

Bir İplik Fabrikasında Siparişlere Hızlı Cevap Verebilecek Bir Çizelgeleme Yaklaşımı

Çiğdem şenbay

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Mayıs 2018

A Scheduling Approach For Fast-Fashion In A Thread Company

Çiğdem Şenbay

**MASTER OF SCIENCE THESIS**

Department of Industrial Engineering

May 2018

Bir İplik Fabrikasında Siparişlere Hızlı Cevap Verebilecek Bir Çizelgeleme Yaklaşımı

Çiğdem şenbay

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Lisansüstü Yönetmelięi Uyarınca  
Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı  
Endüstri Mühendisliği Bilim Dalında  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Doç. Dr. Ezgi Aktar Demirtaş  
İkinci Danışman: Doç. Dr. Tuğba Saraç

Mayıs 2018

## ONAY

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi Çiğdem Şenbay'ın YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı “Bir İplik Fabrikasında Siparişlere Hızlı Cevap Verebilecek Bir Çizelgeleme Yaklaşımı” başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek oybirliği ile kabul edilmiştir.

**Danışman:** Doç. Dr. Ezgi Aktar Demirtaş

**İkinci Danışman:** Doç. Dr. Tuğba Saraç

**Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:**

**Üye :** Doç. Dr. Ezgi Aktar Demirtaş

**Üye :** Doç. Dr. Servet Hasgül

**Üye :** Dr. Öğr. Üyesi Zehra Kamışlı Öztürk

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun ..... tarih ve  
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Hürriyet ERŞAHAN  
Enstitü Müdürü

## ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Doç. Dr. Ezgi Aktar Demirtaş ve Doç. Dr. Tuğba Saraç danışmanlığında hazırlamış olduğum “Bir İplik Fabrikasında Siparişlere Hızlı Cevap Verebilecek Bir Çizelgeleme Yaklaşımı” başlıklı YÜKSEK LİSANS tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel etik ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim. 21/05/2018

Çiğdem ŞENBAY

İmza

## ÖZET

Çizelgeleme, üretim ve servis işletmelerinde kullanılan önemli bir karar verme teknikleri kümesidir. Çizelgeleme, sistemin etkinlik ve verimliliğini doğrudan etkilemektedir. Makine çizelgeleme problemi; amaç fonksiyonuna uygun biçimde, istenen dönem içindeki işleri makinelere atamayı ve sıralamayı amaçlar. İşler makinelere dağıtılırken, bir ya da birden çok amaç eniyilenmeye çalışılabilir.

Paralel makine çizelgelemede,  $n$  sayıda işin  $m$  sayıda makineye atanması söz konusudur. Bu tez çalışmasında ele alınan paralel makine sistemi, özdeş yani aynı işlemleri yapabilen  $m$  makineden oluşmaktadır. Makinelere atanacak işlerin atama sırasına göre hazırlık süreleri mevcuttur. İşlerin özdeş makinelere atanması esnasında iki amacın eniyilenmesi hedeflenmiştir. Amaçlar, teslim süresinden geç tamamlanan işlerin sayısı ile en büyük tamamlanma zamanının en küçüklenmesidir. Kullanılan veriler iplik üretimi yapan bir tekstil firmasından alınmıştır. 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, gecikmeler çok kritik bir hal almakta, bu kayıplar müşteri hattı duruşlarına veya müşteri kayıplarına yol açabilmektedir.

Uygulamada ele alınan çizelgeleme probleminin çözümüne yönelik geliştirilen matematiksel modelin yanısıra, tavlama benzetimi sezgiseli kullanılmış, elde edilen sonuçlar firmada mevcut kullanılmakta olan yöntemle karşılaştırılarak yorumlanmıştır.

**Anahtar kelimeler:** Paralel makine çizelgeleme, sıra bağımlı hazırlık süresi, iki amaçlı çizelgeleme problemleri, tavlama benzetimi, sezgisel yöntemler, hızlı moda sektörü

## SUMMARY

Production scheduling is an important technique of decision-making used in manufacturing and service industries. The production scheduling is an important function determining the efficiency and productivity of a manufacturing system. Machine scheduling problems aim to assign jobs to machines according to time interval and the objective function that can be single or multi criteria.

In parallel machine scheduling problems,  $n$  jobs are assigned to  $m$  machines. Parallel machine environment analyzed in this research are consisted of  $m$  identical machines that can perform same jobs. Between jobs processed, each machine needs a set-up time that is sequence dependent. While assigning the jobs to the machines, two objectives are aimed be optimized. These objectives are minimizing the makespan and the total number of tardy jobs. The data used in this research had taken from a textile company, which is a producer of thread. 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, from desing to stores are reduced to three weeks time, so delays are becoming very critical which can end with stoppage of customers' production lines or loss of customers.

Additional to the mathematical model applied, the scheduling problem is solved by an algorithm based on simulated annealing and results are compared with the current methods already in use in the company.

**Keywords:** Scheduling of parallel machines, sequence dependent set-up times, bi-objective scheduling problems, simulated annealing, heuristics, fast fashion

## TEŞEKKÜR

Tez çalışmamda, bana danışmanlık ederek, beni yönlendiren ve her türlü olanağı sağlayan danışmanlarım, Doç. Dr. Ezgi AKTAR DEMİRTAŞ ve Doç. Dr. Tuğba SARAÇ'a ve çok değerli hocam rahmetli Prof. Dr. Nihat YÜZÜGÜLLÜ'ye teşekkürü bir borç bilirim.

Her zaman bana güvenmiş ve destek olmuş olan aileme; çalışmalarım sırasında gösterdikleri manevi destekleri için çalışma arkadaşlarıma ve burada adını sayamadığım ancak üzerimde emeği bulunan herkese gönülden teşekkür ederim.



## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

|                                                                  |      |
|------------------------------------------------------------------|------|
| <b>ÖZET</b> .....                                                | vi   |
| <b>SUMMARY</b> .....                                             | vii  |
| <b>TEŞEKKÜR</b> .....                                            | viii |
| <b>İÇİNDEKİLER</b> .....                                         | ix   |
| <b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b> .....                                     | x    |
| <b>ÇİZELGELER DİZİNİ</b> .....                                   | xi   |
| <b>1. GİRİŞ VE AMAÇ</b> .....                                    | 1    |
| <b>2. TEORİK BİLGİ</b> .....                                     | 3    |
| 2.1. Üretim Planlama Süreci .....                                | 4    |
| 2.2. Çizelgeleme (Ayrıntılı Planlama) Süreci .....               | 5    |
| 2.3. Çizelgeleme Problemlerinin Sınıflandırılması .....          | 9    |
| 2.3.1. Üretim tipine göre çizelgeleme problemleri .....          | 9    |
| 2.3.2. İşlerin geliş şekline göre çizelgeleme problemleri .....  | 10   |
| 2.3.3. Makine sayılarına göre çizelgeleme problemleri .....      | 10   |
| 2.3.4. Performans ölçütlerine göre çizelgeleme problemleri ..... | 11   |
| 2.4. Çizelgeleme Problemlerinde Çözüm Yaklaşımları .....         | 13   |
| <b>3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI</b> .....                            | 16   |
| <b>4. ELE ALINAN PROBLEM VE MATEMATİKSEL MODEL</b> .....         | 21   |
| 4.1. Problemin Tanımı .....                                      | 21   |
| 4.2. Matematiksel Model ve Boyut Çözümlemesi .....               | 23   |
| <b>5. ÖNERİLEN ÇÖZÜM YAKLAŞIMI</b> .....                         | 28   |
| 5.1. Tavlama Benzetimi .....                                     | 29   |
| 5.2 Çok Amaçlı Eniyileme .....                                   | 31   |
| 5.3. Geliştirilen Algoritma .....                                | 32   |
| <b>6. BULGULAR VE TARTIŞMA</b> .....                             | 34   |
| 6.1. Test Problemlerinin Türetilmesi .....                       | 34   |
| 6.2. Oyuncak Problemler .....                                    | 36   |
| 6.3. Test Problemlerinin Çözümü .....                            | 38   |
| 6.4. Gerçek Hayat Problemi .....                                 | 41   |
| <b>7. SONUÇ VE ÖNERİLER</b> .....                                | 49   |
| <b>KAYNAKLAR DİZİNİ</b> .....                                    | 51   |

## ŞEKİLLER DİZİNİ

| <b><u>Sekil</u></b>                                        | <b><u>Sayfa</u></b> |
|------------------------------------------------------------|---------------------|
| 2.1 Üretim planlama süreci dönemleri.....                  | 4                   |
| 6.1 Kullanıcı ara yüzü ürün grubu listesi.....             | 42                  |
| 6.2 Ürün grubu pareto diagramı.....                        | 43                  |
| 6.3 NB grubu için işlem süreleri dağılımı .....            | 44                  |
| 6.4 NB grubu için işlem süreleri için normallik testi..... | 44                  |
| 6.5 Minitab sonuçları .....                                | 45                  |
| 6.6 Kullanıcı ara yüzü renk grubu listesi .....            | 45                  |
| 6.7 10 iş için problem verileri ve çözüm ekranı .....      | 48                  |

## ÇİZELGELER DİZİNİ

| <b><u>Cizelge</u></b>                                                   | <b><u>Sayfa</u></b> |
|-------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| 3.1 Literatür taraması.....                                             | 20                  |
| 4.1 Matematiksel boyut analizi.....                                     | 27                  |
| 6.1 Oyuncak problem-1 işlem ve termin süreleri .....                    | 36                  |
| 6.2 Oyuncak problem-1 sıra bağımlı hazırlık süresi matrisi.....         | 36                  |
| 6.3 GAMS ve geliştirilen algoritma çözümlerinin karşılaştırılması ..... | 37                  |
| 6.4 Oyuncak problem-2 işlem ve termin süreleri .....                    | 37                  |
| 6.5 Oyuncak problem-2 sıra bağımlı hazırlık süresi matrisi.....         | 37                  |
| 6.6 Küçük boyutlu problemlerin çözüm karşılaştırması .....              | 39                  |
| 6.7 Orta boyutlu problemlerin çözüm karşılaştırması.....                | 40                  |
| 6.8 Büyük boyutlu problemlerin çözüm karşılaştırması.....               | 41                  |
| 6.9 Ürün grubu işlem süreleri .....                                     | 42                  |
| 6.10 Renk grubu sınıflandırması.....                                    | 46                  |
| 6.11 Renkler arası geçişlere göre hazırlık süresi matrisi .....         | 47                  |
| 6.12 Sipariş geliş olasılıkları ve seçilen işler .....                  | 47                  |

## 1. GİRİŞ VE AMAÇ

Bir üretim sisteminin temel amaçlarından birisi, pazarın taleplerinin zamanında karşılanmasıdır. Bu amacı gerçekleştirebilmek için; eldeki stok miktarı, makinelerin kapasitesi, duruş planları ve işçi verimliliği gibi parametrelerin göz önünde bulundurularak üretimin planlanması ve oluşturulan planların ortaya çıkabilecek gelişmelere bağlı olarak belirli dönemlerde güncellenmesi gerekmektedir. Üretim sistemi, çoğunlukla dinamik bir yapıya sahip olduğu için, atölye bazındaki problemler genellikle çok karmaşıktır. Ayrıca, bu problemlere ait kararlar, zaman kısıtı altında ele alınacağından, hızlı bir çözüm de gerektirmektedir.

İmalat işletmelerinin, pazarda rekabet üstünlüğünü sağlayan üç temel unsur; zaman, kalite ve maliyettir. Pazarda yüksek kalitede ve düşük maliyetli üretim yapan firma sayısı arttıkça, talebi önemli ölçüde hız, yani siparişin alınışından teslim edilişine kadar geçen sürenin kısalığı belirlemektedir. Bu nedenle, endüstrinin büyük bir çoğunluğunda, rekabet üstünlüğünü, aldıkları siparişleri zamanında ve mümkün olduğunca kısa sürede teslim eden firmalar sağlamaktadır. Çalışmanın ele alındığı tekstil sektöründe son dönemde gittikçe yaygınlaşan hızlı moda akımı ile ürün tasarımıyla başlayarak mağazalara ürün teslim edilmesi için gereken süre, üç hafta civarında olmakta ve bu da hazır giyim tedarikçileri üzerinde ciddi termin baskısı yaratmaktadır. Türkiye konum olarak, Avrupa pazarının en önemli tekstil tedarikçilerinden olup, Asya pazarına kıyasla termin konusunda daha hassas müşteriler tarafından tercih edilmektedir.

Son dönemlerdeki imalat yönetim sistemleri incelendiğinde, çoğunun servise bağlı performans göstergelerini takip ettiği görülmektedir. Ortalama imalat süresi, geciken müşteri siparişi sayısı, makine kullanım oranları, enbüyük tamamlanma süresi bunlardan bazıları olup çizelgeleme performansı ile doğrudan bağlantılıdır.

Yapılan çalışmada, ele alınan probleme uygun olarak iki performans ölçütü eniyilenmeye çalışılmıştır. Bu amaçlar, enbüyük tamamlanma süresinin ve toplam geciken iş sayısının en küçüklenmesidir. Çalışmayı genel olarak diğerlerinden ayıran en önemli

özellik, iki amaçlı olması ve işler arası geçişlerde, sıralamaya bağlı hazırlık sürelerinin söz konusu olmasıdır.

Çalışmanın ikinci bölümünde, çizelgeleme ile üretim planlama ilişkisi üzerinde durularak, çizelgeleme problemlerinin türleri ve çizelgeleme parametlerine ayrıntılı olarak yer verilmiştir.

Üçüncü bölümde, tez çalışmasıyla ilgili literatür taraması yapılarak, çizelgeleme ile ilgili ele alınan problemler, amaç fonksiyonları ve geliştirilen yöntemler incelenmiştir. Bu bölümde yapılan karşılaştırmalar neticesinde tez çalışmasında ele alınan konunun özgünlüğü üzerinde durulmuştur.

Dördüncü bölümde ise ele alınan problem tanıtılarak, problemin matematiksel modeli ve modelin boyut analizine yer verilmiştir.

Çalışmanın beşinci bölümünde, çözüm önerisi olarak kullanılan Tavlama Benzetimi ile ilgili genel bilgilere yer verilerek geliştirilen çözüm önerisi detaylı olarak açıklanmıştır.

Deneysel sonuçlar bölümü olan altıncı bölümde, test problemlerinin nasıl türetildiği ile ilgili bilgi verilmiştir. Türetilen problemlerin geliştirilen algoritma ile çözümlerinin, GAMS sonuçlarıyla karşılaştırılması yapılmıştır. Türetilen test problemleri dışında, çalışmanın yapıldığı firmadan da gerçek hayat problemleri alınarak, geliştirilen modelle çözülmüş ve yine çözümler GAMS sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Sonuç ve öneriler kısmı olan son bölümde, çalışma ile ilgili elde edilen sonuçlar özetlenerek, çalışmanın ne şekilde ilerletilip geliştirileceği ile ilgili öneriler sunulmuştur.

## 2. TEORİK BİLGİ

Çizelgeleme, çoğu imalat ve hizmet endüstrisinde önemli rol oynayan; satınalma, üretim, taşıma, dağıtım, iletişim gibi pek çok alanlarda kullanılan bir karar verme aracıdır. Çizelgeleme fonksiyonu; üretim planının karşılanabilmesi, siparişlerin söz verilen teslimat tarihlerine yetiştirilmesi için, matematiksel teknikleri ya da sezgisel metotları kullanarak, kısıtlı şirket kaynaklarının en uygun faaliyetlere tahsisini gerçekleştirmektir (Geyik ve Cedimoğlu, 2001).

Genel bir bakış açısı ile bir üretim ortamında hangi üründen, ne zaman, ne kadar üretilmesi gerektiği, üretim planlama ile belirlenirken; belirlenen planın, mevcut sistemin iş yüküne, kaynakların kapasitesine ve stok durumuna göre nasıl yapılacağı, hangi operasyonun hangi kaynağa atanacağı, operasyonların hangi sırada gerçekleştireceği ise çizelgeleme ile belirlenmektedir.

Bu açıklamadan yola çıkarak, çizelgeleme ile iki temel soruya cevap aranmaktadır;

1. İşlerin yapılması için kullanılacak kaynaklar ve kullanım oranları
2. İşlerin ne zaman ve hangi sırada yapılacağı

Bu sorulara cevap aramadaki bazı amaçlar aşağıdaki gibidir:

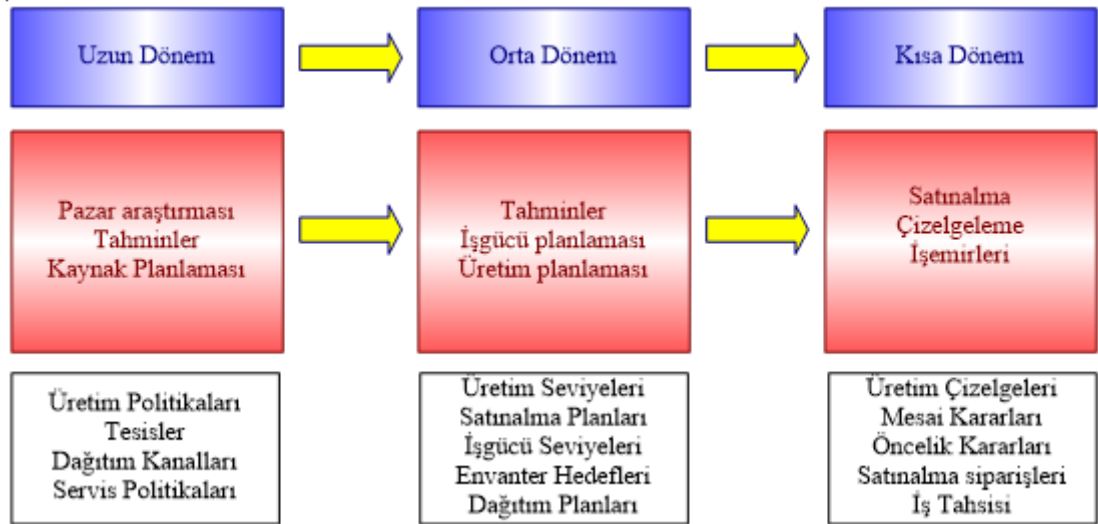
1. Tüm üretim kaynaklarının en verimli ve etkin biçimde kullanılması,
2. Müşteri taleplerine hızlı cevap verilmesi,
3. İşlerin teslim tarihlerinde tamamlanarak, müşteri memnuniyetinin sağlanması,
4. Fazla mesai çalışmalarının en küçüklenmesi,
5. Üretim sürecinde darboğazların tespit edilerek gerekli önlemlerin alınması,
6. Gereksiz elde stok bulundurma maliyetlerinden kaçınılması,
7. İmalat süresi ve ürün maliyetlerinde iyileştirmelerin sağlanması.

Belirtilen bu amaçlar gerçek hayatta birbiriyle çelişebilmektedir. Örnek olarak, teslimat tarihlerini karşılayabilmek için kapasite artırımı yapmak, kaynak kullanım yüzdelerini azaltacaktır. Üretim sistemi göz önüne alınarak belirlenen performans ölçütlerine göre oluşturulan iyi bir çizelgeleme sistemi ile pek çok şirket, stok seviyelerinde düşüşü, verimlilik ve teslimat performanslarında ise artışı başarabilmektedir.

## 2.1. Üretim Planlama Süreci

Üretim planlama faaliyetleri; üretim ve stok seviyelerinin belirlenmesi, işlerin çizelgelenmesi, hammadde ve gerekli donanımın zamanında tedarik edilmesi, üretim alanının artırılması, tesisin etkin bir şekilde yerleşiminin sağlanması gibi farklı zaman boyutlarındaki konular ile ilgilenmektedir. Bu sebeple üretim planlaması, farklı organizasyonel düzeylerde ve değişik zaman aralıklarına göre; uzun, orta ve kısa vadeli olmak üzere üç grupta değerlendirilir (Tersine, 1985).

Uzun dönemli planlarda fazla ayrıntıya inilmezken, planlar uzun dönemden kısa döneme doğru ayrıntılandırılmaktadır. Üretim planlarının hazırlandığı dönemin süresi ne kadar uzun ise, oluşabilecek belirsizliklerden dolayı riskler o kadar fazla, ama detaylar azdır. Bunun tam tersi olarak da, planlama dönemi kısaldıkça tahminleme gücü artacağından riskler azalırken; işlerin detayları artmaktadır. Üretim planlama süreci dönemleri Şekil 2.1’de gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Üretim planlama süreci dönemleri

Bir planlama aşamasından diğerine geçilirken, hazırlanan planların uygunluğu kontrol edilerek olası değişikliklere karşı, gerektiğinde planlar güncellenmektedir.

Firmanın üst yönetimi tarafından oluşturulan, planlama ufku bir yıldan daha uzun süreli planlar stratejik planlardır. İşletmenin uzun dönemdeki hedef ve politikaları, ne üretileceği, pazar payı ve dağıtım kanalı, stratejik planlama süreci içinde belirlenir (Eren, 1979).

Üretim planlarında ise talep tahminleri ve müşteri siparişlerinden hareketle, çizelgeleme seviyeleri, satınalma planları, işgücü seviyeleri, dağıtım planları vb. belirlenmektedir. Planlama dönemi genellikle altı ay veya daha uzun bir süreyi kapsamaktadır. İlgili dönemde kullanılması planlanan kaynaklar ayrıntıya inilmeden genel terimlerle ifade edilmektedir. Bu nedenle üretim planının çıktıları üretilecek ürün (ton, adet vb.), kullanılacak işgücü (adam-saat) veya hammadde (ton, metre vb.) cinsindedir (Yüzügüllü, 1998).

Üretim planlarından sağlanan bilgilerden ve talep tahminlerinden hareketle, her bir devrede ne üretileceği, ne kadar üretileceği ve ne zaman üretileceği gibi sorulara üretim programları ile cevap aranır. Üretim programları genellikle aylık veya üç aylık devreleri kapsamaktadır.

## 2.2. Çizelgeleme (Ayrıntılı planlama) Süreci

Çizelgeleme sürecinin girdilerini, esas olarak bir önceki bölümde bahsedilen üretim programının çıktıları oluşturmaktadır. Bu bilgilerin yanısıra, çizelgeleme için aşağıdaki bilgilere de ihtiyaç duyulmaktadır (Nişancı, 1984):

- İşin yapılması için gerekli malzeme ve parçaların cinsi ve miktarı,
- İşin hangi işyerlerinde, hangi işlemlerden geçeceğini gösteren rotalar,
- İşin yapılması için gerekli makine hazırlık süreleri ve standart işlem süreleri,
- İşlerin teslim zamanları, öncelik ve sıralama kuralları.

Bu girdiler sonucunda çizelgeleme süreci ile aşağıdaki çıktılar elde edilir,

- Makine temelinde işlerin yapılış sıraları ve başlama-bitiş zamanları,
- İşlerin işyerlerine göre dağıtımı,
- Varsa, darboğaz yaratan makinelerin tespiti



Çizelgeleme yapıldıktan sonra gerçekleşen kapasite kullanımı ile planlanan kapasite kullanımı karşılaştırılarak, sapmalar belirlenmeli ve düzeltici önlemler alınmalıdır.

Çizelgeleme problemlerinde; makine ortamı, kısıt(lar) ve amaç bilgilerine ihtiyaç vardır. Bir çizelgeleme problemi  $\alpha / \beta / \gamma$  üçlüsü olarak tanımlanır.  $\alpha$ , makine ortam bilgisini tanımlar.  $\beta$  alanı, işlem özellikleri ve kısıtları hakkında bilgi verir. Bu alana çoklu giriş olabildiği gibi bilgi girişi yapılmayabilir.  $\gamma$  alanı ise eniyilemek istenilen amacı belirtmek üzere genellikle bir giriş gerektirir (Pinedo, 2002). Çizelgeleme problemlerinde kullanılan parametrelerden bazıları aşağıdaki gibidir:

$n$ : İş sayısını,

$m$ : Makine sayısını,

$P_{ij}$ :  $j$  işinin  $i$  makinesindeki işlem süresini,

$r_j$ :  $j$  işinin hazır olma süresidir,  $j$  işi bu süreden önce başlayamaz.

$d_j$ :  $j$  işinin termin süresidir. Bu sürenin aşılması durumunda ceza söz konusudur.

$C_j$ :  $j$  işinin tamamlanma zamanını ifade eder.

$w_j$ :  $j$  işinin diğer işlere göre önceliğini, ya da ağırlığını gösterir.

$\alpha$  alanında belirtilen bazı makine ortam bilgileri aşağıdaki gibidir (Pinedo, 2002):

- Tek makine - (Single Machine) (1),
- Özdeş paralel makineler - (Identical Parallel Machines ) ( $P_m$ ),
- Farklı hızdaki paralel makineler ( $Q_m$ ),
- İlgisiz paralel makineler – (m farklı makine) ( $R_m$ ),
- Akış tipi (Seri makineler) – (Flow Shop) ( $F_m$ ),
- Paralel ve Seri makineler – (Flexible Flow Shop) ( $FF_m$ ),
- Atölye tipi (İşlerin farklı rotalarının olduğu atölye) – (Job Shop) ( $J_m$ ),
- İşlerin farklı rotalarının ve makine alternatiflerinin olduğu atölye – (Flexible Flow Shop) ( $FJc$ ),
- İşlerin izleyeceği rotanın değişebileceği atölye – (Open Shop) ( $O_m$ ), olabilmektedir

İşlemin özelliğini ve kısıtlarının ifade edildiği  $\beta$  ortamına ait parametrelerin bazıları şu şekildedir (Pinedo, 2002):

- Öncelik sırası kısıtı (prec): Hem tek, hem de paralel makinelerde görülebilen bu kısıt, bir işin işleme girebilmesi için kendisinden önce tamamlanması gereken iş veya işleri ifade eder. Kendisinden önce tamamlanması gereken yalnızca bir iş olabileceği gibi, birden çok iş de olabilir ve birden çok iş olması durumunda zincir ifadesi kullanılır.
- İşlemin yarıda kesilebilmesi (prmp): İşin, işlem görmeye başladığı makinede tamamlanma zorunluluğu yoktur. Makine operatörü farklı önceliklere göre işlemi yarıda kesebilir. Yarıda kalan işlem aynı makinede işlem görmeyi bekleyebileceği gibi diğer makinelerden birinde de işlem görmeye devam edebilir. İşin yarıda kesilebilmesi kısıtı konulabileceği gibi işler yarıda kesilemez kısıtı da konulabilir.
- Sıralamaya bağlı hazırlık süresi ( $S_{ij}$ ): Bir işlem bitirilip diğer işlemin yapılmaya başlaması arasında bir hazırlık süresi söz konusu olabilir.  $S_{ij}$  i işi ile j işi arasındaki hazırlık süresini gösterirken, iki işlem arasındaki hazırlık zamanı makineye de bağlı ise notasyon,  $S_{ijk}$  şeklini alır.
- Arızalar (brkdwn): Makine arızası meydana gelip o makinenin sürekli kullanımının mümkün olmaması durumudur.

$\gamma$  alanlarında problemin amaç fonksiyonuna ait bilgiler yer alır. En küçüklenmeye çalışılan amaç, daima tamamlanma zamanının bir fonksiyonudur ve dolayısıyla çizelgeye bağlıdır.

Daha önce belirtildiği gibi,  $j$  işinin tamamlanma zamanı  $C_j$  ile ifade edilir. Ayrıca amaç, teslim tarihinin bir fonksiyonu da olabilir. Bu fonksiyonlardan  $j$  işinin tamamlanma ve termin zamanları arasındaki sapma, gecikme (*Lateness*) aşağıdaki gibi gösterilir:

$$L_j = C_j - d_j \quad (2.1.)$$

$j$  işinin tamamlanma zamanı teslim tarihini aştığında,  $L_j$  pozitif,  $j$  işi teslim tarihinden önce tamamlandığında  $L_j$  negatif değer alır.  $L_j$  pozitif olduğunda, geciken iş sayısını ifade eden  $U_j$ , 0-1 tamsayı değerlerinden, 1 değerini almış olur, aksi halde 0 değerini alır.

Tamamlanma zamanının bir başka fonksiyonu,  $j$  işinin gecikme süresi; (*Tardiness*), aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$T_j = \text{enb}(C_j - d_j, 0) = \text{enb}(L_j, 0) \quad (2.2.)$$

Gecikme ( $L_j$ ) ve gecikme süresi ( $T_j$ ) arasındaki temel fark; gecikme süresi parametresinin alacağı değerin negatif olmamasıdır.

$\gamma$  alanlarında gösterilebilecek diğer amaçlar ise şunlar olabilir (Pinedo, 2002):

- Akış zamanı (Flow time –  $F_j$ ):  $j$  işinin sistemde geçirdiği zamanı gösterir ve aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$F_j = C_j - r_j \quad (2.3.)$$

- En büyük gecikme ( $L_{\text{enb}}$ ): Hedeflenen teslim tarihinden en büyük gecikmenin ölçümünde kullanılır.
- Ağırlıklandırılmış toplam tamamlanma zamanı  $\Sigma(w_j C_j)$ :  $n$  adet işin ağırlıklandırılmış toplam tamamlanma zamanı çizelgeye bağlı olarak toplam stok maliyeti veya elde tutma maliyetinin bir ölçüsünü verir.
- Ağırlıklandırılmış toplam gecikme  $\Sigma(w_j T_j)$ : Toplam ağırlıklandırılmış tamamlanma zamanından daha genel bir maliyet fonksiyonudur.
- Ağırlıklandırılmış geciken iş sayısı  $\Sigma(w_j U_j)$ : Gerçek hayatta sıkça kullanılan bir fonksiyonudur.

Bu tanımlamalar ışığında, çizelgeleme problemlerinin tanımlanmasında kullanılan gösterime ait örnekler vermek gerekirse;  $FFc \mid prec \mid \Sigma w_j T_j$  gösterimi esnek akış tipi üretim ortamında öncelik sırası kısıtlarına sahip, toplam ağırlıklı gecikmeyi en küçüklemek amaçlı bir çizelgeleme problemine karşılık gelmektedir. Benzer şekilde  $P_m \mid prmp \mid L_{\text{enb}}$  gösterimi ise paralel makinelerin olduğu bir sistemde, işlerin bölünebilirliği kısıtı altında en büyük gecikmenin en küçüklenmesini amaçlanmaktadır.

### 2.3. Çizelgeleme Problemlerinin Sınıflandırılması

Çizelgeleme problemlerinin çözümü için çok sayıda teknik ve yaklaşım geliştirilmiştir. Çizelgeleme problemleri, değişik benzetim çalışmaları ve sezgisel çözüm yaklaşımlarının geliştirilmesi, uygulanması ve değerlendirilmesi için odak noktası olmaktadır. Uygun tekniklerin seçimi, problemin karmaşıklığına, modelin yapısına ve amaca göre değişmektedir. Çizelgeleme problemlerinin sınıflandırması; atölye tipine, işin geliş şekline, makine sayılarına ve performans ölçütlerine göre değişik şekillerde yapılmaktadır (Baker, 1974).

#### 2.3.1. Üretim tipine göre çizelgeleme problemleri

Çizelgeleme faaliyetleri, üretim sistemlerinin farklı tiplerine göre değişiklik gösterebilmektedir. Genel olarak, atölye tipi üretim sistemi ve akış tipi üretim sistemi olmak üzere iki tip üretim sistemine göre çizelgeleme faaliyetleri farklılaşmaktadır. Akış tipi üretimde tek bir ürün veya birbirine benzer birkaç ürün imal edilirken, ürünler sistem içinde belli iş merkezlerinden geçmektedirler.

Makinelerin seri olarak birbiri ardına sıralandığı yerleşim düzenlerine akış tipi yerleşim ve akış tipi makine çevresi denilmektedir (Pinedo, 2002). Birçok imalat ve montaj tesisinde her bir iş üzerinde bir dizi operasyonun uygulandığı sıklıkla görülmektedir. Bu operasyonlar tüm işler üzerinde aynı sırada uygulandığı için işlerin aynı rotayı takip etmesi gerekir. Yerine getirilecek işler, başlangıç makinesinden başlayarak tamamlanmaya kadar bir dizi makinede işlem görür ve son makinede işlemlerini tamamlarlar (Baker, 1994).

Akış tipi yerleşimde karşılanması gereken temel şartlar şunlardır (Baker, 1994):

- Sıfır başlangıç zamanında  $n$  adet bağımsız ve çok operasyonlu iş hazırdır (Her bir iş  $m$  adet operasyon ve her bir operasyon farklı bir makine gerektirmektedir).
- Operasyonların hazırlık zamanları işlem sırasından bağımsız olup işlem sürelerine eklenmiştir.
- İş tanımları ayrıntılı olarak bilinmektedir.
- Tüm makineler sürekli olarak kullanıma hazırdır.
- Bir operasyona başlandığında işlem bitene kadar kesinti söz konusu değildir.

Atölye tipi çizelgeleme sistemlerinde ise birbirlerinden farklı çok sayıda ürün üretilmekte ve bu ürünlerin atölye içinde izledikleri rotalar farklı olabilmektedir. Bu nedenle atölye tipi çizelgeleme problemleri çok daha karmaşıktır. Yapılan çalışmaların büyük bir çoğunluğu da bu tip çizelgeleme sistemlerine yöneliktir.

### **2.3.2. İşlerin geliş şekline göre çizelgeleme problemleri**

İşlerin geliş şekline göre çizelgeleme problemleri iki şekilde sınıflandırılmaktadır: Statik ve dinamik çizelgeleme problemleri.

Statik çizelgeleme problemlerinde yapılacak işlerin tümü önceden bilinmektedir ve değişmemektedir. Ayrıca, işler atölyeye aynı anda gelmekte veya geliş zamanları bilinmektedir.

Dinamik çizelgeleme problemlerinde işlerin geliş şekli, süreleri ve geliş zamanları hakkında herhangi bir bilgi yoktur. İşler atölyeye geldikçe işleme alınmakta veya kuyrukta bekletilmektedir. Bu tip problemlerde herhangi bir zamanda gelecek iş, sıralamayı değiştirebileceğinden her iş gelişinde çizelgelemenin güncellenmesi gerekebilmektedir.

### **2.3.3. Makine sayılarına göre çizelgeleme problemleri**

Çizelgeleme problemleri makine sayılarına göre, tek makine veya çok makine olmak üzere iki ana sınıfta toplanmaktadır.

Tek makine çizelgeleme problemlerinde işler tek bir makine üzerinde işlem görerek yapılırlar. Uygulamada gerçek anlamıyla tek makine çizelgeleme problemlerine pek sık rastlanmamaktadır. Ancak, çözümde kolaylık sağlamak için bazı durumlarda problem tek makine çizelgeleme problemi olarak ele alınmaktadır (French, 1982).

Tek makine çizelgeleme problemlerinin çözümü daha kolaydır. Ayrıca bu problemlerin çözüm yaklaşımları çok makine çizelgeleme problemlerinin çözümüne de ışık

tutmaktadır. Bu nedenle yapılan çalışmaların büyük bir kısmı tek makine çizelgeleme problemleri üzerinde yoğunlaşmıştır (Baker, 1974).

Çok makine çizelgeleme problemleri, iki ya da daha fazla makinenin yer aldığı problemlerdir. Çözümü tek makine problemlerine göre daha zordur. Sadece iki makine problemleri için eniyiyi veren yöntemler geliştirilebilmiştir (Baker, 1974). Çok makine çizelgeleme problemlerinin çözüm yaklaşımı olarak, genellikle sezgisel yöntemler kullanılmaktadır.

#### **2.3.4. Performans ölçütlerine göre çizelgeleme problemleri**

Çizelgelemenin ne ölçüde başarılı olduğunu değerlendirmek için kullanılan ölçütler performans ölçütü (çizelgelemenin amacı) olarak tanımlanmaktadır (French, 1982). Bu doğrultuda tek bir performans ölçütü kullanılabileceği gibi birden fazla ve birbirleriyle çelişen ölçütler de kullanmak mümkündür (Nelson vd., 1986).

Yapısına göre problemi çözmek için kullanılan teknikler belli performans ölçütlerini eniyilemektedir. Bu nedenle çözüm tekniği belirlenirken performans ölçütünün de dikkate alınması gerekmektedir. Performans ölçütlerine göre çizelgeleme problemleri üç ana başlık altında incelenebilir. Bunlar tamamlanma süreleri, teslim zamanları ve tesisin verimli kullanılması ile ilgili performans ölçütleridir (Vollmann vd., 2005):

1. Tamamlanma zamanlarıyla ilgili performans ölçütleri:
  - En büyük tamamlanma zamanı
  - Ortalama tamamlanma zamanı
  - Ortalama akış süresi
  - Ortalama bekleme süresi
2. Teslim zamanı ile ilgili performans ölçütleri: İşletme açısından daha büyük bir öneme sahiptirler. Buna karşılık çözümleri çok daha zordur. Bu sınıfta yer alan performans ölçütleri şunlardır:
  - En büyük gecikme süresi
  - Geciken iş sayısı
  - Ortalama gecikme

3. Tesisin verimli kullanılması ile ilgili performans ölçütleri: Bu ölçütler makinelerin ve tesisin verimli kullanımı ile ilgilidirler. Bu sınıfta yer alan performans ölçütleri şunlardır:

- Bekleyen iş sayısı
- Tamamlanmamış iş sayısı
- Makinelerin boş bekleme süresi

Çizelgeleme problemleri ile ilgili yapılan çalışmalar dikkate alındığında, tek performans ölçütlü çalışmaların çoğunlukta olduğu, ancak; çok performans ölçütlü çizelgeleme çalışmalarının da son yıllarda artmakta olduğu görülmektedir. Çok amaçlı problemlerin çözümü, tek amaçlı problemler kadar kolay olmamaktadır. Çünkü birbirleri ile çelişen amaçlar aynı anda eniyilenmeye çalışılırken, performans ölçütleri arasında ödünleşimler meydana gelebilmektedir. Yani bir performans ölçütünün değerini eniyilerken, diğer performans ölçütünün değeri azalabilmektedir (Eren ve Güner, 2002).

Çok performans ölçütlü çizelgeleme problemleri içerisinde iki ölçütün bulunduğu problemler; ikincil ölçütlü ve iki ölçütlü problemler olmak üzere iki kısımda incelenmektedir (Eren ve Güner, 2002; Güner ve Altıparmak, 2003):

- İkincil ölçütlü çizelgeleme problemleri: Bu çizelgeleme problemlerinde, performans ölçütleri birincil ve ikincil ölçüt olarak ayrılmakta ve öncelikle birincil performans ölçütü, ikincil ölçüt yok sayılarak eniyilenmekte, sonrasında ise ikincil performans ölçütü, birincil ölçütün performansını azaltmamak şartıyla eniyilenmektedir. Graham vd. (1979), C1, birincil ölçütü; C2 ise ikincil ölçütü göstermek üzere, ikincil ölçütlü problemlerin,  $n/1/C2:C1$  şeklinde gösterilebileceğini belirtmiştir.
- İki ölçütlü çizelgeleme problemleri: Bu çizelgeleme problemlerinde ise iki farklı ölçüt aynı anda eniyilenmektedir. Graham vd. (1979), iki ölçütlü çizelgeleme problemlerinin  $n/1/C2, C1$  şeklinde gösterilebileceğini belirtmiştir.

## 2.4. Çizelgeleme Problemlerinde Çözüm Yaklaşımları

Çizelgeleme problemleri için çok sayıda çözüm yaklaşımı geliştirilmiştir. Bu çözüm yaklaşımlarını sezgisel ve analitik yöntemler olarak iki gruba ayırabiliriz.

- **Sezgisel Yöntemler:** Bu yöntemler, belirli bir yordamın izlenmesi ve belirli varsayımların yapılması yoluyla, problemin çözümüne yönelik yaklaşık sonuçlar verir.
- **Analitik Yöntemler:** Matematiksel Programlama Yöntemleri olarak da adlandırılan bu yöntemler, eniyi çözümü verirler. Bu yöntemlerde kısıt ve amaç denklemleri bulunur, özellikle işlem sayılarının arttığı durumlarda, çözüm bulmak zorlaşmaktadır.

Çizelgeleme problemlerinde, problemin boyutu ve karmaşıklığına bağlı olarak genellikle eniyi çözümün bulunması zordur ve bu sebeple sezgisel yöntemler ile çözüme gitmeye çalışılır. Sezgisel algoritmalar ile nispeten büyük hacimli problemlerde eniyiye yakın çözümler uygun sürede üretilebilmektedir. Sezgisel algoritmalar basit sıralama kurallarının yanısıra, Genetik Algoritma, Karınca Koloni Algoritması, Tabu Arama Yöntemi, Tavlama Benzetimi gibi çeşitli yöntemlerden oluşmaktadır.

Analitik yöntemler ise; dinamik programlama, doğrusal programlama, dal-sınır algoritması gibi pek çok yöntem içermektedir. Analitik yöntemler kesin çözümler üretir. Ancak bu yöntemler, büyük hacimli çizelgeleme problemlerinde ve özellikle kabul edilebilir sürelerde, etkin çözümler yaratmada zayıf kalmaktadırlar.

İşlem öncelik kuralları, bir iş merkezinde işlenecek olan işlerin özelliklerine göre belli bir işin tamamlanmasının arkasından, üretimin ilgili iş merkezindeki hangi iş ile devam edeceğini belirleyen kurallardır. Çizelgeleme problemlerinde en çok kullanılan işlem öncelik kuralları aşağıdaki gibidir (Saad vd., 1997; Pinedo ve Chao, 1999; Acar, 2000; Baskak ve Erol, 2004):

- **İlk gelen işi önce yap (First Come First Serve - FCFS):** Bu kural literatürde ilk giren ilk çıkar (First In First Out - FIFO) olarak da bilinmektedir (Saad vd., 1997). Bu kuralın temel mantığına göre, iş merkezine gelen işler, geliş sıralarına göre işleme alınırlar.



- Son gelen işi önce yap (Last Come First Serve - LCFS): Bu kural, iş merkezine gelen işlerin üretime alınmaları için geliş sıralarının tersine doğru bir sıralama yapmayı önermektedir. İş merkezine en son sırada gelen iş, ilk sırada, sondan bir önce gelen iş ikinci sırada üretim ortamına alınmakta ve sıralama bu şekilde devam etmektedir.
- En kısa işlem süreli işi önce yap (Shortest Processing Time - SPT): Bu kural, iş merkezine gelen işlerin, işlem sürelerinin kısalığı ile doğru orantılı bir ilişki kurarak sıralama yapmayı önermektedir. İş merkezine gelen işler arasından en kısa işlem süresine sahip olan işlerin önceliklendirildiği bu kural ile üretim sisteminin çıktısı ençoklanmakta ve geciken işlerin oranı azalmaktadır (Saad vd., 1997).
- En uzun işlem süreli işi önce yap (Longest Processing Time - LPT): Bu kurala göre, iş merkezine gelen işler, işlem sürelerinin uzunlukları ile doğru orantılı olarak sıralanacaklardır. İş merkezine gelen işler arasından en fazla işlem süresine sahip olan iş, ilk olarak işlem görecektir.
- Ağırlıklı en kısa işlem süreli işi önce yap (Weighted Shortest Processing Time - WSPT): Çizelgeleme problemlerinde her bir iş aynı önem derecesine sahip olmayabilir. Bu öncelik kuralında, işlerin önceliklerinin bulunmasında, işlem süreleri, ilgili işlerin önem dereceleri ile birlikte dikkate alınmaktadır.
- Sonraki işlemlerin sayısı en fazla olan işi önce yap (Largest Number of Successors - LNS): Bu kural, üretim ortamında bulunan işlerin, bir sonraki işlem sayılarının fazlalığı ile doğru orantılı olarak sıralanmalarını önermektedir. Kurala göre, bir sonraki işlem sayısı en fazla olan iş ilk olarak yapılmaktadır.
- Teslim tarihi en önce olan işi önce yap (Earliest Due Date First - EDD): Devredeki işlerin gecikmelerini en küçükleme amacıyla olan bu kurala göre, sisteme gelen işler arasından en erken teslim tarihine sahip olan iş ilk olarak yapılmaktadır (Pinedo ve Chao, 1999). Teslim tarihi en önce olan işi önce yap öncelik kuralının kullanımı ile işlerin söz verilen tarihlerde teslim edilme performansları artmaktadır (Saad vd., 1997).
- Rastgele sıralama (Service In Random Order - SIRO): Bu kurala göre, iş merkezine gelen ve işlem görmeyi bekleyen işler arasından bir tanesi rastgele bir şekilde seçilmektedir. Herhangi bir amaç eniyilenmeye çalışılmamaktadır (Pinedo ve Chao, 1999).

- En kısa hazırlık zamanı olan işi önce yap (Shortest Setup Time First - SST): Bu kural, üretime girmeyi bekleyen işlerin, hazırlık zamanlarının kısalığı ile doğru orantılı bir şekilde sıralanmalarını önermektedir. En kısa hazırlık zamanına sahip olan işlere öncelik verilmesiyle ortalama gecikme zamanı azaltılabilecektir.
- En az esnek olan işi önce yap (Least Flexible Job First - LFJ): Bu kural, paralel olarak özdeş olmayan birçok makinenin bulunduğu üretim ortamlarında kullanılmaktadır. Kurala göre, üretime girmeyi bekleyen işler arasında, işlem görebileceği iş merkezi sayısı en az olan, yani en az işlem alternatifi olan işlere öncelik verilmektedir (Pinedo ve Chao, 1999).
- Kritik yol üzerindeki işleri önce yap (Critical Path - CP): Bu kurala göre işler öncelik kısıtlarına göre sıralanmakta ve kritik yol üzerindeki işler öncelikli olarak işlenmektedir (Pinedo ve Chao, 1999). Kritik yol, herhangi bir gecikmenin tüm projeyi geciktireceği işlerden oluşan yoldur. Bundan dolayı, kritik yol üzerinde bulunan işlere öncelik verilmesi ile proje boyutunda gecikmeler en küçüklenmeye çalışılmaktadır.

Bu kuralların dışında geliştirilmiş algoritmalar da mevcuttur, örneğin Johnson Algoritması, Jackson Algoritması gibi.

### 3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Gerçek hayatta karşılaşılan çizelgeleme problemleri oldukça karmaşık ve çözümünü zor olan problemlerdir.  $n$ : iş sayısı,  $m$ : makine sayısı iken,  $(n!)^m$  adet farklı sıralama yapmak söz konusudur. İş sayısında veya makine sayısındaki bir artış sıralama sayısını üstel olarak arttırmaktadır. Bu nedenle, çizelgeleme problemleri NP-zor sınıfında yer almakta ve bu nedenle çözümleri için çoğunlukla sezgisel yöntemler ön plana çıkmaktadır.

Sezgisel yöntemlerin önemini anlamak için, dört işin işlem göreceği tek bir makineyi düşünelim. Makinenin işler için ihtiyaç duyduğu hazırlık süresinin, işlem sürelerinin içinde olduğunu ve bu hazırlık sürelerinin işlerin sırasına göre değişmediğini; ayrıca bir işin makinede işlem görmeye başlayınca makinedeki operasyonu bitene kadar ara verilmeyeceğini kabul edelim. Bu dört iş için hazırlanacak çizelgede öncelikle hangi işin ilk, hangisinin ikinci, üçüncü ve dördüncü olarak işlem göreceğine karar vermeliyiz. İlk olarak işlem görmek için 4 alternatif iş mevcuttur. İşlerden biri seçildikten sonra ikinci iş için 3 alternatif, üçüncü iş için 2 alternatif ve son olarak dördüncü iş için bir alternatifin olacağı bilinmektedir. Diğer bir deyişle  $4 \times 3 \times 2 \times 1 = 4! = 24$  farklı alternatif söz konusudur. Şimdi işlerin sayısı artarsa ne olacağını düşünelim. Eğer 6 iş olursa  $n! = 720$  alternatif sıralama olacaktı ve eğer 20 iş olsaydı  $2433 \times 10^{15}$  farklı sıralama söz konusu olacaktır. İşte üstel olarak artan bu alternatifler çözüm süresinin artmasına sebep olmaktadır. (Silver vd., 1998).

Gerçek hayatta atölyede iki veya daha çok makine olduğunda problem daha da karmaşıklaşmaktadır. Sadece iki makine problemleri için en büyük akışı enküçükleyen Johnson algoritması eniyi çözümü sağlamaktadır. İki'den daha çok makinenin yer aldığı problemlerin çözümü için geliştirilen sezgisel teknikler, genellikle Johnson algoritmasının bir uyarlamasıdır (Park vd., 1984). Revize Johnson algoritması ve Jackson algoritması bu uyarlamalara örnek olarak gösterilebilir.

Yıllar içerisinde yapılan çalışmalar ile çözümünü zor olan eniyileme problemlerinin, çözümünde çeşitli sezgisel arama metotları geliştirilmiştir. Genetik Algoritmalar (GA), Tavlama Benzetimi (TB/BT), ve Tabu Aramaları (TA) bu metotlar içerisinde başarı ile uygulanan ve en popüler olan üç tanesidir. Genetik algoritmalar biyolojiden, tavlama benzetimi fizikten, tabu aramaları ise zekâ tekniklerinden esinlenerek geliştirilmiş arama teknikleridir (Gen, 1996).

Yukarıda sözü edilenlerin yanısıra, benzetim yöntemi gerçek hayatta karşılaşılan birçok durumun modellenmesine izin vermektedir. Çizelgeleme problemlerinde değişik sıralama kuralları ve performans ölçütleri, benzetim modelleri ile ele alınarak, değişik durumlar için sistemin performansı incelenebilmektedir.

Paralel makine problemleri, aynı işi yapabilen  $m$  adet makinenin paralel olarak yerleştiği sistemlerle ilgilenir. Her iş yalnız bir operasyona sahiptir ve bu  $m$  makinenin herhangi birinde işlenebilir. Paralel makineler aynı tip aynı hızda olabileceği gibi, farklı tip ve farklı hızda da olabilir.

Paralel makineli bir üretim sisteminde özdeş, benzer ve birbirinden bağımsız makinelerden söz edilebilir. Üretim sisteminde yer alan makineler aynı işi yapan, aynı hıza sahip makinelerden oluştuğunda özdeş makine çizelgeleme probleminden bahsedilir. İşlemlerden her biri, sistemde yer alan herhangi bir makinede işlem görebilir ve işlem süresi değişmez. Yani bir işlem  $m$  adet özdeş makineden hangisinde işlem görürse görsün aynı işlem süresine sahip olur. Birbirinden farklı hızlara sahip makineler benzer makineler olarak adlandırılırken, makine hızlarının işlere bağlı olarak değiştiği makineler ise birbirinden bağımsız paralel makineler adını almaktadır.

Paralel makine çizelgeleme problemleri, son yıllarda araştırmacılar tarafından yoğun olarak çalışılmıştır. Genel görüşe göre paralel makine problemleri tek makine problemlerine göre oldukça zordur. Çünkü hem her bir makinedeki işlerin kendi aralarında sıralanması gerekir, hem de işlerin birden fazla makineye paylaştırılması söz konusudur. Paralel makine çizelgeleme problemlerinde genel olarak verilmesi gereken iki karar vardır. Birincisi; işlerin makinelere atanması, ikincisi ise her bir makinede yapılacak işlerin sıralamasının belirlenmesidir.

Çok ölçütlü çizelgeleme, son yıllarda araştırmacıların en çok ilgisini çeken konulardan birisi olmasına karşın, bu tür çalışmalar genellikle tek makineli ve akış tipi sistemler üzerine yapılmış olup, paralel makineli sistemlerde daha az çalışma yapılmıştır (Eren ve Güner, 2002).

Shim ve Kim (2007), dal sınır algoritmasını kullanarak özdeş paralel makineleri çizelgelemiştir. Toplam gecikmeyi enküçüklemeyi amaçladıkları çalışmada rassal türetilen test problemlerini kullanmışlardır. Yapılan hesaplamalar sonucunda, önerilen algoritmanın 30 iş ve 5 makineye kadar olan problemlerde eniyiye yakın sonuçlar yaratacağı açıklanmıştır.

Paralel makineli bir üretim ortamında sıra bağımlı ve bağımsız işlerden oluşan farklı örnekler için toplam tamamlanma zamanını enküçüklemeye çalışan Silva ve arkadaşları (2002) önerdikleri karınca algoritmasının ele aldıkları örneklerde oldukça başarılı sonuçlar yarattığını vurgulamışlardır.

Hazırlık zamanı ve teslim süresine bağlı olarak birbirinden bağımsız paralel makinelerin yer aldığı bir üretim sistemine ait problemi tavlama benzetimi ile çizelgeleyen Chen (2009), toplam gecikmeyi enküçüklemiş ve olumlu sonuçlar elde etmiştir.

Heady ve Zhu, 1998 yılında özdeş paralel makine çizelgelemeyi sıra bağımlı hazırlık zamanı kısıtı ile birlikte ele almış, tamsayılı programlama ile erken ve geç tamamlanma zamanı toplamını enküçükleme amacı ile küçük problemlerde algoritmanın performansını ölçmüşlerdir.

İşin yarıda kesilmesine izin verilmeyen, özdeş paralel makinelerden oluşan bir üretim ortamının konu edildiği problemde toplam gecikmeyi enküçükleme amacı ile dal sınır algoritmasını kullanan Yalaoui ve Chu (2002) rassal türettikleri test problemleri ile algoritmayı test etmişlerdir.

Tabu arama, tavlama benzetimi ve komşuluk arama yöntemlerinin pek çok özelliklerini bir araya getirerek yeni bir melez metasezgisel yöntem geliştiren Anghinolfi ve Paolucci (2007) paralel makinelerde toplam gecikmeyi enküçüklemeyi amaçlamışlardır.

Literatür incelediğinde, çalışmaların pek çoğunda hazırlık zamanının ihmal edildiği ya da hazırlık zamanlarının işlem sürelerine eklendiği görülmektedir. Ancak bazı problemlerde hazırlık süreleri ihmal edilemeyecek kadar önemlidir ve işlem sürelerinden ayrı olarak değerlendirilmeleri gerekir. Hazırlık süreleri sıralamadan bağımsız olabileceği gibi işlerin sırasına bağlı da olabilir.

Hazırlık zamanı gerektiren tek makine problemlerine çeşitli sezgisel yöntemler, dalsınır algoritması, dinamik programlama, tamsayılı programlama gibi pek çok yöntem ile çözüm getirilmiştir. Gascon ve Leachman (1998), çalışmalarında tek makine çizelgelemeyi dinamik programlama ile çözmüşlerdir. Williams ve Wirth (1996) ise sıra bağımsız hazırlık zamanlı tek makine problemi için yeni bir sezgisel yöntem geliştirmişlerdir. Nazif ve Lee, 2009 yılında yaptıkları çalışmada tek makineli çizelgeleme problemini sıra bağımsız hazırlık zamanları ile birlikte ele almış, toplam ağırlıklı tamamlanma zamanını enküçükleme amacı ile genetik algoritma kullanmışlardır.

Paralel makineli sistemleri ele alan çizelgeleme problemlerinde de hazırlık zamanına bağlı olarak yapılan çalışmalar mevcuttur. Silva ve diğerlerinin, 2002 yılında yaptıkları çalışmada, hazırlık zamanı gerektiren paralel makineli bir problem toplam tamamlanma zamanını enküçükleme amacı ile ele alınmış ve karınca kolonileri eniyileme algoritması ile probleme çözüm getirilmiştir. Sankar ve arkadaşları (2005) ise aynı çalışma verilerini kullanarak, yerel arama içeren karınca koloni algoritması ile Silva ve diğerlerinin elde ettiği sonuçlardan daha iyi sonuçlar elde etmişlerdir. Hazırlık zamanı gerektiren özdeş paralel makine problemini ele alan Lee ve Pinedo, 1997 yılında yaptıkları çalışmada toplam ağırlıklı gecikmeyi enküçüklemek için üç aşamalı sezgisel bir yöntem kullanmışlardır.

Çalışmanın konusu olan sıra bağımlı hazırlık süreli paralel makine problemleriyle ilgili incelenen çalışmaların amaç fonksiyonları ve kullanılan çözüm yöntemleri Çizelge 3.1'de verilmiştir. Söz konusu problemler için literatürdeki çalışmaların büyük çoğunluğunda sezgisel yöntemlerden yararlanıldığı görülmektedir.

Çizelge 3.1. Literatür taraması

| Makale Adı                                                                                                                                                          | Yazar ve Yılı               | Problemin gösterimi               | Çözüm yaklaşımı                               |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------------------|
| Simulated annealing heuristic for the average flow time and the number of tardy jobs bi-criteria identical parallel machine problem                                 | Torres vd., 1997            | P//Fort, $\sum U_j$               | Tavlama benzetimi                             |
| Parallel-machine batch scheduling to minimize the maximum lateness and the number of tardy jobs                                                                     | Lin ve Jeng, 2003           | P/batch/Lenb ;P/batch/ $\sum U_j$ | Dinamik programlama ve sezgiseller            |
| Minimizing the number of tardy jobs for m parallel machines                                                                                                         | Ho ve Chang, 1993           | P// $\sum U_j$                    | Moore algoritması ve sezgiseller              |
| Exact algorithms for scheduling multiple families of jobs on parallel machines                                                                                      | Chen ve Powell, 2003        | P/Sij/ $\sum w_j U_j$             | Dal sınır algoritması                         |
| Minimization of maximum lateness on parallel machines with sequence-dependent setup times and job release dates                                                     | Lin vd., 2010               | P/Sij, rj/Lenb                    | Geliştirilmiş Greedy sezgiseli                |
| Design of a genetic algorithm for bi-objective unrelated parallel machines scheduling with sequence-dependent setup times and precedence constraints                | Moghaddam vd., 2009         | P/Sij, Prec/Cenb                  | Genetik algoritma                             |
| An adaptive scheduling algorithm for a parallel machine problem with rework processes                                                                               | Kang ve Shin, 2010          | Pr/Sij/ Lenb, Cenb, $\sum U_j$    | Çözüm uzayı tabanlı yerel arama algoritması   |
| Generating efficient schedules for identical parallel machines involving                                                                                            | Gupta ve Torres, 2004       | P// $\sum U_j, \sum C_j$          | Tavlama benzetimi                             |
| Minimizing the weighted number of tardy jobs on parallel processors                                                                                                 | M'Hallah ve Bulfin, 2003    | P// $\sum w_j U_j, \sum U_j$      | Dal sınır algoritması                         |
| A Benders decomposition approach to the weighted number of tardy jobs scheduling problem on unrelated parallel machines with production cost                        | M'Hallah ve Al-Khamis, 2015 | $R_m/d_j/\sum w_j U_j$            | Dal sınır algoritması (Bender ayrışması ile)  |
| Resource-constrained unrelated parallel machine scheduling problem with sequence dependent setup times, precedence constraints and machine eligibility restrictions | Afzalirad ve Rezaeian, 2016 | $R_m/r_j, S_{ij}, Prec, res/Cenb$ | Genetik algoritma ve yapay bağışıklık sistemi |
| Hybrid metaheuristics for unrelated parallel machine scheduling with the sequence-dependent setup time                                                              | Chen ve Chen, 2008          | $R_m/S_{ij}/\sum w_j U_j$         | Tabu arama                                    |
| Production Scheduling with History-Dependent Setup Times                                                                                                            | Lee vd., 2011               | P/Spds/Cenb, Lenb, $\sum U_j$     | Pseudopolynomial algoritması                  |

Literatür taramasında incelenen makalelere göre, ele alınan problem; sıra bağımlı hazırlık süreli paralel makine problemi olması, birden fazla amaç fonksiyonun iyileştirilmeye çalışılması ve Tavlama Benzetimi ile geliştirilen çözüm önerisi ile özgün bir çalışma niteliğindedir.

## 4. ELE ALINAN PROBLEM VE MATEMATİKSEL MODEL

Bu bölümde ele alınan problemin incelendiği firmanın faaliyet alanı ve ürün grupları kısaca tanıtılarak; geliştirilen matematiksel model ve sezgisel algoritma hakkında detaylı bilgi verilecektir.

### 4.1. Problemin Tanımı

Uygulamanın yapıldığı tekstil firması 1755 yılında İskoçya’da kurulmuş olup 1890-1960 yılları arasında küreselleşmeye odaklanarak 59 ülkeye yayılmış, toplam 19.000 çalışmanı olan dünyanın en eski ve en büyük iplik üreticisidir.

1952 yılında İstanbul’da kurulan fabrika, 1979 yılında Bursa’ya taşınarak üretimini tamamen Bursa’da yapmaya başlamıştır. Firma yapısı itibariyle küresel ve kurumsal bir firma olup, Avrupa Tedarik Zincirinin bir parçasıdır.

Uygulama yerinin tercih edilmesinde etkenler; söz konusu işletmede hızlı servisin müşterileri kazanmak ve/veya elde tutmak için çok önemli olması, çizelgelemede geliştirilecek her türlü iyileşmenin buna hizmet etmesi ve uygulamanın kolaylıkla denenebileceği özdeş paralel makine ortamı ile yeterli miktarda ürün çeşitliliğinin olmasıdır.

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

- **Apparel İplik Ürünleri**

Apparel ürün grubunda, üretimi olan toplam 137 farklı ürün olup bunların hammaddelerinden en yaygın olanları: PPC(Poly/Poly Corespun), PCC(Poly/Cotton Corespun), SSP(Kesikli Elyaf Polyester), TXP (Texturize Polyester), MFP(Microfiber Polyester), LFP(Hava Texturize Polyester), TRP (Trilobal Polyester), CFN(Filament Nylon), BRP(Braids)’ dir.



- **Performans Malzemeleri**

Bu ürün grubunda dahili üretimi olan toplam 692 farklı ürün olup bunların hammaddelerinden en yaygın olanları ise: PCC(Poly/Cotton Corespun), FNS(Filament Nylon Soft), FNB(Filament Nylon Bonded), CFP(Filament Polyester), 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'yi birçok bileşeni ile aktif olarak kullanmaktadır. SAP R/3'nin yanısıra tedarik zinciri, talep planlama ve çizelgelemeye daha detaylı destek veren SAP-APO (Advanced Planner and Optimizer) firmada 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. APO'ya sipariş ve/veya malzeme ile ilgili; raf ömrü, termin, öncelik, depo kısıtları, sıra bağımlı hazırlık süreleri; makine ile ilgili arıza süreleri, bakım planları, fabrika takvimi, hazırlık süresi, hazırlık maliyeti, geciken iş sayısı ile ilgili belirlemeler yapmak mümkündür (Pinedo, 2002).

SAP-APO sistemleri birbirleri ile bağlantılı olan iki ayrı sistem olup, aralarındaki veri güncellemesi anlıktır. SAP sistemi, siparişlerin imalata onaylanmasında kullanılırken, APO sistemi öncesindeki detaylı çizelgeleme ve renkler arası geçişlerdeki makine temizleme gibi işlemlerin yapıldığı bir eniyileme aracıdır. APO sistemi, tedarik zinciri içerisindeki ülkeler arası stok paylaşımlarının da anlık olarak yapılmasına olanak sağlamaktadır.

Firmada özellikle Tedarik Zinciri yapısını yakından anlamak yararlı olacaktır. Firma mevcut tedarik zinciri içerisinde Avrupa'ya bağlı olup, çoğu zaman söz konusu sistemleri bir son kullanıcı olarak kullanmaktan öteye gidememekte, yerel ihtiyaçlarına göre değişikliklerde zorluklar yaşamaktadır. Öyle ki en son çıkan ERP sistemleri bile kullanılıyor

olsa da, sistemler amaca ve beklentilere uyarlanmadığından, sonuçlar etkili olmaktan uzaklaşmaktadır.

İşletmede gerek Apparel, gerekse Performans malzemeleri ürünlerinin boya çekişleri yukarıda daha önce belirtilen hammadde gruplarına göre değişiklik gösterdiğinden, buna bağlı olarak işlem süreleri de bu gruplara göre değişmektedir (pamuk, naylon, polyester gb.).

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

Alınan müşteri siparişlerine karşılık yapılan üretim siparişi onayı, tüm siparişler için günlük kapasite kapsamında, aynı anda yapılmaktadır. İşletmede mevcut durumda, çizelgeleme işlemi; tüm müşteri siparişlerinin, termine göre sıralanarak verilmesi şeklinde yapılmaktadır. Ancak renkler arası geçişlerde yaşanan hazırlık süreleri dikkate alınmamaktadır. Sadece termine göre yapılan çizelgeleme, renk geçişlerinde makine temizliğini artırdığı için hem zaman hem de su kaybına, dolayısıyla maliyet artışına yol açmaktadır.

Bu çalışmada amaç fonksiyonu; hem gecikmiş iş sayısını, hem de enbüyük tamamlanma zamanını enküçükmeyi hedefleyen, bu iki ölçütün normalleştirilmiş bir fonksiyonu olarak belirlenmiş olup, işletmenin mevcut çözümlerine göre iyileştirme sağlamak amaçlanmıştır.

## 4.2. Matematiksel Model ve Boyut Çözümlemesi

Problemin modele dönüştürülmesi aşamasında yapılan varsayımlar aşağıdaki gibidir:

1. Atölyeye gelen  $n$  iş, sıfırıncı zamanda işlem için hazırdır. Tüm siparişler aynı anda toplu olarak onaylanırlar.
2. Her bir çizelgeleme periyodu süresince, siparişler geliş şekline göre statiktir ve siparişler önceden bilinmektedir.

3. Paralel makineli sistemde gelen işler ( $j=1,2,\dots,n$ ), mevcut paralel makinelerin ( $i=1,2,\dots,m$ ) herhangi birinde işlem görebilir. Makineler kapasite ve kullanım açısından özdeştir.

Bu varsayımı yapmak için, farklı hacimde boyama yapan makineler göz ardı edilerek, sadece 1-4 kg arası boyama yapan makinelere odaklanılmıştır. İşletmede bu aralıkta boyama yapan özdeş 20 makine bulunmakta ve günlük olarak ortalama 250 sipariş onaylanmaktadır.

4. Model  $m$  adet makinaya göre hazırlanmış ancak yukarıda bahsedildiği gibi işletmede bu sayı 20'dir.
5. Makine hazırlık süreleri renk grubuna bağlı olarak önceden bilinmektedir ancak sıra bağımlı olduğundan işlem süresine dâhil edilmemiştir.
6. İlk başlangıç hazırlık süreleri dikkate alınmamıştır.
7. İş kesintisine izin verilmez.
8. Makineler çizelgeleme periyodu süresince çalışmaktadır ve bir makinede aynı anda sadece bir iş yapılabilmektedir.
9. Terminler, çoğunlukla müşteri tarafından belirlenmekte, müşterinin terminde esnek olduğu durumlarda ise müşteri temsilcisi sistemde kayıtlı işlem sürelerine göre termin belirlemektedir.
10. Problemden sadece müşteri siparişleri için yapılan üretim siparişleri dikkate alınmakta, stoğa yapılan üretim siparişleri 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  $\mathbf{P}_m // \mathbf{S}_{ijk} // \sum U_j, \mathbf{C}_{enb}$  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)

$i \in L$  (makina indisi)

Parametreler:

$n$ : iş sayısı

$m$ : makina sayısı

$M$ : çok büyük pozitif sayı

$p_j$ :  $j$ . işinin işlem süresi

$d_j$ :  $j$ . işinin teslim zamanı

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

$CUST$ :  $C_{enb}$  karar değişkeni için bir üst sınır

$$CUST = \sum_{j=1}^n P_j + \sum_{j=1}^n \left( \frac{\sum_{i=1, i \neq j}^n S_{ij}}{n} \right) \quad (4.1.)$$

Karar Değişkenleri:

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

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

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

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

$c_{enb}$ : son işin tamamlanma zamanı

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

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

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

Amaç Fonksiyonları:

$$enk f_1 = \sum_i \sum_k u_{ik} \quad (1)$$

$$enk f_2 = C_{enb} \quad (2)$$

Bu iki amaç fonksiyonu aşağıdaki şekilde normalleştirilmiştir:

$$enk z = (enk f_1/n) + (enk f_2/CUST) \quad (3)$$

Kısıtlar:

$$b_{ik} = \sum_j d_j x_{ijk} \quad \forall i, k \quad (4)$$

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

$$h_{ik} = \sum_j \sum_{t \neq j} s_{tj} y_{itjk} \quad \forall i, k \quad k > 1 \quad (6)$$

$$c_{ik} = q_{ik} \quad \forall i, k \quad k = 1 \quad (7)$$

$$c_{ik} = c_{ik-1} + q_{ik} + h_{ik} \quad \forall i, k \quad k > 1 \quad (8)$$

$$\sum_j x_{ijk} \leq 1 \quad \forall i, k \quad (9)$$

$$\sum_i \sum_k x_{ijk} = 1 \quad \forall j \quad (10)$$

$$\sum_j x_{ijk} - \sum_t x_{itk-1} \leq 0 \quad \forall i, k \quad k > 1 \quad (11)$$

$$1 + y_{itjk} \geq x_{ijk} + x_{itk-1} \quad \forall i, t, j, k \quad j \neq t, k > 1 \quad (12)$$

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

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

$$c_{enb} \geq c_{ik} \quad \forall i, k \quad (15)$$

$$b_{ik} - c_{ik} \leq M(1 - u_{ik}) + M(1 - \sum_j x_{ijk}) \quad \forall i, k \quad (16)$$

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

$$q_{ik} \geq 0 \quad \forall i, k \quad (18)$$

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

$$h_{ik} \geq 0 \quad \forall i, k \quad k > 1 \quad (20)$$

$$c_{ik} \geq 0 \quad \forall i, k \quad (21)$$

$$c_{enb} \geq 0 \quad (22)$$

$$x_{ijk} \in \{0,1\} \quad \forall i, j, k \quad (23)$$

$$y_{itjk} \in \{0,1\} \quad \forall i, t, j, k \quad (24)$$

$$u_{ik} \in \{0,1\} \quad \forall i, k \quad (25)$$

Modelin amaç fonksiyonları (1) toplam geciken iş sayısı ve (2) son işin tamamlanma zamanının ( $c_{enb}$ ) enküçülenmesidir. (3) nolu denklemde, söz konusu iki amaç fonksiyonu normalleştirilmiştir. Kısıt (4)  $i$ . makinanın  $k$ . sırasındaki işin teslim zamanını ( $b_{ik}$ ), kısıt (5),  $i$ . makinanın  $k$ . sırasındaki işin üretim süresini ( $q_{ik}$ ), kısıt (6) ise  $i$ . makinanın  $k$ . sırasındaki ( $k > 1$ ) işin hazırlık süresini ( $h_{ik}$ ) belirlemektedir. Kısıt (7), ilk sıraya atanan, kısıt (8) ise ikinci ve daha sonraki sıralara atanan işlerin tamamlanma zamanlarının hesaplanmasını sağlamaktadır. Kısıt (9) ve kısıt (10) sırasıyla, her makinedeki her sıraya yalnızca bir işin atanmasını ve bir işin yalnızca bir makinanın bir sırasına atanmasını garanti etmektedir. Kısıt (11), işlerin sıra atlamadan sıralanmasını sağlamaktadır. Kısıt (12), (13) ve (14)  $x_{ijk}$  ve  $y_{itjk}$  karar değişkenleri arasındaki ilişki kısıtlarıdır. Kısıt (15),  $c_{enb}$  değerinin tamamlanma

zamanlarının en büyüğüne eşit ya da büyük olmasını sağlamaktadır. Kısıt (16) ve (17) hangi işlerin geciktiğini belirlemektedir. (18)-(25) numaralı kısıtlar ise işaret kısıtlarıdır.

Geliştirilen matematiksel modelin,  $n$  iş ve  $m$  makineli bir örnek için boyut analizi Çizelge 4.1.'de verilmiştir.

**Çizelge 4.1.** Matematiksel boyut analizi

| Kısıt No                      | İndisler                      | Toplam kısıt sayısı             |
|-------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|
| 4                             | $i, k$                        | $m^n$                           |
| 5                             | $i, k$                        | $m^n$                           |
| 6                             | $i, k > 1$                    | $m^{(n-1)}$                     |
| 7                             | $i, k = 1$                    | $m$                             |
| 8                             | $i, k > 1$                    | $m^{(n-1)}$                     |
| 9                             | $i, k$                        | $m^n$                           |
| 10                            | $j$                           | $n$                             |
| 11                            | $i, k > 1$                    | $m^{(n-1)}$                     |
| 12                            | $i, j, k, t, j \neq t, k > 1$ | $m^{(n-1)} \cdot (n-1) \cdot n$ |
| 13                            | $i, j, k, t, j \neq t, k > 1$ | $m^{(n-1)} \cdot (n-1) \cdot n$ |
| 14                            | $i, j, k, t, j \neq t, k > 1$ | $m^{(n-1)} \cdot (n-1) \cdot n$ |
| 15                            | $i, k$                        | $m^n$                           |
| 16                            | $i, k$                        | $m^n$                           |
| 17                            | $i, k$                        | $m^n$                           |
| Değişken                      | İndisler                      | Toplam değişken sayısı          |
| bik                           | $i, k$                        | $m^n$                           |
| qik                           | $i, k$                        | $m^n$                           |
| hik                           | $i, k$                        | $m^{(n-1)}$                     |
| Cik                           | $i, k$                        | $m^1$                           |
| Xijk                          | $i, j, k$                     | $m^n \cdot n$                   |
| Yijtk                         | $i, j, t, k$                  | $m^{(n-1)} \cdot (n-1) \cdot n$ |
| Uik                           | $i, k$                        | $m^n$                           |
| <b>Toplam kısıt sayısı</b>    |                               | $3nm(n-1)(n-1) + 8nm - m + n$   |
| <b>Toplam değişken sayısı</b> |                               | $5nm(n-1)(n-1)$                 |

Matematiksel boyut analizini bir örnek üzerinde açıklamak gerekirse, 2 makine 5 iş için, toplam kısıt sayısı 563, toplam değişken sayısı 800 iken, 5 makine 10 iş için bu değerler, 12.555 kısıt, 20.250 değişkene çıkmaktadır. Gerçek hayat problemlerinde gerek makine ve iş sayısının çok olması, gerekse çözümün kabul edilebilir sürelerde beklenmesi nedeniyle sezgisel yaklaşımların kullanılması kaçınılmaz hale gelmektedir.

## 5. ÖNERİLEN ÇÖZÜM YAKLAŞIMI

Sezgisel yöntemler, zor ve çözümü uzun süre gerektiren problemler için makul sürede kabul edilebilir sonuçlar veren kesin olmayan çözüm yöntemleridir. Sezgiseller, doğayı taklit edip etmemelerine, hafızalı olup olmamalarına, deterministik veya rassal olmalarına, tek çözüm ve popülasyon temelli olmalarına göre sınıflandırılırlar (Özsüt, 2015).

Tavlama Benzetimi (TB) ya da Benzetilmiş Tavlama (BT) 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. 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).

TB'nin diğer yöntemlerle kıyaslandığında gözlenen en önemli avantajı yerel eniyiden kurtulabilme yeteneğidir. Yaklaşım yalnız amaç fonksiyonundaki iyileşmelere bağlı olmayan, aynı zamanda bazı kötüleşmeleri de kabul eden bir rastlantı arama stratejisini benimser. Bahsi geçen aramada ulaşılan yeni pozisyonda eğer amaç fonksiyonunda kötüleşme varsa bir kabul olasılığına bağlı olarak bu yeni noktaya gidilir veya bir önceki pozisyona geri dönlür. Zaman zaman kötüye götüren çözümlerin araştırılması, yerel eniyiden çıkarak farklı bölgelerde de sonuç aramaya olanak sağlamaktadır. Ayrıca algoritma ilerledikçe, kötü çözümlerin kabul edilme olasılığı da azalır.

Tavlama tek bir çözümle başlayıp bu çözümün varyasyonları ile devam eden bir algoritma olduğu için tek çözüm temellidir. Önceki çözümler arama esnasında dinamik olarak kullanılmadığı için hafızalı değildir. İyileştirme sağlamayan çözümlerin seçilmesinde rassal kurallar uygulandığı için rassal bir algoritmadır (Özsüt, 2015).

### 5.1. Tavlama Benzetimi

TB yaklaşımının merkezinde gerçek fiziksel tavlamadaki kabul etme kriterleri yatmaktadır. Tavlama termal bir işlemdir ve düşük enerjili durum katı hali temsil eder. Buna göre tavlama temel olarak iki adımdan oluşturulabilir: Bu adımlardan ilki katı maddenin erime noktası olan azami seviyeye kadar ısının artırılması, ikincisi ise ısıtılmış maddenin yavaşça soğutulmasıyla katı haline dönüştürülmesidir. Sıvı haldeyken maddenin tüm parçacıkları rastlantı olarak dağılırken, katı halde kuvvetli bir yapısal bütünlük içindedir ve sistemin enerjisi asgari seviyededir (Cura, 2008).

Metropolis ve arkadaşları (1958), tavlama sürecini taklit etmek için basit bir algoritma geliştirmişlerdir. Aslında önerdikleri algoritma Monte Carlo tekniklerine dayanmaktaydı ve yeni fiziksel haller şu şekilde geçmekteydi: 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, aşağıda verilen olasılığa bağlı olarak kabul edilebilir.

$$Kabul\ olasılı\u{g}ı = P(kabul) = e^{-\left(\frac{\Delta E}{kBT}\right)} \quad (5.1.)$$

Bu denklemde yer alan  $T$  ısı seviyesini göstermekteyken  $kB$  Boltzman sabiti olarak da bilinen bir sabittir.

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).



Yerel arama algoritmalarının (YAA), en önemli dezavantajının, bütünsel eniyi yerine genellikle yerel eniyi noktaya yönelmesidir. Kontrollü bir yaklaşımda daha kötüye gidişlere izin vermek veya “yokuş yukarı hareket” etmek TB’nin bu soruna getirdiği çözümdür (Reeves, 1995). Bu açıdan YAA’ya fazlasıyla benzemektedir. Ancak yokuş yukarı hareketlere izin verdiği için daha çok bir eşik algoritması türü olarak kabul edilmelidir. Yokuş yukarı hareket etme TB’de mevcut ısı seviyesine bağlı bir olasılık dağılımına göre kabul edilir. Aşağıda örnek bir TB algoritması verilmiştir. Görüldüğü gibi ısı adeta bir eşik değer olarak kullanılmıştır. Buna göre Boltzman sabitinin bulunması gereksizdir. Ayrıca ısının güncellenmesi “soğuma” olarak adlandırılır. Soğumanın ne şekilde olacağı ise ”soğuma programı” olarak adlandırılır (Cura, 2008). Algoritma adımları aşağıdaki gibidir:

- Adım 1: Rassal olarak ya da seçilmiş bir çözüm kümesini başlangıç çözümü ( $S_0$ ), mevcut çözüm olarak kabul et. ( $S=S_0$ );
- Adım 2: Erişilen eniyi çözüm olarak ( $S^*$ ) mevcut çözümü ata. ( $S^*=S$ )
- Adım 3: Mevcut çözümünün maliyet fonksiyonunu hesapla.  $S:C(S)$
- Adım 4: Başlangıç sıcaklığını belirle. ( $T_0$ );
- Adım 5: Başlangıç sıcaklığını  $T$  değerine ata.  $T = T_0$ ;
- Adım 6: Durdurma koşulu ( $t_{son}$ ) gerçekleşmedi ise aşağıdaki işlemleri gerçekleştir.
  - a) Markov zinciri uzunluğunu belirle ( $L$ : Her bir ısı seviyesinde komşu inceleme sayısı olarak da bilinir )
    - i. Mevcut  $S$  çizelgesinde rassal bir komşuluk aralığı,  $S'$ , belirle.
    - ii.  $S'$  için  $C(S')$  maliyet fonksiyonunu hesapla.
    - iii. Bir önceki çizelge ile mevcut çizelgenin maliyet fonksiyonlarının farklarını al.

$$A(C) = C(S') - C(S) \quad (5.2.)$$

- iv. Eğer  $A(C) < 0$  ise, b adımına git,  $S = S'$  kabul et.

$$C(S) < C(S^*) \text{ ise } S^* = S \text{ ata.}$$

- v.  $A(C) > 0$  ise, adım 6a’ ya geri dön ve  $u$  gibi  $(0,1)$  aralığında bir rassal sayı üret.
- vi. Eğer  $u < e^{-A(C)/T}$  ise  $S = S'$  ata.

b) T sıcaklığını azalt, adım 6 ya dön.

- Adım 7:

Eniyi çizelgeyi,  $S^*$ , oluştur ve dur.

Yukarıda genel algoritma verilmiştir. Algoritmada yer alan  $u$  değişkeni, her çevrimde  $(0,1)$  aralığında seçilen rassal bir sayıdır. Ancak TB algoritmaları çözümü araştırılan probleme göre özelleştirilmelidir. Söz konusu özelleştirme başlangıç ısı seviyesinin, soğumanın nasıl bir programı izleyeceğinin, sonlanma koşulunun, maliyet (enerji) fonksiyonunun ve komşuluk yapısının belirlenmesiyle gerçekleştirilmektedir. Her problem için bunların her birinin tek tek ele alınarak incelenmesi ve belirlenmesi gerekmektedir.

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.

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

## 5.2 Çok Amaçlı Eniyileme

Çok amaçlı bir problemin, gerçek değerli bir amaç fonksiyonuna sahip uygun bir skaler eniyileme problemine dönüştürülmesine skalerleştirme denmektedir. Skalerleştirme fonksiyonları 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).

Kolay olması nedeniyle, ağırlıklandırılmış toplam yöntemi, çok amaçlı eniyileme problemlerinde en sık kullanılan skalerleştirme yöntemidir. Her bir amaç bir ağırlık katsayısı ile ilişkilendirilir ve amaçların ağırlıklandırılmış toplamı ile oluşturulmuş fonksiyon eniyilenmeye çalışılır. Ancak, klasik ağırlıklandırma yönteminde tüm Pareto etkin çözümleri elde etmek mümkün değildir. İç bükey Pareto etkin çözümlerin rahatlıkla bulunabildiği konik skalerleştirme yöntemi 2001 yılında Gasimov tarafından geliştirilmiştir (Sipahioğlu ve Saraç, 2010).

Hem iç bükey hem de dış bükey Pareto etkin çözümleri bulmak için en çok kullanılan yöntemlerden ikisi, Tchebycheff ve Epsilon kısıt yöntemleridir. Konik skalerleştirme, Tchebycheff yönteminden farkı, kullanıcının amaç civarında yer almasını istediği bir referans noktasını tanımlayabilmesidir (Sipahioğlu ve Saraç, 2010).

Konik skalerleştirme yönteminde, referans noktasının seçimi konusunda bir kısıtlama bulunmamaktadır. Konik skalerleştirme Epsilon kısıtı yönteminden farkı ise çözümün tek bir aşamada elde edilebilmesidir (Sipahioğlu ve Saraç, 2010).

### 5.3. Geliştirilen Algoritma

İşletmelerde, karşılaşılan çizelgeleme problemlerinin çözümü için matematiksel modeller oluşturulsa bile, genellikle problem boyutlarının büyük olması nedeniyle çözüm bulmak mümkün olamamaktadır. Bu sebeple, büyük boyutlu çizelgeleme problemlerine, dinamik ve hızlı bir şekilde çözüm getirebilmek adına, sezgisel bir algoritma geliştirilmiştir. Geliştirilen algoritma adımları şu şekildedir:

1. Adım: Tüm işler, işlem sürelerine göre azalan şekilde sıralanır;
2. Adım: En büyük işlem süresi olan iş, 1. makineye atanır;
3. Adım: İkinci en büyük işlem süresi olan iş, 2. makineye atanır;
4. Adım: Üçüncü ve daha sonraki işlerin ataması yapılırken, her iki makinedeki işlerin tamamlanma süreleri hesaplanır, hangi makinede işler daha erken tamamlanıyorsa, söz konusu iş o makineye atanır. Bu adım tüm işler tamamlanıp, ilk çizelge elde edilene kadar devam edilir. Bu çizelgeleme  $S_0$  olarak atanır;
5. Elde edilen başlangıç çözümü eniyi çözüm olarak atanır ( $S^*=S_0$ );
6. Adım: Bu adımda, bir önceki adımda elde edilen çizelgelemeye göre amaç fonksiyonu hesaplanır ( $C(S_0)=C(S^*)$ );
7. Adım: Tavlama benzetiminin gereklerinden olan soğuma programı belirlenir. Başlangıç sıcaklığı, durdurma koşulu ve soğuma fonksiyonu bu adımda belirlenerek gerekli atamalar yapılır ( $T=T_0$ );

Hazırlanan algoritmada durdurma koşulu için bir sıcaklık değeri belirlenmiştir ( $t_{son}$ ). Soğuma fonksiyonu ise  $T = T * \text{soğuma oranı}$ , olarak belirlenmiş ve soğuma oranı için değer atanmıştır ( $c$ ).

Soğuma stratejisi olarak sürekli soğuma seçildiğinden Markov zinciri uzunluğu ya da her sıcaklık adımında yapılacak deneme sayısı  $L=1$  olarak alınmıştır. Ayrıca GAMS çözümü ile kıyaslama yapılması için toplam süre 10.000sn ile de sınırlandırılmıştır.

8. Adım: 1 ile toplam iş sayısı arasında eşit olmayan 2 rassal sayı üretilir.
9. Adım: Üretilen sayılar için çizelgede yer değişimi yapılarak yeni çizelge elde edilir ( $S^1$ ).
10. Adım: Yeni çizelge için amaç fonksiyon değeri hesaplanır  $C(S^1)$ .
11. Adım: Bir önceki çizelge ile son çizelgenin amaç fonksiyonlarının farkı alınır.

$$\Delta = C(S^1) - C(S_0) \quad (5.3.)$$

12. Adım:  $\Delta$  değeri negatif ise, yani amaç fonksiyonunda iyileşme varsa,  $S^1 = S^*$  atamasını yap,  $C(S^*) = C(S^1)$  olarak kaydet. Adım 13 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 13'ten devam edilir, değilse bir önceki çizelge ile Adım 13'ten devam edilir.

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

$$T = (T * c) \quad (5.4.)$$

14. Adım:  $T$  sıcaklığı durdurma sıcaklığı ile karşılaştırılır.  $T \leq t_{son}$  ise Adım 15'e gidilir değilse Adım 8'e geri dönlür.

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

Algoritmaya ait deneysel sonuçlar ve oyuncak problemlere ilerleyen bölümlerde yer verilmiştir.

## 6. BULGULAR VE TARTIŞMA

Önerilen matematiksel modelin çözüm performansını görmek amacıyla, matematiksel model GAMS programında kodlanmıştır. Ele alınan problemle tam olarak örtüşen bir çalışma bulunamadığı için, bir alt başlıkta açıklanacak yöntemle farklı boyut ve özellikte altmış adet test problemi türetilerek bunların çözümleri karşılaştırılmıştır.

### 6.1. Test problemlerinin türetilmesi

Özdeş paralel makine problemleri incelendiğinde, iş sayısı ( $n$ ), küçük boyutlu test problemlerinde yaklaşık sekiz, orta boyutlu test problemleri için yaklaşık kırk ve büyük boyutlu problemler için yaklaşık yüzdür (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 iki, en çok altı adet olarak görüldüğü için, problemler  $m=2$  ve  $m=6$  olarak türetilmiştir.

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

KDD: Kesikli düzgün dağılım

$P_j \sim \text{KDD} (1,100)$

$S_{ij} \sim \text{KDD} (1,40)$

Logendran vd. (2006), yaptıkları çalışmada, siparişlerin termin süresi olan  $d_j$ 'ler türetmede aşağıdaki formülleri kullanmıştır.

$$d_j \sim \text{KDD} (a, b)$$

$$a = P(1 - T - \frac{R}{2}) \quad (6.1.)$$

$$b = P \left( 1 - T + \frac{R}{2} \right) \quad (6.2.)$$

$$P = \sum_{j=1}^n (P_j + \beta S_{ij}) / m \quad (6.3.)$$

T: Gecikme faktörü,  $\bar{d}$  : ortalama termin süresi olup, T aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$T = 1 - \bar{d} / C_{enb} \quad (6.4.)$$

T'nin büyük olması, terminlerin çok sıkı olmasını, T'nin küçük olması ise terminlerin rahat olması anlamına gelmektedir.

R: Termin faktörü,  $d_{enb}$ : en uzun termin,  $d_{enk}$ : en kısa termin olup R, aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$R = (d_{enb} - d_{enk}) / C_{enb} \quad (6.5.)$$

Sij dağılımının değişkenlik katsayısı (coefficient of variation) CV değeri aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$CV = \sigma / \mu \quad (6.6.)$$

Kesikli düzgün dağılım için,  $\sigma$  ve  $\mu$  aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$\sigma = \sqrt{\frac{(b-a)^2}{12}} \quad \text{ve} \quad \mu = \frac{a+b}{2} \quad (6.7.)$$

a=1, b=40 için,  $\sigma = \sqrt{\frac{(40-1)^2}{12}}$  olup, 11,25 olarak hesaplanmıştır.

$\mu = \frac{1+40}{2}$  olup, 20,5 olarak hesaplanmıştır. Buna göre CV= 11,25/20,5 olup 0,549'dur.

Logendran vd. (2006), CV değeri ile  $\beta$  değeri doğrusal ilişki gösterdiği için interpolasyon yöntemi ile belli bir CV değerine karşılık gelen  $\beta$  değeri kolayca bulunabileceğine değinmiştir. CV=1 iken  $\beta = 0,1'e$  , CV=0,01 iken  $\beta = 0,9'a$  karşılık gelmektedir. Buna göre interpolasyon ile bizim CV değerimiz için  $\beta = 0,464$  olur.

Rassal değer oluşturmada kullanılan diğer T ve R ikilileri, (0,2, 0,2), (0,2, 0,8), (0,5, 0,5), (0,8, 0,2) (0,8, 0,8) olarak kullanılmıştır. Herbir T ve R setine göre hesaplamalar yapılarak,  $d_j \sim KDD$  (a, b) için a, b sınırları bulunarak, bu sınırlara göre de  $d_j$ 'ler türetilmiştir (Logendran vd., 2006).

## 6.2. Oyuncak Problemler

Geliştirilen algoritma ilk olarak sırasıyla üç ve beş iş için iki makine ortamında oyuncak problemler üzerinde test edilmiştir. Oyuncak problemlerde ele alınan veriler ve çözüm sonuçları, GAMS sonuçları ile kıyaslanmıştır.

**Oyuncak problem-1:** 3 iş için hazırlanan örnek problem verileri Çizelge 6.1'de verilmiş olup tüm sürelerin ortak birimi saat olarak alınmıştır.

**Çizelge 6.1.** Oyuncak problem-1 işlem ve termin süreleri

| İş indisi | İşlem süresi (Saat) | Termin (Saat) |
|-----------|---------------------|---------------|
| J         | $P_j$               | $d_j$         |
| 1         | 2                   | 5             |
| 2         | 3                   | 7             |
| 3         | 4                   | 9             |

Söz konusu işler için sıra bağımlı hazırlık süresi (saat) matrisi Çizelge 6.2'deki gibidir:

**Çizelge 6.2.** Oyuncak problem-1 sıra bağımlı hazırlık süresi matrisi

| Stijk (Saat) | J1 | J2 | J3 |
|--------------|----|----|----|
| J1           | 0  | 0  | 0  |
| J2           | 2  | 0  | 0  |
| J3           | 3  | 2  | 0  |

Bu verilerle eniyi sonuca ulaşılarak skalerleştirilmiş amaç fonksiyonu 0,45 olarak GAMS ile bulunmuştur. GAMS ve geliştirilen algoritma çözümleri Çizelge 6.3'de verilmiştir.

**Çizelge 6.3.** GAMS ve geliştirilen algoritma çözümlerinin karşılaştırılması

| Oyuncak problem 1      | GAMS                                           | Geliştirilen Algoritma                       |
|------------------------|------------------------------------------------|----------------------------------------------|
| enk f1                 | 0                                              | 1                                            |
| enk f2                 | 5                                              | 5                                            |
| Amaç fonksiyonu (z)    | 0,45                                           | 0,78                                         |
| Süre                   | 0,11 saniye                                    | 0,30 saniye                                  |
| Bilgisayar özellikleri | Intel® Core™ i7- 5700 HQ CPU, 2.7 GHz, 8GB RAM | Intel® Core™ i5- 4200U CPU, 1.6 GHz, 8GB RAM |
| Oyuncak problem 2      | GAMS                                           | Geliştirilen Algoritma                       |
| enk f1                 | 5                                              | 5                                            |
| enk f2                 | 15                                             | 19                                           |
| Amaç fonksiyonu (z)    | 1,45                                           | 1,58                                         |
| Süre                   | 0,44 saniye                                    | 1,55 saniye                                  |
| Bilgisayar özellikleri | Intel® Core™ i7- 5700 HQ CPU, 2.7 GHz, 8GB RAM | Intel® Core™ i5- 4200U CPU, 1.6 GHz, 8GB RAM |

**Oyuncak problem-2:** Aynı şekilde 5 iş için de örnek problem verileri Çizelge 6.4 ve Çizelge 6.5'de verilmiştir.

**Çizelge 6.4.** Oyuncak problem-2 işlem ve termin süreleri

| İş indisi | İşlem süresi (Saat) | Termin (Saat)  |
|-----------|---------------------|----------------|
| J         | P <sub>j</sub>      | d <sub>j</sub> |
| 1         | 3                   | 2              |
| 2         | 5                   | 1              |
| 3         | 6                   | 2              |
| 4         | 7                   | 5              |
| 5         | 4                   | 3              |

**Çizelge 6.5.** Oyuncak problem-2 sıra bağımlı hazırlık süresi matrisi

| Stijk (Saat) | J1 | J2 | J3 | J4 | J5 |
|--------------|----|----|----|----|----|
| J1           | 0  | 1  | 2  | 3  | 3  |
| J2           | 1  | 0  | 2  | 3  | 3  |
| J3           | 1  | 2  | 0  | 3  | 3  |
| J4           | 1  | 2  | 3  | 0  | 0  |
| J5           | 1  | 2  | 3  | 0  | 0  |

İkinci oyuncak problemin çözümü de yine GAMS ile 1,45 olarak bulunmuştur. (Bkz. Çizelge 6.3).



Tamsayılı programlama modellerinde, bazı ya da tüm değişkenlerin tamsayı olmasını sağlayan kısıtlar, hesaplama bakımından tamsayılı problemleri daha zor hale getirmektedir. Çoğu tamsayılı programlama modelleri ise NP-Zor sınıfına aittir. Dolayısıyla genel doğrusal programlama modelleri polinomial zamanda çözülebilirken, aynı formülasyonun tamsayı çözümünü bulmak, üstel hesaplama zamanı gerektirebilir.

Gerçek hayatta karşılaşılabılır problemlerde, çizelgelenecek yüzlerce iş, kullanılabilir onlarca makine olabilir. Bu durumda matematiksel model kullanarak eniyi çözüme kısa sürede ulaşmak imkansız olacaktır. Problem boyutu arttıkça, çözüm süresinin üstel olarak artıyor olması, eniyi çözümü veren matematiksel model yerine problemin eniyi çözümünü vermeyen ancak eniyiye yakın çözümü kısa sürede veren sezgisel algoritma kullanımını gerektirmektedir.

### 6.3. Test Problemlerinin Çözümü

Önceki bölümde de belirtildiği gibi test problemleri küçük, orta ve büyük boyutlu olmak üzere üçe ayrılmış ve sonuçları, Çizelge 6.6, Çizelge 6.7 ve Çizelge 6.8’de ayrı ayrı verilmiştir.

Çizelge 6.6’da,  $m=2$  ve  $m=6$  makine,  $n=8$  iş, farklı T ve R değerleri ile türetilen 20 örnek problemin GAMS ve Tavlama benzetimi ile çözümleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. İş sayısı küçük boyutlu olan problemlerde GAMS daha iyi sonuç verirken, Tavlama benzetimi eniyiye yakın sonuçları GAMS’e göre çok kısa bir sürede vermektedir.

Çizelge 6.6. Küçük boyutlu problemlerin çözüm karşılaştırması

| no | n | m | T   | R   | GAMS |    |     |          |     | TAVLAMA B. |     |          |     |
|----|---|---|-----|-----|------|----|-----|----------|-----|------------|-----|----------|-----|
|    |   |   |     |     | CUST | F1 | F2  | süre(sn) | Z   | F1         | F2  | süre(sn) | Z   |
| 1  | 8 | 2 | 0,8 | 0,8 | 469  | 4  | 206 | 33       | 0,9 | 5          | 221 | 1,2      | 1,1 |
| 2  |   |   |     |     | 537  | 4  | 231 | 27       | 0,9 | 5          | 240 | 1,2      | 1,1 |
| 3  |   |   |     | 0,2 | 542  | 5  | 225 | 23       | 1,0 | 5          | 286 | 1,0      | 1,2 |
| 4  |   |   |     |     | 603  | 5  | 242 | 50       | 1,0 | 6          | 304 | 1,1      | 1,3 |
| 5  |   |   |     | 0,5 | 570  | 2  | 248 | 21       | 0,7 | 3          | 283 | 1,0      | 0,9 |
| 6  |   |   |     |     | 462  | 2  | 208 | 26       | 0,7 | 3          | 209 | 1,2      | 0,8 |
| 7  |   |   | 0,2 | 0,8 | 547  | 1  | 220 | 14       | 0,5 | 2          | 271 | 1,0      | 0,8 |
| 8  |   |   |     |     | 730  | 0  | 357 | 14       | 0,5 | 1          | 369 | 1,2      | 0,6 |
| 9  |   |   |     | 0,2 | 441  | 1  | 190 | 36       | 0,6 | 1          | 247 | 1,0      | 0,7 |
| 10 |   |   |     |     | 531  | 1  | 266 | 45       | 0,6 | 2          | 242 | 1,0      | 0,7 |
| 11 | 8 | 6 | 0,8 | 0,8 | 524  | 6  | 88  | 436      | 0,9 | 6          | 88  | 0,7      | 0,9 |
| 12 |   |   |     |     | 530  | 6  | 97  | 711      | 0,9 | 6          | 97  | 0,6      | 0,9 |
| 13 |   |   |     | 0,2 | 671  | 8  | 105 | 48       | 1,2 | 8          | 107 | 0,7      | 1,2 |
| 14 |   |   |     |     | 375  | 6  | 80  | 1696     | 1,0 | 6          | 80  | 0,9      | 1,0 |
| 15 |   |   |     | 0,5 | 596  | 5  | 105 | 218      | 0,8 | 5          | 113 | 0,8      | 0,8 |
| 16 |   |   |     |     | 450  | 3  | 100 | 346      | 0,6 | 3          | 100 | 0,7      | 0,6 |
| 17 |   |   | 0,2 | 0,8 | 595  | 2  | 121 | 23       | 0,5 | 2          | 130 | 0,7      | 0,5 |
| 18 |   |   |     |     | 459  | 3  | 79  | 136      | 0,6 | 3          | 101 | 0,7      | 0,6 |
| 19 |   |   |     | 0,2 | 507  | 4  | 89  | 212      | 0,7 | 4          | 99  | 0,7      | 0,7 |
| 20 |   |   |     |     | 485  | 2  | 107 | 176      | 0,5 | 2          | 107 | 0,8      | 0,5 |

Çizelge 6.7’de, m=2 ve m=6 makine, n=8 iş, farklı T ve R değerleri ile türetilen 20 örnek problemin GAMS ve Tavlama Benzetimi ile çözümleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. GAMS 20 örnek problemin sadece 3 tanesinde çözüm bulabilirken, Tavlama benzetimi 20 problemde de kısa sürede başarılı sonuçlar bulmuştur.

Çizelge 6.7. Orta boyutlu problemlerin çözüm karşılaştırması

| no | n  | m | T   | R   | GAMS |      |      |          |       | TAVLAMA B. |      |          |      |     |
|----|----|---|-----|-----|------|------|------|----------|-------|------------|------|----------|------|-----|
|    |    |   |     |     | CUST | F1   | F2   | süre(sn) | Z     | F1         | F2   | süre(sn) | Z    |     |
| 1  | 40 | 2 | 0,8 | 0,8 | 2761 | -    | -    | 10000    | -     | 26         | 1438 | 9,4      | 1,2  |     |
| 2  |    |   |     |     | 3035 | -    | -    | 10000    | -     | 27         | 1564 | 10,2     | 1,2  |     |
| 3  |    |   |     | 0,2 | 2723 | 34   | 1502 | 10000    | 1,4   | 34         | 1334 | 9,4      | 1,3  |     |
| 4  |    |   |     |     | 2834 | -    | -    | 10000    | -     | 32         | 1384 | 10,1     | 1,3  |     |
| 5  |    |   |     | 0,5 | 3072 | -    | -    | 10000    | -     | 19         | 1645 | 8,9      | 1,0  |     |
| 6  |    |   |     |     | 2974 | 21   | 1405 | 10000    | 1,0   | 23         | 1520 | 9,4      | 1,1  |     |
| 7  |    |   |     | 0,2 | 0,8  | 2889 | 11   | 1283     | 10000 | 0,7        | 15   | 1405     | 10,7 | 0,9 |
| 8  |    |   |     |     | 2440 | -    | -    | 10000    | -     | 15         | 1158 | 12,3     | 0,9  |     |
| 9  |    |   |     | 0,2 | 2791 | -    | -    | 10000    | -     | 13         | 1414 | 12,9     | 0,8  |     |
| 10 |    |   |     |     | 2881 | -    | -    | 10000    | -     | 13         | 1398 | 9,5      | 0,8  |     |
| 11 | 40 | 6 | 0,8 | 0,8 | 3119 | -    | -    | 10000    | -     | 31         | 571  | 5,5      | 1,0  |     |
| 12 |    |   |     |     | 2832 | -    | -    | 10000    | -     | 37         | 483  | 6,6      | 1,1  |     |
| 13 |    |   |     | 0,2 | 3033 | -    | -    | 10000    | -     | 34         | 590  | 5,7      | 1,0  |     |
| 14 |    |   |     |     | 3028 | -    | -    | 10000    | -     | 34         | 557  | 5,4      | 1,0  |     |
| 15 |    |   |     | 0,5 | 2617 | -    | -    | 10000    | -     | 18         | 462  | 5,7      | 0,6  |     |
| 16 |    |   |     |     | 2870 | -    | -    | 10000    | -     | 22         | 542  | 5,5      | 0,7  |     |
| 17 |    |   |     | 0,2 | 0,8  | 3229 | -    | -        | 10000 | -          | 13   | 555      | 5,3  | 0,5 |
| 18 |    |   |     |     | 2659 | -    | -    | 10000    | -     | 16         | 516  | 4,8      | 0,6  |     |
| 19 |    |   |     | 0,2 | 2715 | -    | -    | 10000    | -     | 15         | 473  | 5,5      | 0,6  |     |
| 20 |    |   |     |     | 2754 | -    | -    | 10000    | -     | 15         | 513  | 4,7      | 0,6  |     |

Çizelge 6.8’de, m=2 ve m=6 makine, n=100 iş, farklı T ve R değerleri ile türetilen 20 örnek problemin GAMS ve Tavlama Benzetimi ile çözümleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. GAMS 20 örnek problemin hiçbirisinde çözüm bulamazken, yine Tavlama benzetiminde her probleme kısa sürelerde çözüm bulunmuştur.

Çizelge 6.8. Büyük boyutlu problemlerin çözüm karşılaştırması

|    |     |   |     |     | GAMS |    |    |          |   | TAVLAMA B. |      |          |     |
|----|-----|---|-----|-----|------|----|----|----------|---|------------|------|----------|-----|
| no | n   | m | T   | R   | CUST | F1 | F2 | süre(sn) | Z | F1         | F2   | süre(sn) | Z   |
| 1  | 100 | 2 | 0,8 | 0,8 | 6720 | -  | -  | 10000    | - | 74         | 3377 | 26,6     | 1,2 |
| 2  |     |   |     |     | 7574 | -  | -  | 10000    | - | 74         | 4027 | 28,4     | 1,3 |
| 3  |     |   |     | 0,2 | 7416 | -  | -  | 10000    | - | 87         | 3659 | 25,4     | 1,4 |
| 4  |     |   |     |     | 6783 | -  | -  | 10000    | - | 83         | 3464 | 27,8     | 1,3 |
| 5  |     |   |     | 0,5 | 6790 | -  | -  | 10000    | - | 59         | 3447 | 28,3     | 1,1 |
| 6  |     |   |     |     | 6897 | -  | -  | 10000    | - | 57         | 3530 | 28,8     | 1,1 |
| 7  |     |   | 0,2 | 0,8 | 7294 | -  | -  | 10000    | - | 33         | 3736 | 32,8     | 0,8 |
| 8  |     |   |     |     | 6542 | -  | -  | 10000    | - | 38         | 3224 | 33,0     | 0,9 |
| 9  |     |   |     | 0,2 | 6658 | -  | -  | 10000    | - | 57         | 3391 | 32,1     | 1,1 |
| 10 |     |   |     |     | 6634 | -  | -  | 10000    | - | 32         | 3281 | 29,4     | 0,8 |
| 1  | 100 | 6 | 0,8 | 0,8 | 7458 | -  | -  | 10000    | - | 75         | 1308 | 26,9     | 0,9 |
| 2  |     |   |     |     | 6665 | -  | -  | 10000    | - | 75         | 1237 | 23,4     | 0,9 |
| 3  |     |   |     | 0,2 | 7331 | -  | -  | 10000    | - | 83         | 1291 | 19,9     | 1,0 |
| 4  |     |   |     |     | 6746 | -  | -  | 10000    | - | 84         | 1194 | 27,2     | 1,0 |
| 5  |     |   |     | 0,5 | 6802 | -  | -  | 10000    | - | 60         | 1293 | 19,7     | 0,8 |
| 6  |     |   |     |     | 7582 | -  | -  | 10000    | - | 62         | 1308 | 21,1     | 0,8 |
| 7  |     |   | 0,2 | 0,8 | 6804 | -  | -  | 10000    | - | 32         | 1214 | 22,6     | 0,5 |
| 8  |     |   |     |     | 7232 | -  | -  | 10000    | - | 29         | 1250 | 25,5     | 0,5 |
| 9  |     |   |     | 0,2 | 7148 | -  | -  | 10000    | - | 31         | 1368 | 22,0     | 0,5 |
| 10 |     |   |     |     | 6746 | -  | -  | 10000    | - | 36         | 1215 | 20,8     | 0,5 |

#### 6.4. Gerçek Hayat Problemi

Önceki bölümde detaylı olarak anlatılan sezgisel algoritma Visual Basic Programlama dili kullanılarak, firmada günlük problemlerin çözümünde kullanılabilecek bir arayüzle programlanmıştır.

Bu bölümde programla ilgili bazı detaylar vermek yerinde olacaktır. Programa girişte, 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 kaydedilir.

The screenshot shows a software window titled 'frmTezSon'. It contains several input fields and buttons. On the left, there is a dropdown menu for 'Ürün grubu' (Product Group) with a list of options: PPC, PCC, COT, NB, and NS. The 'PPC' option is currently selected. To the right of this dropdown are two more dropdowns: 'Renk' (Color) set to 'Beyaz' (White) and 'Termin (Saat)' (Deadline in Hours) set to '0'. A 'Kaydet' (Save) button is located to the right of the 'Termin' field. Below these fields is a table with columns: 'Substrate', 'Renk', 'Termin (sa.)', and 'Pros.Süresi'. At the bottom left, there are two buttons: 'Örnek Kayıtlar' (Sample Records) and 'Çalıştır' (Run). On the right side of the window, there is a section titled '[Çözüm kümesi]' (Solution Set) with two sub-sections: '1.Makina' and '2.Makina', each with an empty text box. Below these is a field for 'Amaç Fonksiyonu' (Objective Function) with the value '0'.

Şekil 6.1. Kullanıcı ara yüzü ürün grubu listesi

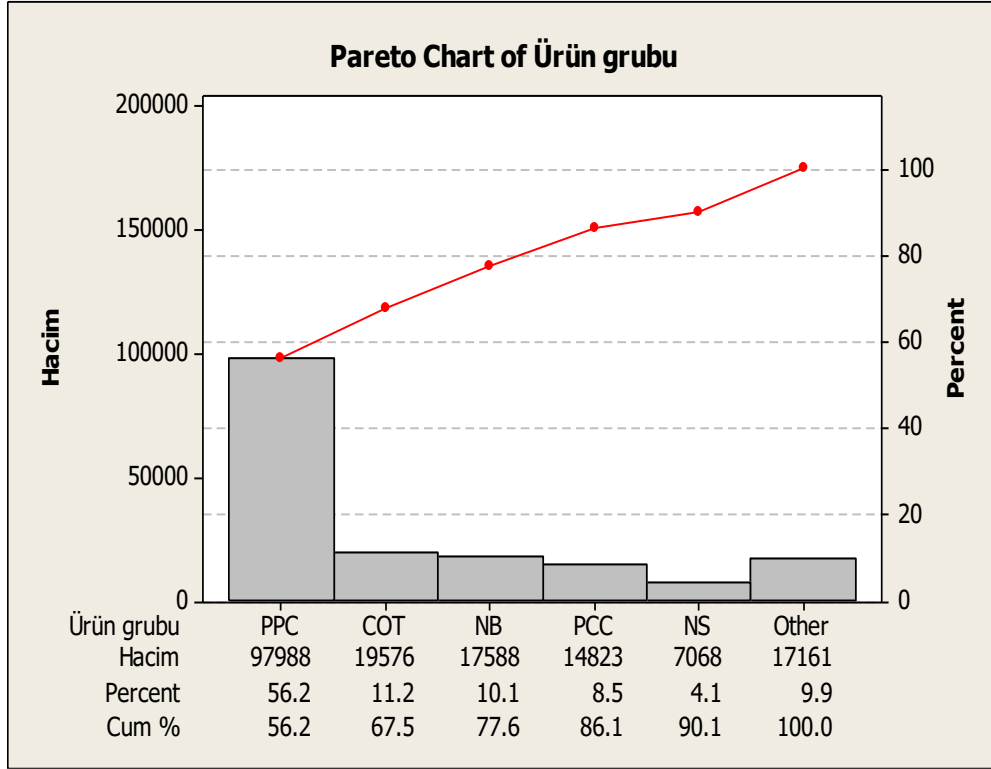
Şekil 6.1’de görüldüğü gibi ürün grubu listesi, 5 farklı grubu içermektedir. İşlem süreleri bu ürün grubuna göre değiştiğinden kullanıcının bu gruplardan birini seçmesi, işlem süresi ataması için yeterlidir.

Programda tanımlı ürün grupları ve işlem süreleri Çizelge 6.9’daki gibidir:

Çizelge 6.9. Ürün grubu işlem süreleri

| Grup | Pj (Saat) |
|------|-----------|
| PPC  | 3         |
| PCC  | 5         |
| COT  | 6         |
| NB   | 7         |
| NS   | 4         |

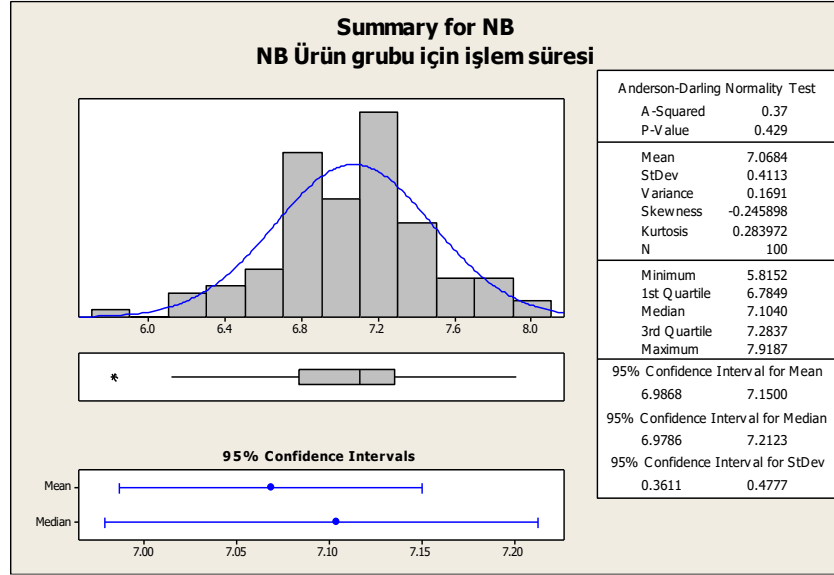
Yukarıdaki ürün grupları belirlenirken, mevcut sistemdeki tüm ürün grupları işlem sürelerine göre gruplandırılmış, aynı işlem süresine sahip olanlar bir grup altında toplanmıştır. Bu beş grubun seçilmesinin sebebi ise, son altı aylık üretim verilerine göre toplam siparişlerin %90’ını oluşturmasıdır. Kalan %10 ise 17 farklı grubun toplamıdır. Sipariş verilerine ait pareto diagramı Şekil 6.2’de verilmiştir.



**Şekil 6.2.** Ürün grubu pareto diagramı

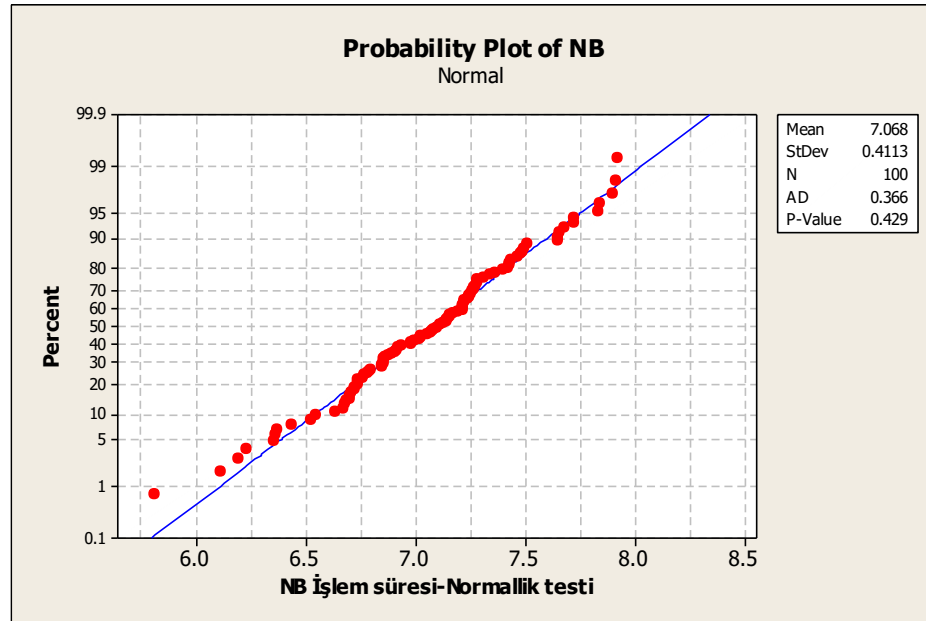
İşlem süreleri, SAP sisteminde kayıtlı olmasına rağmen, genel kontrol amacıyla, son üç ayda gerçekleşen üretim süreleri alınarak istatistiksel analizi yapılmıştır. Aşağıda örnek olarak verilen NB grubu için yapılan çalışma tüm gruplar için yapılmış ve sistemle, gerçekleşen arasında tutarsızlığın var olup olmadığı araştırılmıştır. Buna göre SAP sistemindeki verilerin güncel olduğu sonucuna varılmıştır.

Şekil 6.3'de NB için işlem süreleri dağılımı ve Şekil 6.4'de NB grubunun işlem süreleri için normallik testi sonucu verilmiştir.



Şekil 6.3. NB grubu için işlem süreleri dağılımı

Şekil 6.4'e göre NB grubu için işlem süresi  $\mu = 7,068$  saat ve  $\sigma = 0,411$  olan normal dağılıma uymaktadır.



Şekil 6.4. NB grubu işlem süreleri için normallik testi

Yapılan hipotez testi sonuçları aşağıdaki gibidir:

$H_0$ :  $P_{NB}$  (NB işlem süresi) için  $\mu=7$

$H_a$ :  $P_{NB}$  (NB işlem süresi) için  $\mu \neq 7$

```

Test of mu = 7 vs not = 7
The assumed standard deviation = 0.5

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 6.5. Minitab sonuçları

Şekil 6.5.'da görüldüğü gibi, istatistiksel olarak Minitab ile bulunan p değeri 0,05'ten büyük olduğundan  $H_0$  reddedilemez. Dolayısıyla sistemdeki mevcut işlem süreleri geçerlidir.

İşletmede mevcut 55 farklı renk grubu, SAP-APO sisteminde 13 renk grubuna indirgenmişken, hazırlanan programda bu sayı Şekil 6.6'da görüldüğü gibi 5 ile kısıtlı tutulmuştur.

Şekil 6.6. Kullanıcı ara yüzü renk grubu listesi

Renk grubu için kullanılan sınıflandırma Çizelge 6.10'da gösterildiği gibidir. Bu gruplama, renkler arası geçişlerde, yıkama/ hazırlık sürelerinin standart olarak tanımlanabilmesini amaçlamaktadır.



**Çizelge 6.10.** Renk grubu sınıflandırması

|        |       |  |        |      |  |         |       |  |
|--------|-------|--|--------|------|--|---------|-------|--|
| GRUP1  | Beyaz |  | GRUP20 | Orta |  | GRUP39  | Koyu  |  |
| GRUP2  | Açık  |  | GRUP21 | Orta |  | GRUP40  | Koyu  |  |
| GRUP3  | Açık  |  | GRUP22 | Orta |  | GRUP41  | Koyu  |  |
| GRUP4  | Açık  |  | GRUP23 | Orta |  | GRUP42  | Koyu  |  |
| GRUP5  | Açık  |  | GRUP24 | Orta |  | GRUP43  | Koyu  |  |
| GRUP6  | Açık  |  | GRUP25 | Orta |  | GRUP44  | Koyu  |  |
| GRUP7  | Açık  |  | GRUP26 | Orta |  | GRUP45  | Koyu  |  |
| GRUP8  | Açık  |  | GRUP27 | Orta |  | GRUP46  | Koyu  |  |
| GRUP9  | Açık  |  | GRUP28 | Orta |  | GRUP47  | Koyu  |  |
| GRUP10 | Açık  |  | GRUP29 | Orta |  | GRUP48  | Koyu  |  |
| GRUP11 | Açık  |  | GRUP30 | Orta |  | GRUP49  | Koyu  |  |
| GRUP12 | Açık  |  | GRUP31 | Orta |  | GRUP50  | Koyu  |  |
| GRUP13 | Açık  |  | GRUP32 | Orta |  | GRUP51  | Koyu  |  |
| GRUP14 | Açık  |  | GRUP33 | Orta |  | GRUP52  | Koyu  |  |
| GRUP15 | Açık  |  | GRUP34 | Orta |  | GRUP53  | Koyu  |  |
| GRUP16 | Açık  |  | GRUP35 | Orta |  | GRUP54  | Koyu  |  |
| GRUP17 | Açık  |  | GRUP36 | Orta |  | GRUP54  | Koyu  |  |
| GRUP18 | Açık  |  | GRUP37 | Orta |  | GRUP 55 | Siyah |  |
| GRUP19 | Açık  |  | GRUP38 | Orta |  |         |       |  |

İşler için geçiş hazırlık süresi bu 5 renk grubuna göre (Beyaz, Açık, Orta, Koyu, Siyah) değişmektedir. Öyle ki makinede boyanacak ilk rengin beyaz olması, hazırlık süresini uzatacaktır. Benzer bir yaklaşımla herhangi bir renkten sonra olacak siyah boyamada, hazırlık süresi daha kısa olacaktır. Ayrıca beyaz renkten açık renge geçiş ile daha koyu renklere geçiş arasında hazırlık sürelerinin artışı söz konusu olacağından, en küçük makine yıkama ya da hazırlık süresi için, her zaman açıktan koyuya ya da koyudan açığa göre bir sıralama tercih edilecektir.

Boyahane çalışanları ile görüşülerek, her bir grup geçişinde hazırlık süresi 1 saat artacak şekilde verilerin belirlenmesine karar verilmiştir. Programda hazırlık süresi matrisi Çizelge 6.11’de gösterildiği gibidir, burada da süreler saat bazındadır.

**Çizelge 6.11.** Renkler arası geçişlere göre hazırlık süresi matrisi

| Renk  | Renk-Stijk   | Beyaz | Açık | Orta | Koyu | Siyah |
|-------|--------------|-------|------|------|------|-------|
| Beyaz | <b>Beyaz</b> | 0     | 1    | 2    | 3    | 4     |
| Açık  | <b>Açık</b>  | 1     | 0    | 1    | 2    | 3     |
| Orta  | <b>Orta</b>  | 2     | 1    | 0    | 1    | 2     |
| Koyu  | <b>Koyu</b>  | 3     | 2    | 1    | 0    | 1     |
| Siyah | <b>Siyah</b> | 4     | 3    | 2    | 1    | 0     |

Uygulamada, Çizelge 6.12’de gösterildiği gibi, son üç ayda alınan siparişlerin renk ve ürün gruplarının olasılıkları bulunarak aynı olasılıklarla, 10 sipariş üretilmiştir. P bağımsız olasılık değerlerine göre, seçilmesi gereken 5 sipariş PPC ürün grubunda çıktığı için, geri kalan 5 sipariş de diğer ürün gruplarından birer adet seçilerek oluşturulmuştur.

**Çizelge 6.12.** 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 program çalıştırılarak makine çizelgelemesi bulunmuştur. Buna göre problemin kullanıcı arayüzünden girilmiş verileri ve çözümünü Şekil 6.7’de verilmiştir.

The screenshot shows a software window titled 'frmTezSon'. It contains a form for entering order data and a table showing the resulting machine schedule.

**[Kayıt Bilgileri]**

Ürün grubu: PCC  
 Renk: Siyah  
 Termin (Saat): 6  
 Kaydet

| Kayıt No | Substrate | Renk  | Termin (sa.) | Pros.Süresi |
|----------|-----------|-------|--------------|-------------|
| 8        | NB        | 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           |

**[Çözüm kümesi]**

1.Makina  
4,2,9,6,7

2.Makina  
10,5,1,8,3

Amaç Fonksiyonu  
22.07

Örnek Kayıtlar      Çalıştır

Şekil 6.7. 10 iş için problem verileri ve çözüm ekranı

Algoritmada döngü boyunca elde edilen çizelgeler ve bunların amaç değerleri bir metin dosyasına kaydedilmektedir. Bu kayıtlar grafiğe dökülerek, amaç fonksiyonundaki değişiklikler ve yerel eniyilerden kurtulma noktaları izlenebilmektedir.

Ayrıca geliştirilen sezgiselde çözülebilecek iş sayısı açısından herhangi bir kısıt olmadığından, firmada aktif olarak kullanılmaya açık temel bir yapısı vardır. İşletmedeki makine ve ortalama iş sayısına göre, yani 20 makine ve 250 iş olarak test problemleri çözülerek; işletmenin günlük çizelgeleme ihtiyacını karşılayacağı bir araç geliştirildiğinden emin olunmuştur.

## 7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Günümüzün artan rekabet koşullarında, şirketlerin hem kendilerini, hem de müşterilerini memnun edecek sonuçlara ulaşmak için birden çok sayıda amacı eniyileme çalışmaları kaçınılmaz hale gelmiştir. Bu sebeple, çok amaçlı çizelgeleme yöntemleri de giderek önem kazanmaktadır.

Bu çalışmada ele alınan problem ‘Özdeş Paralel Makine Çizelgeleme’ problemidir. Ele alınan problem için çok amaçlı bir matematiksel model ve bir Tavlama Benzetimi algoritması geliştirilmiştir. Uygulama bölümünde ise Visual Basic programlama dili ile yazılan Tavlama Benzetimi algoritması ile ele alınan çizelgeleme problemi çözülmüş ve sonuçlar matematiksel modelin GAMS ile çözümü ve işletmede mevcut uygulanan yöntemin sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Uygulama yerinden alınan veriler özdeş makine gruplarının bir bölümüne aittir. Bu bölümde yapılan işlemler, işlem süreleri ve hazırlık süreleri detaylı olarak temin edilmiştir. İşlem süreleri, söz konusu ürünün tamamlanmış halde makineden çıkış süresini ifade ederken, hazırlık süreleri işlem sürelerine dâhil edilmemiştir. Hazırlık süreleri iş sırasına bağımlıdır. Son bölüm olan uygulama bölümünde gerçek bir makine ortamından alınan veriler ışığında çok amaçlı çizelgeleme yapılmış ve sonuçlar değerlendirilmiştir. Sıra bağımlı hazırlık sürelerinin olduğu, işlerin bölünmesine izin verilmediği ve her iş için bir teslim süresinin olduğu sistem probleme konu edilmiştir. Söz konusu sistem hem geciken iş sayısını hem de enbüyük tamamlanma süresini enküçüklemeyi hedeflemektedir. Uygulama sonuçları değerlendirildiğinde tavlama benzetimi algoritmasının kayda değer sonuçlar ürettiği görülmektedir. Üretim çizelgesinin en erken teslim süresine göre oluşturulduğu firmada, hedeflenen amaçlara ulaşmak açısından önerilen yöntemin başarılı olduğu görülmektedir.

Çalışmanın geliştirilebilecek yanlarından birisi, Tavlama Benzetiminde, soğuma programında yapılacak değişikliklerle (Başlangıç sıcaklık, soğuma fonksiyonu, Markov zincir uzunluğu gb.) çeşitli testler yapılarak, probleme en uygun parametre değerleri belirlenebilir. Ayrıca yapılan çalışmaya ilaveten, farklı sezgisel yaklaşımlar deneyerek, sonuçların karşılaştırılabileceği düşünülmektedir.

Daha önce belirtildiği gibi çalışmanın yapıldığı tekstil firmasının müşterileri için hız, siparişin alınabilmesi için en önemli etkidir. Burada her bir müşteriye aynı önceliğe sahip olarak düşünmek çok gerçekçi bir yaklaşım değildir. Hızlı moda akımını yaratan büyük hacimli müşterilerin önceliği kesinlikle diğer müşterilere göre daha yüksektir. Bu nedenle amaç fonksiyonuna müşteri önceliklerinin de eklenmesi geliştirilmeye açık yönlerden bir tanesidir.

Ele alınan problemde termin bilgisinin müşteriden alındığı, müşterinin terminde esnek olduğu durumlarda ise sistemdeki işlem sürelerine bağlı olarak, makinelerdeki kuyruk sürelerinin dikkate alınmadan termin verildiği daha önce belirtilmişti. Bu noktada, söz konusu sistem için daha sağlıklı termin belirlemek adına çalışmalar yapılabileceği görülmektedir, makine üzerindeki siparişleri görmek, ya da kuyrukta bekleyen siparişleri termine eklemek bunlardan bazılarıdır. Ayrıca işler arası geçiş süreleri için geçmişe dayalı öğrenme algoritmaları yazılarak müşterilere verilen terminlerde daha gerçekçi sürelere ulaşılabilir.

Tüm belirtilen noktalar dikkate alındığında; söz konusu çalışmanın, gerek benzeri problemlerin çözüm sürecinde, gerekse geliştirilebilecek çalışmalara ışık tutması açısından önemli katkılar sağlayacağı düşünülmektedir.

## KAYNAKLAR DİZİNİ

- Acar, N., 2000, Üretim planlaması yöntem ve uygulamaları, Milli Prodüktivite Merkezi Yayınları, Ankara, s.214.
- 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.
- Akyol, E., 2013, Yüksek lisans tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi.
- Anghinolfi, D., Paolucci, M., 2007, Parallel machine total tardiness scheduling with a new hybrid metaheuristic approach, Computers & Operations Research, 34, 3471-3490.
- Baker, K.R., 1974, Introduction to sequencing and scheduling, John Wiley & Sons Inc., p.305.
- Baker, K.R., 1994, Elements of sequencing and scheduling, Amos Tuck School of Business Administration, Dartmouth College, Hanover, NH.
- Baskak, M., Erol, V., 2004, Sipariş tipi atölyelerde iş sıralama problemi için bir genetik algoritma uygulaması, Yöneylem Araştırması / Endüstri Mühendisliği -XXIV Ulusal Kongresi, Gaziantep - Adana.
- Chen, C.L., Chen, C.L., 2008, Hybrid metaheuristics for unrelated parallel machine scheduling with sequence-dependent setup times, Int. J. Adv. Manuf. Technol., 43, 161-169.
- Chen, J.F., 2009, Scheduling on unrelated parallel machines with sequence-and machine dependent setup times and due-date constraints, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 44, 1204-1212.
- Chen, Z.L., Powell, W.B., 2003, Exact algorithms for scheduling multiple families of jobs on parallel machines, Naval Research Logistics, Vol.50.
- Cura, T., 2008, Modern sezgisel teknikler ve uygulamaları, Papatya Yayıncılık, İstanbul, s.173.
- Eren, E., 1979, İşletmelerde stratejik planlama, Fatih Yayınevi Matbaası, s.496.
- Eren, T., Güner, E., 2002, Tek ve paralel makineli problemlerde çok ölçütlü çizelgeleme problemleri için bir literatür taraması, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 17, 4, 37-69.
- French, S., 1982, Sequencing and scheduling: An introduction to the mathematics of the job shop, John Wiley & Sons Inc., p.245.

### KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Gascon, A., Leachman, R.C., 1998, A dynamic programming solution to the dynamic, multi-item, single machine scheduling problem, *Operations Research*, 36(1), 50-56.
- Gen, M., 1996, Genetic algorithms and industrial engineering, *Computer and Industrial Engineering*, 30 (4): 835-837.
- Geyik, F., Cedimoğlu, İ.H., 2001, Atölye tipi çizelgeleme için uzman sistem tekniği ile basit öncelik kurallarının karşılaştırılması. *Politeknik*, 4: (1) 53-61.
- Graham, R.L., Lawler, E.L., Rinnooy Kan, A.H.G., 1979, Optimization and approximation in deterministic sequencing and scheduling, *Annals of Discrete Mathematics*, 5: 287-326.
- Gupta, J.N.D., Torres, A.J.R., 2004, Generating efficient schedules for identical parallel machines involving flow-time and tardy jobs, *European Journal of Operational Research*, 167, 679-695.
- Güner, E., Altıparmak, F., 2003, İki ölçütlü tek makinalı çizelgeleme problemi için sezgisel bir yaklaşım, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 18: (3) 27-42.
- Heady, R.B., Zhu, Z., 1998, Minimizing the sum of job earliness and tardiness in a multimachine system, *International Journal of Production Research*, 36, 1619-1632.
- Ho, J.C., Chang, Y.L., 1993, Minimizing the number of tardy jobs for m parallel machines, *European Journal of Operational Research*, 84, 343-355.
- 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.
- Lee, K., Lei, L., Pinedo, M., 2011, Production scheduling with history-dependent setup times, *Naval Research Logistics*, Vol.59.
- Lee, Y.H., Pinedo, M., 1997, Scheduling jobs on parallel machines with sequence dependent setup times, *European Journal of Operational Research*, 100, 464-474.
- Lin, B.M.T, Jeng, A.A.K., 2003, Parallel-machine batch scheduling to minimize the maximum lateness and the number of tardy jobs, *International Journal of Production Economics*, 91, 121-134.
- Lin, S.W., Lee, Z.J., Ying, K.C., Lu, C.C, 2010, Minimization of maximum lateness on parallel machines with sequence-dependent setup times and job release dates, *Computers and Operations Research*, 38, 809-815.

### KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Lin, Y.K., Fowler, J.W., Pfund, M.E., 2013, Multi-objective heuristics for scheduling unrelated parallel machines.
- Logendran, R., McDonell, B., Smucker, B., 2006, Scheduling unrelated parallel machines with sequence-dependent setups.
- Metropolis, N., Rosenbluth, A.W., Rosenbluth, M.N., Teller, A.H., Teller, E., 1958, Equations of state calculations by fast computing machines, *J. Chem. Phys.*, 21, 1087-1092.
- 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.
- 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.
- 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.
- Nazif, H., Lee, L.S., 2009, A genetic algorithm on single machine scheduling problem to minimise total weighted completion time, *European Journal of Scientific Research*, 35, 444-452.
- 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.
- Nişancı, H.I., 1984, Üretim planlaması ve kontrolü, Sınai Eğitim ve Geliştirme Merkezi Genel Müdürlüğü (SEGEM), Ankara, s.180.
- Özsüt, Z., 2015, Konteynır yükleme problemleri için matematiksel modeller ve çözüm yöntemleri, Yüksek Lisans tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 78 s.
- Park, Y.B., Pegden, C.D., Enscore, E.E., 1984, A survey and evaluation of static flowshop scheduling heuristics, *International Journal of Production Research*, 22, 1, 127-140.
- Pinedo, M.L, Chao, X., 1999, Operations scheduling with applications in manufacturing and services, McGraw-Hill.



### KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Pinedo, M., 2002, Scheduling theory, algorithms and systems, Prentice Hall, Second Edition, Upper Saddle River, New Jersey.
- Reeves, C.R., 1995, Modern heuristic techniques for combinatorial problems, Mc Graw-Hill Book Company, UK.
- Saad, A., Kawamura, K., Biswas, G., 1997, Performance evaluation of contract net-based heterarchical scheduling for flexible manufacturing systems, International Journal of Automation and Soft Computing, 3: 229-248.
- Sankar, S., Ponnambalam, S.G., Rathinavel, V., Viveshvaren, M.S., 2005, Scheduling in parallel machine shop: an antcolony optimization approach, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 276-280.
- Shim, S., Kim, Y., 2007, Scheduling on parallel identical machines to minimize total tardiness, European Journal of Operation Research, 177: 135-146.
- Silva, C.A., Sousa, J.M., Runkler, T.A., Palm, R., Sa da Costa, J.M., vd., 2002, Scheduling in manufacturing systems using the ant colonies optimization algorithm, Proceedings of 5th Portuguese conference on automatic control.
- Silver, E., Pyke, D., Peterson, R., 1998, Inventory management and production planning and scheduling, 3rd edition, Wiley & Sons, New York.
- Sipahioğlu, A., Saraç T., 2010, Çok amaçlı sırt çantası probleminin çözümüne yeni bir yaklaşım: konik skalerleştirme, Endüstri Mühendisliği dergisi, 21, 4, 2-12.
- Tersine, R. J., 1985, Production/operations management: concepts, structure and analysis, Second Edition, Elsevier Science Publishing Inc., p.752.
- Torres, A.J.R, Enscore, E.E., Barton, R.R., 1997, Simulated annealing heuristics for the average flow-time and the number of tardy jobs bi-criteria identical parallel machine problem, Elsevier Science Publishing Inc., 257-260.
- Vollmann, T.E., Berry, W.L., Whybark, D.C., Jacobs F.R., 2005, Manufacturing planning and control for supply chain management, Mc Graw-Hill Book Companies Inc., Newyork.
- Yalaoui F., Chu C., 2002, Parallel machine scheduling to minimize total tardiness, International Journal of Production Economics, 76. 265-279.
- Williams D., Wirth A., 1996, A new heuristic for a single machine scheduling problem with set-up times, Journal of Operational Research Society, 47, 175-180.