

# PLASTİK ENJEKSİYON MAKİNELERİNİN VARDİYA BAZINDA ÇİZELGELENMESİ PROBLEMİ İÇİN BİR HEDEF PROGRAMLAMA MODELİ

Serhat KAYA, Tuğba SARAÇ\*

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Eskişehir  
serhat.kaya@mail.com, tsarac@ogu.edu.tr

## ÖZET

Bu çalışmada, plastik parça üreten bir fabrikanın üretim tesislerinde sıra bağımlı hazırlık süreli bir özdeş paralel makine çizelgeleme problemi ele alınmıştır. Problemin amaçları, son işin tamamlanma zamanının ve toplam gecikmenin enküçüklenmesidir. Çok amaçlı yapıda olan ve sürece özel kısıtlar içeren problem için bir hedef programlama modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen model hem küçük boyutlu bir problem hem de bir gerçek hayat problemi kullanılarak test edilmiştir. Bu problemlerin çözümünde GAMS/Cplex çözücüsü kullanılmıştır. Elde edilen çizelge işletmenin çizelgesiyle karşılaştırılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Özdeş paralel makine çizelgeleme, sıra bağımlı hazırlık süresi, hedef programlama, vardiya bazlı çizelgeleme

## A GOAL PROGRAMMING MODEL FOR SHIFT-BASED SCHEDULING PROBLEM OF PLASTIC INJECTION MACHINES

## ABSTRACT

In this study, an identical parallel machine scheduling problem with sequence dependent setup times is considered at a plastic product manufacturing plant. The objectives of the problem are to minimize makespan and total tardiness. A goal programming model is developed for this multi-objective problem which includes special process constraints. The developed model is tested using both a small sized instance and a real life problem. GAMS/Cplex solver is used for solving these problems. Obtained schedule compared with the company's own schedule.

**Keywords:** Identical parallel machine scheduling, sequence dependent setup times, goal programming, shift-based scheduling

\* İletişim yazarı

## 1. GİRİŞ

Günümüzde işletmeler arasındaki rekabet gittikçe artmaktadır. İşletmeler hem müşteri taleplerine etkin bir şekilde cevap vermek, hem de kendi çıkarlarını göz önünde bulundurmaya zorundadırlar. Bu sebeple, tedarikten üretime, taşıma ve dağıtımdan, bilgi işlem ve iletişime kadar birçok alanda karar alma süreçleri giderek zorlaşmaktadır.

Bir üretim sisteminde temel amaç pazarın talebinin zamanında karşılanmasıdır. Bu amacı gerçekleştirmek için üretimin eldeki stok miktarı, makinelerin kapasitesi, bakım planları ve işçi verimliliği gibi üretim kısıtları göz önünde bulundurulurken planlanması ve oluşturulan planların ortaya çıkacak beklenmedik gelişmeler karşısında sürekli güncellenmesi gerekmektedir. Üretim sisteminin çoğunlukla dinamik bir yapıya sahip olması nedeniyle atölye bazında problemler çok karışıktır. Ayrıca bu problemlere ait kararlar zaman kısıtı altında ele alınacağından hızlı bir çözüm de gerekmektedir. Üretim çizelgeleme problemleri bunların bir örneğidir (Saraç, 2009).

Çizelgeleme problemleri genellikle  $\alpha | \beta | \gamma$  gösterimiyle ifade edilmektedir. Burada  $\alpha$  sembolü çizelgelenen olan  $j$  işinin işlem gördüğü atölyenin makine ortamını,  $\beta$  sembolü süreç karakteristiklerini ve probleme ait kısıtları,  $\gamma$  ise çizelgelenen olan problemin amaç ya da amaçlarını ifade etmektedir (Pinedo, 2002).

$\alpha$  sembolüyle ifade edilebilecek makine ortamlarından bazıları aşağıda yer almaktadır.

- Tek Makine (*Single Machine*):  $n$  sayıda işin tek bir makinede çizelgelenmesini ifade etmektedir.
  - Özdeş Paralel Makineler (*Identical Parallel Machines, P<sub>m</sub>*):  $m$  tane paralel özdeş makine ifade edilmektedir.  $j$  işinin işlenebileceği tüm makinelerde işlem süresi aynıdır.
  - Farklı Hızlara Sahip Paralel Makineler (*Uniform Parallel Machines, Q<sub>m</sub>*): Farklı işlem kapasitelerine sahip olan  $m$  adet paralel makine söz konusudur.
  - Bağımsız Makineler (*Unrelated Parallel Machine, R<sub>m</sub>*): Birbirinden bağımsız üretim hızlarına sahip  $m$  adet paralel makine ifade edilmektedir.
  - Akış Tipi Yerleşim (*Flow Shop Layout, F<sub>m</sub>*): Üretilen ürüne özel olarak tasarlanmış makineler ürünün akışına göre bir hat oluşturacak şekilde dizilmiştir.
  - Atölye Tipi Yerleşim (*Job Shop Layout, J<sub>m</sub>*): Üretilen her ürünün kendine özgü bir işlem rotası vardır.  $\beta$  alanında ifade edilebilecek süreç karakteristikleri ve sembolleri ile probleme ait kısıtlardan bazıları aşağıdaki gibidir:
  - Hazır Olma Zamanı ( $r_j$ ):  $j$  işine ait hazır olma zamanı gelmeden önce işleme başlanamaması durumunu ifade eder.
  - Sıra Bağımlı Hazırlık Süreleri ( $s_{ij}$ ):  $i$  ve  $j$  işlemleri arasındaki sıra bağımlı hazırlık süresini ifade etmektedir.  $i$  ve  $j$  işleri arasındaki hazırlık süresi işlemin gerçekleştiği  $k$  makinesinin özelliklerine de bağlı ise hazırlık süresi üç indisli olarak ( $s_{ijk}$ ) gösterilmektedir.
  - İş Kesintileri (*prmp*): Herhangi bir makinede işlem gören bir iş yerine o makineye başka bir iş yüklenebilmesini ve daha sonra o işin tekrar aynı makineye ya da benzer özelliklere sahip paralel bir makineye yüklenebileceği durumu ifade etmektedir.
  - İşlerin Öncelik Kısıtları (*prec*): Bir işin işlem görmeye başlamasından önce bir ya da daha fazla işin tamamlanmış olması gerektiğini ifade etmektedir.
  - İş Bölünmesi (*split*): Mevcut sistemdeki herhangi bir işin bölünebildiği ve o işe ait bölünen işlemlerin eş zamanlı olarak birbirinden bağımsız bir şekilde farklı makinelerde gerçekleştirilebildiği durumu ifade etmektedir.
  - Makine Uygunluk Kısıtları ( $M_j$ ):  $j$  işinin paralel makinelerin tamamında değil, bir alt kümesinde işlem görebildiği durumu ifade etmektedir.
- $\gamma$  alanında çizelgeleme probleminin amaç ya da amaçları yer alır. Bu amaçlardan bazıları aşağıda verilmiştir:
- En Büyük Tamamlanma Zamanı ( $C_{max}$ ): Son işin tamamlanma zamanıdır.
  - Toplam Gecikme ( $\sum T_j$ ): Teslim tarihinden daha geç tamamlanmış işlerin gecikme sürelerinin toplamıdır.
  - Toplam Ağırlıklı Tamamlanma Zamanı ( $\sum w_j C_j$ ):  $n$  tane işe ait tamamlanma zamanlarının ağırlıklı toplamıdır.
  - En Büyük Gecikme ( $L_{max}$ ): Çizelgelenen işlerin

öngörülen ve gerçekleşen teslim tarihleri arasında oluşan enbüyük sapma değeridir.

Ele alınan problem mevcut kısıtlar ve amaçlar göz önünde bulundurulduğunda özdeş paralel makine çizelgeleme probleminin özel bir halidir ve literatürde çizelgeleme problemleri için kullanılan sınıflandırma biçimine göre aşağıdaki gibi gösterilebilir.

$$P_m \mid s_{ij}, \text{ prosese özel kısıtlar} \mid \sum T_j, C_{enb}$$

Erişilebilir literatür dikkate alındığında çizelgeleme problemleriyle ilgili birçok çalışma bulunmaktadır. Ancak özdeş paralel makine ve sıra bağımlı hazırlık süresini aynı anda ele almış çalışmaların sayısı sınırlıdır. Allahverdi (2008) çalışmasında sıra bağımlı hazırlık süreli çizelgeleme problemlerine ait çalışmaları ayrıntılı bir şekilde incelemiştir.

Heady ve Zhu (1998), her işin her makinada üretilmediği durumda erken tamamlama ve gecikme maliyetlerini enküçüklemeye yönelik paralel makine çizelgeleme problemi için sezgisel bir çözüm yöntemi önermişlerdir.

Balakrishnan vd. (1999) hazır olma zamanına bağlı toplam ağırlıklandırılmış erken tamamlanma ve gecikme sürelerini enküçüklemeyi amaçlayan paralel makine çizelgeleme problemini karma tamsayı programlama yaklaşımıyla çözmüştür.

Sivrikaya vd. (1999) hazır olma zamanına bağlı özdeş paralel makinelerin iki tipi için toplam ağırlıklandırılmış erken tamamlanma ve gecikme sürelerini enküçüklemeyi hedefleyen çizelgeleme problemini genetik algoritma yöntemiyle çözmeyi amaçlamıştır.

Vignier vd. (1999) hazırlık süreleri toplamını içeren maliyetleri enküçüklemeyi amaçlayan paralel makine çizelgeleme probleminin çözümü için sezgisel yöntem, genetik algoritma ve dal sınır algoritması yöntemlerini kullanmışlardır.

Park vd. (2000) toplam ağırlıklandırılmış gecikme süresini enküçüklemeyi hedefleyen çizelgeleme problemini çözmek için sezgisel yöntemleri ve sinir ağlarını kullanmışlardır.

Radhakrishnan ve Ventura (2000) erken ve

geç tamamlanma süreleri toplamını enküçüklemeyi amaçlayan paralel makine çizelgeleme probleminin çözümünde karma tamsayı programlama ve tavlama benzetimi yöntemlerini kullanmışlardır.

Zhu ve Heady (2000) toplam ağırlıklandırılmış erken tamamlanma ve gecikme sürelerini enküçüklemeyi amaçlayan çizelgeleme probleminin çözümünde karma tamsayı programlama yaklaşımını kullanmışlardır.

Gendreau vd. (2001) son işin tamamlanma zamanını en küçüklemeyi amaçlayan çizelgeleme probleminin çözümü için alt sınır yöntemini ve sezgisel yöntemleri kullanmışlardır.

Kurz ve Askin (2001) hazır olma zamanına bağlı, son işin tamamlanma zamanını enküçüklemeyi amaçlayan çizelgeleme probleminin çözümünde tamsayı programlama, gezgin satıcı problemi ve genetik algoritma yaklaşımlarını kullanmışlardır.

Tahar vd. (2006) iş bölünmesi olduğu durumda son işin tamamlanma zamanını enküçüklemeyi amaçlayan çizelgeleme probleminin çözümü için sezgisel yöntemleri kullanmışlardır.

Gharehgozli vd. (2008) sıra bağımlı hazırlık süreli ve serbest kalma zamanlı paralel makine çizelgeleme probleminin çözümü için karma tamsayı bir hedef programlama modeli geliştirmişlerdir.

Toksari ve Guner (2009) eş zamanlı öğrenme etkisi, doğrusal bozulma ve sıra bağımlı hazırlık süreli, erken tamamlanma ve gecikme sürelerini enküçüklemeyi amaçlayan paralel makine çizelgeleme probleminin çözümünde karma tamsayı programlama yaklaşımını kullanmışlardır.

Bu çalışmada, literatürde yer alan diğer çalışmalardan farklı olarak, vardiya bazında çizelgeleme yapılmaktadır. Bu yaklaşım, bazı vardiyalarda üretim yapılmaması, bazı makinelerin bazı vardiyalarda çalışmaya elverişli olmaması gibi durumların dikkate alınabilmesini de mümkün kılmaktadır. Ayrıca ele alınan problem, enjeksiyonla plastik parça üretim sürecine özel bazı kısıtları da içermektedir. Hem vardiya bazlı çizelgeleme yapılması hem de sürece özel

kısıtlar dikkate alındığında, erişilebilen literatürde bu kapsamda benzer bir çalışmaya rastlanmamıştır.

Çalışmanın izleyen bölümünde ele alınan problem tanıtılmıştır. Üçüncü bölümde geliştirilen hedef programlama modeli ayrıntılı bir şekilde açıklanmış ve önerilen model ve GAMS/Cplex çözücüsü kullanılarak çözülen problemlerin sonuçları tartışılmıştır. Çalışmanın son bölümünde ise elde edilen sonuçlar ve gelecek çalışmalara yönelik öneriler sunulmuştur.

## 2. ELE ALINAN PROBLEM

Bu çalışmada, plastik parça üreten bir fabrikanın bünyesinde yer alan plastik enjeksiyon makinelerinin çizelgelenmesi problemi ele alınmıştır. Söz konusu firma, plastik enjeksiyon, boyama, serigrafi ve tapon baskı konularında faaliyet göstermektedir ve yan sanayi konumundadır.

Plastik enjeksiyon; granül halinde gelen plastik ham maddenin sıcaklık yardımıyla eritilip bir kalıp içine enjekte edilerek şekillendirilmesi ve soğutularak kalıptan çıkarılmasını içeren bir üretim yöntemidir. Bu yöntemle en küçük bileşenlerden bahçe mobilyalarına kadar çok çeşitli ebat ve kategorilerde plastik parçalar üretilebilmektedir. En yaygın üretim yöntemlerinden birisi olan plastik enjeksiyon işlemin gerçekleştirildiği makine, plastik enjeksiyon makinesi olarak adlandırılmaktadır. Bir plastik enjeksiyon parçasının üretim süreci aşağıdaki aşamalardan oluşmaktadır:

- **Kapama:** Bir enjeksiyon makinesi üç ana parçadan oluşur. Bunlar kapama ünitesi (mengene), enjeksiyon ünitesi ve kalıptır. Enjeksiyon ünitesinde ham madde haznesi yer alır. Bu ünite ham maddenin gerekli sıcaklığa kadar ısıtılarak eritilmesi ve uygun basınç ve hızda kalıba enjekte edilmesi görevini yerine getirir. Kapama ünitesi, enjeksiyon ve soğutma esnasında kalıbı basınç altında tutan ünite dir.
- **Ütüleme:** Parçanın istenen ölçülerde olması ve görünümünde çöküntü gibi hataların oluşmaması için uygulanan bir işlemdir. Bu aşamada kalıp içine enjekte edilmiş olan plastik eriyiğin, basınç uygulanarak kalıp boşluğunu iyice doldurması sağlanır.

Plastik, kalıp içinde katı hâle gelinceye kadar işlem devam eder. Kullanılan ham maddenin özelliğine, parça ebatlarına ve ağırlığına bağlı olarak işlemin süresi değişkenlik gösterir.

- **Soğutma:** Enjekte edilen eriyik ham maddenin, kalıbın içinde katılaşmasını sağlar.
- **Kalıp Açma:** Kapama ünitesi kalıbın iki tarafını ayrılacak şekilde açılır.
- **Çıkarma:** Kalıp tipine göre maçalar veya iticiler aracılığıyla bitmiş parça kalıptan çıkarılır.

Mengene bölümünün üzerinde hareket ettiği silindirlere arasındaki mesafeye kolon aralığı denir. Bir kalıbın enjeksiyon makinesine bağlanabilmesi için kalıp en ve boyunun makinenin kolon aralığından küçük olması gereklidir. Yine bir kalıbın enjeksiyon makinesine bağlanabilmesi için kalıbın derinliğinin kapama aralığıyla uyumlu olması gereklidir. Sonuç olarak; bir kalıp, sadece teknik kısıtları sağlayan makinelere bağlanabilmektedir (Saraç, 2007).

Ele alınan üretim sürecinde 14 adet ham madde, 16 adet renk ve 197 adet kalıp kullanılarak 23 adet enjeksiyon makinesinde toplam 439 farklı çeşit ürün üretilmektedir.

İşletmede bulunan enjeksiyon makineleri tonajlarına göre üç sınıfa ayrılmıştır.

**Tablo 2.1** Enjeksiyon Makinelerinin Tonajlarına Göre Grupları

Tonaj	Makine Sayısı
90-250	6
300-360	6
380-700	11

Bu çalışmada 380-700 tonaj grubunda yer alan 11 adet plastik enjeksiyon makinesinin çizelgelenmesi problemi ele alınmıştır. İlgili tonaj grubunda yer alan makinelerde bir adet ham madde, 9 adet renk ve 45 adet kalıp kullanılarak 165 adet ürün üretilmektedir. Üretim tesisinde standart olarak haftada 6 iş günü boyunca günde 3 vardiya ve bir vardiya 8 saat olacak şekilde üretim yapılmaktadır. Enjeksiyon makineleri günde 21 saat çalışmaktadır. Üretim planları her ay-başında ana sanayi işletmesine ait üretim programı

baz alınarak hazırlanmaktadır. Hazırlanan planlar haftalık periyotlara dönüştürülmektedir, aynı zamanda günlük olarak takip edilmektedir. İşletmede bulunan enjeksiyon makinelerinin farklı teknik özelliklere sahip olmaları sebebiyle her ürün her makinede üretilememektedir. Öte yandan ürünlerin üretilebildikleri makinelerdeki üretim süreleri ise eşittir. Ayrıca işletmede kullanılan her bir kalıp sadece bir çeşit ham madde cinsiyile çalışmaktadır. Teknik özellikler dikkate alındığında hangi enjeksiyon makinesinde hangi kalıpların kullanılabilceği belirlidir.

Bazı makinelerde ürünlerin işleme girme sırasına göre hazırlık süreleri farklılık göstermektedir, diğer bir deyişle enjeksiyon makinelerindeki hazırlık süreleri sıra bağımlıdır. Operatör yokluğu, makine parçası arızası, kalıp arızası, planlı bakım, ham madde hatası gibi bazı sebeplerden dolayı herhangi bir vardiyada çalışmayan makineler bulunabilmektedir. Ayrıca resmi tatil, bayram gibi nedenlerle bazı vardiyalarda hiç üretim yapılmamaktadır.

Çalışmanın gerçekleştirildiği işletme ile ana sanayisi arasında yapılan anlaşma gereği eğer firma ürünleri teslim etmekte gecikirse, ana sanayi üretiminde duruşa sebep olduğu için belli bir bedel ödemek zorundadır. Bu nedenle, işletmede hazırlanan çizelgelerin belirlenen teslim tarihlerine gecikmesiz bir şekilde uyması istenmektedir. Plastik enjeksiyon makinelerinde kullanılan kalıpların makinelere bağlanması ve sökülmesi, üretim sürecinde kullanılan renklerin dönüşümü için harcanan süreler bazen bir vardiyaya kadar uzayabilmektedir. Bu nedenle ele alınan problemin bir diğer amacı ise son işin tamamlanma zamanını enküçükleme olarak belirlenmiştir. Böylece hazırlık sürelerinin azaltılması da sağlanacaktır.

### 3. GELİŞTİRİLEN HEDEF PROGRAMLAMA MODELİ

Bu bölümde öncelikle hedef programlama yaklaşımı hakkında genel bilgi verildikten sonra geliştirilen hedef programlama modeli tanıtılmıştır. Daha sonra, örnek problem ve gerçek hayat problemi için önerilen modelle elde edilen sonuçlar sunulmuştur.

#### 3.1 Hedef Programlama

Herhangi bir doğrusal programlama modeli, amaç fonksiyonu ve kısıtlayıcı kümesi şeklinde iki bölümde incelenebilir. Çok amaçlı programlamada en büyükleme veya en küçükleme şeklinde oluşturulan amaç fonksiyonları kısıtlayıcı kümesine göre eniyenir. Bu eniyileme sürecinde amaç fonksiyonlarının olabildiğince iyi değerler alması istenir. Yani amaç fonksiyonları sınırlandırılmamıştır. Hedef programlama yaklaşımın da ise kullanıcıya, amacın öncelikleri (üstünlükleri) bakımından bir çözüm sunulurken, karşıt amaçların mevcut olmasına da izin verilir. Hedeflere ulaşıp ulaşılmadığını göstermek için sapma değişkenleri kullanılır. Amaç hedeflerden sapmayı en aza indirmektir.

#### 3.2 Ele Alınan Problem İçin Hedef Programlama Modeli

Ele alınan problemin işletme politikaları gereği belirlenen hedefler doğrultusunda çözümünü bulmak için geliştirilen hedef programlama modeli, modele ait varsayımlar, parametreler, karar değişkenleri, kısıtlar ve açıklamaları aşağıda yer almaktadır.

##### Varsayımlar

- İşler bölünemez.
- Başlangıç hazırlık süreleri, sıra bağımlı hazırlık süreleri ve işlem süreleri makinelere göre farklılık göstermez.
- Planlama dönemi boyunca birinci vardiyadan başlamak üzere ardışık olacak şekilde çalışılmayan vardiyaların olmasına izin verilir ve bu durumda planlama uzayı çalışılmayacak dönemin bitiminden başlatılır.
- Ara vardiyalarda çalışma olmaması durumunda planlama periyodu bölünür.

##### Kümeler

$N = \{1,2,\dots,n\}$  iş kümesi

$M = \{1,2,\dots,m\}$  makine kümesi

$R = \{1,2,\dots,r\}$  kalıp kümesi

$V = \{1,2,\dots,o\}$  vardiya kümesi

##### İndisler

$i$  ve  $j \in N$  belirli bir işi göstermek için kullanılan indislerdir.

$k \in N$  iş sırasını göstermek için kullanılan indistir.  
 $l \in M$  bir makineyi göstermek için kullanılan indistir.  
 $v \in V$  bir vardiyayı göstermek için kullanılan indistir.  
 $r \in R$  bir kalıbı göstermek için kullanılan indistir.

**Parametreler**

$n$  : iş sayısı  
 $m$  : makine sayısı  
 $r$  : kalıp sayısı  
 $o$  : vardiya sayısı  
 $p_j$  :  $j$ . işin işlem süresi  
 $h_j$  :  $j$ . iş birinci sırada üretilirse gerekecek hazırlık süresi (başlangıç hazırlık süresi)  
 $s_{ij}$  :  $i$ . işten hemen sonra  $j$ . işin üretimine geçilebilmesi için gerekecek hazırlık süresi (sıra bağımlı hazırlık süresi)  
 $d_j$  :  $j$ . işin müşteriye teslim edilmesi gereken zaman  
 $vardiya_v$  :  $v$ . vardiyanın çalışma süresi  
 $g_{lv}$  : Bir makine planlı bakım gibi nedenlerle bazı vardiyalarda üretime elverişli olmayabilir. Bu parametre değeri hangi makinelerin, hangi vardiyalarda üretime elverişli olduğunu belirtmektedir ( $l$ . makine  $v$ . vardiyada üretime elverişli ise 1, diğer durumlarda 0).  
 $e_{jr}$  : Bu parametre hangi işlerin, hangi kalıp ile üretilebileceğini belirtmektedir ( $j$ . iş  $r$ . kalıp ile gerçekleştirilebiliyorsa 1, diğer durumlarda 0).  
 $w_{rl}$  : Sadece ilgili makinenin teknik kısıtlarını sağlayan kalıplar makinelere bağlanabilir. Bu parametre hangi kalıbın hangi makinaya bağlanabileceğini göstermektedir ( $r$ .kalıp  $l$ .

makineye bağlanabiliyorsa 1, diğer durumlarda 0).

$b_{jl}$  : Çizelgenenecek işlerin hangi makinelerde üretilebildiğini gösterir ( $j$ . iş  $l$ . makinede yapılabiliyorsa 1 diğer durumlarda 0). Bu parametre değeri  $e_{jr}$ , ve  $w_{rl}$  parametre değerleri kullanılarak elde edilir.

$sayi$  : Çok büyük pozitif bir sayı

$sure$  : Çalışma süresi (vardiya)

$pper$  : Planlama periyodu ( $C_{enb}$  için hedef değer)

**Karar Değişkenleri**

$x_{jkl}$  :  $j$  işinin hangi sırada hangi makineye atandığını gösteren karar değişkenidir ( $j$ . iş  $k$ . sırada  $l$ . makineye atandıysa 1, diğer durumlarda 0).

$C_j$  :  $j$ . işin tamamlanma zamanı

$C_{enk}$  :  $m$  makine içinde işlem gören son işin tamamlanma zamanı

$q_{jv}$  : İşin hangi vardiyaya atandığını gösteren karar değişkeni ( $j$ . iş  $v$ . vardiyaya atandıysa 1, diğer durumlarda 0).

$f_j$  :  $j$ . işin tamamlandığı vardiyayı gösteren karar değişkeni

$T_j$  :  $j$ . işin gecikme süresi.  $T_j = \text{enb}\{C_j - d_j, 0\}$

$S_{1j}^+$  :  $j$ . iş için hedeflenen sıfır gecikmeden pozitif yönlü sapma

$S_{1j}^-$  :  $j$ . iş için hedeflenen sıfır gecikmeden negatif yönlü sapma

$S_2^+$  : Son işin tamamlanma zamanı için hedeflenen değerden pozitif yönlü sapma

$S_2^-$  : Son işin tamamlanma zamanı için hedeflenen değerden negatif yönlü sapma

**Kısıtlar**

$$C_j + sayi * (1 - x_{j,k,l}) \geq h_j + p_j \quad \forall j, k=1, l \quad (1)$$

$$C_j + sayi * (2 - x_{i,k-1,l} - x_{j,k,l}) \geq C_i + s_{ij} + p_j \quad \forall i \neq j, k > 1, l \quad (2)$$

$$\sum_j x_{j,k,l} \leq 1 \quad \forall k, l \quad (3)$$

$$\sum_k \sum_l x_{j,k,l} = 1 \quad \forall j \quad (4)$$

$$b_{j,l} \geq x_{j,k,l} \quad \forall j, k, l \quad (5)$$

$$f_j \geq (C_j / \text{sure}) \quad \forall j \quad (6)$$

$$f_j \leq (C_j / \text{sure}) + 1 \quad \forall j \quad (7)$$

$$\sum_j x_{j,k,l} - \sum_i x_{i,k-1,l} \leq 0 \quad \forall k > 1, l \quad (8)$$

$$C_{enk} \geq C_j \quad \forall j \quad (9)$$

$$\sum_v q_{j,v} \geq f_j - \text{sayi} * (1 - x_{j,k,l}) \quad \forall j, k=1, l \quad (10)$$

$$\sum_v q_{j,v} \leq f_j - \text{sayi} * (1 - x_{j,k,l}) \quad \forall j, k=1, l \quad (11)$$

$$f_j + \text{sayi} * (1 - x_{j,k,l}) \geq v * q_{jv} \quad \forall j, k=1, l, v \quad (12)$$

$$\sum_v q_{j,v} \geq f_j - f_i + 1 - \text{sayi} * (2 - x_{i,k-1,l} - x_{j,k,l}) \quad \forall i \neq j, k > 1, l \quad (13)$$

$$\sum_v q_{j,v} \leq f_j - f_i + 1 + \text{sayi} * (2 - x_{i,k-1,l} - x_{j,k,l}) \quad \forall i \neq j, k > 1, l \quad (14)$$

$$f_j + \text{sayi} * (2 - x_{i,k-1,l} - x_{j,k,l}) \geq v * q_{jv} \quad \forall i \neq j, k > 1, l, v \quad (15)$$

$$f_i - \text{sayi} * (2 - x_{i,k-1,l} - x_{j,k,l}) \leq v * q_{jv} + \text{sayi} * (1 - q_{jv}) \quad \forall i \neq j, k > 1, l, v \quad (16)$$

$$\text{vardiya}_v \geq q_{jv} \quad \forall j, v \quad (17)$$

$$g_{l,v} + 1 \geq q_{jv} + x_{j,k,l} \quad \forall j, k, l, v \quad (18)$$

$$T_j \geq C_j - d_j \quad \forall j \quad (19)$$

$$T_j - S_1^+ j + S_1^- j = 0 \quad \forall j \quad (20)$$

$$C_{enb} - S_2^+ + S_2^- = \text{pper} \quad (21)$$

$$x_{j,k,l} \in \{0,1\} \quad \forall j, k, l \quad (22)$$

$$q_{jv} \in \{0,1\} \quad \forall j, v \quad (23)$$

$$f_j \geq 0 \text{ ve tamsayı} \quad \forall j \quad (24)$$

$$C_j, T_j, S_1^+ j, S_1^- j \geq 0 \quad \forall j \quad (25)$$

$$C_{enk}, S_2^+, S_2^- \geq 0 \quad (26)$$

$$\text{enk } z = \sum S_1^+ j + S_2^+ \quad (27)$$

(1) numaralı kısıt,  $j$  işi bir makineye ilk sırada atanırsa  $j$  işine ait tamamlanma zamanının, başlangıç hazırlık süresi ve işlem süresi toplamından büyük ya da eşit olmasını sağlar. (2) numaralı kısıt,  $j$  işi bir makinede ikinci ya da daha büyük bir sıraya atanırsa, tamamlanma zamanının bir önceki işin tamamlanma zamanı, sıra bağımlı hazırlık süresi ve ilgili işin işlem süresi toplamından büyük ya da eşit olmasını sağlar. (3) numaralı kısıt herhangi bir makinede herhangi bir sıraya en fazla bir iş atanmasını sağlar. (4) numaralı kısıt her işin herhangi bir makinede herhangi bir sıraya atanmış olmasını garanti eder. (5) numaralı kısıt teknik özellikler sebebiyle ürünlerin üretilmedikleri makinelerle atanmasını engeller. (6) ve (7) numaralı kısıtlar bir işin tamamlandığı vardiyayı temsil eden karar değişkeni değerinin, o işin tamamlanma zamanının vardiya çalışma süresine oranlanmasıyla ortaya çıkan değerden büyük en küçük tamsayı olmasını sağlar. (8) numaralı kısıt çizelgenecek işlerin makinelerle aralarda boşluk olmayacak şekilde ardışık sıralamasıyla atanmasını sağlar. (9) numaralı kısıt  $C_{enb}$  değişkeni değerinin tüm işler arasında tamamlanma zamanı en büyük olan değerden büyük ya da o değere eşit olmasını sağlar. (10), (11) ve (12) numaralı kısıtlar herhangi bir makinede ilk sıraya atanacak olan herhangi bir işin başlangıç ve bitiş vardiya arasında işlem görmeye devam ettiğinin belirlenmesini sağlar. (10) ve (11) numaralı kısıtlar çizelgenin ilk sırasında yer alan bir işin işlem gördüğü toplam vardiya sayısının o işin tamamlandığı vardiya değeri kadar olmasını sağlar. (12) numaralı kısıt ise ilk sıraya atanmış olan işin, tamamlandığı vardiyadan sonraki vardiyalara atanmasını engelleyerek o işin başlangıç ve bitiş vardiya arasında hangi vardiyalarda işlem görmeye devam ettiğinin belirlenmesini sağlar. (13), (14), (15) ve (16) numaralı kısıtlar ikinci ya da daha büyük sıraya atanmış olan işlerin başlangıç ve bitiş vardiya arasında hangi vardiyalarda işlem görmeye devam ettiğinin belirlenmesini sağlar. (17) numaralı kısıt resmi bayram ve tatil gibi durumlarda çalışma yapılmayacak vardiyalara iş atamasının yapılmasını engeller. (18) numaralı kısıt planlı bakım vb. özel sebeplerle bazı makinelerin bazı vardiyalarda çalışmaya elverişli olmadığı durumlarda, işlerin bu makinelerle

atamasını engeller. (19) numaralı kısıt bir işin gecikme süresinin, ilgili işin tamamlanma zamanı teslim zamanından büyük olduğu durumlarda sıfırdan farklı değer almasını sağlar. Eğer bir iş teslim zamanından önce tamamlanmışsa o işin gecikme süresi sıfır değerini alır. (20) numaralı kısıt her bir işin gecikme değerinin sıfır değerini almasını hedeflemektedir. Kısıttaki  $S_1^+$  değişkeni hedeflenen sıfır gecikmeden pozitif yönlü sapmayı temsil eder. Pozitif yöndeki bu sapma istenmeyen bir durum olduğu için bu değer amaç fonksiyonunda enküçüklenmek istenir. (21) numaralı kısıt ile son işin tamamlanma zamanının planlama döneminin toplam süresine eşit olması hedeflenir. Kısıtta yer alan,  $S_2^+$  değişkeni hedeflenen değerden pozitif yönlü sapmayı temsil etmektedir. Pozitif yöndeki bu sapma istenmeyen bir durum olduğu için bu değer amaç fonksiyonunda enküçüklenmek istenir. (22), (23), (24), (25) ve (26) numaralı kısıtlar matematiksel modelde yer alan karar değişkenlerine ait işaret kısıtlarıdır. (27) matematiksel modelin amaç fonksiyonunu belirtir. Amaç fonksiyonu her iş için hedeflenen sıfır gecikmeden pozitif yönlü sapmalar toplamının ve son işin tamamlanma zamanı için hedeflenen değerden pozitif yönlü sapmanın en küçüklenmesidir.

Geliştirilen matematiksel modelin türeteceği çözümleri inceleyebilmek için bir örnek problem türetilmiştir. Örnek probleme ait parametreler ve problemin önerilen model kullanılarak GAMS/Cplex çözücüsüyle çözülmesiyle elde edilen sonuçlar izleyen bölümde yer almaktadır.

### 3.3 Örnek Problem

A işletmesi üretim tesisleri standart olarak haftada 6 işgünü boyunca günde 3 vardiya ve bir vardiya 8 saat olacak şekilde faaliyet göstermektedir. İşletmenin üretim planları ana sanayiden alınan aylık üretim programı verilerine göre 3 günlük çizelgeler halinde hazırlanmaktadır. Ana sanayi kuruluşundan alınan üretim programında 3 günlük planlama periyodu için 6 adet iş bulunmaktadır. Planlanacak 6 adet iş iki farklı kalıp kullanılarak üretilmektedir ve bu işlerin yapılabilirdiği 3 adet özdeş paralel makine bulunmaktadır. Tablo 3.1-3.6'da, mevcut işlere ait işlem süreleri, başlangıç hazırlık süreleri, teslim zamanları, sıra bağımlı hazırlık



süreleri, iş-kalıp ilişkisi, kalıp-makine ilişkisi, iş-makine ilişkisi, makine-vardiya ilişkisini temsil eden parametre değerleri yer almaktadır.

**Tablo 3.1.** Çizelgelenecek İşlere Ait Parametre Değerleri

$j$	$h_j$	$d_j$	$p_j$
1	43	2100	1800
2	87	1900	1415
3	98	2800	1700
4	77	2400	1300
5	46	2600	1715
6	64	3000	2200

Tablo 3.1’de çizelgelenecek işlere ait başlangıç hazırlık süresi ( $h_j$ ), teslim zamanı ( $d_j$ ) ve işlem süresi ( $p_j$ ) bilgileri yer almaktadır. Örneğin 1 numaralı iş çizelgenin ilk sırasında yer alırsa gerekecek hazırlık süresi 43 dakikadır. Ayrıca 1 numaralı işe ait işlem süresi 1800 dakikadır ve yine 1 numaralı işin teslim zamanı çizelgenin sıfır anında başladığı kabul edildiğinde 2100 dakikadır.

**Tablo 3.2.** İş-Kalıp İlişkisi ( $e_{jr}$  parametresi)

$j/r$	1	2
1	1	0
2	1	0
3	0	1
4	1	0
5	0	1
6	0	1

Tablo 3.2’de hangi işin hangi kalıp ile üretilebileceği belirtilmektedir. Örneğin 2 numaralı iş 1 numaralı kalıp ile üretilebilmektedir. 6 numaralı iş ise 2 numaralı kalıp ile üretilebilmektedir.

**Tablo 3.3.** Kalıp-Makine İlişkisi ( $w_{rl}$  parametresi)

$r/l$	1	2	3
1	1	0	1
2	0	1	1

Tablo 3.3’te hangi kalıbın hangi makinelere bağlanabilir olduğu gösterilmektedir. Örneğin 1 numaralı

kalıp 1 ve 3 numaralı makinelere, 2 numaralı kalıp ise 2 ve 3 numaralı makinelere bağlanabilmektedir.

**Tablo 3.4.** İş - Makine İlişkisi ( $b_{jl}$  parametresi)

$j/l$	1	2	3
1	1	0	1
2	1	0	1
3	0	1	1
4	1	0	1
5	0	1	1
6	0	1	1

Tablo 3.4’te hangi işlerin hangi makinelerde üretilebilir olduğu bilgisi yer almaktadır. Örneğin, 1 numaralı işin 1 ve 3 numaralı makinelerde üretilebileceği ancak 2 numaralı makinede üretilemeyeceği görülmektedir. Tabloda yer alan değerler iş-kalıp ilişkisi ( $e_{jr}$ ) ve kalıp-makine ilişkisi ( $w_{rl}$ ) parametre değerleri kullanılarak aşağıda yer alan (28) numaralı formül yardımıyla hesaplanmıştır.

$$b_{jl} = \sum_r e_{j,r} * w_{r,l} \quad \forall j,l \quad (28)$$

**Tablo 3.5.** Makine-Vardiya İlişkisi ( $g_{lv}$  parametresi)

$l/v$	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Tablo 3.5’te hangi makinelerin hangi vardiyalarda çalışabilir durumda olduğu bilgisi yer almaktadır. Yukarıda yer alan bilgilere göre bütün makineler bütün vardiyalarda çalışabilir durumdadır.

**Tablo 3.6.** Sıra Bağımlı Hazırlık Süreleri ( $s_{ij}$  parametresi)

$i/j$	1	2	3	4	5	6
1	0	90	80	90	75	100
2	95	0	100	80	80	70
3	100	100	0	100	75	75
4	95	80	110	0	75	85
5	90	110	115	85	0	90
6	85	80	90	95	100	0

Tablo 3.6’ da işlere ait sıra bağımlı hazırlık süresi bilgileri yer almaktadır. Tabloda yer alan bilgilere göre örneğin 1 numaralı işten hemen sonra 2 numaralı iş çizelgelenirse 90 dakika hazırlık süresi gerekecektir. Ancak 2 numaralı işten hemen sonra 1 numaralı iş çizelgelenirse gerekecek hazırlık süresi 95 dakikadır.

Geliştirilen hedef programlama modeli GAMS/Cplex çözücüsü yardımıyla çözülmüştür. Ayrıca hedef programlamanın yapısı gereği amaç fonksiyonunda yer alan farklı hedeflerin, ağırlıkları değiştirilince önem derecesi fazla olan hedeflere yakın olacak şekilde yeni çözümler türetilmektedir.  $w_1$ : Tüm işler için hedeflenen sıfır gecikmeden pozitif sapmaların enküçüklenmesi amacının ağırlık değeri ve  $w_2$ : Son işin tamamlanma zamanı için belirlenen hedeften pozitif sapmanın enküçüklenmesi amacının ağırlık değeridir.

Amaç fonksiyonunda yer alan hedeflerin eşit ağırlık derecesine sahip olduğu kabul edildiğinde ( $w_1=1$ ,  $w_2=1$ ), GAMS/Cplex çözücüsüyle elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir.

**Tablo 3.7.**  $x_{jkl}$  Karar Değişkeni Değerleri ( $x_{kl} = j$  formatında)

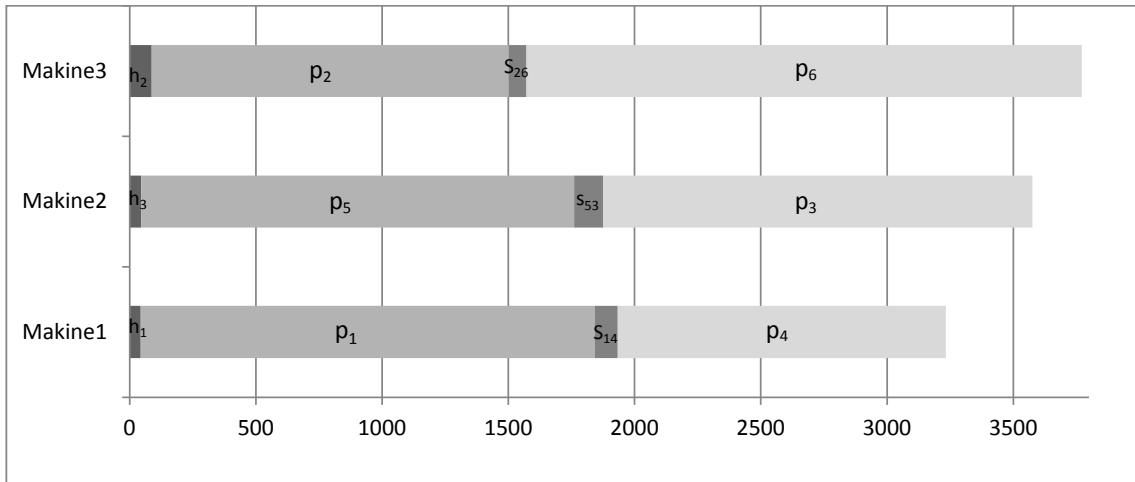
$l / k$	1	2
1	1	4
2	5	3
3	2	6

**Tablo 3.8.** Diğer Karar Değişkenlerinin Değerleri

$j$	$C_j$	$f_j$	$S_{i^+j}$	$q_{jv}$
1	1843	4	-	1,2,3,4
2	1502	4	-	1,2,3,4
3	3576	8	776	4,5,6,7,8
4	3233	7	833	4,5,6,7
5	1761	4	-	1,2,3,4
6	3772	8	772	4,5,6,7,8

Tablo 3.7’de hangi makineye hangi sırada hangi işin atandığı bilgileri yer almaktadır. Örneğin 2 numaralı makineye 1 numaralı sırada 5 numaralı iş atanmıştır. Matematiksel modelde yer alan diğer karar değişkenlerinin aldığı değerler Tablo 3.8’de yer almaktadır. Örneğin 3 numaralı işin tamamlanma zamanı 3576 dakikadır.

Ayrıca 3 numaralı iş 8. vardiyada tamamlanmıştır ve 4, 5, 6, 7 ve 8. vardiyalar boyunca işlem görmeye devam etmiştir. Son olarak 3 numaralı işin teslim zamanının 776 dakika gecikmiş olduğu belirtilebilir. Ayrıca tablodaki bilgilerden  $C_{enb}$  karar değişkeninin 3772 değerini almış olduğu görülmektedir. Elde edilen çözümün Gantt Şeması Şekil 3.1’de verilmiştir.



**Şekil 3.1** Örnek Problemin Gantt Şeması

Amaç fonksiyonunda yer alan hedefler incelendiğinde hedeflenen sıfır gecikmeden pozitif sapmalar toplamı ( $\sum S_1^+$ ) 2381 değerini almaktadır. Diğer bir hedef olan son işin tamamlanma zamanı için belirlenen hedeften pozitif sapma değeri  $S_2^+$  ise 272 değerini almıştır. Amaç fonksiyonunda yer alan hedefler eşit ağırlık derecesine sahip olduğunda amaç fonksiyonu 2653 değerini almaktadır.

Diğer bir durumda, amaç fonksiyonunda yer alan sıfır gecikmeden pozitif sapmalar toplamının ( $\sum S_1^+$ ) önemi 100 olarak belirlenmiştir. Bu durumda önemi artırılan sapma değerinin küçülmesi beklenmektedir.

**Tablo 3.9.**  $x_{jkl}$  karar değişkeni değerleri ( $x_{kl} = j$  formatında)

$l / k$	1	2
1	2	4
2	5	6
3	1	3

Amaç fonksiyonunda yer alan sıfır gecikmeden pozitif sapmalar toplamının ( $\sum S_1^+$ ) öneminin 100 olarak alındığı durum için elde edilen  $x_{jkl}$  karar değişkeni değerleri Tablo 3.9'da yer almaktadır. Örneğin 3 numaralı makineye 2 numaralı sırada 3 numaralı iş atanmıştır. Matematiksel modelde yer alan diğer karar değişkenlerinin aldığı değerler ise Tablo 3.10'da verilmiştir.

**Tablo 3.10.** Diğer Karar Değişkenlerinin Değerleri

$j$	$C_j$	$f_j$	$S_{l_j}^+$	$q_{jv}$
1	1843	4	-	1,2,3,4
2	1502	4	-	1,2,3,4
3	3623	8	823	4,5,6,7,8
4	2882	7	482	4,5,6,7
5	1761	4	-	1,2,3,4
6	4051	9	1051	4,5,6,7,8,9

Tablo 3.10'da görülebileceği gibi 3 numaralı işin tamamlanma zamanı 3623 dakikadır. Ayrıca 3 numaralı iş 8.vardiyada tamamlanmıştır ve 4., 5., 6., 7. ve 8. vardiyalar boyunca işlem görmeye devam etmiştir.

Son olarak 3 numaralı işin teslim zamanının 823 dakika gecikmiş olduğu belirtilebilir. Ayrıca tablodaki bilgilerden  $C_{enb}$  karar değişkeninin 4051 değerini almış olduğu görülmektedir.

Amaç fonksiyonunda yer alan hedefler incelendiğinde hedeflenen sıfır gecikmeden pozitif sapmalar toplamı ( $\sum S_1^+$ ) 2356 değerini almaktadır. Diğer bir hedef olan son işin tamamlanma zamanı için belirlenen hedeften pozitif sapma değeri  $S_2^+$  ise 551 değerini almıştır. Amaç fonksiyonunda yer alan hedefler arasında 100 / 1 ilişkisi olduğu durumda sıfır gecikmeden pozitif sapmalar toplamı ( $\sum S_1^+$ ) beklendiği üzere 25 dakika azalmıştır. Ancak son işin tamamlanma zamanı için belirlenen hedeften pozitif sapma değeri  $S_2^+$  ise 279 dakika artmıştır.

### 3.4 Gerçek Hayat Problemi

İşletmeden alınan veriler yardımıyla 10 iş, 6 makine ve 3 vardiya çizelgelenmesi için orta boyutlu bir gerçek hayat problemi oluşturulmuştur. Problemin parametre değerleri Tablo 3.11-3.16'da yer almaktadır.

**Tablo 3.11.** Çizelgelenecek İşlere Ait Parametre Değerleri

$j$	$h_j$	$d_j$	$p_j$
1	85	2560	290
2	85	10080	260
3	85	3780	885
4	85	1230	310
5	85	1230	960
6	85	1230	860
7	85	1230	290
8	85	3780	295
9	85	1230	645
10	85	2560	330

Tablo 3.11'de çizelgelenecek işlere ait  $h_j$ ,  $d_j$  ve  $p_j$  parametrelerinin değerleri yer almaktadır. Örneğin 1 numaralı iş çizelgenin ilk sırasında yer alırsa gerekecek hazırlık süresi 85, işlem süresi 290 ve teslim zamanı da 2560 dakikadır.

Tablo 3.12'de gerçek hayat probleminde çizelgelenecek işlerin hangi kalıplarla üretilebileceğini

**Tablo 3.12.** İş-Kalıp İlişkisi ( $e_r$  parametresi)

$j/r$	1	2	3	4	5	6
1	1	0	0	0	0	0
2	1	0	0	0	0	0
3	0	1	0	0	0	0
4	0	0	1	0	0	0
5	0	0	0	1	0	0
6	0	0	0	0	1	0
7	0	0	0	0	0	1
8	0	0	0	0	0	1
9	0	0	0	0	0	1
10	1	0	0	0	0	0

gösteren iş-kalıp ilişkisi parametre değerleri yer almaktadır. Örneğin 4 numaralı iş 3 numaralı kalıp ile üretilebilmektedir.

**Tablo 3.13.** Kalıp-Makine İlişkisi ( $w_r$  parametresi)

$r/l$	1	2	3	4	5	6
1	1	0	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1
3	1	0	1	1	1	1
4	1	0	1	1	1	1
5	1	0	1	1	1	1
6	1	0	1	1	1	1

Tablo 3.13'te kalıpların hangi makinelere bağlanabileceğini gösteren kalıp-makine ilişkisi parametre değerleri yer almaktadır. Tabloda incelendiğinde,

**Tablo 3.14.** İş-Makine İlişkisi ( $b_{jl}$  parametresi)

$j/l$	1	2	3	4	5	6
1	1	0	1	1	1	1
2	1	0	1	1	1	1
3	1	1	1	1	1	1
4	1	0	1	1	1	1
5	1	0	1	1	1	1
6	1	0	1	1	1	1
7	1	0	1	1	1	1
8	1	0	1	1	1	1
9	1	0	1	1	1	1
10	1	0	1	1	1	1

örneğin, 2 numaralı kalıp dışında diğer kalıpların 2 numaralı makineye bağlanmaya uygun olmadığı görülmektedir.

Tablo 3.14'te işlerin hangi makinelerde üretilebileceğini gösteren iş-makine ilişkisi parametre değerleri yer almaktadır. Tabloda yer alan verilere göre 2 numaralı makineye sadece 3 numaralı iş atanabilir durumdadır. Bunun dışında kalan diğer işler ise 2 numaralı makine dışındaki tüm makinelere atanabilir durumdadır.

**Tablo 3.15.** Makine-Vardiya İlişkisi ( $g_{lv}$  parametresi)

$l/v$	1	2	3
1	1	1	1
2	1	1	1
3	1	1	1
4	1	1	1
5	1	1	1
6	1	1	1

Tablo 3.15'te makinelerin hangi vardiyalarda çalışmaya elverişli olduğu bilgisi yer almaktadır. Mevcut durum değerlerine göre bütün makineler belirlenen planlama döneminde çalışmaya elverişlidir.

Tablo 3.16'da çizelgelenen işler için sıra bağımlı hazırlık süreleri yer almaktadır. Örneğin 1 numaralı işten hemen sonra 2 numaralı iş çizelgelenirse gerekli olan hazırlık süresi 90 dakikadır. Ancak 2 numaralı işten hemen sonra 1 numaralı iş çizelgelenirse gerekli olan hazırlık süresi 30 dakikadır.

Geliştirilen hedef programlama modeli, hedeflerin eşit öneme sahip olduğu durum göz önünde bulundurularak GAMS/Cplex ile 84 saniyede çözülmüştür.

Tablo 3.17'de işletmenin oluşturduğu çizelge için  $x_{jkl}$  karar değişkeni değerleri  $x_{kl} = j$  formatında yer almaktadır. Örneğin 1 numaralı iş 1 numaralı makinede ilk sırada 10 numaralı iş 1 numaralı makinede ikinci sırada işlem görmektedir.

İşletmenin oluşturduğu çizelge için diğer karar değişkeni değerleri ise Tablo 3.18'de yer almaktadır. Örneğin 8 numaralı işin tamamlanma zamanı 1395

**Tablo 3.16.** Sıra Bağımlı Hazırlık Süreleri ( $s_{ij}$  parametresi)

$i / j$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	90	240	240	240	240	240	210	240	0
2	30	0	180	180	180	180	180	120	180	30
3	150	200	0	120	120	120	120	200	120	150
4	150	200	120	0	120	120	120	200	120	150
5	150	200	120	120	0	120	120	200	120	150
6	150	200	120	120	120	0	120	200	120	150
7	150	200	120	120	120	120	0	90	0	150
8	140	120	180	180	180	180	60	0	60	140
9	150	200	120	120	120	120	0	80	0	150
10	0	90	240	240	240	240	240	210	240	0

**Tablo 3.17.** İşletmenin Oluşturduğu Çizelge İçin  $x_{jkl}$  Karar Değişkeni Değerleri ( $x_{kl} = j$ )

$l / k$	1	2	3
1	1	10	2
2	3	-	-
3	4	-	-
4	5	-	-
5	6	-	-
6	7	9	8

**Tablo 3.18.** İşletmenin Oluşturduğu Çizelge İçin Diğer Karar Değişkeni Değerleri

$j$	$C_j$	$f_j$	$SI^{+j}$	$qjv$
1	375	1	-	1
2	1055	2	-	2
3	970	2	-	1,2
4	395	1	-	1
5	1045	2	-	1,2
6	945	2	-	1,2
7	375	1	-	1
8	1395	3	-	2,3
9	1020	2	-	1,2
10	705	2	-	1,2

dakikadır. Aynı zamanda 8 numaralı iş 2 ve 3 numaralı vardiyalarda işlem görmüştür. İşletmenin çizelgesine

göre bütün işler teslim tarihlerine uygun olarak çizelgelenmiştir ve son işin tamamlanma zamanı 1395 değerini almıştır. Son işin tamamlanma zamanı için hedeflenen değer 1260 dakikadır ve son işin tamamlanma zamanı için hedeflenen değerden pozitif sapma değişkeni 135 değerini almıştır.

Tablo 3.19 ve 3.20'de gerçek hayat probleminin önerilen hedef programlama modeli kullanılarak GAMS/Cplex'te çözümlenmesiyle elde edilen karar değişkeni değerleri yer almaktadır.

**Tablo 3.19.** Gerçek Problem İçin Elde Edilen  $x_{jkl}$  Karar Değişkeni Değerleri ( $x_{kl} = j$ )

$l / k$	1	2	3
1	8	4	-
2	3	-	-
3	1	10	2
4	5	-	-
5	6	-	-
6	7	9	-

Tablo 3.19'da gerçek problem için elde edilen  $x_{jkl}$  karar değişkeni değerleri yer almaktadır. Örneğin 8 numaralı iş 1 numaralı makinede birinci sırada işlem görmektedir. Bunun yanı sıra 4 numaralı iş 1 numaralı makinede ikinci sırada işlem görmektedir.

Tablo 3.20'de gerçek hayat problemi için hedef programlama modeliyle elde edilen diğer karar değiş-

**Tablo 3.20.** Gerçek Problem İçin Elde Edilen Diğer Karar Değişkeni Değerleri

$j$	$C_j$	$f_j$	$S_j^{*j}$	$q_{jv}$
1	375	1	-	1
2	1055	2	-	2
3	970	2	-	1
4	870	2	-	1
5	1045	2	-	1
6	945	2	-	1
7	375	1	-	1
8	380	1	-	1
9	1020	2	-	1
10	705	2	-	1

keni değerleri yer almaktadır. Örneğin, 4 numaralı işin tamamlanma zamanı 870 dakikadır. 4 numaralı iş 2 numaralı vardiyada sona ermiştir ve 1 ve 2 numaralı vardiyalarda işlem görmüştür. Ayrıca çizelgelenen bütün işler teslim zamanlarına uygun olarak çizelgelenmiştir. Son işin tamamlanma zamanı 1055 değerini almıştır ve bu değer son işin tamamlanma zamanı için

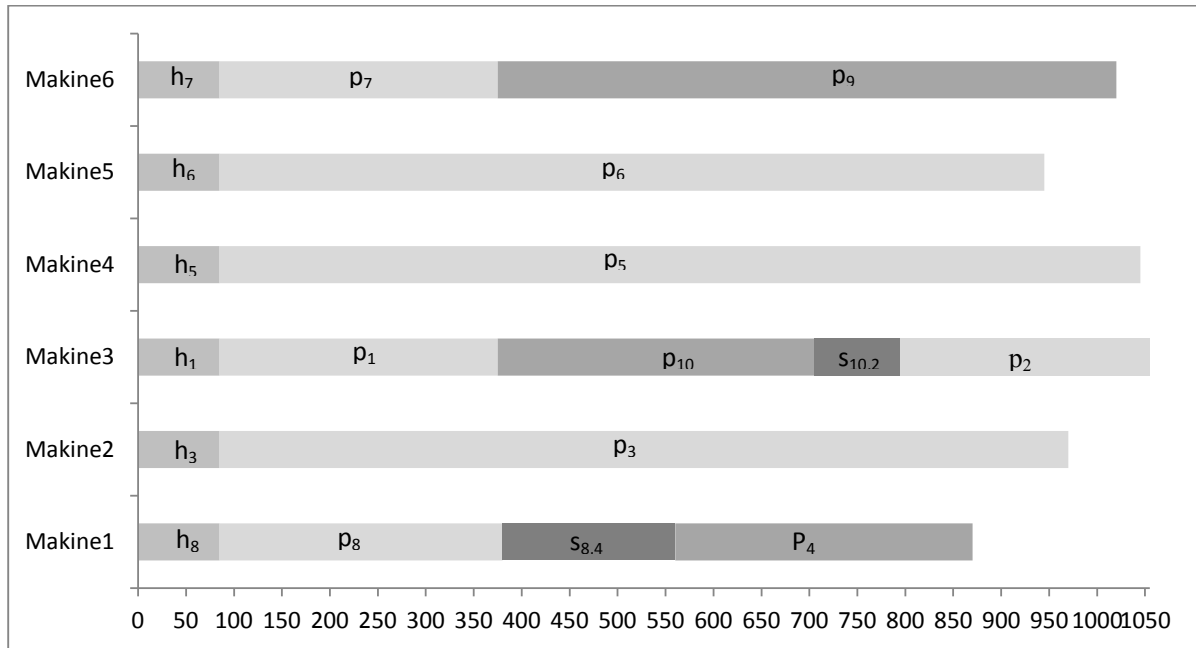
hedeflenen değerden daha küçüktür. Bu durumda  $S_2^-$  karar değişkeni 205 değerini almaktadır. Elde edilen çözümün Gantt Şeması Şekil 3.2'de verilmiştir.

Aşağıdaki tabloda işletmenin çizelgesi ve önerilen modelle elde edilen hedef değerlerinin karşılaştırması yer almaktadır.

**Tablo 3.21.** Sonuçların Karşılaştırılması

	$\sum T_j$	$C_{enb}$
Önerilen Model	0	1055
İşletmenin Çizelgesi	0	1395

Tablo 3.21'de yer alan sonuçlara göre  $\sum T_j$  değeri hem işletme tarafından hazırlanan çizelgede hem de önerilen modelle elde edilen çizelgede sıfır değerini almaktadır. Bu durum işlerin teslim zamanlarına uygun olarak çizelgelendiği anlamına gelmektedir. Ancak son işin tamamlanma zamanını temsil eden  $C_{enb}$  değeri işletme tarafından hazırlanan çizelgede 1395 değerini alırken önerilen modelle elde edilen çizelgede 1055 değerini almaktadır. Sonuçlar karşılaştırıldığında önerilen modelle elde edilen çizelge ile son işin tamamlanma zamanı için % 24'lük bir iyileş-

**Şekil 3.2.** Gerçek Problemin Gantt Şeması

tirme sağlanmıştır. Ayrıca her iki hedef değerine de ulaşılmıştır. Ayrıca büyük boyutlu bir problemin (30 iş, 11 makine, 12 vardiya) önerilen modelle çözülmesi denenmiş ancak GAMS / Cplex çözücüsüyle çözüm elde edilememiştir.

#### 4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada bir plastik parça üreticisinin üretim tesislerinde yer alan plastik enjeksiyon makinelerinde ürünlerin hangi sırayla üretilmesi gerektiğinin belirlendiği  $n$  iş  $m$  makine özdeş paralel makine çizelgeleme problemi ele alınmıştır. Çalışma, ele alınan süreç özellikleri ve vardiya bazlı çizelgeleme yapılması nedeniyle literatürde ilk olma özelliğini taşımaktadır. Gerçek hayatta çizelgeleme yapılırken vardiyalara ait bilgilerin dahil edilmesi kaçınılmazdır. Önerilen model bunu mümkün kılmaktadır.

Ele alınan problemin çözümü için bir hedef programlama modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen hedef programlama modeli ile küçük boyutlu problemin ve işletmeden alınan verilere dayalı orta boyutlu problemin çözümüne ulaşılabilirken, yine işletmeden alınan verilerle oluşturulan büyük boyutlu problem için ise çözüm elde edilememiştir.

Çalışmanın devamında, büyük boyutlu problemlerin çözümü için sezgisel yöntemlere başvurulması önerilmektedir. Ayrıca verileri ve çözüm sonrası elde edilecek sonuçları değerlendirmek ve düzenlemek için bir ara yüz geliştirilmesi önerilmektedir.

#### KAYNAKÇA

1. 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.
2. Balakrishnan, N., Kanet, J. J., Sridharan, S. V., 1999. Early/tardy Scheduling with Sequence Dependent Setups on Uniform Paralel Machines. *Computers and Operations Research* 26, 127-141.
3. Sivrikaya – Serifoglu, F., Ulusoy, G., 1999. Parallel Machine Scheduling with Earliness and Tardiness Penalties. *Computers and Operations Research* 26, 773-787.
4. Vignier, A., Sonntag, B., Portmann, M. C., 1999. Hybrid Method for a Parallel Machine Scheduling Problem. *IEEE Symposium on Emerging Technologies and Factory Automation, ETFA 1*, 671-678.
5. Park, Y., Kim, S., Lee, Y. H., 2000. Scheduling Jobs on Parallel Machines Applying Neural Network and Heuristic rules. *Computers and Industrial Engineering* 38, 189-202.
6. Radhakrishnan, S., Ventura, J. A., 2000. Simulated Annealing for Parallel Machine Scheduling with Earliness - tardiness Penalties and Sequence – Dependent Set – Up Times. *International Journal of Production Research* 38, 2233-2252.
7. Zhu, Z., Heady, R. B., 2000. Minimizing the Sum of Earliness/tardiness in Multi Machine Scheduling : A Mixed Integer Programming Approach. *Computers and Industrial Engineering* 38, 297-305.
8. Gendreau, M., Laporte, G., Guimaraes, E. M., 2001. A Divide and Merge Heuristic for the Multiprocessor Scheduling Problem with Sequence Dependent Setup Times. *European Journal of Production Research* 133, 183-189.
9. Kurz, M.E., Askin, R.G., 2001. Heuristic Scheduling of Parallel Machines with Sequence – Dependent Set – Up Times. *International Journal of Production Research* 39, 3747-3769.
10. Pinedo, M., 2002. *Scheduling: Theory, Algorithms and Systems*. 2nd Ed., Prentice Hall, 568p.
11. Tahar, D.N., Yalaoui, F., Chu, C., Amadeo, L., 2006. A Linear Programming Approach for Identical Parallel Machine Scheduling with Job Splitting and Sequence Dependent Setup Times. *International Journal of Production Economics* 99, 63-73.
12. Saraç, T., 2007, Genelleştirilmiş Karesel Çoklu Sırt Çantası Problemi İçin Melez Bir Çözüm Yaklaşımı, Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Ü. Fen Bil. Ens., s.90 – 108.
13. Allahverdi, A. 2008. A Survey of Scheduling Problems with Setup Times or Costs. *European Journal of Operational Research* 187, 985-1032.
14. Gharehgozli, A. H., Tavakkoli – Moghaddam, R. Zaerpour, N. 2008. A Fuzzy – Mixed Integer Goal Programming Model for a Parallel – machine Scheduling Problem with Sequence – Dependent Setup Times and Release Dates.
15. Toksari, M. D., Guner. E., 2009. Parallel Machine Scheduling Problem to Minimize the Earliness/tardiness Costs with Learning Effect and Deteriorating Jobs.