

# BİR OTOMOTİV YAN SANAYİ FİRMASI İÇİN PARTİ BÜYÜKLÜĞÜ BELİRLEME VE ÇİZELGELEME SİSTEMİNİN GELİŞTİRİLMESİ

Sercan EMİNOĞLU, Neslihan GEZER, Fulya KADI, Tülin İNKAYA, Betül YAĞMAHAN\*

Uludağ Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Bursa  
sercaneminoglu@gmail.com, gezerneslihan@gmail.com, fulyakadi@gmail.com, tinkaya@uludag.edu.tr, betul@uludag.edu.tr

Geliş Tarihi: 30.11.2015; Kabul Ediliş Tarihi: 20.12.2015

## ÖZ

Bu çalışmada, bir otomotiv yan sanayi firmasındaki parti büyüklüğü belirleme ve çizelgeleme problemi ele alınmıştır. Mevcut sistemin analizi sonucunda, kalıp-pres atamalarında uygunsuzluklar, buna bağlı oluşan kalite kayıpları, gerçekleşen ile planlanan üretim miktarları arasında farklar, operatör sayısında dengesizlikler, hazırlık sayılarında ve envanter miktarlarında fazlalıklar gözlenmiştir. Bu problem, kısıtlandırılmış parti büyüklüğüne sahip ilişkisiz paralel makine çizelgeleme problemi şeklinde ele alınmış ve çözümü için karışık tamsayı programlama modeli geliştirilmiştir. Problemin NP-zor olması nedeniyle, makul sürede optimale yakın bir çözüm elde edebilmek için optimizasyon tabanlı sezgisel bir algoritma olan gevşet ve sabitle algoritması kullanılmıştır. Önerilen algoritma, problemi alt problemlere ayırarak çözülmesini sağlamaktadır. Elde edilen üretim planı, firmanın mevcut çizelgeleme sistemiyle hazırlanan üretim planı ile karşılaştırıldığında, hazırlık sayısı ve envanter miktarının iyileştirildiği, uygun kalıp-pres atamaları nedeniyle kalite kayıplarının azaltıldığı ve operatör sayılarının dengeli olarak belirlendiği görülmüştür. Ayrıca, önerilen yaklaşımın firmada kullanımını kolaylaştırmak için bir çizelgeleme yazılımı geliştirilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Paralel makine çizelgeleme, parti büyüklüğü belirleme, karışık tamsayı programlama modeli, sezgisel

## DEVELOPMENT OF A LOT SIZING AND SCHEDULING SYSTEM FOR AN AUTOMOTIVE SUPPLIER

### ABSTRACT

In this study, lot sizing and scheduling problem is considered in an automotive supplier. As a result of the current system analysis, inappropriate mold-press machine assignments, quality losses due to these inappropriate assignments, differences between the planned and actual production amounts, unbalanced number of operators, excess number of setups and excess amount of inventory are observed. This problem is considered as an unrelated parallel machine capacitated lot-sizing and scheduling problem, and a mixed integer programming model is developed for its solution. As the problem is NP-hard, the relax and fix algorithm, an optimization-based heuristic, is used to obtain a near-optimal solution in a reasonable time. The proposed algorithm provides a solution by decomposing the problem into subproblems. When the resulting production plan was compared with the production plan prepared by the current scheduling system; it is shown that there were improvements in the number of setups and amount of inventory, decreases in the quality losses due to appropriate mold-press machine assignments, and balanced number of operators. Moreover, a scheduling software package was developed to facilitate the use of the proposed approach in the company.

**Keywords:** Parallel machine scheduling, lot sizing, mixed integer programming model, heuristic

\* İletişim yazarı

## 1. GİRİŞ

Artan rekabet ortamında müşteri beklentilerinin zamanında karşılanması büyük önem arz etmektedir. Bu nedenle, firmalar özellikle operasyonel seviyedeki kararların hızlı ve etkin bir şekilde alınmasını sağlayacak çözüm araçlarına ihtiyaç duymaktadır. Operasyonel seviyedeki en önemli kararlardan biri, üretim planlama ve çizelgeleme faaliyetleridir. Bu faaliyetleri gerçekleştiren çözüm araçları, üretim sistemindeki dinamik yapıyı dikkate almalıdır. Ayrıca, kısıtlı kaynakları verimli bir şekilde kullanarak müşteri talebini zamanında karşılamalıdır. Bir diğer önemli husus ise firmanın çıkarları doğrultusunda en düşük maliyetli planın oluşturulmasıdır.

Bu çalışma, otomotiv sektöründe faaliyet gösteren bir yan sanayi firmasının üretim planlama departmanında gerçekleştirilmiştir. Mevcut sistem analiz edildiğinde, üretim planlama mühendisinin çizelgelemeyi sezgilerini kullanarak yaptığı gözlenmiştir. Ancak bu yöntem, hızlı ve etkin çözümler üretmekte yetersiz kalmaktadır. Firmaya ait problem, literatürde kısıtlandırılmış parti büyüklüğüne sahip ilişkisiz paralel makine çizelgeleme problemine karşılık gelmektedir. Firmanın ihtiyaçları doğrultusunda optimizasyon tabanlı bir çizelgeleme yazılımı geliştirilmiştir. Yazılım, gevşet ve sabitle algoritmasını kullanarak makul sürede optimale yakın sonuçlar üretmektedir. Algoritmada kullanılan karışık tamsayı matematiksel model, literatürde var olan diğer çizelgeleme modellerine göre gerçek hayatta uygulanabilirliği ve kısıtlarının özgünlüğü nedeniyle farklılık oluşturmaktadır.

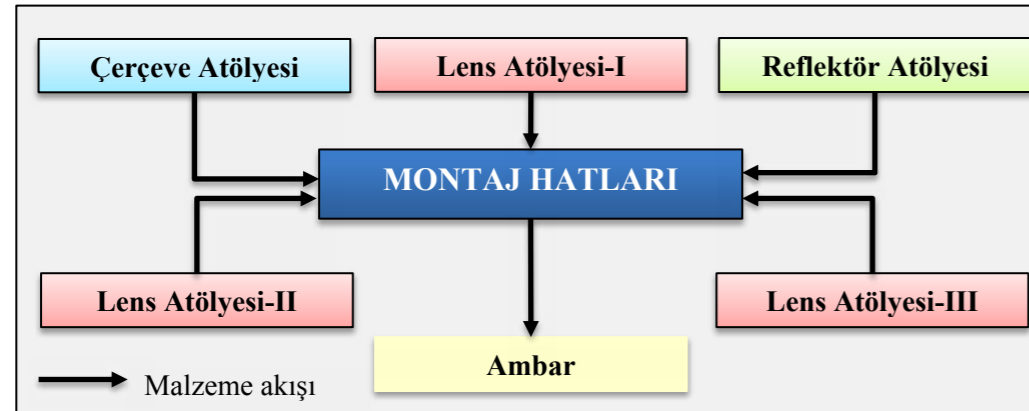
Geliştirilen çizelgeleme yazılımı, ulusal düzeyde katma değer yaratarak akademik bilgi ve becerinin ürüne dönüştürülmesini sağlamıştır. Ayrıca, benzer üretim süreçlerine sahip diğer firmalar tarafından kullanılabilmesi yönüyle esnek bir yapıya sahiptir. Önerilen matematiksel modelin, sezgisel yaklaşımın ve geliştirilen yazılımın özgünlüğü ile uluslararası düzeyde literatüre katkı sağlanmıştır.

Çalışmanın ikinci bölümü, firmadaki mevcut sistemin analizini ve problem tanımını içermektedir. Üçüncü bölümde, ele alınan problem ile ilgili literatür araştırması bulunmaktadır. Dördüncü bölümde, geliştirilen karışık tamsayı programlama modeli, bu modelin doğrulanması ile önerilen gevşet ve sabitle sezgiseli açıklanmıştır. Beşinci bölümde, önerilen yaklaşımın performansı değerlendirilmiş ve duyarlılık analizi yapılmıştır. Ayrıca bu bölümde, geliştirilen yazılımın firmadaki uygulama aşaması yer almaktadır. Çalışmanın son bölümünde ise elde edilen sonuçlar ve yorumlar bulunmaktadır.

## 2. MEVCUT SİSTEM

### 2.1 Sistemin Analizi

Firma, elektromekanik cihazlar, havalandırma ve aydınlatma sistemleri üretmektedir. 2014 yılı itibarıyla, 19 firmaya ürün sevkiyatı yapılmakta ve bünyesinde 1226 personel çalışmaktadır. Üretim günde üç vardiya olarak yapılmakta ve her vardiyadaki üretim süresi 7,5 saattir.



Şekil 1. Fabrika Yerleşim Planı

Üretim süreci, ön üretim ve montaj aşamalarından oluşmaktadır. Ön üretim; çerçeve, reflektör ve lens atölyelerinde yapılmaktadır. Bu atölyelerde üretilen parçalar montaj aşamasında birleştirilmektedir. Üretimi tamamlanan ürünler ambarda depolanmaktadır. Fabrikaya ait yerleşim planı Şekil 1’de verilmiştir. Ön üretim atölyelerindeki üretim süreçleri benzerlik göstermektedir. Ayrıca, bu atölyelerde farklı ürünler ortak kaynakları kullandığı için darboğazlar oluşmaktadır. Montajda ise her ürün için ayrı bir hat mevcuttur.

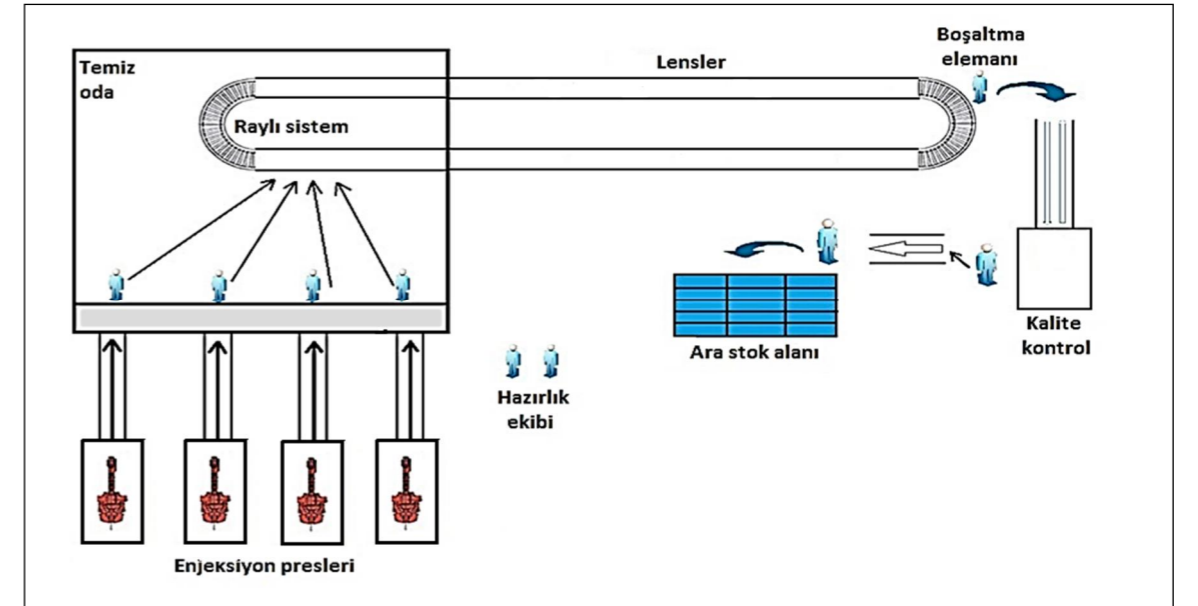
Montaj hatlarının üretim planları müşteri portalından alınan taleplere göre yapılmaktadır. Ön üretim süreçlerinin üretim planı ise montajı besleyecek şekilde oluşturulmaktadır. Ortak kaynak kullanımı nedeniyle oluşan darboğazlar dikkate alınarak bu çalışma kapsamında, ön üretimdeki üç lens atölyesi incelenmiştir.

Lens atölyesinde ilk olarak, tam otomatik enjeksiyon preslerinde kalıplara hammadde enjekte edilerek lensler şekillendirilir. Preslerden çıkan şekillendirilmiş lensler, otomatik raylı sistem aracılığıyla temiz odaya taşınır. Temiz odada görsel kontrol yapıldıktan sonra operatörler tarafından raylı sisteme yüklenir. Raylı sistemden geçen lensler, kalite kontrol ve paketleme bölgesine aktarılır. Son olarak, üretimi tamamlanan lensler, montaj hatlarını

beslemek üzere yarı mamul stok alanında depolanır. Bir lens atölyesindeki yerleşim planı Şekil 2’de verilmiştir.

Lens atölyelerinde yapılan gözlemler sonucu aşağıdaki veriler tespit edilmiştir:

- Üç lens atölyesinde toplam dokuz adet pres makinesi ve 36 adet kalıp bulunmaktadır.
- Her preste kullanılabilecek tanımlı kalıp aileleri vardır.
- Her ürün kendine ait yalnızca bir kalıpta üretilmektedir.
- Hazırlık işlemi, iki kişiden oluşan bir hazırlık ekibi ile gerçekleştirilmektedir.
- Hazırlık süresi, ürünlerin işleme girme sırasına göre değişmektedir.
- Çalışan operatör sayısı, açık olan pres sayısı ile doğru orantılıdır.
- Her vardiyadaki operatör sayısı dağılımı, kalıp-pres atamaları, hazırlık faaliyetleri ve üretim miktarları üretim planlama mühendisinin sezgileri doğrultusunda belirlenmektedir. Bu amaçla, Excel tabloları kullanılmaktadır.
- Bir vardiyada bir prese birden fazla sayıda hazırlık işlemi yapılabilir.



Şekil 2. Lens Atölyesi Yerleşim Planı

## 2.2 Problem Tanımı

Mevcut sistemin analizi sonucunda, gözlenen problemler üç ana başlıkta toplanmıştır:

### a) Planlama

- Üretim planı, haftalık olarak hazırlanmaktadır. Ancak her gün, ertesi günün planı yenilenmekte ve bu işlem yaklaşık dört saat sürmektedir.
- Planlama esnasında, hazırlık sayısı ve envanter miktarını dengelemek için bir kalıp en az iki vardiya boyunca kullanılacak şekilde preslere atanmaktadır.
- Planlanan ve gerçekleşen üretim miktarları arasında farklar oluşmaktadır.
- Planlananın dışında hazırlık faaliyetleri yapılmaktadır. Ayrıca bazı hazırlık faaliyetleri planlanmasına rağmen gerçekleştirilememektedir.

### b) Üretim

- Uygun olmayan kalıp-pres atamalarından dolayı kalite kayıpları oluşmakta ve iskartaya ayrılan ürün miktarı artmaktadır.
- Vardiyalar arasında dengesiz operatör dağılımı oluşmaktadır.
- Montaj hattı zamanında beslenememektedir. Bu nedenle, müşteri talepleri zamanında karşılanamamaktadır.

### c) Envanter

- Firmada yüksek miktarda envanter tutulmaktadır.
- Depolama alanları verimsiz kullanılmaktadır.

Bu çalışmada, var olan problemleri ortadan kaldıracak bir üretim planlama ve çizelgeleme sisteminin geliştirilmesi hedeflenmiştir. Bu sistem ile her vardiyada her ürün için üretim ve envanter miktarları, atölyedeki hazırlık faaliyetleri ve çalışacak operatör sayısı belirlenmek istenmektedir.

## 3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Üretimde hangi kaynakların, ne zaman ve nasıl kullanılacaklarının tespit edilmesi ve işlerin hangi sırayla üretileceğinin belirlenmesi çizelgelemenin tanımını

oluşturmaktadır. Etkin bir çizelgeleme sayesinde, faaliyetler daha az kaynak kullanarak daha kısa zamanda yapılabilmektedir (Baker ve Trietsch, 2009).

Bu çalışmada ele alınan problem, mevcut kısıtlar ve amaçlar dikkate alındığında, “kısıtlandırılmış parti büyüklüğüne sahip ilişkisiz paralel makine çizelgeleme problemi” (*the unrelated parallel machine capacitated lot-sizing and scheduling problem*) olduğu belirlenmiştir. İlişkisiz paralel makine çizelgeleme probleminde,  $n$  adet tek işlemden oluşan iş, ürün bazında farklı işlem hızına sahip  $m$  paralel makinede üretilebilmekte ve hangi işin hangi makinede hangi sıra ile üretileceği kararları verilmektedir. Ayrıca kapasite kısıtı altında belirli bir  $t$  döneminde üretilmesi gereken parti büyüklüklerinin tespit edilmesi gerekmektedir. Bu probleme ek olarak mevcut sistemde, işler arasında sıra bağımlı hazırlık zamanları (*sequence-dependent setup times*), hazırlığın vardiyalar arasında devam edebilmesiyle hazırlık taşıma (*setup carry-over*), her ürünün her makinede işlenemesinden kaynaklı makine uygunluğu (*machine eligibility*) ve ürünlerin belirli makinelerde üretilmesi ile kalitenin artırılması amacıyla tercih kısıtları (*preference constraints*) mevcuttur.

Bu konu ile ilgili literatürde çalışmalar mevcuttur. Carreno (1990), hazırlık, üretim ve envanter maliyetlerinin minimizasyonunu amaçlayan özdeş paralel makine parti büyüklüğü çizelgeleme problemini ele almıştır. Öncelikle problemin matematiksel formülasyonu oluşturulmuştur ve çözümü için sezgisel bir yaklaşım önerilmiştir.

Kang vd. (1999), sıra bağımlı hazırlık zamanlı paralel makine parti büyüklüğü belirleme ve çizelgeleme problemi için sütun oluşturma (*column generation*) yaklaşımını geliştirmişlerdir.

Clark ve Clark (2000), sıra bağımlı hazırlık zamanlı paralel makine parti büyüklüğü belirleme ve çizelgeleme problemi için kayan planlama ufku (*rolling-horizon*) bazlı yaklaşık modeller kullanmışlardır.

Meyr (2002), sıra bağımlı hazırlık zamanlı, birikmiş işlere izin verilmeyen özdeş olmayan paralel makine problemi için hazırlık, elde tutma ve üretim maliyetlerinin minimizasyonunu amaçlayan eşik kabul algoritması

(*threshold accepting algorithm*) ve tavlama benzetimi yerel arama metasezgisellerini önermiştir.

Dastidar ve Nagi (2005), enjeksiyon kalıp çizelgeleme problemini sıra bağımlı hazırlık zamanlı paralel makine çizelgeleme problemi şeklinde tanımlamışlardır. Toplam elde tutma, erteleme ve hazırlık maliyeti minimizasyonunu amaçlayan bir matematiksel model geliştirmişler ve çözümü için iki aşamalı iş merkezi tabanlı bir ayrıştırma planı tanımlamışlardır.

Marinelli vd. (2007), bir paketleme tesisindeki ortak tamponların kullanıldığı paralel makine parti büyüklüğü belirleme ve çizelgeleme problemi için sezgisel bir yaklaşım önermişlerdir.

Beraldi vd. (2008), sıra bağımlı hazırlık zamanlı özdeş paralel makine parti büyüklüğü belirleme ve çizelgeleme problemi için kayan planlama ufku ve sabitle ve gevşet (*fix and relax*) sezgiselleri geliştirmişlerdir.

Jans (2009), hazırlık zamanlı özdeş paralel makine parti büyüklüğü belirleme ve çizelgeleme problemi için geliştirilen matematiksel modelin çözümünde simetrikliği ortadan kaldırmak için yeni kısıtlar tanımlamıştır.

Quadt ve Kuhn (2009), hazırlık zamanlı, hazırlık taşımanın ve sipariş ertelemenin yapılabildiği kısıtlandırılmış parti büyüklüğüne sahip paralel makine çizelgeleme problemi için karışık tamsayılı matematiksel model geliştirmişler ve çözümü için sezgisel yaklaşım önermişlerdir.

James ve Almada-Lobo (2011), kısıtlandırılmış parti büyüklüğüne sahip sıra bağımlı hazırlık zamanı olan tek ve paralel makine çizelgeleme probleminde optimale yakın çözüm bulmak için karışık tamsayılı programlama tabanlı iteratif komşuluk arama sezgisel yaklaşımı geliştirmişlerdir.

Koçanlı vd. (2012), sıra bağımlı hazırlık zamanı, işlerin farklı geliş zamanlarının olduğu ve makine uygunluğu kısıtına sahip özdeş paralel makine çizelgeleme probleminin olduğu bir uygulama çalışması gerçekleştirmişlerdir. Problem için bir hedef programlama modeli ve genetik algoritma geliştirmişlerdir.

Xiao vd. (2013), kısıtlandırılmış parti büyüklüğüne sahip sıra bağımlı hazırlık zamanları, zaman penceresi,

makine uygunluğu ve tercih kısıtlarına sahip paralel makine çizelgeleme problemi için iki karışık tamsayılı programlama tabanlı sabitle ve eniyile (*fix and optimize*) algoritmaları önermişlerdir.

İncelenen bu çalışmalar arasında ele alınan probleme çözüm getirebilecek en uygun yaklaşım, Xiao vd. (2013) tarafından önerilen karışık tamsayılı matematiksel programlama modelidir.

## 4. ÖNERİLEN ÇÖZÜM YAKLAŞIMLARI

### 4.1 Karışık Tamsayılı Programlama Modeli

Bu çalışmada, firmanın ihtiyacı doğrultusunda Xiao vd. (2013) tarafından önerilen matematiksel modele, lens üretiminde çalışan operatör sayılarını vardiyalar bazında dengeli bir şekilde belirleyecek kısıtlar ile maksimum envanter seviyesi ve emniyet envanteri (minimum envanter seviyesi) ile ilgili kısıtlar eklenmiştir.

Modele ait notasyon, amaç fonksiyonu ve kısıtlar aşağıda verilmiştir.

#### Parametreler:

$M$	pres sayısı	$m = 1, 2, \dots, M$
$J$	kalıp (ürün) sayısı	$j = 1, 2, \dots, J$
$T$	vardiya sayısı	$t = 1, 2, \dots, T$
$G$	gün sayısı	$g = 1, 2, \dots, \lceil T/3 \rceil$
$h_j$	$j$ 'inci ürünün birim elde tutma maliyeti	
$\alpha_m$	$m$ 'incipres için hazırlık maliyeti katsayısı	
$\beta$	pres tercihi için ödül katsayısı	
$\rho$	operatör maliyeti katsayısı	
$d_{jt}$	$j$ 'inci ürünün $t$ 'inci vardiyadaki talep miktarı	
$p_{mj}$	$j$ 'inci ürünün $m$ 'inci preste birim üretim süresi	
$\tau_{ji}$	$j$ 'inci ürün ile $i$ 'inci ürün arasındaki sıra bağımlı hazırlık süresi	
$M_{mj}$	$\begin{cases} 1, & m \text{ 'inci pres } j \text{ 'inci ürün üretmek için uygunsa} \\ 0, & \text{diğer} \end{cases}$	
$\Omega_{mj}$	$j$ 'inci ürünün $m$ 'inci presi tercih etme katsayısı	
$C_{mt}$	$m$ 'inci pres için $t$ 'inci vardiyadaki kapasite	
$A_t$	$t$ 'inci vardiyada yapılabilecek maksimum hazırlık süresi	

$K_j$   $j$ 'inci ürünün maksimum envanter miktarı

$E_j$   $j$ 'inci ürünün minimum envanter miktarı

$L$  ürünler için minimum üretim miktarı

$Z_{mj}^0$   $m$ 'inci preste  $j$ 'inci ürün için başlangıç hazırlık durumu

$I_{j0}$   $j$ 'inci ürün için başlangıç envanter miktarı

$BIGM$  pozitif büyük bir sayı

### Karar Değişkenleri:

$I_{jt}$   $t$ 'inci vardiya sonunda  $j$ 'inci ürünün envanteri

$Q_{mjt}$   $t$ 'inci vardiya sonunda  $j$ 'inci ürünün  $m$ 'inci presteki üretim miktarı

$Y_{mjit} = \begin{cases} 1, & t\text{'inci vardiyada } m\text{'inci preste } j\text{'inci ürün } \\ & i\text{'inci üründen hemen önce üretiliyorsa} \\ 0, & \text{diğer} \end{cases}$

### Model:

$$\min \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T h_j I_{jt} + \sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^J \sum_{t=1}^T \alpha_m Y_{mjit} - \beta \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T Q_{mjt} \Omega_{mj}}{\sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T d_{j,t}} + \rho \sum_{t=1}^T XA_t \quad (1)$$

### Öyle ki:

$$I_{j(t-1)} + \sum_{m=1}^M Q_{mjt} - I_{jt} = d_{jt} \quad \forall j,t \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^J p_{mj} Q_{mjt} + \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^J \tau_{ji} Y_{mjit} \leq C_{mt} \quad \forall m,t \quad (3)$$

$$Q_{mjt} \leq \frac{C_{mt}}{p_{mj}} \left( \sum_{i=1}^J Y_{mijt} + Z_{mj(t-1)} \right) \quad \forall m,j,t \quad (4)$$

$$Q_{mjt} \leq \sum_{t'=1}^T d_{jt'} \left( \sum_{i=1}^J Y_{mijt} + Z_{mj(t-1)} \right) \quad \forall m,j,t \quad (5)$$

$$\sum_{j=1}^J Z_{mjt} = 1 \quad \forall m,t \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^J Y_{mijt} + Z_{mj(t-1)} = \sum_{k=1}^J Y_{mikt} + Z_{mjt} \quad \forall m,j,t \quad (7)$$

$$S_{mit} \geq S_{mjt} + 1 - J(1 - Y_{mjit}) \quad \forall m,j,i,t \quad (8)$$

$$\sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^J \tau_{ji} Y_{mjit} \leq A_t \quad \forall t \quad (9)$$

$$Y_{mijt} \leq M_{mj} \quad \forall m,j,i,t \quad (10)$$

$$Z_{mjt} \leq M_{mj} \quad \forall m,j,t \quad (11)$$

$$\sum_{m=1}^M Q_{mjt} + I_{j(t-1)} \leq K_j \quad \forall j,t \quad (12)$$

$$Z_{mjt} = \begin{cases} 1, & t\text{'inci vardiyanın sonunda } m\text{'inci} \\ & \text{preste üretilen } j\text{'inci ürün } t+1\text{'inci} \\ & \text{vardiyada üretilcekse} \\ 0, & \text{diğer} \end{cases}$$

$S_{mjt}$   $t$ 'inci vardiyada  $j$ 'inci ürünün  $m$ 'inci presteki üretim sırasını gösteren sıralama değişkeni  
(Büyük  $S_{mjt}$  değeri,  $j$ 'inci ürünün  $m$ 'inci preste daha sonra planlanmasını ifade etmektedir.)

$$B_{mt} = \begin{cases} 1, & m\text{'inci pres } t\text{'inci vardiyada } j\text{'inci üretim} \\ & \text{yapılıyorsa} \\ 0, & \text{diğer} \end{cases}$$

$$N_{mjt} = \begin{cases} 1, & m\text{'inci preste } t\text{'inci vardiyada } j\text{'inci} \\ & \text{ürünün üretimi yapılıyorsa} \\ 0, & \text{diğer} \end{cases}$$

$X_t$   $t$ 'inci vardiyada çalışacak operatör sayısı

$X_{ort}$  vardiya başına ortalama operatör sayısı

$XA_t$   $t$ 'inci vardiyada ortalama operatör sayısından sapma miktarı

$$Q_{mjt} \leq BIGM \times N_{mjt} \quad \forall m,j,t \quad (13)$$

$$Q_{mjt} \geq BIGM(N_{mjt} - 1) + L \quad \forall m,j,t \quad (14)$$

$$\sum_{j=1}^J Q_{mjt} \leq BIGM \times B_{mt} \quad \forall m,t \quad (15)$$

$$\sum_{j=1}^J Q_{mjt} \geq BIGM(B_{mt} - 1) + L \quad \forall m,t \quad (16)$$

$$X_t = \sum_{m=1}^M B_{mt} \quad \forall t \quad (17)$$

$$X_{ort} = \frac{\sum_{t=1}^T X_t}{T} \quad (18)$$

$$XA_t \geq X_{ort} - X_t \quad \forall t \quad (19)$$

$$XA_t \geq X_t - X_{ort} \quad \forall t \quad (20)$$

$$I_{j0} = E_j \quad \forall j \quad (21)$$

$$I_{j,3g} \geq E_j \quad \forall j,g \quad (22)$$

$$Z_{mj0} = Z_{mj}^0 \quad \forall m,j \quad (23)$$

$$B_{mt}, N_{mjt}, Y_{mjit}, Z_{mjt} \in \{0,1\} \quad \forall m,j,i,t \quad (24)$$

$$I_{jt}, Q_{mjt}, S_{mjt}, X_t, XA_t, X_{ort} \geq 0 \quad \forall m,j,t \quad (25)$$

Amaç fonksiyonu (1), elde tutma maliyeti, hazırlık maliyeti, pres tercih ödülü ve operatör maliyeti toplamının minimizasyonunu sağlamaktadır. Tercih edilen preste yapılan üretim, ödül puanı olarak amaç fonksiyonuna katkı sağlamaktadır. Verilen ödül, tercih edilen preste yapılan üretim miktarının toplam talebe oranı doğrultusundadır. Bu miktarın büyük olması daha iyi bir sonuçtur. Problem minimizasyon problemi olduğu için pres tercih ödülü negatiftir. Kısıt (2), envanter denge kısıtını sağlamaktadır. Her vardiyada preslere atanmış tüm ürünlerin hazırlık zamanı ve toplam işlem zamanının, ilgili vardiyadaki preslerin kullanılabilir zamanını geçmemesi durumu kısıt (3) ile sağlanmaktadır. Eğer üretilen ürün vardiyalar arasında değişmiyorsa, sonraki vardiyada üretilcek ürün için hazırlık gerekli değildir. Çünkü hazırlık durumu önceki vardiyadan bir sonraki vardiyaya devredilmektedir.  $j$ 'inci ürün yalnızca  $m$ 'inci makinenin  $t$ 'inci periyodu için hazırlık yapıldıktan sonra işlenebilmektedir. Kısıt (4) ve (5) ile üretim miktarı  $Q_{mjt}$  değerleri makine kapasitesinden ve talep miktarından küçük olacak şekilde sınırlandırılmıştır. Kısıt (6) ile bir makine yalnızca bir hazırlık durumunu bir sonraki periyoda devredebilmektedir. Kısıt (7), eğer  $m$ 'inci pres,  $j$ 'inci ürünü üretmek için hazırlık yaptıysa ya da hazırlık

durumu  $j$ 'inci ürünü üretmek için  $t-1$ 'inci vardiyadan (bir önceki vardiya) geliyorsa, daha sonra makine ya hazırlık durumunu  $t$ 'inci vardiyada değiştirmek zorundadır ya da işlenen  $j$ 'inci ürünün hazırlık durumu  $t+1$ 'inci vardiyaya (bir sonraki vardiya) devredilmek zorundadır. Kısıt (8), her vardiyada üretilcek ürünlerin sıralama işlemini yapmaktadır. Kısıt (9), bir vardiyada yapılabilecek maksimum hazırlık sayısını, hazırlık yapan operatör sayısının çalışma süresiyle kısıtlamaktadır. Eğer  $m$ 'inci pres  $j$ 'inci ürünü üretmek için uygun değilse ( $M_{mj} = 0$ ), bu preste  $j$ 'inci ürün için herhangi bir vardiyada hazırlık yapılmamasını kısıt (10) sağlamaktadır. Benzer şekilde, kısıt (11) ile  $m$ . pres  $j$ 'inci ürünün hazırlık durumunu devredememektedir. İşlemi tamamlanan ürünler kutulara konarak taşınmaktadır. Her ürün için belirli tipte kutu kullanılmakta ve bu kutular sınırlı sayıdadır. Kısıt (12), bir vardiyada üretilbilecek maksimum ürün adedini sınırlandırmaktadır. Kısıt (13) ile  $m$ 'inci preste  $t$ 'inci vardiyada  $j$ 'inci ürünün üretilip üretilmediğine karar verilmektedir. Kısıt (14) ise eğer  $m$ 'inci preste  $t$ 'inci vardiyada  $j$ 'inci ürün üretiliyorsa, bu üretim miktarının en az minimum üretim miktarı  $L$  kadar olmasını sağlamaktadır. Kısıt (15),  $t$ 'inci vardiyada  $m$ 'inci preste üretimin yapılıp yapılmadığını göstermektedir. Kısıt (16)

ile üretim yapılan vardiyada toplam üretim miktarının belirlenen seviyeden daha az olmaması gerektiği ifade edilmektedir. Kısıt (17) ise  $t$ 'inci vardiyada çalışan toplam operatör sayısını vermektedir. Kısıt (18) ile vardiya başına ortalama operatör sayısı hesaplanmaktadır. Kısıt (19) ve (20) ile ise  $t$ 'inci vardiyadaki operatör sayısının ortalamadan sapma miktarı hesaplanmaktadır. Kısıt (21) her bir ürün için başlangıç envanter miktarını göstermektedir. Bu değer, minimum envanter miktarına eşit olmaktadır. Kısıt (22) ile her günün sonunda (üç ve üçün katları olan vardiyalarda) her ürün için eldeki envanter miktarının belirlenen minimum envanter miktarına eşit veya bu miktardan büyük olması koşulu sağlanmaktadır. Kısıt (23) ise her presteki başlangıç hazırlık durumunu göstermektedir. Kısıt (24), 0-1 karar değişkenlerini; ve kısıt (25), karar değişkenlerinin negatif olmama durumunu tanımlamaktadır.

#### 4.2 Matematiksel Modelin Doğrulanması

Önerilen modelin doğruluğunu saptayabilmek için bir pilot çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu pilot çalışmada; üç pres, beş kalıp (ürün) ve altı vardiya ele alınmıştır. Firmadan ürünler için haftalık talep değerleri, birim üretim süreleri, hazırlık süreleri, pres tercih bilgisi, pres uygunluk bilgisi, kapasite ve envanter miktarları gibi veriler elde edilmiştir. Pilot çalışma için oluşturulan matematiksel model; maksimum envanter seviyesi kısıtı, minimum envanter seviyesi kısıtı, minimum üretim miktarı kısıtı ve operatör sayısı kısıtını içermemektedir. Bu modelde, 1.268 kısıt, 770 değişken, 555 tamsayı değişken ve 4.598 adet sıfırdan farklı değer (*nonzeros*) bulunmaktadır. Önerilen model, MPL 5.0 matematiksel modelleme yazılımı (Maximal Software, Inc., 2015) ve Gurobi 6.0.4 (Gurobi Optimization, Inc., 2015) çözücüsü kullanılarak çözdürülmüştür.

Pilot çalışmanın çözümü analiz edildiğinde, her vardiya için hangi preste, hangi kalıp ile yapılacak üretim miktarları, envanter miktarları ve hazırlık durumu elde edilmiştir. Ayrıca modelin, envanter ve talep seviyelerine uygun üretim yapılmasını sağladığı ve tüm ürünler için taleplerin karşılandığı görülmektedir. Pilot çalışma için elde edilen çizelgenin Gantt şeması Şekil 3'te verilmiştir.

#### 4.3 Gevşet ve Sabitle Algoritması

Firmanın mevcut problem büyüklüğü dokuz pres, 36 kalıp ve 18 vardiyadan oluşmaktadır. Tüm kısıtlar ele alındığında, matematiksel modelin 451.675 kısıt, 234.487 değişken, 222.102 adet tamsayı değişken ve 2.002.564 adet sıfırdan farklı değer içerdiği görülmektedir. Bu problem, NP-zor sınıfında yer aldığı için (James ve Almada-Lobo, 2011) makul sürede çözülememektedir. Bu nedenle, problemin çözümü için optimizasyon tabanlı bir sezgisel olan gevşet ve sabitle algoritması kullanılmıştır. Literatürde James ve Almada-Lobo (2011)

ile Xiao vd. (2013), benzer bir çizelgeleme problemine gevşet ve sabitle algoritmasını uygulayarak başarıyla sonuçlandırmışlardır.

Gevşet ve sabitle algoritması ile problem, kayan dönemler yaklaşımıyla alt problemlere ayrıştırılarak incelenir. Her iterasyonda bir alt problem çözülür ve tamsayı karar değişkenleri üç farklı şekilde ele alınır. İlk gruptaki karar değişkenleri, önceki iterasyonun çözümü kullanılarak sabitlenir. İkinci gruptaki karar değişkenleri, mevcut iterasyonda optimize edilir. Son gruptaki karar değişkenleri ise sürekli değişken olarak optimize edilir.

Bu çalışmada, hazırlık yapma ( $Y_{mjt}$ ) ve hazırlık taşıma ( $Z_{mjt}$ ) durumlarını gösteren ikili karar değişkenleri vardiyalara göre gevşetilip sabitlenerek çözüm elde edilmesi amaçlanmıştır. Bölüm 4.1'deki matematiksel modele kısıt (26) ve (27)'nin eklenmesi ile gevşetilmiş model oluşturulmuştur. Ayrıca,  $Y_{mjt}$  ve  $Z_{mjt}$  karar değişkenlerinin optimize edilip edilmediğini göstermek amacıyla  $\delta_t$  parametresi tanımlanmıştır. Eğer  $\delta_t = 0$  ise  $Y_{mjt}$  ve  $Z_{mjt}$  karar değişkenleri bir önceki iterasyonda elde edilen  $\bar{Y}$  ve  $\bar{Z}$  değerlerine sabitlenmiştir. Eğer  $\delta_t = 1$  ise bu değişkenler mevcut iterasyonda optimize edilmektedir.

$$Y_{mjt}(1 - \delta_t) = \bar{Y}_{mjt}(1 - \delta_t) \quad \forall m,j,i,t \quad (26)$$

$$Z_{mjt}(1 - \delta_t) = \bar{Z}_{mjt}(1 - \delta_t) \quad \forall m,j,t \quad (27)$$

Gevşet ve sabitle algoritmasında kullanılan parametreler aşağıda tanımlanmıştır:

#### Parametreler

$w$  iterasyonlarda incelenen dönem sayısı (aralık)

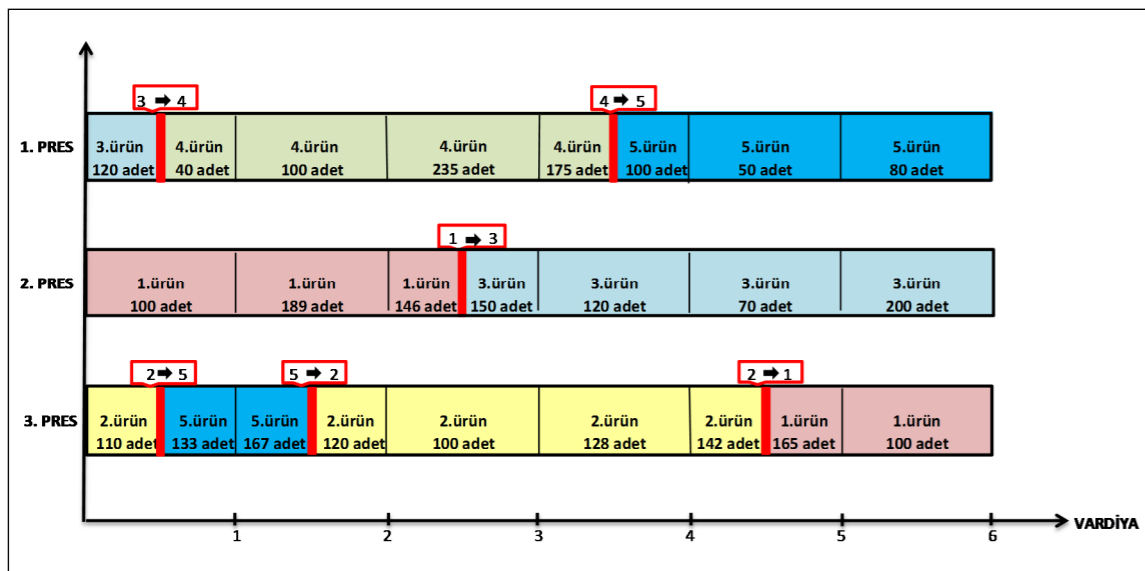
$t_s$  incelenen aralığın başlangıç dönemi

$t_e$  incelenen aralığın son dönemi

$$\delta_t = \begin{cases} 1, & t'inci \text{ dönemdeki karar değişkenleri} \\ & \text{optimize ediliyor ise} \\ 0, & \text{diğer} \end{cases}$$

$\gamma$  önceki iterasyon ile örtüşen dönem sayısı

Gevşet ve sabitle algoritmasının işleyiş mekanizması Şekil 4'te verilmiştir. Her iterasyonda iki dönemin incelendiğini ( $w=2$ ) ve önceki iterasyon ile örtüşen bir dönem ( $\gamma=1$ ) olduğunu varsayalım. Bu durumda, ilk iterasyonda ilk iki dönemdeki ikili değişkenler optimize edilirken, diğer dönemler sürekli değişken olarak incelemeye alınmaktadır. İkinci iterasyonda ilk üç dönem incelemeye alınarak ikili değişken olmaya zorlanmakta, diğer dönemler ise sürekli değişken olarak incelemeye alınmaktadır. Üçüncü iterasyonda ise ilk dönemdeki ikili değişkenler ikinci iterasyonun çözümü kullanılarak sabitlenmektedir. İkinci, üçüncü ve dördüncü dönemler ikili değişken, diğer dönemler ise sürekli değişken olarak incelenmektedir. Her iterasyonda yalnızca bir dönemin



Şekil 3. Pilot Çalışma için Gantt Şeması

#### Başla

$t_s \leftarrow 1, t_e \leftarrow w$

**Süresince**  $t_e < T$  yap

$Y, Z \in \{0,1\}, \forall t \leq t_e$ ; aksi halde  $Y, Z \in \mathbb{R}$

$\delta_t \leftarrow 1, \forall t \geq t_s$ ; aksi halde 0.

**Gevşetilmiş modeli** ( $\bar{Y}, \bar{Z}, \delta_t$ ) **çöz**

$\bar{Y} = Y, \bar{Z} = Z$

$t_s \leftarrow t_e - \gamma, t_e \leftarrow t_e + w - \gamma$

**Eğer**  $t_e \geq T$  **ise**

$t_e \leftarrow T$

**Dur**

**Dur**

$\delta_t \leftarrow 1, \forall t \geq t_s$ ; aksi halde 0.

**Gevşetilmiş modeli** ( $\bar{Y}, \bar{Z}, \delta_t$ ) **çöz.**

**Son**

Şekil 4. Gevşet ve Sabitle Algoritması



sabitlenip diğer dönemlerin bir sonraki iterasyonda tekrar incelemeye alınmasının nedeni, dönemler arası geçişlerde sürekliliğin sağlanmasıdır. Benzer şekilde, diğer iterasyonlarda bir önceki iterasyondan gelen bir dönem sabitlenerek çözüm elde edilmektedir. Böylece çözüm uzayındaki tüm ikili değişkenler optimize edilmektedir.

## 5. UYGULAMA

### 5.1 Önerilen Yöntemin Performansının Değerlendirilmesi

Önerilen yöntemin performansını değerlendirmek amacıyla firmanın bünyesinde bulunan 36 ürünün dokuz presteki birim üretim süreleri, sıra bağımlı hazırlık süreleri, haftalık talep miktarları, hangi kalıpların hangi preslerde üretiminin tercih edildiği bilgisi, pres-kalıp uygunluk bilgileri, kapasite miktarları, maksimum hazırlık, minimum-maksimum ve başlangıç envanter miktarları elde edilmiştir. Modelde kullanılan tercih ödülü katsayısı ( $\beta$ ), üretimin tercih edilen preslerde yapılmasını sağlamaktadır. Bu değer, Xiao vd. (2013) tarafından önerilen yaklaşım kullanılarak  $\beta=147$  olarak belirlenmiştir. Operatör dengeleme maliyeti ( $\rho$ ), vardiyalar arası eşit sayıda operatörün atanmasını sağlamaktadır. Mevcut çözümde bu katsayı, operatörün saatlik çalışma maliyeti dikkate alınarak hesaplanmış ve  $\rho=5$  olarak bulunmuştur. Hazırlık maliyeti ( $\alpha_m$ ), hazırlık süresi boyunca çalışan operatörlerin maliyeti dikkate alınarak hesaplanmıştır. Her pres için bu değer  $\alpha_m=15$  olarak belirlenmiştir. Elde tutma maliyeti ( $h_j$ ) ise firmanın verilerinden alınmıştır.

Önerilen gevşet ve sabitle algoritmasına ait kod Visual Basic.NET (VB.NET) ortamında yazılmıştır. Bu algoritma ile her iterasyonda MPL 5.0 optimizasyon yazılımı ve Gurobi 6.0.4 çözücüsü çağırılarak her bir alt problemin optimum çözümü bulunmaktadır. Algoritma, Intel Core i5-3330 CPU 3.00GHz 4 GB RAM özelliklerine sahip bir bilgisayarda çalıştırılmıştır.

Firma, üretim planlama sistemindeki eksikler nedeniyle emniyet envanteri (minimum envanter) tutmaktadır. Önerilen yaklaşımın uygulanması ile emniyet envanterine ihtiyaç kalmayacağı beklenmektedir. Bu nedenle, emniyet envanteri tutmanın firmanın maliyetine ve üretim çizelgesine olan etkisi incelenmiştir. Ayrıca, operatör sayısını dengelemenin toplam maliyete ve

üretim çizelgesine etkisi dikkate alınmıştır. Bu amaçla, üç farklı senaryo incelenmiştir:

*Birinci senaryoda*, firmadaki mevcut üretim çizelgeleme sistemi yansıtılmıştır. Bu kapsamda, Bölüm 4.1'deki matematiksel model incelenmiştir.

*İkinci senaryoda*, matematiksel modelde sadece minimum envanter seviyesi kısıtı devre dışı bırakılmıştır. Böylece, her vardiyadaki operatör sayısı dengeli iken emniyet envanterinin üretim çizelgesine etkisi incelenmiştir.

*Üçüncü senaryoda*, matematiksel modelde minimum envanter seviyesi kısıtı ve operatör sayısı dengeleme kısıtı devre dışı bırakılmıştır. Böylece, emniyet envanteri tutulmamasının ve operatör sayısının dengelenmemesinin üretim çizelgesine etkisi incelenmiştir.

Her senaryo için gevşet ve sabitle algoritmasının sonuçları, elde tutma maliyeti, hazırlık maliyeti, pres tercih maliyeti, operatör dengeleme maliyeti, toplam maliyet ve çözüm süresi açısından karşılaştırılmıştır. Ayrıca, her senaryoya ait matematiksel model 60 dakika çalıştırılarak amaç fonksiyonunun mevcut en iyi değeri hesaplanmıştır. Bu değer, gevşet ve sabitle algoritmasının sonuçları ile karşılaştırılarak algoritmanın performansı belirlenmiştir. Karşılaştırma sonuçlarına ait veriler, Tablo 1'de özetlenmektedir.

Tablo 1'de birinci, ikinci ve üçüncü senaryolar için önerilen algoritmanın amaç fonksiyonu değeri, matematiksel model ile elde edilen sonuçtan sırasıyla, %0,6, %2,7 ve %2,8 oranında daha fazladır. Böylece, geliştirilen gevşet ve sabitle algoritmasının optimale yakın sonuçlar verdiği görülmektedir.

Senaryolar karşılaştırıldığında, toplam maliyet açısından üçüncü senaryonun daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir. Ancak bu senaryo, firmanın ihtiyacı olan operatör dengeleme kısıtlarını içermemektedir. Bu nedenle, üçüncü senaryo ile çok yakın performansa sahip olan ikinci senaryo, önerilen sistem olarak seçilmiştir. Bu senaryoya göre elde edilen üretim planı, firmadaki mevcut çizelgeleme sistemiyle hazırlanmış üretim planı ile karşılaştırıldığında; elde tutma maliyetinde yıllık 234.400,4 TL ile yılda %81,3 kazanç sağlanırken, hazırlık maliyetinde ise yıllık 10.140 TL kayıp oluşmaktadır.

Tablo 1. Matematiksel Model ve Önerilen Sezgisel Algoritmanın Karşılaştırılması

Maliyet/Süre	Matematiksel Model*			Gevşet ve Sabitle Algoritması		
	1. Senaryo	2. Senaryo	3. Senaryo	1. Senaryo	2. Senaryo	3. Senaryo
Elde Tutma Maliyeti (TL)	4353,7	1031,5	936,5	4327,1	1037,3	926,9
Hazırlık Maliyeti (TL)	375	390	405	420	435	450
Pres Tercih Ödülü (TL)	-130,1	-95,7	-95,1	-130,5	-96,3	-95,3
Operatör Dengeleme Maliyeti (TL)	0	60	-	10	47,8	-
Toplam Maliyet (TL)	4598,6	1385,8	1246,4	4626,6	1423,8	1281,6
Çözüm Süresi (dak.)	60	60	60	40,1	28,8	9,9

\* İlgili senaryo 60 dakika çalıştırıldığında bulunan en iyi çözüm

Ancak bu kaybın elde tutma maliyetindeki kazanç ile telafi edildiği görülmektedir. Tercih ödülünde ise yıllık 2044,6 TL'lik bir iyileştirme sağlanmaktadır. Böylece, kalıplar %69 oranında daha uygun preslerde kullanılmaktadır. Operatör dengeleme maliyetinde ise yılda 114,4 TL kazanç sağlanmaktadır. Buradan yıllık %4,4 oranında bir iyileştirme elde edilmiştir. Toplam maliyete bakıldığında, yılda 226.419,4 TL'lik kazanç elde edilerek %75,4 oranında iyileştirme sağlandığı görülmektedir.

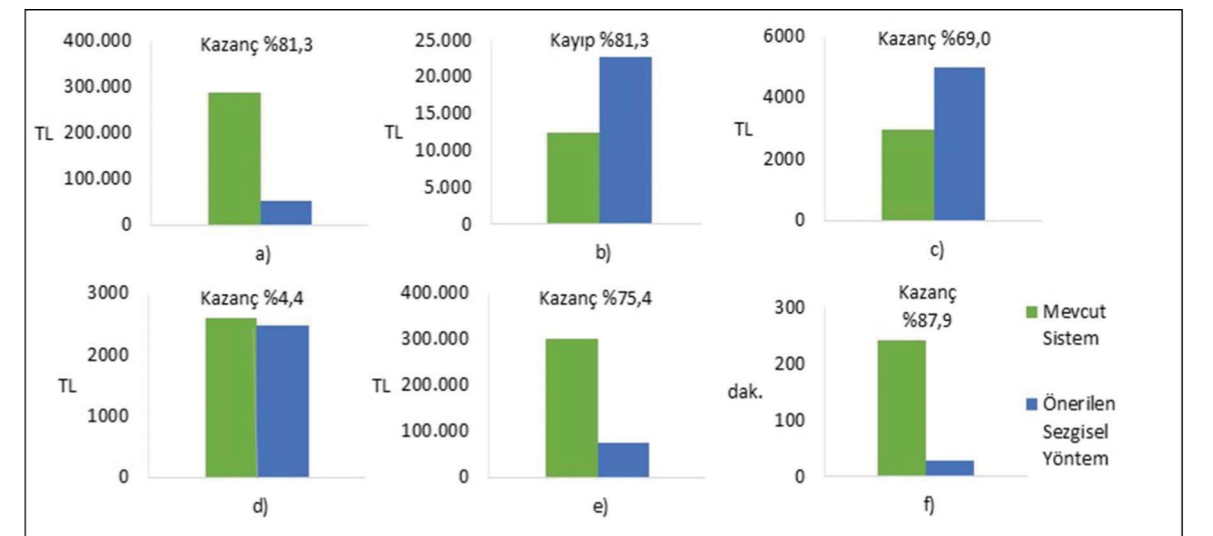
Firmadaki mevcut üretim çizelgelerinin hazırlanma süresi yaklaşık 240 dakikadır. Geliştirilen matematiksel model ise 60 dakika çalıştırılmasına rağmen optimum

çözüm elde edilememiştir. Önerilen gevşet ve sabitle algoritması ile 28,8 dakikada optimale yakın sonuç elde edilmektedir.

Yıllık maliyetler ve çözüm süresine ait karşılaştırma sonuçları, Şekil 5'te verilmiştir.

### 5.2 Duyarlılık Analizi

Bu bölümde, problem parametrelerinin önerilen yaklaşıma etkisi incelenmiştir. Problem parametreleri olarak, tercih ödülü katsayısı ( $\beta$ ) ve operatör dengeleme maliyeti ( $\rho$ ) ele alınmıştır. Ayrıca, firmada lens atölyesindeki hazırlık işlemini azaltmak amacıyla SMED (*Single*



Şekil 5. Maliyet ve Çözüm Süresi Karşılaştırmaları: a) Elde Tutma Maliyeti, b) Hazırlık Maliyeti, c) Tercih Ödülü, d) Operatör Dengeleme Maliyeti, e) Toplam Maliyet ve f) Çözüm Süresi

*Minute Exchange of Die*) çalışmaları yapılmaktadır. Bu nedenle, hazırlık süresi ( $\tau_{ji}$ ) ve hazırlık maliyetinin ( $\alpha_m$ ) üretim planına olan etkileri de incelenmiştir. Hazırlık süresi, ürünler arası geçişte kalıp değiştirme süresini göstermektedir. Hazırlık maliyeti ise hazırlık süresi boyunca çalışan operatörlerin maliyeti dikkate alınarak hesaplanmıştır. Bu nedenle, hazırlık süresi ve hazırlık maliyeti parametrelerinin etkisi birlikte incelenmiştir.

Her parametre, üst limit, mevcut değer ve alt limit olmak üzere üç seviyede incelenmiştir. Parametreler için seviye değerleri Tablo 2’de verilmiştir.

Duyarlılık analizi sonuçları Tablo 3’te verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde aşağıdaki tespitler yapılmıştır:

- Tercih ödülü katsayısı mevcut değerden azaltıldığında, elde tutma maliyeti azalırken hazırlık maliyeti

**Tablo 2.** Duyarlılık Analizinde İncelenen Parametreler ve Seviyeleri

Parametre	Üst Limit	Mevcut Değer	Alt Limit
Tercih ödülü katsayısı ( $\beta$ )	1470	147	14,7
Operatör dengeleme maliyeti ( $\rho$ )	100	5	0,25
Hazırlık süresi ( $\tau_{ji}$ ) ve hazırlık maliyeti ( $\alpha_m$ )	$1,20\tau_{ji}$ ve $1,20\alpha_m$	$\tau_{ji}$ ve $\alpha_m$	$0,15\tau_{ji}$ ve $0,15\alpha_m$

**Tablo 3.** Duyarlılık Analizi Sonuçları

Parametre	Maliyet/Süre	Üst Limit	Mevcut Değer	Alt Limit
Tercih ödülü katsayısı ( $\beta$ )	Elde tutma maliyeti (TL)	1156,5	1037,3	991,6
	Hazırlık maliyeti (TL)	480	435	465
	Tercih ödülü (TL)	-1155,8	-96,3	-9,60
	Operatör dengeleme maliyeti (TL)	50	47,8	63,3
	Toplam maliyet (TL)	530,7	1423,8	1510,3
	Çözüm süresi (dak.)	129	28,8	165
Operatör dengeleme maliyeti ( $\rho$ )	Elde tutma maliyeti (TL)	1028,3	1037,3	967,6
	Hazırlık maliyeti (TL)	525	435	420
	Tercih ödülü (TL)	-96,2	-96,3	-95,5
	Operatör dengeleme maliyeti (TL)	0	47,8	8,2
	Toplam maliyet (TL)	1457,1	1423,8	1300,3
	Çözüm süresi (dak.)	51	28,8	34
Hazırlık süresi ( $\tau_{ji}$ ) ve hazırlık maliyeti ( $\alpha_m$ )	Elde tutma maliyeti (TL)	1042,8	1037,3	886,4
	Hazırlık maliyeti (TL)	504	435	96,8
	Tercih ödülü (TL)	-97,1	-96,3	-95,6
	Operatör dengeleme maliyeti (TL)	78,9	47,8	40
	Toplam maliyet (TL)	1528,6	1423,8	927,6
	Çözüm süresi (dak.)	54	28,8	22

artmaktadır. Ayrıca, operatör dengeleme maliyeti artmaktadır.

- Tercih ödülü katsayısı artırıldığında, firma daha fazla üretim yapmaktadır. Bu nedenle, hem elde tutma hem de hazırlık maliyetlerinde artış görülmektedir.
- Tercih ödülü katsayısı mevcut değerden farklı bir değer aldığında, çözüm süresi belirgin bir şekilde artmaktadır. Hızlı çözüm elde etmek için tercih ödülü katsayısının mevcut değeri tercih edilmiştir.
- Operatör dengeleme maliyeti azaltıldığında, mevcut durumda olduğu gibi vardiyalar arası operatör sayısında dengesizlikler görülmektedir. Elde tutma ve hazırlık maliyetlerinde ise azalma vardır.
- Operatör dengeleme maliyeti artırıldığında, vardiyalar arası operatör sayısındaki dengesizlik tamamıyla sıfırlanmaktadır. Ayrıca, hazırlık maliyetinde ve çözüm süresinde belirgin bir artış gözlenmektedir.
- Hazırlık süresi ve buna bağlı olarak hazırlık maliyeti azaltıldığında, elde tutma ve operatör dengeleme maliyetinin azaldığı gözlenmiştir. Ayrıca, toplam maliyet ve çözüm süresi iyileşmiştir.
- Hazırlık süresi ve hazırlık maliyeti artırıldığında, elde tutma ve operatör dengeleme maliyetleri artmıştır. Çözüm süresi uzamıştır.

Sonuç olarak, problem parametreleri firmanın önceliklerine göre belirlenerek hedeflenen üretim planı elde edilebilmektedir. Ayrıca, SMED çalışmalarının başarı ile

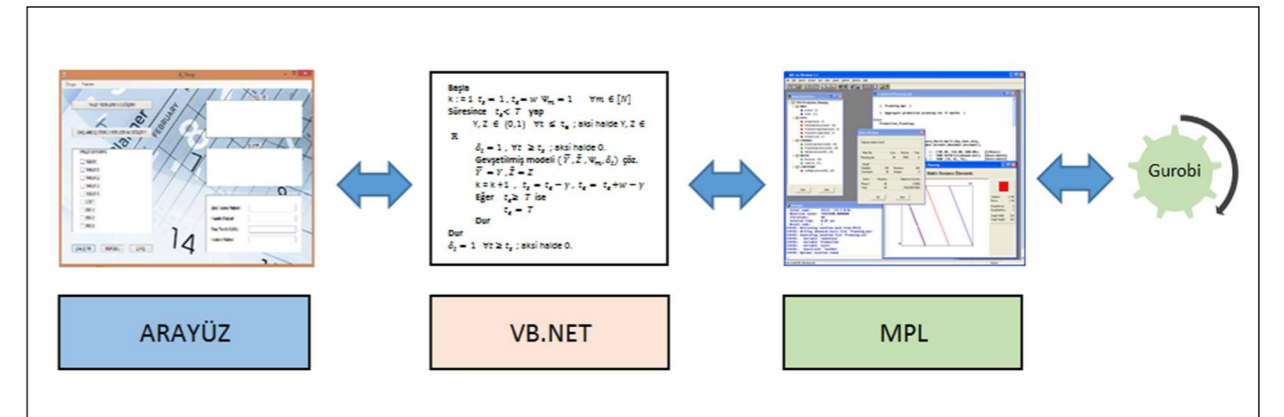
tamamlanması durumunda hem daha hızlı hem daha az maliyetli bir üretim planı elde edilebileceği görülmüştür.

### 5.3 Çizelgeleme Yazılımı

Önerilen yaklaşımın firmada kullanımını kolaylaştırmak üzere İÇ\_Prog (İleri Çizelgeleme Programı) isimli çizelgeleme yazılımı geliştirilmiştir. VB.NET ortamında kodlanan gevşet ve sabitle algoritması ile MPL optimizasyon yazılımı sürekli iletişim halinde çalışmaktadır. Algoritmanın her iterasyonunda, oluşturulan alt problemin optimum çözümünün elde edilebilmesi için MPL yazılımına veriler aktarılmaktadır. Gurobi çözücüsü kullanılarak elde edilen optimum çözüm, gevşet ve sabitle algoritmasına bir sonraki iterasyon için veri olarak geri iletilmekte ve yeni alt problem oluşturulmaktadır. Bu iletişim, algoritmanın tamamlanmasına kadar devam etmektedir.

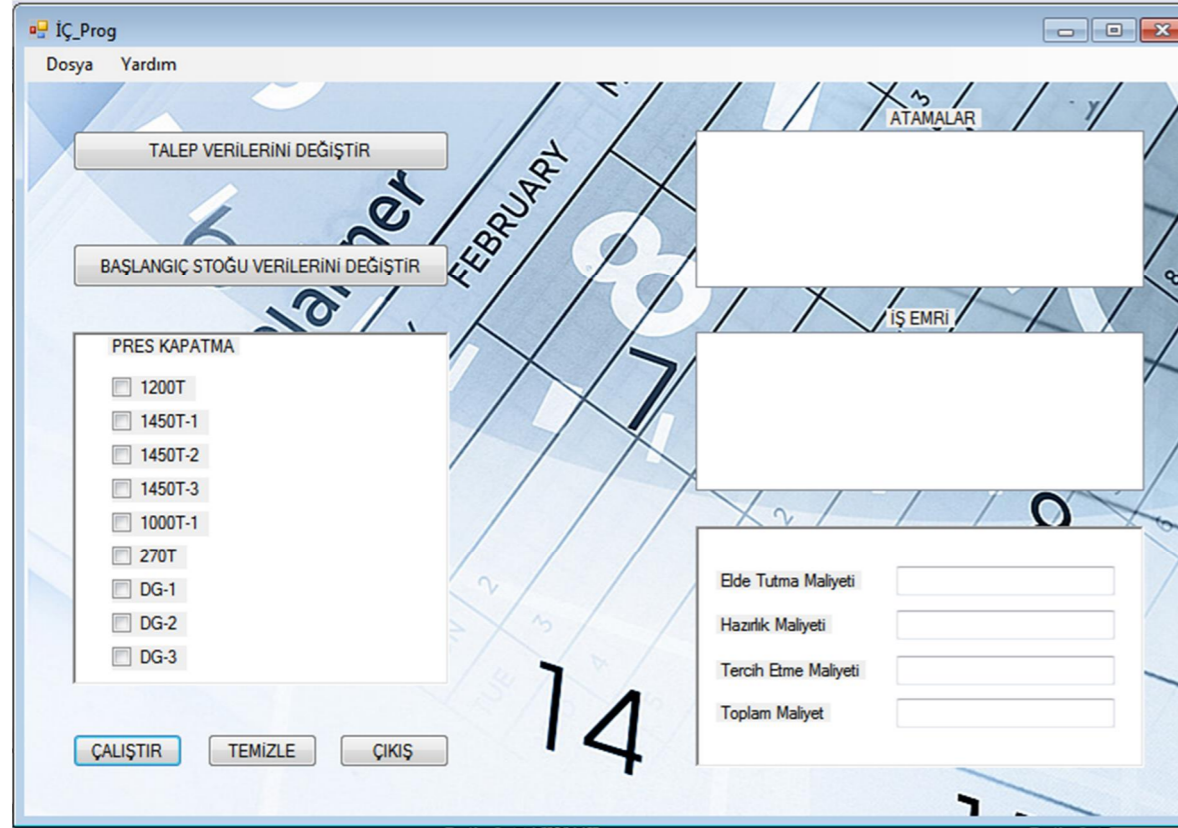
Tasarlanan arayüz ile birlikte üretim planlama mühendisi etkin ve sistematik bir şekilde veri girişini sağlayarak üretim çizelgeleme işlemini gerçekleştirecektir. Bu yazılım sayesinde hem hızlı hem de optimale yakın sonuçlar alınabilmektedir. Oluşturulan çizelgeleme yazılımının işleyiş mekanizması Şekil 6’da verilmiştir. Geliştirilen arayüz ise Şekil 7’de gösterilmektedir.

Bundan sonraki aşamada, yazılımın firmada kullanımını kolaylaştırmak üzere kullanıcılar için bir kullanım kılavuzu (bkz. Ek 1) hazırlanmıştır.



**Şekil 6.** Çizelgeleme Yazılımı





Şekil 7. Çizelgeleme Yazılımının Arayüzü

## 6. SONUÇ VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, bir otomotiv yan sanayi firması için üretim planlama ve çizelgeleme yazılımı geliştirilmiştir. Önerilen yazılım, çizelgeleme faaliyetlerini hızlı ve etkin bir şekilde gerçekleştirmektedir. Ayrıca, önerilen çözüm yaklaşımı, gerçek hayat problemini dikkate alan kısıtları ve uygulanabilirliği yönüyle literatürdeki diğer çalışmalara göre özgün ve yenilikçi bir yapıya sahiptir.

Geliştirilen bu yazılım firma yetkilileriyle görüşülerek onaylanmıştır ve firma yetkililerince üretim planlama sistemine entegre edilmesi uygun bulunmuştur.

Bu çalışma sonucunda firmada aşağıdaki iyileştirmeler sağlanmıştır:

- Önerilen optimizasyon tabanlı sezgisel algoritmayı kullanarak, 28,8 dakika içerisinde üretim planı elde edilebilmektedir. Böylece, üretim planlama mühendisinin, her gün dört saat harcayarak yaptığı üretim

çizelgeleme süresinde %88 oranında kazanç sağlanacaktır. Bu durumda, üretim planlama mühendisinin çizelgeleme çalışmaları için harcadığı zamanda yıllık 1098,2 saat azalma olacaktır. Bu çalışma saatinde, üretim planlama mühendisi firmada yürütülen diğer projelere katkı sağlayabilecektir.

- Hazırlık sayısı ve envanter seviyesi optimize edilmiştir. Böylece daha sık hazırlık işlemi yapılarak envanter seviyesinin daha düşük olacağı belirlenmiştir.
- Kalıplar %69 oranında daha uygun preslerde kullanılmaktadır. Böylece kalıp-pres atamaları nedeniyle oluşan kalite kayıplarında azalma beklenmektedir.
- Operatörler vardiyalara daha dengeli bir şekilde atanmıştır ve bu alanda %4,4 oranında iyileştirme sağlanmıştır.
- Sonuç olarak, önerilen yöntemle bir yılda, toplam maliyette %75,4 oranında kazanç sağlanmaktadır.

## TEŞEKKÜR

Projeyi 2209B (2241A) Sanayi Odaklı Lisans Bitirme Tezi Destekleme Programı kapsamında destekleyen TÜBİTAK'a ve bu çalışmanın firmalarında gerçekleştirilmesi için gösterdikleri ilgi ve destekleri için firma çalışanları Evren GEÇGİL ve Mehmet KALAY'a sonsuz teşekkürlerimizi sunarız.

## KAYNAKÇA

1. Baker, K. R., Trietsch, D. 2009. Principles of Scheduling and Sequencing, John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey.
2. Beraldi, P., Ghiani, G., Grieco, A., Guerriero, E. 2008. "Rolling-horizon and Fix-and-relax Heuristics for the Parallel Machine Lot-sizing and Scheduling Problem with Sequence-dependent Set-up Costs," Computers & Operations Research, vol. 35 (11), p. 3644-3656.
3. Carreno, J. J. 1990. "Economic Lot Scheduling for Multiple Products on Parallel Identical Processors," Management Science, vol. 36 (3), p. 348-358.
4. Clark, A. R., Clark, S. J. 2000. "Rolling-horizon Lot-sizing When Set-up Times are Sequence-Dependent," International Journal of Production Research, vol. 38 (10), p. 2287-2307.
5. Dastidar, S. G., Nagi, R. 2005. "Scheduling Injection Molding Operations with Multiple Resource Constraints and Sequence Dependent Setup Times and Costs," Computers & Operations Research, vol. 32 (11), p. 2987-3005.
6. Jans, R. 2009. "Solving Lot-sizing Problems on Parallel Identical Machines Using Symmetry-breaking Constraints," INFORMS Journal on Computing, vol. 21 (1), p. 123-136.
7. James, R. J. W., Almada-Lobo, B. 2011. "Single and

Parallel Machine Capacitated Lot-sizing and Scheduling: New Iterative MIP-based Neighborhood Search Heuristics," Computers & Operations Research, vol. 38 (12), p. 1816-1825.

8. Kang, S., Malik, K., Thomas, L. J. 1999. "Lotsizing and Scheduling on Parallel Machines with Sequence-Dependent Setup Costs," Management Science, vol. 45 (2), p. 273-289.
9. Koçanlı, M. M., Aydınbeyli, Y. E., Saraç, T. 2012. "Eti Şirketler Grubu'nda Üretim Çizelgeleme Problemi için Bir Hedef Programlama Modeli ve Genetik Algoritma," Endüstri Mühendisliği Dergisi, vol. 23 (3), p. 12-26.
10. Marinelli, F., Nenni, M. E., Sforza, A. 2007. "Capacitated Lot Sizing and Scheduling with Parallel Machines and Shared Buffers: A Case Study in a Packaging Company," Annals of Operations Research, vol. 150 (1), p. 177-192.
11. Meyr, H. 2002. "Simultaneous Lotsizing and Scheduling on Parallel Machines," European Journal of Operational Research, vol. 139 (2), p. 277-292.
12. Maximal Software, Inc., MPL Modeling System, Arlington, VA, USA. <http://www.maximalsoftware.com/mpl/>, son erişim tarihi: 11 Haziran 2015.
13. Gurobi Optimization, Inc., Gurobi Optimization. <http://www.gurobi.com/>, son erişim tarihi: 11 Haziran 2015.
14. Quadt, D., Kuhn, H. 2009. "Capacitated Lot-Sizing and Scheduling with Parallel Machines, Back-Orders, and Setup Carry-Over," Naval Research Logistics (NRL), vol. 56 (4), p. 366-384.
15. Xiao, J., Zhang, C., Zheng, L., Gupta, J. N. D. 2013. "MIP-based Fix-and-optimize Algorithms for the Parallel Machine Capacitated Lot-sizing and Scheduling Problem," International Journal of Production Research, vol. 51 (16), p. 5011-5028.



## EKLER

### Ek 1. İÇ\_Prog Yazılımı Kullanım Kılavuzu

İÇ_Prog Kullanım Kılavuzu	
<p><b>1. Program Verilerinin Güncellenmesi</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>◆ Kullanıcı, talep verilerini değiştirmek için arayüzde bulunan <b>TALEP VERİLERİNİ DEĐİŐTİR</b> butonuna tıklayarak, verilerin bulunduğu Excel dosyasını açmalıdır. Açılan Excel dosyasında otomatik olarak seçili olan talep tablosu kullanıcı tarafından güncellenmelidir.</li><li>◆ Başlangıç stoğunu güncellemek için aynı işlemler <b>BAŞLANGIÇ STOĐU VERİLERİNİ DEĐİŐTİR</b> butonu tıklanarak yapılmalıdır.</li></ul> <p><b>2. Programın Çalıştırılması</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>◆ Arayüzde bulunan <b>PRESLER</b> bölümünde, çalışır durumda olmayan presler, sol tarafında yer alan kutucuklar tıklanarak işaretlenmelidir. Yapılan değişiklik kaydedildiği durumda program belirlenen presler kapalı olacak şekilde çalışır. Presleri tekrar aktifleştirmek için kullanıcı Excel dosyasını açmalı; uygunluk, tercih edilme ve üretim zamanları tablolarını eski haline dönüştürmelidir.</li><li>◆ Kullanıcı <b>ÇALIŐTIR</b> butonuna tıklayarak, yazılımı çalıştırmalıdır. Program her iterasyonda sonuç vermektedir. Optimale en yakın sonuç için programın bitmesi beklenmelidir.</li><li>◆ Atamaların, iş emrinin ve maliyetlerin bulunduğu kutular <b>TEMİZLE</b> butonu ile silinebilir.</li><li>◆ Sonuçlar görüldükten sonra arayüzde bulunan <b>ÇIKIŐ</b> butonuna basılarak çalışma sonlandırılmalıdır.</li></ul>	<p><b>3. Menü Çubuđunun Kullanımı</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>◆ Dosya altında bulunan <b>AÇ</b> tıklanarak istenilen dosyaya erişim sağlanırken, <b>ÇIKIŐ</b> ile program sonlandırılır.</li><li>◆ Yardım altında bulunan <b>HAKKINDA</b> tıklanarak program hakkında bilgi edinilebilir ve yine burada bulunan <b>KULLANIM KILAVUZU</b> tıklanarak programın detayları hakkında bilgi edinilir.</li></ul> <p><b>4. Dikkat Edilmesi Gereken Hususlar</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>◆ Okumakta olduğunuz kullanım kılavuzu masaüstünde kayıtlı olmalıdır.</li><li>◆ Programda belirtilen klasör yollarının geçerli olması gerekmektedir.</li><li>◆ Program ile çalışırken kullanılan Excel dosyasının kapalı olması gereklidir.</li><li>◆ Verilerin bulunduğu Excel dosyasına girilen taleplerin, kullanılabilir üretim kapasitesini (makinelere toplam kapasitesi-o makinelere gün içinde yapılan hazırlıklar için harcanan süre) aşmaması gereklidir.</li><li>◆ Yazılımın hata vermesi durumunda, ilk olarak kalıpların kullanabildiği preslerdeki kapasite yeterliliğinin detaylıca tekrar araştırılması gereklidir.</li><li>◆ Eğer sonuçlar daha sonra incelenmek üzere saklanmak isteniyorsa program sonucunun yer aldığı Excel dosyası, farklı bir isimle farklı bir klasörde kayıt edilmelidir.</li></ul>