



## Developing a matheuristic for dynamic lot sizing and scheduling problem with an application

Burcu Kubur Özbel<sup>1</sup> , Adil Baykasoğlu<sup>2\*</sup> 

<sup>1</sup>The Graduate School of Natural and Applied Sciences, Dokuz Eylül University, Tinaztepe Campus, 35390, İzmir, Türkiye

<sup>2</sup>Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Dokuz Eylül University, Tinaztepe Campus, 35397, İzmir, Türkiye

### Highlights:

- A real-world problem in the paper bag industry is tackled.
- We present a mathematical model for the proposed problem.
- We also present matheuristic algorithm combining Mixed Integer Linear Programming (MILP) model and Simulated Annealing (SA) algorithm.

### Keywords:

- Integrated lot sizing and scheduling problem
- Sequence-dependent setup cost
- Production planning
- Mixed integer mathematical programming
- Matheuristics

### Graphical/Tabular Abstract

This study addresses a practical production issue in the paper bag industry that contains the problem of capacitated lot sizing and scheduling with cutting plan assignment. The assignment of cutting plan configurations can change the total cost and time. Figure A shows a sample production plan.

Production Plan	Period 1	Period 2	Period 3
Cutting pattern 1	$x_{111} = 107$	$x_{721} = 70$	$x_{231} = 80$
Cutting pattern 2	$x_{512} = 86$	$x_{122} = 56$	$x_{632} = 119$
Cutting pattern 3	$x_{413} = 70$	$x_{523} = 86$	$x_{733} = 90$
Cutting pattern 4	$x_{614} = 119$	$x_{224} = 120$	$x_{134} = 48$

Figure A. Production plan with cutting pattern assignment

### Article Info:

Research Article

Received: 14.06.2022

Accepted: 26.02.2023

### DOI:

10.17341/gazimmfd.1130887

### Correspondence:

Author: Adil Baykasoğlu

e-mail:

adil.baykasoğlu@deu.edu.tr

phone: +90 232 301 7600

### Purpose:

This paper aims to propose a model for solving a capacitated lot sizing and scheduling problem (CLSP) with sequence dependent setup costs and non-zero setup times with cutting pattern selection.

### Theory and Methods:

We provide a mixed integer linear programming (MILP) model for CLSP with cutting pattern selection. The proposed model is based on a real-world case study from paper bag production industry. Due to limited performance of the solvers in addressing large instances, we propose a matheuristic approach that effectively presents high quality solutions.

### Results:

Randomly generated test problems based on real data were used to compare proposed mathematical model and matheuristic algorithm. The matheuristic algorithm allows efficient solutions to be found, and reduce efficiently computational times.

### Conclusion:

The proposed matheuristic algorithm shows advantages of combining metaheuristics with mathematical programming approach to solve lot sizing and scheduling problems with cutting pattern selection. The computational times of matheuristic are far less than the CPLEX solver.



## Dinamik parti büyüklüğü belirleme ve çizelgeleme problemi için bir matsezgisel geliştirilmesi ve uygulaması

Burcu Kubur Özbel<sup>1</sup> , Adil Baykasoğlu<sup>2\*</sup> 

<sup>1</sup>Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tınaztepe Yerleşkesi, 35390, İzmir, Türkiye

<sup>2</sup>Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Tınaztepe Yerleşkesi, 35397, İzmir, Türkiye

### Ö N E Ç İ K A N L A R

- Kağıt çanta endüstrisinde gerçek hayat problemi ele alındı
- Önerilen problem için matematiksel model önerildi
- Karma tam sayılı programlama modeli ile Benzetilmiş Tavlama algoritmasını birleştiren matsezgisel yöntem önerildi

#### Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 14.06.2022

Kabul: 26.02.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1130887

#### Anahtar Kelimeler:

Bütünleşik parti büyüklüğü belirleme ve çizelgeleme problemi, sıra bağımlı hazırlık maliyeti, üretim planlama, karma tamsayı matematiksel programlama, matsezgisel

#### ÖZ

Kısıtlandırılmış parti büyüklüğü belirleme problemi işletmelerde sıklıkla karşılaşılan problemlerden biridir. Ancak, bu problemlerin modellenme aşamasında gerçek hayatta geçerli olabilen pek çok faktör dikkate alınmamaktadır. Bu çalışmada, sipariş üzerine kağıt/karton çanta üretimi yapan bir işletmedeki bütünleşik parti büyüklüğü belirleme ve çizelgeleme problemi modellenerek çözümlenmiştir. Problem için karma tam sayılı programlama modeli önerilmiştir. Önerilen modelde, ürünler arası geçişlerde ve üretim periyotlarındaki hazırlık süreleri ve maliyetleri göz önünde bulundurulmuştur. Geliştirilen model, üretim maliyeti, elde tutma maliyeti, karşılanamayan talep maliyeti, dışardan satın alma maliyeti ve sıra bağımlı ürün geçişlerinin hazırlık maliyeti toplamını en küçüklemeyi hedeflemektedir. Geliştirilen modelin uygulamasıyla, üretim kaynaklarının daha verimli kullanılıp daha efektif üretim planlarının ortaya konulabileceği görülmüştür.

## Developing a matheuristic for dynamic lot sizing and scheduling problem with an application

### H I G H L I G H T S

- A real-world problem in the paper bag industry is tackled
- A mathematical model for the proposed problem is presented
- A matheuristic algorithm combining Mixed Integer Linear Programming model and Simulated Annealing algorithm is presented

#### Article Info

Research Article

Received: 14.06.2022

Accepted: 26.02.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1130887

#### Keywords:

Integrated lot sizing and scheduling problem, sequence-dependent setup cost, production planning, mixed integer mathematical programming, matheuristic

#### ABSTRACT

Capacitated lot sizing is a frequently encountered production-planning problem in manufacturing companies. However, many real life factors are usually not taken into account during the model development phase for these problems. In this study, an integrated lot-sizing and scheduling problem of a paper bag production firm is considered. A mixed integer mathematical programming model is proposed for modeling and solving the problem. Setup cost/time between product and period changes are considered in the proposed model. It is aimed to minimize the total cost of production, holding inventory, backorder, procurement and setup for product type change and product period change. It is observed that productive utilization of manufacturing resources and the generation of more effective production plans are possible by the application of the proposed model.

## 1. Giriş (Introduction)

Günümüzün yüksek yoğunluklu rekabet ortamında üretim planlama ve çizelgeleme gerek araştırmacıların gerekse işletmelerin etkin bir şekilde çözümlenmeye çalıştıkları önemli problemlerden birisi olmaya devam etmektedir. Üretim planlama; üretim araçlarının, olanakların ve işgücünün verimli kullanılmasıyla bu araç ve olanaklara göre üretilen ürünün miktarının ve yönteminin belirlenerek, üretileceği zamanın saptanması faaliyetleridir [1]. İşletmeler kârlarını enbüyükleyecek, en düşük maliyetli üretim planının oluşturulmasını istemektedir. Bu amacı gerçekleştirmek için stok miktarları, makinelerin kapasitesi, hazırlık süreleri, satın alma maliyetleri gibi üretim faktörleri dikkate alarak üretimin planlanması ve elde edilen planların üretim sisteminin dinamik yapısına paralel olarak güncellenmesi gerekmektedir. Üretim planlamasıyla ilgili olan kapasite planlama, sipariş verme, parti büyüklüğü belirleme ve çizelgeleme gibi çeşitli kararların bütünlük ve etkin bir şekilde ele alınması gereklidir [2]. Mevcut çalışma, sipariş üzerine kâğıt/karton çanta üretimi yapan bir firmanın karmaşık üretim planlama problemini ele almaktadır. İşletmede üretim planları çalışanların geçmiş bilgi ve deneyimlerine dayalı olarak kesgisel bir şekilde oluşturulmaktadır. Bilimsel bir temele dayanmayan mevcut üretim planlama yaklaşımının doğrulanması ve etkinliği tartışmalıdır. İşletmenin üretim planlama problemi, bilimsel yazındaki bütünlük/kısıtlandırılmış parti büyüklüğü belirleme ve sıra bağımlı çizelgeleme problemine en yalın biçimi ile benzerlik göstermektedir. Söz konusu temel problem NP-zor bir yapıdadır [3]. İşletmenin üretim planlama ihtiyaçlarına cevap verebilecek pek çok yeni kısıt ve parametre dikkate alınarak özgün bir karma tamsayılı programlama modeli geliştirilmiştir. Önerilen model benzer üretim karakteristikleri ve iş süreçleri taşıyan diğer işletmelere de uygulanabilecek esnek bir yapıya sahiptir.

Makalenin takip eden bölümleri şu şekilde düzenlenmiştir: ikinci bölümde işletmenin üretim sistem analizi ve buna bağlı olarak belirlenen problemin tanımı yer almaktadır. Üçüncü bölümde, problemle ilgili bilimsel yazın araştırmasına yer verilmiştir. Dördüncü bölümde, önerilen karma tamsayılı programlama modeli detaylı bir şekilde açıklanmakta ve problem için geliştirilen matsezsizsel yöntemin ayrıntıları ve işlem basamakları gösterilmiştir. Beşinci bölümde, deneysel sonuçlar ve çalışmanın son kısmında ise sonuçlar yorumlanmıştır.

## 2. Mevcut Sistem (Current System)

İşletme sipariş üzerine kâğıt-karton çanta üretimi yapmaktadır. İşletme, 1995 yılında 650 m<sup>2</sup> üzerine kurulmuş olup 16 çalışanı bulunmaktadır. Tesiste otomotiv, kozmetik, mücevher, tekstil, ayakkabı ve sağlık gibi uluslararası ve yerel pazarlara kâğıt-karton çanta üretimi yapılmaktadır. Depodan üretim birimine getirilen kâğıt rulolar ilk önce ebatlama alanında makine yardımı ile talep edilen miktar ve ebatlarda kesim işlemine tabi tutulur. Kesilen tüm kâğıtlarla birlikte bobin ebadı istenen boyutta olmayan veya yıpranmış bobinler paletler aracılığıyla giyotin makinasına taşınarak uygun ebatlarda kesim ve tıraşlama işlemi gerçekleştirilir. Giyotin makinasından çıkan kâğıtlar, taşıyıcı ile ofset makinalarının bulunduğu alana taşınır. Bu alanda mevcut olan iki çeşit ofset makinası (ofset dört renk ve ofset beş renk) ile baskı işlemi yapılır ve baskısı tamamlanmış kâğıtlar sefalon makinasında talebe uygun olarak mat, parlak ve metalik sefalonlardan biriyle kaplanır. Daha sonra sefalonlanmış kâğıtların üzerindeki baskıyı belirginleştirmek için Uv-Lak makinasında parlatma işlemi yapılır. Sonraki aşamada talebe göre yıldız işlemi, gofraj işlemi veya yıldız ile gofraj işlemi birlikte yapılabilir. Bundan sonraki aşamada kâğıtlar yapıştırma makinaları alanına taşınır ve gereken yapıştırma (kutu yapıştırma, taban yapıştırma, yan

yapıştırma, çift yapıştırma) işlemi yapılır. Daha sonra yapıştırılmış ürünler taşıyıcıya yüklenerek, asansör yardımıyla üst katta bulunan delik açma, el oyuk açma, zımba ve ip işlemleri alanına (ip birleştirme, ip örme, ip kesme) gönderilir. Gerçekleştirilen mevcut iş akış şeması Şekil 1'de verilmiştir.

Talebe göre, çantalarda el oyuk açma, delik açma ve ip işlemleri yapılır. Delik açma ve ip işlemleri aşamasındaki ip işlemleri operatörlerce manüel olarak gerçekleştirilir. Daha sonra, talebe göre deliklerde zımba olması isteniyorsa, zımba makinası ile çantalar zımbalanır. Depodan üretim birimine getirilen kâğıt rulolar ilk önce ebatlama alanında makine yardımı ile talep edilen miktar ve ebatlarda kesim işlemine tabi tutulur. Bu aşamada birçok kesim planının olabileceği ve kesim planlarının kalan üretim planlama kararlarıyla entegre olması gerekmektedir. Bu entegrasyon, envanter ve malzeme israfında önemli azalmalara izin verebilir. Kesme planları oluşturulurken ana malzemenin ebatları dikkate alınmaktadır. Bir ürüne ait örnek bir kesim planı Şekil 2'de verilmiştir. Şekil 2a'da ürün tek parça halinde kesim planı ile elde edilirken, Şekil 2b'de iki parçanın birleşimi şeklinde kesme planında yer almaktadır.

Kesim işleminden sonra uygulanan işleme göre ürün tipleri oluşmaktadır. Birinci tip ürün standart olup, diğerleri müşteriye özel olarak üretilir. Örneğin, ikinci tip çantaya yalnızca yıldız işlemi uygulanırken, üçüncü tip çantaya gofraj işlemi, dördüncü tip çantaya yıldız ile birlikte gofraj işlemi, beşinci tip çanta ipli olup ip işlemleri, altıncı tip çantaya ip ve zımba işlemleri ve yedinci tip çantaya el oyuk açma işlemi uygulanır. Farklı ürün tipleri Şekil 3'de gösterilmektedir.

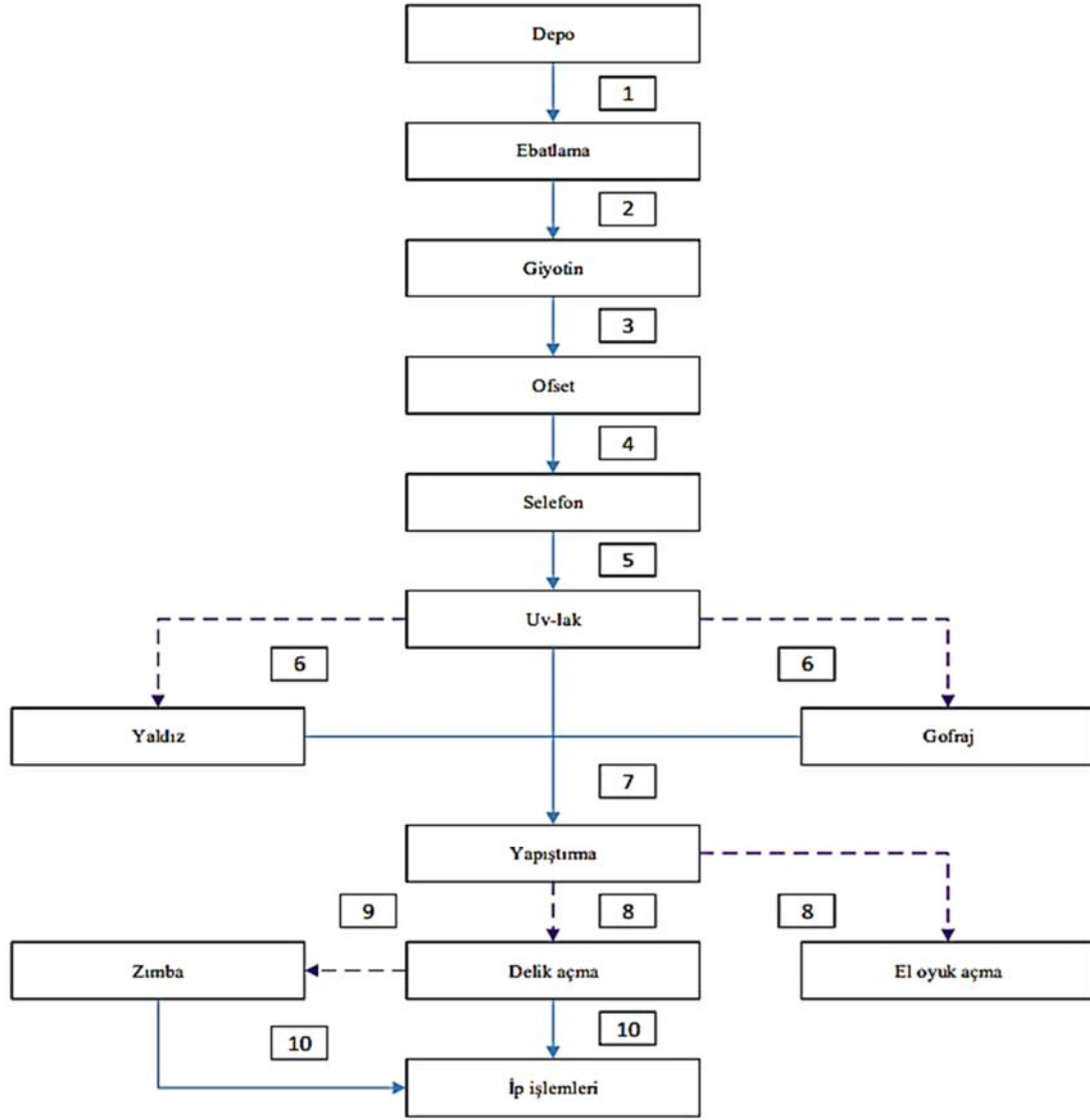
Firmada yapılan incelemeler sonucunda aşağıdaki olgular tespit edilmiştir.

- Makine ayarlaması ürün çeşidinden bağımsız olarak, ürünü üretmek için her ürün çeşidinden önce mutlaka yapılmalıdır.
- Hazırlık süresi ürünler arasındaki geçişlere göre değişmektedir.
- Kesme planları arası geçişlerde yalnızca bir defa ürünler arası geçiş hazırlık işlemi yapılır.
- Üretimi yapılan ürün periyotlar arasında değişiyorsa, sonraki periyotta üretimi yapılacak ürün için hazırlık gereklidir. Zira hazırlık işlemi önceki periyottan sonraki periyoda aktarılmaktadır.
- Kesme planları önceden belirlidir ve her periyotta yalnızca bir tanesi seçilmektedir.
- Her ürün tipine göre işlem zamanları seçilen kesme planına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir.
- Ürünler değiştiğinde kesme planları değişmektedir.
- Farklı kesme planlarına aynı ürünler atanırsa bunlar arasında sıra bağımlı hazırlık işlemi yok denecek kadar küçük olduğundan göz ardı edilmiştir.

Bu çalışmada, belirlenen problemlere çözüm sağlamaya odaklı bir üretim planının oluşturulması hedeflenmektedir. Bu plan ile, her periyotta her ürün için üretim, envanter, karışılanamayan ürün ve dışarıdan satın alınan ürün miktarları, ürün geçişleri ile üretim periyot geçişlerindeki hazırlık faaliyetlerinin belirlenmesi amaçlanmaktadır.

## 3. Bilimsel Yazın Araştırması (Literature Review)

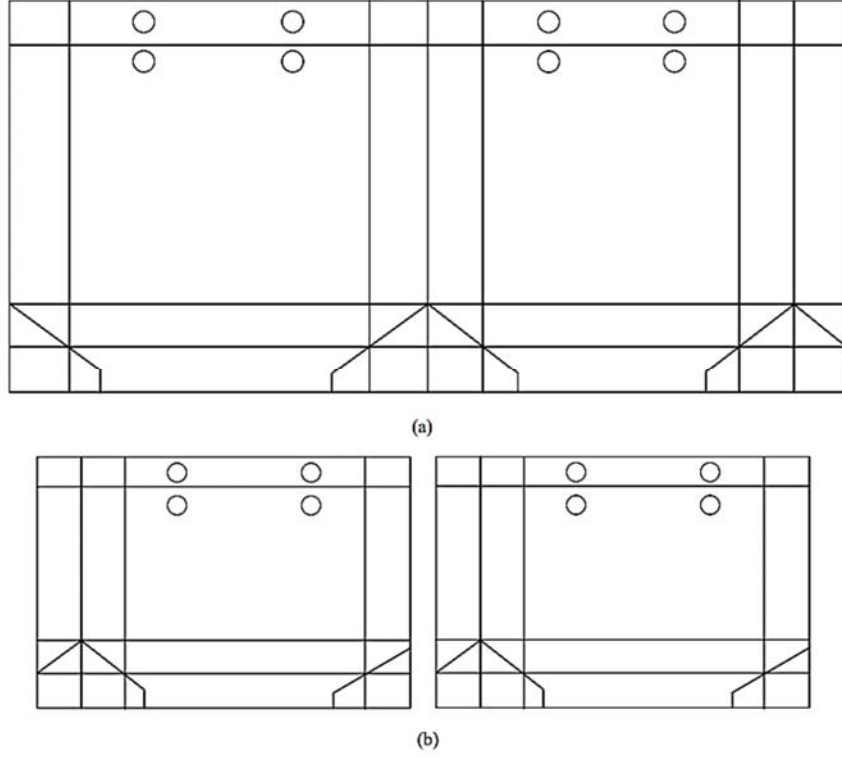
Bilimsel yazında konu ile doğrudan ve dolaylı olarak ilgili çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu kısımda, geliştirilen modelle ilgili olan başlıca çalışmalara değinilmiştir. Carravilla ve Sousa [4], sipariş üzerine üretim yapan bir işletmede üretim planlaması, tesis düzenleme ve hat dengeleme kararlarıyla birlikte bütünlük bir üretim planlama problemini analiz etmiştir. Zhu ve Wilhelm [5] bütünlük parti büyüklüğü belirleme ve sıra bağımlı çizelgeleme problemi üzerine bilimsel yazın araştırması yapmıştır. Çalışmalarında farklı makina



Şekil 1. Mevcut iş akış şeması (Current workflow)

düzenlemelerine yer verilmiş ve her bir kategorinin çözümü için metodu incelenmiştir. Neureuther vd. [6] sipariş üzerine çelik üretimi yapılan bir işletmede, ürün modelleri için doğrusal programlama temelli hiyerarşik/bütünleşik üretim planlama modeli geliştirmiştir. Clark vd. [7] bir hayvan besleme tesisindeki üretim parti büyüklüğü ve çizelgeleme problemi üzerinde çalışmıştır. Asimetrik gezgin satıcı probleminin matematiksel modeline dayanarak, hazırlık durumunun periyotlar arasında sıfır olduğu ve hazırlık durumunun bir periyottan diğerine korunduğu durum için iki farklı çok periyotlu model önermişlerdir. Problem, iteratif çözüm yöntemi geliştirilerek çözülmüştür. Wolsey [8] zaman penceresi içeren iki farklı parti büyüklüğü problemi üzerinde çalışmıştır. Belirli bir zaman aralığında her bir müşteriye özel olarak üretilmesi gereken siparişin üretim zamanı penceresi için hem sabit kapasiteli durumlar hem de kapasitelenirilmemiş durumlar için dinamik programlama algoritmaları önermiştir. Almada-Lobo vd. [9] cam kap sektöründeki bir firmada sıra-bağımlı hazırlıkların olduğu çok ürünli kapasitelenirilmiş parti büyüklüğü problemi üzerinde çalışmışlardır. Bu problem için gerekli tüm özellikleri içeren iki doğrusal karma tamsayılı matematiksel programlama modeli geliştirmişlerdir. Li vd.

[10] çok ürünli kapasitelenirilmiş dinamik parti büyüklüğü problemini tek seviyeli ve çok seviyeli durumları dikkate alarak modellemiştir. Bilimsel yazındaki pek çok modelden farklı olarak, modelleri ortak hazırlık maliyetini de içermektedir. Chen vd. [11] siparişe dayalı üretim ortamında, kısa vadeli kapasite planlaması problemini ele almışlardır. Seçilen tüm siparişlerin son teslim tarihine kadar tamamlanması koşulu altında operasyonel kârı enbüyüklemek amacıyla, operasyon yöneticisinin bir dizi potansiyel müşteri siparişini seçmesine yardımcı olmak için bir matematiksel model sunmuşlardır. Önerilen matematiksel model, normal çalışma zamanı, fazla mesai ve dış kaynak kullanımını içermektedir. Ehrenberg ve Zimmerman [12] sipariş üzerine cam üretimi yapan şirketlerin üretim planlarının belirlenmesi üzerine çalışmışlardır. Ele aldıkları problemin çözümü için benzetim tabanlı optimizasyon yaklaşımı önermişlerdir. Gansterer vd. [13] sipariş üzerine üretim yapılan sistemlerde planlanan teslim süresi, güven stoku ve parti büyüklüklerini belirlemek için benzetim tabanlı optimizasyon yöntemleri önermişlerdir. Chien-Chung [14] sipariş üzerine üretimin olduğu çok hatlı bir üretim tesisinde verimli ve hızlı karar verilmesini sağlamak için doğrusal olmayan programlama modeli önermiştir.



Şekil 2. Kesim planı örneği (Example of cutting pattern)

Şekil 3. Ürün tipleri: Standart, Yaldızlı, Gofrajlı, Yaldızlı+Gofrajlı, İpli, İpli+Zımbalı, El oyuklu  
(Product type: Standard, Gilded, Embossed, Gilded + Embossed, Corded, Corded + Stapled, Hand-carved)

Bruno vd. [15] kapasitelendirilmiş parti büyüklüğü formülasyonlarının klasik üretim planlama alanının dışında, pratik lojistik problemlerinde de etkin bir şekilde kullanılabileceğini göstermişlerdir. Ramezian vd. [16] akış tipi üretimde kapasitelendirilmiş parti büyüklüğü ve çizelgeleme problemi ele almışlardır. Sıra-bağımlı hazırlıkları içeren problem için etkin bir matematiksel model önermişlerdir. Rangel ve Maldonado [17] işler arası sıra bağımlı makina hazırlık süreleri ve maliyetlerin bulunduğu, tek makina ve tek seviye üretim sürecini göz önüne alarak bütünlük parti büyüklüğü ve çizelgeleme problemi için üç matematiksel model önermişlerdir. Gansterer [18] bütünlük planlamanın etkisini incelemek için, sipariş üzerine üretimin yapıldığı bir işletmede kapsamlı bir hiyerarşik üretim planlama modeli sunmuştur. Modelin performansı otomotiv yan sanayisinden elde edilen verilerle değerlendirilmiştir. Li vd. [19] dört çeşit maliyet faktörünü (malzeme maliyeti, işlem maliyeti, gecikme maliyeti ve tesis doluluk maliyeti) göz önüne alarak toplam kârın kapasite kısıtı ile en büyüklenmesini sağlayan sipariş üzerine üretim planlaması için bir matematiksel model önermişlerdir. Ji vd. [20] belirsiz kapasite ve rastgele talepler altında  $n$  bileşen içeren bir montaj hattı sistemi için en iyi üretim planlamasını tek bir periyotta incelemiştir. Mula vd. [21] iki parçalı bir enjeksiyon kalıplama işlemi içeren çok makineli kapasiteye

sahip parti boyutlandırma ve çizelgeleme modelini incelemiş ve yeni karma tamsayı matematiksel model önermişlerdir. Önerilen model otomotiv sektörü baz alınarak oluşturulan problem sınıflarında başarıyla uygulanmıştır. Ayrıca, modelin tek makine ile kıyaslaması yapılmıştır. Konu ile ilgili bilimsel yazındaki çalışmalar incelendiğinde araştırmacıların ya en temel problemlere ya da işletmelere özel problemlere odaklandıkları gözlenmektedir. Temel problem modellerinin işletmelerin pratik ihtiyaçlarına cevap verememesi ve işletmelerin kendine özel çeşitli kısıt ve amaçları bulunmasından dolayı işletme ihtiyaçlarına özel modellerin geliştirilmesi gerekmektedir. Bununla birlikte, modelleme aşamasında bilimsel yazında geliştirilen modellerdeki bazı özel kısıt ve durumların ele alınış biçimlerinin irdelenmesi faydalı olabilir. Mevcut çalışmada böyle bir yaklaşım izlenerek, sipariş üzerine kağıt/karton çanta üretimi yapan bir işletmedeki bütünlük çizelgeleme ve parti büyüklüğü belirleme problemi için karma tamsayı matematiksel programlama modeli önerilmiştir. Önerilen model, kesme planlarının entegre edilmesi ve dışarıdan satın alınmaları içermesi açısından literatürden farklılaşmaktadır. Önerilen modelde, periyot başı ve sonunda üretilen ürünün matematiksel ifadesinde Gupta ve Magnusson [22] tarafından önerilen yaklaşımlardan faydalanılmıştır.

#### 4. Çözüm Yaklaşımı (Solution Approach)

##### 4.1. Karma tam sayılı matematiksel programlama modeli (Mixed-integer mathematical programming model)

Mevcut problemin matematiksel ifadesi ve çözümü için karma tam sayılı bir matematiksel model geliştirilmiştir. Modele ait notasyon, amaç fonksiyonu ve kısıtlar şu şekildedir:

##### İndisler ve Kümeler:

$i, j$	: Çanta indisi
$t$	: Periyot indisi
$m$	: Kesme planı indisi
$N$	: Çanta kümesi ( $i=1, \dots, N; j=1, \dots, N$ )
$M$	: Kesme planı kümesi ( $m=1, \dots, M$ )
$T$	: Planlama dönemindeki periyot kümesi ( $t=1, \dots, T$ )
$F_t$	: $t$ periyodundaki ilk kesme planı

##### Parametreler:

$p_{im}$	: $i$ tipi çantadan $m$ kesme planında bir parti ürün üretmek için gerekli birim üretim süresi
$bs_{ij}$	: $i$ tipi çanta üretiminden sonra $j$ tipi çantaya geçiş için gerekli sıra bağımlı hazırlık süresi
$d_{it}$	: $t$ periyodundaki $i$ tipi çanta için talep miktarı
$ds_i$	: $i$ tipi çantanın birim satın alma maliyeti
$g_i$	: $i$ tipi çantanın karşılanamama (back-order) maliyeti
$h_i$	: $i$ tipi çantanın birim elde tutma maliyeti
$I_{i0}^+$	: $i$ tipi çantanın başlangıç envanter miktarı
$I_{i0}^-$	: $i$ tipi çantanın başlangıç karşılanamayan talep (back-order) miktarı
$c_t$	: $t$ periyodundaki toplam makina kapasitesi (üretim süresi)
$cp_{im}$	: $i$ tipi çantanın $m$ kesme planında üretim maliyeti
$s_{ij}$	: $i$ tipi çanta üretiminden $j$ tipi çantaya geçiş için gerekli birim sıra bağımlı hazırlık maliyeti
$I_i^{max}$	: $i$ tipi çantanın maksimum envanter miktarı
$e_i^{max}$	: $i$ tipi çantadan maksimum satın alınabilecek miktar
$BIGM$	: Pozitif büyük bir sayı

##### Karar değişkenleri:

$I_{it}^+$	: $i$ tipi çantanın $t$ periyodu sonundaki envanter miktarı
$I_{it}^-$	: $i$ tipi çantanın $t$ periyodu sonundaki karşılanamayan talep (back-order) miktarı
$x_{itm}$	: $i$ tipi çantanın $t$ periyodunda $m$ kesme planında üretim miktarı
$od_{it}$	: $i$ tipi çantanın $t$ periyodunda satın alım miktarı
$\omega_t$	: Sürekli yardımcı değişken ( $0 \leq \omega_t \leq 1$ ), eğer $t$ periyodunda en az bir ürün üretiliyorsa pozitif değer alır. Yapısı gereği, tam sayı olarak kısıtlanmamasına rağmen ya 0 ya da 1 değerini alır.
$\delta_t$	: Sürekli yardımcı değişken, eğer $t$ periyodunda tam olarak bir ürün üretiliyorsa sıfır değerini alır. Aksi halde, sınırlanmamış negatif olmayan değerler alır.
$z_{ijtm}$	$= \begin{cases} 1, i \text{ tipi çanta üretiminden } j \text{ tipi çantaya } t \\ \text{periyodunda } m \text{ kesme planına geçiş varsa} \\ 0, \text{ aksi halde} \end{cases}$
$y_{oim}$	$= \begin{cases} 1, \text{Başlangıç periyodunda } i \text{ tipi çanta üretmek} \\ \text{için } m \text{ kesme planında hazırlık yapılıyorsa} \\ 0, \text{ aksi halde} \end{cases}$
$y_{itm}$	$= \begin{cases} 1, i \text{ tipi çanta üretmek için } t \text{ periyodunda} \\ m \text{ kesme planında hazırlık yapılıyorsa} \\ 0, \text{ aksi halde} \end{cases}$

$$w_{it} = \begin{cases} 1, \text{ eğer } i \text{ tipi çanta } t \text{ periyodunda üretiliyorsa} \\ (x_{itm} > 0) \\ 0, \text{ aksi halde} \end{cases}$$

$$a_{it} = \begin{cases} 1, \text{ eğer } i \text{ tipi çanta } t \text{ periyodunda ilk üretiliyse} \\ 0, \text{ aksi halde} \end{cases}$$

$$b_{it} = \begin{cases} 1, \text{ eğer } i \text{ tipi çanta } t \text{ periyodunda enson üretiliyse} \\ 0, \text{ aksi halde} \end{cases}$$

##### Matematiksel programlama modeli:

Amaç fonksiyonu (Eş. 1-Eş. 5), elde tutma maliyeti (Eş. 1), karşılanamayan talep maliyeti (Eş. 2), dışarıdan satın alma maliyeti (Eş. 3), ürünler arası sıra bağımlı geçiş hazırlık maliyeti (Eş. 4) ve üretim maliyeti (Eş. 5) toplamının en küçüklenmesini ifade etmektedir.

$$\text{Min } Z = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T (h_i I_{it}^+) + \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T (g_i I_{it}^-) + \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T (ds_i od_{it}) + \quad (3)$$

$$\sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (s_{ij} z_{ijtm}) + \quad (4)$$

$$\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N \sum_{m=1}^M (cp_{im} x_{itm}) \quad (5)$$

##### Kısıtlar:

Eş. 6-Eş. 7 numaralı kısıtlar envanter denge kısıtını ifade etmektedir.

$$od_{it} + I_{i(t-1)}^+ + I_{it}^- + \sum_{m=1}^M x_{itm} - I_{it}^+ - I_{i(t-1)}^- = d_{it} \quad \forall i, \forall t > 1 \quad (6)$$

$$od_{it} + I_{i0}^+ + I_{it}^- + \sum_{m=1}^M x_{itm} - I_{it}^+ - I_{i0}^- = d_{it} \quad \forall i, \forall t=1 \quad (7)$$

Eş. 8 numaralı kısıt her periyotta üretilen tüm çantaların sıra bağımlı hazırlık süresi ve toplam üretim zamanının, ilgili periyotun kullanılabilir makine kapasitesini geçmemesini sağlamaktadır.

$$\sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^N p_{im} x_{itm} + \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N bs_{ij} z_{ijtm} \leq c_t \quad \forall t \quad (8)$$

Eş. 9 numaralı kısıt her tip çantanın üretimini yapılması için, her periyodun bu üretim için kesme planı hazırlığının yapılmasını ifade etmektedir. Eş. 9 ile üretim için kesme planı hazırlığı yapılmazsa hiçbir ürünün üretilmemesi sağlanmaktadır.

$$x_{itm} \leq \frac{c_t}{p_{im}} y_{itm} \quad \forall i, \forall t, \forall m \quad (9)$$

Eş. 10 numaralı kısıt ile her periyotta yalnızca bir kesme planı hazırlığı yapılması sağlanmaktadır.

$$\sum_{i=1}^N y_{itm} = 1 \quad \forall m, \forall t \quad (10)$$

Eş. 11-Eş. 12 numaralı kısıtlar, her periyotta  $j$  tipi çanta üretimi için  $m$ 'inci kesme planı hazırlığı yapıldıysa ve  $i$  tipi çanta üretimi için  $m-1$ 'inci kesme planı hazırlığı yapıldıysa, bu durumda ürünler arasında geçiş olduğunu ifade etmektedir.

$$z_{ijtm} \geq y_{it(m-1)} + y_{jtm} - 1 \quad \forall m | m > 1, \quad \forall t, \forall j, \forall i | i \neq j \quad (11)$$

$$z_{ijtm} \geq y_{oim} + y_{jtm} - 1 \quad \forall m, \forall t, \forall j, \forall i | i \neq j \quad (12)$$

Eş. 13 numaralı kısıt her periyotta tutulabilecek maksimum  $i$  tipi çanta adedini sınırlandırmaktadır.

$$I_{it}^+ \leq I_i^{max} \quad \forall i, \forall t \quad (13)$$

Eş. 14 numaralı kısıt her periyotta dışarıdan satın alınabilecek çanta adedini sınırlandırmaktadır.

$$od_{it} \leq e_i^{max} \quad \forall i, \forall t \quad (14)$$

Kısıt kümesi Eş. 15-Eş. 25 numaralı kısıtlar, verilen periyotlarda ilk ve son hangi çantanın üretildiğini belirler. Üretilen ürün periyotlar arasında değişiyorsa, sonraki periyotta üretimi yapılacak ürün için hazırlık gereklidir. Zira hazırlık durumu önceki periyottan bir sonraki periyoda aktarılmaktadır.

Eş. 15 numaralı kısıt, eğer  $i$  tipi çanta  $t$  periyodunda üretiliyorsa ( $w_{it} = 1$ ) bu durumda  $\omega_t$  değişkeninin bir değerini almasını sağlar.

$$w_{it} \leq \omega_t \quad \forall i, \forall t \quad (15)$$

Eş. 16 numaralı kısıt, eğer verilen periyotta birden fazla çanta tipi üretildiyse, bu durumda  $\delta_t$  değişkeninin pozitif değer almasını sağlar.

$$\sum_{i=1}^N w_{it} - 1 \leq (J-1) \delta_t \quad \forall t \quad (16)$$

Eş. 17-Eş. 18 numaralı kısıtlar, verilen periyotta üretim varsa ve tam olarak bir çanta tipinin üretimi gerçekleşmişse, bu durumda  $a_{it}$  değişkenine bir atanmasını sağlar.

$$\omega_t \leq \sum_{i=1}^N a_{it} \quad \forall t \quad (17)$$

$$\sum_{i=1}^N a_{it} \leq 1 \quad \forall t \quad (18)$$

Eş. 19-Eş. 20 numaralı kısıtlar, verilen periyotta üretim varsa ve tam olarak bir çanta tipinin üretimi gerçekleşmişse, bu durumda  $b_{it}$  değişkenine bir atanmasını sağlar.

$$\omega_t \leq \sum_{i=1}^N b_{it} \quad \forall t \quad (19)$$

$$\sum_{i=1}^N b_{it} \leq 1 \quad \forall t \quad (20)$$

Eş. 21 numaralı kısıt, verilen periyotta üretim varsa ve tam olarak bir çanta tipinin üretimi gerçekleşmişse, bu durumda  $a_{it}$  ve  $b_{it}$  değişkenine bir atanmasını sağlar. Bu kısıt sayesinde  $\delta_t$  değişkeninin sıfır değerini alması sağlanır.

$$a_{it} + b_{it} \leq 2 - \delta_t \quad \forall i, \forall t \quad (21)$$

Eş. 22-Eş. 23 numaralı kısıtlar, bir periyotta birden fazla çanta tipi üretildiğinde uygulanır. Bu kısıtlar sayesinde, eğer üretilen çanta tipi verilen periyotta ilk veya son sırada üretiliyse en az bir  $z_{ijtm}$  değişkeninin değerinin bir olması garantilenir.

$$\sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^N z_{jitm} \geq w_{it} - a_{it} \quad \forall i, \forall t \quad (22)$$

$$\sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^N z_{ijtm} \geq w_{it} - b_{it} \quad \forall i, \forall t \quad (23)$$

Eş. 24-Eş. 25 numaralı kısıtlar, eğer  $i$  tipi çanta  $t$  periyodunda üretiliyse, o periyotta ilk veya son olabilme durumunu ifade eder.

$$a_{it} \leq w_{it} \quad \forall i, \forall t \quad (24)$$

$$b_{it} \leq w_{it} \quad \forall i, \forall t \quad (25)$$

Eş. 26 numaralı kısıt, eğer  $i$  tipi çanta  $t$  periyodunda  $m$  kesme planı ile üretiliyorsa ( $x_{itm} > 0$ ), bu durumda  $w_{it}$  değişkeninin bir değerini almasını sağlamaktadır.

$$\sum_{m=1}^M x_{itm} \leq BIGM w_{it} \quad \forall i, \forall t \quad (26)$$

Eş. 27-Eş. 28 numaralı kısıtlar,  $t-1$ 'inci periyottan  $t$  periyoduna geçerken farklı ürün üretilmesi durumunda  $z_{ijtm}$  değişkeninin değer almasını sağlamaktadır.

$$z_{jitF_t} \geq y_{j(t-1)m} + a_{it} - 1 \quad \forall j, \forall i, \forall t, \forall m \quad (27)$$

$$z_{ij(t+1)F_t} \geq y_{j(t+1)F_t} + b_{it} - 1 \quad \forall t, \forall i, \forall j \quad (28)$$

Eş. 29 numaralı kısıt,  $\omega_t$  değişkeninin değer aralığının sınırlandırılmasını sağlamaktadır.

$$0 \leq \omega_t \leq 1 \quad \forall t \quad (29)$$

Eş. 30 numaralı kısıt, karar değişkenlerinin negatif olmama ve tamsayı olma durumunu tanımlamaktadır.

$$od_{it}, x_{itm} \geq 0 \text{ ve tamsayı} \quad \forall i, \forall t, \forall m \quad (30)$$

Eş. 31 numaralı kısıt, karar değişkenlerinin negatif olmama durumunu tanımlamaktadır.

$$I_{it}^+, I_{it}^-, \delta_t \geq 0 \quad \forall i, \forall t \quad (31)$$

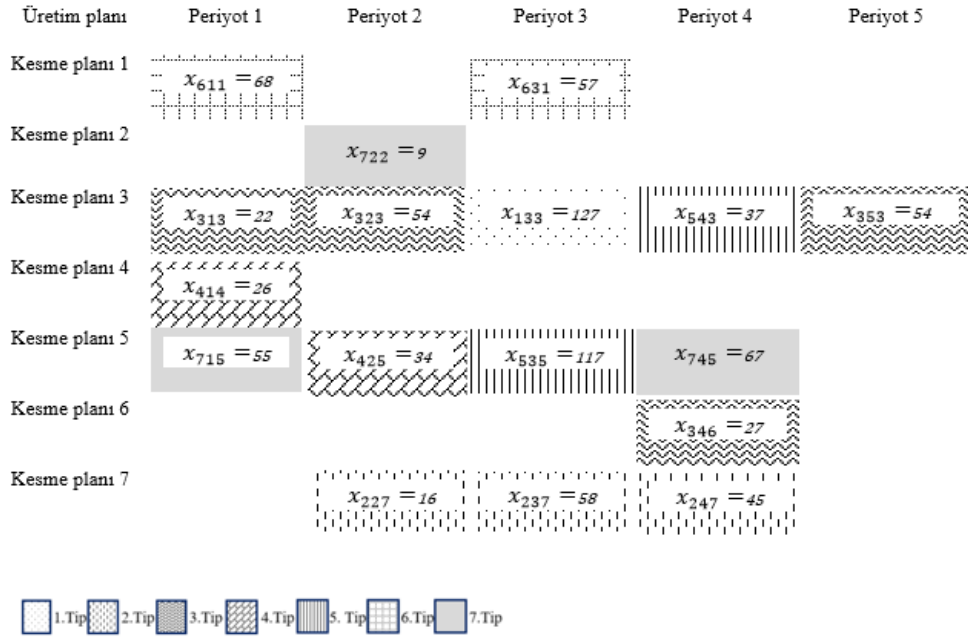
Eş. 32 numaralı kısıt, 0-1 karar değişkenlerini tanımlamaktadır.

$$z_{ijtm}, y_{itm}, w_{it}, a_{it}, b_{it} \in \{0,1\} \quad \forall j, \forall i, \forall t, \forall m \quad (32)$$

Geliştirilen karma tamsayı matematiksel programlama modeli sonucunda oluşan 7P-5T-7M örnek problemi için veriler ve üretim planı şu şekildedir:

$h_i$	= [12, 16, 13, 13, 17, 11, 19 ];
$g_i$	= [10, 14, 18, 15, 14, 19, 16 ];
$ds_i$	= [16, 12, 11, 15, 11, 13, 16 ];
$I_i^{max}$	= [232, 232, 216, 226, 230, 228, 222 ];
$e_i^{max}$	= [58, 58, 54, 57, 58, 57, 56 ];
$d_{it}$	= [[52, 99, 86, 61, 116, ], [60, 72, 116, 103, 47, ], [76, 88, 74, 81, 108, ], [83, 91, 42, 85, 113, ], [68, 50, 115, 95, 40, ], [102, 80, 114, 47, 82, ], [111, 65, 69, 110, 92, ]];
$cp_{im}$	= [[25, 27, 13, 47, 35, 20, 42, ], [36, 35, 40, 25, 33, 36, 16, ], [41, 44, 11, 46, 46, 22, 35, ], [33, 21, 27, 20, 18, 43, 38, ], [35, 26, 11, 47, 10, 46, 13, ], [21, 32, 50, 46, 46, 48, 31, ], [44, 28, 31, 26, 19, 26, 46, ]];
$c_t$	= [1104, 1090, 1232, 1164, 1196 ];
$s_{ij}$	= [[10000, 381, 337, 323, 251, 264, 340, ], [381, 10000, 116, 209, 165, 248, 330, ], [337, 116, 10000, 230, 367, 249, 214, ], [323, 209, 230, 10000, 332, 309, 231, ], [251, 165, 367, 332, 10000, 229, 235, ], [264, 248, 249, 309, 229, 10000, 168, ], [340, 330, 214, 231, 235, 168, 10000, ]];

Bu veriler kullanılarak geliştirilen matematiksel programlama modeli çözüldüğünde Şekil 4'deki üretim planı elde edilmiştir. Üretim planından her kesme planında kaç adet hangi ürünün üretileceği ve sırası elde edilebilir. Toplam maliyet 45333 olarak bulunmuştur.



Şekil 4. Üretim planı (Production plan)

Toplam maliyete etki eden diğer tüm maliyetlerin oranları Şekil 5’de verilmiştir. Toplam maliyete etkisi en fazla olan maliyet kalemi sıra bağımlı geçiş hazırlık maliyetidir. Bunu, dışarıdan satın alma maliyeti takip etmektedir.



Şekil 5. Toplam maliyete etki eden tüm maliyetlerin oranları (Rates of all costs affecting the total cost)

#### 4.2. Önerilen matsezgisel algoritma (Proposed matheuristic algorithm)

Matsezgisel yöntemler, metsezgisel yöntemlerle, matematiksel programlama metotlarının birlikte kullanıldığı çözümlenme yöntemleridir [23]. Bu yöntem sınıfı, NP-zor problemlerin çözümünde daha yüksek performans sağlamak için metsezgisel algoritmalar ile matematiksel programlama tekniklerinin birlikte kullanımı olarak ifade edilmektedir [24]. Bu kullanımın amacı, metsezgisel algoritmalara kıyasla en iyi çözüme daha yakın sonuçlar elde etmek ve matematiksel programlama tekniklerine kıyasla daha kısa sürede sonuçlar elde etmektir [25]. Bu yöntemlerin NP-zor sınıfta yer alan serü yüklemesi probleminde etkinliği gösterilmiştir [26]. Koch vd. [27] lastik endüstrisinde müşteri önceliğini dikkate alan parti

boyutlandırma ve çizelgeleme problemi önerip, büyük boyutlu problemlerin çözümünde matsezgisel algoritma kullanmışlardır. Cunha vd. [28] çok parçalı parti büyüklüğü problemini yeniden üretim koşulu altında ele almıştır. Problemin çözümünde sütün oluşturma yöntemine dayalı matsezgisel algoritma kullanılmıştır. Carvalho ve Nascimento [29] paralel makinelerde üçgenel olmayan hazırlık ( $p$  ürününden  $q$  ürüne geçiş ve  $q$  ürününden  $r$  ürüne geçiş sürelerinin toplamı  $p$  ürününden  $r$  ürüne geçiş hazırlık süresinden küçük hazırlık süresi) içeren sıra bağımlı parti boyutlandırma ve çizelgeleme problemini çözmek için matsezgisel yöntem önermişlerdir. Bu yöntem üçgenel olmayan hazırlık içeren problemler için özel olarak tasarlanmıştır. Bu nedenle test edilen örnek problemlerin çoğunda daha iyi performans göstermiştir.

Önermiş olduğumuz matsezgisel yöntemde, ele alınan problem iki adet alt karar problemine ayrılmıştır: (i) Ürünlerin kesme planına atama kararı, (ii) Bütünleşik parti büyüklüğü belirleme ve çizelgenmesi kararı. Ele alınan problemde ürünlerin kesme planına atama kararı tavlama benzetimi kullanılarak elde edilmektedir. Elde edilen karar, ikinci alt probleme girdi olarak sağlanmakta ve ana modelden türetilen alt model çözümlerle parti büyüklüğü belirleme ve çizelgeleme kararı sağlanmaktadır. Alt modelin amaç fonksiyonu Eş. 33’de ifade edildiği gibidir:

$$\begin{aligned} \text{Min } Z = & \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T (h_i l_{it}^+ + g_i l_{it}^- + ds_i od_{it}) \\ & + \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (s_{ij} \overline{y_{itm-1}} * \overline{y_{jtm}}) \\ & + \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N \sum_{m=1}^M (cp_{im} x_{itm}) \end{aligned} \quad (33)$$

Eş. 6-Eş. 8 ve Eş. 13-Eş. 14 nolu kısıtlar ile

$$x_{itm} \leq \frac{c_t}{p_{im}} \overline{y_{itm}} \quad \forall i, \forall t, \forall m \quad (34)$$

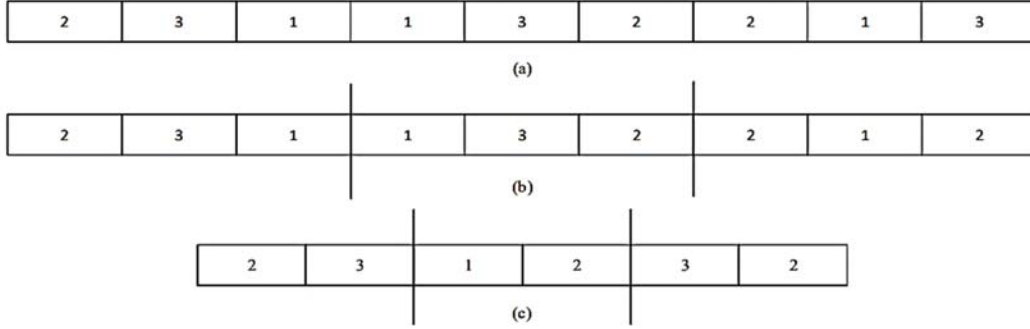
Eş. 34 ile üretim için kesme planı hazırlığı yapılmazsa hiçbir ürünün üretilmemesi sağlanmaktadır.

$\overline{y_{itm}}$ ;  $i$  tipi çantanın  $t$  periyodunda  $m$  kesme planına atanmasını gösteren karar değişkeninin tavlama benzetimi algoritması ile elde edilen değeri göstermektedir.

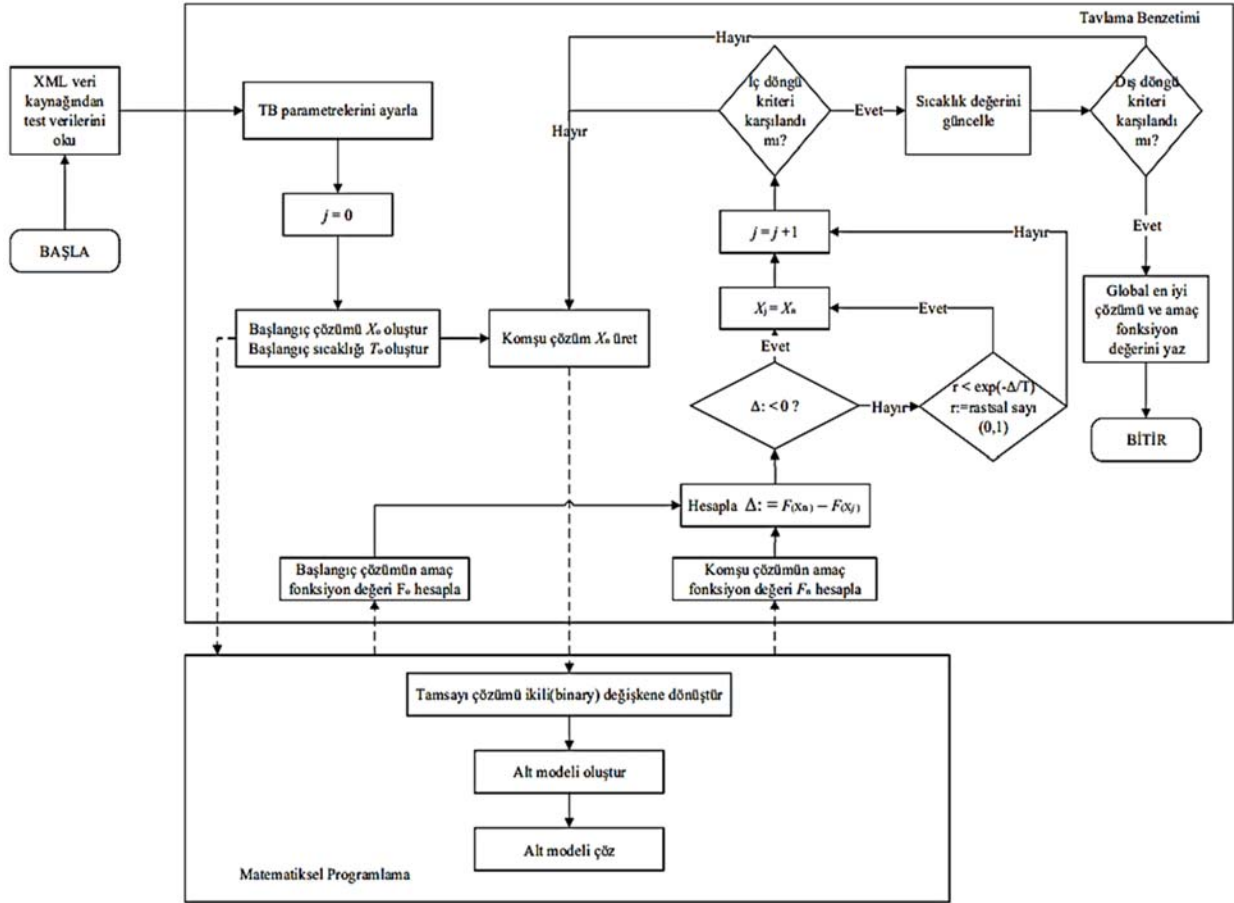


Önerilen tavlama benzetimi algoritmasında kesme planına atama için aday çözüm ifadesinde permütasyon kodlama yaklaşımı kullanılmıştır. Aday çözümünün dizi uzunluğu  $M*T$  boyutundadır. 3 çanta tipi, 3 kesme planı ve 3 periyot için örnek çözüm gösterimi Şekil 6a'da verilmiştir. Burada rastgele her bir çanta her bir kısma atanmıştır. Her bir periyottaki kesme planı sayısı bilindiği için örnek dağıtım 3 kesme planına göre Şekil 6b'de ve 2 kesme planına göre Şekil 6c'de verilmiştir. Şekil 6b'de, 1. Periyotta 2. Çanta tipi 1. Kesme planına, 3. Çanta tipi 2. Kesme planına ve 1. Çanta tipi 3. Kesme planına atandığı kabul edilmektedir ( $y_{211} = 1, y_{312} = 1$  ve  $y_{113} = 1$ ). Bu çözüm gösteriminden her periyot hangi çanta tipinin üretimi

ile başlar ve biter bilgisi doğrudan elde edilmiştir. Böylece alt matematiksel modelde ana modelde olan kısıtlar ortadan kalkmış olup, alt matematiksel modelin boyutu küçültülmüştür. Başlangıç çözümü rassal olarak elde edilmektedir. Komşu çözüm iki farklı operatör (swap (yer değiştirme) ve inversion (ters çevirme)) arasından rassal olarak seçilerek oluşturulmaktadır. Swap operatöründe çözüm gösterimindeki çanta tiplerinden rasgele 2 farklı çanta tipi seçilir ve yerleri değiştirilir. Inversion operatöründe ise belli bir çanta tipi grubu seçilir. Bu çanta tipi grubu sırasıyla sondan başa çevrilerek çözüm gösteriminde aynı yere konur. Bu çalışma kapsamında önerilen matsezgisel algoritmanın akış şeması Şekil 7'de verilmiştir.



Şekil 6. (a) 3 kağıt çanta tipi, 3 periyot için örnek bir çözüm gösterimi (b) 3 kesme planına göre atanmış kağıt çanta tiplerinin çözüm gösterimi (c) 2 kesme planına göre atanmış kağıt çanta tiplerinin çözüm gösterimi  
(a) An example illustration for 3 paper bag types, 3 periods (b) Solution representation of assigned paper bag types according to 3 cutting plans (c) Solution representation of assigned paper bag types according to 2 cutting plans



Şekil 7. Matsezgisel algoritmanın akış şeması (Flow chart of the matsezgisel algorithm)

Tavlama Benzetimi (TB), optimizasyon problemlerini etkin bir şekilde çözümlenmek amacıyla Kirkpatrick vd. [30] tarafından geliştirilen rastsal aramaya dayalı bir optimizasyon yöntemidir. TB çok sayıda karmaşık optimizasyon problemine uygulanmıştır [31]. Önerilen tavlama benzetimi algoritmasının sözde kodu Şekil 8'da verilmiştir. Algoritmada kullanılan kısaltmalar çözüm (komşu) (başlangıç) (mevcut) ( $X_{(n)(o)(c)}$ ), çözümün amaç fonksiyon değeri (komşu) (başlangıç) (mevcut) ( $F_{(n)(o)(c)}$ ), en iyi çözüm ( $X_{eniyl}$ ), en iyi çözümün amaç fonksiyon değeri ( $F_{eniyl}$ ), iterasyon sayacı ( $I$ ), Başlangıç sıcaklığı ( $T_0$ ), Son sıcaklık ( $T_f$ ), Sıcaklık değeri ( $T$ ), Soğutma oranı ( $q$ ) ve  $T$ . sıcaklıkta toplam iterasyon sayısı ( $MaxI_{iter}$  ( $T$ )) ile gösterilmektedir.

### 5. Sayısal Çalışmalar (Computational Studies)

Bu kısımda, matematiksel model ve matsezigisel yöntemlerde kıyaslama yapabilmek için gerçek hayat verilerine göre problem sınıfları oluşturulmuştur. Sağlanan ve tahmin edilen verilerden her parametre için alt ve üst limitler belirlenmiş ve gözlemlenen limitler aralığında tek tip bir dağılımı takip eden bir veri üretici oluşturulmuştur. Her problem sınıfı P-T-M ile tanımlanmıştır. Burada P çanta tipi, T periyot ve M kesme planı sayısını göstermektedir. Oluşturulan her problem sınıfı 10 tane ayrı problem örneği içermektedir. Toplam 80 adet problem çözümlenerek karşılaştırmalar yapılmıştır. Problem sınıfları  $d_{it}$  (uniform(0;40,120)),  $s_{ij}$  (uniform(100,400)),  $cp_{im}$  (uniform(10,50)),  $ds_i$  (uniform(10,25)),  $h_i$  ve  $g_i$  (uniform(10,20)),  $I_i^{max}$  ( $= \max \{d_{it}\} * 2$ ),  $e_i^{max}$  ( $= \max \{d_{it}\}/2$ ),  $c_t$  ( $= \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T d_{it} * 2$ ),  $bs_{ij}$  ( $= \lceil s_{ij}/10 \rceil$ ) ve  $p_{im}$  ( $= \lceil cp_{im}/10 \rceil$ ) kullanılarak oluşturulmuştur. Yapılan çalışmalar iki

bölümde toplanmıştır. İlk bölümde, makalede ele alınan problem için üç alt sınır hesaplanacaktır. İkinci bölümde, önerilen matematiksel model ve matsezigisel algoritmanın performansları test edilecektir.

#### 5.1. Önerilen Matematiksel Model için Alt Sınır (Lower Bound for Proposed Mathematical Model)

Bu alt bölümde önerilen matematiksel model için üç alt sınır değeri Ramezaniyan vd.'nin [16] kapasitelendirilmiş parti büyüklüğü ve çizelgeleme problemi için uyguladığı yöntemden yararlanılarak hesaplanacaktır. İlk alt sınır, tüm ikili değişkenlerin gevşetilmesiyle elde edilir. İkinci alt sınır  $Z_{ijtm}$  ve  $y_{itm}$  karar değişkenlerinin gevşetilmesiyle elde edilir. Son olarak üçüncü alt sınır sadece  $Z_{ijtm}$  karar değişkeninin gevşetilmesiyle elde edilmiştir. Elde edilen üç alt sınırın performanslarını değerlendirmek ve önerilen matematiksel model ile karşılaştırmak için tüm problem sınıfları ele alınmıştır. Tablo 1 sonuçları göstermektedir. Gap sütunundaki değerler, matematiksel modelin amaç değeri ile alt sınırların amaç değeri arasındaki farkın matematiksel modelin amaç değerine bölünmesi ile bulunmuştur. Tablo 1, diğer iki alt sınıra kıyasla üçüncü alt sınırın avantajlarını teyit etmektedir.

#### 5.2. Önerilen Matematiksel Model ve Matsezigisel Algoritmanın Performans Analizi (Performance Analysis of the Proposed Mathematical Model and Matheuristic Algorithm)

Mevcut çalışmada kullanılan bilgisayar Intel i7 Core 2.4 GHz işlemci ve 16 GB RAM olup Windows 10 işletim sistemine sahiptir. Önerilen matematiksel modeli çözmek için ILOG CPLEX Optimization Studio

---

```

1. Başlangıç: Tavlama benzetimi algoritmasının parametrelerini belirle
2. Bir başlangıç çözümü ve mevcut çözüm oluştur
3.  $X_{eniyl} := X_{(o)}$ ;  $F_{eniyl} := F_{(o)}$ ;  $X_{(c)} := X_{(o)}$ ;  $F_{(c)} := F_{(o)}$ ;
4.  $T := T_0$ ;
5. While ( $T > T_f$ )
6.      $I := 0$ ;
7.     While ( $I < MaxI_{iter}(T)$ )
8.         Mevcut çözümden (1,2) arasında rastgele bir sayı seçerek bir komşu çözüm  $X_{(n)}$  üret
           ve amaç fonksiyon değeri  $F_{(n)}$  hesapla
           Seçilen sayı 1 ise swap (yer değiştirme), 2 ise inversion (ters çevirme) operatörü uygula
9.          $\Delta := F_{(n)} - F_{(c)}$ ;
10.        If ( $\Delta < 0$ )
11.             $X_{(c)} := X_{(n)}$ ;
12.             $F_{(c)} := F_{(n)}$ ;
13.        Else
14.             $r_1 :=$  rastsal sayı(0,1);
15.            If ( $r_1 < \exp(-\Delta/T)$ );
16.                 $X_{(c)} := X_{(n)}$ ;
17.                 $F_{(c)} := F_{(n)}$ ;
18.            End if
19.        End if
20.        If ( $F_{(c)} < F_{eniyl}$ )
21.             $X_{eniyl} := X_{(c)}$ ;  $F_{eniyl} := F_{(c)}$ ;
22.        End if
23.         $I := I+1$ ;
24.    End While
25.     $T := qT$ ;
26. End While
27. Raporla  $X_{eniyl}$ ;  $F_{eniyl}$ 

```

---

Şekil 8. Önerilen tavlama benzetimi algoritmasının sözde kodu (Pseudo code of proposed simulated annealing algorithm)

**Tablo 1.** Alt sınır hesaplama süreleri ve kıyaslama sonuçları (Computation times and comparison results of lower bounds)

	Alt Sınır 1			Alt Sınır 2			Alt Sınır 3			
	Problem No	Sonuç	Süre(s)	Gap(%)	Sonuç	Süre(s)	Gap(%)	Sonuç	Süre(s)	Gap (%)
(4P-3T-4M)	1	13531	0,01	15,16	14669,11	0,19	8,02	15949	0,08	0,00
	2	13398	0,00	9,69	14476,14	0,05	2,43	14836	0,23	0,00
	3	12360	0,00	10,94	13389,32	0,06	3,53	13879	0,08	0,00
	4	13838	0,00	8,03	14906,53	0,08	0,93	15046	0,08	0,00
	5	16430	0,01	15,22	17562,02	0,14	9,38	19380	0,09	0,00
	6	15202	0,02	7,27	16093,57	0,05	1,83	16393	0,11	0,00
	7	13158	0,02	16,65	14752,54	0,08	6,55	15787	0,14	0,00
	8	14093	0,02	20,77	16282,16	0,13	8,46	17787	0,09	0,00
	9	14730	0,00	7,92	15736,07	0,06	1,63	15997	0,14	0,00
	10	15173	0,00	13,40	16360,31	0,06	6,62	17521	0,08	0,00
(5P-4T-6M)	1	22780	0,02	14,15	24877,35	0,19	6,25	26536	0,55	0,00
	2	23644	0,02	9,57	25677,04	0,22	1,79	26145	0,33	0,00
	3	18764	0,02	14,37	21162,73	0,20	3,42	21913	2,17	0,00
	4	23285	0,02	20,31	25864,86	0,17	11,48	29220	0,47	0,00
	5	26349	0,02	11,68	28625,86	0,39	4,05	29833	0,38	0,00
	6	30444	0,02	8,96	32651,32	0,17	2,36	33441	0,33	0,00
	7	16845	0,03	19,43	19480,11	0,31	6,82	20907	0,38	0,00
	8	19780	0,02	12,00	21630,27	0,22	3,76	22476	0,45	0,00
	9	28606	0,02	11,56	30340,45	0,27	6,20	32346	0,42	0,00
	10	20427	0,02	11,37	22397,00	0,20	2,82	23047	0,58	0,00
(7P-5T-7M)	1	35513	0,03	17,79	40696,35	0,69	5,79	43199	2,34	0,00
	2	36472	0,03	18,86	41453,44	1,89	7,78	44950	11,38	0,00
	3	37184	0,03	18,31	41412,32	0,78	9,03	45521	2,05	0,00
	4	39031	0,03	15,78	43340,05	1,28	6,48	46345	15,91	0,00
	5	41522	0,03	14,02	46304,34	2,70	4,12	48293	2,91	0,00
	6	41958	0,03	11,31	45754,73	0,55	3,28	47308	2,80	0,00
	7	33577	0,02	13,22	37079,19	0,56	4,17	38692	28,52	0,00
	8	38356	0,01	17,91	43679,09	0,64	6,51	46723	23,52	0,00
	9	34041	0,03	17,00	38841,26	0,77	5,30	41015	19,81	0,00
	10	33320	0,03	17,33	37931,72	0,73	5,89	40304	33,64	0,00
(9P-6T-8M)	1	48362	0,06	17,53	55048,92	1,84	6,13	58641	69,88	0,00
	2	52427	0,06	21,10	59660,04	0,97	10,22	66451	118,59	0,00
	3	57602	0,06	22,28	65471,87	7,98	11,66	74116	81,61	0,00
	4	56446	0,05	17,20	64023,65	8,72	6,08	68171	43,61	0,00
	5	56476	0,05	14,60	62707,97	2,20	5,18	66131	68,55	0,00
	6	63776	0,08	15,29	70213,71	2,92	6,74	75291	83,19	0,00
	7	49238	0,06	20,80	56721,84	3,75	8,76	62166	63,19	0,00
	8	45674	0,06	21,72	52857,01	1,67	9,41	58349	69,91	0,00
	9	55450	0,06	19,76	61978,26	2,47	10,32	69108	129,27	0,00
	10	51395	0,06	21,68	58003,28	2,69	11,61	65620	260,19	0,00
(10P-6T-10M)	1	65600	0,09	16,95	72621,61	2,41	8,06	78988	186,08	0,00
	2	61162	0,09	17,91	69639,59	15,45	6,53	74502	3600	0,00
	3	64150	0,11	16,88	71548,25	4,44	7,29	77177	553,52	0,00
	4	62368	0,09	18,23	70365,3	5,84	7,74	76269	3593,67	0,00
	5	59613	0,08	19,96	67075,92	2,83	9,94	74476	3600	0,00
	6	57523	0,08	17,61	65550,73	3,63	6,11	69820	80,17	0,00
	7	56535	0,09	24,95	64449,35	2,89	14,45	75334	1799,69	0,00
	8	53850	0,09	22,33	60928,70	3,23	12,12	69332	1294,09	0,00
	9	60538	0,08	15,80	67505,36	12,56	6,10	71894	3421,12	0,00
	10	64254	0,09	17,80	72304,78	6,05	7,50	78165	3600	0,00
(12P-8T-8M)	1	87511	0,16	25,45	99149,38	20,53	15,53	117383	331,86	0,00
	2	98237	0,14	22,56	110494,8	29,81	12,90	126860	879,09	0,00
	3	100436	0,16	16,29	112275,4	25,06	6,42	119980	3600	0,00
	4	94498	0,14	19,36	106271,6	42,39	9,31	117179	3600	0,00
	5	93908	0,16	15,09	103850,2	18,55	6,10	110594	383,77	0,00
	6	96482	0,16	20,41	109255,1	31,03	9,87	121220	843,84	0,00
	7	92097	0,16	20,64	103566,7	31,34	10,76	116052	805,08	0,00
	8	98808	0,16	17,39	110132,1	27,21	7,92	119607	3600	0,00
	9	94368	0,14	27,08	107662,1	28,69	16,81	129415	3600	0,00
	10	110821	0,14	17,31	122199,2	27,19	8,82	134022	320,77	0,00

Sürüm 12.10 programı kullanılmıştır. Önerilen matsezzgisel algoritma Microsoft Visual Studio 2019 C++'da CPLEX'in MIP çözücüsü entegre edilerek kodlanmıştır. Modelin çalıştırılması 3600 CPU saniye ile sınırlandırılmıştır. Tavlama benzetimi algoritması rassallık

içerdiği için 20 kez çalıştırılmıştır. Algoritmanın parametreleri için denemeler yapılmış olup başlangıç sıcaklığı ( $T_0$ )=100, son sıcaklık ( $T_f$ )=1, soğutma oranı ( $q$ )=0,985 ve toplam iterasyon sayısı ( $MaxI_{iter}(T)$ )=10 olarak alınmıştır. Tablo 2'de bulunan en iyi ve

(15P-10T-7M)	1	164064	0,27	20,31	182504,6	42,77	11,36	205884	3600	0,00
	2	153662	0,25	24,60	172284,5	34,30	15,47	203809	3600	0,00
	3	184775	0,30	17,45	202456,6	115,58	9,55	223839	3600	0,00
	4	148790	0,27	22,42	165853,4	54,77	13,52	191784	3600	0,00
	5	173226	0,23	21,47	193506,3	35,14	12,28	220593	3600	0,00
	6	156361	0,27	21,40	173711,7	32,36	12,67	198922	3600	0,00
	7	177893	0,25	20,21	196431,0	180,42	11,89	222945	3600	0,00
	8	144718	0,27	21,53	162820,3	61,36	11,71	184422	3600	0,00
	9	168542	0,28	20,35	187510,5	44,06	11,38	211593	3600	0,00
	10	165366	0,27	21,66	183416,2	41,48	13,11	211088	3600	0,00
(20P-12T-9M)	1	241831	0,63	24,38	272784,94	1256,78	14,71	319814	3600	0,00
	2	236882	0,66	26,67	267106,87	298,23	17,32	323055	3600	0,00
	3	264587	0,64	24,11	294792,07	83,69	15,45	348664	3600	0,00
	4	270925	0,61	23,81	304356,72	663,42	14,40	355568	3600	0,00
	5	257814	0,59	24,26	285652,85	170,58	16,08	340395	3600	0,00
	6	235609	0,64	19,45	26292,05	88,86	10,09	292496	3600	0,00
	7	245594	0,64	22,95	273256,21	485,51	14,27	318740	3600	0,00
	8	254851	0,67	22,59	284507,06	91,59	13,58	329213	3600	0,00
	9	234656	0,61	25,68	265107,74	90,14	16,04	315747	3600	0,00
	10	270860	0,59	20,79	298705,55	272,31	12,64	341941	3600	0,00

Tablo 2. Problem sınıflarının çözümü (Results of problem instances)

Problem No	Matematiksel Model			Matsezgisel		Matsezgisel			
	Sonuç	Süre(s)	Gap	En iyi sonuç	En iyi sonuca ulaşma süresi(s)	Ortalama sonuç	Ortalama süre(s)	Sapma (%)	
(4P-3T-4M)	1	15949	1,11	0,00	15949	40,16	15949	40,68	0,00
	2	14836	1,45	0,00	14836	41,35	14836	41,73	0,00
	3	13879	1,64	0,00	13879	39,87	13879	40,07	0,00
	4	15046	1,43	0,00	15046	36,37	15046	36,99	0,00
	5	19380	1,87	0,00	19380	35,12	19380	35,52	0,00
	6	16393	1,09	0,00	16393	36,99	16393	37,10	0,00
	7	15787	1,37	0,00	15787	37,12	15787	37,59	0,00
	8	17787	1,28	0,00	17787	38,85	17787	39,07	0,00
	9	15997	1,01	0,00	15997	39,83	15997	40,01	0,00
	10	17521	0,87	0,00	17521	40,10	17521	40,36	0,00
(5P-4T-6M)	1	26536	3,56	0,00	26536	42,12	26536	42,65	0,00
	2	26145	4,84	0,00	26145	42,17	26145	42,57	0,00
	3	21913	3,85	0,00	21913	43,74	21913	43,90	0,00
	4	29220	3,09	0,00	29220	41,12	29220	41,67	0,00
	5	29833	4,01	0,00	29833	40,16	29833	40,75	0,00
	6	33441	5,47	0,00	33441	39,19	33441	39,64	0,00
	7	20907	4,86	0,00	20907	41,83	20907	42,07	0,00
	8	22476	3,12	0,00	22476	40,89	22476	41,00	0,00
	9	32346	5,84	0,00	32346	42,90	32346	43,21	0,00
	10	23047	5,21	0,00	23047	41,27	23047	41,67	0,00
(7P-5T-7M)	1	43199	15,24	0,00	43199	51,13	43199	51,45	0,00
	2	44950	15,78	0,00	44950	50,45	44950	50,96	0,00
	3	45521	14,78	0,00	45521	49,02	45521	49,47	0,00
	4	46345	16,21	0,00	46345	49,57	46345	49,89	0,00
	5	48293	16,09	0,00	48293	52,71	48293	53,02	0,00
	6	47308	15,55	0,00	47308	49,03	47308	49,43	0,00
	7	38692	14,01	0,00	38692	49,33	38692	49,75	0,00
	8	46723	12,11	0,00	46723	48,17	46723	48,47	0,00
	9	41015	12,54	0,00	41015	49,99	41015	50,12	0,00
	10	40304	13,67	0,00	40304	50,40	40304	50,81	0,00

ortalama sonuçlar ile en iyi ve ortalama sonuca ulaşma zamanları verilmiştir. Tablo 2'den de görüleceği üzere çözüm zamanları matematiksel modelde problem boyutu arttıkça artmaktadır. 20P-12T-9M boyutlu problem sınıfında 3600 CPU saniye içerisinde tüm örneklerde çözüm alınamamış olup en fazla %3,03'den küçük fark (gap) oluşmuştur. Matematiksel model ile bulunan sonuçlar matsezgisel algoritma tarafından bulunan sonuçlar ile karşılaştırılmış ve sapma (Matematiksel model ile bulunan sonuç - matsezgisel algoritma tarafından bulunan en iyi sonuç / Matematiksel model ile

bulunan sonuç x 100%) Tablo 2'de gösterilmiştir. Matsezgisel algoritma 80 problem örneğinden 40 problemi optimum olarak çözebilmiştir. Tablo 2'den de görüleceği üzere çözüm zamanları ve matematiksel modelin bulunduğu optimum veya belirtilen sürede bulunan en iyi değerden sapma miktarının %3,67' den az olması önerilen algoritmanın her zaman yüksek kaliteli çözümler elde edilebileceğini ve sonuçların oldukça tatmin edici olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak, önerilen matsezgisel yöntem, ele alınan kâğıt çanta üretimi yapan bir işletmedeki bütünleşik parti büyüklüğü

(9P-6T-8M)	1	58641	35,73	0,00	58641	43,76	58641	43,96	0,00
	2	66451	36,35	0,00	66451	42,36	66451	43,63	0,00
	3	74116	43,45	0,00	74116	42,01	74116	42,34	0,00
	4	68171	34,22	0,00	68171	44,25	68171	44,66	0,00
	5	66131	45,31	0,00	66131	45,86	66131	46,00	0,00
	6	75291	48,78	0,00	75291	41,56	75291	41,86	0,00
	7	62166	51,18	0,00	62166	42,70	62166	42,85	0,00
	8	58349	52,22	0,00	58349	41,12	58349	41,33	0,00
	9	69108	44,25	0,00	69108	43,18	69108	43,53	0,00
	10	65620	38,01	0,00	65620	42,10	65620	42,39	0,00
(10P-6T-10M)	1	78988	331,56	0,00	79625	86,66	81654	88,86	-0,81
	2	74502	532,89	0,00	75470	94,15	76431	96,54	-1,30
	3	77177	206,73	0,00	78009	88,91	79356	90,97	-1,08
	4	76269	413,99	0,00	76912	96,25	78236	98,44	-0,84
	5	74476	304,47	0,00	75247	92,10	76532	94,59	-1,04
	6	69820	71,16	0,00	70120	90,57	71354	92,56	-0,43
	7	75334	373,41	0,00	76687	87,52	78334	88,97	-1,80
	8	69332	364,84	0,00	70325	89,99	71831	91,58	-1,43
	9	71894	265,34	0,00	72621	83,73	74157	85,66	-1,01
	10	78165	614,07	0,00	78451	94,51	79920	96,85	-0,37
(12P-8T-8M)	1	117383	278,83	0,00	117541	109,90	119782	112,86	-0,13
	2	126860	462,80	0,00	127856	106,27	130454	108,54	-0,79
	3	119980	797,59	0,00	120936	108,79	122146	112,00	-0,80
	4	117179	641,22	0,00	118086	110,90	120104	113,88	-0,77
	5	110594	285,34	0,00	111733	113,72	113541	115,55	-1,03
	6	121220	439,03	0,00	122928	104,56	125033	107,86	-1,41
	7	116052	367,00	0,00	117416	109,04	119339	111,36	-1,18
	8	119607	563,95	0,00	120536	108,10	122321	110,25	-0,78
	9	129415	448,84	0,00	130199	107,35	131824	109,69	-0,61
	10	134022	297,41	0,00	135918	106,73	137547	109,00	-1,41
(15P-10T-7M)	1	205884	3600,48	0,22	209537	147,31	212569	150,54	-1,77
	2	203809	3361,84	0,00	206929	146,79	209785	152,00	-1,53
	3	223839	629,27	0,00	224605	144,82	227034	150,53	-0,34
	4	191784	1538,81	0,00	195507	145,06	197941	149,16	-1,94
	5	220593	1074,63	0,00	223578	146,22	226035	149,33	-1,35
	6	198922	3601,38	0,15	202369	147,01	204964	150,31	-1,73
	7	222945	3600,78	0,18	225839	145,94	228135	148,89	-1,30
	8	184422	3607,64	0,28	188089	146,83	190357	150,00	-1,99
	9	211593	1015,06	0,00	215482	147,59	217835	149,86	-1,84
	10	211088	728,86	0,00	214238	149,28	216885	152,55	-1,49
(20P-12T-9M)	1	319814	3600,00	1,43	325131	265,13	330458	271,58	-1,66
	2	323055	3600,24	0,71	331224	259,74	335745	264,89	-2,53
	3	348664	3600,15	1,06	358102	278,59	362196	282,15	-2,71
	4	355568	3600,80	0,68	367742	282,45	372057	286,91	-3,42
	5	340395	3600,47	0,69	350733	289,11	356001	293,07	-3,04
	6	292496	3600,63	0,87	302254	256,87	305986	262,54	-3,34
	7	318740	3600,12	0,32	330432	275,33	335824	279,09	-3,67
	8	329213	3600,79	0,94	339678	281,88	344812	285,93	-3,18
	9	315747	3600,09	3,03	325254	269,07	331036	275,06	-3,01
	10	341941	3600,92	2,19	350573	291,78	355914	296,08	-2,52

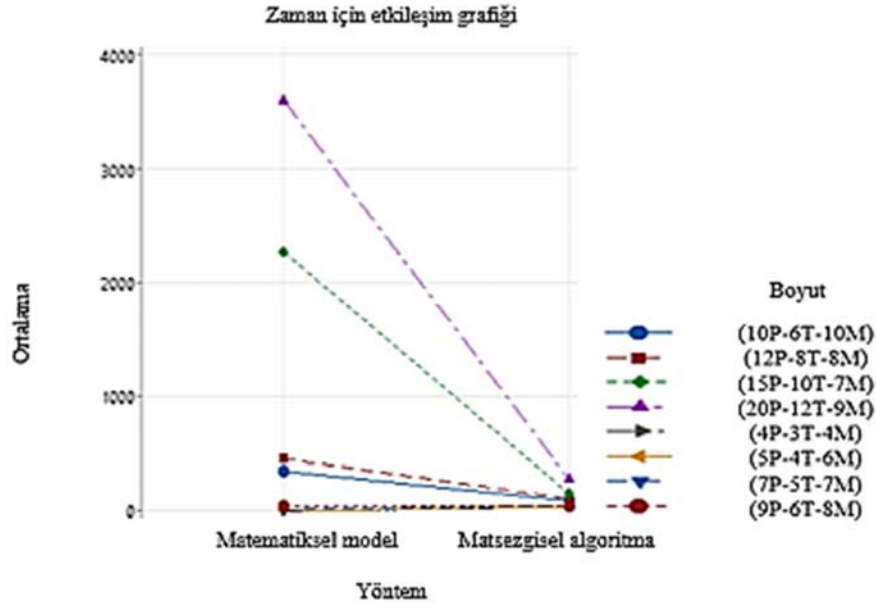
**Tablo 3.** Varyans analizi (Analysis of variance)

Kaynak	DF	Adj SS	Adj MS	F-Değeri	P-Değeri
Yöntem	1	22065892	22065892	182,88	0,000
Boyut	7	71564681	10223526	84,73	0,000
Yöntem*Boyut	7	56751283	8107326	67,19	0,000
Hata	144	17374741	120658		
Toplam	159	167756596			

belirleme ve çizelgeleme probleminin çözüm ve çözüm zamanı açısından etkindir.

Minitab programı ile veriler analiz edilerek kullanılan yöntemlerin ve problem boyutunun sonuca olan etkisi araştırılarak varyans analizi

yapılmıştır. Elde edilen varyans analizi tablosu Tablo 3’de verilmiştir. Güven seviyesi %95 olduğunda ( $\alpha = 0,05$ ) yöntemin, boyutun ve yöntemle-boyutun etkileşiminin (Yöntem\*Boyut) etkileri incelenmiştir. Bu üç faktörün p değeri  $\alpha = 0,05$  değerinden küçük olduğundan aralarındaki fark anlamlıdır.



Şekil 9. Yöntem, boyut ve çözüm süresi ilişkisi (Method, dimension and computational time relationship)

Yöntem, boyut ve çözüm süresi ilişkisini gösterebilmek amacıyla Şekil 9'de ilişki grafiği verilmiştir. Grafikten de görülebileceği gibi matsezsizsel algoritma özellikle büyük boyutlu problemlerde oldukça başarılıdır.

## 6. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışmada, sipariş üzerine kağıt-karton çanta üretimi yapan bir firmadaki bütünsel parti büyüklüğü belirleme ve çizelgeleme problemi incelenmiştir. Problemin çözümü için karma tam sayılı programlama modeli önerilmiştir. Geliştirilen model, üretim maliyeti, elde tutma maliyeti, karşılanamayan talep maliyeti, dışardan satın alma maliyeti ve sıra bağımlı ürün geçişlerinin hazırlık maliyeti toplamını en küçükmeyi hedeflemektedir. Önerilen model işletme verileri ile test edilerek doğrulanmış ve tüm kısıtları sağlayabilen gerçekçi ve uygulanabilir optimal üretim planlarını oluşturabildiği görülmüştür.

Gelecek çalışmalarda planlanan parti büyüklüğünün bir kısmının kusurlu olduğu bir üretim sistemi de probleme dâhil edilebilir ve bu problem içinde sezgisel yöntemler geliştirilerek, matsezsizsel çözüm yaklaşımı sunulabilir.

## Kaynaklar (References)

1. Tatar T., İşletmelerde Üretim Yönetimi ve Teknikleri, A.D.M.M.A Yayınları, Ankara, 1982.
2. Stadler H., Kilger C., Meyr, H., Supply Chain Management And Advanced Planning. Concepts, Models, Software and Case Studies, Springer, 2015.
3. Bitran, G.R., Yanasse H.H., Computational complexity of the capacitated lot size problem, *Management Science*, 28 (10), 1174-1186, 1982.
4. Carravilla M. A., de Sousa J.P., Hierarchical production planning in a make-to-order company: A case study, *European Journal of Operational Research*, 86 (1), 43-56, 1995.
5. Zhu X., Wilhelm W.E., Scheduling and lot sizing with sequence-dependent setup: A literature review, *IIE Transactions*, 38 (11), 987-1007, 2006.

6. Neureuther B.D., Polak G.G., Sanders N.R., A hierarchical production plan for a make-to-order steel fabrication plant, *Production Planning & Control*, 15 (3), 324-335, 2004.
7. Clark A.R., Neto R.M., Toso E.A., Multi-period production setup-sequencing and lot-sizing through ATSP subtour elimination and patching, In *Proceedings of the 25th Workshop of the UK Planning and Scheduling Special Interest Group*, 80-87, December, 2006.
8. Wolsey L.A., Lot-sizing with production and delivery time windows, *Mathematical Programming*, 107 (3), 471-489, 2006.
9. Almada-Lobo B., Klabjan D., Antónia Carravilla M., Oliveira J.F., Single machine multi-product capacitated lot sizing with sequence-dependent setups, *International Journal of Production Research*, 45 (20), 4873-4894, 2007.
10. Li Y., Tao Y., Wang F., An effective approach to multi-item capacitated dynamic lot-sizing problems, *International Journal of Production Research*, 50 (19), 5348-5362, 2012.
11. Chen C.S., Mestry S., Damodaran P., Wang C., The capacity planning problem in make-to-order enterprises, *Mathematical and Computer Modelling*, 50 (9), 1461-1473, 2009.
12. Ehrenberg C., Zimmermann J., Simulation-based optimization in make-to-order production: scheduling for a special-purpose glass manufacturer, In *Simulation Conference (WSC) Proceedings of the 2012 Winter IEEE*, 1-12, December, 2012.
13. Gansterer M., Almeder C., Hartl R., Simulation-based optimization methods for setting production planning parameter, *International Journal of Production Economics*, 151, 206-213, 2014.
14. Chien-Chung L., Optimisation of make-to-order production for multiple-line production, *South African Journal of Industrial Engineering*, 24 (3), 139-149, 2013.
15. Bruno G., Genovese A., Piccolo C., The capacitated lot-sizing model: a powerful tool for logistics decision making, *International Journal of Production Economics*, 155, 380-390, 2014.
16. Ramezani R., Saidi-Mehrabad M., Teimoury E., A mathematical model for integrating lot-sizing and scheduling problem in capacitated flow shop environments, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 66, 347-361, 2013.
17. Rangel S., Maldonado M., Three mathematical models for a integrated lot sizing and scheduling problem, *Proceeding Series of the Brazilian Society of Applied and Computational Mathematics*, 2 (1), 1-6, 2014.
18. Gansterer M., Aggregate planning and forecasting in make-to-order production systems, *International Journal of Production Economics*, 170, 521-528, 2015.

19. Li X., Guo S., Liu Y., Du B., Wang L., A production planning model for make-to-order foundry flow shop with capacity constraint, *Mathematical Problems in Engineering*, 2017.
20. Ji Q., Wang Y., Hu X., Optimal production planning for assembly systems with uncertain capacities and random demand, *European Journal of Operational Research*, 253 (2), 383–391, 2016.
21. Mula, J., Díaz-Madroñero, M., Andres, B., Poler, R., Sanchis, R., A capacitated lot-sizing model with sequence-dependent setups, parallel machines and bi-part injection moulding, *Applied Mathematical Modelling*, 100, 805-820, 2021.
22. Gupta D., Magnusson T., The capacitated lot-sizing and scheduling problem with sequence-dependent setup costs and setup times, *Computers & Operations Research*, 32 (4), 727-747, 2005.
23. Boschetti M., Maniezzo V., Roffilli M., Röhlér A.B., *Matheuristics: optimization, Simulation and Control*, In International workshop on hybrid metaheuristics, Springer, Berlin, 171-177, 2009.
24. Croce F. D., Grosso A., Salassa F., *Matheuristics: Embedding MILP solvers into heuristic algorithms for combinatorial optimization problems, Heuristics: Theory and applications*, Editör: Siarry P., Nova Science Publishers, Inc., New York, 53-68, 2013.
25. Küçükaydın H., Column generation based matheuristics for a vehicle routing problem with time windows and variable start time, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 34 (4), 2061-2078, 2019.
26. Çalışkan E., İşleyen S.K., Çerçioğlu H., A mixed integer mathematical model for loading problem in seru manufacturing systems and matheuristic solution approach, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 36 (2), 793-806, 2021.
27. Koch, C., Arbaoui, T., Ouazene, Y., Yalaoui, F., De Brunier, H., Jaunet, N., De Wulf, A., A Matheuristic Approach for Solving a Simultaneous Lot Sizing and Scheduling Problem with Client Prioritization in Tire Industry, *Computers & Industrial Engineering*, 165 (4), 107932, 2022.
28. Cunha, J. O., Kramer, H. H., Melo, R. A., Effective matheuristics for the multi-item capacitated lot-sizing problem with remanufacturing, *Computers & Operations Research*, 104, 149-158, 2019.
29. Carvalho, D. M., Nascimento, M. C., Hybrid matheuristics to solve the integrated lot sizing and scheduling problem on parallel machines with sequence-dependent and non-triangular setup, *European Journal of Operational Research*, 296 (1), 158-173, 2022.
30. Kirkpatrick, S., Gelatt, Jr.C.D., Vecchi, M.P., *Optimization by Simulated Annealing*, *Science*, 220 (4598), 671-680, 1983.
31. Özbel B., Baykasoğlu A., A matheuristic based solution approach for the general lot sizing and scheduling problem with sequence dependent changeovers and back ordering. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 14 (1), 115-128, 2023.

