

# KAYNAK MAKİNELERİNİN VARDİYA BAZINDA ÇİZELGELENMESİ PROBLEMİ İÇİN İKİ AŞAMALI BİR ÇÖZÜM YAKLAŞIMI

Tuğba Saraç\*, Kumsal Erten, Elif Yılmaz

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Eskişehir  
tsarac@ogu.edu.tr, kumsal.erten@gmail.com, eliifyilmaz@gmail.com

Geliş Tarihi: 14.11.2015; Kabul Ediliş Tarihi: 02.05.2018

## ÖZ

Bu çalışmada, beyaz eşya üreticisi bir işletmenin bünyesinde bulunan kaynak makinelerinde ürünlerin hangi makinelerde, hangi sırayla üretilmesi gerektiğinin belirlendiği  $n$  ürün,  $m$  ilişkisiz paralel makina çizelgeleme probleminin özel bir hali ele alınmıştır. Literatürde yer alan çalışmalarda genellikle işlerin sırası belirlenmekte ancak işlerin hangi vardiyada üretileceği dikkate alınmamaktadır. Oysa gerçek hayatta vardiya bazında dikkate alınması gereken farklı kısıtlar söz konusudur. Bu çalışmada önerilen model hem işlerin hangi makineye hangi sıraya atanacağını hem de üretileceği vardiyayı belirlemektedir. Böylece vardiyaya özel kapasite kısıtı gibi durumları dikkate almak mümkün olabilmektedir. Ele alınan problemde, hazırlık süreleri ihmal edilebilecek kadar küçük olmasına rağmen, birbirine benzemeyen işlerin art arda üretilmeleri üretim sürecini zorlaştırması nedeniyle istenmemektedir. Ürünlerin farklılıkları, en, boy, marka gibi özelliklerine bağlı olarak değişmektedir. Bu çalışmada öncelikle tüm ürünlerin ardışık üretilmeleri durumunda benzemezlik düzeylerini temsil edebilecek bir farklılık katsayısı tanımlanmış ve bu katsayının hesaplanabilmesi için bir yaklaşım geliştirilmiştir. Problemin amaçları son işin tamamlanma zamanının ve farklılık katsayılarının toplamının en küçüklenmesidir. Çok amaçlı yapıda olan ve sürece özel kısıtlar içeren problem için bir hedef programlama modeli önerilmiştir. Önerilen bütünlükmatematiksel model küçük boyutlu bir problem ve gerçek hayat problemi kullanılarak test edilmiştir. Gerçek hayat problemini bütünlük model ile çözebilmek mümkün olmamıştır. Büyük problemlerin çözümü için bütünlük model yerine birbirini ardı sıra çalışacak iki aşamalı bir çözüm yaklaşımı önerilmiştir. Yöntemin ilk aşamasında işlerin atanacağı makineler belirlenmekte, ikinci aşamada ise, birinci aşamada belirlenen, makinalara atanmış işlerin, sıralarına ve vardiyalarına karar verilmektedir. Önerilen yaklaşım gerçek hayat probleminin çözülebilmesini mümkün kılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** İlişkisiz paralel makine çizelgeleme problemi, vardiya bazlı çizelgeleme, hedef programlama, kaynak makineleri

## A TWO STAGE SOLUTION APPROACH FOR THE SHIFT-BASED SCHEDULING PROBLEM ON WELDING MACHINES

### ABSTRACT

In this study, one of the special version of  $n$  product,  $m$  unrelated parallel machine scheduling problem is considered. This problem occurs in a firm which produces white goods and it is determining that which job produces at which welding machine and in what order. Generally, alignment of workload is determined on scheduling problems but the shifts of the workload are not considered. However, in real-life, there are some restrictions that needs attention, in shift basis. Therefore, this study proposes a model both scheduling the jobs on which machine needs to be used and align it correctly, also designates the shift of production. With this model, special circumstances such as specific capacity for a shift could be considered. In this problem, there are preparations periods depending on alignment. These periods are changing depending on the weight, height and brand of product. In this study first, a coefficient of variation has been identified that could represent their preparation time and an approach has been developed to calculate these coefficients. In this way, measurement of setup time will consist of in case of sequential production of all products requirements can be eliminated. Purpose of this problem is minimizing the sum of finishing period of the last assignment and discrepancy factor. A goal programming model is developed for this multi-objective problem which includes special process constraints. This suggested mathematical model is tested with small sized and real-life problems. A solution is obtained for the small sized problem but real-life problem could not be solved with GAMS/CPLEX. Therefore, the two-stage approach which will work successively has been proposed instead of integrated models for the solution of major problems. In the first stage of the procedure, Works are assigned to shifts. In the second stage, a mathematical model is solved for each shifts. The real life problem can be solved by proposed solution approach.

**Keywords:** Unrelated parallel machine scheduling problem, shift-based scheduling, goal programming, welding machines

\* İletişim yazarı

TÜBİTAK 2241/A (2209/B) - Sanayi Odaklı Lisans Bitirme Tezi Destekleme Programı 2015 Yılı 5. Döneminde TÜBİTAK tarafından destek almıştır.

## 1. GİRİŞ

Bir üretim sisteminde çalışanların ve kullanılan makinelerin etkinlik ve verimliliği üretim sürecini önemli derecede etkiler. Etkin ve verimli bir sürecin yaratılmasında birçok faktör rol oynamaktadır. Bunlardan önemli bir tanesi de çizelgelemedir.

Çizelgeleme fonksiyonu bir şirkette matematiksel veya sezgisel teknikler yardımı ile işlerin gerçekleştirilmesinde sınırlı kaynakların tahsis edilmesine olanak sağlar. Kaynakların uygun tahsisi ise şirketin amaçlarını eniyilemesine ve hedeflerine erişmesine olanak sağlar (Baker, 1974; Eren ve Güner, 2002).

Çizelgeleme problemleri; parametrelerin deterministik (belirli) ya da stokastik (belirsiz) olması üretim ortamının tek makinalı ya da çok makinalı olması, geliş sürecinin durağan (statik) ya da dinamik olmasına göre değiştiği çeşitli problem yapılarını kapsar (Eren ve Güner, 2002). Çizelgeleme problemlerinde genellikle sonlu sayıda makine olduğu kabul edilmektedir ve iş sayısı  $n$  ve makine sayısı ise  $m$  ile ifade edilmektedir (Pinedo, 2016).

Bir çizelgeleme probleminin en çok kabul gören sınıflandırma biçimi  $\alpha | \beta | \gamma$  üçlü gösterimidir. Bu üçlü gösterimde;  $\alpha$  makine ortamını,  $\beta$  problemde ele alınan kısıtları,  $\gamma$  ise amaç fonksiyonunu ya da fonksiyonlarını göstermektedir. Bu çalışmada ele alınan problem, ilişkisiz paralel makine probleminin özel bir halidir. Literatürde çizelgeleme problemleri için kullanılan sınıflandırma biçimine göre,  $R_m | M_j, \text{ sürece özel kısıtlar} | C_{enb}, \Sigma S_{ij}$  olarak gösterilebilir. Burada  $R_m$  problemin ilişkisiz paralel makina çizelgeleme problemi olduğunu,  $M_j$  makina uygunluk kısıtlarının dikkate alındığını, sürece özel kısıtlar, taşıma sistemi kısıtı gibi işletmenin üretim sürecinden kaynaklanan kısıtların varlığını,  $C_{enb}$  ve  $\Sigma S_{ij}$  problemin son işin tamamlanma zamanını ve farklılık katsayıları toplamının enküçüklenmesi olmak üzere iki amacının olduğunu ifade etmektedir.

Bir çizelgeleme problemi tek amaçlı ya da çok amaçlı olabilmektedir. Literatürde çoğunlukla tek amaçlı problemler üzerinde çalışılmış olmasına karşın; gerçek hayatta çok amaçlı olanlarla daha çok karşılaşmaktadır. Bu sebeple çok amaçlı çizelgelemenin tek amaçlı çizelgelemeye kıyasla daha gerçekçi ve uygulanabilir

olduğu söylenebilir. Ayrıca literatürde paralel makine çizelgeleme problemlerini ele alan çalışmaların önemli bir kısmı özdeş paralel makinaları ele almıştır. Bu çalışmada, ilişkisiz paralel makine problemi üzerine çalışılmıştır.

İlişkisiz paralel makine çizelgeleme problemini ele alan çalışmalar incelendiğinde, Liaw ve ark. (2003) toplam ağırlıklı gecikmeyi en küçük yapacak şekilde bir çizelgeleme oluşturmayı amaçlamışlardır. Bu NPzor problemin çözümü için dal sınır algoritması uygulamışlar ve çözüm aralığı için alt ve üst sınırlar üretmişlerdir. Mokotoff ve Chretienne (2002)  $R_m // C_{enb}$  problemi için kesme algoritmasını uygulamışlar ve elde ettikleri çözümleri yaklaşım algoritmaları ile desteklemişlerdir. Li ve Yang (2008), Chen (2005) ve Rabadi ve ark. (2006) yaptıkları çalışmalarda sezgisel yöntemler kullanmışlardır. Pinedo (2016) ve Peyro ve Ruiz (2011) ise ilişkisiz makinelerin çizelgenmesi üzerine çeşitli araştırmalar yapmışlardır. Rocha ve ark. (2008) ilişkisiz paralel makinelerin hazırlık sürelerini de dikkate alarak önerdikleri tam sayılı programlama modelini Cplex 9.0 ve dal-sınır algoritması ile çözerek elde ettikleri sonuçları karşılaştırmışlardır. Martello ve ark. (1997) ilişkisiz paralel makine çizelgeleme probleminde son işin tamamlanma zamanını enküçüklemek için yaklaşım algoritmaları önermişlerdir.

Vardiya çizelgeleme problemlerine literatürde çok yer verilmemiştir. Vardiya çizelgeleme konusundaki tam sayılı matematiksel modellerden ilki 1954 yılında George Dantzig tarafından, ikincisi ise 1979 yılında Elbridge Keith tarafından geliştirilmiştir (Thompson, 1999). Bechtold ve Jacobs (1990), Aykin (1996), Thompson (1999), vb. vardiya çizelgelemesi yapmak üzere tam sayılı matematiksel modeller geliştirmişlerdir.

Literatürde çizelgeleme problemleri için geliştirilen pek çok farklı çözüm yöntemi ve ele alınan pek çok farklı süreç özelliği mevcuttur. Bu çalışmada, şimdiye kadar yapılmış çoğu çalışmanın aksine vardiya bazında kısıtların olduğu ilişkisiz paralel makine çizelgeleme problemi ele alınmıştır. Erişilen literatür incelendiğinde ilişkisiz paralel makinelerde vardiya bazında çizelgeleme probleminin ele alındığı bir çalışmaya rastlanmamıştır.

Sadece iş sırasını belirleyen klasik çizelgeleme yaklaşımına göre bir problem çözüldüğünde bu sonu-

cun gerçek hayatta uygulanması genellikle mümkün değildir. Çünkü işletmelerin her vardiyaya özel kapasite ve uygunluk kısıtları mevcuttur. Çizelgenin bu kısıtlara uygun hazırlanabilmesi ise işlerin hangi vardiyaya ya da vardiyalarda üretileceğinin kesin olarak bilinmesini gerektirmektedir. Bu nedenle bu çalışmada vardiyaya bazında çizelgeleme yapılmıştır. Bu durum literatürde yer alan klasik uygunluk kısıtlarından farklıdır. Literatürdeki kısıtlar genellikle bir işin bir makineye atanıp atanamayacağı yönündedir. Ancak bu çalışmada ele alındığı haliyle, işlerin ayrıca vardiyaya bazında da atanmaları gerekmektedir. Bu da problemi daha zor bir yapıya dönüştürmektedir. Bu çalışmada hem vardiyaya bazında uygunluk kısıtları (her vardiyada her makinenin çalışmaması durumu) hem de vardiyaya bazında kapasite kısıtları (her vardiyada otomatik taşıma sisteminin ve sonraki süreçlerin kapasiteleri vardır. Dolayısıyla üretim çizelgesi buna göre hazırlanmalıdır.) mevcuttur. Bu haliyle çalışma erişilen literatürdeki benzerlerinden farklılık göstermektedir.

## 2. PROBLEMİN TANIMI

Problemin yaşandığı üretim işletmesinde çizelgeleme, mümkün olduğunca işleri geciktirmemeye özen göstererek planlama sorumlusunun tecrübeleri doğrultusunda sistematik bir yaklaşım kullanılmadan yapılmaktadır. İşletmede sipariş tipi üretim yapılmakta ve 3200 çeşit ürün üretilmektedir. Sık sık yeni siparişler geldiği için planlama periyodu 24 saat olarak belirlenmiştir. Böylece yeni siparişler gelmesi durumunda üretim planındaki değişiklikleri en kısa sürede göz önünde bulunduran, etkili ve verimli bir planlama mümkün olacaktır. Bir planlama periyodunda 30 çeşide kadar ürün üretilebilmektedir.

İşletmede 4 adet paralel kaynak makinesi bulunmaktadır. Bu makinelerin farklı teknik özelliklere sahip olmaları sebebiyle her ürün her makinede üretilememektedir. Ayrıca, her kaynak makinesi aynı ürünü farklı hızlarda üretmektedir.

Kaynak makinelerinde bir işten diğerine geçilirken yapılacak hazırlığın süresi ihmal edilebilir düzeydedir. Ancak birbirine benzeyen işlerin ardışık çizelgelenmesi işlem kalitesini ve yaşanacak üretim problemlerini azaltmaktadır. Bu nedenle firma mümkün olduğunca benzer işlerin arka arkaya çizelgelenmesini istemektedir.

Ele alınan problemde, bir ürünün hatve, yükseklik, derinlik, uzunluk ve marka olmak üzere beş karakteristik özelliği vardır. İki ürünün bu beş özelliği de aynı ise, ard arda üretildiklerinde herhangi bir problem yaşanmamaktadır. Çizelgeleme yapılırken birbiri ardına çizelgelenen ürünlerin mümkün olduğunca çok özelliğinin aynı olması istenmektedir. Ancak mevcut uygulamada ürün çeşitliliğinin çok olması nedeniyle bu her zaman mümkün olamamaktadır. Birbirinden çok farklı ürünlerin arka arkaya çizelgelenmesi, makinelerin verimliliğinin düşmesine sebep olmaktadır. Bir başka deyişle, birbirine benzeyen ürünlerin aynı makinelere atanması, bu mümkün olamıyorsa art arda üretilen ürünlerin olabildiğince az farklılığa sahip olması gerekmektedir. İşletmede, ürünlerin işleme girme sırası sistematik bir yaklaşımla belirlenmediği için dikkate alınması gereken tüm seçenekler üretilemeyip gözden kaçırılmaktadır. Bu durum, fazla fire oluşmasına ve makinelerin üretiminin yavaşlamasına sebep olmaktadır.

Bir diğer önemli konu da, uzman personelin her vardiyada olamaması nedeniyle, bazı makinelerin bazı vardiyalarda çalışmamasıdır. Bu durum, vardiyaya özel çizelgeleme yapılmasını gerektirmektedir.

Kaynak işlemleri tamamlanan paneller, panel taşıma askısına takılarak, otomatik taşıma sistemi aracılığı ile boyahaneye taşınmaktadır. Otomatik taşıma sistemi sabit bir hızla çalışmaktadır ve belli sayıda taşıma askısına sahiptir. Her taşıma askısına bir ya da birden fazla panel takılması mümkündür. Taşıma askılarının uzunluğu standarttır. Bir taşıma askısına, asılacak panellerin uzunlukları toplamı taşıma askısının uzunluğunu geçmemelidir. Bir vardiyada ortalama 900 adet panel taşıma askısının kullanılması mümkündür. İşletme, kaynağı tamamlanmış panellerin ara stok yapılmaksızın boyahane bölümüne taşınmasını istediğinden, çizelgeleme yapılırken taşıma sisteminin kapasitesi göz önünde bulundurulmalıdır. Bir askıya asılan ortalama panel sayısı 3'ü geçtiğinde işletmenin paketleme bölümünün kapasitesi aşılmaktadır. Bu nedenle otomatik taşıma sistemi yüklenirken bir taşıma askısına düşen ortalama panel sayısının 3'ü geçmemesi gerekmektedir.

### 3. BÜTÜNLEŞİK MATEMATİKSEL MODEL

Bu çalışmada, çok amaçlı yapıda olan ve sürece özel kısıtlar içeren ilişkisiz paralel makine çizelgeleme problemi için bir hedef programlama modeli geliştirilmiştir. Amaç, son işin tamamlanma zamanının ve farklılık katsayıları toplamının, hedef değerlerinden pozitif sapmalarının toplamını enküçükmektir. Önerilen bütünleşik matematiksel model ile büyük boyutlu problemlerin çözülebilmesi mümkün görünmemektedir. Bu nedenle büyük boyutlu problemlerin çözümü için iki aşamalı bir çözüm yaklaşımı önerilmiştir. Yöntemin ilk aşamasında işler vardiyalara bir matematiksel model yardımı ile atanmaktadır. İkinci aşamada ise işlerin hangi makinelerin hangi sırasına atanacaklarını belirlemek üzere, her vardiya için bir matematiksel model çözülmüştür. İki aşamalı yaklaşım, bütünleşik modelin çözemediği büyüklükteki problemlerin çözülebilmesine imkân sağlayabilecek ve böylece firmanın beklentilerini karşılayan iş çizelgeleri kısa sürede oluşturulabilecektir.

#### 3.1 Bütünleşik Matematiksel Model

Bu bölümde, geliştirilen hedef programlama modeli ve çözümünü elde edilen sonuçlar ayrıntılı bir şekilde ele alınmıştır. Hedef programlama yaklaşımında, hedeflerden istenmeyen yöndeki sapmalar enküçülenmeye çalışılır. Önerilen bütünleşik modelin varsayımları, parametreleri, karar değişkenleri, kısıtları, hedef kısıtları ve amaç fonksiyonu aşağıda verilmiştir.

*Varsayımlar:*

- İşçi ve ara mamul kısıtları nedeniyle herhangi bir vardiyada çalışmayan makineler bulunabilir
- Makineler hız bakımından birbirinden farklıdır.
- Tüm makineler ve işler sıfır zamanında hazırdır.
- Bir makine aynı anda tek bir işi işleyebilir.
- Bir işe başlandıktan sonra o iş bölünmeksizin veya başka bir makineye aktarılmaksızın işlenmelidir.

*Kümeler:*

$N = \{1, 2, \dots, n\}$  iş kümesi

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

$V = \{1, 2, \dots, o\}$  vardiya kümesi

*İndisler:*

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

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

*Parametreler:*

$n$ : iş sayısı

$m$ : makine sayısı

$o$ : vardiya sayısı

$r_{jl}$ :  $j$  işin  $l$  makinadaki birim işlem süresi

$a_j$ :  $j$  işin sipariş miktarı

$p_{jl}$ :  $j$  işin  $l$  makinadaki işlem süresi ( $p_{jl} = r_{jl} * a_j$ )

$s_{ij}$ :  $i$  iş ile  $j$  işin benzemezlik düzeyini gösteren farklılık katsayısı

$e$ : bir vardiyanın çalışma süresi

$y_{lv}$ :  $l$  makine  $v$  vardiyada üretime elverişli ise 1, diğer durumlarda 0

$b_j$ : çizelgelenen işlerin, hangi makinelerde üretilebildiğini göstermektedir. ( $j$  iş  $l$  makinede yapılabilirse 1, diğer durumlarda 0).

$g$ : çok büyük pozitif bir sayı

$h$ : planlama periyodu ( $C_{enb}$  için hedef değer)

$u_j$ :  $j$  panelin uzunluğu

$t_j$ : bir taşıma askısına  $j$  panelden kaç adet asılacağı

*Karar Değişkenleri:*

$w_{ij}$ :  $i$  işten sonra  $j$  işin üretilmesi halini gösteren karar değişkeni ( $i$  işten sonra  $j$  iş üretiliyorsa 1, diğer durumlarda 0)

$x_{jlk}$ :  $j$  işi  $l$  makinanın  $k$  sırasına atadıysa 1, diğer durumlarda 0

$C_j$ :  $j$  işin tamamlanma zamanı

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

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

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

$S_1^+$ : hedeflenen farklılık düzeyinden pozitif yönlü sapma

$S_1^-$ : hedeflenen farklılık düzeyinden negatif yönlü sapma

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

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

*Kısıtlar:*

$$C_j + g^*(1 - x_{jlk}) \geq p_{jl}^* a_j \quad \forall j, k=1, l \quad (1)$$

$$C_j + g^*(2 - x_{ilk-l} - x_{jlk}) \geq C_i + p_{jl}^* a_j \quad \forall i \neq j, k > 1, l \quad (2)$$

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

$$\sum_k \sum_l x_{jlk} = 1 \quad \forall j \quad (4)$$

$$x_{jlk} \leq b_{jl} \quad \forall j, k, l \quad (5)$$

$$f_j \geq (C_j/e) \quad \forall j \quad (6)$$

$$f_j \leq (C_j/e) + 1 \quad \forall j \quad (7)$$

$$\sum_j x_{jlk} - \sum_i x_{ilk-l} \geq 0 \quad \forall k > 1, l \quad (8)$$

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

$$\sum_v q_{jv} \geq f_j - g^*(1 - x_{jlk}) \quad \forall j, k=1, l \quad (10)$$

$$\sum_v q_{jv} \leq f_j + g^*(1 - x_{jlk}) \quad \forall j, k=1, l \quad (11)$$

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

$$\sum_v q_{jv} \geq f_j - f_i + 1 - g^*(2 - x_{ilk-l} - x_{jlk}) \quad \forall i \neq j, k > 1, l \quad (13)$$

$$\sum_v q_{jv} \leq f_j - f_i + 1 + g^*(2 - x_{ilk-l} - x_{jlk}) \quad \forall i \neq j, k > 1, l \quad (14)$$

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

$$f_j - g^*(2 - x_{ilk-l} - x_{jlk}) \leq v^* q_{jv} + g^*(1 - q_{jv}) \quad \forall i \neq j, k > 1, l, v \quad (16)$$

$$e \geq q_{jv} \quad \forall j, v \quad (17)$$

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

$$w_{ij} + g^*(2 - x_{ilk-l} - x_{jlk}) \geq 1 \quad \forall i, j, l, k > 1 \quad (19)$$

$$\sum_i \sum_j w_{ij}^* s_{ij} - S_1^+ + S_1^- = 0 \quad (20)$$

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

$$\sum_j (a_j * u_j * q_{jv} / 100) / (\sum_j (a_j * u_j) * \sum_j (t_j * a_j) / \sum_j a_j) \leq 3 \quad \forall v \quad (22)$$

$$\sum_j (q_{jv} * a_j) / t \leq 900 \quad \forall v \quad (23)$$

$$x_{jlk}, w_{ij}, q_j \in \{0, 1\} \quad (24)$$

$$f_j \geq 0 \text{ ve tamsayı} \quad \forall j \quad (25)$$

$$C_j, S_1^+, S_1^-, S_2^+, S_2^-, C_{enb} \geq 0 \quad (26)$$

$$enkz = S_1^+ + S_2^+ \quad (27)$$

(1) numaralı kısıt, her makinada ilk sıraya atanan işlerin tamamlanma zamanlarını hesaplar. (2) numaralı kısıt, ikinci ya da daha büyük bir sıraya atanan işlerin tamamlanma zamanlarını hesaplar. (3) numaralı kısıt herhangi bir makinede herhangi bir sıraya en fazla bir iş atanmasını sağlar. (4) numaralı kısıt her işin herhangi bir makinenin herhangi bir sırasına atanmasını garanti eder. (5) numaralı kısıt, teknik özellikler sebebiyle ürünlerin üretilmedikleri makinalara atanmasını engeller. (6) ve (7) numaralı kısıtlar bir işin tamamlandığı vardiyayı belirler. (8) numaralı kısıt işlerin makinelerin sıra atlamadan atanmasını sağlar. (9) numaralı kısıt son işin tamamlanma zamanının ( $C_{enb}$ ) hesaplanmasını sağlar. (10), (11) ve (12) numaralı kısıtlar herhangi bir makinede ilk sıraya atanmış işlerin başlangıç ve bitiş vardiyaları arasında işlem görmesini sağlar. (13), (14), (15) ve (16) numaralı kısıtlar ikinci ya da daha büyük sıraya atanmış olan işlerin başlangıç ve bitiş vardiyaları arasında hangi vardiyalarda işlem görmeye devam ettiğinin belirlenmesini sağlar. (17) numaralı kısıt resmi bayram ve tatil gibi durumlarda çalışma yapılmayacak vardiyalara iş atmasını engeller. (18) numaralı kısıt, işlerin çalışmaya elverişli olmayan makinelere atanmasını engeller. (19) numaralı kısıt  $i$  işinden sonra  $j$  işinin üretileceği bilgisini taşır. (20) numaralı kısıt mümkün olduğunca benzer işlerin ard arda üretilmesini hedeflemektedir. Kısıttaki  $S_1^+$  değişkeni hedeflenen değerden pozitif yönlü sapmayı temsil eder. Pozitif yöndeki bu sapma istenmeyen bir durum olduğu için bu değer amaç fonksiyonunda enküçüklenmek istenir. (21) numaralı kısıt ile son işin tamamlanma zamanının planlama döneminin toplam süresine eşit olması hedeflenir. Kısıtta yer alan,  $S_2^+$  değişkeni hedeflenen değerden pozitif yönlü sapmayı temsil etmektedir. Pozitif yöndeki bu sapma istenmeyen bir durum olduğu için bu değer amaç fonksiyonunda enküçüklenmesi istenir. (22) ve (23) nolu kısıtlar işletmenin otomatik taşıma sisteminin kapasitesi ile ilgili kısıtlardır. (22) nolu kısıt, her vardiyada askılara takılan ortalama panel sayısının 3'ü geçmemesini sağlar.

(23) numaralı kısıt ise her vardiyada en fazla 900 adet askının kullanılmasını garanti eder. (24), (25) ve (26) numaralı kısıtlar matematiksel modelde yer alan karar değişkenlerine ait işaret kısıtlarıdır. (27) matematiksel modelin amaç fonksiyonunu belirtir. Amaç fonksiyonu hedef değerlerinden pozitif yönlü sapmaların toplamının enküçüklenmesidir.

Bütünleşik modelin kısıt sayısı;  $4n^3m+n^2m(o+1)+nm(1-o)+5n+no+2o$ 'dur.

### 3.2 İki Aşamalı Çözüm Yaklaşımı

Büyük boyutlu problemlerin çözümü için iki aşamalı bir çözüm yaklaşımı önerilmiştir. Birinci aşamada işlerin atanacağı makinaların belirlenmesi hedeflenmiştir (M1). İkinci aşamada da, birinci aşamada belirlenen, makinalara atanmış işlerin, sıralarına ve vardiyalarına karar vermek hedeflenmiştir (M2).

**M1:**

*Karar Değişkenleri:*

$xx_{jl}$ :  $j$  iş  $l$  makineye atandıysa 1 diğer durumlarda 0

$TP_l$ :  $l$  makinadaki toplam üretim süresi

$TP_{enb}$ : en büyük toplam üretim süresi

$Senb_l$ :  $l$ . makinenin en büyük farklılık katsayısı

$$TP = \sum_j p_{jl} * xx_{jl} \quad \forall l \quad (1.1)$$

$$\sum_l xx_{jl} = 1 \quad \forall j \quad (1.2)$$

$$xx_{jl} \leq b_{jl} \quad \forall j, l \quad (1.3)$$

$$TP_{enb} \geq TP_l \quad \forall l \quad (1.4)$$

$$Senb_l \geq s_{ij} - g * (2 - xx_{il} - xx_{jl}) \quad \forall i \neq j, l \quad (1.5)$$

$$enkz_l = TP_{enb} + \sum_l Senb_l \quad (1.6)$$

M1'de (1.1) numaralı kısıt,  $l$ . makineye atanan işlerin toplam üretim süresini verir. (1.2) numaralı kısıt, her işin



bir makinaya atanmasını sağlar. (1.3) numaralı kısıt işle-  
rin üretilmedikleri makinalara atanmasını engeller. (1.4)  
numaralı kısıt son işin tamamlanma zamanını hesaplar.  
(1.5) numaralı kısıt her makinanın en büyük farklılık  
katsayısını hesaplamaktadır. Pozitif yöndeki bu sapma  
istenmeyen bir durum olduğu için bu değer amaç fonk-  
sionunda enküçüklenmek istenir. (1.6) toplam üretim  
süresiyle, makinalara atanan işlerin öncelik değerinin  
toplamının enküçüklenmesi istenir. M1'in kısıt sayısı :  
 $n^2m+nm+n+m$ 'dir.

**M2:**

*Parametreler:*

$xxx_{jl}$ :  $j$  iş  $l$  makinaya atanmışsa 1 diğer durumlarda 0.

$d_l$ :  $l$  makinaya atanan iş sayısı  $\sum_j xxx_{jl} = d_l$

*Karar Değişkenleri:*

$x_{jk}$ :  $j$  işi  $k$ . sırasına atadıysa 1, diğer durumlarda 0.

$$C_j + g^*(1 - x_{jk}) \geq p_{jl} \quad \forall j, k=1, k \leq d_l, xxx_{jl}=1, l \quad (2.1)$$

$$C_j + g^*(2 - x_{ik-l} - x_{jk}) \geq C_i + p_{jl} \quad \forall i \neq j, k > 1, k \leq d_l, xxx_{jl}=1, xxx_{il}=1, l, \quad (2.2)$$

$$\sum_{k|k \leq d_l} x_{jk} = 1 \quad \forall j, l, xxx_{jl} \quad (2.3)$$

$$\sum_j |xxx_{jl}=1 x_{jk} = 1 \quad \forall k \leq d_l, l \quad (2.4)$$

$$f_j \geq (C_j / \text{sure}) \quad \forall j \quad (2.5)$$

$$f_j \leq (C_j / \text{sure}) + 1 \quad \forall j \quad (2.6)$$

$$C_{\text{emb}} \geq C_j \quad \forall j \quad (2.7)$$

$$\sum_v q_{jv} \geq f_j - g^*(1 - x_{jk}) \quad \forall j, k=1, xxx_{jl}=1, l \quad (2.8)$$

$$\sum_v q_{jv} \leq f_j + g^*(1 - x_{jk}) \quad \forall j, k=1, xxx_{jl}=1, l \quad (2.9)$$

$$f_j + g^*(1 - x_{jk}) \geq v * q_{jv} \quad \forall j, k=1, xxx_{jl}=1, l, v \quad (2.10)$$

$$\sum_v q_{jv} \geq f_j - f_i + 1 - g^*(2 - x_{ik-l} - x_{jk}) \quad \forall i \neq j, k > 1, xxx_{il}=1, xxx_{jl}=1, k \leq d_l, l \quad (2.11)$$

$$\sum_v q_{jv} \leq f_j - f_i + 1 + g^*(2 - x_{ik-l} - x_{jk}) \quad \forall i \neq j, k > 1, xxx_{il}=1, xxx_{jl}=1, k \leq d_l, l \quad (2.12)$$

$$f_j + g^*(2 - x_{ik-l} - x_{jk}) \geq v * q_{jv} \quad \forall i \neq j, k > 1, xxx_{il}=1, xxx_{jl}=1, k \leq d_l, l \quad (2.13)$$

$$f_j - g^*(2 - x_{ik-l} - x_{jk}) \leq v * q_{jv} + \text{sayı} * (1 - q_{jv}) \quad \forall i \neq j, k > 1, xxx_{il}=1, xxx_{jl}=1, k \leq d_l, l \quad (2.14)$$

$$e \geq q_{jv} \quad \forall j, v \quad (2.15)$$

$$y_{lv} + 1 \geq q_{jv} + x_{jk} \quad \forall j, k, l, v, xxx_{jl}=1, k \leq d_l \quad (2.16)$$

$$w_{ij} + g^*(2 - x_{ik-l} - x_{jk}) \geq 1 \quad \forall i, j, k > 1, l, xxx_{il}=1, xxx_{jl}=1, k \leq d_l \quad (2.17)$$

$$\sum_i \sum_j w_{ij} * s_{ij} - S_1^+ + S_1^- = 0 \quad (2.18)$$

$$C_{\text{emb}} - S_2^+ + S_2^- = h \quad (2.19)$$

$$\sum_j (a_j * u_j * q_{jv} / 100) / (\sum_j (a_j * u_j) * \sum_j (t_j * a_j) / \sum_j a_j) \leq 3 \quad \forall v \quad (2.20)$$

$$\sum_j (q_{jv} * a_j) / t_j \leq 900 \quad \forall v \quad (2.21)$$

$$x_{jk} \in \{0,1\} \quad \forall j, k \quad (2.22)$$

$$w_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i, j \quad (2.23)$$

$$q_{jv} \in \{0,1\} \quad \forall j, v \quad (2.24)$$

$$f_j \geq 0 \text{ ve tamsayı} \quad \forall j \quad (2.25)$$

$$C_j \geq 0 \quad \forall j \quad (2.26)$$

$$S_1^+, S_1^-, S_2^+, S_2^-, C_{emb} \geq 0 \quad (2.27)$$

$$enkz_2 = S_1^+ + S_2^+ \quad (2.28)$$

M2'de (2.1) numaralı kısıt,  $j$ . iş  $l$ . makinaya atanmış ise  $j$  işine ait tamamlanma zamanının, işlem süresi toplamından büyük ya da eşit olmasını sağlar. (2.2) numaralı kısıt,  $j$  işi bir makinada ikinci ya da daha büyük bir sıraya atanırsa, tamamlanma zamanının bir önceki işin tamamlanma zamanı ve ilgili işin işlem süresi toplamından büyük ya da eşit olmasını sağlar. (2.3) numaralı kısıt her işin atandığı makinada herhangi bir sıraya atanmış olmasını garanti eder. (2.4) numaralı kısıt  $l$  makinaya herhangi bir sıraya en fazla bir iş atanmasını sağlar. (2.5) ve (2.6) numaralı kısıtlar bir işin tamamlandığı vardiyayı temsil eden karar değişkeni değerinin, o işin tamamlanma zamanının vardiya çalışma süresine oranlanmasıyla ortaya çıkan değerden büyük en küçük tamsayı olmasını sağlar. (2.7) numaralı kısıt  $C_{emb}$  değişkeni değerinin tüm işler arasında tamamlanma zamanı en büyük olan değerden büyük ya da o değere eşit olmasını sağlar. (2.8) ve (2.9) numaralı kısıtlar çizelgenin ilk sırasında yer alan bir işin işlem gördüğü toplam vardiya sayısının o işin tamamlandığı vardiya değeri kadar olmasını sağlar. (2.10) numaralı kısıt ise ilk sıraya atanmış olan işin tamamlandığı vardiyadan sonraki vardiyalara atanmasını engelleyerek o işin başlangıç ve bitiş vardiyaları arasında hangi vardiyalarda işlem görmeye devam ettiğinin belirlenmesini sağlar. (2.8), (2.9) ve (2.10) numaralı kısıtlar herhangi bir makinada ilk sıraya atanacak olan

herhangi bir işin başlangıç ve bitiş vardiyaları arasında işlem görmeye devam ettiğinin belirlenmesini sağlar. (2.11), (2.12), (2.13) ve (2.14) numaralı kısıtlar ikinci ya da daha büyük sıraya atanmış olan işlerin başlangıç ve bitiş vardiyaları arasında hangi vardiyalarda işlem görmeye devam ettiğinin belirlenmesini sağlar. (2.15) numaralı kısıt resmi bayram ve tatil gibi durumlarda çalışma yapılmayacak vardiyalara iş atamasının yapılmasını engeller. (2.16) numaralı makina ve sürece özel birtakım sebeplerle bazı makinaların bazı vardiyalarda çalışmaya elverişli olmadığı durumlarda, işlerin bu makinalara atamasını engeller. (2.17) numaralı kısıt ayar  $i$  den sonra  $j$  nin üretilmesiyle ayar süresi arasında ilişki kurmayı sağlar. (2.18) numaralı kısıt her bir işin hedeflenen farklılık katsayısından sapmalarını hesaplamaktadır. Kısıttaki  $S_1^+$  değişkeni hedeflenen değerinin pozitif yönlü sapmayı temsil eder. Pozitif yöndeki bu sapma istenmeyen bir durum olduğu için bu değer amaç fonksiyonunda enküçüklenmek istenir. (2.19) numaralı kısıt ile son işin tamamlanma zamanının planlama döneminin toplam süresine eşit olması hedeflenir. Kısıtta yer alan,  $S_2^+$  değişkeni hedeflenen değerden pozitif yönlü sapmayı temsil etmektedir. Pozitif yöndeki bu sapma istenmeyen bir durum olduğu için bu değer amaç fonksiyonunda enküçüklenmek istenir. (2.20) ve (2.21) nolu kısıtlar işletmenin otomatik taşıma sisteminin kapasitesi ile



ilgili kısıtlardır. (2.20) nolu kısıt, her vardiyada askılara takılan ortalama panel sayısının 3'ü geçmemesini sağlar. (2.21) numaralı kısıt ise her vardiyada en fazla 900 adet askının kullanılmasını garanti eder. (2.22)-(2.27) numaralı kısıtlar matematiksel modelde yer alan karar değişkenlerine ait işaret kısıtlarıdır. Amaç fonksiyonu (2.28) her iş için hedeflenen sıfır öncelik değerinden olan pozitif yönlü sapmalar toplamının ve son işin tamamlanma zamanı için hedeflenen değerden pozitif yönlü sapmanın enküçüklenmesidir. M2'in kısıt sayısı:  $n(6n^2m+5m+4) + v(n^2m+nm+n+2)$ 'dir.

#### 4. DENEYSEL SONUÇLAR

Geliştirilen bütünleşik matematiksel modelin ve iki aşamalı çözüm yaklaşımının başarısını gösterebilmek için öncelikle küçük boyutlu bir problem türetilmiştir. Daha sonra bir gerçek hayat probleminin çözümü araştırılmıştır. Tüm testler Intel (R) Core (TM) i7-4790 CPU@3.66 GHz işlemcisi, 16 GB belleği olan bir bilgisayarda yapılmıştır. Matematiksel modeller GAMS 24.1.3 ile kodlanmış ve çözücü olarak Cplex kullanılmıştır.

##### 4.1 Küçük Örnek Problem

3 adet kaynak makinesi vardır. İşletme tek çeşit hatve, tek çeşit marka, 2 çeşit derinlik, 3 çeşit yükseklik ve 4 çeşit uzunlukta ürün üretebilmektedir. Ürünlerin özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

**Tablo 1.** Ana Ürün Tablosu

Ürün Numarası	Hatve	Marka	Derinlik	Yükseklik	Uzunluk
1	1	1	1	3	1
2	1	1	1	3	3
3	1	1	1	3	4
4	1	1	2	2	1
5	1	1	2	2	3
6	1	1	1	3	1
7	1	1	1	3	3
8	1	1	2	1	4
9	1	1	2	1	3
10	1	1	1	1	2

Tablo 1'de her farklı özellik bir rakamla ifade edilmiştir. Sözelimi birinci satırda 8. ürünün, 1. hatvede, 1. markada, 2. derinlikte, 1. yükseklik ve 4. uzunlukta üretilmesi gerektiği görülmektedir. Derinlik, yükseklik ve uzunluk değişmesi durumunda farklılık katsayısını hesaplamakta kullanılan değerler sırasıyla Tablo 2, Tablo 3 ve Tablo 4'de verilmiştir. Yükseklik, derinlik ve uzunluk değişimleri zorluk derecelerini temsil edecek şekilde farklı ölçeklendirilmiştir. Örnek problemde, yükseklik dönüşümü en zor dönüşüm olduğu için [500,600] aralığında, derinlik dönüşümü ikinci zor değişim olduğundan [200-300] aralığında ve uzunluk dönüşümü en kolay dönüşüm olduğundan [1-10] aralığında değer alacak şekilde tasarlanmıştır. Ürünlerin farklılık katsayıları ( $s_{ij}$ ), ilgili dönüşüm değerlerinin toplanmasıyla elde edilmiş ve Tablo 5'de verilmiştir.

**Tablo 2.** Derinlik Dönüşümü

Derinlik	1	2
1	-	250
2	250	-

**Tablo 3.** Yükseklik Dönüşümü

Yükseklik	1	2	3
1	-	550	600
2	550	-	500
3	600	500	-

**Tablo 4.** Uzunluk Dönüşümü

Uzunluk	1	2	3	4
1	-	3,5	4	8,5
2	3,5	-	1	5,5
3	4	1	-	5
4	8,5	5,5	5	-

Tablo 5'ten de görüldüğü gibi 3. üründen sonra 4. ürünün üretilmesi halinde derinlik 1. çeşitten 2. çeşide geçecek ve 250 değeri atanacaktır. Aynı zamanda yükseklik 3. çeşitten 2. çeşide geçecek ve buna karşılık 500 değeri, uzunluk özelliğinde de 1. çeşitten 3. çeşide geçilecek ve 4 değeri atanacaktır. Toplamda 3. üründen sonra 4. ürünün üretilmesi 759 gibi bir değere karşılık gelecektir. Örnek probleme ilişkin diğer parametreler Tablo 6-9'da verilmiştir.

**Tablo 5.** Farklılık Katsayısı

$s_{ij}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	4	8,5	750	754	600	604	258,5	254	3,5
2	4	0	5	754	750	604	600	255	250	1
3	8,5	5	0	759	755	608,5	605	250	255	5,5
4	750	754	759	0	4	800	804	509	504	754
5	754	750	755	4	0	804	800	505	500	751
6	600	604	608,5	800	804	0	4	858,5	854	603,5
7	604	600	605	804	800	4	0	855	850	601
8	258,5	255	250	509	505	858,5	855	0	5	255,5
9	254	250	255	504	500	854	850	5	0	251
10	3,5	1	5,5	754	751	603,5	601	255,5	251	0

**Tablo 6.** Mevcut İşlere Ait İşlem Süresi

$r_{jt}$	1	2	3
1	16,20	9,25	9,26
2	21,73	18,3	18,4
3	32,81	23,08	23,09
4	0	10,1	10,2
5	0	18,3	18,4
6	0	8	9
7	0	18,3	18,4
8	0	23,08	23,09
9	0	18,3	18,3
10	20,81	18,2	18,2

**Tablo 7.** Parametre Değerleri

$u_j$	$t_j$	$a_j$
100	3	480
150	2	400
200	2	250
100	4	180
150	2	350
100	4	100
150	2	140
200	1	250
150	2	170
140	2	200

**Tablo 8.** İş-Makine İlişkisi

$b_{jt}$	1	2	3
1	1	1	1
2	1	1	1
3	1	1	1
4	0	1	1
5	0	1	1
6	0	1	1
7	0	1	1
8	0	1	1
9	0	1	1
10	1	1	1

**Tablo 9.** Makine-Vardiya İlişkisi

$y_{vt}$	1	2	3
1	1	1	1
2	1	1	1
3	1	1	1

Tablo 6'da işlerin makinelerine göre işlem süreleri verilmiştir. Buna göre 10. işin özelliklerinde bir ürünün 1. makinede üretilmesi durumundaki işlem süresi 20,81 birim saniye, 2. ve 3. makinede üretilmesi halinde ise 18,2 birim saniyedir. Tablo 7.'de de çizelgelenecek işlere ait üretim adedi ( $a_j$ ), uzunluğu ( $u_j$ ) ve bir taşıma askısına kaç adet panel asılabileceği ( $t_j$ ) verileri yer almaktadır.

Tablo 8'de işlerin hangi makinalarda üretilebilir olduğu bilgisi bulunmaktadır. Tüm işler tüm makinalarda üretilememektedir. Tablo 9'da ise hangi makinaların hangi vardiyalarda çalışabilir durumda olduğu verilmektedir. Örnek problem için tüm makinaların tüm vardiyalarda çalışabildiği varsayılmıştır.

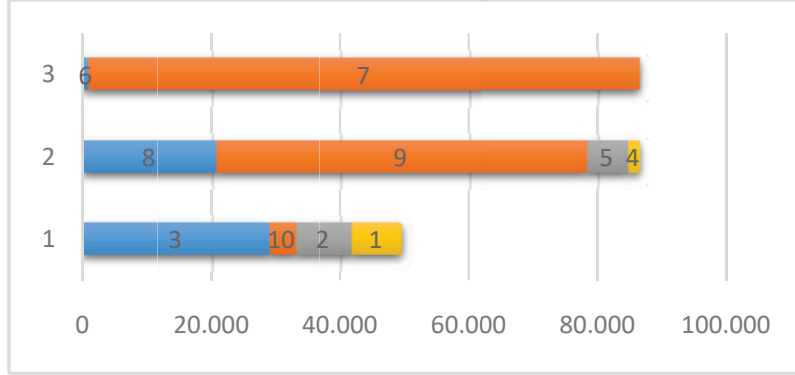
Örnek problem, bütünlük modelile 21 dakikada çözülmüş ve eniyi çözüm elde edilmiştir. Elde edilen çözümün Gantt

Şeması Şekil 1'de, karar değişkeni değerleri ise Tablo 10 ve 11'de verilmiştir.

Tablo 10'da işlerin hangi makineye hangi sırada atandığı yer almaktadır. Örneğin 8 numaralı iş, 2 numaralı makineye 1. sırada atanmıştır. Tablo 11'de işlerin hangi vardiyalara atandığı bilgisi verilmektedir.

Örneğin 3 numaralı iş 1. ve 2. vardiya işlem görmüştür. Amaç fonksiyonu ( $z$ ) 3,852 değerini almıştır. Amaç fonksiyonunda yer alan hedefler incelendiğinde hedeflenen sıfır farklılık düzeyinden pozitif sapma ( $S_1^+$ ) 523,500 değerini almaktadır.

Daha sonra örnek problem geliştirilen iki aşamalı çözüm yaklaşımıyla çözülmüştür. Elde edilen çözümün Gantt Şeması Şekil 2'de, karar değişkenlerinin değerleri ise Tablo 12 ve 13'de verilmiştir.



Şekil 1. Bütünleşik Model ile Elde Edilen Çözümün Gantt Şeması

Tablo 10. Sıra / Makine İlişkisi

Sıra/Makine	Makine 1	Makine 2	Makine 3
1	3	8	6
2	10	9	7
3	2	5	
4	1	4	

Tablo 11. İş / Vardiya İlişkisi

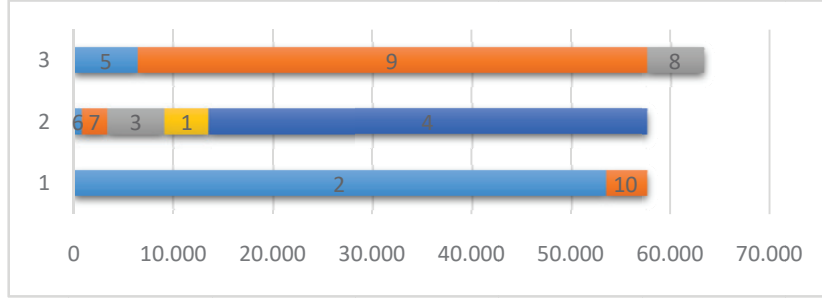
$q_{jv}$	1	2	3
1		1	
2		1	
3	1	1	
4			1
5			1
6	1		
7	1	1	1
8	1		
9		1	1
10		1	

Tablo 12. Sıra / Makine İlişkisi

Sıra/Makine	Makine 1	Makine 2	Makine 3
1	2	6	5
2	10	7	9
3		3	8
4		1	
5		4	

**Tablo 13 . İş / Vardiya İlişkisi**

$q_{jv}$	1	2	3
1	1		
2	1	1	
3	1		
4	1	1	
5	1		
6	1		
7	1		
8			1
9	1	1	
10		1	

**Şekil 2 . İki Aşamalı Çözüm Yaklaşımıyla Elde Edilen Çözümün Gantt Şeması**

Tablo 12’de işlerin hangi makineye hangi sırada atandığı bilgileri yer almaktadır. Örneğin 6 numaralı iş, 2 numaralı makineye 1. sırada atanmıştır. İşlerin atandığı vardiyalar Tablo 13’de verilmiştir. Buna göre 1. iş 1. vardiyaya atanmıştır, 4. iş ise hem 1. vardiya hem de 2. vardiyalarda işlem görmüştür.

Örnek problemin amaç fonksiyonu ( $z$ ) 1873,500 değerini almıştır. Amaç fonksiyonunda yer alan hedefler incelendiğinde hedeflenen sıfır farklılık düzeyinden pozitif sapmalar toplamı da ( $S_1^+$ ) 1873,5 değerini almaktadır. Bütünleşik model ile  $z = 3,852$  bulunmuş ve problemin çözümü 21 dakika sürmüştür. İki aşamalı model ile ise  $z = 1873,5$  bulunmuş ve çözümü 0,109 dakikada elde edilmiştir. Bütünleşik model amaç fonksiyonunun aldığı değer açısından daha başarılı olurken, iki aşamalı çözüm yaklaşımı ise çözüm süresi açısından avantaj sağlamıştır.

#### 4.2 Gerçek Hayat Problemi

Gerçek hayat probleminde, 4 adet ilişkisiz paralel kaynak makinesi ve bu makinelerde üretilebilecek 34 iş ele alınmıştır. Bu işlere ait farklılık katsayıları ( $s_{ij}$ ), işlerin marka, yükseklik,

derinlik, hatve ve uzunluk özellikleri dikkate alınarak Excel’de hesaplanmıştır.

Gerçek hayat problemi bütünleşik model ile çözülememiştir.

Önerilen iki aşamalı yaklaşım ile son işin tamamlanma zamanı ( $C_{enb}$ ) 66.856,52 saniye ve hedeflenen sıfır farklılık düzeyinden pozitif sapma ( $S_1^+$ ) 4459,500 değerini almaktadır.

Mevcut durumda son işin tamamlanma zamanı ( $C_{enb}$ ) 68.528,68 saniye ve hedeflenen sıfır farklılık düzeyinden pozitif sapma da ( $S_1^+$ ) 1921 değerini almaktadır.

Son işin tamamlanma zamanını temsil eden  $C_{enb}$  değeri işletme tarafından hazırlanan çizelgede 68.528,68 saniye değerini alırken önerilen modelle elde edilen çizelgede 66.856,52 saniye değerini almaktadır. Sonuçlar karşılaştırıldığında önerilen modelle elde edilen çizelge ile son işin tamamlanma zamanı için %2,44’lük bir iyileştirme sağlanmıştır. Ayrıca her iki hedef değerine de ulaşılmıştır.

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada  $n$  iş  $m$  makinenin olduğu ilişkisiz paralel makine çizelgeleme problemi ele alınmıştır. Çalışmada süreç özelliklerine ve vardiya çizelgelemesine yer verilmiştir. Gerçek hayatta çizelgeleme yapılırken vardiyalara ait bilgilerin dâhil edilmesi kaçınılmazdır. Önerilen model bunu mümkün kılmaktadır. Ele alınan problemin çözümü için bir hedef programlama modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen hedef programlama modeli ile işletmeden alınan verilere dayalı bir örnek problemin çözümüne ulaşılabılırken, büyük boyutlu gerçek problem için ise çözüm elde edilememiştir. Büyük boyutlu problemlerin çözümü için iki aşamalı bir çözüm yaklaşımı geliştirilmiştir. Gerçek problem iki aşamalı çözüm yaklaşımı ile çözülmüş ve işletmenin çizelgesine kıyasla %2,44'lük bir iyileşme sağlanmıştır.

## KAYNAKÇA

1. **Ak, B.** 2012. "Seçilmiş Bir Endüstriyel Tesiste Üretim Çizelgeleme Problemi ve Genetik Algoritma Yöntemi İle Optimizasyon," Yüksek lisans tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, s. 140.
2. **Arnaou, J. P., Rabadi, G., Musa, R.** 2009. "A Twostage Ant Colonyoptimizationalgorithmto Minimize Themakespan on Unrelatedparallelmachineswithsequence-Dependentsetup times," Springer US, pp. 693-701.
3. **Aykin T.** 1996. "Optimal Shift Scheduling with Multiple Break Windows," Management Science, vol. 42, no. 4, pp. 475-627.
4. **Bechtold, S. E. ve Jacobs, L. W.** 1990. "Implicit Modeling of Flexible Break Assignments in Optimal Shift Scheduling," Management Science, vol. 36, no. 11, pp. 1293-1416.
5. **Chen, J. F.** 2005. "Unrelatedparallelmachinescheduling-withsecondaryresourceconstraints," The International Journal of Advanced ManufacturingTechnology, vol. 26, Issue 3, pp. 285-292.
6. **Eren, T. ve Güner, E.** 2002. "Tek ve Paralel Makinalı Problemlerde Çok Ölçütlü Çizelgeleme Problemleri için Bir Literatür Taraması," Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, cilt 17, sayı 4, s. 37-69.
7. **Küçük, B.** 2010. "Özdeş Paralel Makineli Bir Üretim Sisteminin Karınca Koloni Algoritması ile Çizelgelemesi," Doktora tezi, T. C. İstanbul Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, s. 97.
8. **Liaw, C. F., Lin, Y. K., Chen, C. Y., Chen, M.** 2003. "Schedulingunrelatedparallelmachines to Minimize Total Weighted tardiness," Computers & Operations Research, vol. 30, pp. 1777-1789.
9. **Martello, S., Soumis, F., Toth, P.** 1997. "Exact and approximation algorithms for makespan minimization on Unrelated parallel machines," Discrete Applied Mathematics, vol. 75, pp. 169-188.
10. **Mokotoff, E., Chretienne, P.** 2002. "A cutting plane algorithm for the unrelated parallel machines scheduling Problem," European Journal of Operational Research, vol. 141, Issue 3, pp. 515-525.
11. **Özkan, S. E.** 2009. "Farklı Kapasiteli Paralel Makinelerin Dinamik Çizelgenmesi İçin Sezgisel Bir Algoritma ve Uygulaması," Yüksek lisans tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, s. 75.
12. **Peyro L. F., Ruiz R.** 2011. "Size-reduction heuristics for the unrelated parallel machines scheduling Problem," Computers & Operations Research, vol. 38, Issue 1, January 2011, p. 301-309.
13. **Pinedo M.L.** 2016. "Scheduling: Theory, Algorithms, And systems," Springer, Fifth Edition, New York, U.S.A.
14. **Rabadi G., Moraga R. J., Al-Salem, A.** 2006. "Heuristics for the Unrelated Parallel Machine Scheduling Problem with Setup Times," vol. 17, Issue 1, pp. 85-97.
15. **Rocha P. L., Ravetti, M. G., Mateus, G. R.** 2008. "Exact algorithms for a Scheduling Problem With unrelated parallel machines and sequence and machine-Dependent-setup times," Computers & Operations, vol. 35, Issue 4, pp. 1250-1264.
16. **Saraç, T. ve Kaya, S.** 2013 "Plastik Enjeksiyon Makinelerinin Vardiya Bazında Çizelgenmesi Problemi İçin Bir Hedef Programlama Modeli," Endüstri Mühendisliği Dergisi, cilt 24, Sayı 1-2, s. 12-26.
17. **Saraç, T., Sipahioğlu, A.** 2009. "Plastik Enjeksiyon Makinelerinin Çizelgenmesi Problemi," Endüstri Mühendisliği Dergisi, cilt: 20, sayı 2, s. 2-14.
18. **Thompson, G. M.** 1999. "Labor scheduling, Part 4: Controlling work force schedules in Real Time," Cornell Hotel and Restaurant Administration Quarterly, 40(3), 85-86. doi: 10.1016/S0010-8804(99)80041-X.