

## Özdeş olmayan paralel makina çizelgeleme problemlerinin çözümü için bir karar destek sistemi

### A decision support system for non-identical parallel machine scheduling

İnci SARIÇİÇEK<sup>1\*</sup> 

<sup>1</sup>Endüstri Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye.  
incid@ogu.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 20.02.2017, Kabul Tarihi/Accepted: 03.07.2017

doi: 10.5505/pajes.2017.48658

\* Yazışılan yazar/Corresponding author

Araştırma Makalesi/Research Article

#### Öz

İşletmelerin üretim planlama faaliyetlerinde makina çizelgeleme kısa dönem planlamada sık tekrarlanan bir faaliyet olup kaynakların etkin kullanımı açısından çok önemlidir. Gerek darboğaz problemleri gerek kapasiteyi artırma amaçlı aynı işi yapabilen birden fazla makina bulunan atölyelerde atölye ortamı ne olursa olsun bir paralel makina çizelgeleme probleminin de çözülmesi gereği ortaya çıkmaktadır. Özellikle özdeş olmayan paralel makinalarda işin hangi makinada işleneceği birçok faktöre bağlı olarak belirlenmek istenmektedir. Bu tür durumlara genel yazılımlar cevap verememektedir. Ayrıca plastik akitme, fırınlama gibi paralel makina ortamlarında iş sırasına bağlı olarak hazırlık sürelerinin değişmesi durumu söz konusu olduğunda sıraya bağımlı hazırlık sürelerini de dikkate alan çizelgeler hazırlamak planlamacılar için önem arz etmektedir. Bu kapsamda, çalışmada sıraya bağımlı hazırlık süreli özdeş olmayan paralel makina çizelgeleme problemleri için bir karar destek sistemi tasarlanmıştır. Karar verici ilgili sistemi kullanarak, durumsallık yaklaşımıyla ilgili dönemde atölyede hangi amaç için işlerin çizelgenmesi gerekiyorsa ilgili amaca göre çizelgeyi elde edebilir. Ayrıca, işleri en kısa sürede bitirmek ve geciken iş sayısını en küçükmek gibi farklı amaç fonksiyonları için çizelgeleri elde etme ve sonuçlarını karşılaştırma imkânı bulabilir. Karar destek sisteminin model temelinde, büyük boyutlu gerçek hayat çizelgeleme problemlerine kısa sürede çözüm üretebilen ileri sezgisel algoritmalar kullanılmıştır.

**Anahtar kelimeler:** Özdeş olmayan paralel makina çizelgeleme, Sıraya bağımlı Hazırlık Süreleri, Karar destek sistemi, Tavlama benzetimi, Yasaklı arama

#### Abstract

Machine scheduling in the production planning activities of enterprises is an activity that is frequently repeated in short periods and is very important in terms of efficient use of resources. It is necessary to solve a parallel machine scheduling problem regardless of the workshop environment in workshops where more than one machine that can do the same job to increase the capacity and solve the bottleneck problems. Especially in non-identical parallel machines, it is desired to determine which machine will process the job depending on many factors. A general software cannot respond to such situations. In addition, it is important for planners to prepare charts that take into account sequence dependent setup times in parallel machine environments such as plastic injection and oven scheduling problems. In this context, the study is focused on designing a decision support system for non-identical parallel machine scheduling problems with sequence dependent setup times. By using the decision support system, the decision maker can obtain the schedule for the jobs need to be scheduled for the relevant period and purpose according to situation of workshop. The system makes it possible to find and compare schedules for different objective functions such as minimizing makespan and minimizing the number of tardy jobs. On the basis of the model of the decision support system, meta-heuristic algorithms that can produce a solution to large scale real-life scheduling problems in a short time have been used.

**Keywords:** Non-identical parallel machine scheduling, Sequence dependent setup Times, Decision support system, Simulated annealing, Tabu search

## 1 Giriş

İşletmelerin üretim planlama faaliyetleri kapsamında çizelgeleme önemli bir faaliyet olup, atölyede kaynakların etkin kullanımı iyi bir makina çizelgeleme yapılıp yapılmamasına bağlıdır. İşletmeler üretecekleri ürünleri, kaynak kullanım kısıtları altında, zamanında teslim gibi amaçlar doğrultusunda yapmak durumundadır.

Paralel makina ortamları, işletmelerde çoğunlukla aynı işi yapan birden fazla makina olması sebebiyle sıkça rastlanan bir durumdur. Farklı hızlarda onlarca hidrolik pres olan bir atölyede, hangi işlerin hangi hidrolik preste hangi sırayla yapılacağı belirlenmesi bir özdeş olmayan paralel makina çizelgeleme problemidir. Bir talaş kaldırma işlemi hem tornada hem de frezede yapılabilir olduğunda hangi işler için hangisinin daha uygun olduğunun belirlenmesi ve makinalarda işlerin sıralanması da ilgili çizelgeleme problemleri için bir başka örnektir. İlgili iş için hangisinin daha uygun olacağına karar verilerek makinalara iş ataması gerçekleştirilir. İşletmelerde etkin kaynak kullanımı açısından farklı zamanlarda farklı amaçlar için çözülmesi gereken bu çizelgeleme problemlerinin

planlama ufkuna bağlı olarak her gün her hafta her ay vb. periyodik aralıklarla ve kısa sürede çözülmesi önem arz etmektedir.

Paralel makina çizelgeleme problemleri makina çeşidine bağlı olarak üçe ayrılmaktadır: Özdeş paralel makinalar (identical parallel machines,  $P_m$ ), Farklı hızlara sahip paralel makinalar (uniform parallel machines,  $Q_m$ ) ve paralel ilgisiz makinalar (unrelated parallel machines,  $R_m$ ). Paralel makina aynı işi yapabilen makina anlamında olup, özdeş olduğunda birbirinin aynı makinalar söz konusudur. İkinci gruptaki makinalar yine aynı tip makinalardır ancak hızları farklılık gösterir. Üçüncü gruptaki makinalar ise farklı tipte fakat aynı işi yapabilen makinalar olduğundan "paralel ilgisiz makinalar" olarak adlandırılır [1].

Literatürdeki bir diğer sınıflandırma özdeş ve özdeş olmayan paralel makinalar şeklinde olup, özdeş olmayanlar grubu daha önce bahsedilen sınıflandırmadaki son iki gruba kapsamaktadır. Dolayısıyla özdeş makinalar aynı işi aynı sürede yaparken, özdeş olmayanlarda aynı iş farklı sürelerde tamamlanabilir. Bu makinanın hızına, modeline vb. göre değişim gösterir. İşletmelerde aynı işi yapan tüm makinaların

aynı model aynı yılda alınmış ve aynı özelliklerini korumuş olmasını beklemek pek gerçekçi olmayacağından özdeş olmayan makinaların çizelgelemesi işletmeler için önemlidir.

Literatürde farklı kısıt ve özellikler içeren çeşitli paralel makina çizelgeleme problemi mevcut olup, ilgili problemlere önerilen birçok model yer almaktadır. Ancak işletmelerde aynı işler için kullanılan fakat farklı işleme özelliklerine sahip paralel makinalar için istenen amaca uygun çizelgeyi hemen üretebilen ve diğer amaçlar için uygun çizelgelerle birlikte ödünleşmeleri göstererek karar vericiye değerlendirme imkânı sunan bir yazılım ihtiyacı açıktır. Literatürde belli bir amaç için çözümler üreten birçok matematiksel model sunulmuştur. Oysa işletmelerde atölye ortamı oldukça dinamik olup amaç zamana ya da duruma bağlı olarak farklılık gösterebilmektedir. Haftanın bir gününde müşteri siparişlerini mümkün en kısa sürede üretmek önemliyken başka bir gün mümkün olduğunca az müşterinin siparişini geciktirecek şekilde bir çizelge üretmek önemli olabilir. Gerçek hayatta birçok amaç göz önünde bulundurularak etkin bir şekilde işlerin makinalara atanması ve çizelgenmesi gerekmektedir. Çalışmada sıraya bağımlı hazırlık süreli özdeş olmayan paralel makina çizelgeleme problemini iki farklı meta-sezgisel ile çözüme imkânı veren ve en önemlisi aynı anda birçok amaç için üretilen çizelgeleri karşılaştırarak aralarındaki ödünleşmeleri gösteren ve karar vericinin seçimini kolaylaştıran bir bilgi sistemi tasarlanmıştır. Kullanıcı dostu ara yüzler ile işletmelerde kolaylıkla kullanılacak bir sistem amaçlanmıştır.

Çalışmanın birinci bölümünde konuya giriş yapıldıktan sonra ikinci bölümde, literatürdeki paralel makina çizelgeleme çalışmaları özetlenmiştir. Üçüncü bölümde tasarlanan karar destek sistemi tanımlanarak, son bölümde sonuç ve öneriler sunulmuştur.

## 2 Paralel makina çizelgeleme çalışmaları

Literatürde, paralel makina çizelgeleme problemleri, partiye bağlı hazırlık süreli/maliyetli (batching setup times/costs) ve partiye bağlı olmayan hazırlık süreli/maliyetli (non-batching setup times/costs) olarak sınıflandırılmıştır[2],[3]. Bu sınıflar kendi içlerinde sıradan bağımsız hazırlık süreli/maliyetli (sequence-independent setup) problemler ve sıraya bağımlı hazırlık süreli/maliyetli (sequence-dependent setup) problemler olarak sınıflandırılır. Allahverdi ve diğ. 2008 yılındaki literatür araştırmalarında, partiye bağlı olmayan, sıraya bağımlı hazırlık süreli paralel makina çizelgeleme problemlerini içeren 35 çalışma bir çizelgede sunulmuştur [3]. Çalışmaların çoğunun (20 çalışma) özdeş (P) paralel makina ortamlarında yapıldığı, buna karşın özdeş olmayan (Q ve R) paralel makina çizelgeleme konusunda çalışmaların sınırlı olduğu göze çarpmaktadır. 2000'li yıllarda, büyük boyutlu problemlerin çözümünde sağladığı üstünlükler sebebiyle tavlama benzetimi, yasaklı arama ve genetik algoritmalar gibi meta-sezgisellerin kullanımında artış dikkat çekmektedir. Bunun sebebi, çizelgeleme problemlerinin çoğunun NP-zor oluşu, matematiksel optimizasyon tekniklerinin problemin boyutu arttığında makul bir sürede çözüm verememesi ve uygulamada yetersiz kalmasıdır.

Son yıllarda, özdeş olmayan paralel makina çizelgeleme konusuna ilginin arttığı görülmektedir. Li and Yang toplam ağırlıklı tamamlanma zamanını enküçükleyen paralel ilgisiz makine çizelgeleme çalışmalarını model ve algoritmalar açısından incelemiştir [4]. Chen ve Chen sıraya bağımlı hazırlık süreli paralel ilgisiz makina (R) çizelgeleme probleminin çözümü için melez ileri sezgiseller (metaheuristics) önermiştir

[5]. Öncelik kısıtlarını da probleme dahil eden Tavakkoli-Moghaddam ve diğ. iki amaçlı olarak problemi ele alıp genetik algoritma ile çözüm aramıştır [6]. Arnaout ve diğ. [7] sıraya bağımlı hazırlık süreli paralel ilgisiz makina çizelgeleme probleminin çözümü için iki safhalı karınca kolonisi algoritmasını kullanırken Vallada ve Ruiz [8] bir genetik algoritma önermiştir. Lin ve diğ. [9], Ying ve Lin [10] teslim zamanı kısıtlarını ele almıştır. Hsu ve diğ. [11] yaşlanma etkileri bakım faaliyetlerini dikkate almıştır. Nadari-beni ve diğ. [12] makina uygunluk kısıtlarını içeren bulanık bir model önermiştir.

Bu çalışma paralel makina ortamlarının en genel hali olan paralel ilgisiz makinalar dahil olmak üzere, makina hızlarının farklılık gösterdiği işe ve makinaya bağlı olarak işlem sürelerinin matris şeklinde sisteme verildiği özdeş olmayan (non-identical) paralel makina ortamlarında sıraya bağımlı hazırlık sürelerini dikkate alarak işlerin çizelgenmesi üzerine odaklanmıştır. Literatürde, sıraya bağımlı hazırlık süresi paralel makinalar için ele alınan önemli özelliklerdendir. Atölye ortamında işlerin atölyeye geliş zamanları farklılık gösterebilir. İlgili kısıt göz ardı edilerek, işlerin hepsinin başlangıçta yapılmaya hazır olduğu varsayımı altında çizelgeler oluşturulmuştur. Çalışmada, üretim planlamadaki karar vericilere çizelgeleme faaliyetlerinde etkin çizelgeler üreterek doğru kararlar almalarına yardımcı olması amacıyla bir Karar Destek Sistemi-KDS tasarlanmıştır. KDS, problemlerin çözüm aşamasında, model yönetiminde tavlama benzetimi ve yasaklı arama algoritmalarını içermektedir. Tavlama benzetimi ve yasaklı arama algoritmalarının paralel makina ortamlarının çizelgenmesinde başarılı olduğu birçok çalışmada gösterilmiştir [13]. Çalışmada ele alınan paralel makina çizelgeleme problemlerine çözüm aramak amacıyla kodlanan yazılım ile karar verici, veri tabanından makina ve işlere ilişkin verileri alabilmekte tavlama benzetimi veya yasaklı arama algoritmalarından biri ile istediği amaç için çizelgeleme problemini çözdürebilmektedir. Ayrıca KDS'nin en önemli özelliklerinden biri olan kısıt ekleme/çıkarma özelliği sayesinde yeni bir işi ekleme/çıkarma ya da sıraya bağımlı hazırlık süresi yoksa bu özelliği kullanmama gibi esnek yapıyla hızlı bir şekilde problemi çözmeye olanak sağlamaktadır. Sistem ilgili problemi yaşayan işletmelerde kolay kullanım imkânı veren ara yüzlere sahiptir.

## 3 Tasarlanan karar destek sistemi

Çalışmada, sıraya bağımlı hazırlık süreli özdeş olmayan paralel makina çizelgeleme problemlerinin çözümünde işletmelerdeki üretim planlama işini yapan karar vericilere destek olacak, ilgili çizelgeleme problemlerine kısa sürede etkin çözümler verecek bir sistem amaçlanmıştır. Bu amaçla tasarlanan KDS, farklı amaç fonksiyonları için çizelgeleme problemlerini çözebilecek, Gantt şeması yardımıyla sonuçları gösterecek, gerektiğinde bir çizelgeyi başka çizelgelerle karşılaştırıp aradaki ödünleşmelere göre işletmeye uygun çizelgeyi seçme imkânı sunacaktır. Tasarlanan KDS, veri tabanı, model ve kullanıcı ara yüzlerinden oluşmaktadır.

### 3.1 Veritabanı

Veri tabanı, işletmedeki planlama uzayına bağlı olarak belli aralıklarla kullanılacak işlere ve makinalara ilişkin verileri içermektedir. İş/işlem, üretilecek ürün/müşteri siparişini ifade etmektedir. Çizelgeleme faaliyeti belli aralıklarla belli bir iş listesinde yer alan işler için gerçekleştirilecektir. N adet iş olup, işler j ve k indisleri ile (j,k=1,2,..., N) gösterilmektedir ve N

birimlik bir dizinde saklanmaktadır. Ayrıca her bir işin teslim zamanına ilişkin veri de veritabanında yer almaktadır.

Makina, işlerin yapılacağı tezgâh/makinaları ifade etmektedir. M adet makine olup, i makine indisi (i=1,2,...,M) olarak kullanılmaktadır. Makinalar, M birimlik bir dizinde saklanmaktadır.

İşlem süresi, belli bir işin ilgili makinada ne kadar sürede yapılacağı bilgisidir. İşlem süreleri, MxN'lik bir matriste tutulmaktadır. Matriste makina satırı ile işe karşı gelen sütunun kesiştiği hücre ( $p_{ij}$  - i∈M, j∈N) i makinasında j işinin işlem süresini vermektedir.

Sıraya bağımlı hazırlık süresi, bir işten sonra yapılacak işe göre hazırlık süresinin değiştiğini ifade eder. Örneğin, 3 numaralı makinada 1 numaralı işten sonra, 2 numaralı iş yapılırsa 10 br. sürelik hazırlık gerekirken 5 numaralı iş yapılırsa sadece 2 br. sürelik hazırlık gerekecektir. Sıraya bağımlı hazırlık süresi verisi NxN'lik bir matriste tutulmaktadır. Satırda yer alan işten sonra ilgili sütunda yer alan iş yapılırsa kesiştikleri hücrede yer alan süre kadar ( $S_{ijk}$  - i∈M, j∈N, k∈N.) i makinasında j işinden sonra k işi yapıldığında makina bazı sıraya bağımlı hazırlık süresi olacağı verisi ilgili çizelgeleme problemlerinin çözümünde kullanılmaktadır.

### 3.2 Model

KDS, problemlerin çözüm aşamasında, model yönetiminde Tavlama Benzetimi (Simulated Annealing-SA) ve Yasaklı Arama (Tabu Search- TS) algoritmalarını içermektedir.

Tavlama benzetimi algoritması, katıların ısıtılması ve sonra kristalleşmeye kadar yavaş yavaş soğutulması ve daha gürbüz bir malzeme elde etme esasına dayanır. Kirkpatrick ve diğ. tarafından 1983 yılında önerilmiştir [14]. Tavlama benzetimi yüksek bir sıcaklık değeriyle başlar ve belirlenen bir fonksiyona göre her bir iterasyonda azaltılır. Sıcaklık parametresi, elde edilen en iyi çözümden daha kötü bir çözümün kabul edilme olasılığını belirlemede kullanılır. Her bir hesaplama adımında mevcut çözümün komşuları arasından çok sayıda çözüm üretilir. Yeni çözümler belirlenen ölçütlere göre kabul ya da reddedilir. Algoritma durma ölçütüne bağlı olarak, örneğin, istenen iterasyona ulaşıldığında ya da sıcaklık minimum değerine ulaşıldığında ya da istenen çözüme ulaşıldığında sonlandırılır.

SA algoritması sözde kodu

Begin

Başlangıç sıcaklığını ( $\beta_1$ ) ve soğutma oranını ( $\alpha$ ) belirle.

İterasyon sayısını (N) belirle. İterasyon sayısı için sayaç  $k \leftarrow 1$ .

Sezgisel ya da rasgele bir başlangıç çözüm ( $S_1$ ) üret.

Eniyi çözüm  $S_{eniyi} \leftarrow S_1$

Repeat

$S_k$ ' ya komşu bir çözüm  $S_c$  üret ve çözümün

amaç fonksiyonu değerini  $G(S_c)$  hesapla.

Eğer  $G(S_{eniyi}) < G(S_c) < G(S_k)$  ise  $S_{k+1} \leftarrow S_c$

Eğer  $G(S_c) < G(S_{eniyi})$  ise  $S_{eniyi} = S_{k+1} \leftarrow S_c$

Eğer  $G(S_c) \geq G(S_k)$  ise (0,1) arasında

düzensiz dağılım bir  $U_k$  rassal sayısı türet

Eğer  $U_k \leq P(S_k, S_c)$  ise  $S_{k+1} \leftarrow S_c$

$$P_{kabul} = \exp\left(\frac{G(S_k) - G(S_c)}{\beta_k}\right);$$

Aksi halde  $S_{k+1} \leftarrow S_k$

Sıcaklığı düşür  $\beta_{k+1} \leftarrow \beta_k \cdot \alpha$

İterasyon sayısını bir artır:  $k \leftarrow k+1$

Until  $k > N$

$S_{eniyi}$  SA ile bulunan eniyi çözümdür.

End

Yasaklı Arama Algoritması, Glover tarafından geliştirilmiş bir ileri-sezgisel algoritmadır. Temel yaklaşım, daha önce araştırılmış bir çözümün tekrar araştırılması ile oluşacak döngüyü engellemek için tekrarın yasaklanmasıdır. Yasaklanan hareketler tabu listesinde tutulur. Tabu listesinin uzunluğu ve aday çözüm sayısı başlangıçta belirlenmesi gereken parametrelerdir. Aday çözüm sayısı bir çözümden türetilerek araştırılacak komşu çözüm sayısını ifade etmektedir. Her iterasyonda aday çözümler içerisinde eniyi amaç fonksiyonu değerine sahip hareket bir sonraki çözümü oluşturmak amacıyla seçilir.

TS algoritması sözde kodu

Begin

İterasyon sayısını (N) ve komşu çözüm sayısını (C) belirle

İterasyon sayısı için sayaç  $k \leftarrow 1$

Sezgisel ya da rasgele bir başlangıç çözüm ( $S_1$ ) üret.

Eniyi çözüm  $S_{eniyi} \leftarrow S_1$

Repeat

Komşu çözüm sayısı için sayaç  $n \leftarrow 1$

Repeat

$S_k$ ' ya komşu bir çözüm  $S_n$  üret ve çözümün amaç fonksiyonu

değerini  $G(S_n)$  hesapla

$n \leftarrow n+1$

Until ( $n > C$ )

Komşu çözümlerden en küçük amaç fonksiyonu değerine sahip olanı seç  $G(S_c) \leftarrow \text{Enk } G(S_n)$

Eğer  $S_k$ ' dan  $S_c$ ' ye geçiş tabu listesinde yasaklanmadıysa  $S_{k+1} \leftarrow S_c$

Tabu listesinin başına seçilen çözüme ilişkin hareketin tersini gir

Diğer tabu hareketlerini bir pozisyon ileri kaydır

Tabu listesinin uzunluğuna göre sonuncu hareketi sil

Eğer  $G(S_c) < G(S_{eniyi})$  ise  $S_{eniyi} \leftarrow S_c$

İterasyon sayısını bir artır:  $k \leftarrow k+1$

Until ( $k > N$ )

$S_{eniyi}$  TS ile bulunan eniyi çözümdür.

End

Her iki algoritma için bir çözüm gösteriminde (makina sayısı +iş sayısı-1) lik bir dizin kullanılır. Örneğin, yedi iş dört makina bir çizelgeleme problemi için, 10 luk bir dizin açılır (Şekil 1). İşlerin hangi makinalarda yapılacağı "-1" sembolleriyle ayrılmış işlerden hareketle söylenebilir. Örnek çözüm, 1 ve 2 numaralı işlerin 1 numaralı makinada, 3 ve 4 numaralı işlerin 2

numaralı makinada, 5 ve 6 numaralı işlerin 3 numaralı makinada ve 7 numaralı işin 4 numaralı makinada yapılacağını ifade etmektedir.

1	2	-1	3	4	-1	5	6	-1	7
Başlangıç çözümü.									
1	2	-1	3	4	-1	5	-1	6	7
Komşu çözüm.									

Şekil 1: Başlangıç ve komşu çözüm gösterimi.

Rastgele iki hücredeki içeriğin yer değişikliği ile komşu çözüm türetilmektedir. Örneğin sekizinci ve dokuzuncu hücrelerdeki değişiklik ile 6 numaralı iş 4 numaralı makinada yapılacak ilk iş olurken 3 numaralı makinada sadece 5 numaralı iş yapılacak anlamına gelmektedir.

SA ve TS sıraya bağımlı hazırlık süreli beş paralel ilgisiz makine çizelgeleme problemi (R | ST<sub>sd</sub> | C<sub>enb</sub>, ΣT<sub>j</sub>, T<sub>enb</sub>, n<sub>t</sub>, Σ(E<sub>j</sub>+T<sub>j</sub>)) için kullanılmak amacıyla kodlanmıştır. SA ve TS algoritmalarının doğru bir şekilde kodlandığı ve çalıştığını görmek amacıyla Vallada ve Ruiz'in [8] R | ST<sub>sd</sub> | C<sub>enb</sub> çizelgeleme problemi için önerdiği matematiksel model GAMS'in CPLEX çözücüsünde kodlanmış ve elde edilen eniyi (optimum) çözüm önerilen SA ve TS algoritmalarının performansının test edilmesinde kullanılmıştır (Tablo 1).

Parametreler:

$p_{ij}$ : i makinasında j işinin işlem süresi (i ∈ M, j ∈ N)

$S_{ijk}$ : i makinasında j işinden sonra k işi yapıldığında makina bazlı sıraya bağımlı hazırlık süresi (i ∈ M, j ∈ N, k ∈ N.)

Karar Değişkenleri:

$x_{ijk} = \begin{cases} 1, & i \text{ makinasında } j \text{ işinden sonra } k \text{ işi yapılırsa} \\ 0, & \text{diğer} \end{cases}$

$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{eğer } j \text{ işi } i \text{ makinasına atanırsa} \\ 0, & \text{diğer} \end{cases}$

$C_{ij}$ = i makinasında j işinin tamamlanma zamanı

$C_{max}$ = Enbüyük tamamlanma zamanı

Matematiksel model:

$$\text{Enk } C_{enb} \quad (1)$$

$$\sum_{i \in M} \sum_{\substack{j \in \{0\} \cup \{N\} \\ j \neq k}} x_{ijk} = 1 \quad \forall k \in N \quad (2)$$

$$\sum_{i \in M} \sum_{\substack{k \in N \\ j \neq k}} x_{ijk} \leq 1 \quad \forall j \in N \quad (3)$$

$$\sum_{k \in N} x_{i0k} \leq 1 \quad \forall i \in M \quad (4)$$

$$\sum_{\substack{h \in \{0\} \cup \{N\} \\ h \neq k, h \neq j}} x_{ihj} \geq x_{ijk} \quad \forall j, k \in N, \\ j \neq k, \\ \forall i \in M \quad (5)$$

$$x_{ijk} \leq x_{ij} \quad \forall j \in N, \\ \forall i \in M \quad (6)$$

$$C_{ik} + V(1 - x_{ijk}) \geq C_{ij} + S_{ijk} + p_{ik} \quad \forall k \in N, \\ j \neq k, \\ \forall i \in M \quad (7)$$

$$C_{i0} = 0 \quad \forall i \in M \quad (8)$$

$$C_{ij} \geq 0 \quad \forall j \in N, \\ \forall i \in M \quad (9)$$

$$C_{max} \geq C_{ij} \quad \forall j \in N, \\ \forall i \in M \quad (10)$$

$$x_{ijk} \in \{0, 1\}, \forall j \in \{0\} \cup \{N\}, \forall k \in N, j \neq k, \forall i \in M \quad (11)$$

Tablo 1: Enbüyük tamamlanma zamanının enküçüklenmesi amaç fonksiyonu için SA ve TS algoritmalarının performanslarının eniyi çözümlerle karşılaştırılması.

Problem	Hazırlık	C <sub>enb</sub> amaç fonksiyonu değeri		
		CPLEX	SA	TS
1	Kısa	25	27	25
2	Orta	41	41	41
3	Uzun	66	73	66
4	Kısa	15	19	20
5	Orta	30	35	35
6	Uzun	53	57	59

Amaç, enbüyük tamamlanma zamanını enküçüklemektir. (2) numaralı kısıt kümesi, her işin sadece bir makinaya atanmasını ve sadece bir öncüle sahip olmasını sağlar. (3) numaralı kısıt kümesi, herbir işin en fazla bir ardılı olmasını ifade eder. (4) numaralı kısıt kümesi her makinada kukla işlerin ardıl sayısını maksimum birle sınırlandırır. Eğer verilen bir i makinasında j işi işlenecekse aynı makinada bir öncül h işi mevcut olmalıdır ki (5) numaralı kısıt kümesi, makinalarda işleri uygun şekilde ilişkilendirir. (6) numaralı kısıt i makinasına j işi atanmadıysa ilgili makinada j işinden sonra k işinin yapılmayacağını garantiler ve iki değişkeni ilişkilendirir. (7) numaralı kısıtlar kümesi makinalarda işlerin tamamlanma zamanlarını kontrol eder. Basit bir şekilde eğer i makinasına j işinden sonra k işi atanırsa ( $x_{ijk} = 1$ ), onun tamamlanma zamanı  $C_{ik}$ , j işinin tamamlanma zamanı  $C_{ij}$  artı j ve k işleri arasındaki hazırlık süresi ve k işinin işlem süresi toplamından daha büyük olmalıdır. Eğer  $x_{ijk} = 0$ , ise büyük bir sabit olan V aktif hale gelerek kısıtı gereksiz kılar. (8) ve (9) numaralı kısıt kümeleri kukla işler için tamamlanma zamanlarını 0, gerçek işler için negatif olmayacak şekilde tanımlar. (10) numaralı kısıt işlerin tamamlanma zamanları ile enbüyük tamamlanma zamanını ilişkilendirir. (11) numaralı küme 0-1 değişkenleri tanımlar.

SA ve TS algoritmalarının performansları CPLEX çözücünden elde edilen eniyi çözümlerle karşılaştırıldığında her iki algoritmanın da eniyi ya da eniyeye yakın çözümler verdiği görülmektedir. KDS'nin model temelinde kodlanan tavlama benzetimi ve yasaklı arama algoritmalarının performansını karşılaştırmak amacıyla iş sayısı (N), makina sayısı (M) ve sıraya bağımlı hazırlık süreleri ( $S_{jk}$ ), dikkate alınarak test problemleri türetilmiştir. Sıraya bağımlı hazırlık süreleri, kısa, orta ve uzun olmak üzere sırasıyla U (5, 20), U (20, 40) ve U (40, 80) dağılımlarından türetilmiştir.

Testler, Intel(R) Core (TM) 2 Quad CPU Q8400 2.66 GHz işlemcili 4 GB RAM ve 64 bit işletim sistemine sahip bir bilgisayarda yapılmıştır. SA ve TS algoritmalarını içeren KDS Visual Studio 11.0 ile kodlanmıştır. Algoritmalar 5000 iterasyon için çalıştırılmış ve çözüm süreleri (CPU) saniye olarak Tablo 2-6'te belirtilmiştir.

Altı test problemi için farklı amaçlar doğrultusunda SA ve TS algoritmalarının sonuçları amaç fonksiyonu ve çözüm süresi (CPU) açısından Tablolarda 2-6'da kıyaslanmıştır. Tablolarda sırasıyla, enbüyük tamamlanma zamanının enküçüklenmesi-



$C_{enb}$  (makespan), toplam gecikmenin enküçüklenmesi- $\sum T_j$  (total tardiness), enbüyük gecikmenin enküçüklenmesi- $T_{enb}$  (maximum tardiness), geciken iş sayısının enküçüklenmesi-  $n_t$  (the number of tardy job) ve enküçük toplam erkenlik-geçlik- $\sum(E_j+T_j)$  amaçları için algoritmaların verdiği sonuçlar gösterilmiştir.

Tablo 2: Enbüyük tamamlanma zamanının enküçüklenmesi amaç fonksiyonu için tavlama benzetimi ve yasaklı arama algoritmalarının performanslarının karşılaştırılması.

n	m	$S_{jk}$	$C_{enb}$		CPU(sn)	
			SA	TS	SA	TS
10	5	Kısa	27	25	0.012	0.712
10	5	Orta	41	41	0.141	0.733
10	5	Uzun	73	66	0.134	0.741
15	10	Kısa	19	20	0.185	1.159
15	10	Orta	35	35	0.193	1.135
15	10	Uzun	57	59	0.211	1.142

Tablo 3: Toplam gecikmenin enküçüklenmesi amaç fonksiyonu için tavlama benzetimi ve yasaklı arama algoritmalarının performanslarının karşılaştırılması.

n	m	$S_{jk}$	$\sum T_j$		CPU(sn)	
			SA	TS	SA	TS
10	5	Kısa	27	14	0.048	0.519
10	5	Orta	95	87	0.057	0.505
10	5	Uzun	214	198	0.044	0.522
15	10	Kısa	11	3	0.077	0.929
15	10	Orta	74	67	0.072	0.983
15	10	Uzun	194	190	0.071	0.881

Tablo 4: Enbüyük gecikmenin enküçüklenmesi amaç fonksiyonu için tavlama benzetimi ve yasaklı arama algoritmalarının performanslarının karşılaştırılması.

n	m	$S_{jk}$	$T_{enb}$		CPU(sn)	
			SA	TS	SA	TS
10	5	Kısa	11	7	0.061	0.547
10	5	Orta	29	24	0.056	0.566
10	5	Uzun	60	47	0.070	0.568
15	10	Kısa	8	4	0.078	0.897
15	10	Orta	21	21	0.089	0.864
15	10	Uzun	50	45	0.082	0.862

Tablo 5: Geciken iş sayısının enküçüklenmesi amaç fonksiyonu için tavlama benzetimi ve yasaklı arama algoritmalarının performanslarının karşılaştırılması.

n	m	$S_{jk}$	$n_t$		CPU(sn)	
			SA	TS	SA	TS
10	5	Kısa	2	2	0.049	0.487
10	5	Orta	5	5	0.049	0.485
10	5	Uzun	5	5	0.053	0.540
15	10	Kısa	1	1	0.071	0.878
15	10	Orta	5	5	0.076	0.845
15	10	Uzun	5	5	0.074	0.765

Tablo 6: Toplam erkenlik ve geçliğin enküçüklenmesi amaç fonksiyonu için tavlama benzetimi ve yasaklı arama algoritmalarının performanslarının karşılaştırılması.

n	m	$S_{jk}$	$\sum(E_j+T_j)$		CPU(sn)	
			SA	TS	SA	TS
10	5	Kısa	54	49	0.055	0.511
10	5	Orta	129	120	0.044	0.554
10	5	Uzun	282	230	0.069	0.606
15	10	Kısa	49	34	0.067	0.917
15	10	Orta	123	122	0.072	0.073
15	10	Uzun	249	237	0.068	0.935

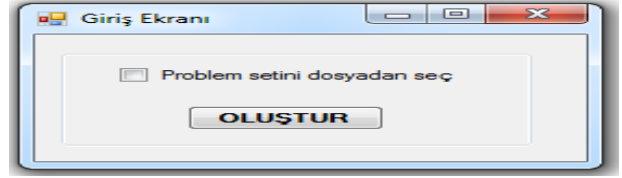
Tablolardaki değerler incelendiğinde iki algoritmanın

çoğunlukla yaklaşık sonuçlar verdiği görülmüştür. Aynı iterasyon sayısı durma ölçütü olarak alındığından yasaklı aramanın rastgele 10 çözüm içeren aday liste kullanması sebebiyle CPU değerlerinin daha fazla olması beklenen bir durumdur.

Çalışmada, sıraya bağımlı hazırlık süreli paralel makina problemlerini farklı amaçlar için çözebilme yeteneğine sahip bir karar destek sistemi tasarlanmıştır. Tasarlanan karar destek sistemi veritabanı, model ve kullanıcı arayüzlerinden oluşmaktadır. Çalışmada ele alınan paralel ilgisiz makina çizelgeleme problemlerine çözüm aramak amacıyla kodlanan yazılım ile karar verici veritabanından makina ve işlere ilişkin verileri alabilmekte tavlama benzetimi veya yasaklı arama algoritmalarından biri ile istediği amaç için çizelgeleme problemini çözdürebilmektedir. Kullanıcı aynı zamanda farklı amaçlar için çizelgeleri karşılaştırma imkânı da bulmaktadır.

### 3.3 Kullanıcı arayüzleri

Sistem ilgili problemi yaşayan işletmelerde kolay kullanım imkânı veren arayüzlere sahiptir. Programın giriş ekranı, işletmenin ilgili dönemi için çizelgeleme problemine ilişkin problem setini seçme imkânı tanımaktadır (Şekil 2).



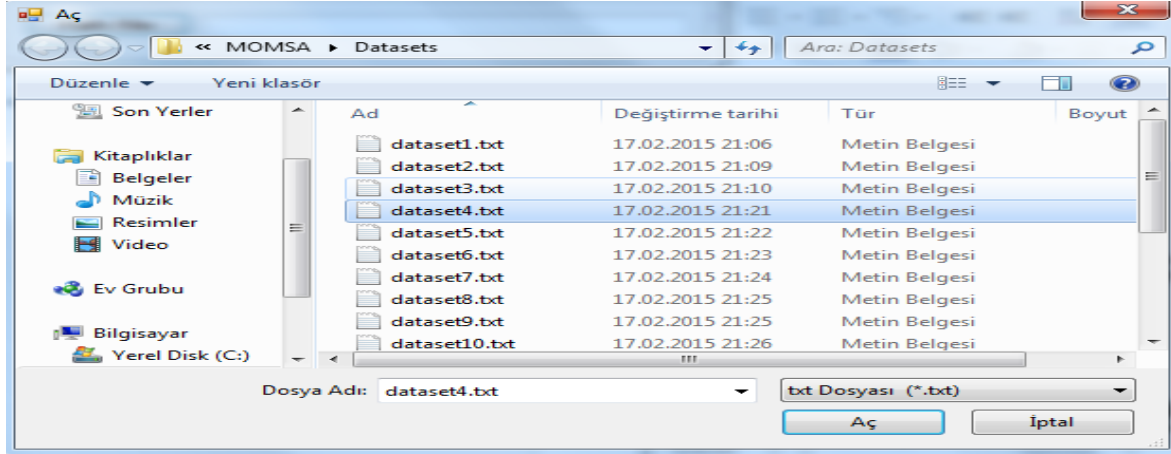
Şekil 2: Giriş arayüzü.

Problem seti seçilerek "oluştur" butonuna basıldığında problem setinin yükleneceği dosya yolunun seçileceği arayüz ekrana gelmektedir (Şekil 3).

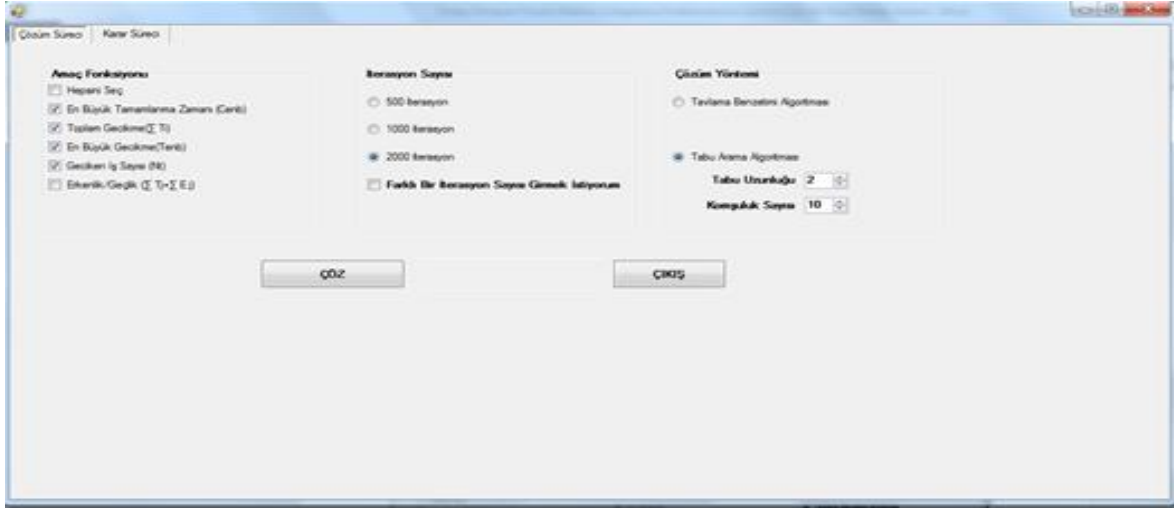
Problem seti kullanılmak üzere ilgili klasöre yüklendiğinde "tavlama benzetimi" ya da "yasaklı arama" meta-sezgiselleri yardımıyla a problemi çözebilmemize imkân sağlayan arayüz gelmektedir (Şekil 4). Problemin hangi amaç fonksiyonu doğrultusunda hangi meta-sezgisel kullanılarak çözdürüleceği, meta-sezgiselin kaç iterasyon çalıştırılacağı ilgili arayüzde seçilmektedir.

Şekil 4'te, 10 makina 25 iş içeren sıraya bağımlı hazırlık süreli özdeş olmayan paralel makina çizelgeleme probleminin arayüzde işaretlenmiş dört amaç fonksiyonu için yasaklı arama algoritması ile 2000 iterasyon için çözümü istendiği görülmektedir. İlgili amaçlar, enbüyük tamamlanma zamanının enküçüklenmesi " $C_{enb}$ ", toplam gecikmenin enküçüklenmesi " $\sum T_j$ ", enbüyük gecikmenin enküçüklenmesi " $T_{enb}$ ", en az geciken iş sayısı " $n_t$ " ve enküçük toplam erkenlik-geçlik " $\sum(E_j+T_j)$ " olup her bir amaç için ayrı ayrı alınacak çözümler için "ÇÖZ" butonuna basılır. İzleyen arayüz ile karar vericiye istenen amaç fonksiyonları için makina atamaları ve sıralamalar sunulur (Şekil 5).

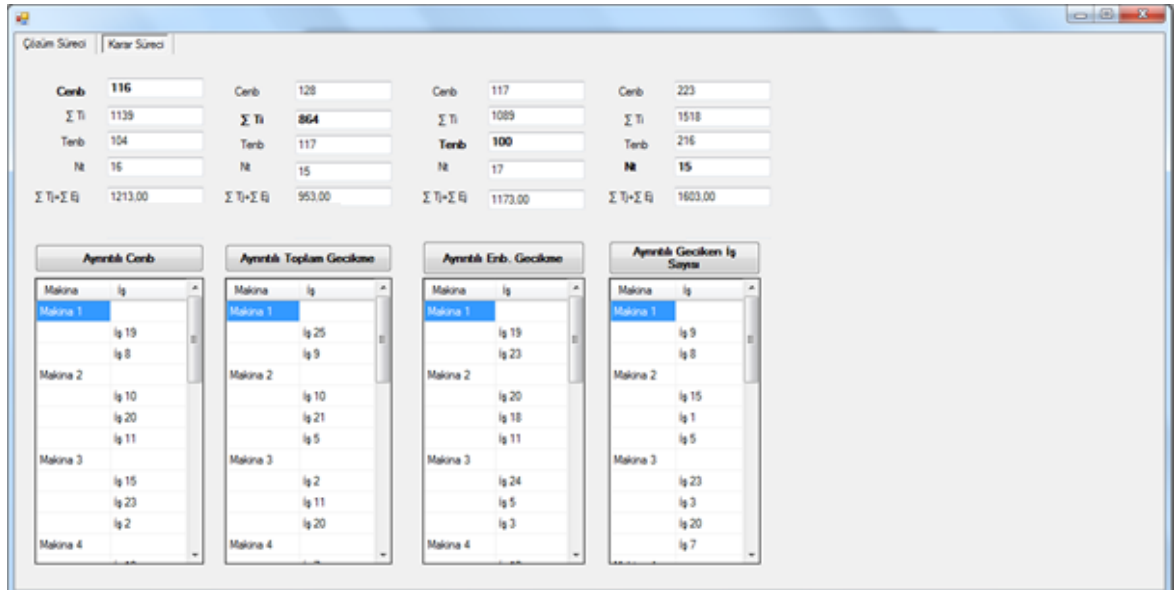
Şekil 5'teki arayüz farklı amaçlar için sonuçları karşılaştırarak ödünleşmeleri görmeyi mümkün kılmaktadır. Birinci sütun "Enbüyük tamamlanma zamanını ( $C_{enb}$ ) enküçükleme" amacı için çözümü, ikinci sütun "toplam gecikmeyi ( $\sum T_j$ ) enküçükleme" amacı için çözümü, üçüncü sütun "enbüyük gecikmeyi ( $T_{enb}$ ) enküçükleme" amacı için çözümü ve son sütun "geciken iş sayısını ( $n_t$ ) enküçükleme" amacı için makinalara atanan işleri ve sıralarını göstermektedir.



Şekil 3: Problem setinin seçileceği arayüz.



Şekil 4: Meta-sezgisel arayüzü.



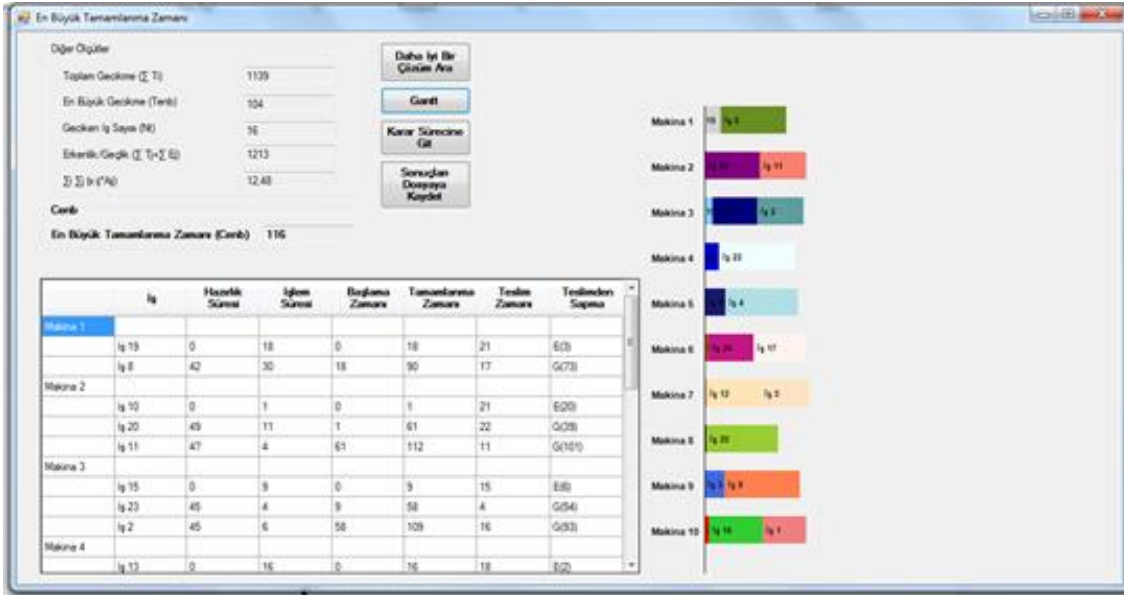
Şekil 5: Sonuçları karşılaştırma arayüzü.

Problem *Cenb* için çözdürüldüğünde elde edilen çizelgede (Şekil 6) işler 116 birim sürede tamamlanmakta ve geciken iş sayısı 16 olmaktadır. Buna karşın geciken iş sayısını enküçükleme amacıyla elde edilen çözümde geciken iş sayısı 15'e düşmekte ancak işlerin tamamlanma zamanı 223 birim süreye çıkmaktadır. Karar verici dört çözümü karşılaştırıp ödünleşmeleri inceleyerek atölye için hangi çözümün daha uygun olacağına karar verebilir. Ayrıca istediği amaç doğrultusunda ayrıntılı bilgi ve Gantt şemasını görmek için "Ayrıntılı sonuç" butona tıklayarak her bir makinada işlerin başlama ve bitiş zamanlarını ne kadar erken ya da geç bittiği gibi bilgileri tablo şeklinde görebilir. Örnek problem için Şekiller 6-9 her bir amaç doğrultusunda ayrıntılı sonuç arayüzlerini göstermektedir. İş atölyelerinde işlerin çizelgelemesinde duruma bağlı olarak amaç farklılık gösterebilir. Bir planlama döneminde işleri en kısa sürede

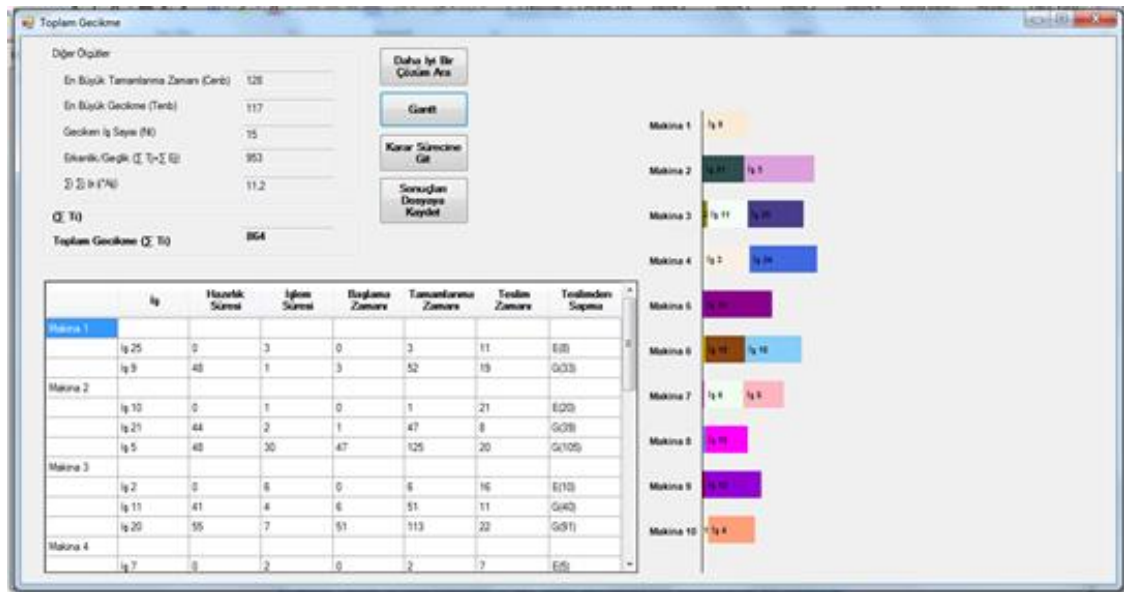
bitirmek önemli iken başka bir dönemde geciken işlerin sayısına azaltacak bir çizelge üretmek çok daha önemli olabilir.

Şekil 6'da işleri mümkün en kısa sürede bitirmek için "enbüyük tamamlanma zamanını (Cenb) enküçükleme" amacı doğrultusunda problem çözdürüldüğünde işlerin hangi makinada hangi sıra ile yapılacağı görülmektedir. İlgili çizelgeye göre son iş 116 br. süre sonra bitmiş olacaktır. Atölyede ilgili çizelge uygulanırsa 25 işten 16'sı gecikecek, işlerin toplam gecikmesi 1139 br. süre olup, en fazla gecikme 104 br. süredir. En fazla gecikmenin hangi işte olacağı şeklin sol alt köşesindeki tabloda görülebilmektedir.

Şekil 7'de toplam gecikmeyi enküçükleme amacı için elde edilen çizelge görülmektedir. İlgili arayüz ile işlerin toplam gecikmelerini enküçükleme amacı doğrultusunda problem çözdürüldüğünde, hangi makinada hangi işin hangi sıra ile yapılacağı tablo ve şema ile kullanıcıya sunulmaktadır.



Şekil 6: Enbüyük tamamlanma zamanını enküçükleyen çizelgeye ilişkin ayrıntılı sonuç arayüzü.



Şekil 7: Toplam gecikmeyi enküçükleyen çizelgeye ilişkin ayrıntılı sonuç arayüzü.

Şekil 8’de enbüyük gecikmeyi enküçüklemek amacıyla elde edilen çizelge verilmiştir. İlgili çizelge uygulanırsa işlerden biri 100 br. süre geç bitecek demektir. Buna karşın işler en erken 117 br. süre sonra tamamlanabilecektir. Cenb amacı için elde edilen çizelgede ilgili değerin 116 ve enbüyük gecikmenin 104 olduğu düşünülürse karar verici için ilgili ödünleşmeler dikkate alınarak atölye için uygun olan çizelge seçilebilmektedir.

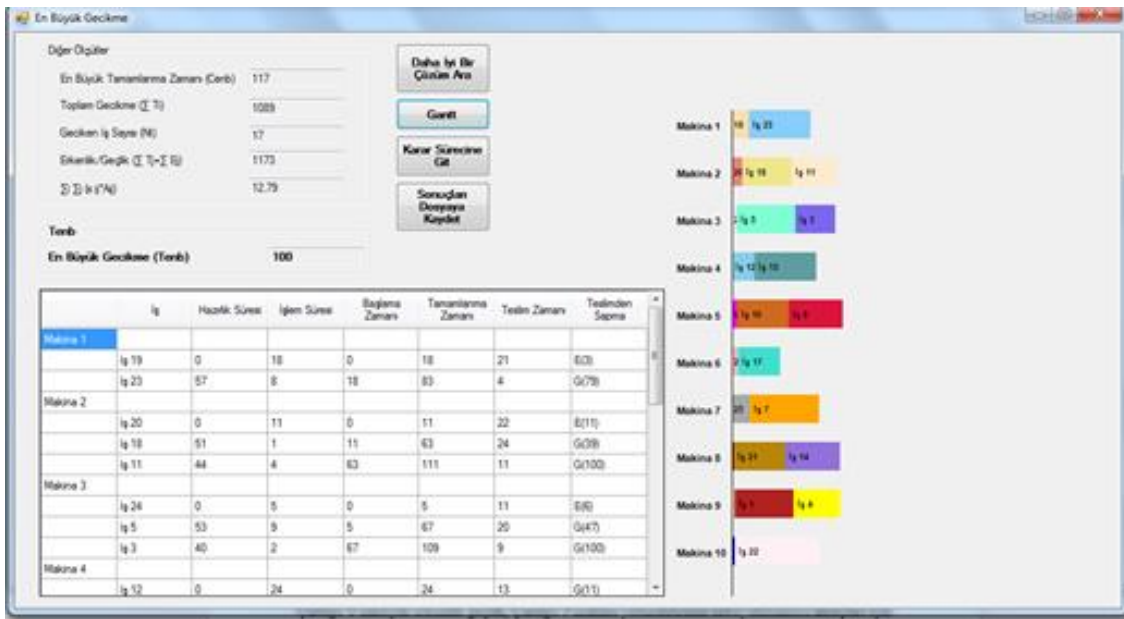
Şekil 9’da geciken iş sayısını enküçükleyen çizelgeye ilişkin ayrıntılı sonuç ara yüzü verilmiştir.

Şekil 9’daki çizelge uygulanırsa 15 iş gecikecek buna karşın işlerin tamamlanma zamanı 223 br. süre olacaktır. Şekil 6’daki enbüyük tamamlanma zamanını enküçüklemek amacıyla elde edilen çizelgeye göre, 16 iş gecikirken işlerin tamamlanma zamanının 116 br. süre olduğu düşünülürse karar verici, ilgili

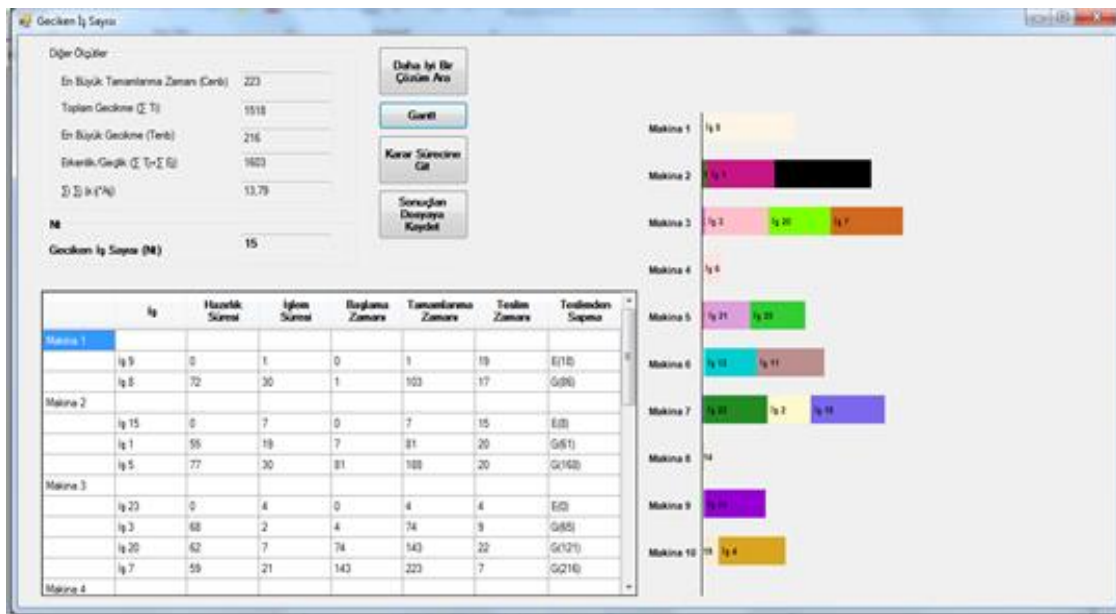
iki amaç doğrultusunda ödünleşmeleri dikkate alarak atölye için uygun çizelgeyi seçebilecektir.

#### 4 Sonuçlar

Çalışmada aynı işi yapabilen ancak özdeş olmayan paralel makinelerin çizelgelenmesi, sıraya bağımlı hazırlık süresi olduğu durumda ele alınmış ve büyük boyutlu problemlerin çözümü için meta-sezgiseller içeren bir karar destek sistemi tasarlanmıştır. Bu kapsamda enbüyük tamamlanma zamanının enküçüklenmesi, enbüyük gecikmenin enazlanması, geciken iş sayısının enazlanması, toplam erken bitirme ve geç bitirmelerin enazlanması amaçları için çizelgeleri üretebilecek tavlama benzetimi ve yasaklı arama algoritmaları kodlanmıştır.



Şekil 8: Enbüyük gecikmeyi enküçükleyen çizelgeye ilişkin ayrıntılı sonuç arayüzü.



Şekil 9: Geciken iş sayısını enküçükleyen çizelgeye ilişkin ayrıntılı sonuç arayüzü.



Geliştirilen çözüm yaklaşımı bir yazılım halinde tasarlanıp kodlanarak herhangi bir işletmede kolaylıkla çizelgeler üretilebilir hale getirilmiştir. Problemin sanayide karşılaşılan oramı yüksek olup kodlanan programın ilgili işletmelerde kullanımı mümkündür. Farklı amaçlar için sıraya bağımlı hazırlık süreli tüm paralel makina problemlerinin çözümünü verebilen sistem ile işletmelerde kaynakların daha etkin kullanımı ve verimlilik artışı mümkün olabilecektir. Bundan sonraki çalışmalar, birden fazla amaç fonksiyonunun birlikte ele alındığı çok amaçlı modellerin ileri sezgisel algoritmalar ile çözümü ve karar destek sistemine dahil edilmesi üzerine odaklanacaktır.

## 5 Teşekkür

Bu çalışma, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu tarafından 201415D13 nolu "Sıraya Bağımlı Hazırlık Süreli Paralel Makina Çizelgeleme Problemlerinin Çözümünde Makina Yeteneğini Dikkate Alan Bir Karar Destek Sistemi" başlıklı proje olarak desteklenmiştir.

## 6 Kaynaklar

- [1] Pinedo M. *Scheduling Theory, Algorithms, and Systems*. Second Edition, New Jersey, USA, Prentice Hall, 2002.
- [2] Allahverdi A, Gupta JND, Aldowaisan, T. "A review of scheduling research involving setup considerations". *Omega*, 27(2), 219-239, 1999.
- [3] Allahverdi A, Ng CT, Cheng TCE, Kovalyov M. "A survey of scheduling problems with setup times or costs". *European Journal of Operational Research*, 187(3), 985-1032, 2008.
- [4] Li K, Yang SL. "Non identical parallel machine scheduling research with minimizing total weighted completion times: Models, relaxations and algorithms, *Applied Mathematical Modelling*, 33(4), 2145-2158, 2009
- [5] Chen CL, Chen CL. "Hybrid metaheuristics for unrelated parallel machine scheduling with sequence-dependent setup times". *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 43(1-2), 161-169, 2009.
- [6] Tavakkoli-Moghaddam R, Taheri F, Bazzazi M. "Design of a genetic algorithm for bi-objective unrelated parallel machines scheduling with sequence-dependent setup times and precedence constraints". *Computers & Operations Research*, 36(12), 3224-3230, 2009.
- [7] Arnaout JP, Rabadi G, Musa R. "A two-stage Ant Colony Optimization algorithm to minimize the makespan on unrelated parallel machines with sequence-dependent setup times". *Journal of Intelligent Manufacturing*, 21(6), 693-701, 2010.
- [8] Vallada E, Ruiz R. "A genetic algorithm for the unrelated parallel machine scheduling problem with sequence dependent setup times". *European Journal of Operational Research*, 211(3), 612-622, 2011.
- [9] Lin SW, Lu CC, Ying KC. "Minimization of total tardiness on unrelated parallel machines with sequence- and machine-dependent setup times under due date constraints". *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 53(1-4), 353-361, 2011.
- [10] Ying KC, Lin SW. "Unrelated parallel machine scheduling with sequence and machine-dependent setup times and due date constraints". *International Journal of Innovative Computing Information and Control*, 8(5A), 3279-3297, 2012.
- [11] Hsu CJ, Ji M, Guo JY, Yang DL. "Unrelated parallel-machine scheduling problems with aging effects and deteriorating maintenance activities". *Information Sciences*, 253, 163-169, 2013.
- [12] Naderi-Beni M, Ghobadian E, Ebrahimnejad S, Tavakkoli Moghaddam R. "Fuzzy bi-objective formulation for a parallel machine scheduling problem with machine eligibility restrictions and sequence-dependent setup times". *International Journal of Production Research*, 52(19), 5799-5822, 2014.
- [13] Sariçiçek İ, Çelik C. "Two meta-heuristics for parallel machine scheduling with job splitting to minimize total tardiness". *Applied Mathematical Modelling*, 35(8), 4117-4126, 2011.
- [14] Kirkpatrick S, Gelatt CD, Vecchi MP. "Optimization by Simulated Annealing". *Science*, 220(4598), 671-680, 1983.