

## ENERJİ-ETKİN ESNEK ATÖLYE TİPİ MAKİNE ÇİZELGELEME PROBLEMİ İÇİN ÇOK AMAÇLI BİR MATEMATİKSEL MODEL

Emine AKYOL ÖZER<sup>1\*</sup>, Sevcan DİNCER<sup>2</sup>, Hüseyin TAMER<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Eskişehir Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Endüstri Mühendisliği Bölümü, Eskişehir

ORCID No : <https://orcid.org/0000-0002-9570-2886>

<sup>2</sup>Eskişehir Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Endüstri Mühendisliği Bölümü, Eskişehir

ORCID No : <https://orcid.org/0000-0001-7395-3468>

<sup>3</sup>Eskişehir Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Endüstri Mühendisliği Bölümü, Eskişehir

ORCID No : <https://orcid.org/0000-0001-9766-330X>

Anahtar Kelimeler	Öz
<i>Enerji Etkin Çizelgeleme, Esnek Atölye Tipi Makine Çizelgeleme, Yeniden Dolaşım, Makine Uygunluk Kısıtları, Toplam Ağırlıklı Tamamlanma Zamanı</i>	<i>Bu çalışmada, bir conta fabrikasındaki yeniden dolaşım ve makine uygunluk gibi sürece özgü kısıtların bulunduğu bir esnek atölye tipi çizelgeleme problemi ele alınmıştır. Klasik makine çizelgeleme problemlerinde son işin tamamlanma zamanı, ağırlıklı tamamlanma zamanı, toplam gecikme gibi verimliliği veya maliyeti enküçükleyecek amaçlar ele alınmaktadır. Son yıllarda ise, sürdürülebilir üretim süreçlerinin önem kazanmasıyla bu amaçlara ek olarak, enerji odaklı amaç fonksiyonları gündeme gelmiştir. Bu çalışmada, klasik çoğu çizelgeleme problemlerinden farklı olarak, toplam enerji tüketimini ve toplam ağırlıklı tamamlanma zamanını enküçükleyecek çok amaçlı bir matematiksel model geliştirilmiştir. Bu modelin performansı, GAMS/Cplex çözücüsünde küçük boyutlu test problemleri ve fabrikadaki gerçek hayat problemleri kullanılarak test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar tartışılmıştır.</i>

## A BI-OBJECTIVE MATHEMATICAL MODEL FOR ENERGY-EFFICIENT FLEXIBLE JOB SHOP MACHINE SCHEDULING PROBLEM

Keywords	Abstract
<i>Energy Efficient Scheduling Flexible Job Shop Scheduling Recirculation, Machine Eligibility Restrictions, Total Weighted Completion time</i>	<i>In this study, a flexible job shop scheduling problem with particular constraints such as recirculation and machine suitability in a gasket factory is discussed. In classical machine scheduling problems, the objectives that minimize productivity or cost such as completion time, weighted completion time, total delay are addressed. In recent years, in addition to these objectives, energy-oriented objective functions have become critical with the increasing importance of sustainable production processes. In this study, unlike most classical scheduling problems, a multi-objective mathematical model is developed to minimize total energy consumption and total weighted completion time. The performance of this model has been tested using small-scale test problems and real-life problems from the factory in the GAMS/Cplex solver. The obtained results are discussed.</i>
Araştırma Makalesi	Research Article
Başvuru Tarihi : 04.07.2020	Submission Date : 04.07.2020
Kabul Tarihi : 10.03.2021	Accepted Date : 10.03.2021

### 1. Giriş

Üretim çizelgeleme, bir ürünü oluşturan iş parçalarının tek veya çok sayıdaki makinelerde hangi sırada ve ne zaman işleneceğinin belirlenmesidir. Çizelgeleme

problemleri, üretim ortamı açısından ele alındığında; tek makine, paralel makine, akış tipi ve atölye tipi çizelgeleme problemleri olmak üzere dört ana başlıkta ele alınabilir. Tek makine çizelgeleme probleminde, bütün işler tek makinede üretilir. Paralel makine

\* Sorumlu yazar; e-posta : [emineakyol@eskisehir.edu.tr](mailto:emineakyol@eskisehir.edu.tr)



Bu eser, Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) hükümlerine göre açık erişimli bir makaledir.

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

çizelgeleme probleminde ise, işler aynı işi yapan çok sayıda makinelerden herhangi birisine atanabilmektedir. Bu problemlerde işlerin sırasının yanı sıra, hangi makinelere atanacağını da belirlenmesi gerektiğinden tek makine çizelgeleme problemine göre daha zordur. Akış tipi çizelgeleme probleminde, bütün işler aynı öncelik ilişkisine sahiptir ve bu ilişki gözetilerek aynı makine grubunda işlem görür. Atölye tipi çizelgeleme probleminde ise, her iş farklı tip makinelerde ve farklı iş rotalarını izler (French, 1982).

Çizelgeleme problemlerinde kullanılan çözüm metodlarının başarısı, performans kriterleriyle ortaya koyulmaktadır. Klasik çizelgeleme problemlerinde son işin tamamlanma zamanı, ağırlıklı tamamlanma zamanı, toplam gecikme gibi performans kriterleri kullanılmaktadır. Son yıllarda ise, bu kriterlerin yanı sıra, sürdürülebilir kalkınmanın odak noktası olan enerji verimliliği önemli bir performans kriteri olarak öne çıkmaktadır.

Bu çalışmada, bir conta fabrikasındaki yeniden dolaşım (recirculation) ve makine uygunluk kısıtlarının olduğu esnek atölye tipi çizelgeleme problemi ele alınmıştır. Problemin amacı, toplam enerji tüketimini ve ağırlıklı tamamlanma zamanını en küçükmektir. Bu problem literatürde  $FJ_M / M_j, rcrc / \sum E_i, \sum w_i C_i$  şeklinde gösterilmektedir.

Çalışmanın izleyen bölümünde, ele alınan problem ile ilgili erişilebilen literatür sunulmuştur. Üçüncü bölümde, problem tanıtılmış ve önerilen matematiksel model açıklanmıştır. Çalışmanın deneysel sonuçları dördüncü bölümde, edilen sonuçlar ve geleceğe yönelik öneriler beşinci bölümde sunulmuştur.

## 2. Bilimsel Yazın Taraması

Makine çizelgeleme problemleri ile ilgili literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, esnek atölye çizelgeleme problemlerinin, atölye çizelgeleme ve akış çizelgeleme gibi klasik problemlerden daha az sayıda olduğu gözlemlenmiştir. Araştırmada göze çarpan bazı çalışmalar şunlardır;

Karabulut ve Saraç (2019) esnek atölye tipi çizelgeleme problemi için üç aşamalı bir çözüm yaklaşımı geliştirmişlerdir. Önerilen yaklaşımın her aşamasında amaç fonksiyonu toplam gecikmeyi en küçükleyecek şekilde, sırasıyla sıra bağımlı hazırlık süreli tek makine çizelgeleme problemi, tek makine çizelgeleme problemi ve paralel makine çizelgeleme problemi çözülmüştür. Yazarlar, problemlere kapasite kısıtı ekleyerek daha uygulanabilir çözümler üretilebilmesini sağlamışlardır.

Wang, Wang, Chu ve Yu (2019), iki kriterli, enerji tasarruflu, iki aşamalı hibrit akışlı atölye çizelgeleme problemini incelemişlerdir. Birinci aşamada uygunluğa sahip paralel makineler, ikinci aşamada tek makine bulunmaktadır. Amaç, tamamlanma zamanını ve toplam

enerji tüketimini en küçükmektir. Orta ve büyük ölçekli problemleri çözebilmek için yerel arama stratejisine sahip, tabu arama algoritması ve karınca kolonisi optimizasyon algoritması geliştirilmiştir.

Aqel, Li ve Gao (2019) çalışmalarında esnek atölye tipi çizelgeleme problemini kodlama ve çoğaltma işlemlerinin daha basit olduğu bir meta-sezgisel ile yinelenen açgözlü algoritma önermişlerdir. Algoritma geliştirilirken iki aşamaya bölünmüş ve her bir aşama, alt problemleri sıralama ve rotalama için kullanılmıştır.

Deliktaş, Torkul ve Üstün (2019) esnek atölye tipi çizelgeleme problemlerinde hücreli üretim ortamında istisnai parçaları, hücreler arası hareketleri, hücreler arası taşıma süreleri, sıra bağımlı hazırlık süreleri ve yeniden dolaşımı göz önünde bulundurarak hem tek hem iki amaçlı fonksiyonu içeren matematiksel model geliştirmişlerdir. Tek amaç ile hazırlanan modelin amaç fonksiyonu tamamlanma zamanını en küçükmektir. Daha sonra toplam gecikme amacı modele dahil edilmiştir.

Xing, Chen, Wang, Zhao ve Xiong (2010) çalışmalarında esnek atölye tipi makine çizelgeleme problemi için bilgi tabanlı karınca kolonisi optimizasyon algoritması önermektedir. Bu algoritma, karınca kolonisi optimizasyon modeli ile bilgi modelinin etkili entegrasyonunu sağlamaktadır.

Demircioğlu (2019) atölye tipi üretim için çizelgeleme yapılırken harcanan en yüksek elektrik miktarı hesaplayarak, sadece toplam işlerin bitiş süresinin minimizasyonu değil aynı zamanda elektrik tasarrufu yapan bir çizelgele oluşturmayı hedeflemişlerdir. Her bir zaman dilimi için harcanan elektrik miktarı kullanılarak tüm işlemlerin bitiş zamanına kadar olan tüm zaman dilimleri için en büyük elektrik harcaması hesaplanmıştır. Bu değer azaltılmaya çalışılması ile elektrik enerjisi tasarrufu sağlanmaya çalışılmıştır. Tamsayı matematiksel model oluşturularak yapay sinir ağları ile çözümler elde edilmiştir.

Mousakhani (2013), sıralı hazırlık süresine sahip esnek atölye tipi çizelgeleme problemi için toplam gecikmeyi en küçükmeyi amaçlamıştır. Geliştirdiği karma tamsayı matematiksel modeli literatürdeki diğer modellerle karşılaştırmıştır. Bu model hem boyut karmaşıklığı hem de hesaplama karmaşıklığı açısından daha iyi performans göstermiştir. Çalışmanın devamında lokal arama temelli efektif bir meta-sezgisel algoritma önermiş ve aynı problem için tabu arama ve değişken komşuluk arama algoritmalarıyla karşılaştırmıştır.

Wu ve Sun (2018), esnek atölye tipi çizelgeleme problemi için operasyon yönetimi açısından öncelikle enerji tasarrufu sağlayan bir model önermişlerdir ve daha sonra sıralanmış genetik algoritma geliştirmişlerdir.

Wang ve Jiang (2018), esnek atölye tipi çizelgeleme problemi için iki aşamalı bir enerji tasarrufu optimizasyonu yöntemi önermektedirler. İlk aşamada bir modifiye genetik algoritma uygulamışlar ve ikinci aşamada genetik algoritmayı ve parçacık sürüsü optimizasyonu ile birleştiren hibrit bir yöntem benimsemişlerdir. Son olarak, önerilen yöntemin uygulanabilirliğini ve geçerliliğini göstermek için bir vaka çalışması kullanmışlardır.

Meng, Zhang, Shao ve Ren (2019), esnek atölye tipi çizelgeleme problemi için toplam enerji tüketimini en aza indirmeyi amaçlamışlardır. Problemin çözümü için, karma tamsayılı doğrusal programlama modeli önermişlerdir.

Zhang, Gao ve Shi (2011), esnek atölye tipi çizelgeleme probleminde üretim süresini en aza indirmek için bir genetik algoritma önermişlerdir. Çeşitli veriler ile test ederek geliştirdikleri algoritmanın performansını ortaya koymuşlardır.

Salido, Escamilla, Giret ve Barber (2016), çalışmalarında makinelerin görevlerini farklı hızlarda işlemek için farklı miktarlarda enerji tüketebilecekleri atölye tipi çizelgeleme probleminin genişletilmiş bir versiyonunu çözmek için genetik bir algoritma geliştirilmiştir.

Saraç, Sipahioğlu ve Özer (2020), makine uygunluk kısıtlarının olduğu bir paralel makine çizelgeleme problemi için tamamlanma zamanını, toplam gecikmeyi ve toplam bekleme süresini en aza indirmek amacıyla iki aşamalı çok amaçlı bir matematiksel model önermişlerdir. İlk aşamada makineler işler atanır, ikinci aşamada her makineye ayrı çizelgeler oluşturulur. Bu geliştirilen model ve yöntemin performansını rassal test problemleri ile göstermişlerdir.

Erişilebilen literatürde, esnek atölye tipi çizelgeleme problemlerini ele alındığı çalışmalarda genellikle enerji tasarrufunun tek amaç olarak dikkate alındığı ve yeniden dolaşım kısıtlarının olmadığı göze çarpmaktadır. Bu çalışmada ise, literatürden farklı olarak yeniden dolaşım ve makine uygunluk kısıtlarının olduğu, parti tipi üretimin yapıldığı bir esnek atölye çizelgeleme problemi için, toplam enerji tüketimini ve toplam tamamlanma zamanının en küçüklenmesi hedeflenmiştir.

### 3. Yöntem

Bu çalışma için işletmeden gerekli izinler alınmıştır.

Esnek atölye tipi makine çizelgeleme problemlerinde alternatif makineler bulunmakta ve her iş farklı sayıda operasyona ve her bir operasyon farklı öncelik sıralarına sahiptir.

Çalışmanın yapıldığı işletmede 6 adet hidrolik, 22 adet eksantrik olmak üzere iki çeşit pres makinesi bulunmakta ve her ikisi de aynı operasyonlarda

kullanılabilmektedir. Parçalar üretilirken, operatör talimatındaki makine tonaj bilgisine uygun makinede preslenir. Eğer talimatta yazan tonajdaki makineler meşgul ise, kendi tonajından belli limitlerde fazla olması koşuluyla farklı tonajlardaki makineler de kullanılabilir. Bununla birlikte, daha yüksek tonajdaki makinelerin elektrik tüketimi daha fazla olmaktadır. İşletmede pres makinelerinin türleri göz ardı edilerek tonajlarına göre makine sayıları, alternatif makine tonajları, her makinede işlenen parça ve operasyon sayıları, makinelerin motor güçleri (kw) Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1  
Makine Bilgileri

Makine Tonajı	Alternatif Makine Tonajları	Makine Sayısı	İşlenen Parça Sayısı	İşlenen Operasyon Sayısı	Motor Gücü (kW)
30	40	2	4	8	2,2
40	-	1	5	7	3,0
80	100, 110	2	4	4	5,5
100	110, 160	5	4	8	7,5
110	160, 180	2	4	7	11,0
160	180	1	4	4	15,0
180	250	3	6	1	16,0
250	-	2	2	2	18,5
500	-	4	8	12	45,0

Bu çalışmada ele alınan, makine uygunluk kısıtı ve hazırlık süresi bulunan ve parti tipi üretim yapan esnek atölye tipi makine çizelgeleme problemi için iki amaçlı bir karma tamsayılı matematiksel model geliştirilmiştir. Modelin amaç fonksiyonu, toplam enerji tüketimini ve işlerin toplam ağırlıklı tamamlanma zamanlarını en küçüklemeektir.

*Varsayımlar:*

- Çizelgeleme periyodu boyunca tüm makineler iş atanabilir.
- Tüm işlerin işlem süreleri ve hazırlık süreleri belirlidir.
- Herhangi bir anda, bir makinede en çok bir iş işlem görebilir.

*Kümelere:*

$N = \{1,2, \dots, n\}$  iş kümesi

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

$K = \{1,2, \dots, k_{max}\}$  operasyon kümesi

$H = \{1,2, \dots, h_{max}\}$  sıra kümesi

$T = \{1,2, \dots, t_{max}\}$  parti kümesi

**İndisler:** $i, q$ : iş indisi $j, o$ : makine indisi $k, p$ : operasyon indisi $h, u$ : sıra indisi $t, e$ : parti indisi**Parametreler:** $n$ : toplam iş sayısı $m$ : toplam makine sayısı $\sigma_i$ :  $i$ . işe ait operasyon sayısı $k_{max}$ : işlere ait en büyük operasyon sayısı $\varphi_i$ :  $i$ . işe ait parti sayısı $P_{ikt}$ :  $i$ . işin  $k$ . operasyonunun bir partisinin işlem süresi $S_{ik}$ :  $i$ . işin  $k$ . operasyonuna hazırlık süresi $D_{ikt}$ :  $i$ . işin  $k$ . operasyonunun  $t$ . partisi için hazırlık süresi $M$ : çok büyük bir pozitif sayı $b_{ikj}$ :  $i$ . işin  $k$ . operasyonu  $j$ . makinede yapılıyorsa 1 ; diğer durumda 0 $w_i$ :  $i$ . işin ağırlık katsayısı $\emptyset_j$ :  $j$ . makinenin dakikada harcadığı enerji katsayısı $AI\_Cmax$ : Ağırlıklı tamamlanma zamanının alabileceği en büyük değer $AI\_E$ : Toplam enerji tüketiminin alabileceği en büyük değer**Karar Değişkenleri:** $C_{ikt}$ :  $i$ . işin  $k$ . operasyonunun  $t$ . partisinin tamamlanma süresi $Cmax_i$ :  $i$ . işin tamamlanma zamanı $E_i$ :  $i$ . işin tamamlanması için harcanan enerji $x_{ikjh}$ :  $i$  işinin  $k$ . operasyonu  $j$ . makinesindeki  $h$ . sıraya atanırsa 1; diğer durumda 0 $v_{ikj}$ :  $i$  işinin  $k$ . operasyonunun  $j$ . makinede çalışmaya başlaması için gerekli bekleme süresi

$$v_{ikj} = enb \{C_{qpe} - C_{i(k-1)t}, 0\}$$

 $r_{ikt}$ :  $i$  işinin  $k$ . operasyonunun  $t$ . partisinin çalışmaya başlaması için gerekli bekleme süresi

$$r_{ikt} = enb \{C_{i(k-1)t} - C_{ik(t-1)}, 0\}$$

**Amaç Fonksiyonu:**

$$enk z_1 = (\sum_{i=1}^n E_i) / AI\_E \quad (1)$$

$$enk z_2 = (\sum_{i=1}^n w_i Cmax_i) / AI\_Cmax \quad (2)$$

**Kısıtlar**

$$\sum_{h=1} x_{ikjh} \leq b_{ikj} \quad \forall i, k, j \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{k_i} x_{ikjh} \leq 1 \quad \forall j, h \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^m \sum_{h=1}^{h_j} x_{ikjh} = 1 \quad \forall i, k \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{k_i} x_{ikj(h+1)} \leq \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{k_i} x_{ikjh} \quad \forall j, h \quad (6)$$

$$C_{ikt} \geq S_{ik} + P_{ikt} - M * (1 - x_{ikjh}) \quad h = 1, k = 1, t = 1 \quad \forall i, k, j, h, t \quad (7)$$

$$C_{ikt} \geq C_{ik(t-1)} + D_{ikt} + P_{ikt} - M * (1 - x_{ikjh}) \quad h = 1, k = 1, t > 1 \quad \forall i, k, j, h, t \quad (8)$$

$$C_{ikt} \geq C_{i(k-1)t} + S_{ik} + P_{ik} - M * (1 - x_{ikjh}) \quad h = 1, k > 1, t = 1 \quad \forall i, k, j, h, t \quad (9)$$

$$C_{ikt} \geq C_{ik(t-1)} + D_{ikt} + P_{ik} + r_{ikt} - M * (1 - x_{ikjh}) \quad h = 1, k > 1, t > 1 \quad \forall i, k, j, h, t \quad (10)$$

$$C_{ikt} \geq C_{i(k-1)t} + S_{ik} + P_{ik} + v_{ikj} - M * (1 - x_{ikjh}) \quad h > 1, t = 1 \quad \forall i, k, j, h, t \quad (11)$$

$$C_{ikt} \geq C_{ik(t-1)} + r_{ikt} + D_{ikt} + P_{ik} - M * (1 - x_{ikjh}) \quad h > 1, k > 1, t > 1 \quad \forall i, k, j, h, t \quad (12)$$

$$C_{ikt} \geq C_{ik(t-1)} + D_{ikt} + P_{ik} - M * (1 - x_{ikjh}) \quad h > 1, k = 1, t > 1 \quad \forall i, k, j, h, t \quad (13)$$

$$v_{ikj} + M * (2 - x_{ikjh} - x_{qpj(h-1)}) \geq C_{qpe} - C_{i(k-1)t} \quad h > 1, i \neq q, \forall i, k, q, p, j, h, t, e \quad (14)$$

$$r_{ikt} + M * (2 - x_{ikjh} - x_{i(k-1)ou}) \geq C_{i(k-1)t} - C_{ik(t-1)} \quad t > 1, k > 1, \forall i, k, j, o, h, u, t \quad (15)$$

$$Cmax_i = C_{i\sigma_i\phi_i} \quad \forall i \quad (16)$$

$$E_i = \sum_k^{k_i} \sum_j^m \sum_h \phi_j * P_{ik} * x_{ikjh} \quad \forall i \quad (17)$$

$$v_{ikj} \geq 0 \quad \forall i, k, j \quad (18)$$

$$r_{ikt} \geq 0 \quad \forall i, k, t \quad (19)$$

$$C_{ikt} \geq 0 \quad \forall i, k, t \quad (20)$$

$$x_{ikjh} \in \{0,1\} \quad \forall i, k, j, h \quad (21)$$

Önerilen matematiksel model iki amaçlıdır; ilk amaç fonksiyonu (1) toplam enerji tüketiminin enküçüklenmesidir. İkinci amaç fonksiyonu (2) ise, işlerin ağırlıklı tamamlanma zamanını minimize etmektedir. Her iki amaç fonksiyonunun birimleri farklı olduğundan normalleştirmeye ihtiyaç duyulmuştur. Bu sebeple, her amaç fonksiyonu, alabileceği en büyük değere bölünmüştür. Kısıt (3) her işin her operasyonunun tonajlarına uygun makinelerden birine atanmasını garanti eder. Makinedeki bir sıraya en çok bir operasyonun atanması, Kısıt (4) ile sağlanır. Kısıt (5) ile her işin her operasyonunun birden fazla makineye atanması engeller. Kısıt (6), operasyonların sıralı bir şekilde atanmasını sağlar. (7), (8), (9), (10), (11), (12) ve (13) kısıtları her işin her operasyonunun her partisinin tamamlanma zamanının hesaplanmasını sağlar.  $i$  işinin birinci operasyonunun ilk partisi  $j$ . makinedeki ilk sıradaysa kısıt (7), o makinedeki ilk operasyonsa fakat ilk partisi değilse kısıt (8), işin ilk operasyonu değilse fakat operasyonun ilk partisi makinedeki ilk sıradaysa kısıt (9), işin ilk operasyonu değil fakat makinedeki ilk operasyonsa ve operasyonun ilk partisi değilse kısıt (10), ilk sırada değilken bir operasyonun ilk partisise kısıt (11), makinedeki ilk operasyon değilse ve bir işin ilk olmayan operasyonun ilk partisi değilse kısıt (12), makinedeki ilk operasyon değilse ama işin ilk operasyonuna ait ilk olmayan partisise kısıt (13) kullanılır. Kısıt (14),  $i$ . işin  $k$ . operasyonunun  $t$ . partisinin,  $j$ . makineyi bekleme süresini, kısıt (15) ise  $i$ . işin  $k$ . operasyonunun  $t$ . partisinin, aynı işin önceki operasyonun  $t$ . partisini bekleme süresini bulmak için kullanılır. Her işin son operasyonunun son partisinin tamamlanma zamanı kısıt (16) ile bulunur. Bir işin yapılması için harcanan enerji miktarı, o işin ilgili operasyonunun yapıldığı makinenin enerji katsayısına ve belirtilen makinedeki işlem süresine bağlıdır. Kısıt (17), her işin tüm operasyonları için harcanan toplam enerjinin hesaplanmasını sağlar. Kısıt (18), (19), (20), (21) karar değişkenlerine ait işaret kısıtlarıdır.

Bu çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

#### 4. Deneysel Sonuçlar

Önerilen matematiksel modelin çözüm performansı, küçük boyutlu problemler ve işletmeden alınan verilerden oluşan gerçek hayat problemleri ile ortaya koyulmuştur. Problemler, Windows 10 Intel Core i5-7200U CPU @ 2.50 GHz özelliklerine sahip bir bilgisayardaki GAMS programında kodlanmış ve Cplex çözücüsü kullanılarak çözülmüştür.

##### 4.1. Küçük Boyutlu Problemler

Matematiksel modelin doğruluğu, iki küçük boyutlu problem ile test edilmiş ve her iki problem için de optimal çözüme ulaşılmıştır.

**P1:** 2 iş 3 makineden oluşan ilk problemde, her işin kendine ait üçer operasyonu bulunmaktadır. Tablo 2'de operasyon süreleri ( $P_{ik}$ ), Tablo 3'te ilk partilerin hazırlık süreleri ( $S_{ik}$ ) ve Tablo 4'te makine uygunluk durumları ( $b_{ikj}$ ) verilmiştir. İşlerin ağırlıkları sırasıyla (1,5) olarak, makinelerin dakika bazında harcadıkları enerji katsayıları ise (2,5,1) olarak belirlenmiştir. Birinci işin operasyonları 3 parti, ikinci işin operasyonları 2 parti halinde gerçekleştirilmektedir. Partiler arası hazırlık sürelerinin ( $D_{ikt}$ ) olmadığı varsayılmıştır.

Tablo 2

P1 için  $i$  İşinin  $k$  Operasyonunun İşlem Süresi ( $P_{ik}$ )

$i/k$	1	2	3
1	3	2	9
2	4	15	6

Tablo 3

P1 için  $i$  İşinin  $k$  Operasyonunun İlk Partisi için Hazırlık Süresi ( $S_{ik}$ )

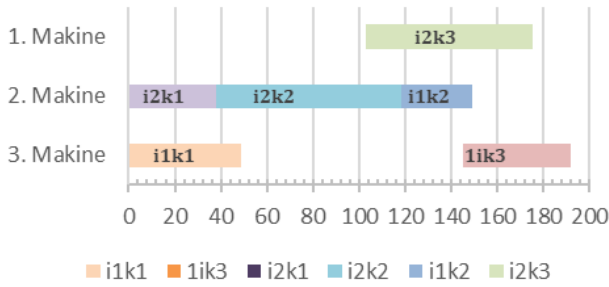
$i/k$	1	2	3
1	40	25	20
2	30	50	60

Tablo 4

P1 için  $i$  İşinin  $k$  Operasyonunun  $j$  Makinesinde İşlenme Durumu ( $b_{ikj}$ )

$i/k$	1	2	3	4
1	20	35	40	0
2	25	20	30	25
3	40	35	30	0
4	35	30	35	20

P1 probleminin optimal çözüm değerine 0.046 saniyede ulaşılmıştır. Normalleştirilmiş optimal amaç fonksiyon değerleri, enerji için 0.453 birim, süre için 0.783 birim olarak bulunmuştur. 1. işin tamamlanma zamanı 192 dakika, 2. işin tamamlanma zamanı 175 dakikadır. Elde edilen sıralama için Gantt şeması Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1. P1 için Gantt Şeması

**P2:** 4 iş 4 makineden oluşan ikinci problemde, her işin farklı sayıda operasyonu bulunmaktadır. Tablo 5’de operasyon süreleri ( $P_{ik}$ ), Tablo 6’da ilk partilerin hazırlık süreleri ( $S_{ik}$ ), Tablo 7’de ilk sırada olmayan partiler için hazırlık süreleri ( $D_{ikt}$ ) ve Tablo 8’de makine uygunluk durumları ( $b_{ikj}$ ) verilmiştir. İşlerin ağırlıkları sırasıyla (1, 5, 2, 10) olarak belirlenmiştir. Makinelerin dakika bazında harcadıkları enerji katsayıları (0.13, 0.24, 0.19, 0.37) olarak belirlenmiştir. İlk işin operasyonları 3 parti, ikinci işin operasyonları 2 parti, üçüncü işin operasyonları 3 parti, dördüncü işin operasyonları 2 parti halinde gerçekleştirilmektedir.

Tablo 5

P2 için  $i$  İşinin  $k$  Operasyonunun İşlem Süresi ( $P_{ik}$ )

$i/k$	1	2	3	4
1	3	2	5	-
2	4	6	3	7
3	2	5	3	-
4	4	2	5	6

Tablo 6

P2 için  $i$  İşinin  $k$  Operasyonunun İlk Partisi için Hazırlık Süresi ( $S_{ik}$ )

$i, k/j$	1	2	3
1,1	1	0	1
1,2	0	1	0
1,3	1	0	1
2,1	0	1	0
2,2	0	1	0
2,3	1	0	1

Tablo 7

P2 için  $i$  İşinin  $k$  Operasyonunun  $t$ .

Partisi için Hazırlık Süresi ( $D_{ikt}$ )

$i, k/n$	2	3
1,1	0.5	0.5
1,2	0.7	0.7
1,3	0.6	0.6
2,1	0.5	-
2,2	0.3	-
2,3	0.9	-
2,4	0.7	-
3,1	0.8	0.8
3,2	0.4	0.4
3,3	0.3	0.3
4,1	0.7	-
4,2	0.2	-
4,3	0.8	-
4,4	0.9	-

Tablo 8

P2 için  $i$  İşinin  $k$  Operasyonunun  $j$  Makinesinde İşlenme Durumu ( $b_{ikj}$ )

$i, k/j$	1	2	3	4
1,1	1	0	1	0
1,2	0	1	0	0
1,3	0	0	0	1
2,1	1	0	1	0
2,2	0	1	0	0
2,3	1	0	1	0
2,4	0	1	0	0
3,1	0	1	0	0
3,2	1	0	1	0
3,3	1	0	1	0
4,1	0	0	0	1
4,2	1	0	1	0
4,3	1	0	1	0
4,4	0	0	0	1

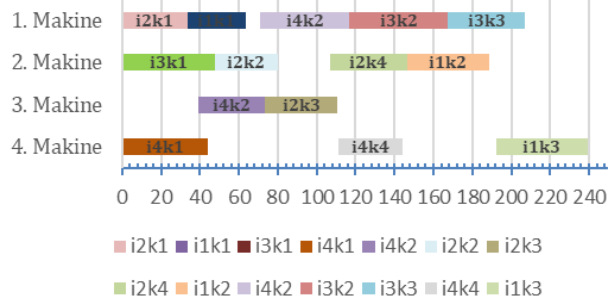
P2 probleminin optimal çözümüne 2400 saniyede ulaşılmıştır. Modelin normalleştirilmiş en iyi amaç fonksiyon değerleri, enerji için 0.917 birim, süre için 0.941 birimdir. 1. işin tamamlanma zamanı 239,5

1. Makine 2. Makine 3. Makine 4. Makine

0 20 40 60 80 100 120 140 160 180 200 220 240

i2k1 i1k1 i3k1 i4k1 i4k2 i2k2 i2k3 i2k4 i1k2 i4k2 i2k3 i4k4 i1k3

i2k1 i1k1 i3k1 i4k1 i4k2 i2k2 i2k3 i2k4 i1k2 i4k2 i2k3 i4k4 i1k3



Şekil 2. P2 için Gantt Şeması

#### 4.2. Gerçek Hayat Problemi

İşletmenin çizelgeleme periyodu günlük olacak şekilde belirlenmiştir. İşletmedeki parçalar, işlem süresi ve parça sayısı açısından dengeli bir şekilde 3 gruba ayrılarak 3 farklı çizelge oluşturulması hedeflenmiştir.

Her grup GAMS/Cplex çözücüsünde 1 saatlik süre limitiyle çalıştırılmıştır. Elde edilen çizelgeler Tablo 9, Tablo 10 ve Tablo 11'de verilmiştir. Tablolardaki ilk sütun, parçaları ve onlara ait operasyonların kodunu, ikinci sütun parçaların ağırlık katsayısını, üçüncü sütun operatör talimatındaki makineleri, dördüncü sütun atandığı makineyi, son sütun ise operasyonların

Parça-Operasyon Kodu	Ağırlık Katsayısı	Operatör Talimatındaki Makine	Seçilen Makine	Makinedeki Sırası
5178	2	-	-	-
5178-10	-	HP-160	HP-160	1
5178-20	-	HP-110	HP-180-3	1
5178-30S	-	HP-110	HP-110-2	2
5179	2	-	-	-
5179-10	-	HP-500	500-2	1
5179-30S	-	HP-160	HP-160	2
1314	2	-	-	-
1314-10	-	HP-110	HP-110-2	1
1314-20	-	HP-110	HP-110-1	1
1314-30S	-	HP-110	HP-180-1	1
7653	2	-	-	-
7653-10	-	500	500-4	1
7653-20S	-	500	500-2	2
40200	3	-	-	-
40200-10	-	500	500-1	1
40200-20	-	500	500-3	1

atandığı makineyi göstermektedir.

Tablo 9

Grup 1 Verileri için Makine Çizelgesi

Grup 1' de her parça 2 veya 3 operasyon olmak üzere toplamda 5 parça 12 operasyondan oluşmaktadır. Bu parçaların üretilmesi için uygun olan alternatif makineler dahil olmak üzere 4 farklı tonajda 10 makine bulunmaktadır. GAMS/Cplex çözücüsünde elde edilen normalleştirilmiş en iyi amaç fonksiyon değerleri, enerji için 0.984 birim, toplam ağırlıklı tamamlanma zamanı için 0.960 birimdir. Harcanan toplam enerji 7995,984 kW, toplam ağırlıklı tamamlanma zamanı 2232 saniyedir.

Tablo 10

Grup 2 Verileri için Makine Çizelgesi

Parça-Operasyon Kodu	Ağırlık Katsayısı	Operatör Talimatındaki Makine	Seçilen Makine	Makinedeki Sırası
0.007	1	-	-	-
0.007-10	-	EP-30	EP-30-1	1
0.007-20	-	EP-80	EP-80-1	1
0.007-30	-	EP-40	EP-40	1
0.007-40	-	EP-100	EP-100-4	1
0.007-50	-	EP-100	EP-100-2	1
0.007-60S	-	EP-30	EP-30-2	1
0.008	1	-	-	-
0.008-10	-	EP-30	EP-30-1	3
0.008-20	-	EP-80	EP-80-1	2
0.008-30	-	EP-40	EP-40	2
0.008-40	-	EP-100	EP-100-5	1
0.008-50	-	EP-100	EP-100-1	1
0.008-60S	-	EP-30	EP-30-1	4
0.011	1	-	-	-
0.011-10	-	EP-30	EP-30-1	2
0.011-20	-	EP-80	EP-80-2	1
0.011-30	-	EP-40	EP-40	3
0.011-40	-	EP-100	EP-100-2	2
0.011-50	-	EP-100	EP-100-3	1
0.011-60S	-	EP-30	EP-30-1	5
1936	2	-	-	-
1936-10	-	500	500-1	1
1936-20	-	500	500-2	1
1936-32	-	500	500-3	2
1936-33	-	500	500-4	1
40100	3	-	-	-
40100-10	-	500	500-3	1
40100-20	-	EP-180	EP-180-1	1
40100-30	-	EP-180	EP-180-1	2
40100-40	-	EP-180	EP-180-1	3
40100-50	-	EP-180	EP-180-2	1
40100-60	-	EP-180	EP-180-2	2
40100-70S	-	EP-180	EP-180-3	1

Grup 2' de her parça 4, 6 veya 7 operasyon olmak üzere toplamda 5 parça 29 operasyondan oluşmaktadır. Bu parçaların üretilmesi için uygun olan alternatif makineler dahil olmak üzere 9 farklı tonajda 22 makine bulunmaktadır. Bu problem verileri ile GAMS/Cplex çözücüsünde normalleştirilmiş en iyi amaç fonksiyon değerleri, enerji için 0.930 birim, toplam ağırlık tamamlanma zamanı için 0.647 birim olarak bulunmuştur. Harcanan toplam enerji 12700,08 kW, toplam ağırlıklı tamamlanma zamanı 6409,182 saniyedir.

Tablo 11

Grup 3 Verileri için Makine Çizelgesi

Parça-Operasyon Kodu	Ağırlık Katsayısı	Operatör Talimatındaki Makine	Seçilen Makine	Makinedeki Sırası
108.00	1	-	-	-
108.00-10	-	EP-40	EP-40	3
108.00-20	-	EP-40	EP-40	4
108.00-25	-	EP-40	EP-40	5
0.012	1	-	-	-
0.012-10	-	EP-30	EP-30-1	1
0.012-20	-	EP-80	EP-80-1	1
0.012-30	-	EP-40	EP-40	2
0.012-40	-	EP-100	EP100-1	1
0.012-50	-	EP-100	EP100-3	1
0.012-60S	-	EP-30	EP30-2	1
5177	2	-	-	-
5177-10	-	HP-160	HP-160	1
5177-20	-	HP-110	HP-110-1	1
5177-30S	-	HP-250	HP-250-1	1
6490	2	-	-	-
6490-10	-	HP-160	180-3	1
6490-20	-	HP-250	HP-250-2	1
6490-30S	-	HP-160	HP-160	2
137	2	-	-	-
137-10S	-	HP-110	HP-110-2	1
1968	2	-	-	-
1968-10	-	500	500-3	1
1968-20	-	500	500-4	1
1968-10S	-	500	500-2	1

Grup 3' de her parça 1,3 veya 6 operasyon olmak üzere toplamda 6 parça 19 operasyondan oluşmaktadır. Bu parçaların üretilmesi için uygun olan alternatif makineler dahil olmak üzere 9 farklı tonajda 22 makine bulunmaktadır. Bu problem verileri ile GAMS/Cplex çözücüsünde normalleştirilmiş en iyi amaç fonksiyon değerleri, enerji için 1.176 birim, toplam ağırlık tamamlanma zamanı için 0.919 birim olarak elde edilmiştir. Harcanan toplam enerji 8011,95 kW, toplam ağırlıklı tamamlanma zamanı 2276,24 saniyedir.

## 5. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada, yeniden dolaşım ve makine uygunluk kısıtlarının olduğu bir esnek atölye problemi ele alınmıştır. Bu sebeple esnek atölye tipi çizelgeleme problemi için çok amaçlı bir matematiksel model oluşturulmuştur. Bu modelin amacı, harcanan toplam enerjiyi ve her işin ağırlıklı tamamlanma zamanını enküçükmektir.

Geliştirilen model, küçük boyutlu rassal test problemleri ile GAMS/Cplex çözücüsü kullanılarak doğrulanmıştır ve bu problemler için kısa sürede optimal çizelgeler elde edilmiştir. Fabrikadan alınan gerçek verilerle günlük çizelgeler hazırlanmış ve 1 saat süre limitiyle uygun çözümler elde edilmiştir.

Gelecek çalışmalarda, daha büyük boyutlardaki problemlerin çözümüne yönelik olarak metasezgisel çözüm yaklaşımlarından yararlanılabilir. Özellikle çok amaçlı problemlerde kullanılan NSGA-II gibi evrimsel algoritmalar geliştirilebilir. Bu çözüm yaklaşımlarının performansları Gams sonuçları ile kıyaslanarak ortaya koyulabilir. Ayrıca, Pareto etkin noktaları bulmaya yönelik farklı skalerleştirme metodları ile karar vericilere çözüm alternatifleri sunulabilir.

## Araştırmacıların Katkısı

Bu çalışmada; Emine AKYOL ÖZER, makale içeriği, bilimsel yazın araştırma, model aşamasında yönlendirme, sonuçların değerlendirilmesi; Sevcan DİNCER, verilerin toplanması, model ve GAMS kodunun oluşturulması, şemaların oluşturulması, makale düzeni; Hüseyin TAMER, model ve GAMS kodunun oluşturulması, bilimsel yazın taraması, test problemlerinin oluşturulması ve incelenmesi, tabloların oluşturulması konularında katkı sağlamışlardır.

## Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

## Kaynaklar

- Aqel, G. A., Li X. ve Gao L. (2019). A modified iterated greedy algorithm for flexible job shop scheduling problem. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 32 (21). doi: <https://doi.org/10.1186/s10033-019-0337-7>
- Deliktaş, D., Torkul O. ve Üstün Ö. (2019). A flexible job shop cell scheduling with sequence-dependent family setup times and intercellular transportation times using conic scalarization method. *International Transactions in Operational Research*, 26 (6), 2410-



2431. Erişim adresi: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1111/itor.12407>
- Demircioğlu, M. (2019). Yapay sinir ağları kullanarak enerji tasarruflu atölye tipi çizelgeleme. *Çukurova Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 28 (3), 143-154. doi: <https://doi.org/10.35379/cusosbil.644997>
- French, S. (1982). *Sequencing and scheduling: an introduction to the mathematics of the job-shop*. New York: Ellis Horwood Series.
- Karabulut, M. A. ve Saraç, T. (2019). Kapasite kısıtlı esnek atölye tipi çizelgeleme problemi için üç aşamalı bir çözüm yaklaşımı ve bir işletmede uygulanması. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 27 (3), 233-241. doi: <http://dx.doi.org/10.31796/ogummf.613268>
- Meng, L., Zhang, C., Shao, X. ve Ren, Y. (2019). MILP models for energy-aware flexible job shop scheduling problem. *Journal of Cleaner Production*, 210, 710-723. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.021>
- Mousakhani, M. (2013). Sequence-dependent setup time flexible job shop scheduling problem to minimise total tardiness. *International Journal of Production Research*, 51(12), 3476-3487. doi: <https://doi.org/10.1080/00207543.2012.746480>
- Salido, M. A., Escamilla, J., Giret A. ve Barber, F. (2016). A genetic algorithm for energy-efficiency in job-shop scheduling. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 85, 1303-1314. Erişim adresi: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s00170-015-7987-0.pdf>
- Saraç, T., Sipahioğlu, A. ve Akyol Özer, E. (2020). A two-stage solution approach for plastic injection machines scheduling problem. *Journal of Industrial and Management*, 13 (5). doi: <http://dx.doi.org/10.3934/jimo.2020022>
- Wang, H., Jiang, Z., Wang, Y., Zhang, H. ve Wang, Y. (2018). A two-stage optimization method for energy-saving flexible job-shop scheduling based on energy dynamic characterization. *Journal of Cleaner Production*, 188, 575-588. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.254>
- Wang, S., Wang, X., Chu, F. ve Yu, J. (2019). An energy-efficient two-stage hybrid flow shop scheduling problem in a glass production. *International Journal of Production Research*, 58 (8), 2283-2314. doi: <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1624857>
- Wu, X. ve Sun, Y. (2018). A green scheduling algorithm for flexible job shop with energy-saving measures. *Journal of Cleaner Production*, 172, 3249-3264. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.342>
- Xing, L. N., Chen, Y. W., Wang, P., Zhao, O. S. ve Xiong, J. (2010). A knowledge-based ant colony optimization for flexible job shop scheduling problems. *Applied Soft Computing*, 10 (3), 888-896. doi: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2009.10.006>
- Zhang, G., Gao, L. ve Shi, Y. (2011). An effective genetic algorithm for the flexible job-shop scheduling problem. *Expert Systems with Applications*, 38 (4), 3563-3573. doi: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2010.08.145>