



## MAKİNELERDE HIZ DEĞİŞİKLİĞİNİN SÜRDÜRÜLEBİLİRLİĞE ETKİSİNİN İNCELENMESİ: BİR MATEMATİKSEL MODEL

Feriştah ÖZÇELİK<sup>1\*</sup>, Tuğba SARAÇ<sup>2</sup>, Mehmet ERTEM<sup>3</sup>

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

ORCID No : <http://orcid.org/0000-0003-0329-203X>

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

ORCID No : <http://orcid.org/0000-0002-8115-3206>

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

ORCID No : <http://orcid.org/0000-0001-5363-3619>

### Anahtar Kelimeler Öz

*Sürdürülebilirlik, Hız değişimi, Paralel makine çizelgeleme problemi, Doğrusal tamsayılı programlama.*

*Sürdürülebilirlik, ekonomik büyüme, sosyal refah ve doğal çevreyi koruma arasında denge kurmayı hedefleyen bir yaklaşımdır. Günümüzde, şirketler, toplumlar ve bireyler faaliyetlerini sürdürülebilir bir şekilde yürütmek için çözümler aramakta ve sürdürülebilirlik stratejilerini benimsemektedir. Enerji tüketimi ve kaynak kullanımı sürdürülebilirlik açısından oldukça önemli faktörlerdendir. Bu nedenle üretim faaliyetleri, geleneksel yönetim anlayışları yerine, sürdürülebilirlik stratejileri ile yönetilmelidir. Üretimde önemli bir yere sahip olan makine çizelgeleme problemini ele alan çalışmalarda genellikle sürdürülebilirlik kavramı göz ardı edilmiştir. Bu çalışmada, makinelerin hız değişiklikleri ve enerji tüketimleri kaynaklı maliyetler de dahil edilerek, işletmelerin sürdürülebilirlik performanslarının iyileştirilmesi hedeflenmiştir. Çalışma kapsamında hız*

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

doi : <https://doi.org/10.46465/endustrimuhendisligi.1328966>

---

*değişikliğinin dikkate alındığı makine çizelgeleme problemi ele alınmış ve problem için bir matematiksel model geliştirilmiştir. Rassal türetilen test problemleri önerilen matematiksel model ile çözülmüştür. Elde edilen sonuçlar, makinelerin hız değişikliklerinin optimize edilmesinin enerji tasarrufu sağladığını, kaynak kullanımını optimize ettiğini ve çevresel etkileri azalttığını göstermektedir. Sonuçlar, bu alanda karar vericilere ve endüstriyel kullanıcılara rehberlik edebilir ve sürdürülebilir üretim sistemlerinin geliştirilmesine katkı sağlayabilir.*

---

## **INVESTIGATION OF THE EFFECT OF SPEED CHANGE IN MACHINES ON SUSTAINABILITY: A MATHEMATICAL MODEL**

### **Keywords**

*Sustainability,  
Speed change,  
Parallel machine  
scheduling problem,  
Linear integer  
programming.*

### **Abstract**

*Sustainability is an approach that aims to strike a balance between economic growth, social welfare, and the preservation of the natural environment. In today's world, businesses, communities, and individuals are actively seeking solutions and adopting sustainability strategies to carry out their activities in a sustainable manner. Energy consumption and resource utilization are crucial factors in terms of sustainability. Therefore, production activities should be managed with sustainability strategies instead of traditional management approaches. The concept of sustainability has generally been ignored in studies dealing with the machine scheduling problem, which has importance in production. This study focuses on the consideration of machine speed changes and associated energy consumption costs to improve the sustainability performance of businesses. The machine scheduling problem, incorporating the consideration of speed changes, is addressed, and a mathematical model is developed for the considered problem. Randomly generated test problems are solved using the proposed mathematical model. The results showed that optimizing machine speed changes leads to energy savings, optimized resource utilization, and reduced environmental impacts. These findings can guide decision-makers and industrial users in this field and contribute to the development of sustainable production systems.*

Araştırma Makalesi	Research Article
Başvuru Tarihi : 19.07.2023	Submission Date : 19.07.2023
Kabul Tarihi : 08.04.2024	Accepted Date : 08.04.2024

## 1. Giriş

Sürdürülebilirlik, günümüzde giderek daha önemli hale gelen bir konudur. Endüstriyel faaliyetlerin çevresel etkileri ve kaynak tüketimi, sürdürülebilirlik açısından büyük bir endişe kaynağıdır. Makine çizelgeleme ise, üretim süreçlerinin verimliliğini artırmak ve kaynakları etkin bir şekilde kullanmak adına önemli bir optimizasyon yöntemidir. Sürdürülebilirlik odaklılık, geleneksel çizelgeleme yaklaşımlarının tekrar ele alınmasını gerektirmektedir (Akbar ve Irohara, 2018). Örneğin, amacın sadece gecikmeden kaynaklı maliyetleri en küçükmek olduğu makine çizelgeleme yaklaşımları, toplam enerji tüketimi ve dolaylı olarak da bu enerji tüketiminin sebep olduğu açığa çıkan karbon emisyonu gibi çevresel etkileri göz ardı etmektedir. Bu durum ise, kısa erimde endüstriyel sektör açısından kârlılık olarak algılsa bile uzun erimde özellikle çevresel etkiler ve kısıtlı enerji kaynaklarının kullanımı açısından sürdürülebilir bir durum değildir.

Makine çizelgeleme yaklaşımında, makinenin hız değişimi de sürdürülebilirlik üzerinde önemli bir etkiye sahiptir ancak yapılan literatür taramasında makine hız değişimlerini dikkate alan makine çizelgeleme yaklaşımları son derece sınırlıdır (Tablo 1). Makinenin hız değişimi, enerji tüketimi, makine ömrü ve çevresel faktörler üzerinde doğrudan bir etkiye sahiptir (Arriaza, Kim, Lee ve Suhaimi, 2017). Makinelerin çalışma hızlarını değiştirmek, enerji tüketimini değiştirmenin en basit yöntemidir (Sharma, Zhao ve Sutherland, 2015). Daha yüksek hızlar genellikle daha fazla enerji tüketimine neden olurken, daha düşük hızlar enerji tasarrufu sağlayabilir (Yoon, Kim, Kim, Lee, Lee ve Ahn, 2015). Hız değişikliği aynı zamanda bir parçanın tamamlanma süresini, dolayısıyla da gecikme süresini etkiler (Sharma vd., 2015). Özellikle talaşlı imalat sektöründe (Sharma vd., 2015) hız değişikliği, ürün kalitesini, enerji tüketimini ve takım ömrünü etkilediğinden sıklıkla ele alınmaktadır.

Enerji verimliliğini artırmak için makinenin optimum hız aralıklarında çalışması önemlidir. Bu şekilde hem üretim süreçlerinin verimliliği artırılabilir hem de enerji tüketimi ve çevresel etkiler azaltılabilir. Makine çizelgelemede makinenin hız değişiminin sürdürülebilirlik üzerindeki etkisi, daha fazla araştırma ve analiz gerektiren bir konudur. Bu alanda yapılan çalışmalar, sürdürülebilirlik odaklı çizelgeleme stratejilerinin geliştirilmesine katkı sağlayabilir.

Bu çalışma kapsamında son on yılda sürdürülebilirlik odaklı makine çizelgeleme çalışmaları detaylı bir şekilde incelenmiştir. Literatür taraması yapılırken, özellikle makine hızını hesaba katan çalışmalara odaklanılmış ve ilgili çalışmalar Tablo 1'de özetlenmiştir. Literatür araştırması yapılırken makine hızlarının iş bazlı ve makine bazlı olmak üzere iki temel yaklaşımla hesaba katıldığı tespit

edilmiştir. Burada iş bazlı yaklaşım, makine hızının işten işe geçişebildiğini, makine bazlı yaklaşım ise atanan işlerden bağımsız olarak makinenin hızının belirlendiğini ifade etmektedir. Ayrıca, incelenen makalelerin amaç fonksiyonları ve çözüm yaklaşımları da Tablo 1’de verilmiştir.

Yapılan literatür araştırması makine hızının iş bazlı ele alındığı çalışmaların daha yaygın olduğunu göstermektedir (Cota, Coelho, Guimarães ve Souza, 2021; Yin, Li, Gao, Lu ve Zhang, 2017; Jiang, Zhang ve Sun, 2019, vb.). Bu yaklaşım endüstriyel sektörde daha sık karşılaşılan bir durum olduğundan bu çalışmada da kullanılmıştır. Bunun yanında, incelenen çalışmalardaki amaç fonksiyonlarına bakıldığında büyük çoğunluğunun sürdürülebilirlik açısından önemli olan toplam enerji tüketimini dikkate aldığı görülmektedir (Zhao, He ve Wang, 2020; Trevino-Martinez, Sawhney ve Shylo, 2022; Mansouri, Aktas ve Besikci, 2016, vb.). Yapılan çalışmada da amaç fonksiyonu toplam enerji tüketimini dikkate almaktadır. Diğer taraftan, yapılan literatür çalışması bütün makine ortamlarının dikkate alındığını göstermektedir. Bu çalışmada ilişkisiz paralel makine ortamı tercih edilmiştir. Son olarak, çözüm yöntemlerine bakıldığında, kesin çözüm yaklaşımı (Fang, Uhan, Zhao ve Sutherland, 2011; Carlucci, Renna ve Materi, 2021; Koulamas ve Kyparisis, 2022), kesin çözüm yaklaşımı ve sezgisel/metasezgisel yaklaşım (Lu, Zhang, Gao, Yi ve Mou, 2021; Yin ve diğ., 2017, vb.), veya yalnızca sezgisel/metasezgisel yaklaşımın (Tirkolae, Goli ve Weber, 2020; Antoniadis ve Huang, 2013; Liu, Nanthapodej ve Hsu, 2018; Ding, Schulz, Shen, Buscher ve Lü, 2021, vb.) tercih edildiği çalışmalar mevcuttur. Bu çalışma kapsamında geliştirilen matematiksel model kesin çözüm yaklaşımı ile çözülmüştür.

Detaylı literatür çalışması kapsamında incelenen çalışmaların hiçbirinde makine hız değişimlerinden kaynaklanan enerji maliyetinin hesaba katılmadığı tespit edilmiştir. Oysa, endüstride çalışan uzmanlarla yapılan görüşmelerde, makine hızının her yeni işe başlarken değiştirilmesinin mümkün olsa bile enerji tüketimini ve makine bakım maliyetlerini artırdığından dolayı çok tercih edilmediği sonucuna varılmıştır. Bu sebeple, iş bazında hız değişimine izin veren bir modelin aynı zamanda hız değişimlerinden kaynaklı maliyetleri de hesaba katmasının daha gerçekçi ve gerekli olduğu görülmektedir. Literatürdeki bu eksikliği gidermek adına bu çalışmada, makine hız değişimlerini hesaba katan sürdürülebilirlik odaklı paralel makine çizelgeleme problemi ele alınmıştır. Makine hızı değişikliklerinin sürdürülebilirlik performansına olan etkisi, sadece enerji verimliliği açısından değil, aynı zamanda işletme maliyetleri ve bu durumun çevresel etkisi açısından ele alınmıştır. Başka bir deyişle, geliştirilen model makine hızı değişikliğinin sadece enerji verimliliği üzerindeki etkisini değil, işletmelerin sürdürülebilirlik stratejileri üzerindeki geniş kapsamlı etkilerini de ortaya koymaktadır.

**Tablo 1**  
**Literatür Tablosu**

<i>Çalışma</i>	<i>MO</i>	<i>İB</i>	<i>MB</i>	<i>Amaç Fonksiyonu</i>	<i>Çözüm Yöntemi</i>
Behnamian ve Ghomi (2011)	AKT	✓		$C_{enb}$ , toplam kaynak maliyeti	Melez metasezgisel
Fang ve diğ. (2011)	AKT	✓		$C_{enb}$ , enbüyük enerji tüketimi, karbon ayak izi	MIP
Antoniadis ve diğ. (2013)	TM	✓		Toplam enerji tüketimi	Sabit faktör yaklaşım algoritması
Mansouri ve diğ. (2016)	AKT	✓		$C_{enb}$ , toplam enerji tüketimi	Çizelge geliştirme sezgiseli (SDH), yerel arama sezgiseli
Yin ve diğ. (2017)	ATT	✓		$C_{enb}$ , toplam enerji tüketimi, gürültü emisyonu	MIP, Çok amaçlı GA
Liu ve diğ. (2018)	PM	✓		Ağırlıklı toplam gecikme, toplam tamamlanma zamanı	Baskın çözüm sayısı tabanlı GA
Jiang ve diğ. (2019)	ATT	✓		toplam enerji tüketimi ve tamamlanma zamanı maliyetleri	MIP, kesikli balina algoritması
Luo, Zhang ve Fan (2019)	EATT	✓		$C_{enb}$ , toplam enerji tüketimi	çok amaçlı gri kurt algoritması
Öztop Tasgetiren, Eliyi, Pan ve Kandiller (2020)	AKT	✓		Toplam akış zamanı, toplam enerji tüketimi	Sezgisel algoritmalar
Tirkolaee ve diğ. (2020)	EAKT	✓		Toplam maliyet	Bulanık çözüm yaklaşımı, yapay balık sürüsü algoritması (SAAFSA)
Zhao ve diğ. (2020)	AKT	✓		$C_{enb}$ , toplam enerji tüketimi	İki aşamalı evrimsel algoritma
Cota ve diğ. (2021)	PM	✓		$C_{enb}$ , toplam enerji tüketimi	MIP, Çok amaçlı matsezgisel algoritma
Ding ve diğ. (2021)	EAT	✓		Toplam gecikme, toplam enerji tüketimi	Melez parçacık sürü optimizasyonu algoritması
Lu ve diğ. (2021)	ATT	✓		$C_{enb}$ , toplam enerji tüketimi	MIP, çok amaçlı memetik algoritma
de Athayde Prata, Fernandez-Viagas, Framinan ve Rodrigues (2022)	AKT	✓		Toplam gecikme	Metasezgisel algoritma
An, Li, Chen, Li, Zhao ve Cao (2023)	TM	✓		Toplam enerji maliyeti	GA
Carlucci ve diğ. (2021)	ATT		✓	$C_{enb}$	MIP
Füchtenhans ve Glock (2023)	ATT		✓	Ağırlıklı toplam gecikme, toplam enerji tüketimi	GA
Koulamas ve Kyparisis (2022)	AKT		✓	Geciken iş sayısı, toplam gecikme ya da enbüyük gecikme	Dinamik programlama
Trevino-Martinez ve diğ. (2022)	TM		✓	Toplam enerji maliyeti, karbon ayakizi salınımı	MIP
Wei, Liao ve Zhang (2022)	ATT		✓	$C_{enb}$ , toplam enerji tüketimi	Evrimsel ve sezgisel alg.
Wang ve Qi (2023)	PM		✓	$C_{enb}$ , toplam enerji tüketimi	Melez metasezgisel
Zhang, Nip ve Wang (2022)	PM		✓	$C_{enb}$	Yaklaşım algoritması, polinom zamanlı algoritma

AKT: Akış Tipi, ATT: Atölye Tipi, EAKT: Esnek Akış Tipi, EATT: Esnek Atölye Tipi, GA: Genetik Algoritma, İB: İş bazlı hız, MB: Makine bazlı hız, MO: Makine ortamı, MIP: Karma Tamsayılı Programlama, PM: Paralel Makine, TM: Tek Makine.

Geliştirilen modelin amacı gecikme, enerji tüketimi ve hız değişimden kaynaklanan toplam maliyeti en küçükmektir. Amacı oluşturan maliyet kalemlerinin birbirini zıt yönde etkilediği göz önüne alındığında gecikme maliyeti ile enerji tüketim maliyeti arasında bir ödünleşme olduğu aşikârdır. Daha sürdürülebilir üretim yöntemlerinin son derece önemli hale geldiği günümüzde, yapılan bu çalışma sürdürülebilirlik açısından önemli olan enerji tüketimi ve makine hız değişiminden kaynaklı maliyetleri aynı anda hesaba katarak ilişkisiz paralel makine çizelgeme problemini eniyilemeyi hedeflemektedir.

Bu çalışmanın izleyen bölümünde problem tanımı ve önerilen matematiksel model, üçüncü bölümde deneysel sonuçlar verilmiştir. Son bölümde ise sonuç ve öneriler sunulmuştur.

## 2. Problem tanımı ve matematiksel model

Ele alınan problemde  $n$  iş  $m$  paralel makineden birisinde işlem görmelidir. Makineler farklı hızlarda ( $s \in \{1, 2, 3\}$ ) çalışabilmektedir. Makinelerin her hız seviyesindeki enerji tüketimi ( $\alpha_s$ ) farklıdır. Hız arttıkça enerji tüketimi de artmaktadır. Makine hızı, bir iş devam ederken değiştirilemez. Bir makinedeki hız değişikliğinin maliyeti ( $\beta$ ) vardır. Bir makine aynı anda sadece bir iş için kullanılabilir. İşler atandıkları makinelerde bölünmeden tamamlanmalıdır. Bir işin işlem süresi ( $p_{jl}$ ) atandığı makineye ve makinenin hızına bağlıdır. İşler teslim zamanından ( $d_j$ ) sonra bitirilirse gecikmiş olur, işin gecikmesinin maliyeti ( $\varphi$ ) vardır. Problemin amacı, enerji tüketimi, gecikme ve hız değişikliği maliyetleri toplamının enküçüklenmesidir. Geliştirilen matematiksel model ve gerekli tanımlamalar aşağıda verilmiştir.

*İndisler:*

$i, j, k \in \{1, 2, \dots, n\}$  iş/sıra indisi

$l \in \{1, 2, \dots, m\}$  makine indisi

$s \in \{1, 2, 3\}$  hız indisi

*Parametreler:*

$p_{jl}$ :  $j$ . işin  $l$ . makinede standart hızda ( $s = 2$ ) işlem süresi

$d_j$ :  $j$ . işin teslim zamanı

$$v_s: s. \text{ hıza ait katsayı } v_s = \begin{cases} 1 - \delta & s = 1 \\ 1 & s = 2 \\ 1 + \delta & s = 3 \end{cases}$$

$\delta$  : makine hız artırım/azaltım oranı

$\varphi$  : birim gecikme maliyeti

$\alpha_s$  : s. hızda çalışırken birim süredeki enerji tüketimi

$\gamma$  : birim enerji tüketim maliyeti

$\beta$  : hız değişikliğinin birim maliyeti

$M1, M2$  : büyük pozitif sayı.  $M1 = \frac{enb_{ll} p_{ll}}{enk v_s}$   $M2 = \frac{\sum_i enb_{ll} p_{ll}}{enk v_s}$

*Karar Değişkenleri:*

$x_{jkl}$ : eğer j. iş k. sırada l. makineye atandıysa 1, diğer durumda 0.

$y_{js}$ : eğer j. iş s hızında işlenecek ise 1, diğer durumda 0.

$b_{ij}$ : aynı makinede ardışık çizelgelenmiş i ve j işlerinin hızları farklı ise 1, diğer durumda 0.

$C_j$ : j işinin tamamlanma zamanı

$T_j$ : j işinin gecikme miktarı

$Q_{jls}$ : j işi l. makinede s hızı ile işlenecekse, gerçekleşecek işlem süresi

*Amaç fonksiyonu:*

$$enkz = \varphi \sum_j T_j + \gamma \sum_j \sum_l \sum_s \alpha_s Q_{jls} + \beta \sum_i \sum_j b_{ij} \quad (1)$$

*Kısıtlar:*

$$\sum_j x_{jkl} \leq 1 \quad \forall k, l \quad (2)$$

$$\sum_k \sum_l x_{jkl} = 1 \quad \forall j \quad (3)$$

$$\sum_s y_{js} = 1 \quad \forall j \quad (4)$$

$$\sum_j x_{jkl} - \sum_i x_{i(k-1)l} \leq 0 \quad \forall k, l \quad k > 1 \quad (5)$$

$$C_j + M1(1 - x_{jkl}) \geq \frac{p_{jl}}{v_s} y_{js} \quad \forall j, k, l, s \quad k = 1 \quad (6)$$

$$C_j + M2(2 - x_{jkl} - x_{i(k-1)l}) \geq C_i + \frac{p_{jl}}{v_s} y_{js} \quad \forall i, j, k, l, s \quad i \neq j, k > 1 \quad (7)$$

$$T_j \geq C_j - d_j \quad \forall j \quad (8)$$

$$Q_{jls} \geq \frac{p_{jl}}{v_s} - M1(2 - x_{jkl} - y_{js}) \quad \forall j, k, l, s \quad (9)$$

$$b_{ij} \geq y_{is} - y_{js} - (2 - x_{jkl} - x_{i(k-1)l}) \quad \forall i, j, k, l, s \quad i \neq j, k > 1 \quad (10)$$

$$b_{ij} \geq y_{js} - y_{is} - (2 - x_{jkl} - x_{i(k-1)l}) \quad \forall i, j, k, l, s \quad i \neq j, k > 1 \quad (11)$$

$$x_{jkl} \in \{0,1\} \quad \forall j, k, l \quad (12)$$

$$y_{js} \in \{0,1\} \quad \forall j, s \quad (13)$$

$$b_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i, j \quad (14)$$

$$C_j \geq 0 \quad \forall j \quad (15)$$

$$T_j \geq 0 \quad \forall j \quad (16)$$

$$Q_{jls} \geq 0 \quad \forall j, l, s \quad (17)$$

Amaç (1) toplam maliyetin enküçülenmesidir. Maliyetin üç bileşeni vardır; işlerin gecikme maliyetleri, makinelerin enerji tüketim maliyetleri ve hız değişim maliyetleri. Denklem (2) ve (3) sırasıyla bir makinenin bir sırasına en fazla bir işin atanabilmesini ve her işin mutlaka bir makinenin bir sırasına atanmasını sağlamaktadır. Denklem (4), her iş için bir hız belirlenmesini garanti etmektedir. Denklem (5) aynı makineye atanan işlerin sıra atlamadan işlenmesini sağlamaktadır. Denklem (6) her makinedeki ilk işin ve denklem (7) ilk sıra haricindeki işlerin tamamlanma zamanını belirlemektedir. Denklem (8), işlerin gecikme sürelerini hesaplatmaktadır. Denklem (9)  $j$  işi  $l$  makinede  $s$  hızı ile işlenecekse, gerçekleşecek işlem süresini hesaplatma kısıtlarıdır. Denklem (10) ve (11), aynı makinede ardışık çizelgelenmiş  $i$  ve  $j$  işlerinin hızlarının farklı olup olmadığını belirlemek içindir. Denklem (12)-(17) karar değişkenlerin işaret kısıtlarıdır.

### 3. Deneysel Sonuçlar

Bu bölümün alt başlıklarında, çalışmada kullanılan test problemlerinin özellikleri, örnek problem ve test sonuçları sunulmuştur. Bu çalışmada Araştırma ve Yayın Etiğine uyulmuştur.



### 3.1 Test Problemlerinin Türetilmesi

İş sayıları ( $n$ ), 5, 10 ve 15 olarak makine sayıları ( $m$ ) ise 2 ve 3 makine olarak belirlenmiştir.  $p_{jl}$  (işlem süresi) denklem (18)'de verildiği gibi kesikli düzgün dağılım (KDD) kullanılarak türetilmiştir.

$$p_{jl} \sim \text{KDD}(1, 100) \quad (18)$$

$d_j$  (teslim zamanı) gevşek ve sıkı olmak üzere iki farklı farklı tipte türetilmiştir. Bu parametrenin hangi tipte olduğuna göre nasıl adlandırıldığı denklem (19)'da verilmiştir.

$$d_j = \begin{cases} d_j^g & \text{gevşek} \\ d_j^s & \text{sıkı} \end{cases} \quad (19)$$

Burada  $d_j^g \sim \text{KDD}\left(\frac{e^{nb} p_{jl}}{1+\delta}, \frac{d^{enb}}{2}\right)$  ve  $d_j^s \sim \text{KDD}\left(\frac{e^{nb} p_{jl}}{1+\delta}, \frac{d^{enb}}{3}\right)$  olarak türetilmektedir.

Teslim zamanı için bir üst sınır değeri olan  $d^{enb}$  ise denklem (20)'de verilen formülle hesaplanmıştır.

$$d^{enb} = \left(\frac{\sum_j \sum_l p_{jl}}{1-\delta}\right) / m \quad (20)$$

Hız arttırım oranı ( $\delta$ ) için ise; 0,1 ve 0,3 olmak üzere iki düzey tanımlanmıştır. Birim gecikme maliyeti ( $\varphi$ ) 1000, s. hızda çalışırken birim süredeki enerji tüketimi ( $\alpha_s$ ),  $\delta=0,1$  için sırasıyla, 55, 60 ve 70,  $\delta=0,3$  için ise sırasıyla, 45, 60 ve 100 olarak belirlenmiştir. Birim enerji tüketim maliyeti ( $\gamma$ ) ve hız değişikliğinin birim maliyeti ( $\beta$ ) ise sırasıyla 5 ve 500 olarak alınmıştır.

Test problemleri; ' $n - m - (k/b) - (g/s) - \text{örnek no}$ ' olarak adlandırılmaktadır. Hız arttırım oranı ( $\delta$ ) 0,1 ise oran küçük ( $k$ ), 0,3 ise büyük ( $b$ ) olarak adlandırılmaktadır. Ayrıca teslim zamanları  $d_j^g$  formülü ile türetiliyse gevşek ( $g$ ) ve  $d_j^s$  formülü ile türetiliyse sıkı ( $s$ ) olarak adlandırılmaktadır. Her tip problemde 3 örnek türetilmiştir. Problem adının sonunda yer alan *örnek no* problemin kaçınıcı örnek olduğunu göstermektedir. Örneğin; 10-2-k-g-2 isimli problem 10 iş 2 makinenin olduğu hız oranı küçük ve teslim zamanları gevşek olan ikinci test problemidir. Toplamda  $4 \times 2 \times 2 \times 2 \times 3 = 96$  test problemi türetilmiştir.

### 3.2 Örnek Problem

Örnek problemin amacı paralel makine çizelgeleme problemlerinde toplam enerji tüketimi ve gecikme maliyetlerinin en küçüklenmesine makine hız değişimlerinin etkisinin gösterilmesidir. Bu kapsamda küçük boyutlu bir test problemi türetilmiş ve geliştirilen model kullanılarak elde edilen sonuçlar ve ilgili parametre değerleri araştırmacıların yararına olarak paylaşılmıştır. Tablo 2'de örnek problem için türetilmiş makine bazlı işlem süreleri ( $p_{jl}$ ) ve teslim

zamanları ( $d_j$ ) verilmiştir. Hız katsayısı ( $v_s$ ) ve hıza bağlı enerji tüketimi ( $\alpha_s$ ) sırasıyla 0,7 için 45; 1 için 60 ve 1,3 için 100 olarak belirlenmiştir. Ayrıca, birim gecikme maliyeti ( $\varphi$ ) 1000, hız değişikliğinin birim maliyeti ( $\beta$ ) 500, ve birim enerji tüketim maliyeti ( $\gamma$ ) 5 olarak seçilmiştir.

Tablo 2

Örnek Problem İçin İşlem Süreleri ( $p_{jl}$ ) ve Teslim Zamanları ( $d_j$ )

$iş$ $j$	$p_{jl}$		$d_j$
	$l=1$	$l=2$	
1	12	65	60
2	89	76	80
3	55	14	40
4	58	32	60
5	29	15	40

İlgili parametre değerleri kullanılarak örnek problem 2,92 saniyede optimum çözüme ( $z=58092,31$ ) ulaşmıştır. Elde edilen sonuçlara göre  $j1$  ve  $j2$  işleri birinci makinede ( $m1$ ) sırasıyla 2 ve 3 hızlarında,  $j3$ ,  $j4$  ve  $j5$  işleri ise ikinci makinede ( $m2$ ) 2 hızında çizelgelenmiştir. Bu çizelgeye göre toplam işlem süresi 141,46, toplam gecikme 1,46 ve toplam hız değişikliği ise yalnızca 1 olarak sonuçlanmıştır. Bu sonuçlar, yüksek hızlarda işlem yapma, gecikme ve hız değiştirme kararları arasında karmaşık bir ödünleşme ilişkisi olduğunu göstermektedir. Sonuçlar kısmında bu ilişkiyi çözümlenmek adına detaylı bir duyarlılık analizi yapılmıştır.

### 3.3 Test Sonuçları

Geliştirilen matematiksel modelin performansını gösterebilmek için rassal olarak türetilen test problemleri önerilen model ile çözülmüş ve elde edilen sonuçlar Tablo 3'te verilmiştir. Tüm testler NEOS Server'da GAMS/CPLEX çözücüsü kullanılarak yapılmıştır. Süre limiti 28000 saniye olarak belirlenmiştir. Tablolar 7 sütundan oluşmaktadır. İlk sütunda problem adı yer almaktadır. İzleyen sütunlarda sırasıyla amaç fonksiyonu değeri ( $z$ ) ve amaç fonksiyonun üç ayrı bileşeni olan işlerin gecikme maliyeti ( $f_1$ ), makinelerin enerji tüketim maliyeti ( $f_2$ ) ve hız değişim maliyeti ( $f_3$ ) verilmiştir. Son iki sütunda ise saniye cinsinden çözüm süresi ( $t$ ) ve elde edilen amaç fonksiyonu değerinin, CPLEX tarafından hesaplanan alt sınırdan yüzde olarak ne kadar farklı olduğunu gösteren fark değerleri ( $fark$ ) sunulmuştur.  $f_1$ ,  $f_2$  ve  $f_3$  fonksiyonları sırasıyla denklem (21), (22) ve (23)'de verilmiştir.

$$f_1 = \varphi \sum_j T_j \quad (21)$$

$$f_2 = \gamma \sum_j \sum_t \sum_s \alpha_s Q_{jts} \quad (22)$$

$$f_3 = \beta \sum_i \sum_j b_{ij} \quad (23)$$

Tablo 3

## 5 Boyutlu Test Problemlerinin Sonuçları

<i>problem</i> ( <i>n-m-k/b-</i> <i>g/s-no</i> )	<i>z</i>	<i>f</i> <sub>1</sub>	<i>f</i> <sub>2</sub>	<i>f</i> <sub>3</sub>	<i>t</i>	<i>fark</i>
5-2-b-g-1	29100,00	0,00	29100,00	0,00	1,39	0,00
5-2-b-g-2	41100,00	0,00	41100,00	0,00	2,14	0,00
5-2-b-g-3	91800,00	0,00	91800,00	0,00	2,76	0,00
5-2-b-s-1	74100,00	0,00	74100,00	0,00	2,64	0,00
5-2-b-s-2	39900,00	0,00	39900,00	0,00	1,17	0,00
5-2-b-s-3	58300,00	4000,00	54300,00	0,00	2,63	0,00
5-2-k-g-1	42900,00	0,00	42900,00	0,00	1,41	0,00
5-2-k-g-2	37200,00	0,00	37200,00	0,00	0,97	0,00
5-2-k-g-3	21600,00	0,00	21600,00	0,00	0,88	0,00
5-2-k-s-1	51654,55	4818,18	46836,37	0,00	2,22	0,00
5-2-k-s-2	65163,64	17909,09	46754,55	500,00	4,93	0,00
5-2-k-s-3	40672,73	90,91	40081,82	500,00	1,53	0,00
5-3-b-g-1	45600,00	0,00	45600,00	0,00	3,38	0,00
5-3-b-g-2	27300,00	0,00	27300,00	0,00	3,02	0,00
5-3-b-g-3	24600,00	0,00	24600,00	0,00	1,77	0,00
5-3-b-s-1	28800,00	0,00	28800,00	0,00	4,42	0,00
5-3-b-s-2	40800,00	0,00	40800,00	0,00	2,28	0,00
5-3-b-s-3	37500,00	0,00	37500,00	0,00	2,73	0,00
5-3-k-g-1	37500,00	0,00	37500,00	0,00	3,87	0,00
5-3-k-g-2	44100,00	0,00	44100,00	0,00	4,19	0,00
5-3-k-g-3	31200,00	0,00	31200,00	0,00	7,82	0,00
5-3-k-s-1	46200,00	0,00	46200,00	0,00	3,79	0,00
5-3-k-s-2	39300,00	0,00	39300,00	0,00	3,29	0,00
5-3-k-s-3	50100,00	0,00	50100,00	0,00	4,95	0,00

*n*: iş sayısı, *m*: makine sayısı, *k*: küçük, *b*: büyük, *g*: gevşek, *s*: sıkı, *no*: örnek no

Tablo 3'ten görülebileceği gibi 5 boyutlu test problemlerinin tamamı için fark değerleri 0 olarak elde edilmiştir. Yani tüm problemlerin 8 saniye içinde eniyi çözümlerine erişilmiştir.

Test sonuçları maliyet bileşenleri bazında incelendiğinde, 24 problemin sadece 4'ünde gecikme kaynaklı maliyet oluştuğu görülmektedir. Toplam maliyetinin en büyük bileşeni enerji tüketimi maliyetidir. Hız değişim maliyeti ise sadece iki problemde ortaya çıkmıştır.

Tablo 4'ten görülebileceği gibi 10 boyutlu 24 test probleminden sadece 4 tanesinin süre limiti içinde eniyi çözümlerine erişilmiştir. 10 boyutlu problemler için elde edilen amaç fonksiyonu değerleri genel olarak değerlendirildiğinde, CPLEX'in hesapladığı alt sınır değerine ortalama uzaklık (*fark*) %47'dir.

Tablo 4

## 10 Boyutlu Test Problemlerinin Sonuçları

<i>problem</i> ( <i>n-m-k/b-g/s-no</i> )	<i>z</i>	<i>f<sub>1</sub></i>	<i>f<sub>2</sub></i>	<i>f<sub>3</sub></i>	<i>t</i>	<i>fark</i>
10-2-b-g-1	176492,31	0,00	175992,31	500,00	28000	0,82
10-2-b-g-2	122700,00	0,00	122700,00	0,00	28000	0,51
10-2-b-g-3	114300,00	0,00	114300,00	0,00	28000	0,28
10-2-b-s-1	63000,00	0,00	63000,00	0,00	28000	0,36
10-2-b-s-2	79500,00	0,00	79500,00	0,00	28000	0,38
10-2-b-s-3	107369,23	0,00	106369,23	1000,00	28000	0,50
10-2-k-g-1	213990,91	35181,82	177809,09	1000,00	28000	0,78
10-2-k-g-2	93000,00	0,00	93000,00	0,00	28000	0,46
10-2-k-g-3	80100,00	0,00	80100,00	0,00	22195	0,00
10-2-k-s-1	115563,64	0,00	115063,64	500,00	28000	0,76
10-2-k-s-2	111118,18	0,00	110618,18	500,00	28000	0,49
10-2-k-s-3	230545,45	78454,55	152090,91	0,00	28000	0,75
10-3-b-g-1	66000,00	0,00	66000,00	0,00	28000	0,38
10-3-b-g-2	70200,00	0,00	70200,00	0,00	28000	0,28
10-3-b-g-3	115800,00	0,00	115800,00	0,00	28000	0,60
10-3-b-s-1	76800,00	0,00	76800,00	0,00	15631	0,00
10-3-b-s-2	57900,00	0,00	57900,00	0,00	8346	0,00
10-3-b-s-3	72300,00	0,00	72300,00	0,00	28000	0,45
10-3-k-g-1	80100,00	0,00	80100,00	0,00	28000	0,35
10-3-k-g-2	78900,00	0,00	78900,00	0,00	10700	0,00
10-3-k-g-3	52500,00	0,00	52500,00	0,00	28000	0,31
10-3-k-s-1	74700,00	0,00	74700,00	0,00	28000	0,61
10-3-k-s-2	47100,00	0,00	47100,00	0,00	28000	0,36
10-3-k-s-3	82500,00	0,00	82500,00	0,00	28000	0,08

*n*: iş sayısı, *m*: makine sayısı, *k*: küçük, *b*: büyük, *g*: gevşek, *s*: sıkı, *no*: örnek no

Test sonuçları maliyet bileşenleri bazında incelendiğinde, 5 boyutlu problemlere benzer şekilde yine en büyük maliyet bileşeninin enerji tüketimi maliyeti olduğu ve gecikme kaynaklı maliyetin ve hız değişim maliyetinin daha nadir ortaya çıktığı görülmüştür.

Tablo 5'ten de görülebileceği gibi, tüm test problemleri için matematiksel model süre limitine kadar çalışmıştır. 15 boyutlu 24 test probleminden 6 tanesinin süre limiti içinde uygun çözümüne erişilememiştir. Uygun çözümleri bulunabilen problemlerin ise fark değerlerinin %73 ile %98 arasında değer aldığı görülmektedir.

Tablo 5

## 15 Boyutlu Test Problemlerinin Sonuçları

<i>problem (n-m-k/b- g/s-no)</i>	<i>z</i>	<i>f<sub>1</sub></i>	<i>f<sub>2</sub></i>	<i>f<sub>3</sub></i>	<i>t</i>	<i>fark</i>
15-2-b-g-1	169200,00	0,00	169200,00	0,00	28000	0,97
15-2-b-g-2	109200,00	0,00	109200,00	0,00	28000	0,75
15-2-b-g-3	116700,00	0,00	116700,00	0,00	28000	0,86
15-2-b-s-1	125700,00	0,00	125700,00	0,00	28000	0,73
15-2-b-s-2	198661,54	6307,69	191353,85	1000,00	28000	0,87
15-2-b-s-3	167507,69	1538,46	165469,23	500,00	28000	0,88
15-2-k-g-1	155700,00	0,00	155700,00	0,00	28000	0,88
15-2-k-g-2	130500,00	0,00	130500,00	0,00	28000	0,89
15-2-k-g-3	-	-	-	-	28000	-
15-2-k-s-1	122945,45	181,82	122263,64	500,00	28000	0,94
15-2-k-s-2	145800,00	0,00	145800,00	0,00	28000	0,98
15-2-k-s-3	140163,64	0,00	139663,64	500,00	28000	0,83
15-3-b-g-1	-	-	-	-	28000	-
15-3-b-g-2	-	-	-	-	28000	-
15-3-b-g-3	-	-	-	-	28000	-
15-3-b-s-1	134561,54	0,00	134561,54	0,00	28000	0,96
15-3-b-s-2	163100,00	2000,00	161100,00	0,00	28000	0,98
15-3-b-s-3	107400,00	0,00	107400,00	0,00	28000	0,97
15-3-k-g-1	108000,00	0,00	108000,00	0,00	28000	0,84
15-3-k-g-2	-	-	-	-	28000	-
15-3-k-g-3	-	-	-	-	28000	-
15-3-k-s-1	116700,00	0,00	116700,00	0,00	28000	0,97
15-3-k-s-2	116444,44	0,00	116444,44	0,00	28000	0,96
15-3-k-s-3	123444,44	0,00	123444,44	0,00	28000	0,98

*n*: iş sayısı, *m*: makine sayısı, *k*: küçük, *b*: büyük, *g*: gevşek, *s*: sıkı, *no*: örnek no

### 3.4 Problem Özelliklerinin Çözüm Zorluğuna Etkisi

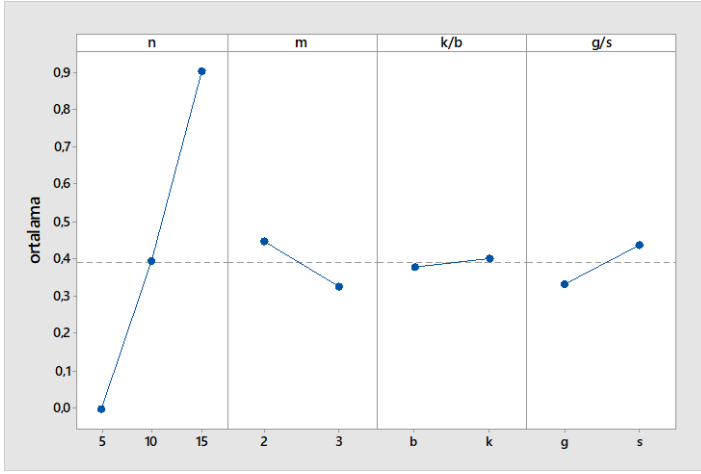
Problem özelliklerinin çözüm zorluğuna etkisini inceleyebilmek amacıyla varyans analizi yapılmıştır. Varyans analizi tablosu Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6

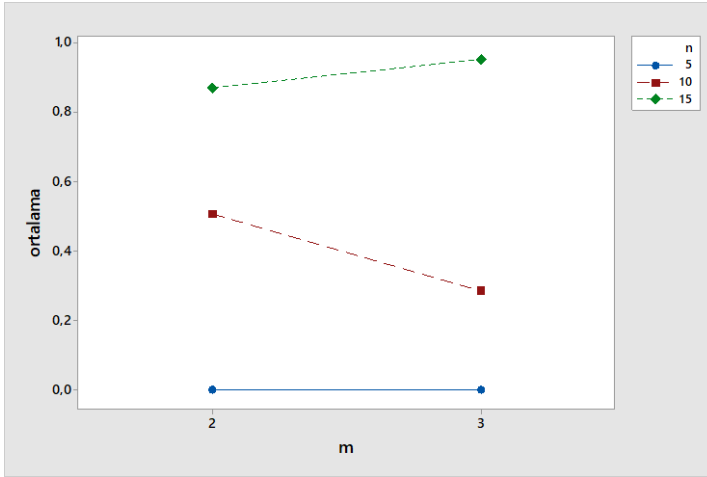
#### Varyans Analizi

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
n	2	7,21702	3,60851	164,06	0,000
m	1	0,02430	0,02430	1,10	0,298
k/b	1	0,00051	0,00051	0,02	0,880
g/s	1	0,00009	0,00009	0,00	0,950
n*m	2	0,26597	0,13298	6,05	0,004
n*k/b	2	0,00627	0,00313	0,14	0,868
n*g/s	2	0,00035	0,00017	0,01	0,992
m*k/b	1	0,01555	0,01555	0,71	0,404
m*g/s	1	0,00744	0,00744	0,34	0,564
k/b*g/s	1	0,11288	0,11288	5,13	0,028
Error	51	1,12178	0,02200		
Lack-of-Fit	8	0,15573	0,01947	0,87	0,552
Pure Error	43	0,96605	0,02247		
Total	65	9,95870			

Tablo 6'dan görülebileceği gibi iş sayısı ( $n$ ) ana faktörü ve iş sayısı-makine sayısı ( $n*m$ ) ve hız artırım oranı-teslim zamanlarının sıklığı ( $k/b*g/s$ ) ikili etkileşimleri ( $p < 0,05$ ) kritiktir. Ana etkiler grafiği ve kritik ikili etkileşimlere ait ikili etkileşim grafikleri sırasıyla Şekil 1-3'te verilmiştir. Bu şekillerde yatay eksenle ilgili faktörlerin düzeyleri, dikey eksenle ise ilgili faktör düzeylerinde amaç fonksiyonu değerlerinin ortalaması verilmektedir. Şekil 1'den görülebileceği gibi kritik tek ana faktör olan iş sayısı arttıkça problemin çözüm zorluğu ciddi bir şekilde artmaktadır.

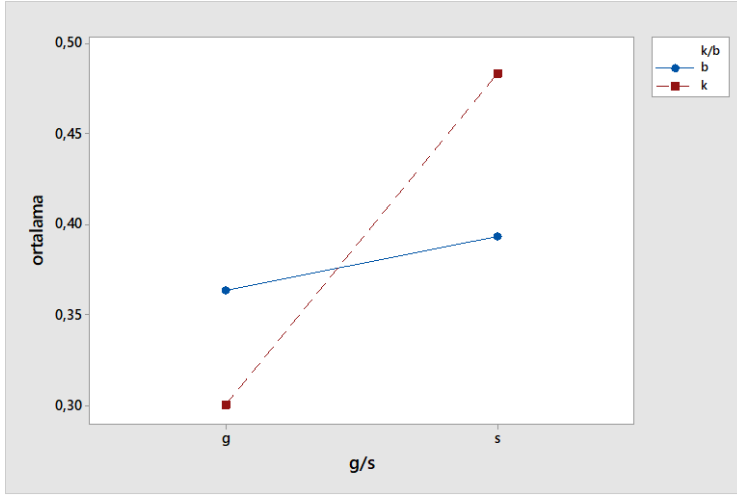


Şekil 1. Ana Etkiler Grafiği ( $n$ : iş sayısı,  $m$ : makine sayısı  $k/b$ : hız arttırım oranı,  $g/s$ : teslim zamanlarının sıklığı)



Şekil 2. İş Sayısı-Makine Sayısı ( $n*m$ ) İkili Etkileşim Grafiği

Şekil 2'den görülebileceği gibi 15 boyutlu problemlerde makine sayısı arttığında 10 boyutlu problemlerde ise az makine olduğunda çözüm gücü artmaktadır.



Şekil 3. Hız Artırım Oranı-Teslim Zamanlarının Sıklığı ( $k/b*g/s$ ) İkili Etkileşim Grafiği

Şekil 3'ten görülebileceği gibi hız artırım oranı ister küçük ister büyük olsun teslim zamanı sıkı problemler daha zordur. Ancak hız değişim oranı küçük olduğunda problem çözme gücü daha fazla artmaktadır.

Sonuç olarak, çözümü en zor problemler büyük boyutlu, hız değişim oranı küçük ve teslim zamanı sıkı olan problemlerdir.

### 3.5 Enerji Tüketim Maliyeti ve Hız Değişim Maliyetini Göz Önünde Bulundurmanın Etkisi

Enerji tüketim ( $f_2$ ) ve hız değişikliği ( $f_3$ ) maliyetlerini göz önünde bulundurmanın etkisini inceleyebilmek için eniyi çözümlerin elde edilebildiği 5 boyutlu problemler sadece gecikme kaynaklı maliyetler ( $f_1$ ) dikkate alınarak da çözülmüştür. Elde edilen sonuçlar Tablo 7'de sunulmuştur. Tablo 7 dört bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde problem isimleri, ikinci bölümde önerilen model ile elde edilen maliyet bileşenleri ( $f_1, f_2, f_3$ ), üçüncü bölümde sadece gecikme maliyetleri dikkate alındığında elde edilen maliyet bileşenleri ( $f'_1, f'_2, f'_3$ ) ve son bölümde ise enerji tüketimini ve hız değişim maliyetini dikkate almanın enerji tüketimi maliyetine etkisi ( $etki-f_2$ ) ve hız değişim maliyetine etkisi ( $etki-f_3$ ) verilmiştir. Hesaplanan etki değerlerinin formülleri sırasıyla (24) ve (25)'de verilmiştir.

$$etki-f_2 = \frac{f'_2 - f_2}{f'_2} \quad (24)$$



$$etki-f_3 = \frac{f_3' - f_3}{f_3'} \quad (25)$$

Tablo 7'den görülebileceği gibi enerji tüketim ve hız değişikliği maliyetleri göz önünde bulundurulduğunda sadece iki test probleminde ilave gecikme oluşurken, hız tüketim maliyetleri ortalama %27, hız değişimi kaynaklı maliyetler ise %87 oranında azalmıştır. Bu nedenle gecikme kaynaklı maliyetlerle birlikte enerji tüketim ve hız değişikliği maliyetlerinin de eşzamanlı değerlendirilmesi işletmelere ciddi katkı sağlayacaktır.

Tablo 7

## Enerji Tüketim ve Hız Değişikliği Maliyetlerini Göz Önünde Bulundurmanın Etkisi

<i>problem (n-m-k/b- g/s-no)</i>	$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_1'$	$f_2'$	$f_3'$	$etki-f_2$	$etki-f_3$
5-2-b-g-1	0,00	29100,00	0	0,00	53846,15	0	0,46	-
5-2-b-g-2	0,00	41100,00	0	0,00	63677,47	1500	0,35	1
5-2-b-g-3	0,00	91800,00	0	0,00	108138,46	1000	0,15	1
5-2-b-s-1	0,00	74100,00	0	0,00	88738,46	1000	0,16	1
5-2-b-s-2	0,00	39900,00	0	0,00	59126,37	500	0,33	1
5-2-b-s-3	4000,00	54300,00	0	0,00	70046,15	1000	0,22	1
5-2-k-g-1	0,00	42900,00	0	0,00	43400,00	0	0,01	-
5-2-k-g-2	0,00	37200,00	0	0,00	45175,76	500	0,18	1
5-2-k-g-3	0,00	21600,00	0	0,00	49600,00	0	0,56	-
5-2-k-s-1	4818,18	46836,37	0	4818,18	47108,59	0	0,01	-
5-2-k-s-2	17909,09	46754,55	500	17909,09	46954,55	500	0,00	0
5-2-k-s-3	90,91	40081,82	500	0,00	41308,08	500	0,03	0
5-3-b-g-1	0,00	45600,00	0	0,00	117446,15	500	0,61	1
5-3-b-g-2	0,00	27300,00	0	0,00	61019,78	1000	0,55	1
5-3-b-g-3	0,00	24600,00	0	0,00	33750,00	0	0,27	-
5-3-b-s-1	0,00	28800,00	0	0,00	51445,05	500	0,44	1
5-3-b-s-2	0,00	40800,00	0	0,00	56145,60	500	0,27	1
5-3-b-s-3	0,00	37500,00	0	0,00	40178,57	0	0,07	-
5-3-k-g-1	0,00	37500,00	0	0,00	51295,45	500	0,27	1
5-3-k-g-2	0,00	44100,00	0	0,00	46138,89	0	0,04	-
5-3-k-g-3	0,00	31200,00	0	0,00	61172,22	1000	0,49	1
5-3-k-s-1	0,00	46200,00	0	0,00	67833,33	0	0,32	-
5-3-k-s-2	0,00	39300,00	0	0,00	68345,96	500	0,42	1
5-3-k-s-3	0,00	50100,00	0	0,00	68794,44	0	0,27	-
							0,27	0,87

*n*: iş sayısı, *m*: makine sayısı, *k*: küçük, *b*: büyük, *g*: gevşek, *s*: sıkı, *no*: örnek no

#### 4. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada makinelerde hız değişikliğinin sürdürülebilirliğe etkisinin incelenmesi amacıyla hız değişiklikleri kaynaklı maliyetlerin de dikkate alındığı

yeni bir matematiksel model önerilmiştir. Önerilen matematiksel modelin performansının gösterilebilmesi için farklı boyut ve özelliklerde rassal türetilen test problemleri kullanılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar, önerilen matematiksel modelle 5 işli problemlerin tamamının eniyi çözümlerine 8 saniyenin altında sürelerde erişilebildiğini ortaya koymuştur. 10 işli problemler için ise süre limiti içerisinde eniyi ya da uygun çözümler elde edilebilmiştir. 15 işli problemlerinin bazılarında süre limiti içinde uygun çözüm bulunabilirken, bazılarında çözüm bulunamamıştır. Yapılan analiz sonucunda büyük boyutlu, hız değişim oranı küçük ve teslim zamanı sıkı olan problemler, çözümü en zor olan problemler olarak belirlenmiştir. Ayrıca, daha sürdürülebilir üretim yöntemlerinin son derece önemli hale geldiği günümüzde, yapılan bu çalışma sürdürülebilirlik açısından önemli olan enerji tüketimi ve makine hız değişiminden kaynaklı maliyetleri, gecikme kaynaklı maliyetlerle aynı anda hesaba katarak, hız tüketim maliyetlerini ortalama %27 ve hız değişimi kaynaklı maliyetleri ise ortalama %87 oranında azaltmıştır.

Bu çalışmada önerilen model büyük boyutlu problemler için makul süreler içerisinde eniyi çözüme ulaşamamaktadır. Gelecekte, daha büyük boyutlu problemlerin çözülebilmesi için geliştirilen matematiksel modelin çözümüne yönelik metasezgisel algoritmalar geliştirilmesi hedeflenmektedir. Ayrıca, hız değişiminin farklı makine çizelgeleme ortamlarında sürdürülebilirliğe olan katkısı gelecek çalışmalar için önemli bir araştırma konusudur. Bunun yanında, önerilen model deterministik model parametrelerindeki olası belirsizlikler göz ardı edilmiştir. Gelecek çalışmalarda işlem veya hazırlık sürelerindeki belirsizlik unsurlarının dahil edildiği stokastik makine çizelgeleme problemleri, makine hızlarının değişken olduğu durumları ele alarak incelenebilir.

### **Araştırmacıların Katkısı**

Bu çalışmada; Feriştah ÖZÇELİK, çalışma fikrinin oluşturulması, literatürün taranması, matematiksel modelin geliştirilmesi, deneysel çalışmaların yapılması ve makalenin yazılması; Tuğba SARAÇ, çalışma fikrinin oluşturulması, literatürün taranması, matematiksel modelin geliştirilmesi, deneysel çalışmaların yapılması ve makalenin yazılması; Mehmet ERTEM, çalışma fikrinin oluşturulması, literatürün taranması, matematiksel modelin geliştirilmesi, deneysel çalışmaların yapılması ve makalenin yazılması konularında katkı sağlamışlardır.

### **Çıkar Çatışması**

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

**Kaynaklar**

- Akbar, M. ve Irohara, T. (2018). Scheduling for sustainable manufacturing: A review. *Journal of Cleaner Production*, 205, 866-883. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.100>
- An, Y., Li, C., Chen, X., Li, Y., Zhao, Z., ve Cao, H. (2023). An optimal energy-efficient scheduling with processing speed selection and due date constraint in a single-machine environment. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Doi: <https://doi.org/10.1177/09544054231180659>
- Antoniadis, A. ve Huang, C. C. (2013). Non-preemptive speed scaling. *Journal of scheduling*, 16(4), 385-394. Doi: <https://doi.org/10.1007/s10951-013-0312-6>
- Arriaza, O., Kim, D., Lee, D., ve Suhaimi, M. (2017). Trade-off analysis between machining time and energy consumption in impeller NC machining. *Robotics and Computer-integrated Manufacturing*, 43, 164-170. <https://doi.org/10.1016/J.RCIM.2015.09.014>
- Behnamian, J. ve Ghomi, S. F. (2011). Hybrid flowshop scheduling with machine and resource-dependent processing times. *Applied Mathematical Modelling*, 35(3), 1107-1123. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2010.07.057>
- Carlucci, D., Renna, P., ve Materi, S. (2021). A Job-Shop Scheduling Decision-Making Model for Sustainable Production Planning With Power Constraint. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 70(5),1923-1932. Doi: <https://doi.org/10.1109/TEM.2021.3103108>
- Cota, L. P., Coelho, V. N., Guimarães, F. G., ve Souza, M. J. (2021). Bi-criteria formulation for green scheduling with unrelated parallel machines with sequence-dependent setup times. *International Transactions in Operational Research*, 28(2), 996-1017. Doi: <https://doi.org/10.1111/itor.12566>
- de Athayde Prata, B., Fernandez-Viagas, V., Framinan, J. M., ve Rodrigues, C. D. (2022). Matheuristics for the flowshop scheduling problem with controllable processing times and limited resource consumption to minimize total tardiness. *Computers & Operations Research*, 145, 105880. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2022.105880>
- Ding, J., Schulz, S., Shen, L., Buscher, U., ve Lü, Z. (2021). Energy aware scheduling in flexible flow shops with hybrid particle swarm optimization. *Computers & Operations Research*, 125, 105088. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2020.105088>
- Fang, K., Uhan, N., Zhao, F., ve Sutherland, J. W. (2011). A new approach to scheduling in manufacturing for power consumption and carbon footprint reduction. *Journal of Manufacturing Systems*, 30(4), 234-240. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2011.08.004>

- Füchtenhans, M. ve Glock, C. H. (2023). The impact of incentive-based programmes on job-shop scheduling with variable machine speeds. *International Journal of Production Research*, 1-19. Doi: <https://doi.org/10.1080/00207543.2023.2266765>
- Jiang, T., Zhang, C., ve Sun, Q. M. (2019). Green job shop scheduling problem with discrete whale optimization algorithm. *IEEE Access*, 7, 43153-43166. Doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2908200>
- Koulamas, C. ve Kyparisis, G. J. (2022). Flow shop scheduling with two distinct job due dates. *Computers & Industrial Engineering*, 163, 107835. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107835>
- Liu, C. H., Nanthapodej, R., ve Hsu, S. Y. (2018). Scheduling two interfering job sets on parallel machines under peak power constraint. *Production Engineering*, 12, 611-619. Doi: <https://doi.org/10.1007/s11740-018-0840-1>
- Lu, C., Zhang, B., Gao, L., Yi, J., ve Mou, J. (2021). A knowledge-based multiobjective memetic algorithm for green job shop scheduling with variable machining speeds. *IEEE Systems Journal*, 16(1), 844-855. Doi: <https://doi.org/10.1109/JSYST.2021.3076481>
- Luo, S., Zhang, L., ve Fan, Y. (2019). Energy-efficient scheduling for multi-objective flexible job shops with variable processing speeds by grey wolf optimization. *Journal of Cleaner Production*, 234, 1365-1384. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.151>
- Mansouri, S. A., Aktas, E., ve Besikci, U. (2016). Green scheduling of a two-machine flowshop: Trade-off between makespan and energy consumption. *European Journal of Operational Research*, 248(3), 772-788. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.08.064>
- Öztop, H., Tasgetiren, M. F., Eliiyi, D. T., Pan, Q. K., ve Kandiller, L. (2020). An energy-efficient permutation flowshop scheduling problem. *Expert systems with applications*, 150, 113279. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.113279>
- Sharma, A., Zhao, F., ve Sutherland, J. W. (2015). Econological scheduling of a manufacturing enterprise operating under a time-of-use electricity tariff. *Journal of Cleaner Production*, 108, 256-270. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.06.002>
- Tirkolae, E. B., Goli, A., ve Weber, G. W. (2020). Fuzzy mathematical programming and self-adaptive artificial fish swarm algorithm for just-in-time energy-aware flow shop scheduling problem with outsourcing option. *IEEE transactions on fuzzy systems*, 28(11), 2772-2783. Doi: <https://doi.org/10.1109/TFUZZ.2020.2998174>

- Trevino-Martinez, S., Sawhney, R., ve Shylo, O. (2022). Energy-carbon footprint optimization in sequence-dependent production scheduling. *Applied Energy*, 315, 118949. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.118949>
- Wang, L. ve Qi, Y. (2023). Scheduling an Energy-Aware Parallel Machine System with Deteriorating and Learning Effects Considering Multiple Optimization Objectives and Stochastic Processing Time. *CMES-Computer Modeling in Engineering & Sciences*, 135(1), 325-339. Doi: <https://doi.org/10.32604/cmes.2022.019730>
- Wei, Z., Liao, W., ve Zhang, L. (2022). Hybrid energy-efficient scheduling measures for flexible job-shop problem with variable machining speeds. *Expert Systems with Applications*, 197, 116785. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.116785>
- Yin, L., Li, X., Gao, L., Lu, C., ve Zhang, Z. (2017). Energy-efficient job shop scheduling problem with variable spindle speed using a novel multi-objective algorithm. *Advances in Mechanical Engineering*, 9(4), 1687814017695959. Doi: <https://doi.org/10.1177/1687814017695959>
- Yoon, H. S., Kim, E. S., Kim, M. S., Lee, J. Y., Lee, G. B., ve Ahn, S. H. (2015). Towards greener machine tools—A review on energy saving strategies and technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 48, 870-891. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.03.100>
- Zhang, S., Nip, K., ve Wang, Z. (2022). Related machine scheduling with machine speeds satisfying linear constraints. *Journal of Combinatorial Optimization*, 44(3), 1724-1740. Doi: <https://doi.org/10.1007/s10878-020-00523-1>
- Zhao, F., He, X., ve Wang, L. (2020). A two-stage cooperative evolutionary algorithm with problem-specific knowledge for energy-efficient scheduling of no-wait flow-shop problem. *IEEE transactions on cybernetics*, 51(11), 5291-5303. Doi: <https://doi.org/10.1109/TCYB.2020.3025662>