

YAPAY SİNİR AĞLARI KULLANARAK ENERJİ TASARRUFLU ATÖLYE TİPİ ÇİZELGELEME

Mert DEMİRCİOĞLU¹

ÖZ

Enerji maliyetlerindeki artış ve iklimsel değişiklikler dolayısıyla, günümüzdeki üretim işletmeleri geleneksel üretim süreçleri yerine sürdürülebilir üretim süreçlerine geçmek zorunda kalmaktadırlar. Geleneksel çizelgeleme problemi sadece işlem sürelerini dikkate alır ve enerji tasarrufu veya çevresel etkileri dikkate almamaktadır. Bu çalışmada ise atölye tipi üretim için çizelgeleme yapılırken harcanan en yüksek elektrik miktarı hesaplanarak, sadece toplam işlerin bitiş süresinin minimizasyonu değil aynı zamanda elektrik tasarrufu yapan bir çizelgeleme yapılmıştır. Her bir zaman dilimi için harcanan elektrikler bulunmuş ve tüm işlemlerin bitiş zamanına kadar olan tüm zamanlar için en büyük elektrik harcaması hesaplanmıştır. Bu değerin azaltılmaya çalışılması ile elektrik tasarrufu sağlanmaya çalışılmıştır. Tamsayı matematiksel model oluşturularak yapay sinir ağları ile çözümler elde edilmiştir. Uygulamada tüm işlemlerin bitiş süresinden biraz feragat edilerek önemli ölçüde enerji tasarrufu yapıldığı görülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Atölye Tipi Çizelgeleme, Enerji Tasarrufu, Yapay Sinir Ağları

A JOB SHOP SCHEDULING WITH ENERGY SAVINGS USING NEURAL NETWORKS

ABSTRACT

Due to the increase in energy costs and climatic changes, today's manufacturing companies are forced to switch to sustainable production processes instead of traditional production processes. The traditional scheduling problem only takes into account processing times and does not take into account energy saving or environmental impacts. In this study during the scheduling of job shop production, the maximum amount of electricity consumed was also calculated and not only the completion time of the total jobs (makespan) minimized but also an energy saving schedule. The electricity consumed for each time period was found and the maximum electricity consumption was calculated for all times up to the end time of all jobs. By trying to reduce this value, savings for electricity was tried to be made. Integer mathematical model has been created and solutions have been obtained with neural networks. In the application, it is seen that all processes have been sacrificed a little bit from the makespan and thus significant energy savings have been achieved.

Keywords: Job Shop Scheduling, Energy Savings, Neural Networks

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Çukurova Üniversitesi, İİBF, İşletme Bölümü, mdemircioglu@cu.edu.tr, ORCID: 0000-0002-2287-2067.

Received/Geliş: 10/11/2019 Accepted/Kabul: 04/12/2019, Research Article/Araştırma Makalesi
Cite as/Alıntı: Demircioğlu, M. (2019), "Yapay Sinir Ağları Kullanarak Enerji Tasarruflu Atölye Tipi Çizelgeleme", Çukurova Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, cilt 28, sayı 3, s.143-154.

Giriş

Dünya'daki enerji tüketiminin yaklaşık yarısı sanayi sektörü tarafından kullanılmaktadır. Son 60 yılda sanayi sektörünün enerji ihtiyacı ikiye katlanmıştır. Enerji kullanımının büyük bir kısmı da (kömür, petrol ve doğalgaz) fosil yakıtlardan karşılanmaktadır. İklimsel değişikliklere olan artan endişe dolayısıyla üretim işletmeleri karbon ayak izlerini düşürmek için artan bir baskı ile karşı karşıya kalmışlardır. Bu baskı, enerji maliyetlerinin artması ve karbon emisyonu ile ilişkili yasalar ve vergiler ile birlikte gelecekte giderek daha fazla artacaktır. Bu ekonomik ve çevresel faktörler işletmeleri enerji tüketimlerini minimize etmek için motivasyon sağlamaktadır (Fang, Uhan, Zhao & Sutherland, 2011:234).

Son yıllarda elektrik fiyatlarının artması ile birlikte, elektrik maliyetlerinin azaltılması üretim işletme yöneticileri için önem kazanmıştır. Bununla birlikte literatürde de elektrik maliyetlerinin düşürülmesi ile ilgili çalışmalar yapılmaya başlanmıştır. (Zhang, Zhao, Fang & Sutherland, 2014:37).

Üretim işletmelerindeki, enerji tüketimi ile ilgili çalışmalar makine seviyesinde, ürün seviyesi ve üretim sistemi seviyesinde olmak üzere üçe ayrılmaktadır. Önceki çalışmalar genellikle makinelerin daha düşük enerji ile çalışması merkezinde yapılmıştır. Ama sadece makinelerin enerji verimli olarak çalışması yeterli gelmemektedir. Ürün seviyesindeki çalışmalar ise ürün tasarımı ve operasyonel kararlar alınarak yapılabilmektedir. Ürün seviyesindeki değişiklikler üretim işletmelerinde kolayca uygulanabilecek değişimler değildir ve küçük ve orta düzeyde firmalar için yüksek bir yatırım maliyeti oluşturmaktadır. Üretim sistemi seviyesindeki değişimler ise enerji tasarrufu sağlayan üretim uygulamaları ile kolayca uygulanabilmektedir (Dai, Tang, Giret, Salido & Li 2013:418). Bu çalışmanın da konusu olan atölye tipi üretim yapan işletmelerde, tüm sistemin enerji tüketimini de dikkate alarak yapılacak enerji odaklı atölye tipi çözümlenmesi yapılması hedeflenmektedir. Ayrıca üretim sistemi seviyesindeki bir perspektif ile, enerji odaklı yapılan bir çözümlenme ile bir makine veya ürün seviyesinde herhangi bir tasarım değişikliği yapılmadan enerji tasarrufu yapmak mümkündür. Böylece makine veya sistemdeki bir donanım değişikliğine göre, optimize edilmiş bir atölye tipi üretim çözümlenmesi çok daha düşük maliyet ile yapılabilmektedir (Tang, Dai, Salido & Giret, 2016:82).

Üretim işletmelerinde elektrik maliyetleri çoğunlukla ihtiyaç duyulan maksimum elektrik miktarı ile ilişkilendirilmektedir. Kullanılan maksimum elektrik miktarı işletmelerin enerji maliyetlerinde anahtar rol oynamaktadır (Fang, Uhan, Zhao & Sutherland, 2011:234). Karşılaşılabilecek olan maksimum elektrik miktarını düşürecek üretim çözümlenmesi yapılması elektrik tüketiminin azalmasını sağlayacaktır.

Bu çalışmada atölye tipi çözümlenme problemine enerji tasarrufu sağlayacak kısıtlar eklenerek, tüm işlerin tamamlanma zamanından biraz feragat ederek enerji tasarrufu sağlanması amaçlanmıştır. Bu şekilde işletmeler daha düşük enerji kullanarak hem maliyet tasarrufu elde etmiş olacaklar, hem de daha çevreci bir işletme olacaklardır.

Kavramsal Çerçeve

Literatürde farklı çizelgeleme problem tipleri ile ilgili çok sayıda yayın bulunmasına karşın, elektrik tasarrufunu hesaba katan yayın sayısı az olmakla beraber son yıllarda artan önemi dolayısıyla artmaktadır. Çizelgeleme problemleri ile ilgili bilimsel araştırma ve yayınlar 1950'li yıllardan itibaren olmasına karşın, enerji tasarrufu ile ilgili alandaki ilk çalışma Mouzon, Yıldırım & Twomey (2007), yapılan tek bir CNC makinesi ile ilgili olan toplam süre ve enerji minimizasyonu üzerine olan makaledir. Bununla birlikte 2008 yılında Mouzon ve Yıldırım bir makine için toplam üretim süresi ve toplam enerjiyi minimize edecek bir meta sezgisel bir algoritma geliştirmiştir (Fang, Nelson, Zhao & Sutherland, 2013:116). Fang, Uhan, Zhao & Sutherland (2011), çizelgeleme problemine enerji ve güç kriterleri eklemiştir.

Dai, Tang, Giret, Salido & Li (2013), esnek akış tipi çizelgeleme problemleri için aç-kapa stratejisi geliştirerek toplam üretim zamanı ve enerji tüketimi için tatminkâr sonuçlar elde etmişlerdir. Shrouf, Ordieres-Mere, Garcia-Sanchez, & Ortega-Mier (2014), aynı yöntemi kullanarak tek bir makine için toplam enerji harcamasını minimize etmişlerdir. Bazı üretim sistemlerinde makinelerin boş zamanlarında tamamen kapatılması, tekrar açıldığında belirli bir süreye ve ek enerjiye ihtiyaç duyması ve sıklıkla yapılan aç-kapa işleri dolayısıyla makinelerin hasar görmesinden ötürü mümkün olamamaktadır. Bu tür durumlarda aç-kapa stratejisi işe yararamaktadır. Fang, Uhan, Zhao & Sutherland (2013), alternatif aç-kapa kontrol stratejisi geliştirerek, makinelerin farklı hızlarda çalışmasına dayanan bir yöntem geliştirmişlerdir. Bu yeni strateji ile makineler farklı işleri yaparken farklı hızlarda çalışmaktadır. Makinelerin yüksek hızla çalıştığı zaman işler daha çabuk bitmekte fakat enerji tüketimi artmaktadır. Fang, Uhan, Zhao & Sutherland (2013), akış tipi üretim çizelgeleme problemi için geliştirdikleri modele en yüksek enerji tüketimi için bir kısıt eklemiştir (Zhang & Chiong, 2016:3362).

Enerji maliyetleri açısından bakıldığında, elektrik fiyatlarının zamana bağlı değişimleri incelenmiş ve üretim çizelgeleme problemlerinde zamana bağlı elektrik fiyatlarına göre çalışmalar yapılmıştır. Elektrik tarifelerine göre yüksek fiyata denk gelen zaman dilimlerinde üretimin azaltılması ve düşük fiyata denk gelen zaman dilimlerinde ise üretimin yükseltilerek elektrik maliyetlerinde tasarruf amaçlanmıştır. Moon, Shin & Park (2013), paralel makine ile yapılan üretim sistemleri için zamana bağlı elektrik maliyetini dikkate alan ve toplam işlerin tamamlanma zamanını minimize edecek genetik algoritma yöntemi ile çözüm üretmişlerdir. Luo, Du, Huang, Chen & Li (2013), üretim ve enerji tarifelerine bağlı hibrit akış tipi çizelgeleme problemi için karınca algoritması geliştirmişlerdir. Zhang, Zhao, Fang & Sutherland (2014), zaman endeksli tamsayı programlama formülasyonu ile üretim miktarından taviz vererek farklı elektrik tarifelerini dikkate alarak elektrik maliyetlerini azaltan üretim çizelgelemesi yapmışlardır.

Atölye tipi çizelgeleme problemlerinde enerji tasarrufu ile ilgili çalışmalar daha azdır. Atölye tipi çizelgeleme problemleri için genellikle genetik algoritma yöntemi kullanılmıştır. Liu, Dong, Lohse, Petrovic & Gindy (2014), atölye tipi çizelgeleme problemleri için çoklu hedef içeren genetik algoritma ile 10 makine ve 10 işten oluşan bir problemi çözmüşlerdir.

May, Stahl, Taisch & Prabhu (2015), sürdürülebilirlikle ilgili çoklu hedef içeren bir genetik algoritma ile atölye tipi çizelgeleme problemleri için bir uygulama geliştirmişler ve enerji tüketiminde kayda değer azalışlar sağlamışlardır. Zhang & Chiong (2016), atölye tipi çizelgeleme problemi için makine hızlarını değiştirerek ve enerji tüketimini azaltan genetik algoritma yöntemi ile bir model geliştirmişlerdir.

Matematiksel Model

Atölye tipi çizelgeleme problemlerinde n sayıda iş ($J = \{1, 2, \dots, n\}$) ve m sayıda makine ($M = \{1, 2, \dots, m\}$) olmak üzere $(n!)^m$ sayıda mümkün çözüm vardır. Bu yüzden atölye tipi çizelgeleme problemleri $n \geq 3$ ve $m \geq 2$ olduğu durumlarda çözülmesi çok zor olan np-hard sınıfına girmektedir.

Atölye tipi çizelgeleme probleminin zaman indeksli tamsayı matematiksel modeli aşağıdaki gibidir (Ku & Beck, 2016:167):

İndis

$$J = \{1, 2, \dots, n\}$$

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

$$H = \{1, 2, \dots, t\}$$

Parametreler

$$p_{ij}: j. \text{ işin } i. \text{ makinedeki süresi} \quad \forall j \in J, i \in M$$

$$\sigma_h^j: j. \text{ işin } h. \text{ faaliyetinin sırası} \quad \forall j \in J, h \in M$$

Karar Değişkenleri

$$x_{ijt} = \begin{cases} 1 & \text{Eğer } j. \text{ iş } t. \text{ zamanda } i. \text{ makinede başlar ise} \\ 0 & \text{Aksi halde} \end{cases}$$

$$C_{maks}: \text{Tüm işlerin bitiş zamanı}$$

Amaç Fonksiyonu

$$\min Z = C_{maks} \quad (1)$$

Kısıtlar

$$\sum_{t \in H} x_{ijt} = 1, \quad \forall j \in J, i \in M \quad (2)$$

$$\sum_{t \in H} (t + p_{ij}) \cdot x_{ijt} \leq C_{maks}, \quad \forall j \in J, i \in M \quad (3)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{t' \in T_{ijt}} x_{ijt'} \leq 1, \quad \forall i \in M, t \in H, T_{ijt} = \{t - p_{ij} + 1, \dots, t\} \quad (4)$$

$$\sum_{t \in H} (t + p_{\sigma_{h-1}^j}) \cdot x_{\sigma_{h-1}^j, jt} \leq \sum_{t \in H} t \cdot x_{\sigma_h^j, jt}, \quad \forall j \in J, h = 2, \dots, m \quad (5)$$

$$X_{ijk} \in \{0,1\}, \quad \forall j \in J, i \in M, t \in H \quad (6)$$

$$C_{maks} \geq 0, \quad (7)$$

Amaç fonksiyonunda minimize edilmek istenen tüm işlerin bitiş zamanı (C_{maks}) (1) denklemde gösterilmektedir. Denklem (2), her bir işin bir tek makinede yapılmasını sağlayan kısıttır. Denklem (3), C_{maks} değerinin yapılacak olan tüm işlerin son faaliyetlerinin en büyüğünün seçilmesini sağlayan kısıttır. Denklem (4), herhangi bir zaman diliminde herhangi bir makinenin kapasitesinden fazla iş almasını engellemektedir. Denklem (5) ise işlerdeki her bir operasyonun belirlenen sırayla yapılmasını sağlamaktadır.

Atölye tipi çizelge problemine bazı eklemeler yapılarak makinelerin birim zamanda harcadıkları elektrik değerleri de hesaplanabilir (8). Bu sayede makinelerin başlangıçtan, tüm işlerin bitişine kadar olan zaman dilimine kadar harcayabilecekleri maksimum değer (el_{maks}) hesaplanabilir (9). el_{maks} değerini de belirli sınırlar içerisinde değiştirerek tüm işlerin bitiş zamanı (C_{maks}) değerini biraz arttırarak kayda değer elektrik tasarrufu yapılabilir.

Parametreler

e_{ij} : j . işin i . makinedeki birim zamanda harcadığı elektrik miktarı $\forall j \in J, i \in M$

el_{maks} : birim zamanda harcanabilecek maksimum elektrik miktarı

Kısıtlar

$$\sum_{j \in J} \sum_{i \in M} x_{ijt} \cdot e_{ij} \leq el^t \quad (8)$$

$$el_{maks} \geq el^t \quad (9)$$

Uygulama

Bu çalışmada, atölye tipi çizelgeme problemleri için bir örnek uygulama yapılmış, makinelerin kullandıkları elektrik miktarları da modele eklenerek elektrik tasarrufu sağlayan bir çizelgeleme yapılması hedeflenmiştir. Uygulama 5 makine ve 10 iş olan bir atölye tipi üretim probleminin çizelgelemesidir. Tüm işler bütün makinelerden geçeceği için toplam 50 adet faaliyet bulunmaktadır. İşlerdeki her bir faaliyetin süreleri 2 ile 7 saat arasında değişen sürekli tekdüze dağılımdan $U[2,7]$ üretilmiştir. Makinelerin faaliyetler için kullandıkları elektrik miktarları ise 50kw ile 200kw arasına değişen sürekli tekdüze dağılımından $U[50,200]$ üretilmiştir.

Uygulamada on beş farklı durum incelenmiştir. Bu on beş farklı durum için beş farklı koşul ve her bir koşul için üç farklı iterasyon sayısı (100, 500, 5000) kullanılmıştır. Bu on beş farklı durumun sonuçları Tablo 1'de gösterilmektedir. Çözüm yöntemi olarak yukarıda matematiksel modeli verilen tamsayı programlama modelinden yararlanılarak, yapay sinir ağları yöntemi kullanılmıştır. Yapay sinir ağları yönteminde ağırlıkların düzeltilmesi yapılmamış, öğrenme değeri 0,05 seçilerek, iterasyon sayısı koşullara bağlı olarak

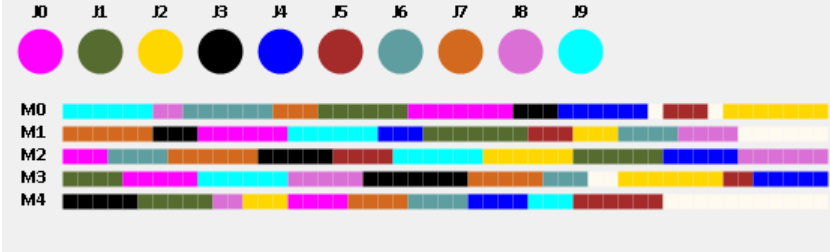
değiştirilmiştir. Yapay sinir ağları ile çözüm için 3.7Ghz Intel Core i7-8700k işlemci, 32Gb rama sahip olan bilgisayar kullanılmıştır.

Birinci koşulda, tüm zamanlar içerisindeki elektrik kullanımı (el_{maks}) için herhangi bir kısıtlama yoktur. İkinci koşulda el_{maks} için 200, üçüncü koşulda 175, dördüncü koşulda 150 ve beşinci koşulda ise 125 değeri kısıt olarak modele eklenmiştir.

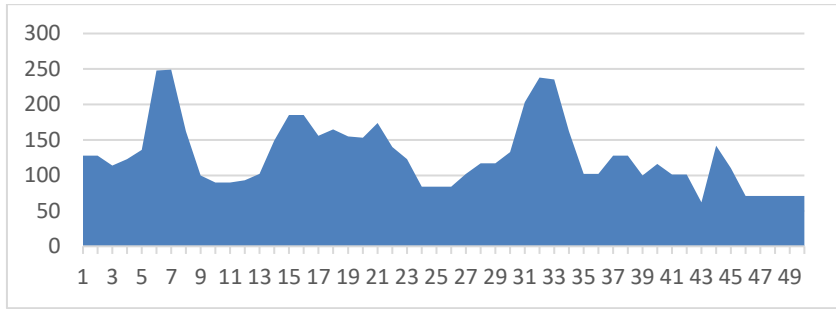
Tablo 1. Tüm Durumlar ve Sonuçları

Durumlar	Koşullar	İterasyon Sayısı	Bitiş Zamanı (C_{maks})	Maksimum Elektrik Mik.	CPU Zamanı
D1	yok	100	54	322	10sn
D2	yok	500	51	258	52sn
D3	yok	5000	51	249	506sn
D4	<200	100	53	199	13sn
D5	<200	500	51	200	71sn
D6	<200	5000	51	200	660sn
D7	<175	100	59	173	13sn
D8	<175	500	56	171	69sn
D9	<175	5000	54	175	676sn
D10	<150	100	64	150	17sn
D11	<150	500	63	150	79sn
D12	<150	5000	61	147	782sn
D13	<125	100	77	125	20sn
D14	<125	500	75	125	95sn
D15	<125	5000	73	124	1065sn

Örnek uygulamada ilk koşulda yer alan üç durumda (D1, D2, D3) makinelerin tüm zaman içerisindeki maksimum elektrik kullanımı (el_{maks}) ile ilgili çok yüksek bir değer girilmiş ve böylece harcanan elektrik miktarı dikkate alınmadan sadece toplam üretim süresi (C_{maks}) minimize edilmiştir. D1 durumu 100 iterasyon ile yapılmış C_{maks} değeri 54 saat olarak bulunmuştur. D2 durumun da ise 500 iterasyon yapılarak C_{maks} değeri 51 ve D3'te ise 5000 iterasyon yapılarak C_{maks} değeri yine 51 saat olarak bulunmuştur. Kullanılan elektrik miktarları ise üç durum için sırasıyla 322, 258 ve 249 saat olmuştur. Bu üç durumdan en iyisi olan üçüncü durumun (D3) çizelgelemesi Şekil 1'de gösterilmektedir. Aynı zamanda üçüncü durumdaki tüm makinelerin zamana bağlı toplam elektrik harcamaları da Şekil 2'de gösterilmektedir.

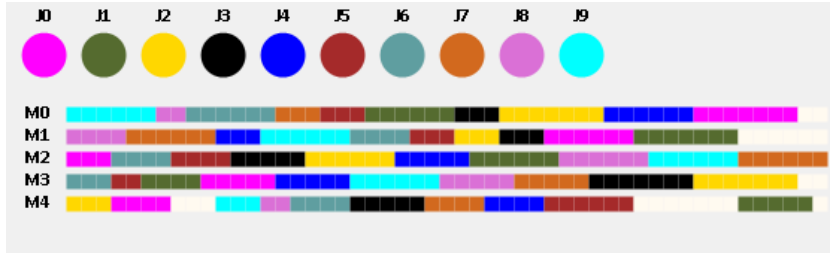


Şekil 1. D3 Harcanan elektrik miktarı dikkate alınmadan yapılan çizelgeleme

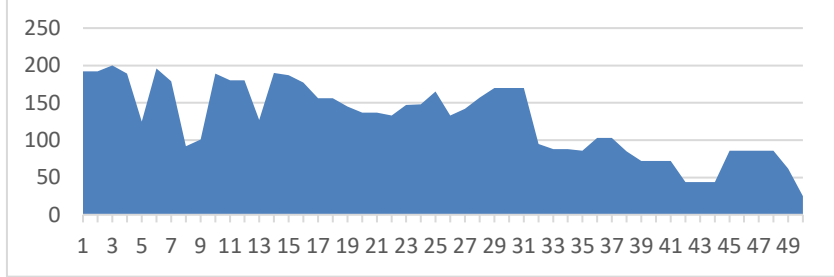


Şekil 2. D3 Tüm makinelerin zamana bağlı toplam elektrik harcaması

İkinci koşulda yer alan üç durumda (D4, D5, D6) makinelerin tüm zaman içerisindeki maksimum elektrik kullanımı (el_{maks}) için kısıt olarak 200kw/s girilmiş ve toplam üretim süresi (C_{maks}) minimize edilmiştir. Bu üç durumda en iyi sonuçlar D6'da 5000 iterasyonda elde edilmiştir. D6'da C_{maks} değeri 51 saat ve maksimum kullanılan elektrik miktarı 200kw/s olmuştur. Maksimum elektrik kullanımı için 200kw/s kısıtı girilmesine rağmen yine bütün işler 51 saatte bitirilmiş ve 49kw/s'lik bir elektrik tasarrufu sağlanmıştır. Altıncı durumun (D6) çizelgelemesi Şekil 3'de gösterilmektedir. Aynı zamanda altıncı durumdaki tüm makinelerin zamana bağlı toplam elektrik harcamaları da Şekil 4'de gösterilmektedir.

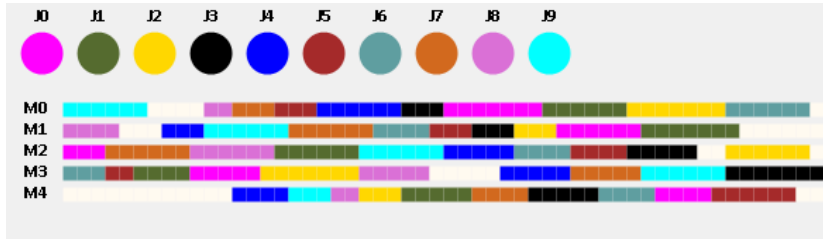


Şekil 3. D6 Maksimum elektrik kullanımı 200kw/s'a göre yapılan çizelgeleme

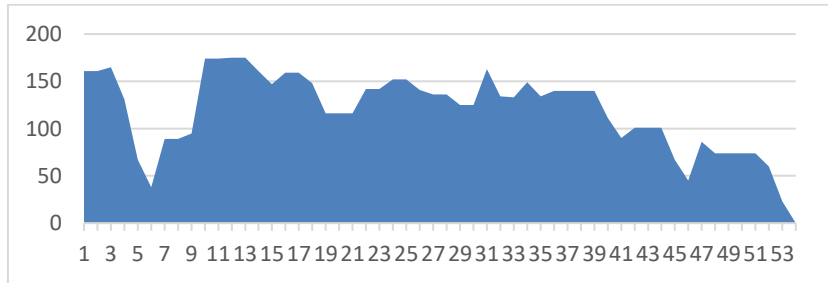


Şekil 4. D6 Tüm makinelerin zamana bağlı toplam elektrik harcaması

Üçüncü koşulda yer alan üç durumda (D7, D8, D9) makinelerin tüm zaman içerisindeki maksimum elektrik kullanımı (el_{maks}) için kısıt olarak 175kw/s girilmiş ve toplam üretim süresi (C_{maks}) minimize edilmiştir. Bu üç durumda en iyi sonuçlar D9'da 5000 iterasyonda elde edilmiştir. D9'da C_{maks} değeri 54 saat ve maksimum kullanılan elektrik miktarı 175kw/s saat olmuştur. Maksimum elektrik kullanımı için 175kw/s kısıtı girildiğine D6'ya göre 3 saatlik bir süre artışına karşın toplam 25kw/s daha elektrik tasarrufu yapmak mümkündür. Dokuzuncu durumun (D9) çizelgesi Şekil 5'de gösterilmektedir. Aynı zamanda dokuzuncu durumdaki tüm makinelerin zamana bağlı toplam elektrik harcamaları da Şekil 6'da gösterilmektedir.

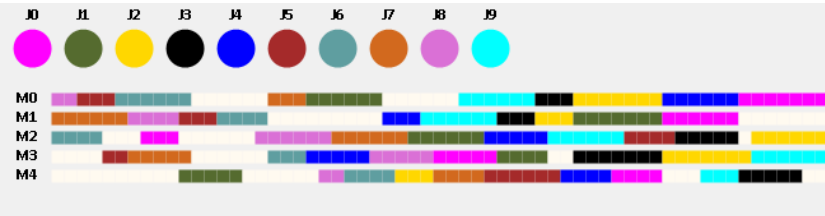


Şekil 5. D9 Maksimum elektrik kullanımı 175kw/s'a göre yapılan çizelgeleme

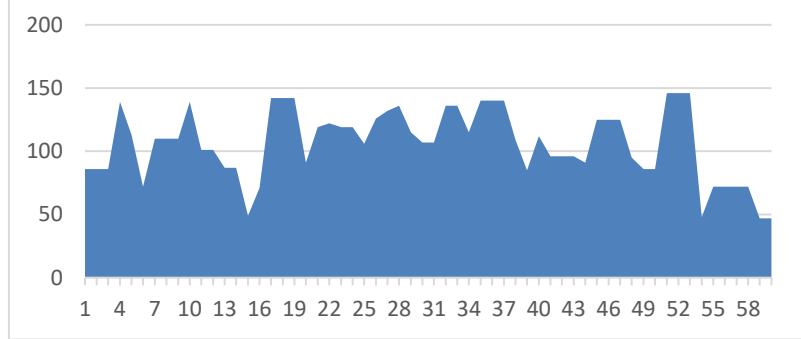


Şekil 6. D9 Tüm makinelerin zamana bağlı toplam elektrik harcaması

Dördüncü koşulda yer alan üç durumda (D10, D11, D12) makinelerin tüm zaman içerisindeki maksimum elektrik kullanımı (el_{maks}) için kısıt olarak 150kw/s girilmiş ve toplam üretim süresi (C_{maks}) minimize edilmiştir. Bu üç durumda en iyi sonuçlar D12’de 5000 iterasyonda elde edilmiştir. D12’de C_{maks} değeri 61 saat ve maksimum kullanılan elektrik miktarı 147kw/s saat olmuştur. Maksimum elektrik kullanımı için 150kw/s kısıtı girildiğine D6’ya göre 10 saatlik bir süre artışına karşın toplam 53kw/s daha elektrik tasarrufu yapmak mümkündür. On ikinci durumun (D12) çizelgesi Şekil 7’de gösterilmektedir. Aynı zamanda on ikinci durumdaki tüm makinelerin zamana bağlı toplam elektrik harcamaları da Şekil 8’de gösterilmektedir.

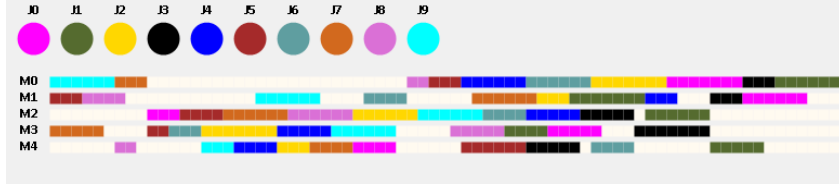


Şekil 7. D12 Maksimum elektrik kullanımı 150kw/s'a göre yapılan çizelgeleme

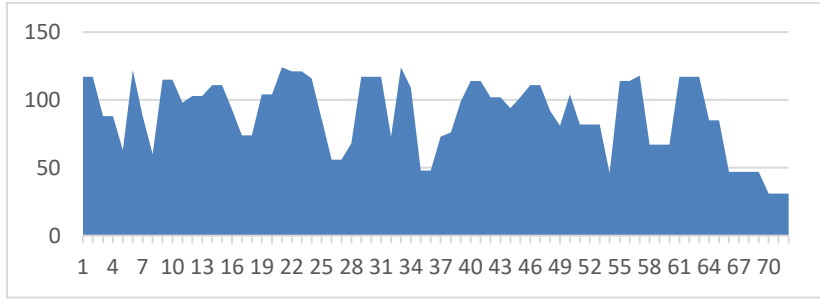


Şekil 8. D12 Tüm makinelerin zamana bağlı toplam elektrik harcaması

Beşinci koşulda yer alan üç durumda (D13, D14, D15) makinelerin tüm zaman içerisindeki maksimum elektrik kullanımı (el_{maks}) için kısıt olarak 125kw/s girilmiş ve toplam üretim süresi (C_{maks}) minimize edilmiştir. Bu üç durumda en iyi sonuçlar D15’de 5000 iterasyonda elde edilmiştir. D15’de C_{maks} değeri 73 saat ve maksimum kullanılan elektrik miktarı 124kw/s saat olmuştur. Maksimum elektrik kullanımı için 125kw/s kısıtı girildiğine D6’ya göre 22 saatlik bir süre artışına karşın toplam 75kw/s daha elektrik tasarrufu yapmak mümkündür. On beşinci durumun (D15) çizelgesi Şekil 9’da gösterilmektedir. Aynı zamanda on beşinci durumdaki tüm makinelerin zamana bağlı toplam elektrik harcamaları da Şekil 10’da gösterilmektedir.



Şekil 9. D15 Maksimum elektrik kullanımı 125kw/s'a göre yapılan çizelgeleme



Şekil 10. D15 Tüm makinelerin zamana bağlı toplam elektrik harcaması

Beş koşul incelendiğinde elektrik kullanımı dikkate alınmadan yapılan çizelgelemede toplam işlerin bitiş süresi 51 saat olurken, kullanılan elektrik miktarı 249kw/s gibi çok yüksek bir değer olmaktadır. Elektrik kullanımını kısıtlayan D6'da minimum toplam işlem süresi yine 51 saat olmasına rağmen elektrik kullanımı 200kw/s'te düşmüştür. D9'da ise işlem süresinde 6 saatlik artışa karşılık elektrik kullanımı 175kw/s'e düşmüştür. D12'de işlem süresindeki artış miktarı 10 saate çıkmış, elektrik kullanımı 147kw/s olmuştur. D15'de ise elektrik kullanımı 124kw/s olurken tüm işlerin bitiş süresi 73 saate çıktığı görülmektedir. Bu durumda elektrik kullanımını 147kw/s değerinden daha fazla düşürmenin tüm işlemlerin bitiş sürelerini çok fazla yükselttiği görülmektedir. İşletme D6, D9 ve D12 durumlarından kendisine en uygun olanını seçmelidir.

Sonuç ve Tartışma

Ekonomik (enerji maliyetleri) ve ekolojik nedenlerden (karbon salınımı) dolayı işletmelerin enerji tasarruflu üretim yapma zorunluluğu olmuştur. Enerji tasarruflu üretim için üretim süreçlerinin yeniden gözden geçirilmesi gerekmektedir. Geleneksel çizelgeleme yöntemlerinde tek amaç olan tüm işlerin bitiş zamanının minimizasyonu yerine, kullanılan elektrik miktarı, karbon ayak izi gibi faktörlerinde artık göz ardı edilmemesi gerekmektedir.

Bu çalışmada, enerji tasarrufu sağlayan atölye tipi çizelgeleme problemi için örnek bir uygulama yapılmış, farklı durumlar için sistemin durumu incelenmiş ve geleneksel çizelgeleme çözümüne oranla tüm işlerin tamamlanma süresinde göz ardı edilebilir bir artışla

işletme için kayda değer bir enerji tasarrufu sağlanmıştır. Problemin kompleksliğinden dolayı optimum çözüme ulaşılamayan durumlarda yapay sinir ağları yöntemi kullanılarak farklı durumlara göre çözelgeler yapılmıştır.

Araştırmada çözelgeleme problemlerinde genellikle dikkate alınmayan arıza, bakım gibi işlemler için makine duruş zamanları göz ardı edilmiştir. Ayrıca bazı işlemler için hazırlık süresi gerekebilir. Çalışmada hazırlık süreleri olmadığı varsayılmıştır. Gerçeğe daha yakın sonuçlar elde edilebilmesi için dikkate alınmayan bu durumlarında daha sonraki çalışmalara eklenmesi fayda sağlayacaktır. Ayrıca ileriki çalışmalarda esnek atölye tipi çözelgeleme, akış çözelgeleme gibi farklı çözelgeleme türleri için enerji tasarrufu sağlayan çözelgeme uygulanabilir. Enerji tasarruflu atölye tipi çözelgeleme problemi ve farklı problem türleri için farklı meta sezgisel yöntemler denenebilir. Yine sürdürülebilir üretim konseptinde yer alan karbon ayak izi için benzer çalışmalar yapılabilir.

Kaynaklar

- Dai, M., Tang, D., Giret, A., Salido, M.A., & Li, W.D. (2013). Energy-efficient scheduling for a flexible flow shop using an improved genetic-simulated annealing algorithm. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 29, 418 – 429.
- Fang, K., Uhan, N., Zhao F., & Sutherland J. W., (2013). Flow shop scheduling with peak power consumption constraints. *Annals of Operations Research*, 206, 115 – 145.
- Fang, K., Uhan, N., Zhao F., & Sutherland J. W., (2011). A new approach to scheduling in manufacturing for power consumption and carbon footprint reduction. *Journal of Manufacturing Systems*, 30, 234 – 240.
- Ku, W.,--Y., & Beck J. C., (2016). Mixed Integer Programming models for job shop scheduling: A computational analysis. *Computer & Operations Research*, 73, 165 – 173.
- Liu, Y., Dong, H., Lohse, N., Petrovic S., & Gindy, N., (2014). An investigation into minimising total energy consumption and total weighted tardiness in job shops. *Journal of Cleaner Production*, 65, 87 – 96.
- Luo, H., Du, B., Huang, G.Q., Chen, H., & Li, X., (2013). Hybrid flow shop scheduling considering machine electricity consumption cost. *International Journal of Production Economics*, 146(2), 423 – 439.
- May, G., Stahl, B., Taisch, M., & Prabhu, V., (2015). Multi-objective genetic algorithm for energy-efficient job shop scheduling. *International Journal of Production Research*, 53(23), 7071 – 7089.
- Moon, J. Y., Shin, K., & Park, J. (2013). Optimizing of production scheduling with time-dependent and machine-dependent electricity cost for industrial energy efficiency. *International Journal of Advanced Manufacturing Technologies*, 68(1-4), 523 – 535.
- Mouzon, G., & Yıldırım, M. B. (2008). A framework to minimise total energy consumption and total tardiness on a single machine. *International Journal of Sustainable Engineering*, 1(2), 211 – 230.
- Mouzon, G., Yıldırım, M. B., & Twomey, J. (2007). Operational methods for minimising of

- energy consumption of manufacturing equipment. *International Journal of Production Research*, 45(18-19), 4247 – 4271.
- Tang, D., Dai, M., Salido, M. A., & Giret, A. (2016). Energy-efficient dynamic scheduling for a flexible flow shop using an improved particle swarm optimization. *Computers in Industry*, 81, 82 – 95.
- Shrouf, F., Ordieres-Mere J., Garcia-Sanchez A., & Ortega-Mier, M. (2014). Optimizing the production scheduling of a single machine to minimize total energy consumption costs. *Journal of Cleaner Production*, 67, 197 – 207.
- Zhang, R., & Chiong, R. (2016). Solving the energy-efficient job shop scheduling problem: a multi-objective genetic algorithm with enhanced local search for minimizing the total weighted tardiness and total energy consumption. *Journal of Cleaner Production*, 112, 3361 – 3375.
- Zhang, R., Zhao, F., Fang, K., & Sutherland J. W., (2014). Energy-conscious flow shop scheduling under time-of-use electricity tariffs. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 63, 37 – 40.