



Sıra Bağımlı Hazırlık Süreli Özdeş Olmayan Paralel Makine Çizelgeleme Problemi: Oluklu Mukavva Fabrikasında Bir Uygulama

Non-Identical Parallel Machine Scheduling Problem with Sequence-Dependent Setup Time: An Application in a Corrugated Cardboard Factory

Sümeyye Ünlü^{*1} , Hacı Mehmet Alakaş¹ 

¹Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği A.B.D, 71000, Kırıkkale, TÜRKİYE

Başvuru/Received: 17/01/2022

Kabul / Accepted: 01/03/2022

Çevrimiçi Basım / Published Online: 31/07/2022

Son Versiyon/Final Version: 31/07/2022

Öz
Özdeş olmayan paralel makine çizelgeleme problemi son zamanlarda işletmelerin ilgisini çeken konulardan birisi olmuştur. İşletmeye gelene bir işin son derece etkin ve hızlı şekilde yapılabilmesi çizelgelemeye bağlıdır. Makinelerin işlem süreleri, ürün geçişlerinde yapılan hazırlık süreleri gibi fazladan harcanan her süre üretim hızı ve kapasitesini etkilemektedir. Yapılan bu çalışmada sıra bağımlı hazırlık süreli özdeş olmayan paralel makine çizelgeleme problemi ele alınmıştır. Çalışma oluklu mukavva üretimi gerçekleştiren işletmede uygulamalı olarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın amacı en büyük tamamlanma zamanının (C_{max}) en küçüklümesidir. Firmada aynı operasyonlarda kullanılan fakat sahip oldukları özelliklere göre özdeş olmayan iki adet paralel makine bulunmaktadır. Makine farklılıkları ise hız, kapasite, ürün geçişlerindeki hazırlık süreleri ve teknik özellikleridir. İşletmeden 112 adet sipariş- ürün bilgisi ve makinelerde yapılan hazırlık sürelerinin bilgisi alınmıştır. Alınan bilgiler doğrultusunda gelen siparişlerin işlem süreleri ve ürün geçişleri esnasında yapılan hazırlıkların hazırlık süreleri matrisi hesaplanmıştır. Bu hesaplanan veriler oluşturulan matematiksel modele aktarılarak, ILOG Cplex Optimization programı ile çözülmüştür. Çözüm sonucunda işletme için uygun iki haftalık üretim çizelgesi elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler

“Özdeş olmayan paralel makine çizelgeleme, sıra bağımlı hazırlık süresi, en büyük tamamlanma zamanı”

Abstract

The problem of non-identical parallel machine scheduling has been one of the issues that attracted the attention of enterprises recently. Being able to do a job very effectively and quickly depends on scheduling. Any extra time spent, such as the processing times of the machines, the preparation times for product transitions, affects the production speed and capacity. In this study, non-identical parallel machine scheduling problem with sequence dependent setup time is discussed. The study was carried out practically in a company that produces corrugated cardboard. The aim of the study is to minimization of maximum completion time (C_{max}). There are two parallel machines in the company that are used in the same operations but are not identical according to their features. Machine differences are speed, capacity, preparation times for product transitions and technical features. 112 order-product information and information about the preparation times made on the machines were obtained from the enterprise. In line with the information received, the processing times of the incoming orders and the preparation times of the preparations made during the product transitions were calculated. These calculated data were transferred to the created mathematical model and solved with the ILOG Cplex Optimization program. As a result of the solution, a two-week production schedule suitable for the enterprise was obtained.

Key Words

“non-identical parallel machine scheduling, sequence dependent setup time, maximum completion time”

1. Giriş

Üretim ve hizmet sektörlerinde artan rekabet ile sıralama ve çizelgeleme konusu ön plana çıkan konulardan olmuştur. Özellikle üretim sektörlerinde verimlilik artışı, müşteriye hızlı cevap verebilme, eldeki kaynakları daha etkin şekilde kullanabilmeleri açısından büyük rol oynamaktadır. Çizelgeleme aslında karar verme sürecidir ve birçok üretim sektöründe kullanılmaktadır (Pinedo, 2008). Burada karar verilen süreç, neyin ne zaman, hangi makinede, hangi operasyonda, hangi kaynakla üretilmesi gerektiğini göstermektedir. Çizelgeleme problemleri kendi aralarında incelediğinde, akış tipi, atölye tipi, tek makine ve paralel makine üretim ortamları olarak sınıflandırılmaktadır. Akış tipi ve atölye tipi çizelgeleme problemlerinde üretim merkezleri ve bunları takip eden rotalar mevcuttur. Tek makine çizelgeleme problemlerinde ise tek makine mevcuttur ve bütün işler burada işlem görmektedir. Paralel makine çizelgeleme problemlerinde ise makineler paralel olarak yerleştirilmiştir ve bu makineler aynı işleri yapmaktadır. İşler ise rassal olarak atanmaktadır (French, 1982).

Paralel makine çizelgeleme problemleri yapısı gereği tek makine çizelgeleme problemlerine göre daha zor ve karmaşıktır. Paralel makine problemleri, m tane işi yapan n tane makinenin paralel olarak konumlandırıldığı ortamlardır. Bu m işin her biri n makedeki bir operasyonda işlem görmektedir. Paralel makine çizelgeleme problemleri makine çeşidine göre üç sınıfa ayrılmaktadır. Özdeş paralel makineler, farklı hızlara sahip paralel makineler ve özdeş olmayan paralel makinelerdir. Özdeş paralel makine ortamlarında aynı işi yapan ve aynı hıza sahip makineler bulunmaktadır. Farklı hızlara sahip paralel makine ortamları ise adından da anlaşılacağı üzere işlerin özelliklerine bakılmaksızın makine hızlarının farklı olduğu makineler bulunmaktadır. Özdeş olmayan paralel makine ortamlarında ise hızları, kapasiteleri, işlem sayılarının farklılık gösterdiği makineler bulunmaktadır.

Özdeş olmayan paralel makine çizelgeleme problemleri son zamanlarda araştırmacıların ilgisini çekmeye başlamıştır. İşler makinelere atanırken makinenin hızı, teknik özellikleri, termin süreleri gibi faktörler dikkate alınmakta ve işlem görmektedir. Paralel makine çizelgeleme problemlerinde olduğu gibi özdeş olmayan paralel makine çizelgeleme problemlerinde de çözüme ulaşmak için matematiksel modeller, sezgisel yöntemler, optimal yöntemler kullanılmaktadır. Mevcut problemler incelenerek uygun amaç fonksiyonları belirlenmektedir bunlar toplam tamamlanma zamanı minimizasyonu, geciken iş sayını küçüktür.

Özdeş olmayan paralel makine problemlerine hazırlık sürelerinin de dahil edildiği ve sıra bağımlılığın önemli olduğu problemler ise sıra bağımlı hazırlık süreli özdeş olmayan paralel makine çizelgeleme problemleri olarak adlandırılmaktadır. Bir işin kendinden önce gelen işe bağlı olarak hazırlık sürelerinin değişmesi durumuna sıra bağımlı hazırlık süresi denmektedir. Hazırlık zamanı işler arasında yapılacak ayarlamalardan olabileceği gibi makinenin bakımı, temizliği gibi durumlardan da kaynaklanabilmektedir.

Bu çalışma Ankara Başkent OSB'de bulunan oluklu mukavva üretimi yapan işletmede gerçekleştirilmektedir. Problemin amaç fonksiyonu en büyük tamamlanma zamanı (C_{max}) minimizasyonudur. İşletmede iki adet özdeş olmayan paralel makine vardır ve işler sıra bağımlı olarak ele alınmaktadır. Makinelerin işlem süreleri, kapasiteleri, işler arası hazırlık süreleri, üretim hızları birbirlerinden farklıdır. Problemin çözüme ulaşmak için fabrikadan 112 adet sipariş ve ürün detay bilgileri alınmıştır. Eldeki verileri kullanarak ürünlerin işlem süreleri ve hazırlık süreleri matrisleri hesaplanmıştır. Matematiksel model oluşturularak, hesaplanan veriler ile birlikte ILOG Cplex Optimization programı ile çözülmüştür. Çözüm sonucunda iki haftalık üretim çizelgeleri elde edilmiştir.

Çalışma dört bölümden oluşmaktadır. İkinci bölümde literatürde yapılan çalışmalardan bahsedilmiştir. Üçüncü bölümde, oluklu mukavva fabrikasında yapılan sıra bağımlı hazırlık süreli özdeş olmayan paralel makine çizelgeleme problemi üzerine yapılan uygulama, model ve sonuçlardan bahsedilmiştir. Dördüncü bölümde ise sonuçlar değerlendirilmiştir.

2. Literatür Araştırması

Literatürde özdeş olmayan paralel makine ve sıra bağımlı özdeş olmayan paralel makine hakkında birçok çalışma mevcuttur (Deane ve White (1975), Bank ve Wenner (2001), Silva ve diğ (2002), Chen (2009). Bank ve Wenner (2001), sezgisel yöntemler kullanarak özdeş olmayan paralel makine çizelgeleme problemini incelemişlerdir. Amaçları erken ve geç başlama cezalarını en küçüktür. Weng ve arkadaşları (2001), sıra bağımlı hazırlık süreli özdeş olmayan paralel makine çizelgeleme problemini ağırlıklandırılmış ortalama tamamlanma zamanını minimize etmek için çözümlenmişlerdir. Yöntem olarak sezgisel yöntemleri kullanmışlardır. Liaw ve diğ. (2003) özdeş olmayan paralel makine çizelgeleme problemini dal sınır yöntemi kullanarak çözmüşlerdir. Koulamas ve Kyparis (2003) çalışmalarından özdeş olmayan paralel makineleri ele almışlardır. Tamamlanma zamanını en aza indirmeyi hedefleyen çalışmalarından meta sezgisel yöntemler kullanmışlardır. Türkcan ve arkadaşları (2003), özdeş olmayan paralel makine çizelgeleme problemini uygulamalı olarak yapmışlardır. Uygulamayı ise CNC makine üreten firmada gerçekleştirmişlerdir. Toplam gecikmeyi minimize etmeyi hedefleyen çalışmalarında iki ölçütlü algoritma yöntemi kullanmışlardır. Lee ve Asllani (2004) 0-1 karma tam sayı yöntemini kullanarak sıra bağımlı hazırlık süreli paralel makine çizelgeleme problemini incelemişlerdir. Problemin çözümünde amaç fonksiyonu olarak geciken iş sayısını ve son işin tamamlanma zamanını en aza indirmeyi hedeflemişlerdir. Silva ve Magalhaes (2006), sezgisel yöntemler kullanarak ilgisiz paralel makine çizelgeleme problemlerini ele almışlardır. Rocha ve diğ. (2008), sezgisel yöntemler kullanarak toplam gecikmeyi küçüktürmeyi amaçlamışlardır. Chen (2009) çalışmasında sıra bağımlı hazırlık süreli ilgisiz paralel makine çizelgeleme problemini çözmüşlerdir. Çözüme ulaşmak için tavlama benzetimi yöntemi kullanmışlardır. Amaçları ise toplam gecikmenin en küçükleme. Arnaout ve diğ. (2010) makalelerinde sıra bağımlı hazırlık süreli ilgisiz paralel makine çizelgeleme problemini ele almışlardır. Karınca kolonisi yöntemi kullanarak üretim sürelerini minimize etmeyi hedeflemişlerdir. Tran ve Beck

(2011), işlerin tamamlanma zamanını en küçükleyen özdeş olmayan paralel makine çizelgeleme problemini çözmüşlerdir. Valla ve Ruiz (2011), genetik algoritma yöntemi ile hazırlık süreleri dikkate alınan sıra bağımlı özdeş olmayan paralel makine çizelgeleme problemini incelemişlerdir. Yılmaz ve arkadaları (2014), tamamlanma zamanını en küçükleyen özdeş olmayan paralel makine çizelgeleme problemini çözmüşlerdir. Çözüme ulaşmak için ise genetik algoritma kullanmışlardır. Liao ve diğ. (2014) yaptıkları çalışmalarında sıra bağımlı hazırlık süreli özdeş olmayan paralel makine çizelgeleme problemini melez sezgisel algoritma yöntemini kullanarak çözmüşlerdir. Çalışmanın sonucunda toplam tamamlanma zamanını en küçüklemişlerdir. Herr ve Goel (2016) makalelerinde hazırlık zamanını dikkate alarak sıra bağımlı ilişkisiz paralel makine problemini ele almışlardır. Toplam gecikmeyi minimize etmeyi hedeflemişlerdir. Hulett ve diğ. (2017) çalışmalarını uygulamalı olarak elektronik üretim tesisinde bulunan ilgisiz paralel makineler üzerinde yapmışlardır. Toplam ağırlıklı gecikmeyi en aza indirmeyi hedefleyen çalışmalarında çözüme ulaşmak için parçacık sürüsü algoritması kullanmışlardır. Sarıççek (2018) makalesinde özdeş olmayan paralel makine problemini sıra bağımlı hazırlık süreli olarak ele almıştır. Gonzalez ve diğ. (2019) çalışmalarını metal katlama fabrikasında uygulamalı olarak yapmışlardır. Toplam gecikmeyi küçükmeyi hedefleyen çalışmada özdeş olmayan paralel makine çizelgeleme problemini çözmüşlerdir. Furugi (2021) çalışmasında sıra bağımlı hazırlık süreli özdeş olmayan paralel makine çizelgeleme problemini incelemişlerdir. Toplam gecikmeyi ve erken teslim sürelerini en aza indirmeyi hedefleyen çalışmasında karma tam sayılı matematiksel model önermişlerdir.

İncelenen literatür çalışmalarına baktığımızda özdeş olmayan paralel makine çizelgeleme problemi ile ilgili farklı amaç fonksiyonları ve yöntemler ele alınmıştır. Çalışmaların büyük yoğunluğu toplam tamamlanma zamanını en küçüklemeyi hedeflemiş olup yöntem olarak ise sezgisel yöntemler tercih edilmiştir. Yapılan bu çalışmanın literatüre en büyük katkısı ise uygulamalı olarak ele alınmış olmasıdır. Böylelikle uygulamalı olarak yapılan özdeş olmayan paralel makine çizelgeleme problemlerine, sıra bağımlı hazırlık süreleri de eklenerek ileride yapılacak olan çalışmalara, özellikle de oluklu mukavva sektörüne örnek olacaktır.

3. Paralel Makine Çizelgeleme

Paralel makine çizelgeleme problemleri gün geçtikçe işletmeler için önem arz etmeye başlamış olup bu konuda birçok literatür çalışmaları da mevcuttur (Silva ve diğ. (2002), Chen (2009), Joo ve Kim (2012)). Çizelgeleme ile makineleri, kaynakları, işçileri etkin şekilde kullanarak verimlilik, kapasite ve müşteriye hızlı cevap vermeye başlanılmıştır. Teknolojinin artması ile işletmeler makine kapasitelerini arttırmaya başlamışlardır. Aynı işi yapan fakat daha gelişmiş özellikli, hızlı makineler olarak üretim ortamlarını özdeş olmayan paralel makine ortamına dönüştürmektedirler. Bu sebeple özdeş olmayan paralel makine çizelgeleme problemleri kaçınılmaz olmaya başlamıştır.

Paralel makine çizelgeleme problemlerinin genel geçer kabul ve varsayımları şu şekildedir:

- İki iş aynı anda işleme alınmaz, her işin belirli bir operasyonu vardır.
- Kesinti olmadığı varsayılr. Bir işin başlaması için önceki işin bitmesi gerekmektedir.
- İşler ertelenemez.
- Makineler boş kalabilir.
- Çizelgeleme boyunca makinelerde arıza olmamaktadır.
- İş sayısı, makine sayısı gibi operasyonlar bilinmektedir.
- Makinelerde aynı anda birden fazla iş olmamaktadır.

Bu varsayımlar özdeş olmayan paralel makine çizelgeleme problemlerinde geçerli sayılmaktadır, bunlardaki farklılıklar ise:

- Makine hızları birbirlerinden farklıdır.
- Makinelerin sahip olduğu kapasiteler farklıdır.
- Her işin makinelerdeki işlem süreleri farklıdır (Engin, 2001).

4. Sıra Bağımlı Hazırlık Süreli Özdeş Olmayan Paralel Makine Çizelgeleme Problemi: Oluklu Mukavva Fabrikasında Bir Uygulama

Çalışma, 2013 yılında Ankara Başkent OSB'sinde bulunan 4000 m²'lik kapalı alana sahip oluklu mukavva üretimi yapan fabrikada gerçekleştirilmiştir. Fabrika, gıda, tekstil, savunma, otomotiv gibi birçok sektöre hizmet vermektedir. İşletme haftanın altı günü tek vardiya olarak çalışmaktadır. Günlük çalışma saatleri ise on saat olup haftalık 3600 dakika üretim yapmaktadırlar. İşletmede üretim talebe göre yapılmaktadır. Fabrikada iki adet paralel makine olup aynı operasyonda kullanılmasına rağmen sahip oldukları farklılıklara göre özdeş değillerdir. Bu farklılıklar; üretim hızı, kapasite, işlem süreleri, işler arası hazırlık süreleri ve bazı teknik (boya haznesi adedi, bıçak ölçüleri) özellikleridir. Yapılacak olan çalışmada hazırlık süreleri dikkate alınarak sıra bağımlı hazırlık süreli özdeş olmayan paralel makine çizelgeleme problemi incelenerek matematiksel model kurulmuştur. Kurulan bu model ILOG Cplex Optimization programı ile çözümlenerek işletme için iki haftalık üretim çizelgeleri oluşturulmuştur. Amaç fonksiyonu ise en büyük tamamlanma zamanını (C_{max}) en aza indirmektir. Böylelikle elde edilen üretim çizelgesindeki işler minimum tamamlanma zamanı ulaşacak şekilde sıralanacaktır. Çalışmanın bu kısmında makinelere makine 1 ve makine 2 olarak adlandırılmıştır. Makine 1'in üretebileceği maksimum yarı mamul ölçüsü 2700 cm iken makine 2'de bu ölçü 2400 cm'dir. Aynı şekilde makine 1'de üç renk haznesi bulunurken, makine 2'de dört renk haznesi bulunmaktadır. Bu sebeple gelen siparişlerin ölçü ve renklerinin makinelere uygun olmaması durumunda o iş ilgili makinede sıraya alınamamaktadır. Makinelerin özelliklerini karşılaştırılması tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Makine Özellikleri

	Kesim	Baskı	Yapıştırma	Saatlik Üretim Miktarı (adet/saat)	Max Üreteceği Safya Boyu (mm)	Renk Haznesi Adet
Makine 1	Var	Var	Var	2000- 2500	2700	3
Makine 2	Var	Var	Var	5000- 6000	2400	4

Makinelerdeki hazırlık sürelerini etkileyen faktörler ise, ürün dalga (BC, EB, C, B, E) boyu değişimi, baskı rengi değişiminde boya haznesi yıkama süresi ve A Box ve özel kesim kutu değişimlerinde bıçak değişimi süresidir. İşletmeden alınan hazırlık süreleri bilgileri tablolarda verilmiştir.

Tablo 2. Dalga Geçişleri Arası Hazırlık Süresi

Makine 1	Dalga Geçişleri Arası Hazırlık Süreleri (dakika)					Makine 2	Dalga Geçişleri Arası Hazırlık Süreleri (dakika)				
	BC	EB	C	B	E		BC	EB	C	B	E
BC	0	15	20	23	27	BC	0	10	10	10	10
EB	15	0	12	20	25	EB	10	0	10	10	10
C	20	12	0	17	23	C	10	10	0	10	10
B	23	20	17	0	10	B	10	10	10	0	10
E	27	25	23	10	0	E	10	10	10	10	0

Tablo 3. Boya Haznesi Yıkama ve Bıçak Değişim Süreleri

Makine 1-2	Boya Haznesi Yıkama Süreleri (dakika)			Makine 1-2	Bıçak Değişim Süreleri (dakika)	
	Siyah	Ara Renk	Beyaz		Özel Kesim Kutu	A Box Kutu
Siyah	0	7	15	A Box Kutu	30	10
Ara Renk	5	0	10	Özel Kesim Kutu	30	30
Beyaz	4	8	0			

Uygulama çözümüne ulaşmak için fabrikadan 112 adet sipariş için sipariş ve ürün özellikleri (sipariş adeti, ürün ölçüleri, renk sayısı, dalga çeşidi, koli tipi) alınmıştır. Verilerin bir kısmı tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Sipariş ve Ürün Bilgisi

Sipariş No	En (cm)	Boy (cm)	Sip. Mik.	1. Makine İşlem Süresi (dk)	2. Makine İşlem Süresi (dk)	Renk Sayısı	Dalga Çeşidi	Baskı Rengi	Koli Tipi
1	650	820	30000	900	360	0	C	RENKSİZ	KESİMLİ
2	790	1200	1080	0	10.8	4	EB	SİYAH	A BOX
3	826	2210	1000	26.7	10.9	0	BC	RENKSİZ	A BOX
4	2460	1200	1000	26.7	0	0	C	RENKSİZ	A BOX
5	470	1400	1400	42	16.8	2	BC	ARA RENK	A BOX
6	470	1415	350	10.5	4.2	2	BC	ARA RENK	A BOX
7	850	2070	400	9.6	4	0	BC	RENKSİZ	A BOX
8	660	1510	1010	0	10.1	4	C	ARA RENK	A BOX
9	460	1270	2000	60	24	0	BC	RENKSİZ	A BOX
10	900	2730	420	12.6	0	1	BC	BEYAZ	A BOX
11	421	1190	5000	150	60	1	C	BEYAZ	A BOX
12	436	1250	1120	33.6	13.4	1	C	BEYAZ	A BOX
13	476	1130	1120	33.6	13.4	1	C	SİYAH	A BOX
14	451	1100	1250	37.5	15	1	C	SİYAH	A BOX
15	495	1450	1410	42.3	16.9	1	EB	ARA RENK	A BOX
16	428	557	350	10.5	4.2	0	C	RENKSİZ	KESİMLİ
...

İşletmeden alınan veriler kullanılarak her iki makine için işlerin işlem süreleri hesaplanmıştır. Aynı şekilde işletmeden alınan hazırlık süreleri ile birlikte de makineler için hazırlık süreleri matrisi oluşturulmuştur.

4.1. Matematiksel Model

Bu bölümde önerilen matematiksel model detaylı bir şekilde açıklanıp, ILOG Cplex Optimization programı ile çözülmüştür. Modelin amaç fonksiyonu en büyük tamamlanma zamanını (C_{max}) en küçükmektir.

Modele geçmeden önce sistemin özellikleri, varsayımları ve modelin parametreleri ve karar değişkenleri verilmiştir.

Sistem özellikleri;

- Makinelerin sayısı biliniyor, 2 adet makine mevcut.
- Makine hazırlık süreleri farklıdır, biliniyor.
- Makine hızları birbirinden farklıdır, biliniyor.
- Kapasiteleri farklıdır, biliniyor.
- İşlem süreleri farklıdır, biliniyor.
- Boya hazneleri sayısı farklıdır, biliniyor.
- Sıradaki işin başlaması için, ondan önceki işin mutlaka bitmesi gerekmektedir.

Varsayımlar;

- Makineler çizelgeleme başlamadan önce boş olduğu kabul ediliyor
- Her iş belirli operasyonlardan oluşmuştur. Aynı işin iki işlemi aynı anda işlenemez.
- Kesinti yoktur. Operasyon başladığı makinede bitecektir.
- Tüm işlerin işlem süreleri ve hazırlık süreleri belirlidir.
- Hazırlık süreleri işlem süresine dahil edilmemiştir.
- Erteleme yoktur. Her iş tamamlanıncaya kadar işlenecektir.
- Makineler işsiz (boş) olabilir.
- Hiçbir makine birden fazla iş yapamaz.
- Makineler bozulmamaktadır.
- İş tarifleri önceden bilinmektedir.

Parametreler:

n: İş sayısı	$j=1,2,\dots,n$
m: Makine sayısı	$k=1,2$
V: Büyük sayı	
P_{jk} : j işinin k. makinede işlem süresi	$k=1,2 \quad j=1,2,\dots,n$
S_{kij} : k. makinde i işinden sonra j işinin hazırlık süresi	$k=1,2 \quad j,i=1,2,\dots,n$

Karar Değişkenleri:

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{k. makineye i işinden sonra j işi atanırsa} \\ 0 & \text{aksi durumda} \end{cases}$$

$$C_j: j \text{ işinin tamamlanma zamanı} \quad j=1,2,\dots,n$$

Amaç Fonksiyonu:

$$\min C_{max} \quad (1)$$

Kısıtlar:

$$\sum_{k=1}^m \sum_{i=0}^n x_{ijk} = 1 \quad j=1,\dots,n \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{0jk} = 1 \quad k=1,\dots,m \quad (3)$$

$$\sum_{i=0}^n x_{ihk} - \sum_{j=0}^n x_{hjk} = 0 \quad (i, j \neq h) \quad k=1,\dots,m, h=1,\dots,n \quad (4)$$

$$C_j - [C_i + \sum_{k=1}^m x_{ijk}(S_{kij} + P_{jk}) + V(\sum_{k=1}^m x_{ijk} - 1)] \geq 0$$

$$i=0, \dots, n, j=1, \dots, n \quad (5)$$

$$C_0 = 0 \quad (6)$$

$$C_j \leq C_{max} \quad j=1, \dots, n \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{i,2,1} = 0 \quad k=1, 2, j=1, \dots, n \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{i,8,1} = 0 \quad k=1, 2, j=1, \dots, n \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{i,20,1} = 0 \quad k=1, 2, j=1, \dots, n \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{i,14,1} = 0 \quad k=1, 2, j=1, \dots, n \quad (11)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{i,15,1} = 0 \quad k=1, 2, j=1, \dots, n \quad (12)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{i,28,1} = 0 \quad k=1, 2, j=1, \dots, n \quad (13)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{i,6,1} = 0 \quad k=1, 2, j=1, \dots, n \quad (14)$$

$$\sum_{k=1}^n x_{i,4,2} = 0 \quad k=1, 2, j=1, \dots, n \quad (15)$$

$$\sum_{k=1}^n x_{i,10,2} = 0 \quad k=1, 2, j=1, \dots, n \quad (16)$$

$$\sum_{k=1}^n x_{i,35,2} = 0 \quad k=1, 2, j=1, \dots, n \quad (17)$$

$$\sum_{k=1}^n x_{i,60,2} = 0 \quad k=1, 2, j=1, \dots, n \quad (18)$$

Önerilen modelin amaç fonksiyonu (1) en büyük tamamlanma zamanını en aza indirmeyi amaçlamaktadır. Kısıt (2), her işin yalnızca bir kez, bir makinede planlanmasını sağlamaktadır. İşlerin birden fazla sıraya alınmaması (3) numaralı kısıt ile gerçekleştirilmektedir. İşlemi bitmiş olan işten sonraki işin sıraya alınması, kısıt (4) ile yapılmaktadır. Kısıt (5) ile hazırlık zamanları da dikkate alınarak işin tamamlanma süresi hesaplanmaktadır. (6) kısıtı başlangıç değeri ataması için kullanılmıştır. (7) numaralı kısıt ise en büyük tamamlanma zamanının bir işin tamamlanma zamanından büyük olması gerektiğini göstermektedir. Baskı rengi, üç rengin üzerinde olan siparişlerin makine 1'de sıraya alınmaması gerektiğini (8) ve (14) numaralı kısıtlar arasında göstermektedir. Aynı şekilde ürün ölçüleri makine 2'ye uygun olmayan siparişlerin makine 1'de sıraya alan kısıtlar ise (15), (16), (17) ve (18) numaralı kısıtlardır.

Sıra bağımlı hazırlık süreli özdeş olmayan paralel makine çizelgeleme problemi için oluşturulan model ILOG Cplex Optimization programı ile zaman sınırlı olarak iki saat çalıştırılmıştır. Çözüm sonucunda iki makine için iki haftalık üretim çizelgesi elde edilmiştir. Oluşturulan üretim çizelgeleri tablo 5 ve tablo 6'da gösterilmiştir.

Tablo 5. Hafta 1 Üretim Çizelgesi

1. Hafta Makinelere Atanan İşler					
Sıra	Makine 1	Sıra	Makine 1	Sıra	Makine 2
1	26	12	7	1	23
2	28	13	11	2	22
3	29	14	13	3	1
4	25	15	15	4	17
5	21	16	12	5	8
6	9	17	10	6	2
7	6	18	18	7	27
8	19	19	3	8	24
9	4	20	16	9	20
10	5				
11	14				

Birinci hafta için model çözüm sonucunda amaç fonksiyonu (C_{max}) değeri 3082 olarak bulunmuştur. Elde edilen çizelgeye baktığımızda, baskı rengi dört renk olan siparişlerden 2, 8, 20 numaralı siparişlerin makine 2’de işleme alınmıştır. Yarı mamul ölçüsü makine 2’ye uygun olmayan siparişler (4, 10) ise makine 1’de işleme alınmıştır.

Tablo 6. Hafta 2 Üretim Çizelgesi

2. Hafta Makinelere Atanan İşler							
Sıra	Makine 1	Sıra	Makine 1	Sıra	Makine 2	Sıra	Makine 2
1	8	20	13	1	16	20	52
2	49	21	38	2	57	21	51
3	50	22	55	3	33	22	54
4	35	23	11	4	32	23	1
5	17	24	23	5	53	24	43
6	7	25	25	6	28	25	41
7	6	26	64	7	27	26	56
8	31	27	12	8	36		
9	37	28	47	9	9		
10	60	29	26	10	15		
11	18	30	21	11	58		
12	2	31	20	12	46		
13	22	32	63	13	34		
14	10	33	24	14	45		
15	48	34	29	15	59		
16	30	35	44	16	14		
17	19	36	40	17	4		
18	5	37	39	18	3		
19	62	38	42	19	61		

İkinci hafta için elde edilen çizelgeye baktığımızda, 14, 15, 28 ve 61 numaralı siparişlerin makine 2’de, 35 ve 60 numaralı siparişlerin ise makine 1’de sıraya alındığını görmekteyiz. En büyük tamamlanma zamanı minimize etmeyi hedeflediğimiz çizelgede amaç fonksiyon değeri ise 3768 olarak bulunmuştur.

5. Sonuç

Üretim ortamlarının hızlı cevap verebilme, verimlilik artışı, kapasite artışı gibi konularda kendilerini geliştirmek istemeleri ile çizelgeleme konularına talep artmaktadır. Literatürde yapılan çalışmalara baktığımızda özdeş olmayan paralel makine ve sıra bağımlı hazırlık süreli özdeş olmayan paralel makine çizelge problemleri ile ilgili teorik ve uygulamalı çalışmalar bulunmaktadır.

Yapılan bu çalışmanın uygulamalı olması aynı sektörde çalışan diğer işletmelere de yön vereceği düşünülmektedir. Bu çalışma oluklu mukavva üretimi yapan firmada gerçekleştirilmiştir. İşletme bünyesinde iki adet özdeş olmayan paralel makine bulunmaktadır. Firma haftanın altı günü günlük on saat çalışmaktadır. Makineye gelen işlerin sıra bağımlı hazırlık süreleri dikkate alınarak makinelere uygun iki haftalık üretim çizelgeleri elde edilmiştir. Problemin amaç fonksiyonu en büyük tamamlanma zamanının (C_{max}) en küçüklenmesidir.

Böyle bir çalışmanın yapılması için işletmeler bünyelerinde bulunan makineler, işler, sistem özellikleri vb. hakkında bilgi sahibi olmalıdırlar. Makineler özellikleri bakımından incelendiğinde, aynı operasyonlarda kullanılabilir ama hızları, kapasiteleri, işlem süreleri, hazırlık süreleri vb. farklı olmalıdır. Veri toplama kısmında ise işletmeden, ürün bilgileri, işler arası hazırlık sürelerini etkileyen faktörler ve süreleri, sipariş adetleri, saatlik üretim miktarı alınmalıdır. Alınan sipariş adetleri ve üretim miktarları kullanılarak işlerin işlem süreleri hesaplanmalıdır. Hazırlık süreleri için ise ürün geçişlerinde makinelere uygulanan hazırlıklar belirlenerek, süreleri hesaplanmalı ve matris oluşturulmalıdır. Bütün bu hesaplamalar ve veriler sonucunda çözüme gidilecek matematiksel model kurulmalıdır. Çalışmada oluşturulan model, bir paket programı kullanılarak çözüm sonucuna ulaşılabilmektedir. Problemin yapısının daha büyük olması durumunda sezgisel yöntemlere başvurulması gerekmektedir.

Sıra bağımlı hazırlık süreli paralel makine çizelgeleme probleminin çözümleri için farklı yöntemler (genetik algoritma, tabu arama, sezgisel yöntemler vb.) kullanılmaktadır. Sanayi sektöründe sıkça rastlanabilecek bir problemdir.

Bundan sonra yapılacak olan çalışmalarda, problemin kısıtları, amaçları, parametreleri ve çözüm yöntemleri gibi değerleri değiştirilerek problem tekrar ele alınabilir ve karşılaştırılabilir.

Referanslar

- Arnaout, J. P., Rabadi, G., & Musa, R. (2010). A Two-Stage Ant Colony Optimization Algorithm To Minimize The Makespan On Unrelated Parallel Machines With Sequence-Dependent Setup Times. *Journal Of Intelligent Manufacturing*, 21(6), 693-701.
- Bank, J., & Werner, F. (2001). Heuristic Algorithms For Unrelated Parallel Machine Scheduling With A Common Due Date, Release Dates, And Linear Earliness And Tardiness Penalties. *Mathematical And Computer Modelling*, 33(4-5), 363-383.
- Chen, J. F. (2009). Scheduling On Unrelated Parallel Machines With Sequence-And Machine-Dependent Setup Times And Due-Date Constraints. *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 44(11), 1204-1212.
- French, S. (1982). *Sequencing And Scheduling: An Introduction To The Mathematics Of The Job-Shop*. New York: Ellis Horwood Series.
- Furugi, A. (2021). Makine Uygunluk Kısıtlaması ve Sıra Bağımlı Kurulum Süresi İle Özdeş Olmayan Paralel Makine Çizelgeleme Problemi İçin Tabu Arama Algoritması. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 36(3), 1539-1550.
- Herr, O., & Goel, A. (2016). Minimising Total Tardiness For A Single Machine Scheduling Problem With Family Setups And Resource Constraints. *European Journal Of Operational Research*, 248(1), 123-135.
- Hulett, M., Damodaran, P., & Amouie, M. (2017). Scheduling Non-Identical Parallel Batch Processing Machines To Minimize Total Weighted Tardiness Using Particle Swarm Optimization. *Computers & Industrial Engineering*, 113, 425-436.
- Kyparisis, G. J., & Koulamas, C. (2006). Flexible Flow Shop Scheduling With Uniform Parallel Machines. *European Journal Of Operational Research*, 168(3), 985-997.
- Lee, S. M., & Asllani, A. A. (2004). Job Scheduling With Dual Criteria And Sequence-Dependent Setups: Mathematical Versus Genetic Programming. *Omega*, 32(2), 145-153.
- Liao, T. W., Chang, P. C., Kuo, R. J., & Liao, C. J. (2014). A Comparison Of Five Hybrid Metaheuristic Algorithms For Unrelated Parallel-Machine Scheduling And Inbound Trucks Sequencing In Multi-Door Cross Docking Systems. *Applied Soft Computing*, 21, 180-193.
- Liaw, C. F., Lin, Y. K., Cheng, C. Y., & Chen, M. (2003). Scheduling Unrelated Parallel Machines To Minimize Total Weighted Tardiness. *Computers & Operations Research*, 30(12), 1777-1789.
- Perez-Gonzalez, P., Fernandez-Viagas, V., García, M. Z., & Framinan, J. M. (2019). Constructive Heuristics For The Unrelated Parallel Machines Scheduling Problem With Machine Eligibility And Setup Times. *Computers & Industrial Engineering*, 131, 131-145.
- Pinedo, M. L. (2008). *Scheduling: theory, algorithms, and systems*. Springer
- Rocha, P. L., Ravetti, M. G., Mateus, G. R., & Pardalos, P. M. (2008). Exact Algorithms For A Scheduling Problem With Unrelated Parallel Machines And Sequence And Machine-Dependent Setup Times. *Computers & Operations Research*, 35(4), 1250-1264.
- Sarıççek, İ. (2018). Özdeş Olmayan Paralel Makina Çizelgeleme Problemlerinin Çözümü İçin Bir Karar Destek Sistemi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 24(1), 108-116.
- Silva, C., & Magalhaes, J. M. (2006). Heuristic Lot Size Scheduling On Unrelated Parallel Machines With Applications In The Textile Industry. *Computers & Industrial Engineering*, 50(1-2), 76-89.
- Tran, T. T., Araujo, A., & Beck, J. C. (2016). Decomposition Methods For The Parallel Machine Scheduling Problem With Setups. *Inform Journal On Computing*, 28(1), 83-95.

Turkcan, A., Akturk, M. S., & Storer, R. H. (2003). Non-Identical Parallel Cnc Machine Scheduling. *International Journal Of Production Research*, 41(10), 2143-2168.

Vallada, E., & Ruiz, R. (2011). A Genetic Algorithm For The Unrelated Parallel Machine Scheduling Problem With Sequence Dependent Setup Times. *European Journal Of Operational Research*, 211(3), 612-622.

Weng, M. X., Lu, J., & Ren, H. (2001). Unrelated Parallel Machine Scheduling With Setup Consideration And A Total Weighted Completion Time Objective. *International Journal Of Production Economics*, 70(3), 215-226.