

## BİR TEKSTİL FABRİKASINDA MONTAJ HATTI DENGELEME VE PERFORMANSA DAYALI İŞÇİ ATAMA PROBLEMİ

Emine AKYOL ÖZER<sup>1\*</sup>, Elif Ecem COŞKUN<sup>2</sup>, Özüm BULUT<sup>3</sup>, Elif Su TOY<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Eskişehir Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Endüstri Mühendisliği Bölümü, Eskişehir  
ORCID No: <http://orcid.org/0000-0002-9570-2886>

<sup>2</sup>Eskişehir Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Endüstri Mühendisliği Bölümü, Eskişehir  
ORCID No: <http://orcid.org/0000-0003-0097-0392>

<sup>3</sup>Eskişehir Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Endüstri Mühendisliği Bölümü, Eskişehir  
ORCID No: <http://orcid.org/0000-0003-2942-2584>

<sup>4</sup>Eskişehir Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Endüstri Mühendisliği Bölümü, Eskişehir  
ORCID No: <http://orcid.org/0000-0002-5884-4914>

Anahtar Kelimeler	Öz
Montaj Hattı Dengeleme, İşçi Atama Problemi, Matematiksel Model	<i>Tekstil sektörü dünya çapında çok geniş bir pazara sahiptir ve her geçen gün müşteri ihtiyaçları ve beklentileri yükseldiği için tekstil fabrikalarının müşteri isteklerine hızlı cevap verebilmeleri gerekmektedir. Bu çalışmada, bir tekstil fabrikasının dikim atölyesindeki montaj hattı dengeleme ve performansa dayalı işçi atama problemleri birlikte ele alınmıştır. Problemin çözümü için, M1, M2 ve M3 olmak üzere üç farklı matematiksel model geliştirilmiştir. M1 modelinde, iş ve işçi sayısı eşit alınarak açılacak istasyon sayısı ve işlerin tamamlanma süresi enküçüklenecek şekilde montaj hattı dengeleme ve işçi atama yapılmıştır. M2 modeli, işletmeden alınan veriler doğrultusunda her işe bir veya birden fazla işçinin atanabildiği doğrusal olmayan bir matematiksel modeldir. Son model (M3) ise doğrusal olmayan modelde (M2) doğrusallığı bozan kısıt yerine bir işe atanan işçilerin o işi yapma sürelerinin ortalamasını hesaplayankısıt eklenerek elde edilmiş alternatif doğrusal bir modeldir. Pantolon hattı verileri kullanılarak M1, M2 ve M3 modellerinin GAMS programında elde edilen çözümleri kıyaslanmış ve tartışılmıştır.</i>

## ASSEMBLY LINE BALANCING AND PERFORMANCE BASED WORKER ASSIGNMENT PROBLEM IN A TEXTILE FACTORY

Keywords	Abstract
Assembly Line Balancing, Worker Assignment Problem, Mathematical Model	<i>The textile industry has a huge market worldwide. While customer needs and expectations are increasing day by day, textile factories must be able to respond quickly to customer requests. In this study, assembly line balancing and performance-based worker assignment problems in a sewing workshop of a textile factory are discussed together. Three different mathematical models have been developed for the solution of the problem: M1, M2 and M3. In the M1 model, assembly line balancing and worker assignment were made so that the number of stations to be opened and the completion time of the works were minimized by taking the number of jobs and workers equal. M2 model is a nonlinear mathematical model where one or more workers can be assigned to each job in line with the data received from the business. The last model (M3) is an alternative linear model obtained by adding the constraint that calculates the average time of the workers assigned to a job instead of the constraint that disrupts the linearity in the nonlinear model (M2). Using the pants line data, the solutions of the M1, M2 and M3 models obtained in the GAMS program were compared and discussed.</i>

Araştırma Makalesi	Research Article
Başvuru Tarihi : 26.01.2021	Submission Date : 26.01.2021
Kabul Tarihi : 12.06.2021	Accepted Date : 12.06.2021

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

## 1. Giriş

İnsanların giyinme temel ihtiyaçlarını karşılayan tekstil sektöründe her geçen gün müşteri beklentileri artmaktadır. Bu sebeple tekstil fabrikalarının müşteri isteklerine hızlı cevap verebilme yönünde çaba göstermeleri gerekmektedir. Bununla birlikte, kısa süreli birçok iş adımının ve çok sayıda makinenin bulunduğu tekstil sektörü, karışık ve yoğun bir üretim sürecine sahiptir. Montaj hatlarının dengeli bir şekilde tasarlanması ve kurulması; üretim hızının artmasına ve sistematik bir üretim planlama çalışmasına imkân sağlamaktadır.

Montaj hattı dengeleme, işlerin aralarındaki öncelik ilişkileri dikkate alınarak istasyonlara atanmasıdır. Fakat, hat dengeleme yapılırken karşılaşılan güçlü farklılıklarının ihmal edilmesi gerçekçi sonuçlar elde edilmesine engel olmaktadır. İş sürelerinin işi gerçekleştiren kişinin tecrübesine dolayısıyla da performansına bağlı olarak değiştiği montaj hatlarında, montaj hattı dengeleme ve işçi atama problemleri birlikte ele alınmalıdır. Bu çalışmada, bir tekstil fabrikasında ceket ve pantolon üretimi yapan dikim hattındaki işlerin dengeli bir şekilde istasyonlara atanması ve bu istasyonlara uygun sayıda ve uygun performanslı işçilerin atanması hedeflenmiştir.

## 2. Bilimsel Yazın Taraması

Bu bölümde, erişilebilen literatürdeki montaj hattı dengeleme (MHD) ve işçi atama problemleri, özellikleri ve önerilen çözüm yaklaşımları açısından incelenmiştir ve bu çalışmalar Tablo 1'de özetlenmiştir.

Literatürdeki işçi atama problemlerinde, işçilerin yeteneklerinin veya tercihlerinin göz önünde bulundurulduğu göze çarpmaktadır. Çiçek (2016), Jandarma Genel Komutanlığı'nda öncelikle personel ön tercihleri doğrultusunda, sonra birliklerin ihtiyaçlarına göre atama yapılmasını sağlayacak ve personellerin tercih kararlarına yardımcı olacak bir karar destek sistemi geliştirmiştir. Bu sayede atamalardaki memnuniyet oranının artırılması amaçlanmıştır. Wu ve diğ. (2018) kapasite kısıtı altında yetenekli işçilerin işlere atanması

problemini ele almışlardır. Bu çalışmada, işçi atama problemini birden fazla hücreye yayılan çapraz eğitim planı ile ele almak için minimum eğitim maliyetini ve maksimum iş yükü dengesini amaçlayan yeni bir matematiksel programlama modeli sunulmaktadır. Problemin hesaplama karmaşıklığı göz önüne alınarak matematiksel modelin yanında parçacık sürü optimizasyonu ve yapay arı kolonisi algoritmaları önerilmiştir. Tutumlu ve diğ. (2020), işçilerin hem yetenek hem sağlık durumlarını göz önünde bulundurarak iş istasyonlarına atanmaları problemini ele almışlardır. Problemin çözümü için üç aşamadan oluşan bir çözüm yaklaşımı geliştirmişlerdir. İlk olarak her iş istasyonu için gereken vardiya sayısı belirlenmiş sonrasında her vardiya için gereken işçi sayısı hesaplanmış ve son olarak da işçilerin sağlık ve yetenek seviyeleri dikkate alınarak hangi işçinin hangi iş istasyonuna atanacağını belirlemek için karma tamsayılı doğrusal karar modeli önermişlerdir.

Özgen (2016) ise işçi atama problemi yerine çok sayıda operasyona ve işçiye sahip olan konfeksiyon hatlarının dengeleme problemini ele almıştır. Dikim hattında üretilen iki farklı gömlek modelinin her biri için En Uzun İşlem Süresi Yöntemi, Kilbridge ve Wester Yöntemi ve Göreceli Pozisyon Ağırlıkları Yöntemi uygulanarak elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Literatürdeki montaj hattı dengeleme ve işçi atama problemlerinin birlikte ele alındığı çalışmalarda farklı kısıtlar probleme dahil edilmiştir. Koltai ve Tatay (2011) montaj hattı dengeleme modelleri için beceri gereksinimlerini ve beceri koşullarını modellemeyi amaçlamıştır. Farklı beceri kısıtlamalarını matematiksel olarak tanımlamakta ve montaj hattı dengeleme modellerinin beceri değerlendirmeleri ile nasıl tamamlanabileceğini göstermektedir. Vilà ve Pereira (2014) her istasyona bir operatörün atandığı klasik montaj hattı dengeleme ve işçi ataması problemini çözmek için alt sınırlardan yararlanan tam bir numaralandırma algoritması geliştirmişlerdir. Geliştirilen algoritmaya yeni sınır ve dallar eklendiğinde çözüm açısından daha iyi bir performans sağlanabileceği görülmüştür.

Tablo 1  
Literatür Taraması

Çalışma	Problem Özellikleri			Çözüm Yöntemi
	MHD	İşçi Atama	Problem Tipi	
<i>Çiçek (2016)</i>		✓	Personel tercihlerine göre işçi atama	Karar destek sistemi
<i>Wu, Cai, Li ve Chu (2018)</i>		✓	Yetenek düzeylerine göre kapasite kısıtlı işçi atama	Sürü optimizasyonu ve yapay arı kolonisi algoritması
<i>Tutumlu, Aygün ve Saraç (2020)</i>		✓	Yetenek ve sağlık durumlarına göre işçi ataması	Karma tamsayı doğrusal karar modeli
<i>Özgen (2016)</i>	✓		Çok ve küçük süreli iş elemanının olduğu karmaşık sistemde MHD	En uzun işlem süresi yöntemi, Kilbridge-Wester yöntemi ve göreceli pozisyon ağırlıkları yöntemi
<i>Koltai ve Tatay (2011)</i>	✓	✓	Yetenek düzeylerine göre işçi atama	Matematiksel model
<i>Vilà ve Pereira (2014)</i>	✓	✓	Klasik MHD ve işçi atama	Numaralandırma algoritması
<i>Mura ve Dini (2016)</i>	✓	✓	Yetenek düzeylerine göre işçi atama	Genetik Algoritma
<i>Roshani ve Giglio (2016)</i>	✓	✓	Çok çalışanlı hatlarda MHD ve işçi atama	Karışık tamsayı matematiksel model ve metasezgisel yaklaşım
<i>Lian, Liu, Li ve Yin (2018)</i>		✓	Seru üretimde beceri ve yeterliliklere bağlı olarak çok yetenekli işçi atama	Matematiksel model ve metasezgisel algoritma
<i>Yılmaz ve Demir (2019)</i>	✓	✓	İşin yapılma süresinin homojen olmadığı durumlarda işçi atama	Matematiksel model
<i>Öksüz, Büyükoğuzkan ve Satoğlu (2017)</i>	✓	✓	U tipi MHD ve performans dayalı işçi atama	Matematiksel model, yapay arı kolonisi algoritması ve genetik algoritma
<i>Yılmaz (2020)</i>		✓	Seru üretim sisteminde işçi çizelgeleme	Matematiksel model ve genetik algoritma tabanlı çözüm yöntemleri
<i>Liu, Liu, Chu, Zheng ve Chu (2021)</i>	✓	✓	Çok sayıda iş yapma yeteneğine sahip işçilerin ataması	İki amaçlı karma tamsayı doğrusal matematiksel model, çok amaçlı genetik algoritma ve tavlama benzetimi

Mura ve Dini (2016) geliştirdikleri bir genetik algoritma ile montaj hattı dengeleme problemini ele alarak iş istasyonu sayısını, montaj ekipmanlarının

sayısını ve operasyonların doğru bir şekilde gerçekleştirilebilmesi için gereken yüksek performanslı işçi sayısını en aza indirmeyi amaçlamışlardır. Roshani ve Giglio (2016), bir grup

işçinin aynı ürün üzerinde aynı anda farklı işlemler gerçekleştirdiği çok operatörlü montaj hatları için hat dengeleme problemini ele alarak çevrim süresinin enküçüklenmesi amacıyla karışık-tamsayılı bir matematiksel programlama modeli önermişlerdir. Ele alınan problem NP zor olduğundan, tavlama benzetimine dayanan iki meta-sezgisel yaklaşım geliştirmişlerdir. Öksüz ve diğ. (2017), U tipi montaj hatlarının dengelenmesi ve işçi atama problemi üzerine çalışmışlardır. İşçi atamaları yapılırken işçilerin farklı performanslara sahip olduğu göz önünde bulundurulmuştur. Problemin çözümü için öncelikle doğrusal olmayan bir matematiksel model önerilmiş ve doğrusallaştırılmıştır. Büyük boyutlu problemlerin çözümü için ise, Yapay Arı Kolonisi Algoritması ve Genetik Algoritma geliştirilmiştir. Literatürdeki test örneklerinden yararlanılarak önerilen ilerisezgisel algoritmaların performansı ortaya koyulmuştur. Lian ve diğ. (2018) becerileri ve yeterliliklerine bağlı olarak serü üretimde çok yetenekli işçi ataması üzerine çalışmışlardır. Serü üretim, saniyeler süren işlemler için ayrı ayrı işçi atamasındansa ürünün tamamını üreten çok yetenekli veya eğitilmiş işçilerin atanması anlamına gelmektedir. Serular ve işçiler arası işyükü dengesini sağlamak amacıyla bir matematiksel model önerilmiştir ancak problemin NP-zor olması nedeniyle matematiksel model yanında bir metasezgisel algoritma geliştirilmiştir. Yılmaz ve Demir (2019) montaj hattı dengeleme ve işçi atama probleminde, işleri yapma süresi eşit olmayan işçileri de göz önünde bulundurmıştır. Çevrim süresini enküçüklemeyi amaçlayan bir matematiksel model geliştirmişlerdir. Yılmaz (2020), operasyonların montaj hücrelerinde gerçekleştirildiği bir serü üretimdeki işçi çizelgeleme problemini ele almıştır. Öncelikle kapsamlı bir matematiksel model önerilmiş ve küçük boyutlu problemler için eniyi çözümler elde edilmiştir. Büyük boyutlu problemler için ise genetik algoritma tabanlı çözüm yöntemlerinden yararlanılmıştır. Liu ve diğ. (2021), montaj hattı dengeleme ve çok sayıda iş yapma yeteneğine sahip işçilerin olduğu bir işçi atama problemini ele almışlardır. İşçi ve üretim maliyetlerinin yanısıra enerji tüketiminin enküçüklenmesi amaçlanmıştır. İki amaçlı karma tamsayılı doğrusal bir matematiksel model geliştirilmiştir. Küçük boyutlu

problemlerde Pareto çözümleri elde edebilmek için E-kısıt yöntemi kullanılmıştır. Büyük boyutlu problemler için ise, çok amaçlı genetik algoritma ve tavlama benzetiminden yararlanılmıştır.

Erişilebilen literatüre bakıldığında montaj hattı dengeleme ve işçi atama problemlerinin birlikte ele alındığı çok az çalışma olduğu görülmektedir. Bu çalışmada, bir tekstil fabrikasının dikim atölyesindeki montaj hattı dengeleme ve performansa dayalı işçi atama problemleri birlikte ele alınmıştır. Problemin çözümü için M1, M2 ve M3 olmak üzere üç farklı matematiksel model geliştirilmiştir ve önerilen modeller kullanılarak fabrikadan alınan gerçek verilerle en iyi çözümlere ulaşılmıştır.

### 3. Yöntem

Bu çalışmada, bir tekstil fabrikasının dikim atölyesindeki montaj hattı dengeleme ve işçi atama problemleri birlikte ele alınmıştır. Atölyede pantolon ve ceket hazırlanan iki farklı hat yer almaktadır. Dikim atölyesindeki ceket hattı başlangıçta üç kola ayrılmaktadır. Bunlar; beden hazırlama, astar hazırlama ve kol hazırlama hatlarıdır. Paralel çalışan bu hatlar etek-tulum hattında birleşmektedir. Aynı şekilde pantolon hattında da ön beden ve arka beden hatları paralel olarak üretim yapmaktadır. Sonrasında montaj hattında birleşmektedir.

Bunların yanı sıra giyim sektöründe moda ve mevsim faktörlerinden kaynaklı çok fazla çeşit bulunmaktadır. Bu çeşitlilik hazırlık ve işlem sürelerinin değişkenliğine sebep olmaktadır. Ek olarak her modelde yer almayan apartura punta, süs iliği dikme, yama, kola düğme dikme (monogram) vb. işlemler de ekstra süreye sebep olmaktadır.

Pantolon hattı ön beden hazırlama, arka beden hazırlama, montaj ve pres hatlarından oluşmaktadır. Sırasıyla bu hatlarda 30, 21, 82, 15 olmak üzere toplam 148 çalışan bulunmaktadır. Her hatta bulunan işçilere o hat içinde bir sıra numarası atanmıştır. Pantolon hattının ön beden, arka beden, montaj ve pres işlemlerinin tanımları, işlem süreleri ve aralarındaki öncelik ilişkileri Şekil 1'de yer almaktadır.

NO	ÖNCEKİ OPERASYON	OPERASYON ADI	İŞLEM SÜRESİ (DK)	NO	ÖNCEKİ OPERASYON	OPERASYON ADI	İŞLEM SÜRESİ (DK)
<b>ÖN BEDEN HAZIRLAMA</b>							
1	-	Yan Cep Yapıştırma	0,29	1	-	Ön-Arka Eşleme	0,28
2	1	Ön Overlok	2,35	2	1	Yan Çatma	1,19
3	-	Pervaz Overlok	0,18	3	2	Ara Çatma Otomat	0,96
4	2,3	Pervaz Takma	1,21	4	3	Yan Ara Dikiş Açma	0,97
5	4	Yan Cep Gazi	0,50	5	-	Köprü Hazırlama	0,46
6	5	Yan Cep İç Geçme	0,33	6	4,5	Köprü Tutturma	0,49
7	-	Yan Cep Karşılık Overlok	0,48	7	-	Korset Yapma	0,42
8	7	Yan Karşılık Otomat	0,29	8	7	Korsete Tela Yapıştırma	0,18
9	6,8	Yan Cep Tutturma	1,36	9	8	Kemer Astarı Takma	0,37
10	9	Yan Cep Puntarez	0,33	10	9	Etiket Hazırlama	0,38
11	10	Yan Cep Astar Bağlama	0,30	11	10	Kemere Etiket Tutturma	0,36
12	11	Yan Cep Torbalama	0,45	12	11	Kemere Etiket Dikme	0,29
13	12	Yan Cep Kapama	0,57	13	12	Kemer Kıрма Ütü	0,25
14	-	Sol Patlete Fermuar Dikme	0,22	14	13	Kemer Kesme/Kemer Çizme	0,34
15	14	Sağ Patlete Fermuar Dikme ve Ortadan Ayırma	0,21	15	6,14	Kemer Eşleme	0,20
16	13,15	Sağ ve Sol Patlet Takma	0,83	16	15	Kemer Takma	1,30
17	16	Ön Kontrol	0,48	17	16	Kemer Kontrol	0,65
				18	17	Sol Patlet Biye Çekme	0,38
				19	18	Patlet Astarı Ütü	0,20
				20	19	Sağ Patlete Astar Dikme	0,49
				21	20	Korset Kapama	0,42
				22	21	Sağ Patlet Ütü	0,37
				23	22	Korset Çevirme	0,19
				24	23	Korset Pres	0,37
				25	24	Sol Patlet Gazi	0,38
				26	25	Kanca-Kopça Takma	0,56
				27	26	Sağ Patlet Kapama	0,34
				28	27	Stoper (Zimba) Vurma	0,38
				29	28	Arka Çatma İşaretleme	0,32
				30	29	Arka Çatma	0,96
				31	30	Arka Dikiş Açma	0,71
				32	31	Köprü Altı Puntarez	0,45
				33	32	Kemer Kapama	0,50
				34	33	Patlet Puntarez	0,35
				35	34	Köprü Üstü Puntarez	0,73
				36	35	Kemer Punta	0,56
				37	36	Ara Punta	0,71
				38	37	İlik Açma	0,29
				39	38	Düğme Dikme	0,68
				40	39	Düğme Sarma	0,17
				41	40	Köprü Kesme	0,31
				42	41	Paça Overlok	0,31
				43	42	Paça Ekstrafor	0,50
				44	43	Paça Baskı Pres	0,48
				45	44	Paça Baskı	0,56
				46	45	İplik Temizleme	2,14
				47	46	Pantolon Çevirme	0,20
				48	47	Ara Kontrol	0,98
<b>ARKA BEDEN HAZIRLAMA</b>							
1	-	Arka Overlok	0,41	23	22	Korset Çevirme	0,19
2	1	Arka Sason Dikme	0,51	24	23	Korset Pres	0,37
3	2	Sason Ortalama (İşaretleme)	0,19	25	24	Sol Patlet Gazi	0,38
4	3	Arka Sason Ütü ve Yapışkan Yapıştırma	0,61	26	25	Kanca-Kopça Takma	0,56
5	-	Arka Karşılık Otomat	0,26	27	26	Sağ Patlet Kapama	0,34
6	-	Arka Cep Flato Overlok	0,18	28	27	Stoper (Zimba) Vurma	0,38
7	4,5,6	Arka Flato Otomat	0,56	29	28	Arka Çatma İşaretleme	0,32
8	7	Arka Cep Çevirme	0,19	30	29	Arka Çatma	0,96
9	8	Arka Cep Ütü	1,01	31	30	Arka Dikiş Açma	0,71
10	9	Arka Cep Puntarez	0,54	32	31	Köprü Altı Puntarez	0,45
11	10	Arka Cep İç Geçme	0,33	33	32	Kemer Kapama	0,50
12	11	Arka Cep Overlok	0,54	34	33	Patlet Puntarez	0,35
13	12	Arka Cep Kapama	0,35	35	34	Köprü Üstü Puntarez	0,73
14	13	Arka Kontrol	0,40	36	35	Kemer Punta	0,56
				37	36	Ara Punta	0,71
				38	37	İlik Açma	0,29
				39	38	Düğme Dikme	0,68
				40	39	Düğme Sarma	0,17
				41	40	Köprü Kesme	0,31
				42	41	Paça Overlok	0,31
				43	42	Paça Ekstrafor	0,50
				44	43	Paça Baskı Pres	0,48
				45	44	Paça Baskı	0,56
				46	45	İplik Temizleme	2,14
				47	46	Pantolon Çevirme	0,20
				48	47	Ara Kontrol	0,98
<b>PRES</b>							
1	-	Paça Pres	0,48	43	42	Paça Ekstrafor	0,50
2	1	Kemer Pres	1,70	44	43	Paça Baskı Pres	0,48
3	2	Kemere Etiket Takma	0,86	45	44	Paça Baskı	0,56
4	3	Son Kontrol	1,30	46	45	İplik Temizleme	2,14
5	4	Etiket Takma	0,45	47	46	Pantolon Çevirme	0,20
6	5	Barkod Okutma	0,17	48	47	Ara Kontrol	0,98

Şekil 1. Pantolon hattındaki işlemler

Fabrikadan işçilerin 30 gün için günlük yüzdeler performans değerleri alınmıştır. İşin, %100 performans ile standart süresinde tamamlandığı kabul edilerek her işçinin yüzde performans değeri ile o işin standart süresi arasında ters orantı kurulmuştur. Ters orantı kurulmasının sebebi performans değeri arttıkça işçinin işi yapma süresinin azalacak olmasıdır. İşçilerin performansına göre işleri yapma süreleri aşağıdaki formül ile hesaplanmıştır.

$$q_{ik} = \frac{100 \times t_i}{p_k} \quad (1)$$

Bu denklemde  $q_{ik}$   $k$ . işçinin  $i$ . işi yapma süresi,  $t_i$  işlem süresi,  $p_k$  ise  $k$ . işçinin performans değeridir.

Örnek olarak pantolon hattında yer alan ön beden hazırlama bölümünde çalışan 10 işçinin her bir işi yapma süreleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2

Pantolon hattı için hattaki ilk 10 işçinin performans değerlerine göre işleri yapma süreleri

İşçi	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
İş										
1	2,97	1,77	3,85	2,53	3,18	2,42	2,64	5,60	2,73	2,28
2	1,72	1,02	2,23	1,46	1,84	1,40	1,53	3,24	1,58	1,32
3	1,53	0,91	1,98	1,30	1,64	1,25	1,36	2,88	1,41	1,17
4	1,05	0,62	1,36	0,89	1,12	0,86	0,93	1,98	0,97	0,81
5	0,72	0,43	0,93	0,61	0,77	0,59	0,64	1,36	0,66	0,55
6	0,63	0,38	0,82	0,54	0,68	0,52	0,56	1,19	0,58	0,49
7	0,61	0,36	0,79	0,52	0,65	0,49	0,54	1,14	0,56	0,47
8	0,61	0,36	0,79	0,52	0,65	0,49	0,54	1,14	0,56	0,47
9	0,57	0,34	0,74	0,48	0,61	0,46	0,51	1,07	0,52	0,44
10	0,42	0,25	0,54	0,35	0,45	0,34	0,37	0,79	0,38	0,32
11	0,42	0,25	0,54	0,35	0,45	0,34	0,37	0,79	0,38	0,32
12	0,38	0,23	0,49	0,32	0,41	0,31	0,34	0,71	0,35	0,29
13	0,37	0,22	0,48	0,31	0,39	0,30	0,33	0,69	0,34	0,28
14	0,37	0,22	0,48	0,31	0,39	0,30	0,33	0,69	0,34	0,28
15	0,28	0,17	0,36	0,24	0,30	0,23	0,25	0,52	0,26	0,21
16	0,27	0,16	0,34	0,23	0,28	0,22	0,24	0,50	0,24	0,20
17	0,23	0,14	0,30	0,19	0,24	0,19	0,20	0,43	0,21	0,17

Montaj hattı dengeleme ve performansa dayalı işçi atama problemi için üç farklı model geliştirilmiştir. Bunlardan ilki (M1), iş ve işçi sayıları eşit alınarak her işe bir işçinin atanmasını sağlayan ve işlerin toplam tamamlanma süresini enküçükleyen doğrusal bir matematiksel modeldir. İkinci modelde (M2), işletmeden alınan veriler doğrultusunda her işe bir veya birden fazla işçi atanabilecek şekilde doğrusal olmayan bir matematiksel model geliştirilmiştir. Son model ise (M3), doğrusal olmayan modele (M2) bazı kısıtlar eklenerek elde edilmiş doğrusal bir modeldir. Önerilen montaj hattı dengeleme modellerinin dayandığı varsayımlar aşağıda verilmiştir:

- Görevlere ait işlem süreleri deterministiktir.

- İşlemler öncelik ilişkileri dikkate alınarak iş istasyonlarına atanır.
- $m$  adet iş istasyonundan oluşan seri üretim hatları söz konusudur.

### 3.1 İşçi performansları dikkate alınarak oluşturulan doğrusal montaj hattı dengeleme ve işçi atama matematiksel modeli (M1)

M1 modeli, daha az işçi kaynağı olduğu durumlarda işçilerin performansları dikkate alınarak her işe bir işçi atanmasını sağlayan doğrusal bir modeldir. Probleme ait indisler, parametreler, karar değişkenleri ve kısıtlar aşağıda verilmiştir.

**İndisler** $i, r, s$ : görevler,  $i = \{1, \dots, n\}$  $j$ : iş istasyonları,  $j = \{1, \dots, m\}$  $k$ : işçiler,  $k = \{1, \dots, l\}$ **Parametreler** $n$ : toplam görev sayısı $m$ : toplam iş istasyonu sayısı $l$ : toplam işçi sayısı $t_i$ :  $i$ . görevin işlem süresi $P$ : öncelik ilişkileri kümesi $(r,s) \in P$ : bir öncelik ilişkisi;  $r$  görevi  $s$  görevinin komşu öncülü $q_{ik}$ :  $k$ . işçinin  $i$ . işi yapma süresi $C$ : çevrim süresi $B^{max}$ : güncel işlem süreleri toplamının aldığı maksimum değer $Z^{max}$ : hatta açılacak maksimum istasyon sayısı**Karar Değişkenleri** $x_{ijk}$ :  $i$ . görev  $j$ . istasyona ve  $k$ . işçiye atanırsa 1, diğer durumda 0. $z_j$ :  $j$ . istasyon açılacaksa 1, diğer durumda 0. $b_i$ :  $i$ . işe atanan işçinin performansına bağlı işin güncel işlem süresi**Amaç Fonksiyonu**

$$Enk f = \sum_i b_i / B^{max} + \sum_j z_j / Z^{max} \quad (2)$$

Problemin amaç fonksiyonu (2), işlerin toplam tamamlanma süresini ve açılacak istasyon sayısını enküçüklemeye yöneliktir. Her iki amaç fonksiyonunun birimleri farklı olduğundan normalleştirmeye ihtiyaç duyulmuştur. Bu sebeple, her amaç fonksiyonu, alabileceği en büyük değere bölünmüştür.

**Kısıtlar**

$$\sum_j \sum_k x_{ijk} = 1 \quad \forall i \quad (3)$$

$$\sum_i \sum_j x_{ijk} = 1 \quad \forall k \quad (4)$$

Kısıt (3), bütün işlerin bir istasyona ve mutlaka bir işçinin bir işe atanmasını sağlamaktadır. Kısıt (4), bütün işçilerin işlere ve istasyonlara bir kere atanmasını garanti etmektedir.

$$\sum_i \sum_k x_{ijk} q_{ik} \leq C \quad \forall j \quad (5)$$

İstasyona atanan işlerin yapılma süresi, istasyona atanan işçiler ve onların performansı üzerinden hesaplanmaktadır. Bu sürenin, çevrim süresini aşmaması gerektiği kısıt (5)'te ifade edilmiştir.

$$\sum_j \sum_k j(x_{rjk} - x_{sjk}) \leq 0 \quad \forall (r,s) \in P \quad (6)$$

Öncelik ilişkileri kısıtı (5), öncülü olan bir işin öncülü atandıktan sonra istasyona atanmasını sağlamaktadır.

$$\sum_j \sum_k x_{ijk} q_{ik} = b_i \quad \forall i \quad (7)$$

Bir işin işlem süresi, işin atandığı istasyona, işe atanan işçiye ve işçinin o işi yapma süresine göre kısıt (7) ile belirlenir.

$$x_{ijk} \leq z_j \quad \forall i, j, k \quad (8)$$

Kısıt (8), bütün işlerin ve işçilerin, yalnızca açılan istasyonlara atanmasını garanti etmektedir.

$$x_{ijk}, z_j \in \{0,1\} \quad \forall i, j, k \quad (9)$$

$$b_i \geq 0 \quad \forall i \quad (10)$$

M1'deki karar değişkenlerinin işaret kısıtları, (9) ve (10)'da verilmiştir.

M1 modelinde  $(n^2 + mnl + 2n + m + l)$  tane kısıt,  $(mnl + m)$  tane 0-1 tamsayı karar değişkeni ve  $(n)$  tane pozitif karar değişkeni bulunmaktadır.

### 3.2 İşçi performansları ve sayıları dikkate alınarak oluşturulan doğrusal olmayan montaj hattı dengeleme ve işçi atama matematiksel modeli (M2)

İşçilerin performansları ve işçi sayıları dikkate alınarak oluşturulan M2 modeli doğrusal olmayan bir modeldir. İşletmeden alınan gerçek iş ve işçi

sayıları kullanılarak geliştirilmiştir. Bu modelde, işçiler performans değerlerine bağlı olarak işlere atandığından ve her atamadan sonra atanan işçi sayısına göre işler için yeni bir sürenin belirlenmesinden dolayı doğrusallık bozulmaktadır. M2 modelinde, M1 modelinde tanımlanan indis, parametre ve karar değişkenlerine ek olarak aşağıdaki karar değişkenleri kullanılmıştır.

#### Karar Değişkenleri

$\theta_{ij}$ :  $i$ . görev  $j$ . istasyona atanırsa 1, diğer durumda 0.  
 $y_{ik}$ :  $k$ . işçi  $i$ . işe atanırsa 1, diğer durumda 0.

Modelin kısıtları ve amaç fonksiyonu aşağıda verilmiştir.

#### Amaç Fonksiyonu

$$Enkf = \sum_i b_i / B_{max} + \sum_j z_j / Z_{max} \quad (2)$$

Problemin amaç fonksiyonu (2), işlerin toplam tamamlanma süresini ve açılacak istasyon sayısını enküçüklemeye yöneliktir. Her iki amaç fonksiyonunun birimleri farklı olduğundan normalleştirmeye ihtiyaç duyulmuştur. Bu sebeple, her amaç fonksiyonu, alabileceği en büyük değere bölünmüştür.

#### Kısıtlar

$$\sum_j \theta_{ij} = 1 \quad \forall i \quad (11)$$

Kısıt (11), bütün işlerin istasyonlara atanmasını garanti etmektedir.

$$\sum_i b_i \theta_{ij} \leq C \quad \forall j \quad (12)$$

Kısıt (12), istasyona atanan işler, istasyona atanan işçiler ve onların performansı üzerinden, belirlenen çevrim süresini aşmayacak şekilde atama yapılmasını sağlayan kısıttır.

$$\sum_j j(\theta_{rj} - \theta_{sj}) \leq 0 \quad \forall (r, s) \in P \quad (13)$$

Öncelik ilişkileri kısıtı (13), öncülü olan bir işin öncülü atandıktan sonra istasyona atanmasını sağlamaktadır.

$$\sum_i y_{ik} = 1 \quad \forall k \quad (14)$$

Kısıt (14), bütün işçilerin mutlaka bir işe atanmasını garanti etmektedir.

$$\sum_k y_{ik} \geq 1 \quad \forall i \quad (15)$$

Her işe en az bir işçi atanmasını kısıt (15) sağlamaktadır.

$$b_i \left( \sum_k \frac{y_{ik}}{q_{ik}} \right) = 1 \quad \forall i \quad (16)$$

Bir işe atanan işçilerin o işi birlikte yapma süresi, o işe atanan işçi sayısına ve atanan işçilerin o işi yapma sürelerine bağlı olarak kısıt (16)'da hesaplanmaktadır.

$$\theta_{ij} \leq z_j \quad \forall i, j \quad (17)$$

Kısıt (17), işlerin yalnızca açılan istasyonlara atanmasını garanti etmektedir.

$$\theta_{ij}, z_j, y_{ik} \in \{0,1\} \quad \forall i, j, k \quad (18)$$

$$b_i \geq 0 \quad \forall i \quad (10)$$

M2 modelinin işaret kısıtları kısıt (18) ve (10)'da verilmiştir.

Hatlardaki toplam işçi sayısı ve işçilerin performansları dikkate alınarak geliştirilen M2 modelinde, bir işe birden fazla işçi atanması mümkündür. Bir işe, birden fazla işçinin atanması durumunda o işe atanan işçilerin işi birlikte yapma sürelerinin hesaplanabilmesi ve işin güncel işlem süresinin bulunması için formül (19), M2 modeline uyarlanmıştır.

$$t \left( \frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right) = 1 \quad (19)$$

Formülde yer alan  $a$ , 1. işçinin işi yapma süresini;  $b$ , 2. işçinin işi yapma süresini;  $t$  ise, 1. ve 2. işçinin işi birlikte yapma süresini ifade etmektedir.



Her bir işin işlem süresinin genellikle işlerin standart süresine göre daha az olduğu söylenebilir. M2 modeli, işlem süresi en uzun olan işlere birden fazla sayıda işçi ataması yaparak ve performansı yüksek olan işçileri daha kısa süreleri işlere tek başına atayarak işlerin toplam tamamlanma süresinin azaltılmasını sağlamıştır.

M2 modelinde  $(n^2 + mn + 3n + m + l)$  tane kısıt,  $(nm + m + nl)$  tane 0-1 tamsayı karar değişkeni ve  $(n)$  tane pozitif karar değişkeni bulunmaktadır.

### 3.3 İşçi performansları ve sayıları dikkate alınarak sezgisel kısıtlar eklenen doğrusal montaj hattı dengeleme ve işçi atama matematiksel modeli (M3)

Doğrusal olmayan matematiksel modellerde çözüm elde edilmesi doğrusal modellere göre daha zordur ve daha uzun sürmektedir. Bu sebeple, M2 modelindeki kısıtlar dikkate alınarak ve birtakım kısıtlar eklenerek yine bir işe birden fazla işçi atanabilecek şekilde yeni bir doğrusal model geliştirilmiştir.

M3 modelinde, işlere atanması gereken işçi sayıları hattaki toplam işçi sayısına ve işin süresine bağlı olarak hesaplanmıştır. İşlere atanan işçilerin performansına dayalı yeni bir süre hesaplanması yerine, o işe atanan işçilerin işleri yapma sürelerinin ortalaması hesaplanarak işçi ataması yapılmıştır. M3 modelinde, M1 ve M2 modellerinde tanımlanan indis, parametre ve karar değişkenlerine ek olarak aşağıdaki karar değişkeni kullanılmıştır.

#### Parametreler

$m_i$ :  $i$ . işin işlem süresine göre atanması gereken işçi sayısı

$U^{max}$ : ortalama işlem süreleri toplamının maksimum değeri

#### Karar Değişkeni

$u_i$ :  $i$ . işe atanan işçilerin performansına ve atanan işçi sayısına bağlı olarak işin ortalama işlem süresi

#### Amaç Fonksiyonu

$$Enk f = \sum_i u_i / U^{max} + \sum_j z_j / Z^{max} \quad (20)$$

Problemin amaç fonksiyonu (20), hat boyunca açılacak istasyon sayısını ve bir işe atanan işçilerin o işi yapma sürelerinin ortalamasının toplamını enküçükmektedir. Her iki amaç fonksiyonunun birimleri farklı olduğundan normalleştirmeye ihtiyaç duyulmuştur. Bu sebeple, her amaç

fonksiyonu, alabileceği en büyük değere bölünmüştür.

#### Kısıtlar

$$\sum_i t_i \theta_{ij} \leq C \quad \forall j \quad (21)$$

Açılan her bir istasyona atanan işlerin süreleri toplamının çevrim süresini aşmaması gerektiği kısıt (21)'de ifade edilmiştir.

$$\sum_k y_{ik} = m_i \quad \forall i \quad (22)$$

Kısıt (22), her işe, atanması gereken işçi sayısı ( $m_i$ ) kadar işçi atanmasını sağlamaktadır. Her işe atanması gereken işçi sayısı, toplam işçi sayısının toplam işlem süresine bölünmesiyle elde edilen oranın her işin işlem süresiyle çarpılması ile hesaplanmıştır.

$$\frac{\sum_k y_{ik} q_{ik}}{m_i} = u_i \quad \forall i \quad (23)$$

Kısıt (23)'te bir işe atanan işçilerin o işi yapma sürelerinin ortalaması bulunmaktadır. Bu ortalamanın hesaplanmasının sebebi bir işe atanan işçilerin o işi birlikte yapma süreleriyle doğru orantılı olarak artması ya da azalmasıdır.

$$u_i \geq 0 \quad \forall i \quad (24)$$

$u_i$  karar değişkeninin işaret kısıtı (24)'te verilmiştir.

$$\sum_j \theta_{ij} = 1 \quad \forall i \quad (11)$$

Kısıt (11), bütün işlerin istasyonlara atanmasını garanti etmektedir.

$$\sum_j j(\theta_{rj} - \theta_{sj}) \leq 0 \quad \forall (r, s) \in P \quad (13)$$

Öncelik ilişkileri kısıtı (13), öncülü olan bir işin öncülü atandıktan sonra istasyona atanmasını sağlamaktadır.

$$\sum_i y_{ik} = 1 \quad \forall k \quad (14)$$

Kısıt (14), bütün işçilerin mutlaka bir işe atanmasını garanti etmektedir.

$$\theta_{ij} \leq z_j \quad \forall i, j \quad (17)$$

Kısıt (17), işlerin yalnızca açılan istasyonlara atanmasını garanti etmektedir.

$$\theta_{ij}, z_j, y_{ik} \in \{0,1\} \quad \forall i, j, k \quad (18)$$

$$u_i \geq 0 \quad \forall i \quad (25)$$

M3 modelinin işaret kısıtları kısıt (18) ve (25)'te verilmiştir.

M3 modelinde  $(n^2 + mn + 4n + m + l)$  tane kısıt,  $(nm + m + nl)$  tane 0-1 tamsayı karar değişkeni ve  $(n)$  tane pozitif karar değişkeni bulunmaktadır.

Doğrusal olmayan modeli doğrusal hale getirebilmek amacıyla baziek kısıtlar yazılmıştır. Bu kısıtlar sayesinde karar değişkeni olan ifadelerden bazıları parametreye dönüştürülmüştür. İlk olarak, doğrusal olmayan model her işin süresine göre atanacak işçi sayısını kendisi belirlerken bu modelde her işe kaç işçi atanması gerektiğinin hesaplandığı bir formül kullanılmıştır. Bir diğeri ise bir işe atanan işçilerin o işi birlikte yapma süreleri

daha önce de belirtildiği gibi doğrusallığı bozduğu için bu modelde aynı atama kriterlerini sağlayacak bir değer belirlenmiştir. Bu değer, her iş için o işe atanan işçilerin işi yapma sürelerinin ortalaması olarak ele alınmıştır. Bu ortalama, M2 modelinde yer alan işçilerin işi birlikte yapma süresi ile doğru orantılı olarak artmakta ya da azalmaktadır.

#### 4. Bulgular

Geliştirilen M1, M2 ve M3 matematiksel modelleri pantolon hattı ön beden, arka beden, montaj ve pres bölümleri için GAMS programında çözdürülmüştür. M1 ve M3 modelinde CPLEX çözücüsü, M2 modelinde SBB çözücüsü kullanılmıştır. Her bölüm için elde edilen sonuçlar sırasıyla aşağıda verilmiştir.

##### 4.1 Pantolon ön beden hattı için matematiksel model çıktıları

Her üç model için pantolon ön beden hattında toplam istasyon sayısı, işlere atanan işçiler, toplam tamamlanma süresi ve GAMS çözüm süreleri Tablo 3 ve 4'te verilmiştir. M1 modelinde iş sayısı kadar işçi belirlenerek ön beden hattındaki 30 işçiden en yüksek performanslı 17 işçi probleme dahil edilmiştir. M2 ve M3 modellerinde işletmeden alınan verilere bağlı kalınarak hattaki tüm işçilere yer verilmiştir.

Tablo 3  
Ön beden işçi atamaları

İşler	Atanan İşçiler		
	M1	M2	M3
1	22	12	23
2	14	1,7,18,23,29	1,5,18,22,24,25,30
3	1	25	29
4	13	8,20,26,30	7,10,28
5	7	17,27	13
6	9	4	15
7	11	16	14
8	19	19	27
9	2	13,28	9,11,12,19
10	28	15,21	21
11	24	14	17
12	4	11	6
13	10	3,9	3,20
14	12	10	26
15	15	5	8
16	16	2,24	4,16
17	6	6,22	2

17 iş elemanı bulunan ön beden hattında her üç model için elde edilen işçi atamaları yukarıdaki tabloda verilmiştir. En uzun süreli ikinci işleme M1 modelinde %140 ile en yüksek performanslı işçinin atandığı görülmektedir. M2 modeli ikinci işlem için en fazla sayıda işçi atamasını yapmıştır. Bu sebeple, modelin yüksek performanslı işçileri kısa süreli

işlere tek başlarına atarken, uzun süreli işlere düşük ve orta performanslı işçileri birlikte atadığı söylenebilir. M3 modeli süresi 2,35 dakika olan ikinci işe 7 işçi atanması gerektiğini hesaplayarak düşük ve orta performanslı işçileri atamıştır.

Tablo 4  
Ön beden açılan istasyon sayıları, toplam tamamlanma süreleri ve GAMS çözüm süreleri

	M1	M2	M3
Açılan istasyon sayısı	3	2	3
Toplam tamamlanma süresi	9,61	6,55	7,71
GAMS çözüm süresi (sn)	1,68	44,48	0,49

M2 modelinde diğer iki modele göre açılan istasyon sayısı daha küçük bulunmuştur. İşlere atanan işçiler ve işçi sayıları göz önünde bulundurulduğunda en küçük toplam tamamlanma süresi M2 modelinde elde edilmiştir. M1 modeli her işe bir işçi atadığı için toplam tamamlanma süresi diğer modellere kıyasla daha büyüktür. Doğrusal olmayan M2 modelinin diğer modellere kıyasla GAMS programındaki çözüm süresi daha uzundur. Sezgisel kısıtlar ile oluşturulan doğrusal M3 modelinin çözüm süresini kısalttığı belirgin olarak gözlemlenmiştir.

#### 4.2. Pantolon arka beden hattı için matematiksel model çıktıları

Pantolon arka beden hattında toplam istasyon sayısı, işlere atanan işçiler, toplam tamamlanma süresi ve GAMS çözüm süreleri üç model için Tablo 5 ve 6'da verilmiştir. M1 modelinde arka beden hattındaki 21 işçiden en yüksek performanslı 14 işçi probleme dahil edilmiştir. M2 ve M3 modellerinde işletmeden alınan verilere bağlı kalınarak hattaki tüm işçilere yer verilmiştir.

Tablo 5  
Arka beden işçi atamaları

İşler	Atanan İşçiler		
	M1	M2	M3
1	13	5	5
2	19	10,17	8, 12
3	9	9	17
4	5	7	15, 21
5	6	4	11
6	12	16	20
7	7	3,6	10, 13
8	21	13	14
9	4	8, 14,18	1, 2, 3
10	2	2, 11	9, 18
11	10	12,20	19
12	1	1	6, 16
13	3	19	7
14	15	15, 21	4

M1modelinde, 1,01 dakika ile en uzun işlem süreli dokuzuncu işe performansı en yüksek ve %121 olan işçi atanmıştır. En kısa süreli altıncı işe ise en düşük

performanslı işçi atanmıştır. M2 ve M3 ise dokuzuncu işe en fazla sayıda işçi ataması gerçekleştirmiştir.

Tablo 6  
Arka beden açılan istasyon sayıları, toplam tamamlanma süreleri ve GAMS çözüm süreleri

	M1	M2	M3
Açılan istasyon sayısı	2	2	2
Toplam tamamlanma süresi	6,34	4,10	5,44
GAMS çözüm süresi (sn)	0,926	36,009	0,719

Her üç modelde açılan istasyon sayıları değişmemesine rağmen, M2 modelinde işlerin toplam tamamlanma süresi en küçük olarak bulunmuştur.

#### 4.3 Pantolon montaj hattı için matematiksel model çıktıları

Montaj hattı 48 iş ve 82 işçiden oluştuğundan M2 modeli için GAMS'te sonuç elde edilememiştir. Diğer iki model için çıktılar Tablo 7 ve 8'de verilmiştir. M1 modelinde montaj hattındaki 82 işçiden en yüksek performanslı 48 işçi probleme dahil edilmiştir. M3 modelinde işletmeden alınan verilere bağlı kalınarak hattaki tüm işçilere yer verilmiştir.

Tablo 7  
Montaj işçi atamaları

İşler	Atanan İşçiler		İşler	Atanan İşçiler	
	M1	M3		M1	M3
1	42	67	25	70	50
2	80	5, 54, 63, 64	26	48	11, 73
3	7	24, 30, 41	27	65	65
4	23	12, 58, 76	28	79	59
5	82	69, 72	29	61	10
6	74	33, 34	30	56	4, 38, 61
7	55	46	31	37	28, 37
8	49	75	32	57	80
9	4	26	33	51	13, 15
10	9	56	34	45	74
11	58	51	35	62	48, 82
12	1	14	36	18	19, 25
13	22	29	37	40	18, 40
14	76	57	38	30	32
15	2	8	39	36	70
16	59	9, 20, 21, 53	40	6	77
17	26	35, 68	41	39	2
18	53	62	42	68	6
19	16	78	43	21	3, 66
20	20	47, 81	44	50	17, 52
21	35	60	45	28	27, 71
22	41	36	46	46	1, 16, 22, 31, 42, 49, 79
23	10	43	47	38	44
24	12	7	48	60	39, 45, 55

En uzun süreli 46. işe M1 modeli, performansı en yüksek ve %133 olan işçi atamıştır. M3 modeli ise

46. işe en fazla sayıda işçi ataması yapılması gerektiğini hesaplayarak yedi işçi atamıştır.

Tablo 8  
Montaj açılan istasyon sayıları, toplam tamamlanma süreleri ve GAMS çözüm süreleri

	M1	M2	M3
Açılan istasyon sayısı	7	-	7
Toplam tamamlanma süresi	25,43	-	20,35
GAMS çözüm süresi (sn)	31,131	-	7,337

M2 modeli doğrusal olmadığı için 48 iş ve 82 işçinin bulunduğu montaj hattında GAMS programında hata oluştuğundan sonuç alınamamıştır. Diğer iki model için açılan istasyon sayıları eşit çıkmıştır. Ancak M3 modeli bir işe bir veya birden fazla işçi ataması yapabildiği için daha küçük bir toplam tamamlanma süresi elde edilmiştir.

#### 4.3. Pantolon pres hattı için matematiksel model çıktıları

Geliştirilen modeller için pantolon pres hattında işlere atanan işçiler, toplam istasyon sayısı ve toplam tamamlanma süresi aşağıdaki gibidir. M1 modelinde pres hattındaki 15 işçiden en yüksek performanslı 6 işçi probleme dahil edilmiştir. M2 ve M3 modellerinde işletmeden alınan verilere bağlı kalınarak hattaki tüm işçilere yer verilmiştir.

Tablo 9  
Pres işçi atamaları

İşler	Atanan İşçiler		
	M1	M2	M3
1	13	8, 9	3
2	3	1, 7, 10, 13	5, 6, 9, 12, 13
3	9	2, 5, 12	2, 7, 15
4	4	4, 11, 14	1, 8, 11, 14
5	6	3	4
6	5	6	10

Pantolon için son hat olan preste 1,70 dakika ile en uzun işlem süresine sahip olan ikinci işe M1 modeli en yüksek performanslı işçiyi atamıştır. M2 ve M3

modelleri ise bu işe düşük ve orta performanslı birden fazla işçi ataması yapmıştır.

Tablo 10  
Pres açılan istasyon sayıları, toplam tamamlanma süreleri ve GAMS çözüm süreleri

	M1	M2	M3
Açılan istasyon sayısı	2	1	2
Toplam tamamlanma süresi	4,01	1,99	2,26
GAMS çözüm süresi (sn)	0,808	31,578	0,526

Pres hattı için açılan istasyon sayısını enküçüklemeyi amaçlayan her üç modele bakıldığında en küçük istasyon sayısı M2 modelinde elde edilmiştir. Aynı şekilde toplam tamamlanma süresini de enküçüklemeye çalışan modellerden diğer hatlarda olduğu gibi M2 modelinde en küçük değere ulaşılmıştır.

Bu çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

## 5. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada, bir tekstil fabrikasındaki montaj hattı dengeleme ve işçi atama problemleri birlikte ele alınmıştır. Problemin çözümü için M1, M2 ve M3 olmak üzere üç farklı matematiksel model geliştirilmiştir. Bu üç model ile, pantolon hattı verileri kullanılarak çözüm elde edilmiştir. M1 modelinde, iş ve işçi sayısı eşit alınarak açılacak istasyon sayısı ve işlerin tamamlanma süresi enküçüklenerek montaj hattı dengeleme ve işçi ataması yapılmıştır. M2 modelinde, fabrikadan alınan veriler doğrultusunda pantolon hattındaki gerçek işçi sayıları kullanılmıştır. M1 modelinde olduğu gibi açılacak istasyon sayısı ve işlerin

tamamlanma süresinin enküçüklenmesi amaçlanmıştır. M3 modeli bir işe birden fazla işçi atanabilecek şekilde M2 modeline alternatif olarak geliştirilmiştir. Amaç fonksiyonu diğer modellerden farklı olarak açılacak istasyon sayısını ve bir işe atanan işçilerin o işi yapma sürelerinin ortalamasının toplamını enküçükmektedir. Modele her işin işlem süresine göre o iş için gerekli işçi sayısını hesaplayan bir formül eklenmiştir.

Geliştirilen üç model GAMS programında çözdürülerek sonuçlar elde edilmiştir. 48 işlemin ve 82 işçinin bulunduğu montaj bölümünde, M2 modeli ile çözüme ulaşılamamıştır. Buna alternatif olarak M3 modelinin kullanılması önerilmektedir. Her üç modelde de iş ve işçi sayıları eşit alındığında modeller eşdeğer olmaktadır. Yine her üç modelde işlerin toplam tamamlanma süresinin standart duruma göre azaldığı gözlemlenmiştir. Ön beden, arka beden ve pres bölümleri için en küçük toplam tamamlanma süresi M2 modelinde elde edilmiştir. M2 modeli gerçeğe daha yakın olmasına ve daha iyi sonuçlar vermesine rağmen montaj bölümü gibi büyük boyutlu problemlerde sonuç vermemektedir. M3 modeli ile pantolon hattındaki her bölüm için bir pantolonun toplam tamamlanma süresi hesaplanabilmektedir. Bu nedenle, işletmede yapılan montaj hattı dengeleme ve performansa

dayalı işçi atama uygulamasında M3 modelinin kullanılması önerilmektedir.

Standart duruma göre bir pantolon üretimi 46,5 dakika sürmektedir. M3 modeli kullanıldığında süre 35,76 dakika olarak elde edilmiştir. Buna göre bir pantolon için toplam tamamlanma süresi 10,74 dakika kısalmıştır. Hattın dengelenmesi ve performans dayalı işçi atamaları sayesinde üretim hızı ve işgücü verimliliği artmıştır.

Çalışma bir tekstil işletmesindeki montaj hattı dengeleme ve işçi atama problemine odaklanmıştır. Ancak kolaylıkla farklı işletmelerdeki bu tür problemlere uygulanabilir. Özellikle M3 modeli ile bir işe farklı performansla sahip işçilerin atanabildiği problemlere optimal çözüm türetilebilir. Daha büyük boyutlu problemlerle karşılaşılabildiği durumda genetik algoritma, tavlama benzetimi gibi metasezgisel çözüm yöntemlerine başvurulabilir.

### Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

### Yazarların Katkıları

Bu çalışmada; Emine AKYOL ÖZER, Elif Ecem COŞKUN ve Özüm BULUT, matematiksel modellerin geliştirilmesi, deneysel sonuçların yorumlanması, makalenin yazılması, Elif Su TOY, bilimsel yayın taraması, problemin tespit edilmesi ve gözlemlenmesi konularında katkı sağlamıştır.

### Kaynakça

- Çiçek, İ. (2016). *Jandarma genel komutanlığı için personel atama süreci ve karar destek sistemi* (Yüksek Lisans Tezi). Gazi Üniversitesi Bilişim Enstitüsü, Ankara. Erişim adresi: <https://dspace.gazi.edu.tr/handle/20.500.12602/145912>
- Koltai, T., & Tatay, V. (2011). Formulation of simple workforce skill constraints in assembly line balancing models. *Social and Management Sciences*, 19(1), 43-50. doi: <https://doi.org/10.3311/pp.so.2011-1.06>
- Lian, J., Liu, C., Li, W., & Yin, Y. (2018). A multi-skilled worker assignment problem in seru production systems. *Computers & Industrial*

*Engineering*, 118, 366-382. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.02.035>

- Liu, R., Liu, M., Chu, F., Zheng, F., & Chu, C. (2021). Eco-friendly multi-skilled worker assignment and assembly line balancing. *Computers & Industrial Engineering*, 151, 106944. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106944>
- Mura, M., & Dini, G. (2016). Worker skills and equipment optimization in assembly line balancing by a genetic approach. *6th CIRP Conference on Assembly Technologies and Systems*. 44, s. 102-107. Pisa: Science Direct. doi: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.02.033>
- Öksüz, M. K., Büyüközkan, K., & Satoğlu, Ş. I. (2017). U-shaped assembly line worker assignment and balancing problem: A mathematical model and two meta-heuristics. *Computers & Industrial Engineering*, 112, 246-263. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.08.030>
- Özgen, T. (2016). *Gömlek üretiminde optimum hat dengeleme yönteminin araştırılması* (Yüksek Lisans Tezi). Bursa. Erişim adresi: <http://hdl.handle.net/11452/10959>
- Roshani, A., & Giglio, D. (2016). Simulated annealing algorithms for the multimanned assembly line balancing problem: minimizing cycle time. *International Journal of Production Research*, 2731-2751. doi: <https://doi.org/10.1080/00207543.2016.1181286>
- Tutumlu, B., Aygün, B., & Saraç, T. (2020). İşçilerin sağlık ve yetenek seviyelerine göre iş istasyonlarına kısmi ya da tam kapasiteli olarak atanması problemi için bir çözüm yaklaşımı. *Journal Of Industrial Engineering*, 31(1), 18-27. Erişim adresi: <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/1057415>
- Vilà, M. P. (2014). A branch-and-bound algorithm for assembly line worker assignment. *Computers & Operations Research*, 44, 105-114. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2013.10.016>
- Wu, L., Cai, F., Li, L., & Chu, X. (2018). Cross-trained worker assignment problem in cellular manufacturing system using swarm intelligence metaheuristics. Shenzhen: Hindawi Mathematical Problems in Engineering. doi: <https://doi.org/10.1155/2018/4302062>

Yılmaz, H. Demir, Y. (2019). A new mathematical model for assembly line worker assignment and balancing. *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 9(4), 2002-2008. doi: <https://doi.org/10.21597/jist.579958>

Yılmaz, Ö. F. (2020). Attaining flexibility in seru production system by means of Shojinka: An optimization model and solution approaches. *Computers & Operations Research*, 119. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2020.104917>