

SIRALI-TERS SIRALI POZİSYON AĞIRLIĞI YÖNTEMLERİ VE 0-1 TAMSAYILI PROGRAMLAMA İLE MONTAJ HATTI Dengeleme

Seher ARSLANKAYA^{1*}, Merve AYDIN²

¹Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Sakarya
ORCID No: <https://orcid.org/0000-0001-6023-290>

²Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Sakarya
ORCID No: <https://orcid.org/0000-0003-0591-5229>

Anahtar Kelimeler	Öz
Montaj hattı dengeleme, Sezgisel ve analitik yöntemler, Sıralı pozisyon ağırlığı yöntemi, Ters sıralı pozisyon ağırlığı yöntemi, 0-1 tamsayılı programlama	İmalat sektöründe faaliyet gösteren bir işletme için montaj hatlarında görevlerin dengesiz dağılımı, işletme kaynaklarının etkin olmayan şekilde kullanılmasına neden olmaktadır. Bunun sonucu montaj hattı dengeleme çalışmaları kaynakların verimli kullanılması açısından önem kazanmaktadır. Bu çalışmada beyaz eşya üreten bir işletmenin montaj hattı ele alınmıştır. İşletmede montaj bandının mevcut durumu incelendiğinde iş yüklerinin dengesiz dağıldığı tespit edilmiştir. Yapılan çalışma ile görevlerin iş istasyonlarına dengeli bir şekilde dağıtılarak %30 olan denge kaybını azaltmak ve aynı zamanda montaj hattında çalışan 18 işçi sayısını da azaltarak verimliliğinin artırılması istenmektedir. Bu çalışmada montaj hattı dengeleme yöntemi olarak sezgisel yöntem olan Sıralı Pozisyon Ağırlığı Yöntemi ve Ters Sıralı Pozisyon Ağırlığı Yöntemi; analitik yöntem olan 0-1 Tamsayılı Programlama seçilmiştir. Bu yöntemler ile hat dengeleme çalışmaları sonucunda, denge kaybı %30' dan %11'e ve montaj bandındaki 18 olan işçi sayısı 14'e düşürülmüştür. Sıralı Pozisyon Ağırlığı Yöntemi, Ters Sıralı Pozisyon Ağırlığı Yöntemi ve 0-1 Tamsayılı Programlama Yöntemi ile dengelenen montaj hattı hat etkinliklerine göre kıyaslanmıştır ve iş istasyonları sürelerine t Testi yapılmıştır. Bu çalışma, ele alınan tek modellenmiş montaj hattı dengeleme probleminin, üç yöntemle de çözüldüğünde, anlamlı bir fark olmayacağı sonucunu ortaya koymuştur.

ASSEMBLY LINE BALANCING WITH RANKED AND REVERSE RANKED POSITIONAL WEIGHT METHODS AND 0-1 INTEGER PROGRAMMING

Keywords	Abstract
Assembly line balancing, Heuristic and analytic methods, Ranked positional weight method, Reverse ranked positional weight method, 0-1 integer programming	For an enterprise operating in the manufacturing sector, the uneven distribution of tasks on assembly lines causes inefficient use of enterprise resources. As a result, assembly line balancing activities gain importance in terms of the efficient use of resources. This study discusses the assembly line of an enterprise producing white goods. When the current situation of the assembly line in the enterprise is examined, it has been determined that the workloads are unevenly distributed. With the work done, it is desired to reduce the balance loss of 30% by spreading the tasks to the workstations in a balanced way and to increase productivity by reducing the number of 18 workers working on the assembly line at the same time. In this study, heuristic methods such as Ranked-Reverse Ranked Positional Weight Methods and an analytical method, 0-1 Integer Programming, were chosen as assembly line balancing methods. As a result of line balancing works with these methods, the loss of balance was reduced from 30% to 11% and the number of workers in the assembly line from 18 to 14. The assembly line balanced with the Ranked Positional Weight Method, the Reverse Ranked Positional Weight Method, and the 0-1 Integer Programming method was compared according to the line activities. The t-Test was performed on the workstations times. The study concluded that there would be no significant difference when solving the single model assembly line balancing problem with all three methods.

Araştırma Makalesi	Research Article
Başvuru Tarihi : 30.11.2021	Submission Date : 30.11.2021
Kabul Tarihi : 18.06.2022	Accepted Date : 18.06.2022

*Sorumlu yazar; e-posta: aseher@sakarya.edu.tr

1. Giriş

Teknolojinin gelişimi ile insanların yaşam koşulları gelişmektedir. Bu gelişim ile talepler değişip çeşitlenmektedir. Global pazarlarda firmaların hayatta kalabilmeleri için istenen zamanda müşteri taleplerini karşılama gerekmektedir (Çalışkan, 2020). Artan ve çeşitlenen müşteri taleplerini, istenen kalitede, en az maliyet ile ve istenen zamanda üretilmesini sağlamak montaj hatlarını ve üretim sistemlerini önemli bir noktaya taşımıştır (Becker ve Sholl, 2006).

İstenen çevrim süresinde, belirli bir sırayla iş istasyonlarında gerçekleşen işlemler sonucu ürünün elde edildiği sürece montaj hattı denir (Küçükkoç, 2011). Montaj hattı dengeleme ise ürün meydana gelirken, boşa giden zamanı minimize edecek şekilde işlerin istasyonlara atanmasına denir (Özkan, 2003).

Montaj hatlarında verimliliği en üst seviyede tutmak için iş yüklerinin istasyonlara dengeli olarak dağıtılması gerekmektedir. İş yüklerinin dengeli dağılımı sayesinde montaj hattı dengeleme çalışmaları sonucunda üretim kapasitesi ve verimlilikte artış gözlenmektedir. Ayrıca yapılan çalışmalar ile ürün maliyetlerinde iyileşmeler sağlanmaktadır (Hıdımoğlu, 2019).

Montaj hattı dengeleme problemlerinde birden fazla kısıt göz önüne alınarak çözüme ulaşılmaya çalışılır. Bu kısıtlar aşağıdaki gibidir (Özçelik, 2018):

- Herhangi bir istasyondaki işlemlerin süreleri toplamı çevrim süresinden fazla olamaz.
- Herhangi bir görevin bir istasyona atanmadan önce o görevin öncülleri gerçekleşmiş olmalıdır.
- Bir görev birden fazla istasyona atanamaz.

Bu çalışmada ele alınan hat, tek modelin üretildiği bir montaj hattıdır. Bu tür montaj hatlarına tek modellenmiş hatlar denilmektedir (Kılıç, 2010). Aynı zamanda çalışmada ele alınan montaj hattı dengeleme problemi, problemin türüne göre basit montaj hattı dengeleme problemi sınıfına girmektedir. Basit montaj hattı dengeleme problemleri, tek modellenmiş hat dengelemenin özel bir uyarılmasıdır. Bu tip hat dengeleme problemlerinde, sadece bir ürün üretilir ve çevrim zamanı sabittir. İşlem süreleri ise deterministiktir (Küçükkoç, 2011).

İncelenen montaj hattında, iş yüklerinin dengesiz dağılımı yüzünden üretim kapasitesi ve kaynakların verimsiz kullanılması söz konusudur.

Ürünler üretilirken iş yüklerinin dengesiz paylaştırıldığı ve montaj hattında çalışan işçi sayısının gerekenden fazla olduğu düşünülmesi sebebiyle hat dengeleme çalışması yapılması istenmektedir. Mevcut durumda montaj hattında 18 kişi çalışmaktadır. İstenen durum ise daha az kişiyle hatta çalışan kişi sayısı düşürülüp montaj hattı verimliliğinin artırılması ve görevlerin montaj hattında dengeli bir şekilde dağıtılmasıdır. Problemin çözümünde ise Sıralı Pozisyon Ağırlığı Yöntemi, Ters Sıralı Pozisyon Ağırlığı Yöntemi ve 0-1 Tamsayı Programlama yöntemlerinin karşılaştırılması, çalışmanın özgünlüğünü belirtmektedir.

Bu çalışmada, hangi hat dengeleme yönteminin ele alınan problem için daha iyi sonuç verdiği araştırılmıştır. Bu nedenle hat etkinlik ve denge kaybı değerleri karşılaştırılmıştır. Ayrıca uygulanan yöntemlerin sonucunda elde edilen istasyon sürelerine daha sonrasında t testi yapılmış, montaj hattını dengelemek için yöntemlerin arasında bir fark olup olmadığı araştırılmıştır.

Bu çalışmanın bir sonraki bölümünde yazın taraması yapılmıştır Üçüncü bölümde, montaj hattı dengeleme problemlerinde kullanılan temel kavramlara değinilmiş ve sonrasında montaj hattı dengeleme problemlerinin çözümünde kullanılan yöntemlerden bahsedilmiştir. Uygulama bölümünde, mevcut durum incelemesi yapılmıştır. Beşinci bölümde analitik ve sezgisel yöntemler ile dengeleme yapılmıştır. Altıncı bölümde uygulanan yöntemlere t testi yapılmıştır. Son bölümde ise sonuçlar yorumlanmıştır.

2. Yazın Taraması

Literatürdeki önemli çalışmalara baktığımızda, Salveson (1955) yaptığı çalışmada montaj hattı dengeleme yöntemi olarak 0-1 Tamsayı Programlamayı kullanmıştır.

Helgeson ve Birmie (1961) Pozisyon Ağırlığı Yöntemi' ni geliştirmiş ve ilk olarak çalışmalarında kullanmışlardır.

Ağpak, Gökçen ve Saray, Özel (2005), kaynak kısıtlı montaj hattını dengelemek için Pozisyon Ağırlığı Yöntemi' ni kullanmışlardır. Çalışmalarında Pozisyon Ağırlığı Yöntemi' nin basit ve etkili bir sezgisel yöntem olduğunu ifade etmişlerdir.

Zhang ve Cheng (2010) basit montaj hatları için dengeleme yaparken 0-1 Tamsayı Programlama yöntemini kullanmışlardır.

Kılıç (2010) çalışmasında montaj hattını dengeler iken Pozisyon Ağırlığı Yöntemi, Hoffman Yöntemi, Kilbridge yöntemi ve Basit Sezgisel Yöntemi kullanmıştır. En uygun yöntemin basit sezgisel yöntem olacağı sonucuna varmıştır.

Mishra ve Manoria (2013) Pozisyon Ağırlığı Yöntemi, bilgisayar yazılımı kullanarak uygulamışlardır. Çalışmada, montaj hattı dengeleme ile en uygun sonucun, belirlenen insan gücüyle hedeflenen değeri düşürülebileceği sonucuna varmışlardır.

Ghutukade ve Sawant (2013) çalışmasında kaju fıstığı kabuğu soyma makinesinin üretim montaj hattının dengelenmesinde Sıralı Pozisyon Ağırlığı Yöntemi kullanmıştır.

Yapılan bir çalışmada montaj hattı dengelenirken ilk önce sezgisel yöntem olan COMSOAL yöntemi kullanılmıştır ve matematiksel model geliştirilmiştir (Yılmaz ve Yılmaz, 2016).

Kumar ve Gowda (2016) üretim oranını günde 24 makineye çıkarmak için Sıralı Pozisyon Ağırlığı Yöntemi kullanmışlardır. Ayrıca iş istasyonu ve çevrim süresi azaltılarak yeni çözümler üretilmiştir.

Yapılan bir çalışmada paralel görev atamalı montaj hattı dengeleme problemi ele alınmıştır. Problemi çözerken matematiksel bir model önerisinde bulunulmuştur. Modelin amacı iş istasyon sayısı için çevrim süresi minimizasyonu olarak belirlenmiştir. Çalışma sonunda modelin ürettiği sonuçlar bir problem ile analiz edilmiştir (Altunay, Özmutlu ve Özmutlu, 2017).

Altunay (2017) çalışmasında montaj hattı dengeleme problemlerinde çevrim süresi minimizasyonu için yeni yaklaşımları ele almıştır. Bu yaklaşımları paralel görev atama ve paralel istasyon oluşturma olarak belirlemiştir. Sezgisel bir yöntemin montaj hattı dengelemede kullanılabileceğini göstermek için bu yaklaşımları kullanarak matematiksel programlama modellerini ve paralel istasyon oluşturma yaklaşımını temel almıştır.

Özçelik (2018) çalışmasında basit düz ve U-tipi montaj hatlarını ele almıştır. Ele aldığı montaj hattı dengeleme probleminde, son yıllarda eniyileme problemlerinin çözümünde kullanılan diferansiyel evrim algoritması ile çözüme ulaşmaya çalışmıştır.

Khan ve Jha (2017) yüksek güverte gövdesi üretim hattını ele almışlardır. Her bir proses için standart süreyi belirlemek için zaman etüdü çalışması yapılmıştır. Sonrasında montaj hattı problemini çözmek için Sıralı Pozisyon Ağırlığı yöntemi kullanılmıştır.

Şahin ve Kahya'nın (2018) çalışması montaj hattı dengeleme problemini ergonomik kısıtlar ile hedef programlama modeli ile çözmeye çalışmışlardır. Çalışmada işçilerin duruşlarının da ergonomi açısından değerlendirilerek farklı bir açıdan montaj hattı dengeleme problemi ele alınmıştır.

Nahar, Habib, Nayon ve Hossain (2018) çalışmalarında, basit montaj hattında Karınca kolonisi algoritmasını kullanarak iş istasyon sayısını minimize ve etkinliği maksimize etmeye çalışmışlardır. İstenen bulguları elde etmek için Pozisyon Ağırlığı Yöntemi de kullanılmıştır. Çalışma sonunda iki yöntem karşılaştırılmıştır.

Göçer'in (2018) çalışmasında çok modellenmiş üretim yapan montaj hatları seçilmiştir. Montaj hatlarında eş zamanlı montaj hattı dengeleme ve istasyonlar arası ara stok alanı için bir çözüm geliştirilmiştir. Çalışmada en az istasyon sayısı ile hedef üretim hızına ulaşmak için istasyonlar arası ara stok alanı ataması ve operasyon istasyon atamasının birlikte yapılmasında kullanılacak olan bir yaklaşım geliştirilmiştir.

Yapılan bir çalışmada işçi atamalı bir montaj hattı dengeleme probleminde matematiksel programlama ve benzetim modelleme yaklaşımını kullanmışlardır. Yaptıkları çalışmada iş elemanlarının hangi aletler ile yapılması, iş öğelerine ait birbirinden farklı atama kısıtları, ekipmanların hangi iş istasyonlarında bulduklarını içeren matematiksel model oluşturulmuştur. Daha sonra oluşturulan model ile montaj hattı düzenlenmiştir. Düzenlenen montaj hattı gerçek çalışma ortamında nasıl çalıştığını test etmek için benzetim modeli oluşturulmuştur. (Yıldız, Topaloğlu ve Cin, 2020)

Uyanık (2020) çalışmasında bir traktör fabrikasında karışık modellenmiş montaj hattını ele almıştır. Çalışmasında stokastik çalışma süreleriyle yaptığı analiz sonuçlarını deterministik sonuçlar ile karşılaştırmıştır. COMSOAL yöntemini ele alarak çevrim süresine göre minimum sayıda olması gereken iş istasyon sayısını, Java algoritması ile bulmuştur ve çözüm için sezgisel sonuçlar elde etmiştir. Hat dengeleme çalışması sonucunda verimlilik analizleri yapılmıştır.

Aslan ve Aytekin'in (2020) yaptığı çalışmada görevler arasında kurulum süreleri vardır. Kurulum süreleri görevlerin sırasına göre değişiklik göstermektedir. Montaj hattını dengelemede Meta-Sezgisel yöntem olan yeni bir Diferansiyel Gelişim Algoritması geliştirilerek literatürde bulunan test problemleri kullanılarak denenmiş ve iyi sonuçlar elde edilmiştir.

Kökhan (2020) çalışmasında ilk başta karma Tamsayılı Doğrusal Programlama ile montaj hattını dengelemeye çalışmıştır ama belirli bir görev sayısına kadar model sonuç getirmiştir. Problemin zor yapısından dolayı daha sonra COMSOAL yöntemi kullanılmıştır. Daha verimli sonuçlar elde edilmesi için Tavlama Benzetimi algoritması kullanılmıştır. Çözüm yöntemlerinin hepsi karşılaştırılmıştır.

Çalışkan (2020) çalışmasında işletmenin kapasitesini artırmak ve montaj hattını dengelemek için simülasyon ile mevcut durumu modellemiş ve analiz etmiştir. Sonrasında montaj hattını Sıralı Pozisyon Ağırlığı Yöntemi ile dengeleyerek sonuçları karşılaştırmıştır.

Yetkin ve Kahya, (2021) çalışmalarını bir beyaz eşya firmasında gerçekleştirmiştir. Montaj hattının dengelenmesinde ergonomik şartlar da göz önüne alınarak çok amaçlı bir matematiksel model geliştirilmiştir. Model çözümünde konik skalerleştirme, epsilon kısıt, ağırlıklı toplam ve melez yöntemleri kullanılmıştır.

Tablo 1'de Literatürde yapılan çalışmalar özetlenmiştir.

Tablo 1
Yazın Taramasına İlişkin Özet

Çalışma	Analitik Yöntem	Sezgisel Yöntem	Sezgisel & Analitik Yöntem
Salveson (1955)	x		
Helgeson & Birmie (1961)		x	
Ağpak ve diğ. (2005)		x	
Zhang & Cheng (2010)	x		
Kılıç (2010)		x	
Mishra & Manora (2013)		x	
Ghutukade & Sawant (2013)		x	
Yılmaz & Yılmaz (2016)			x
Kumar & Gowda (2016)		x	
Altunay ve diğ. (2017)	x		
Altunay (2017)			x
Özçelik (2018)	x		
Khan & Jha (2017)		x	
Şahin & Kahya (2018)	x		
Nahar ve diğ. (2018)		x	
Yıldız ve diğ. (2020)	x		
Uyanık (2020)		x	
Kökhan (2020)		x	
Çalışkan (2020)		x	
Yetkin & Kahya (2021)	x		

Montaj hattı dengeleme problemlerini çözümü için literatürde birçok çalışma vardır. Bu çalışma basit ve tek modellenmiş montaj hattı tipi üzerinde yapılmıştır. Literatürde sadece sezgisel yöntemleri,

sadece matematiksel modelleri veya ikisi beraber kullanılarak çözüme ulaşılan çalışmalar vardır. Bu çalışma literatürden farklı olarak, ele alınan montaj hattı için hat etkinliği ve denge kaybını dikkate

olarak, Sıralı Pozisyon Ağırlığı Yöntemi ile Ters Sıralı Pozisyon Ağırlığı Yöntemi ve bu sezgisel yöntemler ile 0-1 Tamsayı Programlama yöntemini karşılaştırarak, hangi yöntemin tek modellenmiş montaj hattı problemlerinin çözümü için uygun olduğunu araştırmıştır. Çözüm daha sonrasında istatistiksel test ile desteklenmiştir. Ayrıca yapılan literatür taraması sonucu, güncel çalışmalarda Ters Sıralı Pozisyon Ağırlığı Yöntemi ile ilgili bir çalışmaya rastlanılmamıştır, bu açıdan da çalışma literatüre katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

3. Montaj Hattı Dengeleme Problemi

Montaj hattı dengeleme problemlerinde kullanılan temel kavramlar aşağıda verilmiştir (Demir, 2020; Küçükkoç, 2011).

Çevrim zamanı, iş ögelerini gerçekleştirilebilmesi için iş istasyonlarına verilen zamandır. Yani bir parça veya ürünün proseste tamamlanma sıklığıdır.

Çevrim Süresi=

$$\frac{\text{Eldeki Toplam Süre}}{\text{Yapılması İstenen Ürün Sayısı}} \quad (1)$$

Gerekli en az iş istasyonu sayısı (k_{enaz}), montaj hattında belirlenen çevrim süresi ile iş ögelerinin her istasyona atanması sonucunda gerekli olan iş istasyonu sayısıdır. En az iş istasyonu sayısı aşağıdaki formül ile hesaplanmaktadır. C, çevrim süresini, t_i iş ögelerinin sürelerini ve $k_{olası}$, çevrim süresinin yarısından büyük süreye sahip iş ögesi sayısını ifade eder.

$$k_{enk} = \frac{\sum t_i}{C} \quad (2)$$

$$k_{enaz} = \text{enb}(k_{enk}, k_{olası}) \quad (3)$$

Denge kaybı, iş istasyonlarında tanımlanan görevlerin dengesiz dağılımından kaynaklanan etkisiz süredir (Demir, 2020). Aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır ve n, dengeleme sonunda bulunan iş istasyonu sayısını ifade etmektedir.

$$(\text{Denge Kaybı} (\%)) = \quad (4)$$

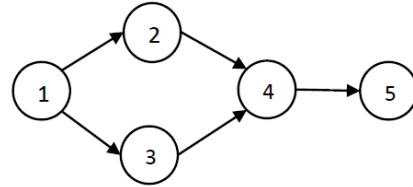
$$\frac{100 * (C * n - \sum t_i)}{n * C}$$

Hattın etkinliği, elde bulunan iş istasyonlarının ne kadar verimli kullanıldığını göstermektedir. Aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

Hattın etkinliği=

$$100x \frac{\text{İş ögelerinin toplam süresi}}{\text{İş istasyonu sayısı} \times \text{çevrim süresi}} \quad (5)$$

Teknolojik Öncelik Diyagramı, ürünlerin üretimi gerçekleşirken birbirinden önce veya sonra gerçekleşmesi gerekmektedir. Bunları açıklarken teknolojik öncelik diyagramı kullanılmaktadır. Teknolojik öncelik diyagramlarında düğümlerde faaliyetler gösterilmektedir ve her faaliyet birbirine ok ile bağlanmaktadır (Demir, 2020). Şekil 1'de örnek öncelik diyagramı gösterilmektedir.



Şekil 1. Bir Ürüne Ait Örnek Teknolojik Öncelik Diyagramı

Öncelik Matrisi, teknolojik Öncelik Diyagramının matris şeklinde oluşturulmuş halidir. Öncül öge ile artçıl ögenin kesiştiği hücreye "1", geri kalan hücrelere "0" değeri yazılır. Şekil 2'de Şekil 1'deki öncelik diyagramının, öncelik matrisi şeklinde gösterilişi verilmektedir.

		Artçıl Ögeler				
		1	2	3	4	5
Öncül Ögeler	1	0	1	1	0	0
	2	0	0	0	1	0
	3	0	0	0	1	0
	4	0	0	0	0	1
	5	0	0	0	0	0

Şekil 2. Bir Ürüne Ait Örnek Öncelik Matrisi

Bu çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur. Montaj hatlarının dengelenmesinde kullanılan üç tür yöntem vardır. Bunlar; Sezgisel Yöntemler, Analitik Yöntemler ve Benzetim

(simülasyon) teknikleridir. Analitik çözüm yöntemlerinde en uygun sonuç bulunur. Bu yöntemlere örnek olarak 0-1 Tamsayılı Programlama, Dal-Sınır Algoritması, Dinamik Programlama verilebilir. Montaj hattı dengeleme probleminde işlem sayıları arttığı durumlarda çözüme ulaşmak zorlaşmaktadır. (Kılıç, 2010; Küçükkoç, 2011). Bunun sonucu uygulamada sezgisel yöntemler daha fazla kullanılmaktadır. Sezgisel yöntemlerde, matematiksel kanıtlardan çok, geçmiş deneyimler ve mantık vardır. Sezgisel yöntemler belirli bir prosedürün belirli varsayımlar altında takip edilerek montaj hatlarının oluşturulmasında kullanılan tekniklerdir. Literatürde, Sırala ve Ata Yöntemi, Sıralı Pozisyon Ağırlığı Yöntemi, Moodie – Young Yöntemi, Hoffman Sezgisel Yöntemi, Kilbridge & Wester Sezgiseli, Ters Sıralı Pozisyon Ağırlığı Yöntemi, COMSOAL Yöntemi sıkça karşılaşılan tekniklerdendir. Bu yöntemlerin birbirlerine göre avantajları ve dezavantajları vardır. Fakat bu yöntemler arasında en popüler olanı pozisyon ağırlığı yöntemidir (Manoria, Mishra ve Maheshwar, 2012). Sıralı Pozisyon Ağırlığı Yöntemi, montaj hatlarının oluşturulmasında kullanılan basit ve etkili sezgisel tekniklerden birisidir. Ters Sıralı Pozisyon Ağırlığı Yöntemi ise öncelik ilişkileri diyagramının tersine çevrilmesi ile elde edilen Sıralı Pozisyon Ağırlığı Yöntemidir (Manoria vd., 2012). Gözlemlenen sistem çok karmaşık olduğu durumlarda veya sistemi gözlemlemek olanaksız ve masraflı olduğunda, Benzetim Tekniği kullanılmaktadır (Özkan, 2003). Matematiksel yöntem ile en uygun çözüm bulunurken, benzetim tekniği ile optimal çözüm bulunmaktadır (Hıdımoğlu, 2019). Bu çalışmada ele alınan problem, Analitik Yöntem ile çözüm için çok karmaşık bir yapıya sahip değildir. Bunun için Benzetim Tekniği kullanılmamıştır.

3.1 0-1 Tamsayılı Programlama Yöntemi

Çalışmada ele alınan problem boyutu çok büyük olmadığı için 0-1 Tamsayılı Programlama ile kesin çözüme ulaşılmaya çalışılmıştır. Ayrıca ele alınan bu yöntemin, seçilen sezgisel yöntemler karşısında nasıl bir etkinlik göstereceği araştırılmak istenmiştir.

0-1 Tamsayılı Programlama Yönteminde kullanılan parametre ve değişken tanımlamaları aşağıda verilmiştir.

İndisler:

i, j : Görevler kümesi

K : Toplam iş istasyonu sayısı ($k = 1, 2, 3, \dots, K$)

N : Görev sayısı

P_j : j görevinden önce görevlerin kümesi ($1, \dots, p, \dots, /P/$)

Parametreler:

t_i : i görevinin tamamlanma süresi

C : Çevrim süresi

Karar Değişkenleri:

$$x_{ik} \begin{cases} 1, & i. \text{ iş } k. \text{ istasyona atanmış} \\ 0, & i. \text{ iş } k. \text{ istasyona atanmamış} \end{cases}$$

$$A_k \begin{cases} 1, & k. \text{ istasyona atama yapılmış} \\ 0, & k. \text{ istasyona atama yapılmamış} \end{cases}$$

Amaç Fonksiyonu:

$$\text{Min} \sum_{k=1}^K A_k \quad (6)$$

Kısıtlar:

$$\sum_{i=1}^N t_i \cdot x_{ik} \leq C, \forall k = 1, 2, 3, \dots, K \quad (7)$$

$$\sum_{k=1}^K x_{ik} = 1, \forall i = 1, 2, 3, \dots, N \quad (8)$$

$$\sum_{k=1}^K (kx_{jk} - kx_{ik}) \geq 0, \quad \forall i, j = 1, 2, 3, \dots, N \text{ ve } i \in P_j \quad (9)$$

(6) eşitliği amaç fonksiyonudur. Eşitlik (7) iş istasyonlarına atanan görevlerin çevrim zamanını aşmaması için olan kısıttır. (8) eşitliği tüm görevleri istasyonlara atar ve bu atamanın sadece 1 kere gerçekleşmesini sağlamak içindir. Öncelik ilişkileri kısıdı ise (9) eşitliğidir. Bu eşitlik tanımlanan öncelik ilişkilerine göre görevleri, iş istasyonlarına atar. (Zhang ve Cheng, 2010) (Küçükkoç, 2020).

3.2 Sıralı Pozisyon Ağırlığı Yöntemi

Pozisyon Ağırlığı Yöntemi, sezgisel yöntemler arasından önemli bir yere sahiptir ve montaj hattı dengeleme problemlerinin çözümünde sıklıkla kullanılan yöntemlerden biridir. Pozisyon Ağırlığı

yöntemine göre her görevin bir pozisyon ağırlığı vardır ve her bir operasyonun pozisyon ağırlığı, kendisinden sonraki tüm işlemlerin zamanlarının arka arkaya toplanarak hesaplanır. Yani en yüksek pozisyon ağırlığına sahip görev seçilir ve ilk atama işlemine geçilir (Fathi, Alvarez ve Rodriguez, 2011). Sıralı pozisyon ağırlığı yöntemi, hat dengelemede yaygın olarak kullanılması ve uygulanabilirliğinin kolay olması nedeniyle bu problem için çözüm yöntemi olarak seçilmiştir.

Sıralı Pozisyon Ağırlığı Yöntem ve Ters Sıralı Pozisyon Ağırlığı Yöntemin çözüm adımları aşağıda verilmiştir.

➤ Sıralı Pozisyon Ağırlığı Yöntem çözüm adımları:

1-) İlk önce teknolojik öncelik diyagramı oluşturulur.

2-) Montaj hattında belirlenen her görev için pozisyon ağırlığı hesaplanır.

3-) Bu aşamada pozisyon ağırlıkları hesaplanan görevlerden, en yüksek pozisyon ağırlığına sahip görevden başlanarak atama yapılmaya başlanır.

4-) Sonraki adımlarda ise en yüksek pozisyon ağırlığı olan görev seçilir ve belirli kısıtlar dahilinde atamalara devam edilir.

- Çevrim süresinin, istasyonlara atanan görev süreleri toplamından büyük veya eşit olması gerekmektedir.
- Göreve ait öncüllerin ya önceki iş istasyonuna ya da aynı istasyona atanmış olması gereklidir.

5-) Görevlerin hepsi atanana kadar 4. adım tekrarlanır (Kılıç, 2010).

- Pozisyon ağırlığı hesaplanırken, görevin kendi süresi ile öncelik diyagramına göre kendisinden sonra gelen görevlerin süreleri toplanır.

3.3 Ters Sıralı Pozisyon Ağırlığı Yöntemi

Ters Sıralı Pozisyon Ağırlığı Yöntemi, öncelik ilişkileri diyagramının tersine çevrilmesi ile uygulanan yöntemdir. Bu yöntemin seçilmesinin nedeni Pozisyon Ağırlığı Yöntemi gibi kolay uygulanabilir olmasıdır. Ayrıca Pozisyon Ağırlığı Yöntemi'nin 0-1 Tamsayılı Programlama Yöntemi

karşısında nasıl performans göstereceği araştırılmak istenmiştir.

➤ Ters Sıralı Pozisyon Ağırlığı Yöntem çözüm adımları:

1-) Oluşturulan teknolojik öncelik diyagramı tersine çevrilir.

2-) Görevlerin yeniden sıralanmış halinin pozisyon ağırlıkları hesaplanır.

3-) En yüksek pozisyon ağırlığına sahip görevden başlanarak atama yapılır.

4-) Sonraki atamalar belirli kısıtlar altında, en yüksek pozisyon ağırlığına görevin atanmasıyla devam eder.

- Atama yapılırken, iş istasyonuna atanan görevlerin işlem süreleri toplamı çevrim süresinden az veya eşit olmalıdır.

5-) Görevlerin hepsi iş istasyonlarına atanana kadar 4. Adımın tekrar eder.

6-) Atamalar bittikten sonra öncelik ilişkileri ve numaraları tersine çevrilerek problem orijinal haline getirilir (Demir, 2020).

3.4 t Testi

t Testi, iki ortalama arasındaki farkı, istatistiksel olarak test etmek için kullanılan bir tekniktir (Tavşancıl, 2021). Bu çalışmada t Testi, seçilen çözüm yöntemleri ile dengelenmiş hatta, istasyon süreleri karşılaştırılarak, çözüm yöntemleri arasında anlamlı fark olup olmadığını anlamak amacıyla kullanılmıştır.

4. Uygulama

4.1 Mevcut Durum İncelemesi

Montaj hattı dengeleme çalışmasının yapıldığı işletmede ocak, fırın, davlumbaz, aspiratör gibi beyaz eşya ürünleri üretilmektedir. İncelenen montaj hattında toplamda 18 kişi çalışmaktadır ve davlumbaz üretilmektedir. Çevrim süresi 35 saniyedir ve çevrim süresi aşağıda hesaplanmıştır. Tablo 2'de çevrim süresini hesaplamak için gereken girdiler verilmiştir.

Tablo 2
Çevrim Süresini Hesaplamak İçin Gereken Veriler

İşletme Vardiya Süresi ve Yapılması İstlenen Ürün Sayısı	2320 adet
1 vardiya süresi	480 dakika
1 günlük vardiya süresi	1440 dakika
1 vardiyada toplam mola süresi	30 dakika
1 günlük vardiyada toplam mola süresi	90 dakika
1 günde yapılması istlenen ürün sayısı	2320 adet

$$C = \frac{\text{Eldeki Toplam Süre}}{\text{Yapılması İstlenen Ürün Sayısı}} = \frac{(1440 \text{ dk} - 90 \text{ dk}) \times 60}{2320 \text{ adet}} = 34,9 \cong 35_{\text{saniye}}/\text{adet}$$

Hat dengeleme çalışması yapılmadan önceki iş istasyonlarına atanmış olan iş ögeleri, bu ögelere

ait işlem süreleri ve her iş istasyonu için toplam süre Tablo 3' de verilmiştir.

Tablo 3
İş İstasyonunda İşlem Gören İş Ögeleri ve İş Ögelerinin Süreleri

İş İstasyonu	İş Ögesi	İş Ögesi Süresi	İş İstasyonu Toplam Süre	İş İstasyonu	İş Ögesi	İş Ögesi Süresi	İş İstasyonu Toplam Süre
1	1	18	29	11	21	22	22
	2	11			12	12	
	3	5			23	10	
2	4	6	32	13	24	12	22
	5	8			25	5	
	6	13			26	5	
3	7	8	28	14	27	18	18
	8	20			28	7	
4	9	13	13		29	23	
5	10	20	20		30	10	
6	11	21	21	16	31	25	43
	12	10			32	4	
7	13	19	29	17	33	4	17
	14	13			34	10	
	15	13			35	7	
8	16	22	22	18	36	8	18
	17	10			37	10	
9	18	5	26				
	19	6					
	20	5					

Montaj hattında iş öğelerinin toplam süresi 438 saniye olarak bulunmuştur. Montaj hattında kullanılmayan atıl süre 192 saniye olarak bulunmuştur ve hesaplanması aşağıda gösterilmiştir.

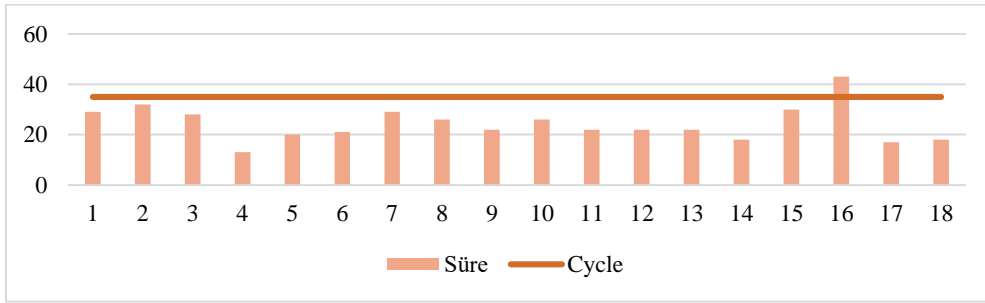
$$\text{İş Öğeleri Toplam Süresi} = (29 + 32 + 28 + 13 + 20 + 21 + 29 + 26 + 22 + 26 + 22 + 22 + 22 + 18 + 30 + 43 + 17 + 18) = 438 \text{ saniye}$$

$$\text{Atıl Süre} = (35-29)+(35-32)+(35-28)+(35-13)+(35-20)+(35-21)+(35-29)+(35-26)+(35-22)+(35-26)+(35-22)+(35-22)+(35-18)+(35-30)+(35-43)+(35-17)+(35-18)=192 \text{ saniye}$$

Dengelemeden önce, hattın etkinliği %69,5 olarak hesaplanmıştır. Hatta yaklaşık olarak %30 bir verimsizliğin olduğu anlaşılmaktadır. Hattın etkinliğinin hesaplanması aşağıda gösterilmiştir.

$$\begin{aligned} \text{Hattın etkinliği} &= 100 \times \frac{\text{İş öğelerinin toplam süresi}}{\text{İş istasyonu sayısı} \times \text{çevrim süresi}} \\ &= 100 \times \frac{438 \text{ sn}}{18 \times 35 \text{ sn}} = \%69,5 \end{aligned}$$

Montaj hattının iş öğeleri dağılımı Şekil 3' de gösterilmiştir. Hattın dengesiz olduğu ve iş öğelerinin dengesiz dağıldığı Şekil 3' deki grafikten de anlaşılmaktadır.



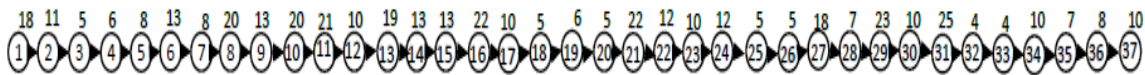
Şekil 3. Montaj Hattını Dengelemeden Önce İş Öğeleri Dağılımı

5. Bulgular

Çalışmada montaj hattını dengelemek için Sıralı Pozisyon Ağırlığı Yöntemi, Ters Sıralı Pozisyon Ağırlığı Yöntemi ve 0-1Tamsayılı Programlama Yöntemi kullanılmıştır. Her yöntem için montaj hattı dengeleme çalışması ve hat etkinlerinin karşılaştırılması aşağıda sırayla verilmiştir.

5.1 Sıralı Pozisyon Ağırlığı Yöntemine göre Montaj Hattının Dengelenmesi

Sıralı Pozisyon Ağırlığı Yöntemi' ne göre ilk olarak teknolojik öncelik diyagramını oluşturulmalıdır. İncelenen montaj hattı boyunca i . iş ögesinden sonra $(i + 1)$. iş ögesi gelmektedir bunun sonucu şekil 4' deki gibi teknolojik öncelik diyagramı oluşmaktadır. Montaj hattının Öncelik Matrisi ise Şekil 5 'de verilmiştir. Aynı zamanda Şekil 4' den de anlaşılacağı üzere montaj hattının tipi, düz montaj hattıdır.



Şekil 4. Montaj Hattında İncelenen Ürüne Ait Teknolojik Öncelik Diyagramı

Tablo 4
Tüm İş Ögelerine Ait Pozisyon Ağırlıkları

İş Ögesi No	Süre (sn)	Pozisyon Ağırlığı	İş Ögesi No	Süre (sn)	Pozisyon Ağırlığı
1	18	438	20	5	197
2	11	420	21	22	192
3	5	409	22	12	170
4	6	404	23	10	158
5	8	398	24	12	148
6	13	390	25	5	136
7	8	377	26	5	131
8	20	369	27	18	126
9	13	349	28	7	108
10	20	336	29	23	101
11	21	316	30	10	78
12	10	295	31	25	68
13	19	285	32	4	43
14	13	266	33	4	39
15	13	253	34	10	35
16	22	240	35	7	25
17	10	218	36	8	18
18	5	208	37	10	10
19	6	203			

$$k_{enk} = \frac{\sum t_i}{C} = \frac{438}{35} = 12,5 \cong 13$$

$$C = \frac{35}{2} \cong 18$$

$$k_{olası} = 14$$

$$k_{enaz} = enb(13, 14) = 14$$

Yukarıda en az iş istasyonu sayısı hesaplanmıştır ve 14 olarak bulunmuştur. Pozisyon ağırlıkları hesaplandıktan sonra iş ögeleri pozisyon ağırlıklarına göre iş istasyonlarına atanır. Aşağıda atama adımlarına örnekler verilmiştir.

- En yüksek pozisyon ağırlığına sahip iş ögesinden başlanarak atama yapmaya başlanacaktır. Burada en yüksek pozisyon ağırlığına sahip iş ögesi 1. iş ögesidir. 1. İş ögesi 1. istasyona atanır.

- Sonraki en yüksek pozisyon ağırlığına sahip iş ögesi 2. iş ögesidir. İşlem süresi 11 saniyedir. Çevrim süresi 35 saniyedir ve bu kısıdı aşmamaktadır. 2. iş ögesi öncülü 1. iş ögesidir ve atanmıştır. Öncelik kısıdı da sağlanmış olmaktadır. Böylelikle 2. iş ögesi 1. iş istasyonuna atanır.

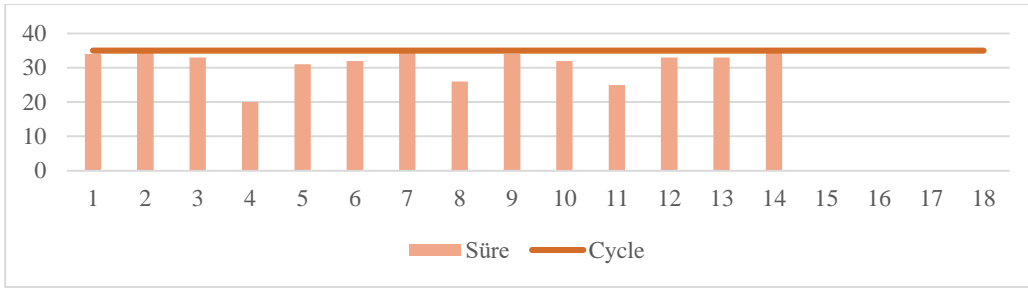
Bu şekilde adımlar, çevrim süresi ile öncelik kısıdı dikkate alınarak tüm iş ögelerinin iş istasyonlarına atanmasına kadar tekrarlanacaktır. Tablo 5' de tüm iş ögelerinin çözüm adımları takip edilerek iş istasyonlarına atanmış hali gösterilmektedir.

Tablo 5
Tüm İş Ögelerinin Sıralı Pozisyon Ağırlığı Yöntemi' ne Göre İstasyonlara Atama Sonuçları

İş İstasyonu	İş Ögesi No	Pozisyon Ağırlığı	Süre (sn)	Birikimli İşlem Süresi	Atanmayan Süre (sn)
1	1	438	18	18	17
	2	420	11	29	6
	3	409	5	34	1
2	4	404	6	6	29
	5	398	8	14	21
	6	390	13	27	8
	7	377	8	35	0
3	8	369	20	20	15
	9	349	13	33	2
4	10	336	20	20	15
5	11	316	21	21	14
	12	295	10	31	4
6	13	285	19	19	16
	14	266	13	32	3
7	15	253	13	13	22
	16	240	22	35	0
8	17	218	10	10	25
	18	208	5	15	20
	19	203	6	21	14
	20	197	5	26	9
9	21	192	22	22	13
	22	170	12	34	1
10	23	158	10	10	25
	24	148	12	22	13
	25	136	5	27	8
	26	131	5	32	3
11	27	126	18	18	17
	28	108	7	25	10
12	29	101	23	23	12
	30	78	10	33	2
13	31	68	25	25	10
	32	43	4	29	6
	33	39	4	33	2
14	34	35	10	10	25
	35	25	7	17	18
	36	18	8	25	10
	37	10	10	35	0

Tüm iş ögeleri atandıktan sonra montaj hattındaki iş ögelerinin dağılımını gösteren grafik Şekil 6'da gösterilmiştir. Şekil 5'de gösterilen grafiğe göre

hattın daha dengeli durumda olduğu Şekil 6'daki grafikten anlaşılmaktadır.



Şekil 6. Sıralı Pozisyon Yöntemiyle Çözüm Sonrası İş Öğeleri Dağılımı Grafiği

Montaj hattını dengeledikten sonra hattın etkinliğinin değişiminin anlaşılması için aşağıda hattın etkinliği, denge kaybı ve atıl süre aşağıda hesaplanmıştır.

Hattın etkinliği

$$= 100 \times \frac{\text{İş öğelerinin toplam süresi}}{\text{İş istasyonu sayısı} \times \text{çevrim süresi}}$$

$$= 100 \times \frac{438 \text{ sn}}{14 \times 35 \text{ sn}} = 89,4\%$$

$$\text{Denge Kaybı}(\%) = 1 - \text{Hattın Etkinliği}$$

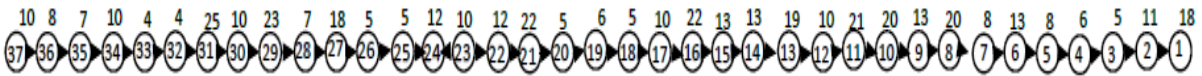
$$= 1 - 0,894 = 0,106$$

$$\text{Atıl Süre} = (35-34) + (35-35)+(35-33)+(35-20)+(35-31)+(35-32)+(35-35)+(35-26)+(35-34) + (35-32)+(35-25)+(35-33)+(35-33)+(35-35) = 52 \text{ saniye}$$

Önceki durumda hattın etkinliği %69,5 iken şimdi %89,4 olmuştur, yani yaklaşık olarak hattın etkinliğinde %20 artış yaşanmıştır ve dengelemeden önce iş istasyonu sayısı 18 tane idi, dengelendikten sonra bu sayı 14'e düşmüştür. Diğer bir iyileşme ise atıl süredir, önceki durumda 192 saniye iken dengelemeden sonra bu süre 52 saniyeye düşmüştür.

5.2 Ters Sıralı Pozisyon Ağırlığı Yöntemine göre Montaj Hattının Dengelenmesi

Bu yöntemde ilk önce oluşturulan teknolojik öncelik diyagramının ters çevrilmesi gerekmektedir. Örneğin 1. iş ögesinin bulunduğu yere 37. iş ögesi gelecektir. Teknolojik öncelik diyagramının ters çevrilmiş hali Şekil 7'de gösterilmiştir.



Şekil 7. Montaj hattında İncelenen Ürüne Ait Ters Çevrilmiş Teknolojik Öncelik Diyagramı

Ters Sıralı Pozisyon Ağırlığı Yöntemi' ne göre ikinci adım olan tüm iş öğelerinin pozisyon ağırlıklarının hesaplanmasıdır. Tersine çevrilmiş teknolojik öncelik diyagramından yararlanılarak pozisyon ağırlıkları hesaplanmaktadır ve Tablo 6' da gösterilmiştir. Aşağıda üç iş ögesine ait ters sıralı pozisyon ağırlığı hesaplanışı gösterilmiştir.

$$\text{1. iş ögesi (eski 37. iş ögesi) pozisyon ağırlığı} = 10+8+7+10+4+4+25+10+23+7+18+5+5+12+10+12+22+5+6+5+10+22+13+13+19+10+21+20+13+20+8+13+8+6+5+11+18 = 438$$

$$\text{2. iş ögesi (eski 36. iş ögesi) pozisyon ağırlığı} = 8+7+10+4+4+25+10+23+7+18+5+5+12+10+12+22+5+6+5+10+22+13+13+19+10+21+20+13+20+8+13+8+6+5+11+18 = 428$$

$$\text{3. iş ögesi (eski 35. iş ögesi) pozisyon ağırlığı} = 8+7+10+4+4+25+10+23+7+18+5+5+12+10+12+22+5+6+5+10+22+13+13+19+10+21+20+13+20+8+13+8+6+5+11+18 = 420$$

Tablo 6

Ters Sıralı Haldeki Teknolojik Öncelik Diyagramına Göre İş Ögeleri Pozisyon Ağırlıkları

İş Ögesi No	Ters Sıralı İş Ögesi No	Süre (sn)	Ters Sıralı Pozisyon Ağırlığı	İş Ögesi No	Ters Sıralı İş Ögesi No	Süre (sn)	Ters Sıralı Pozisyon Ağırlığı
37	1	10	438	18	20	5	235
36	2	8	428	17	21	10	230
35	3	7	420	16	22	22	220
34	4	10	413	15	23	13	198
33	5	4	403	14	24	13	185
32	6	4	399	13	25	19	172
31	7	25	395	12	26	10	153
30	8	10	370	11	27	21	143
29	9	23	360	10	28	20	122
28	10	7	337	9	29	13	102
27	11	18	330	8	30	20	89
26	12	5	312	7	31	8	69
25	13	5	307	6	32	13	61
24	14	12	302	5	33	8	48
23	15	10	290	4	34	6	40
22	16	12	280	3	35	5	34
21	17	22	268	2	36	11	29
20	18	5	246	1	37	18	18
19	19	6	241				

➤ En az istasyon sayısı 14 olarak bulunmuştu. Burada da bu bilgi kullanılmaktadır. Ters Sıralı Pozisyon Ağırlığı Yöntemi' ne göre atanmanın nasıl olduğuna dair örnek adımlar aşağıda verilmiştir.

- En yüksek ters sıralı pozisyon ağırlığına sahip iş ögesinden başlanarak atama yapmaya başlanacaktır. Burada en yüksek pozisyon ağırlığına sahip iş ögesi 1. iş ögesidir. 1. İş ögesi 1. istasyona atanır.
- Sonraki en yüksek ters sıralı pozisyon ağırlığına sahip iş ögesi ters sıralı 2. iş ögesidir. İşlem süresi 8 saniyedir. Çevrim süresi 35

saniyedir ve bu kısıdı aşmamaktadır. Ters sıralı 2. iş ögesi öncülü ters sıralı 1. iş ögesidir ve atanmıştır. Öncelik kısıdı da sağlanmış olmaktadır. Böylelikle ters sıralı 2. iş ögesi 1. iş istasyonuna atanır.

Bu şekilde adımlar, çevrim süresi ile öncelik kısıdı dikkate alınarak tüm iş ögelerinin iş istasyonlarına atanmasına sağlanır. Tablo 7'de tüm iş ögelerinin çözüm adımları takip edilerek iş istasyonlarına atama sonuçları yani tersine problem için denge gösterilmektedir.

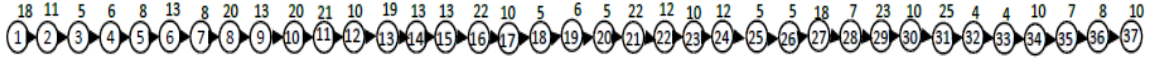
Tablo 7

Tüm İş Ögelerinin Ters Sıralı Pozisyon Ağırlığı Yöntemi'ne Göre İstasyonlara Atama Sonuçları

İş İstasyonu	Ters Sıralı İş Ögesi No	Ters Sıralı Pozisyon Ağırlığı	Süre (sn)	Birikimli İşlem Süresi	Atanmayan Süre (sn)
1	1	438	10	10	25
	2	428	8	18	17
	3	420	7	25	10
	4	413	10	35	0
2	5	403	4	4	31
	6	399	4	8	27
	7	395	25	33	2
3	8	370	10	10	25
	9	360	23	33	2
4	10	337	7	7	28
	11	330	18	25	10
	12	312	5	30	5
	13	307	5	35	0
5	14	302	12	12	23
	15	390	10	22	13
	16	380	12	34	1
6	17	268	22	22	13
	18	246	5	27	8
	19	241	6	33	2
7	20	235	5	5	30
	21	230	10	15	20
8	22	220	22	22	13
	23	198	13	35	0
9	24	185	13	13	22
	25	172	19	32	3
10	26	153	10	10	25
	27	143	21	31	4
11	28	122	20	20	15
12	29	102	13	13	22
	30	89	20	33	2
13	31	69	8	8	27
	32	61	13	21	14
	33	48	8	29	6
	34	40	6	35	0
14	35	34	5	5	30
	36	29	11	16	19
	37	18	18	34	1

Teknolojik Öncelik Diyagramının ters çevrilmiş haline göre hat etkinliğinin hesaplanması gerekmektedir. Aşağıda hat etkinliği hesaplanışı gösterilmektedir.

$$\begin{aligned} & \text{Hattın etkinliği} \\ & = 100 \times \frac{\text{İş ögelerinin toplam süresi}}{\text{İş istasyonu sayısı} \times \text{çevrim süresi}} \\ & = 100 \times \frac{438 \text{ sn}}{14 \times 35 \text{ sn}} = 89,4\% \end{aligned}$$



Şekil 8. Tersine Çevrilmiş Olan Teknolojik Öncelik Diyagramının Tekrar Tersine Çevrilmiş Hali

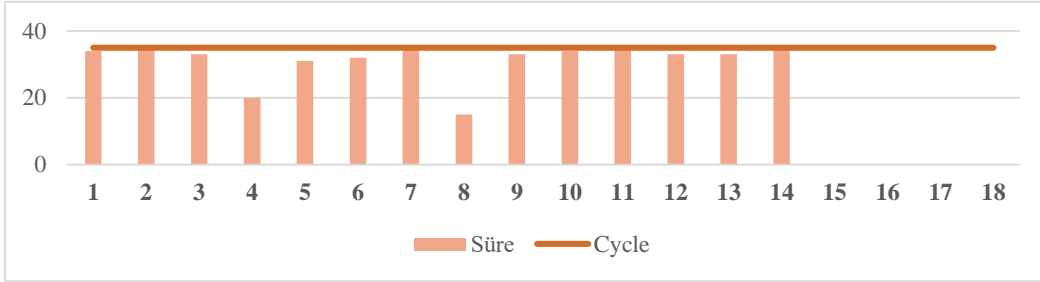
Tablo 7'de ters sıralı hale atanmış iş ögeleri Tablo 8'de probleme ait iş ögeleri sıralamaları haline getirilmiştir. Örneğin, Tablo 7'de gösterilen 37. iş

ögesi aslında 1. İş ögesidir ve Tablo 8' de bu şekilde gösterilmiştir.

Tablo 8
Probleme Ait İş Ögelerinin İstasyonlara Atanmış Hali

İş İstasyonu	İş Ögesi No	Süre (sn)	İstasyon Toplam Süre	İş İstasyonu	İş Ögesi No	Süre (sn)	İstasyon Toplam Süre
1	1	18	34	9	19	6	33
	2	11			20	5	
	3	5			21	22	
2	4	6	35	10	22	12	34
	5	8			23	10	
	6	13			24	12	
	7	8			25	5	
3	8	20	33	11	26	5	35
	9	13			27	18	
4	10	20	20		28	7	
5	11	21	31	12	29	23	33
	12	10			30	10	
6	13	19	32	13	31	25	33
	14	13			32	4	
7	15	13	35	14	33	4	35
	16	22			34	10	
8	17	10	15		35	7	
	18	5			36	8	
					37	10	

Hattın dengelemeden sonra mevcut problem ait dengeleme grafiği Şekil 9'da gösterilmektedir.



Şekil 9. Montaj Hattı Dengeleme Probleminin Ters Sıralı Pozisyon Ağırlığı Yöntemi' ne Göre İş Ögeleri Dağılımı

Probleme ait hat etkinliği, denge kaybı ve atıl sürenin hesaplanması gerekmektedir. Aşağıda nasıl hesaplandığı gösterilmektedir.

$$\begin{aligned} \text{Hattın etkinliği} &= 100 \times \frac{\text{İş ögelerinin toplam süresi}}{\text{İş istasyonu sayısı} \times \text{çevrim süresi}} \\ &= 100 \times \frac{438 \text{ sn}}{14 \times 35 \text{ sn}} = 89,4\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Denge Kaybı(\%)} &= 1 - \text{Hattın Etkinliği} \\ &= 1 - 0,894 = 0,106 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Atıl Süre} &= (35-34)+(35-35)+(35-33)+(35-20)+(35-31)+(35-32)+(35-15)+(35-33)+ \\ &+ (35-34)+(35-35)+(35-33)+(35-33)+(35-35) = 52 \text{ saniye} \end{aligned}$$

Montaj hattını dengelemeden önce hattın etkinliği %69,5 iken, hat dengelendikten sonra %89,4 olmuştur. Yaklaşık olarak hattın etkinliğinde %20 artış yaşanmıştır. Ters Sıralı Pozisyon Ağırlığı Yöntemi ile dengelemeden önce 18 olan iş istasyon sayısı, dengelendikten sonra 14'e düşmüştür. Diğer bir iyileşme ise atıl süredeki düşüştür. Önceki durumda atıl süre 192 saniye iken dengelemeden sonra bu süre, 52 saniyeye düşmüştür.

5.3 Montaj Hattının Analitik Çözüm Yöntemi olan 0-1 Tamsayılı Programlama Matematiksel Modellenmesi ve Lingo Çözümü

Mevcut durumda toplam 18 tane istasyon vardır. Yazılan matematiksel model ile istasyon sayısı minimize edilmek istenmektedir. İlk olarak en az istasyon sayısının bulunması gerekmektedir. Aşağıda hesaplanışı verilmiştir.

$$k_{\text{enk}} = \frac{\sum t_i}{C} = \frac{438}{35} = 12,5 \cong 13$$

$$C = \frac{35}{2} \cong 18$$

$$k_{\text{olası}} = 14$$

$$k_{\text{enaz}} = \text{enb}(13, 14) = 14$$

En az istasyon sayısı 14 olarak bulunmuştur. En az istasyon sayısı bulunduğundan sonra matematiksel kurulması gerekmektedir. Aşağıda kurulan matematiksel model gösterilmiştir.

Amaç Fonksiyonu: İstasyon sayısını minimize eder.

$$\text{Min} \sum_{k=1}^K A_k + A_2 + \dots + A_{13} + A_{14}$$

Tüm görevlerin istasyonlara atanması kısıdı:

$$x_{11} + x_{12} + x_{13} + x_{14} + \dots + x_{113} + x_{114} = 1$$

$$x_{21} + x_{22} + x_{23} + x_{24} + \dots + x_{213} + x_{214} = 1$$

$$x_{31} + x_{32} + x_{33} + x_{34} + \dots + x_{313} + x_{314} = 1$$

·

·

·

$$x_{371} + x_{372} + x_{373} + x_{374} + \dots + x_{3713} + x_{3714} = 1$$

Çevrim zamanı kısıdı: İş istasyonlarındaki toplam süre 35 saniyeden az olmalıdır.

$$18x_{11} + 11x_{21} + 5x_{31} + 6x_{41} + \dots + 8x_{361} +$$

$$10x_{371} \leq 35 A_1$$

$$18x_{12} + 11x_{22} + 5x_{32} + 6x_{42} + \dots + 8x_{362} +$$

$$10x_{372} \leq 35 A_2$$

$$18x_{13} + 11x_{23} + 5x_{33} + 6x_{43} + \dots + 8x_{363} +$$

$$10x_{373} \leq 35 A_3$$

·

·

$$18x_{114} + 11x_{214} + 5x_{314} + 6x_{414} + \dots +$$

$$8x_{3614} + 10x_{3714} \leq 35 A_{14}$$

Öncelik ilişkileri kısıdı: Aşağıda gösterilen öncelik kısıdını yazılırken Teknolojik Öncelik Diyagramı kullanılmıştır.

P=

{(1,2),(2,3),(3,4),(4,5),(5,6),(6,7),(7,8),(8,9),(9,10),
(10,11),(11,12),(12,13),(13,14),(14,15),
(15,16),(16,17),(17,18),(18,19),(19,20),(20,21),
(21,22),(22,23),(23,24),(24,25),
(25,26),(26,27),(27,28),(28,29),(29,30),(30,31),(31,32),
(32,33),(33,34),(34,35),(35,36),(36,37)}

$$1(x_{11} - x_{21}) + 2(x_{12} - x_{22}) + \dots + 14(x_{114} - x_{214}) \leq 0$$

$$1(x_{21} - x_{31}) + 2(x_{22} - x_{32}) + \dots + 14(x_{214} - x_{314}) \leq 0$$

$$1(x_{31} - x_{41}) + 2(x_{32} - x_{42}) + \dots + 14(x_{314} - x_{414}) \leq 0$$

.
.

.

$$1(x_{361} - x_{371}) + 2(x_{362} - x_{372}) + \dots + 14(x_{3614} - x_{3714}) \leq 0$$

Bütün değişkenlerin 0 veya 1 olma kısıdı:

$$\sum_{k=1}^{14} x_{ik}, A_k \in \{0,1\}$$

LINGO programı doğrusal, doğrusal olmayan ve tam sayılı matematiksel modelleri çözmek için kullanılan bir yazılım ve modelleme dilidir. Kullanılan matematiksel model, Ek1'de gösterilen kodlar ile LINGO programında yazılarak çözümlenmiştir.

LINGO programı çözümü sonucu Tablo 9'da tüm görevlerin iş istasyonlarına atama sonuçları gösterilmektedir.

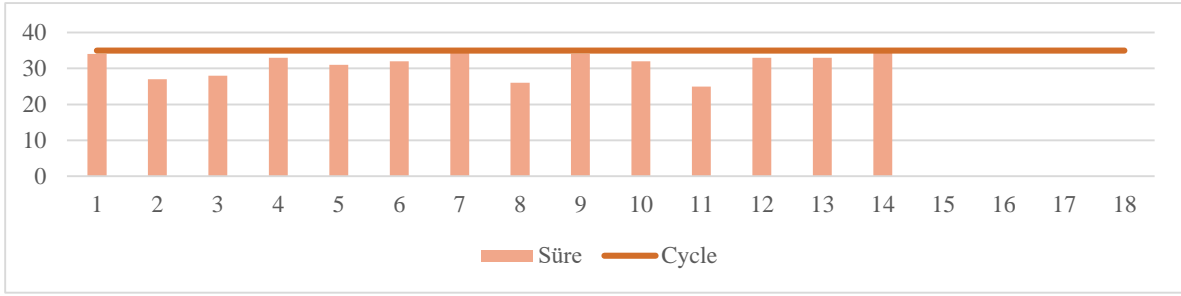
Tablo 9

Tüm İş Ögelerinin Tamsayılı Programlama Yöntemi'ne Göre İstasyonlara Atama Sonuçları

İş İstasyonu	İş Ögesi No	Süre (sn)	İş İstasyonu Toplam Süre	İş İstasyonu	İş Ögesi	Süre	İş İstasyonu Toplam Süre
1	1	18	34	9	21	22	34
	2	11			22	12	
	3	5			23	10	
2	4	6	27	10	24	12	32
	5	8			25	5	
	6	13			26	5	
3	7	8	28	11	27	18	25
	8	20			28	7	
4	9	13	33	12	29	23	33
	10	20			30	10	
5	11	21	31	13	31	25	33
	12	10			32	4	
6	13	19	32	14	33	4	35
	14	13			34	10	
7	15	13	35		35	7	
	16	22			36	8	
8	17	10	26		37	10	
	18	5					
	19	6					
	20	5					

İş ögelerinin istasyonlara nasıl atandığını görsel bir şekilde görmek, hattın etkinliğini anlamak

açısından daha iyi olmaktadır. Bu nedenle Şekil 10'da hat dengeleme grafiği verilmiştir.



Şekil 10. LINGO Çözümü Sonucu İş Ögelerinin İstasyonlara Dağılımı

Hattın etkinliği

$$= 100 \times \frac{\text{İş ögelerinin toplam süresi}}{\text{İş istasyonu sayısı} \times \text{çevrim süresi}}$$

$$= 100 \times \frac{438 \text{ sn}}{14 \times 35 \text{ sn}} = 89,4\%$$

$$\text{Denge Kaybı}(\%) = 1 - \text{Hattın Etkinliği} = 1 - 0,894 = 0,106$$

$$\text{Atıl Süre} = (35-34)+(35-27)+(35-28)+(35-33)+(35-31)+(35-32)+(35-35)+(35-26)+(35-34)+(35-32)+(35-25)+(35-33)+(35-33)+(35-35) = 52$$

Montaj hattını dengelemeden önce %69,5 olan hat etkinliği, dengelemeden sonra %89,4 olmuştur. Matematiksel model ile dengelemeden önce 18

olan iş istasyon sayısı, dengelendikten sonra 14'e düşmüştür. Atıl süredeki iyileşme ise $192-52 = 140$ saniyedir.

5.4 Denge Kaybına Göre Montaj Hattı Dengeleme Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Tablo 10'a bakıldığında tüm yöntemlerde; denge kaybı, hat etkinliği ve atıl süre eşit çıkmıştır. Denge kaybına göre hangi hat dengeleme yönteminin seçilmesi istenirse, tüm yöntemlerde de denge kaybı aynı çıktığı için üç yöntemle de hattı dengelemek aynı etkinliği verecektir.

Tablo 10
Hat Dengeleme Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Yöntem	Hat Etkinliği	Denge Kaybı	Atıl Süre
Sıralı Pozisyon Ağırlığı Yöntemi	0,894	0,106	52
Ters Sıralı Pozisyon Ağırlığı Yöntemi	0,894	0,106	52
0-1 Tamsayı Programlama	0,894	0,106	52

Bir sonraki bölümde ele alınan hat dengeleme yöntemlerinin birbirleri ile karşılaştırılmasında istatistiksel yöntem kullanılacaktır.

programında gerçekleştirilmiştir. T Testi girdileri Tablo 11' de verilmiştir.

6. İstatistiksel Analiz

Bu bölümde Sıralı Pozisyon Ağırlığı Yöntemi, Ters Sıralı Pozisyon Ağırlığı Yöntemi ve 0-1 Tamsayı Programlama kendi aralarında ikili karşılaştırıldığında, hangi yöntemin incelenen hat dengeleme probleminin çözümünde daha uygun olacağına karar verilmesi için istatistiksel analiz yapılmıştır. İstatistiksel analiz olarak Bağımlı Örnek t Testi seçilmiştir ve bu analiz SPSS

Tablo 11
SPSS Programının Girdileri

İş İstasyonu	Sıralı Pozisyon Ağırlığı İstasyon Süresi (sn)	Ters Sıralı Pozisyon Ağırlığı İstasyon Süresi(sn)	0-1 Tamsayı Programlama İstasyon Süresi (sn)
1	34	34	34
2	35	35	27
3	33	33	28
4	20	20	33
5	31	31	31
6	32	32	32
7	35	35	35
8	26	15	26
9	34	33	34
10	32	34	32
11	25	35	25
12	33	33	33
13	33	33	33
14	35	35	35

6.1 t Testi Uygulanması

Tablo 12'de hat dengeleme yöntemlerine ait istasyon sürelerinin standart sapma ve ortalama değerleri gösterilmektedir.

Tablo 12
Hat Dengeleme Yöntemlerine Ait İstatistiksel Değerler

	Ortalama	N	Standart Sapma
Sıralı Pozisyon Ağırlığı Yöntemi	31,2857	14	4,4795
Ters Sıralı Pozisyon Ağırlığı Yöntemi	31,2857	14	6,0438
0-1 Tamsayı Programlama	31,2857	14	3,3839

Tablo 13'de yöntemler ikili karşılaştırıldığında hesaplanan standart sapma değerleri, %95 güven

aralığında farklılıkları ve anlamlılık değerleri verilmiştir.

Tablo 13
Yöntemlere Ait Bağımlı Örnek t Testi Tablosu

	Standart Sapma	%95 Güven Aralığında Farklılık		t	Sig
		En Düşük	En Yüksek		
Sıralı Pozisyon Ağırlığı- Ters Sıralı Pozisyon Ağırlığı	4,1695	-2,4074	2,4074	0	1
Sıralı Pozisyon Ağırlığı- 0-1 Tamsayı Programlama	4,4549	-2,5722	2,5722	0	1
Ters Sıralı Pozisyon Ağırlığı- 0-1 Tamsayı Programlama	6,1017	-3,5230	3,5230	0	1

Tablo 13’de gösterildiği üzere anlamlılık değeri (Sig), yöntemlerin ikili karşılaştırılması sonucu 1 çıkmıştır. Sonuç olarak tüm yöntemler birbirleri karşılaştırıldığında dengelenen hatlar arasında anlamlı bir fark olmadığı anlaşılmıştır.

7. Sonuç

Montaj hattı problemlerinden, dengesiz iş ögesi dağılımı, bu çalışmada ele alınmıştır. Sezgisel yöntem olarak Sıralı Pozisyon Ağırlığı Yöntemi ile Ters Sıralı Pozisyon Ağırlığı Yöntemi kullanılmıştır. Analitik yöntem olarak 0-1 Tamsayı Programlama kullanılmıştır ve oluşturulan matematiksel model LINGO programında çözülmüştür. Ele alınan probleme göre montaj hattı dengelemek için hangi yöntemin kullanılması gerekliliği araştırılmıştır. Hat etkinliği ve denge kaybı değerleri, kullanılan yöntemlerde aynı çıkmıştır. Ayrıca sonuçlara t testi uygulanmış ve yöntemler arasında anlamlı bir fark olmadığı tespit edilmiştir. Yani karşılaştırılan yöntemlerden herhangi biriyle hat dengelendiğinde, diğerleriyle aynı hat etkinliğini vereceği anlaşılmıştır.

Çalışma sonucunda montaj hattında çalışan kişi sayısı 18’den 14 kişiye düşürülmüştür. Böylelikle, maliyette bir iyileşme yaşanacağı düşünülmektedir. Diğer yandan, hat etkinliği %69’ dan %89’a yükselerek iş ögelerinin iş istasyonlarına dağılımı daha dengeli hale getirilmiştir. Montaj hattı eskiye göre daha dengeli ve daha az kişi ile daha verimli hale getirilmiştir.

İncelenen montaj hattı, tek modelli düz montaj hattıdır. U-tipi, karma modelli veya çok modelli hatlarda veya daha çok işlemler montaj hatlarında analitik yöntemler eksik kalabilir veya sonuç vermeyebilir. Gelecek çalışmalarda, bu yöntemlerin farklı tipteki montaj hattı dengeleme problemlerinde uygulandığında, nasıl performans göstereceği araştırılabilir.

Yazarların Katkısı

Seher ARSLANKAYA, çalışmanın danışmanlığının yürütülmesi, sonuçların yorumlanmasında ve makale yazımında; Merve AYDIN, veri toplanması, çözüm yöntemlerinin uygulanması ve makale yazımında görev almıştır.

Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

Kaynaklar

- Ağpak, K., Gökçen, H., Saray, N. ve Özel, S. (2002). Stokastik görev zamanlı tek modelli U tipi montaj hattı dengeleme problemleri için bir sezgisel. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 17(4), 115-124. Erişim adresi: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/gazimmfd>
- Altunay, H. (2017). *Montaj hattı dengeleme problemlerinde çevrim süresinin minimizasyonu için yeni yaklaşımlar: paralel görev atama ve paralel istasyon oluşturma* (Doktora Tezi), Uludağ Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa. Erişim adresi: <https://acikerisim.uludag.edu.tr/>
- Altunay, H., Özmutlu H.C. ve Özmutlu, S. (2017). Paralel görev atamalı montaj hattı dengeleme problemi için yeni bir matematiksel model önerisi, *Cumhuriyet Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 18(1), 15-33. Erişim adresi: <http://esjournal.cumhuriyet.edu.tr/en/>
- Aslan, S. ve Aytekin, M. (2020). Sıra-Bağımlı Hazırlık zamanlı genel montaj hattı dengeleme problemlerinin çözümü için bir diferansiyel gelişim algoritması, *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 11(3), 1103-1118. Doi: <https://doi.org/10.24012/dumf.694846>
- Becker, C. ve Scholl, A. (2006). A Survey on problems and methods in generalized assembly line balancing. *European Journal of Operational Research*, 168(3), 694-715. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.07.023>
- Çalışkan, G. (2020). *Bir tekstil işletmesinde simülasyon optimizasyon yaklaşımı ile hat dengeleme çalışması* (Yüksek Lisans Tezi), Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli. Erişim adresi: <http://acikerisim.pau.edu.tr :8080/xmlui/>
- Demir, A.S. (2020). *Tesis planlama ders notları: 8.hafta ders notu*, Sakarya Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Bölümü.
- Fathi, M, Alvarez, M. J. ve Rodriguez, V. (2011). Use of ranked position weighted method for assembly line balancing problems type-1,

World Academy of Science, *Engineering and Technology*, 5, 269-277.

- Ghutukade, S. T. ve Sawant, S. M. (2013). Use of ranked position weighted method for assembly line balancing. *Int. J. Adv. Engg. Res. Studies/II/IV/July-Sept*, 1(03).
- Göçer, E.G. (2018). *Çok modelli üretim yapan montaj hatlarında eş zamanlı montaj hattı dengeleme ve istasyonlar arası ara stok alanı atama problemi için bir çözüm yaklaşımı* (Yüksek Lisans Tezi), TOBB ETÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara. Erişim adresi: <http://www.earsiv.etu.edu.tr/xmlui/>
- Helgeson, W. B. ve Birnie, D.P. (1961). Assembly line balancing using the ranked positional weighted technique. *Journal of Industrial Engineering*, 12, 394-398.
- Hıdımoğlu, M. B. (2019). *Montaj hattında kapasite dengeleme ve verimlilik analizi* (Doktora Tezi), Marmara Üniversitesi, İstanbul. Erişim adresi: <https://avesis.marmara.edu.tr/>
- Khan, M. S., ve Jha, S. A. U. R. A. B. H. (2017). Evaluation of standard time with the application of rank positional weighted method in the production line. *Int J Mech Product Eng Res Develop*, 7(2), 73-80.
- Kılıç, G. (2010). *Hazır giyim işletmelerinde üretim hattı dengelemesine yönelik bir uygulama* (Yüksek Lisans Tezi), Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Kökhan, S. (2020). *Farklı tipte işgücüne sahip maliyet yönelimli paralel montaj hattı dengeleme problemi için modelleme ve çözüm*. (Doktora Tezi). Gazi Üniversitesi, Ankara. Erişim adresi: <https://avesis.gazi.edu.tr/>
- Kumar, G., ve Gowda, P. (2016). An optimal balancing of assembly line using Rpw. *Int. J. Eng. Res. Adv. Technol*, 1, 469-475. Erişim adresi: <https://www.ijerat.com/index.php/ijerat/index>
- Küçükkoç, İ. (2011). *Karışık modelli montaj hattı dengeleme problemleri ve genetik algoritmalar ile bir uygulama* (Yüksek Lisans Tezi), Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir. Erişim adresi: <https://dSPACE.balikesir.edu.tr/xmlui/>
- Küçükkoç, İ. (2021). Montaj Hattı Dengeleme Ders Notları. Erişim adresi:

<http://ikucukkoc.baun.edu.tr/lectures/EMM4208/EMM4208MontajHattiDersNotlari.pdf>

- Manoria, A., Mishra, S. K. ve Maheshwar, S. (2012). Exper system based on RPW technique to evaluating multi product assembly line balancing solution, *International Journal of Computer Applications*, 40(4), 27-32. Doi: <https://doi.org/10.5120/5034-7185>
- Mishra, S.K. ve Manoria, A. (2012). Assembly line balancing by RPW method in language C++, *International Journal of Mechanical and Production Engineering*, 2, 70-80.
- Nahar, K., Habib, A., Nayon, A. A., ve Hossain, M. (2018). Assembly line balancing using ACO Algorithm and RPW Method: A Comparative case study. *Journal of Modern Science and Technology*, 6(3), 13-24. Erişim adresi: <https://zantworldpress.com/journals/?i=journal-of-modern-science-and-technology>
- Özçelik, F. (2018). Basit düz ve U-tipi montaj hattı dengeleme problemleri için diferansiyel evrim algoritması. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 24(1), 130-140. Erişim adresi: <https://dergipark.org.tr/en/pub/pajes/issue/35876/400849?publisher=pamukkale&publisher=pamukkale>
- Özkan, R. (2003). *Tek modelli deterministik montaj hattı dengeleme problemlerine genetik algoritma ile çözüm yaklaşımı* (Yüksek Lisans Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul. Erişim adresi: <https://polen.itu.edu.tr/home>
- Salveson, M.E. (1955). The assembly balancing problem, *Journal of Industrial Engineering*, 6, 18-25.
- Şahin, B.N. ve Kahya, E. (2018). Hedef programlama problemi ile ergonomik kısıtlar altında montaj hattı dengelemesi, *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 6(ÖS: Ergonomi2017), 188-196. Doi: <https://doi.org/10.21923/iesd.358709>
- Tavşancıl, E. (2021). Temel İstatistik Ders Notu. Erişim adresi: https://acikders.ankara.edu.tr/pluginfile.php/169671/mod_resource/content/0/12_T%20TEST%C4%B0.pdf
- Topaloğlu Yıldız, Ş., Yıldız, G. ve Cin, E. (2020). Bir elektronik firmasında işçi atamalı montaj hattı dengeleme problemine matematiksel programlama ve benzetim modelleme tabanlı

bir çözüm yaklaşımı, *Afyon Kocatepe Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 22(1), 57-73. DOI: <https://doi.org/10.33707/akuiibfd.645402>

Uyanık, A.Ş. (2020). *Bir traktör fabrikasında karışık modelli montaj hattı dengeleme-deterministik ve stokastik ölçümlere göre analizler* (Yüksek Lisans Tezi), TOBB ETÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara. Erişim adresi: <http://earsiv.etu.edu.tr/>

Yetkin, B. N. ve Kahya, E. (2021). Ergonomik montaj hattı dengeleme problemine farklı çözüm yaklaşımları. *Endüstri Mühendisliği Dergisi*, 32(2), 217-234. Erişim adresi: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/endustrimuhenDisligi>

Yılmaz, H. ve Yılmaz, M. A. (2016). Multi-managed assembly line balancing problem with classified teams: a new approach. *Montaj Otomasyonu*, 36(1), 51-59. Doi: <https://doi.org/10.1108/AA-04-2015-035>

Zhang, Z. ve Cheng W. (2010). Teaching assembly line balancing problem by using Lingo Software, 2010 *Second International Workshop on Education Technology and Computer Science*, 663-666. Doi: <https://doi.org/10.1109/ETCS.2010.456>

Ek 1**MODEL:**

! İstasyon sayısını minimize eden model;

SETS:

! Tanımlanmış 37 tane iş ögesi bulunmaktadır;

GOREV / 1..37 / : G ;

! Tanımlanan görevler öncelik sırasına sahiptir. ;

ONCELIK (GOREV,GOREV) / 1,2 2,3 3,4 4,5 5,6 6,7 7,8 8,9 9,10 9,11 11,12 12,13 13,14 14,15 15,16 16,17
17,18 18,19 19,20 20,21 21,22 22,23 23,24 24,25 25,26 26,27 27,28 28,29 29,30 30,31 31,32 32,33 33,34
34,35 35,36 36,37 / ;

!Toplam 18 istasyon vardır. ;

ISTASYON / 1..18 / ;

!X'e (görev,istasyon) ataması;

GXI (GOREV, ISTASYON): X;

ENDSETS

!Görev süreleri ve çevrim süresi;

DATA :G = 18, 11, 5, 6, 8, 13, 8, 20, 13, 20, 21, 10, 19, 13, 13, 22, 10, 5, 6, 5, 22, 12, 10, 12, 5, 5, 18, 7, 23, 10, 25, 4, 4,
10, 7, 8, 10;
CYCTIME= 35;**ENDDATA**

!X(I,J)ataması değeri ya 0 ya da 1 olsun;

@FOR (GXI: @BIN (X));

@FOR (ISTASYON: @BIN (A));

!Her görev bir istasyona atanmalı;

@FOR (GOREV (I): @SUM(ISTASYON(K): X(I,K))=1);

!Her öncelik çifti için, J(ardıl) görevi, I(öncül) görevinden önce atanamaz;

@FOR(ONCELIK (I, J):

@SUM (ISTASYON (K):

K * X(J, K)- K * X (I, K) >= 0);

!Her istasyon için atanan görevlerin toplam süresi,çevrim süresinden az olmalı

@FOR (ISTASYON(K):

@SUM (GXI(I, K):G(I) * X(I, K) <= CYCTIME);

!İstasyon kısıtlaması;

@FOR (ISTASYON(K): @SUM (GXI(I, K):

X(I, K) <= @size(GOREV)*A(k));

!İstasyon sayısını minimize eden amaç fonksiyonu;

MIN = @SUM (ISTASYON(k):A(k));

END