



Received: April 30, 2019  
Accepted: October 10, 2019  
Published Online: December 31, 2019

AJ ID: 2018.07.02.OR.03  
DOI: 10.17093/alphanumeric.559310  
**Research Article**

## A Solution Approach Proposal for Disassembly Line Balancing Based on ELECTRE

Nurcan Deniz, Ph.D. \*

Assist. Prof., Department of Business Administration, Faculty of Economics and Administrative Sciences, Eskisehir Osmangazi University, Eskisehir, Turkey, nurcanatikdeniz@gmail.com

Feriştah Özçelik, Ph.D.

Assoc. Prof., Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Eskisehir Osmangazi University, Eskisehir, Turkey, fdurmaz@ogu.edu.tr

\* Eskişehir Osmangazi Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Meşelik Kampüsü 26480 Eskişehir, Türkiye

### ABSTRACT

Disassembly is a crucial subject in view of the fact that it has a pivotal role in reverse supply chains. It will be possible to make effective disassembly operations with disassembly line balancing. In this study, ELECTRE is used for the first time in the literature to determine the assignment priorities of the tasks to work stations. Two algorithms are also proposed to improve the initial assignments. The first improvement algorithm aims to minimize the workstation number if it is possible. On the other hand, the aim of the second improvement is to make a better balance with interchanging the tasks between workstations. The result is compared with the results in the literature. A novel comparison criteria is also proposed called Deviation Mean (DM) in this study.

### Keywords:

Disassembly Line Balancing, Multi Criteria Decision Making, Supply Chain Management, Sustainability

## Demontaj Hattı Dengeleme Problemi için ELECTRE'ye Dayalı Bir Çözüm Yaklaşımı Önerisi

### ÖZ

Demontaj, tersine tedarik zincirlerindeki kilit rolü göz önüne alındığında önem arz eden bir konudur. Demontaj işleminin etkin yapılması ise demontaj hatlarının dengelenmesi ile mümkün olabilecektir. Bu çalışmada demontaj görevlerinin iş istasyonlarına atanma önceliklerinin belirlenmesi için ELECTRE yöntemi ilk kez kullanılmıştır. Bu önceliklerin kullanılmasıyla elde edilen atamaların iyileştirilmesi için iki algoritma önerilmiştir. İlk iyileştirme algoritması mümkün ise istasyon sayısını en küçükmeyi hedeflerken, ikinci algoritma da görevlerin atandığı istasyonları değiştirerek daha iyi bir dengeleme yapmayı hedeflemektedir. Elde edilen çözüm literatürde TOPSIS, PROMETHEE ve çoklu gruplama hiyerarşisi ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Bu çalışma kapsamında ayrıca özgün bir karşılaştırma ölçütü olarak Deviation Mean (DM) önerilmiştir.

### Anahtar Kelimeler:

Demontaj Hattı Dengeleme, Çok Ölçütlü Karar Verme, Tedarik Zinciri Yönetimi, Sürdürülebilirlik



## 1. Giriş

Son yıllarda ortaya çıkan teknolojik yenilikler ve yenilikçilik nedeniyle tüketiciler, yeni ve daha gelişmiş ürünleri var olan ürünlerden daha ucuza satın alabilmektedir (Ding ve ark. 2010; Kulkarni, 2010). Sürekli artan nüfusla paralellik gösteren tüketim seviyesi, kaynakların sınırlı olduğu günümüz dünyasında ciddi bir çevresel problem olan atığa sebep olmaktadır (Özceylan, 2013). Ev ve işyerlerinde elektronik ürünlere olan bağımlılık, yeni bir çevresel soruna yol açmıştır: Elektronik atıklar. Kişisel bilgisayarlar, televizyonlar ve cep telefonu kullanıcıları ürünlerin tamamı veya bazı parçaları çalışıyor olsa bile yeni ürünlerin daha ucuz ve daha kaliteli olması nedeniyle bu ürünleri birkaç ay içinde değiştirebilmektedir (Kulkarni, 2010). Kitlesele bireyselleştirmenin etkisi ile ürün yaşam döngülerinin kısalması da bu durumda etkili olan diğer bir nedendir (Agrawal ve Tiwari (2008: 1405). Son yıllarda önem kazanan diğer bir konu da sürdürülebilirliktir. Sürdürülebilirliğin çevresel, ekonomik ve sosyal bileşenleri bulunmaktadır (Göksoy, 2010). İmalatta sürdürülebilirlik açısından kullanım süresi dolan ürünlerin (EOL) atık malzemelerinin çevreye etkisinin en küçüklenmesi, önemli bir konudur (Bentaha, Battaia, Dolgui, 2014-40).

Kullanım ömrü dolan ürünler, imalatçılar, tüketiciler, hükümetler ve toplumun tamamı için oldukça önemli bir konudur (Riggs ve ark. 2015). Çevre ile ilgili katı yasalar, artan kamu bilinci, imalatçıların genişleyen sorumlulukları ve ürünleri, alt montaj parçalarını ve parçaları tekrar kullanmanın ekonomik çekiciliği nedeniyle imalatçılar, tüketim sonrası ürünlerin geri dönüşümü ve yeniden imalatı ile ilgilenmektedir (McGovern ve Gupta, 2007: 4485). Çevreye duyarlı imalat ve ürün geri kazanımı alanı 1990'lardan bu yana gelişmektedir (Gungor ve Gupta (2002:2569). Ürün geri kazanımının faydaları marka imajını yükseltme, müşteri beklentilerini karşılama, yedek parça ihtiyaçlarını koruma ve hammadde maliyetlerini düşürme olarak sıralanabilir (Özceylan ve Paksoy, 2013). Ürün geri kazanımında yeniden kullanım, geri dönüşüm, yeniden imalat, depolama ve uygun şekilde yok etme şeklinde beş seçenek vardır. Genellikle bu seçeneklerin hepsinden önce kullanım süresi dolan ürünün demontajının yapılması gerekmektedir (McGovern ve Gupta, 2011). Demontaj "bir ürünün kendisini oluşturan parça, bileşen, alt montaj ve diğer gruplara ayrılmasına ilişkin sistematik bir süreç" olarak tanımlanmaktadır.

Ürün geri kazanımının başarısı kısmi olarak demontaj hatlarının ekonomik etkinliğine bağlıdır. (Bentaha, Battaia ve Dolgui, 2013). Demontaj, iş yükü yoğun ve pahalı bir eylem olduğu için otomatik demontaj sistemlerinin geliştirilmesi önemlidir (Prakash ve Tiwari, 2005). Demontaj, geri dönüşüm sürecinin ilk ve en önemli aşaması (Ding ve ark. 2010) ve ürün geri kazanımı sürecinin en fazla zaman harcayan adımı olarak görülmektedir (Kalaycı ve Gupta, 2013). Demontaj işlemleri tek bir iş istasyonunda gerçekleştirilebildiği gibi, bir demontaj hücresinde veya demontaj hattında da gerçekleştirilebilir. Tek iş istasyonu ve demontaj hücreleri daha esnek olmasına rağmen en yüksek verimlilik demontaj hatları ile elde edilebilmektedir. Ayrıca demontaj hatları otomatik demontaj için de daha uygundur (Ilgın, 2010).

Demontaj hattı dengeleme (DHD) problemi yazında ilk kez Gungor ve Gupta (1999) tarafından ortaya konulmuştur. Problem n adet görevin öncelik ilişkilerini dikkate alarak m adet istasyona atanması şeklinde tanımlanmıştır. DHD problemi ekonomik, çevresel, teknik ve sosyal yönleri bulunan karmaşık bir karar alma problemidir (Avikal

ve ark. 2014). Bu yapısı nedeniyle ilgili problemi çok ölçütlü karar verme (ÇÖKV) problemi olarak ele alan çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmalarda AHP (Avikal ve ark.2014-a, Avikal ve ark. 2014-b), bulanık AHP (Kazançoğlu ve Öztürkoğlu, 2018), uyarlanmış TOPSIS (Avikal ve ark. 2014-b), PROMETHEE (Avikal ve ark.2014-a), çoklu gruplama hiyerarşisi (Ren ve ark. 2018), bulanık MOORA (Kazançoğlu ve Öztürkoğlu, 2018) ve DEMATEL (İlgin, 2018) yöntemleri kullanılmıştır (Deniz ve Ozcelik, 2019).

Avikal ve ark. (2014-a) bulanık AHP ve PROMETHEE tekniklerine bağlı bir sezgisel geliştirmişlerdir. Bu çalışmada ardıl sayısı, gelir, parça talebi, demontaj süresi ve parçanın tehlikeli olma durumu şeklinde beş ölçüt belirlenmiştir. DHD problemi aynı araştırmacılar tarafından bulanık AHP ile birlikte uyarlanmış TOPSIS kullanılarak da çözülmüştür. Bu çalışmada malzemenin durumu ve kırılabilirlik şeklinde iki yeni ölçüt eklenmiştir (Avikal ve ark. 2014-b). Ren ve ark. (2018) ise min-max normalleştirme, bulanık Choquet integral ve 2-opt algoritmasına dayalı çoklu gruplama hiyerarşisi kullandığı çalışmada "kalan ömür" adlı yeni bir ölçüt eklemiştir. Yeşil konularla ilgili ölçütleri demontaj hat dengeleme problemine dâhil eden Kazançoğlu ve Öztürkoğlu (2018) çalışmalarında bulanık AHP ve bulanık MOORA tekniklerini bir arada kullanmışlardır.

Bu çalışmada demontaj hattı dengeleme probleminin çözümü için beş aşamalı bir yöntem önerilmiştir. İlk aşamada değerlendirme sırasında dikkate alınacak ölçütler belirlenmiştir. Sonrasında söz konusu ölçütlerin ağırlıkları belirlenmiştir. Üçüncü aşamada görevlerin istasyonlara atanma sırası ELECTRE tekniği ile belirlenmiştir. Dördüncü aşamada ise görevler, belirlenen sıralama dikkate alınarak iş istasyonlarına atanmıştır. Son aşamada ise iyileştirme algoritması kullanılarak bir önceki aşamada elde edilen atama iyileştirilmiştir.

İzleyen bölümde ELECTRE yöntemi tanıtılmış, üçüncü bölümde önerilen çözüm yaklaşımı literatürden alınan bir örnek problem kullanılarak anlatılmıştır. Çalışmanın son bölümünde ise elde edilen sonuçlar tartışılmıştır.

## 2. ELECTRE

ELECTRE (ELimination Et Choix Traduisant la REalité -Eng. ELimination and Choice Expressing the REality) 1960'ların başında Bernard Roy ve SEMA danışmanlık şirketindeki arkadaşları tarafından geliştirilmiştir (Bezdrob et al, 2011). Belton ve Stewart (2002) tarafından yapılan sınıflandırmaya göre ÇÖKV teknikleri değer ölçüm modelleri, referans seviyesi modelleri ve üstünlük modelleri olmak üzere üç gruba ayrılmaktadır. ELECTRE bu sınıflandırmada üstünlük modelleri içerisinde değerlendirilmektedir (Govindan & Jepsen, 2016). ELECTRE, hem uyum hem de uyumsuzluğu bir arada ele alma fırsatı sunması yönüyle diğerlerinden ayrılmaktadır. ELECTRE yöntemi izleyen adımlardan oluşmaktadır (Zang et al, 2018; Supraja & Kousalya, 2016; Yaralıoğlu, 2010):

*Adım 1: Karar Matrisinin Hesaplanması (A):* A matrisinin satırlarında karar noktaları, sütunlarında ise değerlendirme ölçütleri yer almaktadır.  $m$  karar nokta sayısını gösterirken,  $n$  değerlendirme ölçütü sayısını göstermektedir. Matriste yer alan her  $a_{ij}$  değeri  $j$ . çözümün  $i$ . değerlendirme ölçütünü temsil etmektedir.

$$A_{ij} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \cdot & & & \cdot \\ \cdot & & & \cdot \\ \cdot & & & \cdot \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

*Adım 2: Normalleştirilmiş Karar Matrisinin Hesaplanması (X):* X ile gösterilen normalleştirilmiş matris sütun vektörlerinin (2) formülü aracılığıyla normalleştirilmesi ile elde edilir.

$$x_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sqrt{\sum_{k=1}^m a_{kj}^2}} \quad (2)$$

Bu adımın amacı değişik boyutlardan kaynaklanan etkileri yok etmektir.

$$X_{ij} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \cdot & & & \cdot \\ \cdot & & & \cdot \\ \cdot & & & \cdot \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (3)$$

*Adım 3: Ağırlıklandırılmış Normalize Karar Matrisinin Hesaplanması (Y):* Değerlendirme ölçütlerinin önem derecesi karar alıcılara göre değişiklik gösterebilir.

Bu adımda  $\sum_{i=1}^n w_i = 1$  kısıtını sağlayacak şekilde elde edilen her bir ölçüte ilişkin ağırlık değerleri ( $w_i$ ) X matrisi ile çarpılmaktadır.

$$Y_{ij} = \begin{bmatrix} w_1 x_{11} & w_2 x_{12} & \dots & w_n x_{1n} \\ w_1 x_{21} & w_2 x_{22} & \dots & w_n x_{2n} \\ \cdot & & & \cdot \\ \cdot & & & \cdot \\ \cdot & & & \cdot \\ w_1 x_{m1} & w_2 x_{m2} & \dots & w_n x_{mn} \end{bmatrix} \quad (4)$$

*Adım 4: Uyum Kümesi ( $C_{kl}$ ) ve Uyumsuzluk Kümesinin ( $D_{kl}$ ) Hesaplanması:* Amacın enbüyükleme olması durumunda karar noktaları arasında (5) ifadesine göre karşılaştırma yapılarak uyum kümesi belirlenir.

$$C_{kl} = \{ j | y_{kj} \geq y_{lj} \} \quad (5)$$

Her uyum kümesine karşılık gelen bir de uyumsuzluk kümesi bulunmaktadır. Bu kümenin elemanları da uyum kümesine dâhil olmayan elemanlardır.

**Adım 5: Uyum Matrisi (C) ve Uyumsuzluk Matrisinin (D) Hesaplanması**

Uyum matrisi her uyum kümesindeki her bir elemanın ağırlıklı değerinin toplanması ile (6) elde edilir. C matrisi  $m \times m$  boyutunda olup, köşegenler değer almamaktadır.

$$c_{kl} = \sum_{j \in C_{kl}} w_j \quad (6)$$

$$C = \begin{bmatrix} - & c_{12} & c_{13} & \dots & c_{1m} \\ c_{21} & - & c_{23} & \dots & c_{2m} \\ \cdot & & & & \cdot \\ \cdot & & & & \cdot \\ \cdot & & & & \cdot \\ c_{m1} & c_{m2} & c_{m3} & \dots & - \end{bmatrix} \quad (7)$$

Uyumsuzluk matrisi (D) ise izleyen şekilde ifade edilmektedir:

$$d_{kl} = \frac{\max_{j \in D_{kl}} |y_{kj} - y_{lj}|}{\max_j |y_{kj} - y_{lj}|} \quad (8)$$

Benzer şekilde D matrisi de  $m \times m$  boyutundadır ve  $k = 1$  için değer almamaktadır.

$$D = \begin{bmatrix} - & d_{12} & d_{13} & \dots & d_{1m} \\ d_{21} & - & d_{23} & \dots & d_{2m} \\ \cdot & & & & \cdot \\ \cdot & & & & \cdot \\ \cdot & & & & \cdot \\ d_{m1} & d_{m2} & d_{m3} & \dots & - \end{bmatrix} \quad (9)$$

**Adım 6: Uyum Baskınlık (F) ve Uyumsuzluk Baskınlık (G) Matrisinin Hesaplanması:**  $m \times m$  boyutundaki uyum baskınlık (F) matrisinin elemanları uyum eşik değeri ( $\underline{c}$ ) ve uyum matrisi değerlerine ( $c_{kl}$ ) göre hesaplanır. Eşik değeri ( $\underline{c}$ ) (10) eşitliğine göre hesaplanır.

$$\underline{c} = \frac{1}{m(m-1)} \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^m c_{kl} \quad (10)$$

Uyum matrisi F'in elemanları  $c_{kl} \geq \underline{c} \Rightarrow f_{kl} = 1$ , diğer durumda  $c_{kl} < \underline{c} \Rightarrow f_{kl} = 0$  olacak şekilde belirlenir.

Uyumsuzluk baskınlık matrisi G de (11) numaralı denklem aracılığıyla hesaplanan eşik değerinden hareketle oluşturulmaktadır.

$$\underline{d} = \frac{1}{m(m-1)} \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^m d_{kl} \quad (11)$$

G matrisinin elemanları da  $d_{kl} \geq \underline{d} \Rightarrow g_{kl} = 1$ , diğer durumlarda  $d_{kl} < \underline{d} \Rightarrow g_{kl} = 0$  olacak şekilde belirlenir.

*Adım 7: Birikimli Baskınlık Matrisinin Hesaplanması (E):* E matrisinin elemanları ( $e_{kl}$ ) F matrisinin elemanları ( $f_{kl}$ ) ile ilişkili olduğu G matrisinin elemanlarının ( $g_{kl}$ ) çarpımı ile elde edilir. E matrisi de  $m \times m$  boyutundadır ve tüm elemanları 0 veya 1 değerini alır. Çözümler her bir satırın değer toplamlarından hareketle elde edilir.

### 3. Önerilen Çözüm Yaklaşımı

Bu çalışmada, demontaj hattı dengeleme probleminin çözümü için beş aşamalı bir çözüm yaklaşımı önerilmiştir. İlk aşamada görevlerin atanma sırasının belirlenmesinde dikkate alınacak ölçütler belirlenmiştir. Sonrasında söz konusu ölçütlerin ağırlıkları belirlenmiştir. Üçüncü aşamada ELECTRE tekniği kullanılarak görevlerin istasyonlara atanma sırası belirlenmiştir (Deniz ve Ozcelik, 2018). Dördüncü aşamada ise görevler, belirlenen sıralama kullanılarak iş istasyonlarına atanmış ve elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Son aşamada ise ikili değişikliğe dayanan bir iyileştirme algoritması kullanılarak bir önceki aşamada elde edilen atama iyileştirilmiştir.

#### 3.1. Ölçütlerin Belirlenmesi

Görevlerin istasyonlara atanma sırasının belirlenmesi sırasında dikkate alınacak ölçütler, literatürde bu konuda yapılan çalışmalar dikkate alınarak belirlenmiştir (Tablo 1). Bu çalışmada diğer çalışmalardaki ölçütleri kapsayacak şekilde 8 ölçüt belirlenmiştir. Belirlenen ölçütler aşağıda listelenmiştir.

01. *Ardıl sayısı:* Ardılı daha çok olan görevin diğerlerine göre mümkün olduğu kadar erken atanmasını sağlar. Bu görevin istasyonlara erken atanması daha iyi bir denge değeri elde edilmesine imkân sağlar (Avikal ve ark. 2014-a).
02. *Demontaj süresi:* Yüksek demontaj süresine sahip görevin iş istasyonlarına daha erken atanması ile birlikte iş istasyonlarının doluluk oranlarının artması ve en küçük istasyon sayısı ile çalışılması mümkün olabilmektedir (Avikal ve ark. 2014-a).
03. *Tehlikeli parça varlığı:* Tehlikeli parçaların mümkün olduğunca erken demonte edilmesi talep edilen parçalarla etkileşime girme, malzeme taşıma sistemlerine zarar verme ve iş istasyonuna zarar verme riskleri nedeniyle önemlidir (Avikal ve ark. 2014-a).
04. *Parça talebi:* Talebi yüksek olan parçaların ilk iş istasyonlarına atanması önemlidir, zira demontaj sürecinde kaldığı müddetçe hasar görme şansı artmaktadır. Müşteriye bu ürünlerin daha kısa sürede ulaştırılması demontaj sistemini güçlendirdiği gibi müşteri ile ilişkileri de güçlendirir (Avikal ve ark. 2014-a).
05. *Kar:* Daha yüksek gelir getiren parçaların mümkün olduğunca erken atanmasına ilişkindir. Daha yüksek gelir getiren parçaların daha erken atanması sayesinde demonte edilen parçalar müşterilere daha erken teslim edilebilir. Böylece demontaj hattı güçlendirilmiş olur (Avikal ve ark. 2014-a).
06. *Kırılganlık:* Kırılganlık malzemenin kolay kırılabilmesiyle ilgilidir. Bu malzemeler kolaylıkla zarar görebileceğinden dolayı mümkün olduğunca erken demonte edilmesi önerilmektedir (Avikal ve ark. 2014-b)

07. *Kalan ömür*: Bir parçanın kalan ömrünün daha fazla olması kalite açısından daha iyi olduğunu göstermektedir. Kalan ömrü fazla olan parçaların öncelikli olarak demonte edilmesi gerekmektedir (Ren ve ark. 2018).
08. *Malzemenin durumu*: Maddenin fiziksel halleri katı, sıvı ve gaz şeklindedir. Demontaj sürecindeki ürüne ait parçalar değişik hallerde bulunabilir. Demontaj sırasında ilk olarak gaz halindeki bileşenlerin çıkarılması gereklidir. Daha sonra sıvı ve katı sırası takip edilmelidir (Avikal ve ark. 2014-b).

Ölçüt	Avikal ve ark. 2014 a	Avikal ve ark. 2014 b	Ren ve ark. 2018	Bu çalışma
Ardıl Sayısı	✓	✓		✓
Gelir**	✓	✓	✓	
Parça Talebi	✓	✓	✓	✓
Demontaj Süresi	✓	✓		✓
Parçanın Tehlikeli Olması	✓	✓	✓	✓
Malzemenin durumu (gaz, sıvı, katı)		✓	✓	✓
Kırılganlık		✓	✓	✓
İş istasyonu sayısı*			✓	
Hat dengesi*			✓	
Demontaj maliyeti**			✓	
Kar			✓	✓
Kalan ömür			✓	✓

\* Bu ölçütler ÇÖKV içine dahil edilmemiş, 2-opt yerel arama algoritmasında en küçüklenmeye çalışılmıştır.

\*\* Bu ölçütler kar gelir ve maliyetin farkından hareketle hesaplandığı için dikkate alınmamıştır.

**Tablo 1.** Kullanılan Ölçütlerin Karşılaştırmalı Analizi

Çalışmada ele alınan 8 adet ölçüt diğer yayınlardaki gruplandırmalar dikkate alınarak, yapısal (ardıl sayısı ve demontaj süresi), ekonomik (talep ve kar), çevresel (tehlikeli olma ve malzemenin durumu) ve kalite (kırılganlık ve kalan ömür) olmak üzere ikiyeşerli olarak 4 faktör altında gruplandırılmıştır. Söz konusu gruplandırma Tablo 2'de yer almaktadır.

	01	02	03	04	05	06	07	08
<b>A</b> Yapısal	*	*						
<b>B</b> Ekonomik				*	*			
<b>C</b> Çevresel			*					*
<b>D</b> Kalite						*	*	

01: ardıl sayısı, 02: demontaj süresi, 03: tehlike, 04: talep, 05:kar, 06: kırılganlık, 07: kalan ömür, 08: malzemenin durumu

**Tablo 2.** Faktörler

### 3.2. Ölçütlerin Ağırlıklarının Belirlenmesi

İkinci aşama, ölçütlerin ağırlıklarının belirlenmesidir. Literatürde ağırlıklar genellikle AHP veya bulanık AHP yöntemleri ile belirlenmektedir. Bu çalışmada ise ağırlıklar, Deniz (2016) tarafından hazırlanan doktora tezinde geliştirilmiş olan bir yöntem kullanılarak belirlenmiştir. Bu çalışmada dört faktör olduğundan ilgili yöntem dört faktöre göre uyarlanmıştır. Söz konusu *basit* ve *zeki* yöntem Gülmez (2005) ve Büyükközkan ve ark. (2011) çalışmalarından faydalanılarak geliştirilmiştir. Yöntemin *zekâsı*, önceki değerlendirmeleri hafızasında tutarak tekrar karşılaştırmaya gerek

bırakmamasıdır. *Basitliği* de buradan hareketle ikili karşılaştırma sayısını azaltması ve tutarsızlık indeksi hesaplanmasına gerek duyulmamasından kaynaklanmaktadır.

4 faktör için ağırlıklandırma yönteminin adımları izleyen şekildedir.

1. Adım: İlk iki faktörün karşılaştırılması

2. Adım: Sonraki iki faktörün karşılaştırılması

3. Adım: İlk iki adımın galibi olan faktörlerin karşılaştırılması (Bu adımın çıktısı olan faktör 1. önem derecesindedir)

4. Adım: İlk iki adımın mağlubu olan faktörlerin karşılaştırılması (Bu adımın mağlubu 4. önem derecesindedir)

5. Adım: 3. Adımın mağlubu ile 4. Adımın galibinin karşılaştırılması (Bu adımın galibi 2. önem derecesinde, mağlubu 3. önem derecesindedir)

Ölçekte yer alan ilk iki soru sabit olup, diğer sorular ilk sorulara verilen cevaplara göre Excel ortamında hazırlanan bir şablonda otomatik olarak türetilmektedir. Söz konusu ölçek, 3 uzman tarafından cevaplanmıştır. Ölçekte yer alan sorular “Hangi faktör daha önemli? .... ya da ....” şeklinde sorulmuştur. Her bir uzmanın sorulara verdiği cevaplar Tablo 3 (a) U1, U2 ve U3 sütunlarında ve faktör sıralamaları Tablo 3 (b) de yer almaktadır.

Soru No	U1			U2			U3		
Q1	A veya B	A	A veya B	B	A veya B	B	A veya B	B	
Q2	C veya D	C	C veya D	C	C veya D	C	C veya D	C	
Q3	A veya C	A	B veya C	B	A veya C	B	A veya C	C	
Q4	B veya D	B	A veya D	D	B veya D	D	A veya D	A	
Q5	C veya B	B	C veya B	D	C veya B	C	B veya A	B	

**Tablo 3 (a).** Faktör karşılaştırma soruları ve cevapları

	U1	U2	U3
1	A	B	C
2	B	C	B
3	C	D	A
4	D	A	D

**Tablo 3 (b).** Faktör sıralamaları

İzleyen aşamada aynı işlem her bir faktör altında yer alan ölçütlere uygulanmıştır. Her bir faktör altında ikişer ölçüt olduğu için her üç uzman, dört soruda her bir faktör altında yer alan ölçütleri ikili olarak karşılaştırarak hangi ölçütün daha önemli olduğunu belirlemişlerdir. Bu kez “Hangi ölçüt daha önemli? .... ya da ....” genel sorusu sorulmuştur. Uzmanların verdiği cevaplar Tablo 4’te yer almaktadır.

Soru	U1	U2	U3
Q1	01 veya 02	01	02
Q2	04 veya 05	04	05
Q3	03 veya 08	03	03
Q4	06 veya 07	07	06

**Tablo 4.** Ölçütlerin Karşılaştırması

Ölçüt veya faktör ağırlıklarının belirlenmesinde karşılaştırma sonucunda elde edilen sıralamada ölçüt veya faktörün yer aldığı konum dikkate alınmıştır. Şöyle ki, her bir



sıranın ağırlığının bir sonraki sıranın ağırlığından iki kat fazla olduğu varsayımı ile hareket edilmiştir. Buna göre faktörler açısından ilk sıranın ağırlığı 0.533 olarak belirlenmişken, diğer sıraların ağırlıkları sırasıyla 0.267, 0.133 ve 0.067 şeklinde gerçekleşmiştir. Elde edilen değerler normalleştirilerek (Tablo 7a) son ağırlıkları elde edilmiştir. Tablo 5 (a) da yer alan değerler ilgili faktörün hangi sırada kaç kez bulunduğuyla ilişkindir. Örneğin, Tablo 5 (b) de görüleceği üzere A faktörü sadece Uzman 1 tarafından en önemli (ilk sırada) değerlendirilmiştir. D faktörü ise hem ilk hem de üçüncü uzmanın (U3) sonuçlarına göre dördüncü sırada yer aldığı için D faktörünün 4. sırada yer alma sayısı 2 olarak belirlenmiştir.

	1	2	3	4	Ağırlıklar	Normalleştirilmiş ağırlıklar
A	1		1	1	0.733	0.256
B	1	2			1.067	0.372
C	1	1	1		0.933	0.326
D			1	2	0.133	0.046

**Tablo 5 (a).** Faktör ağırlıkları

Ölçütler için de aynı mantık izlenmiştir. Buna göre ilk sırada olmanın ağırlığı 0.67 iken ikinci sırada olmanın ağırlığı 0.33'tür. Örneğin ilk faktör için ağırlıklandırma Tablo 7 (b) de yer almaktadır.

	1	2	Ağırlıklar	Normalleştirilmiş ağırlıklar
O1	2	1	1.667	0.556
O2	1	2	1.333	0.444

**Tablo 5 (b).** Ölçüt ağırlıkları

Son aşamada ise her ölçütün ağırlığı, bağlı olduğu faktörün ağırlığı ile çarpılarak sonuç ağırlıkları (Tablo 6) elde edilmiştir. Örneğin O1'in ağırlığı bağlı olduğu faktörün ağırlığı olan 0.256 ile kendi ağırlığı olan 0.555 ile çarpılarak 0.142 sonucu elde edilmiştir.

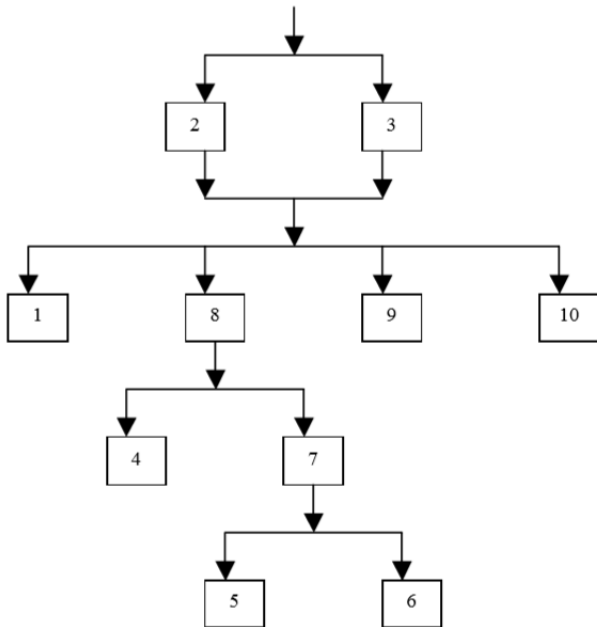
Gerçekleştirilen değerlendirme sonucunda en önemli faktör ve ölçüt, sırasıyla ekonomik faktör ve tehlikeli olma ölçütü olarak bulunmuştur. Bulunan sonuçlar en önemli ölçütün tehlikeli olma ölçütü olması yönüyle yazındaki diğer çalışmalar ile tutarlılık göstermektedir. Diğer ölçütler açısından ise bazı farklılıklar bulunmaktadır. Bu çalışmada tespit edilen ağırlıkların bir avantajı da uç değerlere sahip olmamasıdır. Bir ölçütün ağırlığı diğer ölçütlere baskın bir şekilde fazla değildir. Oysaki önceki çalışmalarda böyle bir durum tespit edilmiştir. Örneğin, Avikal (2014a) en önemli ölçüt olan parçanın tehlikeli olma durumunun ağırlığını bulanık AHP tekniği ile 0.506 olarak belirlemiştir. Ren ve ark. (2018)'nin çalışmasında bu durum daha bariz bir şekilde görülmektedir. Parçanın tehlikeli olma durumunun ağırlığı 0.744 olarak belirlenmiştir.

Ölçüt	Ağırlık
O1	0.142
O2	0.114
O3	0.217
O4	0.207
O5	0.165
O6	0.021
O7	0.026
O8	0.109
<b>Toplam</b>	<b>1</b>

**Tablo 6.** Ölçütlerin son ağırlıkları**3.3. Atama Sırasının Belirlenmesi**

Bu aşamada ÇÖKV tekniklerinden ELECTRE kullanılmıştır. Yöntemin uygulaması literatürden alınan 10 görev için örnek bir problem kullanılarak yapılmıştır. Bu problemin verileri Tablo 7’de, öncelik diyagramı da Şekil 1’de verilmiştir.

No	O1	O2	O3	O4	O5	O6	O7	O8
1	0	14	0.0454	0	-10	0.2365	0.5	2
2	3	10	0.1399	500	55	0.6223	0.3777	1
3	3	12	0.01399	0	-11	0.3777	0.2365	3
4	0	18	0.5	0	-5	0.0454	0.5	1
5	0	23	0.3777	0	-6	0.1399	0.5	1
6	0	16	0.1399	750	12	0.1399	0.5	1
7	1	20	0.7435	295	72	0.0454	0.1399	1
8	2	36	0.1399	0	-9	0.0454	0.7435	1
9	0	14	0.0454	360	15	0.6223	0.5	1
10	0	10	0.5	0	-8	0.1399	0.2365	2

**Tablo 7.** Örnek problem (McGovern ve Gupta, 2003)**Şekil 1.** Öncelik diyagramı (McGovern ve Gupta, 2003)

Dikkate alınan ölçütlerden sadece yedinci ölçüt en küçükleme yönlüdür. Diğer tüm ölçütler enbüyükleme yönlüdür. Hesaplamalarda kolaylık olması açısından yedinci ölçütün değeri 1’den çıkarılarak enbüyükleme yönlü hale getirilmiştir. Söz konusu değişiklik yapıldıktan sonra normalleştirilmiş karar matrisi Tablo 8’de yer almaktadır.

X	O1	O2	O3	O4	O5	O6	O7	O8
1	0,18	0,00	0,04	0,00	-0,11	0,23	0,26	0,41
2	0,00	0,49	0,12	0,49	0,58	0,61	0,33	0,20
3	0,00	0,00	0,01	0,00	-0,12	0,37	0,40	0,61
4	0,37	0,00	0,45	0,00	-0,05	0,04	0,26	0,20
5	0,55	0,00	0,34	0,00	-0,06	0,14	0,26	0,20
6	0,55	0,74	0,12	0,74	0,13	0,14	0,26	0,20
7	0,37	0,29	0,66	0,29	0,76	0,04	0,45	0,20
8	0,18	0,00	0,12	0,00	-0,09	0,04	0,14	0,20

9	0.18	0.35	0.04	0.35	0.16	0.61	0.26	0.20
10	0.18	0.00	0.45	0.00	-0.08	0.14	0.40	0.41

**Tablo 8.** Normalleştirilmiş Karar Matrisi (X)

Tablo 8'de yer alan ağırlıklar kullanılarak hazırlanan ağırlıklandırılmış normalleştirilmiş karar matrisi Tablo 9'da yer almaktadır.

Y	01	02	03	04	05	06	07	08
1	0.03	0.00	0.01	0.00	-0.02	0.00	0.01	0.04
2	0.00	0.06	0.03	0.10	0.10	0.01	0.01	0.02
3	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.02	0.01	0.01	0.07
4	0.05	0.00	0.10	0.00	-0.01	0.00	0.01	0.02
5	0.08	0.00	0.07	0.00	-0.01	0.00	0.01	0.02
6	0.08	0.08	0.03	0.15	0.02	0.00	0.01	0.02
7	0.05	0.03	0.14	0.06	0.13	0.00	0.01	0.02
8	0.03	0.00	0.03	0.00	-0.02	0.00	0.00	0.02
9	0.03	0.04	0.01	0.07	0.03	0.01	0.01	0.02
10	0.03	0.00	0.10	0.00	-0.01	0.00	0.01	0.04

**Tablo 9.** Ağırlıklandırılmış Normalleştirilmiş Karar Matrisi(Y)

Gerekli formüller aracılığıyla uyum ve uyumsuzluk kümeleri ile uyum (C) (Tablo 10.a) ve uyumsuzluk (D) (Tablo 10.b) matrisleri hesaplanmıştır.

1	0.25	0.845	0.475	0.48	0.155	0.13	0.618	0	0.5917
0.75	1	0.866	0.641	0.64	0.537	0.45	0.858	1	0.5065
0.48	0.28	1	0.475	0.48	0.155	0.13	0.475	0	0.4755
0.87	0.47	0.845	1	0.84	0.351	0.27	1	0	0.845
0.87	0.47	0.845	0.618	1	0.514	0.27	1	0	0.6486
0.87	0.79	0.845	0.783	0.78	1	0.59	1	1	0.6486
0.87	0.66	0.871	1	0.84	0.517	1	1	1	0.8708
0.84	0.47	0.845	0.45	0.43	0.326	0.13	1	0	0.4625
0.89	0.27	0.866	0.641	0.64	0.32	0.45	0.783	1	0.6486
0.98	0.49	0.871	0.693	0.69	0.372	0.13	1	0	1

**Tablo 10.a.** Uyum Matrisi (C)

0	0.74	0	0.5755	0.421	1	0.94	0.1196	0.48	0.576
0.222	0	0	0.5966	0.667	0.667	1	0.2222	0.222	0.597
0.17	0.75	0	0.6153	0.509	1	0.95	0.1698	0.48	0.615
0.145	0.68	0	0	0.17	1	0.88	0	0.48	0.145
0.145	0.7	0	0.1548	0	1	0.89	0	0.48	0.155
0.19	0.64	0	0.5966	0.394	0	1	0	0.084	0.597
0.239	0.45	0	0	0.28	1	0	0	0.143	0.239
0.145	0.73	0	0.4559	0.34	1	0.92	0	0.48	0.456
0.164	0.52	0	0.6512	0.476	0.588	1	0.1354	0	0.651
0.013	0.72	0	0.1698	0.34	1	0.91	0	0.48	0

**Tablo 10.b.** Uyumsuzluk Matrisi (D)

Uyum eşik değeri 0.61 ve uyumsuzluk eşik değeri 0.358 sırasıyla (10) ve (11) numaralı denklemler aracılığıyla belirlenmiştir. Bu değerlerden hareketle hesaplanan uyum baskınlık (F) ve uyumsuzluk baskınlık (G) matrisleri sırasıyla Tablo 11.a ve Tablo 11.b'de yer almaktadır.

1	0	1	0	0	0	0	1	0	0
1	1	1	1	1	0	0	1	1	0
0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
1	0	1	1	1	0	0	1	0	1
1	0	1	1	1	0	0	1	0	1
1	1	1	1	1	1	0	1	1	1
1	1	1	1	1	0	1	1	1	1

1	0	1	0	0	0	0	1	0	0
1	0	1	1	1	0	0	1	1	1
1	0	1	1	1	0	0	1	0	1

**Tablo 11.a.** Uyum Baskınlık (F) Matrisi

0	1	0	1	1	1	1	0	1	1
0	0	1	1	1	1	1	0	0	1
0	1	0	1	1	1	1	0	1	1
0	1	0	0	0	1	1	0	1	0
0	1	0	0	0	1	1	0	1	0
0	1	1	1	1	0	1	0	0	1
0	1	1	0	0	1	0	0	0	0
0	1	0	1	0	1	1	0	1	1
0	1	0	1	1	1	1	0	0	1
0	1	0	0	0	1	1	0	1	0

**Tablo 11.b.** Uyumsuzluk (G) Matrisi

Tüm aşamalar sonrası Tablo 12’de gösterilen birikimli baskınlık matrisi (E) elde edilmiştir.

E	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Toplam
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	3
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
5	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
6	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	5
7	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	2
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	1	0	1	1	0	0	0	0	1	4
10	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1

**Tablo 12.** Birikimli Baskınlık Matrisi (E)

Tablo 12’deki her satırın toplamı en son sütunda yer almaktadır. Bu değere göre görevler sıralandığında, sıralama [6, 9, 2, 7, (4, 5, 10), (1,3,8)] olarak bulunmuştur.

### 3.4. Görevlerin İstasyonlara Atanması

Görevler istasyonlara Algoritma 1 kullanılarak atanmıştır.

#### Algoritma 1: İlk Atama Algoritması

Girdi: Atama sırası, öncelik diyagramı, çevrim süresi

Çıktı: Başlangıç atama

$j=0$ ; // iş istasyonu sayısı

tüm görevler atanıncaya kadar tekrar et

$j=j+1$  // j. istasyonu aç

atama sırasındaki ilk görevden başlayarak atanabilecek (çevrim süresi ve öncelik kısıtlarını sağlayan) ilk görevi j. istasyona ata

atanan işi, atama sırasından çıkar

atama yapılan iş istasyonunda kalan atanabilir boş süreyi güncelle

dur

İlk atama algoritması, incelenen örnek probleme uygulanmıştır. Problem için görev süreleri Tablo 13'ün son sütununda verilmiştir. Bu sütunda yer alan tüm görevlerin toplam süresi 173 saniyedir. Çevrim süresi ( $CT$ ) diğer çalışmalarda olduğu gibi 40 saniye olarak alınmıştır. İlgili problem için elde edilen başlangıç ataması Tablo 14'te verilmiştir. Bu atama sonucunda her bir istasyon için elde edilen atıl süreler ise Tablo 15'te yer almaktadır. Elde edilen çözümün literatürdeki sonuçlarla karşılaştırılmasında kısaltılabilir çevrim süresi, enb-enk arası fark ve McGovern ve Gupta (2007) tarafından geliştirilen F değeri kullanılmıştır. Söz konusu ölçütlerden kısaltılabilir çevrim süresi, çevrim süresi ile enküçük atıl süre arasındaki farktan hareketle hesaplanmaktadır. enb-enk arası fark değeri de enbüyük atıl süre ile enküçük atıl süre arasındaki farkı göstermektedir. F değeri Denklem (13)'te belirtildiği şekilde hesaplanmaktadır. Bu denklemde yer alan  $CT$  değeri çevrim süresini ifade ederken  $ST_j$  değeri istasyon  $j$  ye atanan görevlerin sürelerinin toplamını göstermektedir.  $NWS$  ise toplam istasyon sayısını ifade etmektedir.

$$F = \sum_{j=1}^{NWS} (CT - ST_j)^2 \quad (12)$$

Atama sırası	Görev	Öncülü	Görev Süresi (s)
1	6	7	16
2	9	2 veya 3	14
3	2	-	10
4	7	8	20
5	4	8	18
5	5	7	23
5	10	2 veya 3	10
6	1	2 veya 3	14
6	3	-	12
6	8	2 veya 3	36

Tablo 13. Görev atama verileri

İstasyon No	McGovern (2003)	Avikal (2014-a)	Avikal (2014-b)	Ren (2018)	ELECTRE
1	5,6	2,9,3	2,9,3	2,10,9	2,9,10
2	7,9	8	8	3,1	1,3
3	4,1	7,6	7,6	8	8
4	8	4,1	5,1	7,4	7,6
5	10,2,3	5,10	4,10	6,5	4
6					5

Tablo 14. Atama sonuçları (CT=40)

Atıl Süre	McGovern (2003)	Avikal (2014-a)	Avikal (2014-b)	Ren (2018)	ELECTRE
1	1	4	4	6	6
2	6	4	4	14	14
3	8	4	4	4	4

4	4	8	3	2	4
5	8	7	12	1	22
6					17
enk	1	4	3	1	4
enb	8	8	12	14	22
Kısaltılabilir çevrim süresi	39	36	37	39	36
enk-enb arası fark	7	4	9	13	18
F değeri	181	161	201	253	1037

**Tablo 15.** İstasyonlardaki atıl süreler (CT=40)

### 3.5. Çözümün İyileştirilmesi

Bu aşamada, bir önceki aşamada elde edilen başlangıç atamalarının iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Bunun için iki algoritma önerilmiştir. İlk algoritma (*Algoritma 2*) mümkün ise istasyon sayısını en küçüklemeyi hedeflerken, ikinci algoritma da (*Algoritma 3*) görevlerin atandığı istasyonları değiştirerek atıl sürenin istasyonlar arasında dengeli bir şekilde dağıtılmasını hedeflemektedir.

#### Algoritma 2: İstasyon Sayısının Azaltılması Algoritması

Girdi: Başlangıç atama

Çıktı: Daha az istasyon sayısına sahip yeni atama

Ardıl sayısı en çok olan görevi bul (birliktelik bozma kuralı: eğer OR öncelik ilişkisine sahip aynı durumda iki görev varsa herhangi birinin atanması diğer görevlerin atanması için yeterli olduğundan başlangıç çözümde üst sırada yer alan görev en yukarı taşınır)  
Bu görevi sıralamada en üste taşı (Algoritmanın tekrarlanması gerektiğinde ardıl sayısı büyükten küçüğe olacak şekilde sıralamada yukarı taşınır)

Algoritma 1'i kullanarak tekrar atama yap.

#### Algoritma 3. Atamanın İyileştirilmesi Algoritması

Her bir istasyondaki (Tek elemanı olan istasyonlar hariç. Çünkü bu istasyonlarla değiş tokuş işlemi yapılamayacaktır) atıl sürelerine bak

Enbüyük ve enküçük atıl süreye sahip istasyonu belirle (Eşitlik bozma: Bu durumda ilk sırada yer alanı al)

Bu istasyonlar arasında öncelik ilişkilerini bozmayacak şekilde değiş tokuş olabildiğini dene.

Örnek problem için kuramsal en küçük istasyon sayısı 5'tir. Bu sayı tüm iş elemanların süre toplamının (173 s), çevrim süresine (40 s) bölünmesi neticesinde elde edilen sayının (4.325) bir üst tamsayıya yuvarlanması ile elde edilmiştir. Ancak bu çalışmada önerilen çözüm yöntemi ile kuramsal en küçük istasyon sayısına ulaşılamamış, 6 istasyonlu bir çözüm elde edilmiştir. Öncelikle daha az istasyon sayısı ile bir çözüm bulunup bulunamayacağını belirlemek amacıyla *Algoritma 2* kullanılmıştır.

Öncelik diyagramında ilk seviyede tüm işler ardıl sayıları 3 olan görev 2 veya 3'ün tamamlanmasına bağlıdır. Algoritmada birliktelik bozma kuralına uygun olarak görev 2 en başa taşınmış ve 2,6,9,7,(4,5,10),(1,3,8) sıralaması elde edilmiştir. Ancak bu sıralamaya göre yapılan atamada da bir önceki adımdaki 6 istasyonlu aynı çözüm elde edildiği için *Algoritma 2* tekrarlanmıştır. Algoritmanın ikinci tekrarında ardıl sayısı 2 olan görev 8, sıralamada öne alınmıştır. Görev 2'nin ardıl sayısı, görev 8'den fazla olduğu için görev 8 ikinci sıraya taşınmıştır. Yeni görev sıralaması 2,8,6,9,7, (4,5,10), (1,3) şeklinde gerçekleşmiştir. *Algoritma 2* ile elde edilen yeni sıralama kullanılarak yapılan atama sonrasında iş istasyonlarına atanan görevler  $w_1 = (2,9,10)$ ,  $w_2 = (8)$ ,  $w_3 = (7,6)$ ,  $w_4 = (4,1)$ ,  $w_5 = (5,3)$  olmak üzere kuramsal en küçük istasyon sayısına eşit, 5 istasyonlu bir çözüm elde edilmiştir. Bu çözümün F değeri 157 olarak hesaplanmıştır. Bu durumda enk boş süre 4 olduğu için çevrim süresi 36 saniyeye düşürülebilir; en büyük ve en küçük boş süreler arası fark da  $8-4 = 4$  saniye olarak gerçekleşmiştir. Bu

atamaya göre her bir istasyon için atıl süreler sırasıyla 6, 4, 4, 8, 5 şeklinde gerçekleşmiştir. Bu sonuç toplam atıl sürenin 27 s olduğunu göstermektedir.

*Algoritma 3'e* göre öncelikle 2. istasyon tek iş elemanına sahip olduğu için inceleme dışında tutulacaktır. Geriye kalan istasyonlar içerisinde en büyük atıl süreye sahip istasyon 8 s ile 4. istasyon ve en küçük atıl süreye sahip istasyon 4 s ile 3. istasyon olarak belirlenmiştir. Bu istasyonlar arasında 1.ve 6. görevin yer değişimi ile daha iyi bir çözüm elde edilmiştir. Yeni çözüm sonuçları Tablo 19 ve Tablo 20'de yer almaktadır. Tablolardan da görüleceği üzere çözümün F değeri 157'den 149'a düşmüştür. Bu durumda enk boş süre 4 olduğu için çevrim süresi 36 saniyeye düşürülebilir; en büyük ve en küçük boş süreler arası fark da azalarak 6-4= 2 saniye olarak gerçekleşmiştir. Bu atamaya göre her bir istasyon için atıl süreler sırasıyla 6, 4, 6, 6, 5 şeklinde gerçekleşmiştir. Bu sonuç toplam atıl sürenin 27 s olarak sabit kaldığını ancak, istasyonlar arasında daha dengeli dağıtıldığını göstermektedir. Zira 27 saniyenin istasyonlara en adil dağıtımı 3 istasyona 5 saniye ve iki istasyona 6 saniye şeklindedir. Ancak 8. iş elemanının süresi 36 s olduğu ve yanına eklenebilecek 4 veya 4 ten küçük herhangi bir görev olmadığı için bu istasyonun boş zamanı en fazla 4 s olabilir. O halde dengeli dağıtım diğer 4 istasyon arasında olmalıdır. 27-4=23 saniyenin diğer dört istasyona dengeli dağıtımı ise bir istasyona 5 saniye ve diğerlerine 6 saniye şeklinde olmalıdır. Elde edilen çözüm de bunu desteklemektedir.

Tablo 20'de görüleceği üzere literatürde yer alan performans ölçütlerine ilave olarak atıl sürenin istasyonlar arasında ne kadar dengeli dağıldığını göstermek için bu çalışma kapsamında yeni bir karşılaştırma ölçütü (DM- Deviation Mean) önerilmiştir. DM değeri Denklem (13) ve (14)'te gösterildiği üzere her bir istasyondaki atıl sürenin, o istasyondaki ortalama atıl süre ile farklarının ortalamasından hareketle hesaplanmaktadır. Bu değerın sıfır olması ideal olarak en iyi atamanın yapıldığı anlamına gelir. Ancak tıpkı teorik olarak en küçük istasyon sayısının açılmasının mümkün olmadığı gibi, iş elemanı sürelerine bağlı olarak atıl sürenin istasyonlara ideal şekilde adil dağıtılması da mümkün olmayabilecektir. DM aynı zamanda *Algoritma 3*'ün başarılı olup olmadığının bir göstergesidir.

$$DM_j = (CT - ST_j) - \left( \sum_{j=1}^{NW S} (CT - ST_j) / NW S \right) \quad (13)$$

$$DM = \left( \sum_{j=1}^{NW S} (DM_j) / NW S \right) \quad (14)$$

İstasyon No	McGovern (2003)	Avikal (2014-a)	Avikal (2014-b)	Ren (2018)	ELECTRE-uyarlanmış
1	5,6	2,9,3	2,9,3	2,10,9	2,9,10
2	7,9	8	8	8	8
3	4,1	7,6	7,6	1,7	7,1
4	8	4,1	5,1	6,4	4,6
5	10,2,3	5,10	4,10	5,3	5,3

**Tablo 19.** İstasyon atama verileri (Uyarılama sonrası)

Boş Süre	McGovern (2003)	Avikal (2014-a)	Avikal (2014-b)	Ren (2018) 2-opt ile geliştirilmiş	ELECTRE uyarlanmış
1	1	4	4	6	6
2	6	4	4	4	4
3	8	4	4	6	6
4	4	8	3	6	6
5	8	7	12	5	5
Enk	1	4	3	4	4
Kısaltılabilir çevrim süresi	39	36	37	36	36
enk-enb arası fark	7	4	9	2	2
F değeri	181	161	201	149	149
DM	12	1.68	9,6	0.72	0.72

**Tablo 20.** İstasyonlardaki atıl süreler (Uyarlama sonrası)

Elde edilen çözüm Ren ve ark. (2018) tarafından önerilen çözümle aynıdır. Sadece istasyonlara atanan işlerin sırasında farklılıklar gözlemlenmiştir. Ancak bu çalışmada önerilen çözüm sözü edilen çalışmadan daha zengin bir ölçüt kümesi ile ve daha basit araçlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

#### 4. Sonuç

Sürdürülebilir tedarik zincirlerinin kilit noktası demontajdır. Demontaj faaliyetinin etkin ve verimli bir şekilde gerçekleştirilebilmesinin yolu da demontaj hatlarının dengelenmesi ile mümkün olabilir. Demontaj hatlarının dengeleme probleminin NP-zor yapıda olduğundan dolayı genellikle kesin çözüm yöntemleri ve (meta)sezgisel yöntemler kullanılmaktadır. Problemin çok amaçlı doğası, çok ölçütlü karar verme tekniklerini de kullanılabilir hale getirmektedir. Bu çalışmada DHD probleminin çözümünde görevlerin istasyonlara atanma sırasının belirlenmesi için ELECTRE yöntemi, ilk kez kullanılmıştır. Ölçütlerin ağırlıkları, yaygın uygulamanın aksine AHP yerine Deniz (2016) tarafından geliştirilen özgün bir yöntem kullanılarak belirlenmiştir. ELECTRE yöntemi ile elde edilen sıralama dikkate alınarak görevler, iş istasyonlarına atanmış, bir iyileştirme algoritması ile elde edilen çözüm iyileştirilmiştir. Çalışmanın diğer bir katkısı da DM (Deviation Mean) adlı yeni bir performans ölçütünün önerilmesidir. Bu performans ölçütü yardımıyla atıl sürenin istasyonlar arasında ne kadar adil dağıtıldığına ilişkin bir değerlendirme yapmak mümkün olmuştur.

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar yazındaki sonuçlar ile karşılaştırıldığında yazında elde edilen en iyi çözüm olan Ren (2018) ile aynı derecede iyi sonuçlar elde edildiği görülmektedir. Sonuçlar aynı olduğu için çözüm yöntemin karmaşıklığı analiz edilmiştir. Bu anlamda bu çalışma kapsamında önerilen çözüm yönteminin Ren (2018)'den daha sade olduğu görülmektedir.

Çok ölçütlü karar verme tekniklerinin çeşitli alanlarda kullanımı oldukça yaygınken, demontaj hatlarının dengelenmesi probleminde sadece dört çalışma mevcuttur. Hâlihazırda henüz kullanılmayan ÇÖKV tekniklerinin bu problemin çözümünde kullanılması yazına katkı sağlayacaktır. COPRAS ve VIKOR bu kapsamda kullanılabilecek ÇÖKV tekniklerinden bazılarıdır.



## Kaynakça

- Agrawal, S., Tiwari, M.K., (2008). A collaborative ant colony algorithm to stochastic mixed model U-shaped disassembly line balancing and sequencing problem. *Int. J. Prod. Res.* 46 (6), 1405-1429.
- Avikal, S., Jain, R., & Mishra, P. K. (2014b). A Kano model, AHP and M-TOPSIS method-based technique for disassembly line balancing under fuzzy environment. *Applied Soft Computing*, 25, 519-529
- Avikal, S., Mishra, P. K., & Jain, R. (2014a). A Fuzzy AHP and PROMETHEE method-based heuristic for disassembly line balancing problems. *International Journal of Production Research*, 52(5), 1306-1317
- Bentaha, M.L., Battaia, O., Dolgui, A., (2014). A sample average approximation method for disassembly line balancing problem under uncertainty. *Comput. Oper. Res.* 51, 111-122.
- Bezdrob M., Bićo-Čar, M., & Pašić F. (2011). *Managerial Decision Making Tools – ELECTRE Methods Brief Overview of Methods with Practical Examples*. Sarajevo Business and Economics Review, 31.
- Büyükköçkan G., Çifçi G. & Güteryüz S. (2011). Strategic Analysis of Healthcare Service Quality Using Fuzzy AHP Methodology. *Expert Systems with Applications*, 38, 9407-9424
- Deniz N., Ozcelik F. (2018) Determining Task Assignment Priorities For Disassembly Line Balancing Problem with ELECTRE. 16th International Supply Chain Management Congress, October 18-20, Denizli, Turkey.
- Deniz N., Ozcelik F. (2019). An Extended Review on Disassembly Line Balancing with Bibliometric & Social Network and Future Study Realization Analysis. *Journal of Cleaner Production*, 225, 697-715.
- Deniz, N. (2016). Sağlık Sektöründe Hizmet Kalite Algısının Ölçümüne Yönelik Ölçek Geliştirme Çalışması. Basılmamış Doktora Tezi, Eskisehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, Turkey.
- Ding, L. P., Feng, Y-X., & Tan, J. R. (2010). A new multi-objective ant colony algorithm for solving the disassembly line balancing problem. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 48(5-8), 761-771
- Esmailian, B., Behdad, S., & Wang, B. (2016). The evolution and future of manufacturing: A review. *Journal of Manufacturing Systems* 39, 79-100
- Figueira, J.R., Greco, S., Roy, B., & Slowinski, R. (2013). An overview of ELECTRE methods and their recent extensions. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 20(1-2), 61-85
- Galo N. R., Del Rosso Calache L.D., & Carpinetti L.C. R. (2018). A group decision approach for supplier categorization based on hesitant fuzzy and ELECTRE TRI. *International Journal of Production Economics*, 202, 182-196
- Govindan, K., & Jepsen, M. B. (2016). ELECTRE: A comprehensive literature review on methodologies and applications. *European Journal of Operational Research*, 250, 1-29
- Govindan, K., Kadziński M., Ehling R., & Miebs G. (2018). Selection of a sustainable third-party reverse logistics provider based on the robustness analysis of an outranking graph kernel conducted with ELECTRE I and SMAA. *Omega*, 1-15.
- Gülmez, M. (2005). Sağlık Hizmetlerinde Memnuniyet Ölçümü ve Cumhuriyet Üniversitesi Araştırma Hastanesi'nde Ayakta Tedavi Gören Hastalara Yönelik Bir Uygulama. *C.Ü. İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 6(2)
- Güngör, A., & Gupta, S. M. (2001). A solution approach to the disassembly line balancing problem in the presence of task failures. *International Journal of Production Research*, 39 (7), 1427-1467
- Ilgin, M. A. (2010). Kanban-controlled disassembly line with sensor embedded products. Doctor of philosophy, Northeastern University, Boston, Massachusetts.
- Ilgin M. A. (2018) A DEMATEL-Based Disassembly Line Balancing Heuristic. *Journal of Manufacturing Science Engineering*, 141 (2).
- Kalayci, C. B., & Gupta, S. M. (2013). A particle swarm optimization algorithm with neighborhood-based mutation for sequence-dependent disassembly line balancing problem. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 69(1-4), 197-209

- Kazançoğlu Y., Öztürkoğlu, Y. (2018) Integrated framework of disassembly line balancing with Green and business objectives using a mixed MCDM, *Journal of Cleaner Production*, 191, 179-191.
- Koc, A., Sabuncuoglu, I., & Erel, E., (2009). Two exact formulations for disassembly line balancing problems with task precedence diagram construction using an AND/OR graph. *IIE Transactions*, 41(10), 866-881
- Kulkarni, H.M., (2010). Reinforcement Learning Approach for Disassembly. Master of Science thesis. Northeastern University, Boston, Massachusetts.
- McGovern, S. M., & Gupta, S. M. (2007). A balancing method and genetic algorithm for disassembly line balancing. *European Journal of Operational Research*, 179(3), 692-708
- McGovern, S.M. & Gupta S. M. (2003). 2-opt heuristic for the disassembly line balancing problem. in *Proceedings of the SPIE International conference on Environmentally Conscious Manufacturing III*, (pp. 71-84). Providence, Rhode Island.
- Özceylan, E., & Paksoy, T. (2013). Reverse supply chain optimization with disassembly line balancing. *International Journal of Production Research*, 51(20), 5985-6001.
- Özceylan, E., Kalaycı, C. B., Güngör, A., & Gupta, S. M. (2018). Disassembly line balancing problem: a review of the state of the art and future directions. *International Journal of Production Research*
- Prakash, & Twari, M. K. (2006). Solving a disassembly line balancing problem with task failure using a psycho-clonal algorithm. *ASME International Design Engineering Technical Conference/Computers and Information in Engineering Conference*, Long Beach, CA
- Ren, Y., Zhang, C., Zhao, F., Tian, G., Lin, W., Meng, L., & Li, H. (2018). Disassembly line balancing problem using interdependent weights-based multi-criteria decision making and 2-optimal algorithm. *Journal of Cleaner Production*, 174, 1475-1486.
- Rouyendegh, B. D. (Erdebilli B.) (2018). The Intuitionistic Fuzzy ELECTRE model. *International Journal of Management Science and Engineering Management*, 13(2), 139-145
- Supraja S., & Kousalya, P. (2016). ELECTRE Method for the Selection of Best Computer System. *Indian Journal of Science and Technology*, 9(39)
- Yaraloğlu, K., (2010). ELECTRE in Karar Verme Yöntemleri. Ankara, Turkey: Detay Yayıncılık, Retrieved from [www.deu.edu.tr/userweb/k.yaralioglu/dosyalar/ELECTRE\\_Yontemi.doc](http://www.deu.edu.tr/userweb/k.yaralioglu/dosyalar/ELECTRE_Yontemi.doc)
- Zhang P., Yao H., Qiu C., & Liu Y. (2018). Virtual Network Embedding Using Node Multiple Metrics Based on Simplified ELECTRE Method. *IEEE Access*, 6