Farklı İşgören Kaynaklarının Varlığında Çok Amaçlı Demontaj Hattı Dengeleme Problemi

Nurcan Deniz

DOKTORA TEZİ

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Haziran 2021

Multi-objective Disassembly Line Balancing Problem in the Presence of Different Worker Resources

Nurcan Deniz

DOCTORAL THESIS

Department of Industrial Engineering

June 2021

Farklı İşgören Kaynaklarının Varlığında Çok Amaçlı Demontaj Hattı Dengeleme Problemi

Nurcan Deniz

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca
Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı
Endüstri Mühendisliği Bilim Dalında
DOKTORA TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Doç. Dr. Feriştah ÖZÇELİK

Haziran 2021

ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Klavuzuna göre, Doç. Dr. Feriştah ÖZÇELİK danışmanlığında hazırlamış olduğum "Farklı İşgören Kaynaklarının Varlığında Çok Amaçlı Demontaj Hattı Dengeleme Problemi" başlıklı DOKTORA tezimin özgün bir çalışma olduğunu, tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı, tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel etik ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi, tez çalışmamda yararlandığım tüm eserlere atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim. 17/06/2021

Nurcan Deniz

İmza

ÖZET

Demontaj işlemi, sürdürülebilirlik faaliyetlerinin gerçekleştirilmesinde kilit rol oynamaktadır. Demontaj işleminin etkin bir şekilde gerçekleştirilmesinde ise demontaj hatlarından yararlanılmaktadır. Demontaj hatlarında gerçekleştirilen görevlerin çevresel ve bireysel ergonomik riskler nedeniyle işçiler üzerinde oluşturduğu tehlike, işçilerin yerine robotların veya işbirlikçi robotların kullanımı ile azaltılabilmektedir. Elbette bu durum maliyet artışını da beraberinde getirmektedir. Bu çalışmada literatürde ilk kez eşzamanlı olarak maliyet en küçüklenirken ergonomik yararın en büyüklenmesine yönelik heterojen işçiler, robot ve işbirlikçi robotların varlığında demontaj hattı dengeleme ve işgören atama modeli geliştirilmiştir. İkinci amaç fonksiyonu çevresel ve bireysel ergonomik risklerden kaynaklı işçiye yönelik tehlikenin en küçüklenmesi şeklinde ifade edilmiştir. Çok amaçlı modelin çözümünde epsilon kısıt yönteminden yararlanılmış olup, elde edilen Pareto en iyi çözümler arasından karar vericinin seçeceği çözüme destek olabilmek amacıyla entropi tabanlı TOPSIS ve PROMETHEE yöntemlerine dayalı bir yöntem geliştirilmiştir. İdeal noktaya uzaklık ve etkinlik yüzdesine ilave olarak otomasyon oranı adlı yeni bir ölçüt önerilmiştir. Çalışmada ayrıca tam faktör deney tasarımı ile görev sayısı, işçi sayısı ve heterojen işçiler arasındaki süre değişkenliği olmak üzere üç faktörün çözüm süresine etkilerinin istatistiksel olarak anlamlı olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca ilk iki faktörün birleşik etkisi de istatistiksel olarak anlamlı bulunmuştur. Elde edilen sonuçların, demontaj hatları konusunda çalışan akademisyenlerin yanısıra demontaj hattı yöneticilerinin otomasyondan faydalanarak işçilere yönelik tehlikenin azaltılması konusunda yol göstereceği düşünülmektedir.

Anahtar kelimeler: Demontaj hattı dengeleme, işgören atama, çok amaçlı matematiksel model, epsilon kısıt, işbirlikçi robot

SUMMARY

The disassembly process plays a key role in the realization of sustainability activities. Disassembly lines are used to perform the disassembly process efficiently. The danger posed by the tasks performed on disassembly lines on workers due to environmental and individual ergonomic risks can be reduced by the use of robots or collaborative robots instead of workers. Of course, this causes an increase in costs. In this study, for the first time in the literature, the disassembly line balancing and worker assignment model was developed in the presence of heterogeneous workers, robots and collaborative robots to maximize the ergonomic benefit while simultaneously minimizing the cost. The second objective function was expressed as the minimization of the danger to the worker caused by environmental and individual ergonomic risks. The epsilon constraint method was used to solve multi-objective model and entropy-based TOPSIS and PROMETHEE method was developed to support the the decision maker to select among the best Pareto-optimal solutions obtained. In addition to the distance to the ideal point and efficiency, a new criterion called automation rate was proposed. In the full factor experiment design, the effects of number of tasks, the number of workers, and the time variation between heterogeneous workers on solution time, were all found statistically significant. The interaction effect of the first and second factor was also found statistically significant. It is expected that the results will guide both academicians as well as managers working on disassembly lines to reduce the danger to workers by using automation.

Keywords: Disassembly line balancing, worker assignment, multi-objective mathematical model, epsilon constraint, collaborative robot

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET vi
SUMMARY vii
İÇİNDEKİLER ix
ÇİZELGELER DİZİNİ xi
ŞEKİLLER DİZİNİ xii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ xiii
1. GİRİŞ ve AMAÇ 1
2. DEMONTAJ HATTI DENGELEME PROBLEMİ 8
2.1. Demontaj 8
2.2. Demontaj Hatları 9
2.3. Demontaj Hattı Dengeleme Problem Türleri 14
2.4. Robotik Demontaj Hattı Dengeleme Problemi 16
3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI 21
3.1. Manuel Demontaj Hatlarının Dengelenmesi Konusunda Literatür Taraması 26
3.2. Robotik Demontaj Hattı Dengeleme Problemleri Konusunda Literatür Taraması 33
3.3. Çözüm yöntemleri 36
3.4. Tez Çalışmasının Literatüre Katkısı 43
4. MATERYAL ve YÖNTEM 47
4.1. Çok Amaçlı Tamsayılı Programlamaya İlişkin Temel Kavramlar 47
4.2. Epsilon Kısıt Yöntemi 51
4.3. Çok Amaçlı Problemlerde Karar Vericiye Yardımcı Yöntemler 52
4.3.1. Entropi yöntemi 53
4.3.2. TOPSIS yöntemi 54
4.3.3. PROMETHEE yöntemi 55
5. ROBOT, İŞBİRLİKÇİ ROBOT ve HETEROJEN İŞÇİ VARLIĞINDA DEMONTAJ HATTI DENGELEME VE İŞGÖREN ATAMA PROBLEMİ 58
5.1. Matematiksel Modelin Kurulması 58
5.2. Epsilon Kısıt Matematiksel Modelinin Türetilmesi 63
5.3. Örnek Problem 64
6. BULGULAR ve TARTIŞMA **68**

6.1. Test Problemlerinin Türetilmesi 68
6.2. Test Sonuçları 71
6.3. Test Problem Sonuçlarının İstatistiksel Analizi 81
6.4. Çok Ölçütlü Karar Verme Tekniklerine Dayalı Yöntem Geliştirilmesi 84
6.4.1. Ölçütlerin belirlenmesi 84
6.4.2. Entropi yöntemi ile ölçütlerin ağırlıklandırması 85
6.4.3. TOPSIS ile sıralama 87
6.4.4. PROMETHEE ile sıralama 90
6.4.5. Karar verici için çözüm önerisi 93
7. SONUÇ VE ÖNERİLER 96
KAYNAKLAR DİZİNİ 99
EK AÇIKLAMALAR 112

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge **Sayfa**

2.1 Demontaj Hatlarında Değişik İşgören Kaynaklarının Karşılaştırması 20
3.1. Makalelerin Sınıflandırılması 23
3.2. Amaç Fonksiyonlarına Göre Makalelerin Dağılımı 38
3.3. Çalışmanın Benzer Çalışmalardan Ayırıcı Yönleri 44
3.4. İşçiye Yönelik Tehlike Türlerinin Tanımlanması 46
4.1. Çalışma Kapsamında Kulanılan Yöntemler 47
5.1. Modelde Yer Alan İndis, Parametre ve Karar Değişkenleri 61
5.2. Modelin Kısıt Karmaşıklığı 63
5.3. 8 Görevli Demontaj İşlemi Bilgileri 65
5.4. İşgörenlere Ait Görev Süreleri 65
5.5. İşgören Maliyetleri 66
5.6. Görevlerin İşçiye Yönelik Tehlike Durum Bilgisi 66
5.7. Epsilon Kısıt Yöntemi Sonuçları 67
6.1. Test Problemlerine İlişkin İdeal ve Nadir Noktalar 72
6.2. Test Sonuçları 74
6.3. MINITAB Varyans Analizi ANOVA Sonucu 82
6.4. 28-2-2-1 Test Problemi İçin Ölçütlerin Aldıkları Değerler 85
6.5. Normalleştirilmiş Karar Matrisi 86
6.6. Entropi Ağırlıkları 86
6.7. Farklı Test Problemlerinin Ölçüt Ağırlıkları 87
6.8. Ağırlık Değerleri Arasındaki Korelasyon Analizi Sonuçları 87
6.9. Karar Matrisi 88
6.10. Normalize Karar Matrisi 88
6.11. Ağırlıklandırılmış Normalize Matris ve İdeal/Negatif İdeal Noktalar 89
6.12. İdeale ve Negatif İdeale Uzaklık 89
6.13. TOPSIS Sonucu Elde Edilen Sıralama 90
6.14 PROMETHEE Sıralama Sonuçları 91
6.15. TOPSIS ve PROMETHEE Yöntemlerinin Karşılaştırılması 93
6.16. Karar Vericiye Önerilen Çözümün Ayrıntıları 94

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil **Sayfa**

2.1. Kullanım Süresi Dolmuş Ürününün Süreci 10
2.2. Demontaj Hattında Olası Akışlar 11
2.3. a. VE İlişkisi b. VEYA öncül (POR) İlişkisi c. VEYA ardıl (SOR) İlişkisi 13
2.4. Masaüstü Bilgisayar Demontaj Hattı 14
2.5. Daisy Cep Telefonu Demontaj Robotu 17
2.6. İşbirlikçi Robot Örneği 18
3.1. DHD Literatüründeki Yazar Ağlarının En Büyüğü 21
3.2. Yayınların Yıllara Göre Dağılımı 22
3.3. Çalışmaların kullanılan tekniklere göre sınıflandırması 36
4.1. Etkin küme, İdeal ve Nadir Nokta 49
5.1. Çalışmanın Çerçevesi 60
5.2. 8 Görevli Demontaj İşlemine Ait Öncelik Diyagramı 64
6.1. 22 Görevli Demontaj İşlemine Ait Öncelik Diyagramı 68
6.2. 28 Görevli Demontaj İşlemine Ait Öncelik Diyagramı 69
6.3. 22 görev test problemlerinin Pareto eğrileri 79
6.4. 28 görev test problemlerinin Pareto eğrileri 80
6.5. Standartlaştırılmış Etkinin Pareto Grafiği 81
6.6. Faktörlere Ait Ana Etkiler Grafiği 83
6.7. Faktörler Arası Etkileşim Grafiği 83
6.8.a. PROMETHEE I Kısmi Sıralama b. PROMETHEE II Tam Sıralama 91
6.9. GAIA Düzlemi 92
6.10. Ağ Diyagramı 92
6.11. Karar Vericiye Önerilen Çözüm 94

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Kısaltmalar	Açıklama
BDHDP	Basit Demontaj Hattı Dengeleme Problemi
ÇÖKV	Çok Ölçütlü Karar Verme
ÇATP	Çok Amaçlı Tamsayılı Programlama
DHD	Demontaj Hattı Dengeleme
DHDP	Demontaj Hattı Dengeleme Problemi
DHDİAP	Demontaj Hattı Dengeleme ve İşgören Atama Problemi
İAP	İşgören Atama Problemi
KMDHDP	Karma Model Demontaj Hattı Dengeleme Problemi
KODHDP	Kar Odaklı Demontaj Hattı Dengeleme Problemi
KKODHDP	Kısmi Kar Odaklı Demontaj Hattı Dengeleme Problemi
MHDP	Montaj Hattı Dengeleme Problemi
PDHDP	Paralel Hatlı Demontaj Hattı Dengeleme Problemi
RDHDP	Robotik Demontaj Hattı Dengeleme Problemi
SBDHDP	Sıra Bağımlı Demontaj Hattı Dengeleme Problemi
SDHDP	Stokastik Demontaj Hattı Dengeleme Problemi
VZA	Veri Zarflama Analizi

1. GİRİŞ VE AMAÇ

Teknolojinin hızla gelişmesi ile birlikte tüketiciler, kullanmakta oldukları ürünlerden daha fazla gelişmiş yeni ürünleri daha ucuza satın alabilmektedir (Ding vd. 2010; Kulkarni, 2010). Kişisel bilgisayar, televizyon ve cep telefonu kullanıcıları kullanmakta oldukları ürünleri, tamamı veya bazı parçaları çalışıyor olsa bile yeni ürünlerin daha ucuz ve daha kaliteli olması nedeniyle birkaç ay içinde değiştirebilmektedir (Kulkarni, 2010). Kitlesel bireyselleştirmenin etkisi ile ürün yaşam döngülerinin kısalması da bu durumda etkili olmaktadır (Agrawal ve Tiwari, 2008). Örneğin her yıl ABD'de 60 milyonun üzerinde bilgisayar satışı gerçekleşirken, aynı yıl bunların 12 milyondan fazlası elden çıkarılmaktadır. Elden çıkarılan bu rakamın sadece %10'u geri dönüşüme kazandırılırken, geri kalanı bertaraf edilmektedir (Özceylan, 2013). Yine Amerika Birleşik Devletleri'nde yıllık 9,4 milyon ton elektronik atık ortaya çıkmakta sadece %12,5'i geri dönüştürülmektedir (Mura vd. 2020).

Sürdürülebilirlik çalışmaları kapsamında Dell, HP, Kodak, GM, Xerox gibi firmalar ürün geri kazanımını yapmaya başlamışlardır (Özceylan ve Paksoy, 2013). Bu şirketlerden Xerox, 1960'dan bu yana kullanılan donanımlarının geri dönüşümünü gerçekleştirmektedir. 1990 başlarında kar odaklı bir şekilde yeniden imalat sistemini geliştiren şirket, 1997 yılında 400 personeli istihdam ettiği yeniden imalat sürecinden 80 milyon dolardan fazla kar elde etmiştir (Altekin ve Akkan, 2012). Yine Xerox beş yıldan kısa süre içerisinde tek kullanımlık kameraların yeniden imalatı ile malzeme ve parça maliyetinden 200 milyon dolar kazanmıştır (McIntyre vd. 1998'den aktaran Özceylan ve Paksoy, 2013). Diğer taraftan Toshiba, 2011 yılında 125.000 ton kullanım süresi dolmuş ürün toplamış ve 119.000 tonunu geri dönüştürmüştür (Gümüşkaya, 2013). Kodak'ın kullanılmış bir kameranın ortalama olarak %76'sını yeni bir fotoğraf makinası üretiminde kullandığı ifade edilmektedir. Hollanda'daki uygulama ise trafik kazalarında zarar görmüş otomobillerin %90'ının geri kazanılması yönündedir. "Recycling your Dell", Dell firmasının kullanılmış bilgisayarlardaki faydalı parçaları geri kazanmak için hayata geçirdiği bir programdır (Özceylan, 2013). Konunun önemine binaen, yasal düzenlemeler ve teşvikler de yapılmaktadır. Avrupa Birliği, Japonya, Güney Kore ve Tayvan yasalarında imalatçı ve satıcılar, kullanım süresi dolmuş ürünlerinin geri dönüşümü konusunda sorumlu tutulmaktadır (Altekin ve Akkan, 2012; Riggs vd. 2015). Amerika Birleşik Devletleri de

bilgisayar donanımı bağışlayanlara vergi indirimi gerçekleştirilmektedir (Kulkarni, 2010). Sadece elektronik atıkların değil; araba ve kamyon gibi ulaşım araçları ile bulaşık makinesi gibi beyaz eşya ürünlerinin de demontajı gerçekleştirilmektedir (Özceylan vd. 2019). Tang ve Zhou (2006) saatte 60 arabanın montajının yapıldığı bir ortamda günde ancak 20 arabanın demontajının gerçekleştirilebildiğini ifade etmektedir. Hollanda, Almanya, Japonya ve Amerika Birleşik Devletleri'nde birçok demontaj hattı bulunmaktadır. Japonya'da elektrikli ev eşyalarının demontajını gerçekleştiren METEC ve Hollanda'da araba demontajını gerçekleştiren CRS bu hatlardan bazılarıdır (Altekin ve Akkan, 2012).

Tüm bu çalışmalar son yıllarda önem kazanan, ekonomik bileşenlerin yanı sıra çevresel ve sosyal bileşenlerin de dikkate alınması gerekliliğini ortaya koyan "sürdürülebilirlik" kavramı içinde değerlendirilmektedir (Göksoy, 2010). İmalatta sürdürülebilirlik açısından kullanım süresi dolan ürünlerin atık malzemelerinin çevreye etkisinin en küçüklenmesi, önemli bir konudur (Bentaha vd. 2014). Kullanım ömrü dolan ürünler, imalatçılar, tüketiciler, hükümetler ve toplumun tamamı için oldukça önemli bir konudur (Riggs vd. 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, 2007a).

Çevreye duyarlı imalat ve ürün geri kazanımı konusu ürün tasarımı, tersine/kapalı döngü tedarik zincirleri, yeniden imalat ve demontaj olmak üzere temel olarak dört alanda gerçekleştirilen çalışmaları kapsamaktadır (Ilgın, 2010). Ürün geri kazanımında yeniden kullanım, geri dönüşüm, yeniden imalat, depolama ve uygun şekilde yok etme şeklinde beş seçenek bulunmaktadır. Genellikle bu seçeneklerin hepsinden önce kullanım süresi dolan ürünün "demontaj"ının yapılması gerekmektedir (McGovern ve Gupta, 2011). Bu yönüyle "demontaj" anahtar bir role sahiptir (Wang vd. 2019). Tersine lojistik alanı, demontaj öncesi ve demontaj sonrası olmak üzere iki aşamaya ayrılabilir. Demontaj bu iki aşama arasında da bir bağlantı niteliğindedir (Tuncel vd. 2014). Demontaj, geri dönüşüm sürecinin ilk ve en önemli aşaması (Ding vd. 2010) ve ürün geri kazanımı sürecinin en fazla zaman harcayan adımı olarak görülmektedir (Kalaycı ve Gupta, 2013a). Demontaj, iş yükü yoğun ve pahalı bir eylem olduğu için otomatik demontaj sistemlerinin geliştirilmesi önemlidir (Prakash ve Tiwari, 2005). Demontaj çalışmaları çizelgeleme, sıralama, hat dengeleme, siparişe göre

demontaj sistemleri, otomasyon ve ergonomi başlıkları altında incelenmektedir (Ilgın, 2010). Bu çalışmalar arasında demontaj hattı dengeleme problemi (DHDP) daha temiz bir çevreye olan talebin artması sonucunda, tersine imalat içerisinde önemli bir yer tutmaktadır (Koç vd. 2009).

Diğer taraftan Almanya'nın 2011 yılında Hannover'daki teknoloji fuarında dijital ekonomi ve toplumu temsilen "Endüstri 4.0" olarak adlandırdığı vizyonunu tanıtmasının ardından yeni bir endüstriyel dönem başlamıştır. Endüstri 4.0 dört ana bileşene dayalıdır: Siber fiziksel sistemler, nesnelerin interneti, hizmetlerin interneti ve akıllı fabrika (Roblek, 2016). Endüstri 4.0 tasarım ilkeleri ise birlikte çalışabilirlik, sanallaştırma, âdem-i merkeziyetçilik, gerçek zaman kabiliyeti, hizmet yönelimli olma, modülerlik, güvenlik ve esneklik olarak sıralanmaktadır (Thuemmler ve Bai, 2017). Bu bağlamda literatürde imalat sistemleri üç temel bölümde incelenmektedir: Manuel, tam otomatik ve insan-robot işbirliği (hibrit). Bu sistemlerin temel özellikleri incelendiğinde manuel sistemlerde insanın esnekliği, bilişsel kabiliyetleri, yaratıcılığı, zekâsı ve öğrenme yeteneği ön plana çıkmaktadır. İnsan-robot etkileşimde ise esneklik, hız, yeniden yapılandırma, verimlilik, güvenlik, ergonomi ve kabiliyet özellikleri bulunmaktadır. Son olarak sadece robotların çalıştığı tam otomatik sistemlerde doğruluk, yorulmazlık, hız, tekrarlanabilirlik ve güç ön plana çıkmaktadır (Hashemi-Petroodi vd., 2020). Dijital dönüşüm, her sektörde etkisini hissettirdiği gibi demontaj süreçlerinde de etkili olmuştur. "Demontaj 4.0" kavramı altında otomasyon kullanılarak demontaj işlemlerinin yapılabilmesine ilişkin çalışmalar yapılmaktadır (Poschmann vd. 2020).

Sürdürülebilirlik çalışmalarında önemli bir yere sahip olan demontaj işleminin kendisinin de sürdürülebilir bir şekilde gerçekleştirilmesinde insan faktörünün korunması önemlidir. Ancak ürünlerin bazı parçaları tehlikeli malzemeler içerdiği için işçiler risk altındadır (Mura vd. 2020). Bu anlamda demontajda ağır, tekrarlı ve kirli işlerin robotlar tarafından yapılması önerilmektedir (Liu vd. 2019b). Robotların kullanımı ile birlikte verimlilik ve kalite artmaktadır. Ancak robotlar tamamen insanların yerini alamazlar. Robotların demontaj hatlarında kullanılması ve otomasyonun arttırılması anlamında büyük bir potansiyel olduğu literatürde ortaya konmakla birlikte yeni üretim sistemlerinde güncel eğilim insan robot işbirliğidir. İşbirlikçi robotlar (cobot) "ergonomik olmayan ve tekrarlı görevleri gerçekleştiren endüstriyel robotlar" olarak tanımlanmaktadır (Çil vd. 2020a).

İşbirlikçi robotların kullanımı ile hem manuel hem de robotik demontajın avantajları bir arada elde edilmeye çalışılmaktadır. İşbirlikçi robotlar kullanıldığında hat uzunluğunun azalması ve yer tasarrufunun sağlanması ile birlikte malzeme aktarma, işçi hareketi ve hazırlık sürelerinin de azaldığı bilinmektedir. İşbirlikçi robotlar işçilerin yerini almak yerine onları ortak istasyonlarda desteklemektedir. İşbirlikçi robotlar hat dengeleme problemlerinin yaygın amaçları olan istasyon sayısını, çevrim süresini ve maliyetleri azaltma ve karı arttrma amaçlarınının hepsini destekler niteliktedir (Weckenborg, 2020). İşbirlikçi robotlar ayrıca çalışma alanını ve akıllı operatör etkinliğini de arttırmaktadır. Geleneksel robotlara göre de daha kolay programlanabilmesi ve hareket etme avantajı da diğer olumlu yönleridir (Çil vd. 2020a).

İnsan-robot etkileşimi sadece teknik açılardan değil, görevlerin atanmasının düzeltilmesi açısından da önemlidir. Montaj süreçlerinde otomasyonda robot kullanma olasılığının değerlendirilmesinde ana amaç etkin ve etkili bir şekilde ürünlerin zamanında üretimi olduğu için çevrim süresi tabanlı ölçütler kullanılmaktadır. Ancak demontajda belirli bir teslim tarihi yoktur ve bileşenlerin tahmin edilmesi de zordur. Bir elektronik geridönüşüm firmasının amacı karını arttırmak ve alandan tasarruf sağlamaktır. Bu nedenle otomasyondan daha az yararlanılmaktadır. Bu noktada işbirlikçi robotların kullanımı önemli bir rol oynamaktadır. Böylece robot ve insan birbirini tamamlamakta ve yardımcı olmaktadır (Renteria vd. 2019).

Ayrıca robotik işlemler her zaman demontaj için uygun olmayabilir. Böyle durumlarda manuel demontaj işlemleri gerekmekte ve işgören maliyetleri de görev zamanından etkilenmektedir (Lambert ve Gupta, 2005). Demontajın işgören yoğun yapıda olması bu faaliyeti pahalı hale getirmektedir (McGovern ve Gupta, 2011). Diğer taraftan demontajı yapılan ürünler içerisinde tehlikeli veya değerli parçalar bulunabilmektedir (Kalaycılar vd. 2016). Örneğin devre kartlarında, bataryalarda ve katot ışın tüplerinde kurşun, cıva ve krom gibi zararlı maddeler yer almaktadır (Kulkarni, 2010). Cep telefonlarındaki lityum bataryalar, mikrofonlardaki manyetik malzemeler, antenlerdeki yanıcı kimyasallar da tehlikeli maddelere örnek verilebilir (Kalaycı ve Gupta, 2013b). Dinler (2015) tehlikeli ve patlayıcı madde içeren ürünlerin geri dönüşüm faaliyetleri üzerinde çalışmış ve patlama riskini en küçüklemeye çalışmıştır. Çalışmada geri dönüşümü yapılan ürünün demontajı patlama riski nedeniyle robot tarafından gerçekleştirilmektedir. Bu

tehlikeli maddeler işçi üzerinde çevresel bir risk oluşturmaktadır. Diğer taraftan demontaj işlemi doğası gereği işçi üzerinde yorgunluk ve zorlanma gibi bireysel ergonomik riskleri de barındırmaktadır. Bir taraftan dijitalleşmenin sağladığı otomasyon fırsatı diğer taraftan işgücü yoğun bir alan olan demontaj işlemi bir arada değerlendirildiğinde, demontaj hatlarında hem çevresel hem de bireysel ergonomik faktörlerden kaynaklı işçiye yönelik tehlikenin azaltılabilmesi için otomasyondan yararlanmanın faydalı olacağı görülmektedir. Robotlar hem çevresel hem bireysel riskleri ortadan kaldırırken, işbirlikçi robotlar da bireysel risklerin yok edilmesinde faydalı olabilmektedir. Ancak otomasyon artışı, maliyet artışına da neden olmaktadır. Sonuç olarak ergonomik faydanın arttırılması ve maliyetin azaltılması eş zamanlı olarak değerlendirilmelidir. Böylelikle sürdürülebilirliğin kilit noktası olan demontaj hatlarının dengelenmesi, yine sürdürülebilir bir bakış açısıyla çözülmeye çalışılmaktadır. Maliyetin en küçüklenmesi sürdürülebilirliğin ekonomik boyutu, demontaj işleminin kendisi çevresel boyutu ve işçiye yönelik tehlikenin en küçüklenmesi ise sosyal boyutu içerisinde yer almaktadır. Sürdürülebilirlik çalışmalarında ekonomik ve çevresel boyuta ağırlık verilerek, sosyal boyutun geri planda kaldığı göz önünde bulundurulduğunda bu çalışmanın önemi görülmektedir.

Çalışmanın Konusu ve Özgün Değeri

Bu tez kapsamında DHDP, işgören atama problemi (İAP) ile birlikte ele alınmıştır. Geleneksel DHDP'de işgörenlerin hepsi aynı özelliklere sahip eş bireyler olarak kabul edilmektedir. Ancak işgörenler farklı yeteneklere sahiptir ve kiminin el becerisi, kiminin teknik becerileri diğerlerinden farklıdır (Demirkol Akyol ve Baykasoğlu, 2019). DHDP, 2020 yılında İAP ile birlikte ele alınmaya başlanmış ve sınırlı sayıda çalışma gerçekleştirilmiştir. Diğer taraftan demontaj hattı dengeleme (DHD) alanında dijital dönüşümün etkileri tartışılmaya başlamış ve robotların kullanımı üzerine sınırlı sayıda araştırma gerçekleştirilmiştir. Ancak literatürde hem robot ve hem de işbirlikçi robotların heterojen işçiler ile birlikte alternatif işgücü olarak ele alındığı bir çalışmaya rastlanmamıştır. Çalışmanın ilk özgün değeri demontaj hattı dengeleme ve işgören atama probleminde (DHDİAP), montaj görevlerini gerçekleştirecek işgücü alternatiflerinin robot, işbirlikçi robot ve işçi olduğu ve işçilerin farklı yetenek düzeylerine sahip olduğu durumun ilk kez ele alınmasıdır. Çalışma kapsamında geliştirilen matematiksel model iki amaçlı olarak tanımlanmıştır. Ele alınan amaçlar, maliyetin ve işçiye yönelik tehlikenin en

küçüklenmesi şeklindedir. İşçiye yönelik tehlikenin en küçüklenmesi ergonomik yararın en büyüklenmesini temin etmektedir. Bu noktada da çalışmada kullanılan ikinci amaç fonksiyonu DHD literatüründe ilk kez kullanılmıştır. Maliyet, istasyon açma ve işgören maliyetleri toplamından oluşmaktadır. İşçiye yönelik tehlike ise, çevresel veya bireysel ergonomik faktörlerden kaynaklanabilmektedir. Söz konusu çevresel ergonomik faktörler demontajı yapılan parçanın zararlı maddeler içermesi ve gürültü gibi nedenlerden oluşabilmektedir. Dolayısıyla bu gibi nedenlerden kaynaklı tehlike durumu işçi için hem manuel çalışması durumunda hem de işbirlikçi robot ile birlikte çalışması durumunda ortaya çıkabilmektedir. Diğer taraftan yorgunluk veya vücut kullanımına ilişkin bireysel ergonomik faktörler nedeniyle oluşabilen işçiye yönelik tehlike, işçinin işbirlikçi robot ile çalıştığı durumda yok olmaktadır. Her iki durumda oluşabilecek ergonomik risk seviyesi belli bir değerin üzerine çıktığında tehlike var olması durumunda 1, olmaması durumunda 0 olacak şekilde 0-1 değişken olarak tanımlanmıştır. Böylelikle her bir görev için her bir işgören tipinde ortaya çıkabilecek işçiye yönelik tehlike {0, 1, 2} değerlerinden birini almaktadır.

Geliştirilen çok amaçlı modelin çözümünde "epsilon kısıt yöntemi" kullanılmıştır. GAMS/Cplex ortamında çözülen çok amaçlı matematiksel model orta büyüklükte problemlerin çözümünde makul sürelerde Pareto en iyi çözüm kümesini sağlamaktadır. Çalışmanın diğer bir özgünlüğü de karar vericiye destek sağlamak amacıyla bir yöntem geliştirilmesidir. Bu sistemde öncelikle karar verme ölçütleri belirlenmiştir. Bu ölçütlerden biri de çalışmanın doğasına uygun olarak özgün olarak geliştirilen "otomasyon oranı" ölçütüdür. Söz konusu ölçüt ağırlıklarının belirlenmesinde nesnel bir ağırlıklandırma yöntemi olan entropi ağırlıklandırma yöntemi kullanılmıştır. Son olarak genel kabul görmüş çok ölçütlü karar verme tekniklerinden TOPSIS ve PROMETHEE yöntemi kullanılarak elde edilen çözümlerin sıralaması gerçekleştirilmiştir.

Çalışmanın sonuçları demontaj hatlarının dengelenmesi konusunda çalışan akademisyenler ve farklı sektörlerde demontaj hatlarına sahip uygulamacılar açısından önemlidir. Döngüsel ekonomi ve sürdürülebilirlik kavramları ile dijital dönüşüm çalışmalarının giderek önem kazandığı günümüzde, bu çalışmanın çok amaçlı yapısının alana katkı sağlaması hedeflenmektedir.

Çalışmanın Katkısı

Özet olarak bu tez çalışmasının literatüre ve uygulamaya katkıları (*i*) hem görevlerin istasyona atanması hem de istasyonlara atanacak işgücünün (robot/ işçi/işbirlikçi robot/) seçimi problemlerinin birleştirilmesiyle oluşan özgün bir DHDP tanımlanması (*ii*) tanımlanan problem için çok amaçlı ve orta büyüklükte problemlerin kesin çözüm yöntemleri ile çözülebilmesini sağlayacak sadelikte bir matematiksel model geliştirilmesi (*iii*) işçiye yönelik tehlikenin azaltılmasına yönelik yeni bir amaç fonksiyonunun tanımlanması (*iv*) geliştirilen modelin epsilon kısıt yöntemi ile çözülmesi (*v*) karar vericinin elde edilen Pareto en iyi çözüm kümesindeki çözümler arasından seçim yapabilmesi için daha önce kullanılmayan çok ölçütlü karar verme tekniklerine dayalı bir yöntem geliştirilmesi (*vi*) çözümlerin değerlendirilmesinde kullanılacak ölçütlerin belirlenmesi ve (*vii*) problemin çözüm süresine etki eden faktörlerin istatistiksel olarak araştırılması şeklinde sıralanabilir.

Çalışmanın İçeriği

Bu raporun ikinci bölümünde öncelikle DHDP ile ilgili kuramsal bilgiye, üçüncü bölümde ise literatür taramasına yer verilecektir. Dördüncü bölüm materyal ve yönteme ilişkindir. Raporun beşinci bölümünde çalışmanın çerçevesi, matematiksel modelin tanımlanması, test problemlerinin geliştirilmesi, çözümlerin istatistiksel analizi ve karar vericiye destek olmak için geliştirilen yaklaşıma detaylı olarak yer verilecektir. Altıncı bölümde bulgular ve tartışmaya yer verildikten sonra yedinci ve son bölümde sonuç ve öneriler bulunmaktadır.

2. DEMONTAJ HATTI DENGELEME PROBLEMİ

DHDP bazı kaynaklarda, montaj hattı dengeleme probleminin (MHDP) tersi gibi görünmektedir. Ancak kısıtları itibariyle benzer özellikler içermekle birlikte daha karmaşık bir problemdir. Bu bölümde öncelikle demontaj kavramına yer verilecek, sonrasında da sırasıyla demontaj hatları ve bu hatların dengelenmesi üzerinde durulacaktır.

2.1. Demontaj

Demontaj "*bir ürünün kendisini oluşturan parça, bileşen, alt montaj ve diğer gruplara ayrılmasına ilişkin sistematik bir süreç"* olarak tanımlanmaktadır. Demontaj, kısmi (ürünün tamamı demonte edilmiyorsa) ve tam (ürünün tamamen demontajı yapılırsa) olmak üzere iki grupta incelenmektedir (Gungor ve Gupta, 2001). Yeniden imalat aynı zamanda sadece tehlikeli ve/veya karlı parçaların demonte edildiği seçimli demontajı da içerebilir (Koç vd. 2009). Operasyonel seviyede ise demontaj, tahribatlı (geri dönüşü olmayan bağlantılar gibi teknolojik kısıtlar nedeniyle) ve tahribatsız olmak üzere iki grupta incelenebilir (Koç vd. 2009). Gecikmesiz hatlarda konveyör sistemin hızı tüm iş istasyonlarında aynıdır ve her bir iş istasyonu bir sonraki iş istasyonuna işlenen parçayı eş zamanlı olarak iletir. Gecikmeli hatlarda ise parça bir sonraki istasyona veya ara stoğa işlemi bitince iletilir; bu nedenle her bir iş istasyonunun hızı farklıdır (Gümüşkaya, 2013).

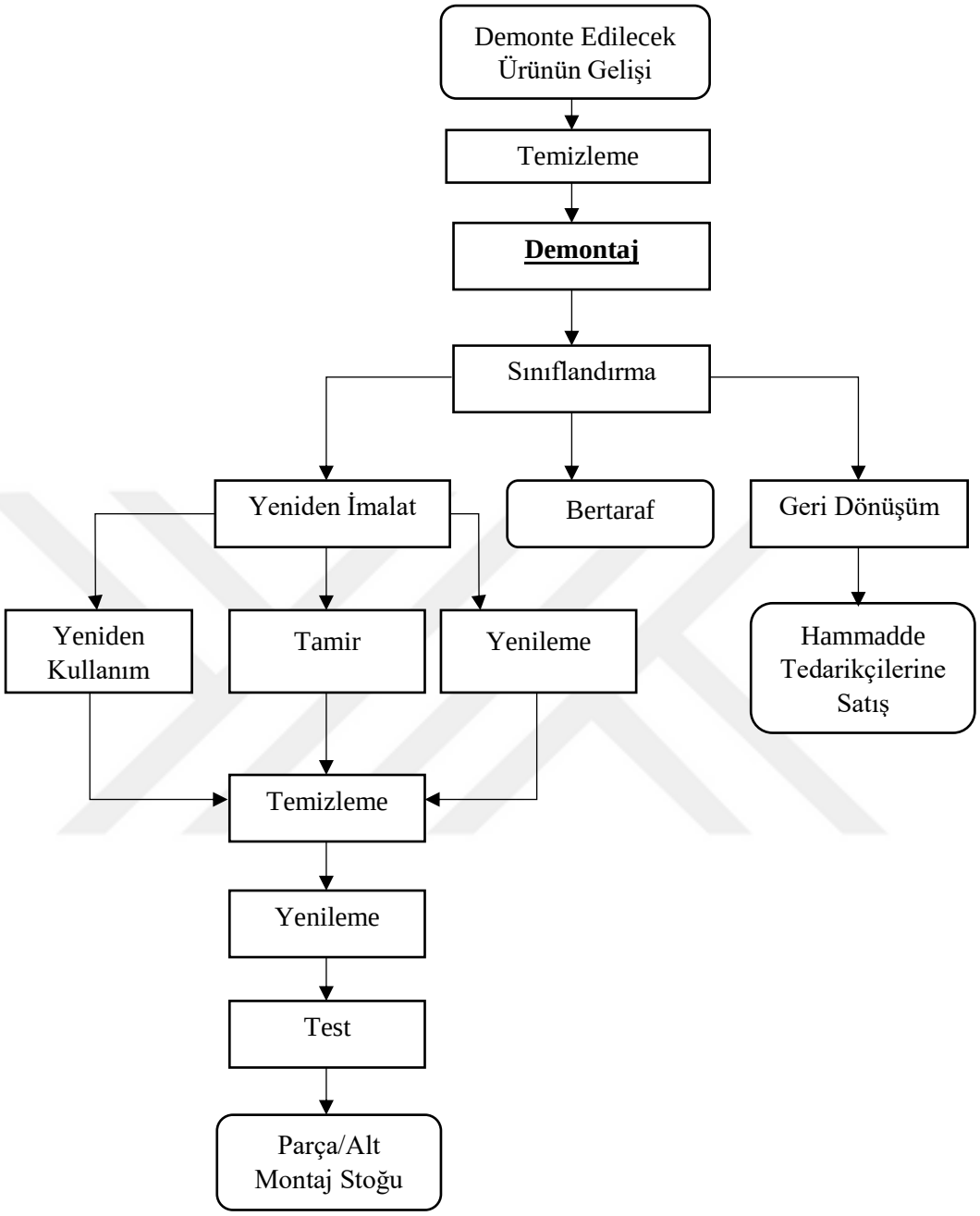
Tersine/kapalı döngü tedarik zincirlerinin işlem adımlarından toplama işlemi, muayene, ayrıştırma ve bertaraf etme alt işlemlerini içerebilir. Yeniden işleme, kullanılmış bir ürünün, ürün veya parça olarak tekrardan kullanılabilir hale getirildiği aşamadır. Bu aşama yeniden kullanım, tamir, yenileme, yeniden imalat, geri dönüşüm ve bertaraf etme işlemlerinden meydana gelir (Özceylan, 2013). Demontaj sonrası alt montaj ürünleri temizlenerek ve test edilerek yeniden imalat için stoklanmakta, geridönüşümü yapılabilir malzemeler ise ham madde tedarikçilerine satılmaktadır. Artıklar ise çöp toplama alanlarına gönderilmektedir (Kalaycı ve Gupta, 2013b). Şekil 2.1'de görselleştirilen bu süreçte demontaj kilit bir rol üstlenmektedir.

2.2. Demontaj Hatları

19. yüzyılda Şikago'daki mezbahalar, demontaj hatlarının ilk örnekleri olarak ifade edilmektedir. Almanya'da Zerlegezentrum Gruenbroich fabrikasında buzdolabı, radyatör ve TV gibi ürünler, Hollanda'da Mirec BV firmasında kullanılmış TV'ler, yine Hollanda'da AVR ve Prozon firmalarında kullanılmış buzdolabı ve soğutucular, Japonya'da Sharp firmasının çözüm ortağı olan Kansai Geri Dönüşüm firmasında kullanılmış klima, TV, buzdolabı ve bulaşık makinesi için demontaj hatları kurulduğu bilinmektedir (Özceylan, 2013).

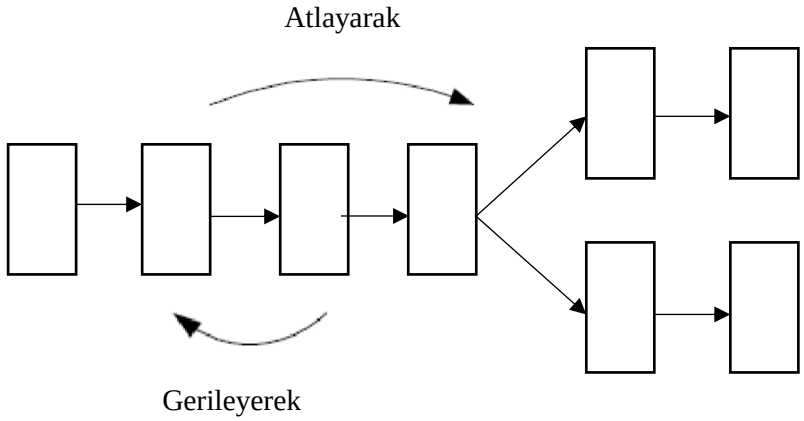
Demontaj hatları, montaj hatları ile benzerlikler içermekle birlikte birbirinin tersi olarak görülemez. Çoklu talepler, kullanım süresi dolan ürünün değişik durumları, stoktaki dalgalanmalar, demontaj hatlarını daha karmaşık ve kontrol edilmesi zor hale getirmektedir (Kulkarni, 2010). Uygulama açısından demontaj sürecinin daha karmaşık olma nedeni bir ürün demonte edildiğinde bileşenlerinin kalite, miktar ve güvenilirliklerinin kontrol edilemiyor olmasıdır (Bentaha vd. 2015a). Saatte 60 arabanın montajının yapıldığı bir ortamda günde ancak 20 arabanın demontajı gerçekleştirilebilmektedir (Tang ve Zhou, 2006).

Demontaj hatlarının kendine özgü özellikleri vardır. Montaj sürecinde parçalar tek bir ürün ortaya çıkarmak için birleştikleri için benzeşik akış sürecine sahiptir. Demontaj sürecinde ise tek bir ürün birden fazla altmontaj ve parçaya ayrılmakta olduğundan akış süreci ayrık olarak nitelendirilmektedir. Ayrıca demontaj hatlarında parçaların yapı ve kalitesi yüksek derecede belirsizlik içermektedir (Gungor ve Gupta, 2001).



Şekil 2.1. Kullanım Süresi Dolmuş Ürününün Süreci

İki hatta da ürüne ait belirli sayıda görev veya operasyon olmasına rağmen montaj hattında tüm görevler, demontaj hatlarında ise bazı görevler yapılmaktadır. Sökülecek ürünlerin (kullanıcılardaki farklı kullanımları ve geçtikleri farklı tamir süreçleri yüzünden) yapı ve kalite açısından yüksek derecede belirsizlik içermesi bu durumun temel sebebidir. Bu tür belirsizlikler nedeniyle her bir ürünün demontajı hat üzerinde farklı şekilde gerçekleşmekte ve akış karmaşıklaşmaktadır (Şekil 2.2) (Özceylan, 2013).



Şekil 2.2. Demontaj Hattında Olası Akışlar 13)

Talep açısından da farklı bir durum söz konusudur. MHDP'de talep, hattın sonunda elde edilen tam bir ürün için iken DHDP'de sökülmekte olan ürünlerin alt montaj parçaları için farklı talepler söz konusudur. Montaj sistemlerinde ürünlerin müşterilere zamanında teslimi hedeflenirken; demontaj sistemlerinde bu durum daha az öneme sahiptir (Özceylan, 2013).

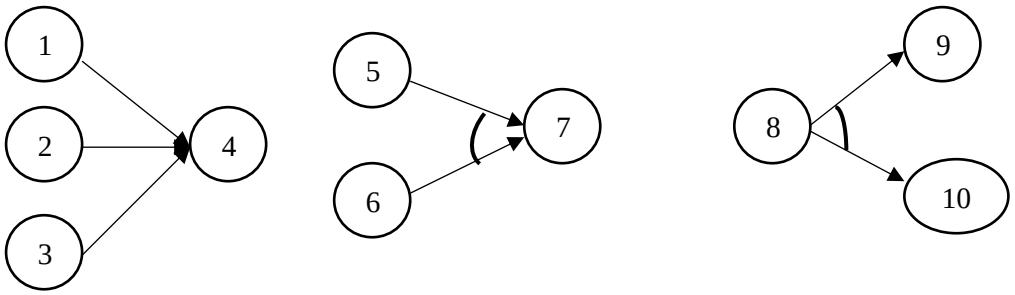
Montajda tüm alt montaj parçaları birleştirilmekte ve son ürün elde edilmektedir. Demontajda ise bir ürün tümüyle demonte edilip tüm alt montaj parçalarına ayrılabilirken, bazı parçalarının demonte edilebildiği kısmi demontaj da gerçekleştirilebilmektedir. Kısmi demontaj fikri ilk kez Altekin vd. (2008) tarafından kar odaklı demontaj hattı dengeleme probleminde (KODHDP) ortaya konmuştur. Burada öne sürülen temel fikir, demontaj işleminin karını artırmak için tüm parçalar yerine yeniden imalat değeri olan parçaların demonte edilmesi üzerinedir. Ancak çevresel açıdan değerlendirildiğinde, yeniden imalat değeri sökme maliyetinden yüksek olan parçaların yanı sıra çevreye zararı olan parçaların da demonte edilmesi gerekmektedir (Kaipu vd. 2019). Ayrıca geri dönüşü mümkün olmayan bağlantılar gibi teknik sebeplerle de bazen tümüyle demontaj mümkün olamamaktadır (Wang vd. 2019). Dolayısıyla demontaj, bileşenlerin ayrılması, bağlantıların çözülmesi gibi işlemlerden oluşmaktadır. Demontaj esnasında kablolar çıkarılmakta; plastik kapaklar, katot ışını tüpü birimleri, tehlikeli bileşenler ve sıvılar, bazı değerli parçalar ve karmaşık bileşenler ayrıştırılmaktadır.

Dijital dönüşümün her sektörde etkisini hissettirdiği günümüzde "Demontaj 4.0" kavramı altında otomasyon kullanılarak demontaj işlemlerinin yapılabilmesine ilişkin çalışmalar da yapılmaktadır (Poschmann vd. 2020). Ancak robotik işlemler her zaman demontaj için uygun olmayabilir. Bu durumlarda manuel demontaj işlemleri gerekmekte ve işgören maliyetleri de görev zamanından etkilenmektedir (Lambert ve Gupta, 2005). Demontajın işgören yoğun yapıda olması bu faaliyeti pahalı hale getirmektedir (Seamus ve Govern, 2011).

Demontaja özgü özelliklerden biri de parçaların fiziksel kusurlarının olabilmesidir. Mesela bir bilgisayar ekranının katot ışın tüpü kırık olması durumunda demontaj süresi uzayabilmektedir. İşlemsel anlamda demontaja özgü özelliklerden birisi de demontaj süresindeki bu değişkenliktir. Bu değişkenlik, parçadan kaynaklı olabileceği gibi işgören kaynaklı da olabilmektedir. Demontaja özgü özelliklerden bir diğeri atamaya ilişkindir. Bazı görevlerin gruplanarak belli bir istasyona atanması gerekebilmektedir. Bunun nedeni sıcaklık ve ışık gibi çevresel koşullar olabileceği gibi, zararlı parçaların çıkarılması için özel tezgâh veya alet gereksinimi de olabilmektedir. Bunların yanında işgörenlerin yetenekleri de bir görev atama kısıtı olabilmektedir. Diğer bir durum da kullanımı dolan ürünün demontajında tekrar kullanılacak parçaların hasar verilmeden çıkarılması gerekirken; geri dönüşümü yapılacak parçaların hasarlı olarak çıkarılabilmesidir (McGovern ve Gupta, 2011).

Altekin vd. (2008)'in öne sürdüğü diğer bir fikir de değişik işleme seçenekleri ve fiziksel kısıtlamalar nedeniyle *VE* öncelik tipi ilişkileri ile karakterize montajdan farklı olarak demontajda farklı öncüllük ilişkilerinin devreye girmesi gerektiğidir. Zira Gungor ve Gupta (2001) da çalışmalarında *VE* öncüllük ilişkisinin yanısıra *VEYA, VEYA içinde VE* ile *karmaşık VE/VEYA* gibi öncelik ilişkilerine de yer vermiştir. Bunlara ilave olarak *VEYA ardıl (SOR)* öncüllük ilişkisi ilk kez Altekin vd. (2008) tarafından önerilmiştir. VE öncelik ilişkisinde bir işin başlaması için öncülü olan tüm işlerin bitirilmesi gerekmektedir. *VEYA öncül (POR*) ilişkisinde ise bir işe başlamak için öncülü olan işlerden en az birinin yapılması yeterli olmaktadır. *VEYA ardıl (SOR)* ilişkisinde ise bir iş yapıldıktan sonra kendisinden sonra gelen birden fazla işten herhangi biri yapılabilir durumdadır. Şekil 2.3 (a.b.c)'de bu üç ilişki görselleştirilmiştir. Şekil 2.3.a'da görüleceği üzere 1, 2 ve 3. görevlerin hepsi tamamlanmadan 4. görev başlayamaz. Şekil 2.3.b. 7. görevin yapılması için 5. veya 6.

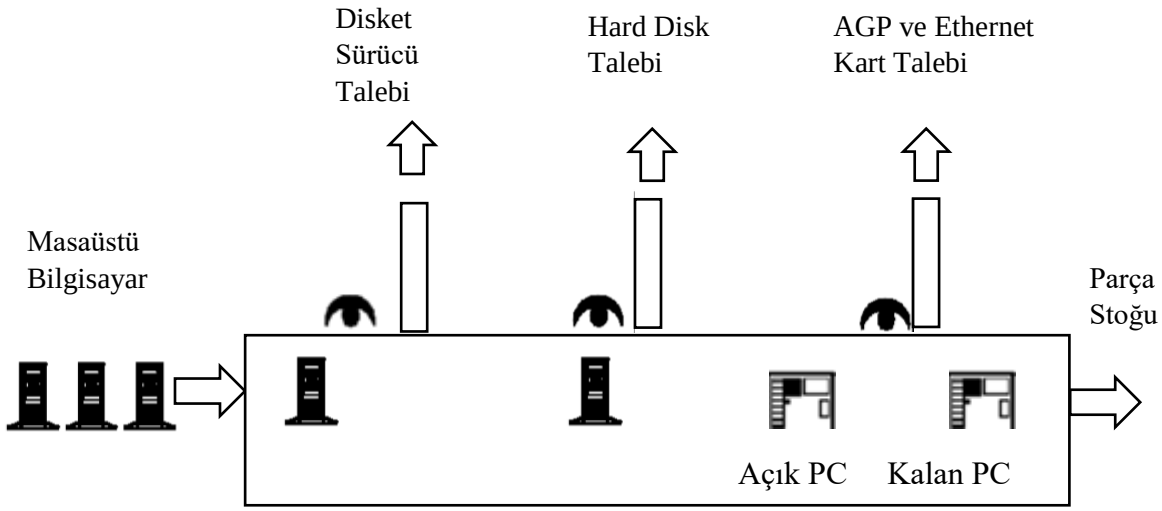
görevlerden her hangi birinin gerekli ve yeterli olduğunu ifade etmektedir. Şekil 2.3.c ise 8. görev tamamlandıktan sonra 9. veya 10. görevden herhangi birinin başlayabilme durumunu gösteren *VEYA ardıl* ilişkisini göstermektedir.



Şekil 2.3. a. *VE* İlişkisi b. *VEYA öncül (POR)* İlişkisi c. *VEYA ardıl (SOR)* İlişkisi

Ancak DHD modellerinde kolaylık açısından genellikle sadece *VE* türünde öncelik ilişkilerinin yer aldığı görülmektedir (Ding vd. 2010). *VE* türünde öncelik ilişkisine sahip tüm görevlerin demontajının gerçekleştiği çalışmalar, montaj hattı dengeleme çalışmalarına benzemektedir. *VE* tipinin yanında diğer öncelik ilişkilerini de ele alan çalışmalar bulunmaktadır (Gungor ve Gupta, 2001; Altekin vd. 2008; Göksoy, 2010; Paksoy vd. 2013; Aydemir-Karadağ ve Türkbey, 2013; Özceylan ve Paksoy, 2014a; Mete vd. 2016; Kalaycılar vd. 2016).

Demontaj işlemleri tek bir iş istasyonunda gerçekleştirilebildiği gibi, bir demontaj hücresinde veya demontaj hattında da gerçekleştirilebilir (Şekil 2.4). Tek iş istasyonu ve demontaj hücreleri daha esnek olmasına rağmen en yüksek verimlilik demontaj hatları ile elde edilebilmektedir. Ayrıca demontaj hatları otomotik demontaj için de daha uygundur (Ilgın, 2010).



Şekil 2.4. Masaüstü Bilgisayar Demontaj Hattı (Gungor ve Gupta 2001)

2.3. Demontaj Hattı Dengeleme Problem Türleri

DHDP demontaj hattı tasarımının kritik bir adımıdır (Çevikcan vd. 2020). Demontaj çalışmaları çizelgeleme, sıralama, hat dengeleme, siparişe göre demontaj sistemleri, otomasyon ve ergonomi başlıkları altında incelenmektedir. Demontaj çizelgeleme, planlama dönemi boyunca kullanım süresi dolan ürünlerin parça ve bileşenlere olan talebin karşılanması amacıyla çizelgelenmesidir. Bu problem türü genellikle kapasiteli ve kapasitesiz olarak sınıflandırılmaktadır. Demontaj sıralama problemleri ise ürünün kendisini oluşturan parçalara ayrılmasındaki en iyi sırayı belirlemek üzerine çalışmaktadır. Bu problem türünün çözümünde *VE/VEYA* serimi gibi serim tabanlı grafiksel yaklaşımlar kullanılmaktadır. Petri ağları modelleme yaklaşımı da bu alanda kullanılan seçeneklerden birisidir. Siparişe göre demontaj sistemlerinin amacı, değişik ürün karması içerisindeki farklı bileşenler için kullanım süresi dolmuş ürünlerin en uygun parti büyüklüklerini belirlemektir. Varolan demontaj tesislerinin büyük çoğunluğu el işçiliğine dayanmakla birlikte artan elektronik atık miktarı işgören maliyetinin artması ve yüksek verimlilik ihtiyacı nedeniyle şirketlerin otomasyon ihtiyacı ortaya çıkmaktadır. Modüler demontaj süreçleri, yarı otomatik demontaj hücre oluşturma, robotize ve esnek demontaj hücreleri ve tesis yerleşimleri bu anlamda çalışılan konular arasındadır (Ilgın, 2010). Demontaj literatüründe ana çalışma alanları sıralama ve hat dengeleme şeklindedir (Koç vd. 2009).

DHDP ilk kez Gungor ve Gupta tarafından 1999 yılında önerilmiştir. Gungor ve Gupta (1999) söz konusu problemi, "n sayıdaki görevin ürünün parçaları arasındaki öncelik ilişkilerini dikkate alarak m adet makineye atanması" şeklinde tarif etmişlerdir.

DHDP temel olarak deterministik ve stokastik olmak üzere iki grupta incelenmektedir. DHDP'nin deterministik hali DHDP olarak ifade edilirken, görev süresindeki belirsizliği ele alan çalışmalar stokastik demontaj hattı dengeleme problemi (SDHDP) olarak ifade edilmektedir. Görev süresindeki belirsizlik işgören kabiliyetleri, motivasyonu ve yorgunluğu, kullanım süresi dolan ürünün yapısı ve kalitesi, ürünün malzeme bileşimindeki değişimler ve iş istasyonu karakteristikleri gibi birçok faktör nedeniyle ortaya çıkmaktadır (Bentaha vd. 2015a).

Diğer bir ayrım da maliyetlerin düşürülmesine odaklanan maliyet odaklı DHDP ile karın en büyüklenmesine odaklanan KODHDP şeklindedir (Gümüşkaya, 2013). KODHD problemi ile ilgilenen araştırmacıların genellikle kısmi demontaj ile ilgilendikleri görülmektedir (Altekin vd. 2004). Ancak Ren vd. (2017) kısmi kar odaklı demontaj hattı dengeleme problemini (KKODHDP) ayrı bir problem türü olarak tariflemiştir. Bu problemin tümüyle demontajla karşılaştırıldığında daha fazla olası dizileri olması ve geri kazanım değeri ve demontaj maliyeti gibi ilave bilgiler içermesi yönüyle daha karmaşık bir problem olduğu ifade edilmektedir.

Sıra bağımlı demontaj hattı dengeleme problemi (SBDHDP) ise DHDP'nin genelleştirilmiş halidir. Tüm sıra bağımlı zaman artışları sıfır olduğunda SBDHDP, DHDP haline indirgenmektedir (Kalaycı ve Gupta, 2014). Gerçek hayat uygulamalarında özellikli tezgâhlar, sınırlı sayıda işgören ve robotlar gibi bazı kaynakların kısıtlı olmasından yola çıkan Mete vd. (2016) literatürde ilk defa kaynak kısıtlı DHDP'yi ortaya koymuşlardır. Bu çalışmada belirli bir çevrim süresi için istasyon sayısı ile birlikte kaynakların etkin kullanımını sağlamak adına kaynak sayısını da en küçüklemek amaçlanmaktadır. Söz konusu kaynaklar her bir görevi gerçekleştirmek için tanımlanmış durumdadır. RDHDP literatürü bölümünde de problemi kaynak kısıtı çerçevesinde ele alan Fang vd. (2020b, 2020c) ve Yuan vd. (2020) çalışmalarına yer verilecektir.

2.4. Robotik Demontaj Hattı Dengeleme Problemi

Literatürde imalat sistemleri üç temel bölümde incelenmektedir: Manuel, tam otomatik ve hibrit. Bu sistemlerin temel özellikleri incelendiğinde manuel sistemlerde insanın esnekliği, bilişsel kabiliyetleri, yaratıcılığı, zekâsı ve öğrenme yeteneği ön plana çıkmaktadır. İnsan-robot etkileşimde ise esneklik, hız, yeniden yapılandırma, verimlilik, güvenlik, ergonomi ve kabiliyet özellikleri bulunmaktadır. Son olarak sadece robotların çalıştığı tam otomatik sistemlerde doğruluk, yorulmazlık, hız, tekrarlanabilirlik ve güç ön plana çıkmaktadır (Hashemi-Petroodi vd., 2020).

Geridönüşüm ve demontajda da robotların rolü gün geçtikçe artmaktadır. Sürdürülebilir imalatta insan sermayesi önemlidir. Bu anlamda demontajda ağır, tekrarlı ve kirli işleri robotların yapması önemlidir (Liu vd. 2019b). Robotik sistemler yapay zekâ, sensör ve görüntüleme teknolojileri yardımıyla ayrıca geridönüşüm öncesinde endüstriyel atıkların sınıflandırılmasında da kullanılabilmektedir. Örneğin, Apple tarafından geliştirilen Liam adlı bir robot aracılığıyla bir cep telefonu sadece 11 saniyede demonte edilebilmektedir (Bogue, 2019). 2016 yılında geliştirilen Liam demonte edilerek, 2018 yılında Şekil 2.5'te görülen Daisy demontaj robotu kullanılmaya başlamıştır (Anonim, 2018). Robotların demontaj hatlarında kullanılması anlamında büyük bir potansiyel olduğu literatürde ortaya konmuştur (Çil vd. 2020b).



Şekil 2.5. Daisy Cep Telefonu Demontaj Robotu (Anonim, 2018)

İmalat ortamında otomasyonu arttırmak için önce robotlar kullanılmaya başlamakla birlikte, yeni üretim sistemlerinde güncel eğilim insan robot işbirliğidir. Böylelikle hem manuel hem de robotik avantajları bir arada elde edilmeye çalışılmaktadır. İşbirlikçi robotlar kullanılarak montaj hatlarının uzunluğunun azalması ve yer tasarrufu mümkündür. Malzeme aktarma, işçi hareketi ve hazırlık süreleri de azalmaktadır. İşbirlikçi robotlar insanın yerini almak yerine insanları ortak istasyonlarda desteklemektedir. Bu işbirliği çeşitli şekillerde olabilmektedir. Ortak istasyonda aynı görevi yapabilecekleri gibi, paralel şekilde farklı görevleri de gerçekleştirebilmektedir. İşbirlikçi robotlar hat dengeleme problemlerinin yaygın amaçları olan istasyon sayısını, çevrim süresini ve maliyetleri azaltma ve karı arttrma amaçlarınının hepsini destekler niteliktedir (Weckenborg, 2020).

Dijital dönüşümün etkisiyle, robotların insanlarla işbirlikçi şekilde çalıştığı iş modelleri gelişmektedir. Endüstri 4.0 ile birlikte insan ve makine etkileşimi mümkün olmaktadır. Robotların kullanımı ile birlikte verimlilik ve kalite artmaktadır. Ancak robotlar tamamen insanların yerini alamazlar. Olası problemlerin yok edilmesinde insan ve robotların birlikte çalışması en iyisidir. Romero vd. sınıflandırmasına göre işbirlikçi robotlar

ergonomik olmayan ve tekrarlı görevleri gerçekleştiren endüstriyel robotlardır. İşbirlikçi robotların avantajları çalışma alanını arttırması ve akıllı operatör etkinliğini arttırmasıdır. Geleneksel robotlara göre de daha kolay programlanabildikleri gibi, hareket etme avantajları da vardır (Çil vd. 2020a). Şekil 2.6'da işbirlikçi robot sektöründe önemli üreticilerden biri olan Kuka'nın bir versiyonu gösterilmektedir.



Şekil 2.6. İşbirlikçi Robot Örneği (Alkan, 2021)

Dijital dönüşümün her sektörde etkisini hissettirdiği günümüzde "Demontaj 4.0" kavramı altında otomasyon kullanılarak demontaj işlemlerinin yapılabilmesine ilişkin çalışmalar da yapılmaktadır (Poschmann vd. 2020). Ancak robotik işlemler her zaman demontaj için uygun olmayabilir. Bu durumlarda manuel demontaj işlemleri gerekmekte ve işgören maliyetleri de görev zamanından etkilenmektedir (Lambert ve Gupta, 2005). İnsan daha karmaşık görevleri yaparken, işbirlikçi robotlar vidaların sökülmesi gibi basit ve tekrarlı işleri yapar. (Bogue, 2019). Diğer taraftan robot potansiyeli olan her işin de robotlar tarafından yapılmasına gerek olmadığı ifade edilmektedir (Malik ve Bilberg, 2019). Yapay zekâdaki hızlı gelişmelerin insan robot işbirliğinin etkinliğini arttıracağı ve imalatta yeni eğilim olacağı öngörülmektedir (Liu vd. 2019b).

Demontaj maliyetinin en büyük bileşeni işgören maliyetidir (Priyono vd. 2016). Demontajın işgören yoğun yapıda olması bu faaliyeti pahalı hale getirmektedir (Seamus ve Govern, 2011). Demontajı yapılan ürünün yenilikçilik ve teknoloji düzeyi arttıkça, demontaj işlemi zorlaşmakta gerçekleştirilmesinde daha yüksek derecede yetenek gerekmektedir

(Priyono vd. 2016). Ancak ürünlerin bazı parçaları tehlikeli malzemeler içerdiği için işçiler risk altındadır. Demontaj hatlarının etkin, sürdürülebilir ve güvenli olması için işgörenlerde oluşan zararın azaltılması önemlidir (Mura vd. 2020). Renteria vd. (2019) demontaj hücrelerinde; sıkıcı ve tehlikeli işlerin robotlara; daha fazla değer katan işlerin işçilere verilerek iş tatminini arttırılacağını öne sürmüştür.

Demontaj süreçlerinin maliyetleri kullanılan teknolojiye bağlıdır. İnsan-robot etkileşimi sadece teknik açılardan değil, görevlerin atanmasının düzeltilmesi açısından da gelişmektedir. Montaj süreçlerinde otomasyonda robot kullanma olasılığının değerlendirilmesinde ana amaç etkin ve etkili bir şekilde ürünlerin zamanında üretimi olduğu için çevrim süresi tabanlı ölçütler kullanılmaktadır. Ancak demontajda belirli bir teslim tarihi yoktur ve bileşenlerin tahmin edilmesi de zordur. Bir elektronik geridönüşüm firmasının amacı karını arttırmak ve alandan tasarruf sağlamaktır. Bu nedenle otomasyondan daha az yararlanılmaktadır. Bu noktada işbirlikçi robotların kullanımı önemli bir rol oynamaktadır. Böylece robot ve insan birbirini tamamlamakta ve yardımcı olmaktadır (Renteria vd. 2019).

Örneğin bilgisayar ve televizyonların ekranları değerli ve tekrar kullanılabilir malzeme ve bileşenlerden oluşmaktadır. Ayrıca toksik madde içeren malzemelerin de ayrıştırılması gerekmektedir. Bu ürünler en büyük oranda cam içermektedir. İkinci olarak demir, alüminyum, bakır ve diğer değerli metalleri içermektedir. Ayrıca kurşun, çinko ve kalay gibi demir içermeyen malzemeler de içermektedir. Plastikler üçüncü grubu oluşturmaktadır. Genellikle alev geciktirici olarak kullanılan halojenlenmiş plastikler de zararlı bileşenler içermektedir. Ayrıca, bu malzemeler mikroplastik halinde insan besin zincirine girerek de ciddi bir çevresel probleme neden olmaktadır (Renteria vd. 2019). Toksik malzemeler işçilere zarar verdikleri için demontajın yapılabilirliğini azaltmakta ve özelleştirilmiş taşıma donanımları gerektirebilmektedir (Priyono vd. 2016).

Demontaj görevlerini gerçekleştiren insanlarda düşük etkinlik, yüksek maliyet, yorgunluk ve gizli tehlike bulunmaktadır. Örneğin korozif sıvı içeren zarar görmüş bir bataryanın demontajında robotların tercih edilmesi daha iyi bir çözümdür. Robotlar bu noktada yardımcı olabilmektedir ancak insanlar daha esnektir (Cheng vd. 2017). Mura vd. (2020) demontaj hatlarının sıralanması konulu çalışmasındaki son amaç sıralamadaki

güvenlik düzeyidir. Burada güvenlik düzeyi için yeni bir formül önerilmiştir: Öncelikle görevler tehlikeli ve tehlikeli olmayan şeklinde ikiye ayrılmaktadır. Tehlikeli görevler katı, sıvı veya gaz şeklinde insanlara, yaşayan organizmalara ve çevreye zarar verebilecek tehlikeli malzeme sökümünü içeren görevlerdir. Bu malzemeler taşınırken sağlık ve güvenlik için risk taşımaktadır. Birleşmiş Milletler Tehlikeli Malların Taşınmasına ilişkin direktifler (United Nations Recommendations on the Transport of Dangerous Goods 2009) kapsamında bu malzemeleri yüksek, orta ve düşük olmak üzere üç grupta ele almaktadır. Tehlikeli görevlerin tehlike düzeylerine göre ayrıştırılması ile birlikte önceliklendirme ve böylece hattın güvenliğini arttırmak da mümkün olmaktadır (Mura vd. 2020).

Söz konusu üç tür demontaj hattı Çizelge 2.1'de karşılaştırılmaktadır.

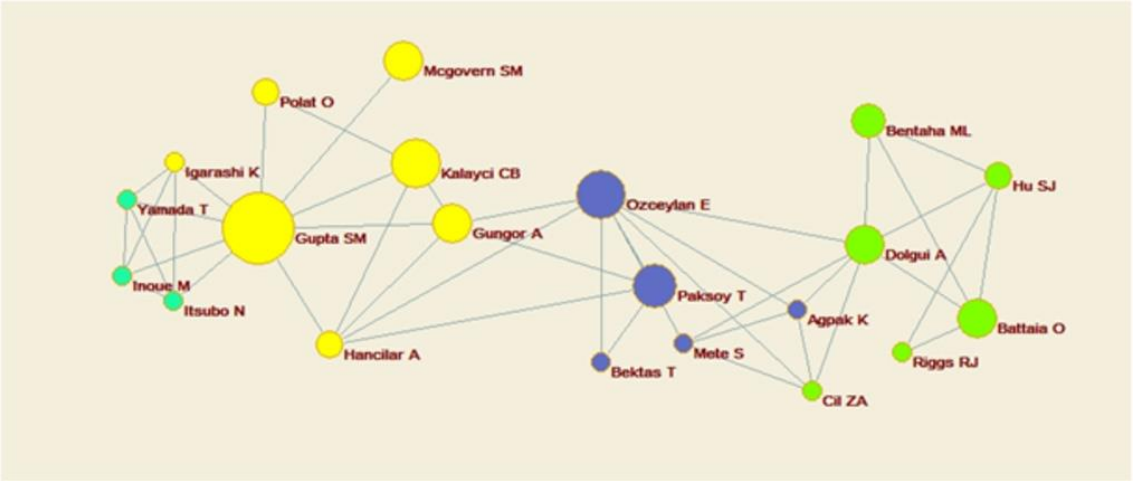
Çizelge 2.1 Demontaj Hatlarında Değişik İşgören Kaynaklarının Karşılaştırılması

	Robot	**İşbirlikçi Robot**	**İşçi**
Otomasyon düzeyi	Yüksek	Orta	-
Maliyet	Yüksek	Orta	Düşük
Programlanabilme	Zor	Kolay	-
Ergonomik Katkı	Çok	Orta	-
Hareket Kabiliyeti	Çok az	Orta	Yüksek

3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

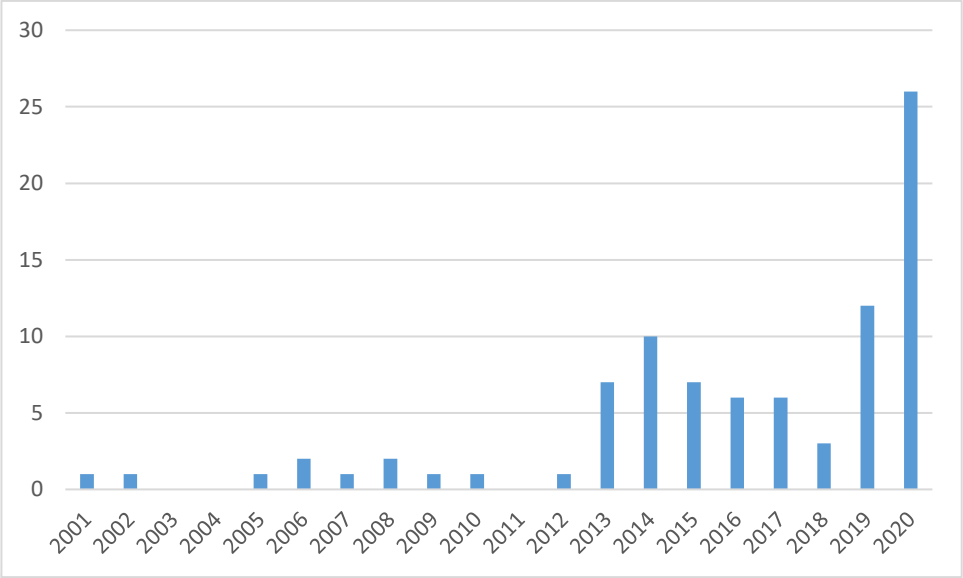
2021 yılında ortaya konduğundan beri DHDP ile ilgili birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. DHDP ile ilgili ilk literatür taraması makaleleri ilk kez 2019 yılında yayınlanmıştır. Aynı yıl Özceylan vd. (2019) ile Deniz ve Özçelik (2019a) tarafından DHDP konusunda iki ayrı tarama makalesi yayınlanmıştır. İlk çalışmada literatür taraması geleneksel teknikler kullanılarak gerçekleştirilirken; Deniz ve Özçelik'in (2019a) çalışmasında geleneksel tekniklere ilave olarak bibliyografik ve sosyal ağ analizi teknikleri ile önerilen çalışmaların gerçekleştirilme analizleri de kullanılmıştır.

Deniz ve Özçelik'in (2019a) çalışmasında yer alan sosyal ağlardan biri olan DHD literatüründeki yazar ağlarının en büyüğü Şekil 3.1'de görülmektedir. Şekilde görüleceği üzere Gupta, bu alanda en çok yazarla en çok çalışma gerçekleştiren otorite konumundadır.



Şekil 3.1. DHD Literatüründeki Yazar Ağlarının En Büyüğü

2020 yılında gerçekleştirilen literatür taraması makalelerinde ise metasezgiseller (Gao vd. 2020) ve çok amaçlı yapı (Laili, 2020) özelinde gerçekleştirilmiştir. Literatürdeki çalışmalar DHD konusunda gerçekleştirilen çalışmaların son yıllarda artış gösterdiğini ortaya koymaktadır. Bu durum Şekil 3.2'de de görülmektedir.



Şekil 3.2. Yayınların Yıllara Göre Dağılımı

Literatürde yer alan DHDP makaleleri hat türü, ürün türleri, parametre yapısı ve demontaj düzeyleri açısından Çizelge 3.1'de sınıflandırılmıştır. İlgili tablo göz önünde bulundurulduğunda öncelikle ürün ile ilgili olarak tek modelli ürünlerin baskınlığı söz konusudur. Hat şekli açısından bakıldığında ise düz hatların baskınlığı görülmektedir. Çalışmalarda ayrıca gecikmesiz hatlar ağırlıktadır. Görev süresi açısından çalışmaların çoğu deterministik olmakla birlikte stokastik çalışmalar da bulunmaktadır. Ayrıca değişkenliği ele alırken bulanık yaklaşımı kullanan az sayıda çalışma da yer almaktadır.

Çizelge 3.1. Makalelerin Sınıflandırılması

		Gungor ve Gupta, 2001	Güngör ve Gupta, 2002	McGovern ve Gupta, 2006	Tang ve Zhou, 2006	McGovern ve Gupta, 2007b	Altekin vd., 2008	Agrawal ve Tiwari, 2008	Koc vd., 2009	Ding vd., 2010
Hat türü	Düz	√	√	√	√	√	√		√	√
	U-şeklinde							√		
	Paralel									
	Çift taraflı									
Ürün türleri	Tek modelli	√	√	√	√	√	√		√	√
	Karma modelli							√		
	Çok modelli									
Paramatre yapısı	Deterministik	√	√	√	√	√	√		√	√
	Stokastik							√		
	Bulanık									
Demontaj düzeyleri	Kısmi						√			
	Tümüyle	√	√	√	√	√		√	√	√
	Kısmi-tümüyle									

Çizelge 3.1. Makalelerin Sınıflandırılması (Devam)

		Altekin ve Akkan, 2012	Kalaycı ve Gupta, 2013a	Paksoy vd., 2013	Özceylan ve Paksoy, 2013	Kalaycı ve Gupta, 2013b	Özceyan vd., 2014	Özceyan ve Paksoy, 2014b	Kalaycı ve Gupta, 2014	Özceylan ve Paksoy, 2014a
Hat türü	Düz	√	√	√	√	√	√	√	√	√
	U-şeklinde									
	Paralel	√								
	Çift taraflı									
Ürün türleri	Tek modelli	√	√		√	√	√	√	√	√
	Karma modelli			√						
	Çok modelli									
Paramatre yapısı	Deterministik	√	√		√	√	√		√	
	Stokastik									
	Bulanık			√				√		√
Demontaj düzeyleri	Kısmi									
	Tümüyle	√	√	√	√	√	√	√	√	√
	Kısmi-tümüyle									

Çizelge 3.1. Makalelerin Sınıflandırılması (Devam)

		Tuncel vd., 2014	McGovern ve Gupta, 2015	Bentaha vd., 2015b	Kalaycı vd., 2015b	Hezer ve Kara, 2015	Bentaha vd., 2015a	Kalaycı vd., 2015a	Riggs vd., 2015	Bentaha vd., 2015b	Igarashi vd., 2016	Kalaycılar vd., 2016
Hat türü	Düz	√	√	√	√		√	√	√	√	√	√
	U-şeklinde											
	Paralel					√						
	Çift taraflı											
Ürün türleri	Tek modelli	√	√	√	√	√	√	√		√	√	√
	Karma modelli								√			
	Çok modelli											
Paramatre yapısı	Deterministik		√		√	√			√			√
	Stokastik	√		√			√			√	√	
	Bulanık							√				
Demontaj düzeyleri	Kısmi											√
	Tümüyle	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	
	Kısmi-tümüyle											

Çizelge 3.1. Makalelerin Sınıflandırılması (Devam)

		√Kalaycı vd., 2016	√Altekin vd., 2016	√Mete vd., 2016	√Seidi ve Saghari, 2016	√Ilgın vd., 2017	√Altekin, 2017	√Ren vd., 2017	√Liu ve Wang, 2017	√Kannan vd., 2017	√Xiao vd., 2017	√Zhang vd., 2017	√Pistolesi vd., 2018
Hat türü	Düz	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
	U-şeklinde												
	Paralel												
	Çift taraflı												
Ürün türleri	Tek modelli	√	√	√	√		√	√	√		√	√	√
	Karma modelli												
	Çok modelli					√				√			
Paramatre yapısı	Deterministik	√		√		√		√	√	√	√	√	√
	Stokastik		√				√						
	Bulanık				√								
Demontaj düzeyleri	Kısmi		√				√	√					√
	Tümüyle	√		√	√	√			√	√	√	√	
	Kısmi-tümüyle												

Literatürde DHDP ile ilgili yapılan çalışmalar, manuel ve robotik demontaj hatlarının dengelenmesi ve çözüm yaklaşımları açısından izleyen alt bölümlerde incelenmiştir.

3.1. Manuel Demontaj Hatlarının Dengelenmesi Konusunda Literatür Taraması

Gungor ve Gupta (2001) yılındaki çalışmalarında görev hataları olması durumunda DHDP'yi tanımladıktan sonra serim kuramına dayalı bir çözüm yaklaşımı geliştirmiş ve Dijkstra algoritmasına dayanan bir algoritma geliştirilmiştir. Altekin ve Akkan'ın (2012) çalışmalarında da görev hatalarına, tekrar yer verildiği görülmektedir. Söz konusu çalışmada ilk kez tahmin edici-tepkisel DHD yaklaşımı uygulanmış ve benzetim çalışması da gerçekleştirilmiştir.

Güngör ve Gupta, 2002 yılında yayınladıkları çalışma kapsamında ise ürün geri kazanımı açısından DHD'nin önemini ortaya koyarak, yapısındaki zorlukları ortaya koyduktan sonra, basit demontaj hattı dengeleme problemini (BDHDP) tanımlamış ve çözüm için bir sezgisel önermişlerdir. Bu sezgiselde yer alan öncelik fonksiyonu gelecek çalışmalara temel oluşturacak biçimde iş istasyonlarının boş zamanları, yüksek talebi olan parçaların daha erken demonte edilmesi, en çok sayıda parçanın öncülü olan ve kolaylıkla ulaşılabilen parçaların daha erken demonte edilmesi, zararlı içeriğe sahip parçaların mümkün olduğunda erken demonte edilmesi ve demontaj yön değişimlerinin en küçüklenmesine bağlı olarak tanımlanmıştır. Aynı problem için McGovern ve Gupta (2005) ise 2-opt ve tepe tırmanma yerel arama sezgiselleri ile açgözlü algoritmayı kullanmışlardır.

DHDP'nin NP-Tam olduğunu ispat ettikleri çalışmada McGovern ve Gupta (2007a), ayrıntılı arama algoritmasının yanısıra 4 farklı sezgisel (açgözlü, açgözlü/tepe tırmanma, açgözlü/2-opt ve Hunter-Killer (H-K)) ve 2 farklı metasezgisel (genetik algoritma ve karınca kolonisi en iyileme ile bunların melezlerini) kullanarak kombinatoryel en iyileme analizi gerçekleştirmişlerdir. Ding vd. (2010) ise deterministik tek modelli çok amaçlı DHDP için çok amaçlı karınca kolonisi en iyileme algoritmasından faydalanmışlardır. Genetik algoritma (Seidi ve Saghari, 2016; Mura vd. 2020), yapay balık sürüsü algoritması (Zhang vd. 2017), meyve sineği en iyileme algoritması (Yang vd. 2019) bu anlamda kullanılan diğer metasezgisellerdir.

DHDP'nin çözümünde tamsayılı programlamanın yanı sıra dinamik programlama da ilk kez Koç vd. (2009) çalışması ile kullanılmıştır. Bu çalışmanın literatüre diğer bir katkısı bir ürünün tamamen demonte edildiğinde ortaya çıkabilecek tüm olasılıkları gösteren *VE/VEYA (AOG)* serimini ortaya koymasıdır. Çalışma kapsamında geliştirilen dönüştürülmüş *AOG* için *VE* ve *VEYA* olmak üzere iki tür ayrıt tanımlanmıştır. Bu çalışmadaki modeli temel alan Mete vd. (2016) ise literatürde ilk kez dal-sınır algoritmasının bir uyarlaması olan ışın araması algoritmasına dayalı bir çözüm yaklaşımı geliştirmişlerdir. Li vd. (2019a) da Koç vd. (2009) tarafından önerilen basit DHD problemini çözmek için dal-sınır ve hatırla algoritması önermişlerdir. Çalışmada ayrıca uyarlanmış Hoffman sezgiseli kullanılarak üst sınır elde edilmiştir. Aydemir-Karadağ ve Türkbey (2013), Paksoy vd. (2013) Koç vd. (2009) tarafından önerilen dönüştürülmüş AOG (TAOG) yapısını kullanan

diğer araştırmacılardır. Koç vd. (2009) tek amaçlı DHDP'nin çözümünde dinamik programlamadan yararlanırken, çok amaçlı DHDP'nin çözümünde dinamik programlamadan ilk kez Zhou vd. (2020) yararlanmıştır.

Deterministik DHDP yanında stokastik DHDP (SDHDP) problemi de diğer bir çalışma alanıdır. Agrawal ve Tiwari (2008) stokastik karma modelli U-tipi DHDP'yi ortaya koymuştur. Çok amaçlı SDHDP üzerine çalışan Aydemir- Karadağ ve Türkbey (2013) ise klasik montaj hatlarında esnekliği arttırmak için kullanılan paralel istasyon fikrini DHD'de ilk kez kullanan araştırmacılardır. SDHDP çözümünde de genetik algoritma (Aydemir-Karadağ ve Türkbey, 2013), işbirlikçi karınca kolonisi en iyileme algoritması (Agrawal ve Tiwari, 2008), çok amaçlı hibrit göçmen kuşlar (Zhu vd. 2020a), kesikli çiçek tozlaşma (Wang vd. 2020a) gibi metasezgisellerden yararlanılmıştır. SDHDP literatürde ilk kez Bentaha vd. (2014a) tarafından kesin çözüm yöntemleri ile çözülmeye çalışılmıştır. Bentaha vd. (2014b) tarafından aynı yıl yayımlanan diğer çalışmada yine demontaj hattı tasarımındaki görev sürelerindeki belirsizlik ele alınmaktadır. Bu çalışmanın farklılığı kısmi demontaj olması ve çevrim süresi aşımı için bir ceza tanımlamasıdır. Bentaha vd. (2015a) ayrıca kullanım süresi dolan bir ürün için en iyi demontaj seçeneğini belirlemek için karar vericiye destek olan bir karar aracı geliştirilmişlerdir. SDHDP alanında düzeltici faaliyetler üzerine ilk kez çalışma gerçekleştiren Altekin vd. (2016), hattı durdurma ve çevrimdışı demontaj seçenekleri ile ikisinin birleşiminden oluşan bir hat tasarlamışlardır. Zheng vd. (2018) ve He vd. (2020b) ise değişik zorluklar nedeniyle işlem sürelerinin dağılımının elde edilememesinden yola çıkarak dağılımdan bağımsız bir model ortaya koymuş, sadece ortalama, standart sapma ve üst sınır bilgisi ile stokastik işlem süreleri üzerinde çalışmışlardır. Liu vd. (2020b) ise DHDP'de sınırlı dağılımsal bilgi olma durumu için kesin çözüm yaklaşımını kullanmayı tercih etmişlerdir. Sadece ortalama ve standart bilgi olması durumunda SDHDP çözmek için literatürde yer alan diğer tahminleme yöntemleri yerine kesme düzlem algoritması önermişlerdir. Bu bağlamda Liu vd. (2020c) uygulamada ise dağılımsal bilginin tamamının elde edilmesinin zor olduğu ve belirsiz görev sürelerinin arasında korelasyon olduğunu öne sürerek görev sürelerinin sadece ortalama ve kovaryans matrisinin kullanan bir çözüm yaklaşımı önermişlerdir. Bu amaçla dağılımsal anlamda robust bir yaklaşım için yeni bir birleşik şans kısıtı önermişlerdir. Görev süresinin yanısıra demontajı yapılacak ürününün kalitesindeki belirsizlik konusu da Zhu vd. (2020a) tarafından çalışılmıştır. Wang vd. (2020a) ise U şeklinde demontaj hatlarının dengelenmesi

probleminde sadece bazı parçaların korozyona uğraması gibi üründen kaynaklanan belirsizlik durumunu dikkate almıştır. SDHDP alanında He vd. (2020a) tarafından gerçekleştirilen çalışma stokastik görev süreleri olması durumunda yeşil DHDP'nin çözümüne odaklanması yönüyle diğerlerinden farklılaşmaktadır. Çok amaçlı SDHDP çözümünde de epsilon kısıt yönteminin kullanıldığı görülmektedir (He vd. 2020a, 2020b).

DHDP için ilk kez karma tamsayılı doğrusal programlama modelini geliştiren Altekin vd. (2008) ayrıca kısmi demontaj durumunu inceleyerek KODHDP ortaya koymuştur. Ayrıca *VE ardıl, VE içinde VEYA* ve *VEYA içinde VE* şeklinde yeni öncelik ilişkileri tanımlamışlardır. Bu çalışmada doğrusal programlama gevşetmesine dayalı alt ve üst sınır yaklaşımları ortaya konduktan sonra kurma ve geliştirme esaslı sezgiseller kullanılmıştır. Bu bağlamda Bentaha vd. tarafından 2013-2015 yılları arasında yazılan makale ve bildirilerde de KODHDP için kesin çözüm yaklaşımları üzerinde durulmuştur. Örneğin Bentaha vd. (2015b), çalışmasında doğrusal programlamanın özel bir hali olan ikinci dereceden konik tahmin kullanılmıştır. Çalışmada ayrıca *VE/VEYA* seriminden de yararlanılmıştır. Bu çalışmanın özelliği DHD ve HD literatüründe ilk kez belirli bir olasılık düzeyi ile birlikte çevrim süresi kısıtının birleşik tatmininden yararlanılmıştır. Şans kısıtı programlama aracılığıyla hızlı bir şekilde kesin çözümler elde edilebildiği kaydedilmiştir. Ren vd. (2017) ise KODHD çözümü için yerçekimsel arama algoritmasını kullanmışlardır. Kaipu vd. (2019) stokastik KODHDP çözümü için çok amaçlı kesikli çiçek tozlaşma algoritması önermişlerdir. Bu çalışmada ayrıca yeşil imalatın üretim süreçlerinde enerji tüketimini ve salınımı azaltmayı hedeflediğinden hareketle enerji tüketiminin en küçüklenmesi de amaçlar arasında yer almaktadır. Wang vd. (2020b) ise atık elektrik-elektronik donanımlarının KODHDP ele almışlardır. Karı en büyüklemek ve enerji tüketimini en küçüklemenin yanısıra, istasyon sayısını ve düzgünlük indeksini de en küçüklemeye çalışmışlardır. Geliştirilmiş genetik algoritma ile kısmi ve hasarlı demontaj durumunun ele alınmıştır. KODHDP çözümünde kullanılan diğer metasezgiseller çok amaçlı genetik algoritma (Wang vd. 2020c) ve göçmen kuşlar algoritması (Xiao vd. 2020) olmuştur. Xiao vd. (2020) ayrıca görev süresindeki belirsizliği de ele almıştır.

Karma model demontaj hattı dengeleme problemine (KMDHDP) ilk kez ikili bulanık hedef programlama ve bulanık çok amaçlı programlama yaklaşımlarını öneren Paksoy vd. (2013), çevrim süresini enküçükleme, demontaj istasyon sayısını enküçükleme ve istasyon

başına iş yükünü dengeleme şeklinde tanımlanan üç amacı aynı anda en iyilemeye çalışmışlardır. Literatürde ilk kez ürünlerin yaşam süresi sonu durumlarındaki belirsizliği ele alan Riggs vd. (2015), KMDHDP için birleşik öncelik serimi yaklaşımını kullanmışlardır. Bir kalem ve dizüstü bilgisayar demontaj örneği üzerinde gerçekleştirilen farklı senaryolar aracılığıyla görev sürelerinin deterministik ve stokastik olma durumları için ayrı ayrı duyarlılık analizleri gerçekleştirilmiştir. Literatürde KMDHDP için kullanılan diğer bir yaklaşım ise doğrusal fiziksel programlama olmuştur (Ilgın vd. 2017) tarafından gerçekleştirilmiştir.

Literatürde en çok çalışılan DHD problemlerinden biri de ilk kez Kalaycı ve Gupta (2013a) ortaya konulan SBDHDP olmuştur. DHDP ve SBDHDP arasındaki fark görev süreleri arasındaki etkileşimdir. Eğer iki görev etkileşim halinde ise görev süreleri bu durumdan etkilenebilir. SBDHDP alanında gerçekleştirilen çalışmalarda genel eğilim metasezgisellerin kullanımıdır. Karınca kolonisi (Kalaycı ve Gupta, 2013a), komşuluk tabanlı mutasyonla parçacık sürü en iyileme algoritması (Kalaycı ve Gupta, 2013b) yapay arı kolonisi algoritması (Kalaycı ve Gupta, 2013c; Liu ve Wang, 2017), yasaklı arama algoritması (Kalaycı ve Gupta, 2014), değişken komşuluk arama (Kalaycı vd. 2015a), kesikli yapay arı kolonisi (Kalaycı vd. 2015b) literatürde kullanıldığı tespit edilen metasezgisel yaklaşımlardır. Bazı çalışmalarda da metasezgisellerin hibrit bir şekilde ele alındığı kaydedilmiştir. Örneğin, Kalaycı vd. (2016), literatürde ilk kez genetik algoritma ile değişken komşu aramadan oluşan melez bir metasezgisel kullanmışlardır. Diğer taraftan SDHDP problemlerinin çözümünde de bulanık mantıktan faydalanıldığı görülmektedir (Kalaycı vd. (2015b).

Literatürde ilk kez paralel hatlı demontaj hattı dengeleme problemini (PDHDP) ortaya koyan Hezer ve Kara'nın (2015) çalışması belirlenen çevrim süresinin aşılması durumunda paralel yeni bir istasyonun açılmasını öneren Aydemir-Karadağ ve Türkbey'in (2013) çalışmasından paralel hatların eş zamanlı dengelenmesi yönüyle ayrılmaktadır. Yazarlar daha önce Gungor ve Gupta (2001) tarafından düz hatlarda DHD için kullanılan yöntemi PDHD için uygulamışlardır. Öncelik ilişkilerinin tanımlanmasında ise Koç vd. (2009) tarafından önerilen TAOG kullanılmıştır. Zhu vd. (2020b) ise kısmi PDHDP üzerine çalışmışlar ve çok amaçlı hibrit grup komşuluk arama algoritmasını önermişlerdir.

DHD literatüründe diğer bir çalışma alanı da çok ölçütlü karar verme (ÇÖKV) tekniklerinin kullanıldığı çalışmalardır. Avikal vd. (2014a) bu anlamda bulanık AHP ve PROMETHEE-II'ye dayalı bir sezgisel önerirken; izleyen çalışmalarında Avikal vd. (2014b) sırasıyla Kano modeli, bulanık AHP ve M-TOPSIS yöntemlerine dayalı *VE/VEYA* öncelik ilişkilerinin kullanıldığı bir teknik ile çözüm geliştirmişlerdir. Yeşil konularla ilgili ölçütleri DHD problemine dâhil eden Kazançoğlu ve Öztürkoğlu (2018) çalışmalarında bulanık AHP ve bulanık MOORA ÇÖKV tekniklerini bir arada kullanırken; DEMATEL (Ilgın, 2018), ELECTRE (Deniz ve Özçelik, 2019b) ve TODIM (Kazançoğlu ve Özkan-Özen, 2020) de bu anlamda kullanılan diğer ÇÖKV teknikleridir.

Kazançoğlu ve Öztürkoğlu (2018)'nun çalışması sonrasında Yang vd. (2019) da çevre dostu olması nedeniyle demontaj hatlarının karbon salınımı ve kaynak kullanımına azaltılması gerektiğinden yola çıkmışlar, ÇÖKV yerine geliştirdikleri çok amaçlı modellerinin çözümünde meyve sineği en iyileme algoritmasını kullanmışlardır. Wang vd. (2019), geleneksel ve tümüyle gerçekleştirilen demontaj çalışmalarının etkinlik üzerine odaklandıklarını ve çevreyi koruma ve ekonomiyi geliştirme ihtiyaçlarını tatmin etmediğini ifade etmektedir. Buradan hareketle çevresel etkileri ve ekonomik faydaları dengelemeye yönelik kısmi demontaj hatlarının dengelenmesi üzerinde çalışmışlardır. Bu amaçla yeni birçok amaçlı genetik tavlama benzetimi algoritması önerilmiştir. Çevresel unsurların yanısıra sosyal unsurları da dâhil eden sürdürülebilir DHD modeli ilk kez 2020 yılında Kazançoğlu ve Özkan-Özen tarafından ortaya konmuştur. Budak (2020) da aynı yıl gerçekleştirdiği çalışmasında sürdürülebilirlik bakış açısıyla tersine lojistik ağları, DHDP ile birlikte ele almıştır.

Son yıllarda DHDP farklı yönleri ile ele alınmaya devam etmektedir. Örneğin, Küçükkoç (2020) literatürde ilk kez büyük boyutta ürünler için çift taraflı DHDP'yi önermiştir. Problemin çözümünde genetik algoritmanın yasaklı aramadan daha iyi sonuç verdiğini ortaya koymuştur. Meng vd. (2020) ve Liang (2021) çift yönlü DHDP üzerinde çalışan diğer araştırmacılardır. Meng vd. (2020) tarafından gerçekleştirilen çalışma hasarın durumuna göre demontaj öncelik kararı veren bir karar modeli de geliştirilmesi yönüyle de özgündür. Bu çalışmalardan bir diğerinde Yuan vd. (2020) kaynak kısıtlı DHDP ele almışlardır. Çalışma baskın olmayan sıralama genetik algoritma yaklaşımı çözümlerinin

Veri Zarflama Analizi (VZA) aracılığı ile sıralanması yönüyle de diğer çalışmalardan ayrışmaktadır.

Yöntemsel açıdan farklılaşan çalışamalara Tang ve Zhou (2006)'nun demontaj hatlarının tasarımı ve işletilmesi için sistematik bir yaklaşım önerdiği ve Petri ağlarını kullandığı çalışma da verilebilir. Petri ağları daha sonra Minca vd. (2014) tarafından bir montaj hattınının demontaj hattına dönüştürülebildiği çalışmada da kullanılmıştır. Tuncel vd. (2014) çalışması ise DHDP için ilk kez bir makine öğrenmesi tekniği olan ve sadece deterministik değil, aynı zamanda stokastik ortamda da çalışan Monte- Carlo tabanlı takviyeli öğrenme yaklaşımını uygulaması yönüyle diğerlerinden ayrılmaktadır.

Son yıllarda gerçekleştirilen çalışmalarda öne çıkan diğer bir eğilim de DHDP ile literatürdeki ilişkili başka problemlerin birlikte alınmasıdır. İlk kez Özceylan ve Paksoy (2013, 2014a, 2014b) tarafından tedarik zinciri problemi ile birleştirilen DHDP, daha sonra sırasıyla kapalı döngü tedarik zinciri ağ tasarımı (Özceylan vd. 2014; Yolmeh ve Saif, 2020), çevresel ve ekonomik parça seçimi (Igarashi vd. 2016), tersine lojistik ağ tasarımı (Kannan vd. 2017; Budak 2020), araç rotalama (Diri Kenger vd. 2020), sıralama (Edis, 2021) ve planlama (He, 2021) problemleri ile birlikte ele alınmıştır. Bu çalışmalardan Edis (2021)'in çalışması DHDP çözümünde ilk kez kısıt programlama yaklaşımını kullanması yönüyle de önemlidir.

2020 yılında DHDP ile birlikte ele alınmaya başlayan diğer bir problem de bir yöneticinin karşılaştığı en zor problemlerden birisi olan "işçi atama problemi"dir. Söz konusu zorluğun nedeni işçi kaynağının diğer kaynaklardan farklı olması, karar ortamının daha dinamik olması ve işçilerin yüksek derecede heterojen olmasıdır (Bruecker vd. 2015). Gerçek hayat üretim süreçleri genellikle değişik seviyede işçi yetenek seviyeleri gerektiren, yüksek çeşitlilikte işlemden oluşmaktadır (Efe vd. 2018). Her işçinin belli yetenekleri vardır. Eğer bir işçi yeteneği daha az olan bir göreve atanırsa, görev süresi de standart süreye göre uzayacaktır. Bu gibi etkin olmayan atamaları önlemek adına işçilerin yetkinlikleri olan işe atanmaları gerekmektedir (Çengil, 2018). Bir işçinin yetenek seviyesi işçilik maliyetlerini etkileyebildiği gibi, iş hızını ve etkinliğini, işin kalitesini, yapabildiği işleri ve esnekliği de etkilemektedir. Yüksek yetenekli işçiler daha yüksek işçilik maliyetine sahiptir ve işçi yetenek seviyesine göre bir işçi bir veya daha fazla işçinin yerine geçebilir. Yetenek

seviyesinin etkilediği “esneklik” çok önemli bir özelliktir. Çünkü talep değişkenliğinin yüksek olduğu bir ortamda çapraz eğitimden kaynaklı esneklik, talep hakkında kesin bilgi sahibi olmaktan daha değerlidir. Buna rağmen işgücü planlamada yeteneklerin dikkate alındığı çalışma sayısı da sınırlıdır (Bruecker vd. 2015).

Çevikcan vd. (2020) çalışması DHD literatüründe insan faktörünü dikkate alan ilk çalışmadır. Bu çalışmada klasik demontaj hatlarında her bir istasyonda tek işçinin çalıştığı, ancak bulaşık makinesi demontajı gibi daha büyük alanlarda daha uzun süren demontaj durumlarında bir istasyonda birden fazla işçinin çalışma durumu ele alınmıştır. Ancak bu çalışmada tüm işçiler homojen kabul edilmiş ve tüm görevleri sabit sürede gerçekleştirdikleri varsayılmıştır. Küçükkoç vd. (2020) ise Tip E bir istasyonda çok işçinin çalıştığı DHDP’yi ortaya koyduğu çalışmasında doğrusal ve doğrusal olmayan modeller önermiştir. Diğer bir çalışmada Yılmaz ve Yazıcı (2021), çok amaçlı DHDP’de, zaman ve kaynak kullanımında etkili bir yöntem olan takım çalışması ve işçilerin heterojenliğini dikkate almıştır. Maliyet, çevrim süresi ve işgücü dengeleme amaçlarını gözeterek geliştirilen en iyileme modelinin küçük boyutlu örnekleri (< 8 parça) genişletilmiş epsilon kısıt yöntemi, büyük boyutlu örnekleri ise (>10) baskın olmayan sıralamalı genetik algoritma-II (NSGA-II) ile çözülmüştür. Son olarak Liu vd. (2021) ise çok modelli DLBP ile işçi atama probleminin stokastik versiyonunu ele almışlardır. Bu çalışmada işçilerin görev süreleri yaş, yetenek seviyesi ve iş deneyimine bağlı olarak değişmektedir. Maliyetin en küçüklenmesi şeklinde tanımlanan model, kesme düzlemi algoritması ve yakınsama metodu ile çözülmüştür.

3.2. Robotik Demontaj Hattı Dengeleme Problemleri Konusunda Literatür Taraması

DHDP literatüründe son yıllarda insan haricinde farklı türde işgörenlerin kullanıldığı durumların da incelendiği görülmektedir. Chen vd. (2014) vida sökme görevinde işçiye yardımcı olacak tamamlayıcı bir robot içeren hibrit bir demontaj iş istasyonu tasarlamıştır. Çalışmanın sonuçları basit bir şekilde yetenekli işçilere minimal ek gereksinimler ile kolaylıkla robotların yardımcı olabileceğini ortaya koyması yönüyle önemlidir. Liu vd. (2018) tarafından ilk kez önerilen robotik demontaj hattı dengeleme problemi (RDHDP) incelendiğinde demontajın manuel yerine tamamen robotlar aracılığıyla yapılması öngörülmektedir. Bu çalışmada robotik iş istasyonlarındaki iş yükünü dengelemeyi

amaçlayan problemin çözümü için etkin baskın olmayan Pareto sıralama yöntemi yardımıyla geliştirilmiş çok amaçlı kesikli arı algoritmasını kullanmışlardır. Uygun demontaj sıralaması ve demontaj yönü uzay girişim matris metodu ile elde edilmiştir.

Fang vd. (2019)'nın çalışmasında çok robotlu iş istasyonlarına sahip karma hatlı DHDP çözümü üzerinde çalışılmıştır. Ayrıca ilk kez takım odaklı demontaj hattı sistemleri üzerine çalışmışlardır. Bu kapsamda evrimci çok amaçlı en iyileme modeli geliştirilmiştir. Matematiksel modelde çevrim süresinin en küçüklenmesinin yanı sıra toplam enerji tüketiminin ve aynı anda çalışan robot sayısının da en küçüklenmesi amaçlanmıştır.

İnsan-robot işbirliği ortamında DHD üzerine çalışan Liu vd. (2019c) işçinin güvenliğinin sağlanmasına odaklanmışlardır. Bu bağlamda geliştirdikleri modelde görevlerin sınıflandırılması ve istasyonlara atanmasını gerçekleştirmişlerdir. Ayrıca büyük boyutlu problemlerin çözümünde arttırılmış kesikli arı algoritmasını kullanmışlardır.

Liu vd. (2020a) RDHDP ile demontaj sıralama problemini birlikte ele almışlardır. Her iki problemi birlikte en iyilemek için de değişken komşu arama ile geliştirilmiş kesikli arı algoritmasını kullanmışlardır. Çok amaçlı yapısı olan problemde çevrim süresi ile istasyon sayısı aynı anda en küçüklenmeye çalışılırken, dengeyi sağlamak adına düzgünleştirme indeksi de en küçüklenmeye çalışılmıştır. Amaç fonksiyonlarının ağırlıklarının belirlenmesi için Analitik Serim Süreci (ASS) kullanılmıştır.

Fang vd. (2020a) ise karma modelli çoklu robotlu DHD problemini çok amaçlı evrimsel tavlama benzetimi yaklaşımı ile çözme yoluna gitmişlerdir. Problemde belirsizlik görev zamanları aralık şeklinde olduğu düşünülerek ele alınmıştır. Çok amaçlı modelde çevrim süresinin en küçüklenmesi, bir istasyondaki en büyük enerji tüketiminin en küçüklenmesi ve toplam enerji tüketiminin en küçüklenmesi şeklinde üç amaç yer almaktadır.

Fang vd. (2020b) kaynak kısıtlı çoklu robotlu DHDP üzerine çalıştıkları makalede bir önceki çalışmaya (Fang vd. 2020a) ek olarak robot sayısını aynı anda en küçükleme yönlü bir matematiksel model önermişlerdir. Bu modelde ise farklı yeteneklere sahip çok robotlu istasyonlar bulunmakta ve hatta aynı anda birden fazla türde ürün eş zamanlı olarak demonte

edilmektedir. Bu problemde görev atama ve robot tahsisi olmak üzere iki alt problem bulunmaktadır. Söz konusu robotlar iş alanını ve ilave kaynakları (imalat araçları, özelleşmiş makine ve yetenekli işçi) paylaşmaktadır. Her bir istasyona atanabilecek robot sayısı önceden sınırlandırılmıştır. Modelin çözümünde ise epsilon kısıt yöntemini kullanan evrim algoritmasından yararlanmışlardır.

Fang ve Xu (2020c)'nun çalışması da kaynak kısıtlı RDHDP üzerinedir. Mete vd. (2016)'nin kaynak kısıtlı DHD çalışmasından yola çıkılarak RDHDP'yi gerçek hayat problemlerine daha yakın hale getirmenin amaçlandığı bu çalışmada yer alan kaynaklar demontaj araçları, gaz veya elektrik gibi robotların çalışmasını destekleyen kaynaklar olabilmektedir. Kaynak kısıtı eklenerek klasik RDHDP'nin daha karmaşık hale getirildiği matematiksel modelde çevrim süresi ve robot sayısının en küçüklenmesi amaçlanmış ve ayrıştırmaya dayalı çok amaçlı evrim algoritması kullanılarak model çözülmüştür.

RDHDP'yi kaynak kısıtı bağlamında ele alan diğer araştırmacılar Yuan vd. (2020) yeniden imalat pazar talebine esnek bir şekilde uyum sağlamak amacıyla iki aşamalı bir demontaj modeli geliştirmişlerdir. Mete vd. (2016)'nin kaynak kısıtlı modeline dayanarak geliştirilen modelde demontaj süresi ve maliyetin yanısıra enerji tüketimi ve çevreye verilen zararı da en küçüklemek için çok amaçlı problem çözüldükten sonra VZA ile elde edilen çözümlerin sıralamaları gerçekleştirilmiştir.

Çil vd. (2020b) RDHDP'nin çözümü için karma tamsayılı doğrusal matematiksel model geliştirmişlerdir. Çevrim süresinin enküçüklenmeye çalışıldığı modelin çözümünde karınca kolonisi eniyilemesine dayalı bir sezgisel geliştirilmiştir.

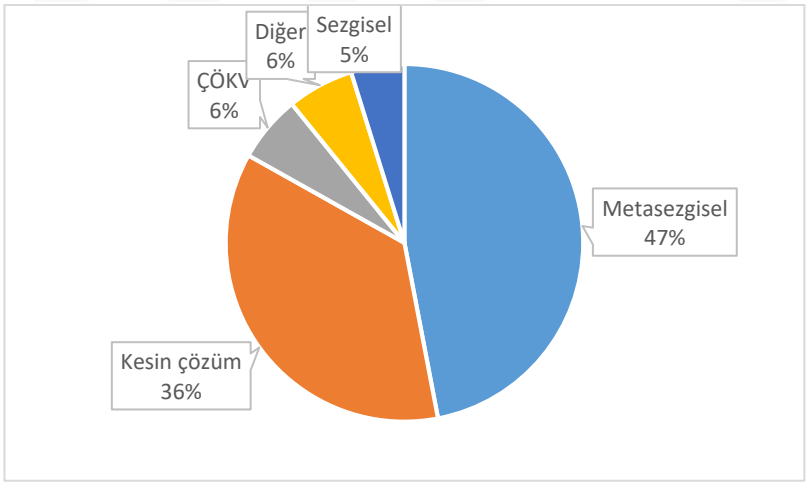
Demontaj hatlarında insan ve robotların yanısıra üçüncü tür işgören yapısı da insan ve robotların birlikte çalıştığı işbirlikçi robotlardır. Demontaj literatüründe bu konuda da sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Cheng vd. (2017) tarafından insan-robot işbirlikçi demontaj için imalat kabiliyet değerlendirme gösterge sistemi ve değerlendirme modelleri ortaya konmuştur. Renteria vd. (2019) ve Liu vd. (2019b) ise demontaj hücresinde insan-robot işbirliği üzerinde çalışmıştır. DHD literatüründe ise insan-robot işbirliği üzerine sadece Liu vd. (2019c) bildirisi tespit edilmiştir. Çalışmanın erişilebilen özetinde güvenliğin

sağlanması için kurulan üç amaçlı modelin geliştirilmiş kesikli arı algoritması ile çözüldüğü görülmektedir.

Görüleceği üzere RDHDP yeni ve az çalışılan bir problemdir. Özceylan vd. (2019) da çalışmasında RDHDP'nin hem problem tanımlama, hem matematiksel modelleme ve çözüm teknikleri açısından araştırılması gerektiğini ifade etmektedir. Ancak robotik demontajın çevresel faydaları, teknolojik uygunluğu ve ekonomik elverişliliği arasında ödünleşme değerlendirmesi konusunda sistematik bir yaklaşım eksikliği bulunmaktadır (Bogue, 2019).

3.3. Çözüm yöntemleri

Kombinatoryal bir eniyileme problemi olan DHD probleminin çözümü için önerilen çözüm yaklaşımları kesin çözüm yöntemleri ve metasezgiseller olmak üzere iki ana grupta incelenebilir (Kalaycı vd. 2015a). Şekil 3.3'te problemin çözümünde kullanılan yaklaşımlar görselleştirilmiştir.



Şekil 3.3. Çalışmaların kullanılan tekniklere göre sınıflandırması

Şekil 3.3'ten görüleceği üzere en çok kullanılan çözüm yöntemi metasezgisellerdir. DHDP çözümünde en çok kullanılan metasezgisel genetik algoritmadır. Genetik algoritmayı yapay arı kolonisi (ABC) algoritması izlemektedir (Gao vd. 2020). Metasezgiselleri kesin çözüm yaklaşımları izlemektedir. Bu anlamda da dal-sınır ve kesme düzlem yaklaşımları öne çıkmaktadır.

DHD problemi ekonomik, çevresel, teknik ve sosyal yönleri bulunan karmaşık bir karar alma problemidir (Avikal vd. 2014a). Problemin çok amaçlı yapısı nedeniyle bu alanda yapılan çalışmaların çoğunluğunun problemi çok amaçlı yapıda ele aldığı göze çarpmaktadır.

Çizelge 3.2'de literatürdeki çalışmalarda ele alınan amaçlar gösterilmiştir. Burada en çok kullanılan amaç fonksiyonunun iş istasyonunu sayısının en küçüklenmesi olduğu görülmektedir. Bu amacı atıl süreler arasındaki değişkenliğin en küçüklenmesi ve tehlikeli parçaların daha erken demonte edilmesi izlemektedir. En büyükleme şeklinde tanımlanan amaç fonksiyonları genellikle kar odaklı problem yapısında tanımlanmıştır. Geri dönüşüm maliyetinin en küçüklenmesi ve çevre dostu uygulamaların en büyüklenmesi gibi yeni eklenen amaçlar, problemin çevresel boyutuyla da uyumlu ve ilerleyen zamanda modellerde yerini alabileceği düşünülen amaçlardır. Örneğin Kaipu vd. (2019) enerji tüketiminin en küçüklenmesini amaç fonksiyonlarına dâhil etmişlerdir. RDHDP ortaya konması ile birlikte enerji tüketimi ve robot sayısının en küçüklenmesi gibi amaçlar da probleme dahil edilmiştir.

Çizelge 3.2. Amaç Fonksiyonlarına Göre Makalelerin Dağılımı

		Fang vd. 2020a	Fang vd. 2019	Pistolesi vd., 2018	Zhang vd., 2017	Xiao vd., 2017	Kannan vd., 2017	Liu ve Wang, 2017	Ren vd., 2017	Altekin, 2017
En küçükleme Yönlü	Toplam boş süre				√					
	Çevrim süresi	√								
	İstasyon sayısı			√	√	√		√		
	Her bir istasyondaki boş sürelerin benzer olması					√		√		
	Tehlikeli parçaların erken demonte edilmesi					√		√		
	Yüksek talebi olan parçaların erken demonte edilmesi					√		√		
	Yön değiştirme sayısı				√					
	Kolaylıkla ulaşılabilen parçaların erken demonte edilmesi									
	Geridönüşüm maliyeti									
	Enerji tüketimi	√								
	Robot sayısı		√							
	Maliyet				√		√			
En Büyükleme Yönlü	Kar			√					√	√
	Kaynaklardan yararlanma									
	Maliyet etkinliği									
	CO_2 kazanım oranı									
	Demontaj derinliği			√						
	Geridönüşüm oranı									

Çizelge 3.2. Amaç Fonksiyonlarına Göre Makalelerin Dağılımı (Devam)

		Ilgın vd., 2017	Seidi ve Saghari, 2016	Mete vd., 2016	Altekin vd., 2016	Kalaycı vd., 2016	Kalaycılar vd., 2016	Igarashi vd., 2016	Bentaha vd., 2015a	Riggs vd., 2015
En küçükleme Yönlü	Toplam boş süre		√			√				
	Çevrim süresi									
	İstasyon sayısı	√	√	√		√	√			√
	Her bir istasyondaki boş sürelerin benzer olması	√	√							
	Tehlikeli parçaların erken demonte edilmesi		√			√				
	Yüksek talebi olan parçaların erken demonte edilmesi		√			√				
	Yön değiştirme sayısı									
	Kolaylıkla ulaşılabilen parçaların erken demonte edilmesi									
	Geridönüşüm maliyeti							√		
	Enerji tüketimi									
	Robot sayısı									
	Maliyet									
En Büyükleme Yönlü	Kar				√				√	
	Kaynaklardan yararlanma									
	Maliyet etkinliği									
	CO_2 kazanım oranı							√		
	Demontaj derinliği									
	Geridönüşüm oranı							√		

Çizelge 3.2. Amaç Fonksiyonlarına Göre Makalelerin Dağılımı (Devam)

		Kalaycı vd., 2015a	Bentaha vd., 2015b	Hezer ve Kara, 2015	Kalaycı vd., 2015b	Bentaha vd., 2014	Tuncel vd., 2014	Özceylan ve Paksoy, 2014a	Kalaycı ve Gupta, 2014	Özceyan ve Paksoy, 2014b
En küçükleme Yönlü	Toplam boş süre	√			√					
	Çevrim süresi									
	İstasyon sayısı	√		√	√		√		√	
	Her bir istasyondaki boş sürelerin benzer olması						√		√	
	Tehlikeli parçaların erken demonte edilmesi	√	√		√		√		√	
	Yüksek talebi olan parçaların erken demonte edilmesi	√			√		√		√	
	Yön değiştirme sayısı									
	Kolaylıkla ulaşılabilen parçaların erken demonte edilmesi									
	Geridönüşüm maliyeti									
	Enerji tüketimi									
	Robot sayısı									
	Maliyet		√			√		√		√
En Büyükleme Yönlü	Kar									
	Kaynaklardan yararlanma									
	Maliyet etkinliği									
	CO_2 kazanım oranı									
	Demontaj derinliği									
	Geridönüşüm oranı									

Çizelge 3.2. Amaç Fonksiyonlarına Göre Makalelerin Dağılımı (Devam)

		Özceylan vd., 2014	Kalaycı ve Gupta, 2013b	Özceylan ve Paksoy, 2013	Paksoy vd., 2013	Kalaycı ve Gupta, 2013a	Altekin ve Akkan, 2012	McGovern ve Gupta, 2007b	Ding vd., 2010	Koc vd., 2009
En küçükleme Yönlü	Toplam boş süre				√	√	√			
	Çevrim süresi				√					
	İstasyon sayısı		√		√				√	
	Her bir istasyondaki boş sürelerin benzer olması		√			√	√		√	
	Tehlikeli parçaların erken demonte edilmesi		√			√				
	Yüksek talebi olan parçaların erken demonte edilmesi		√			√				
	Yön değiştirme sayısı									
	Kolaylıkla ulaşılabilen parçaların erken demonte edilmesi									
	Geridönüşüm maliyeti									
	Enerji tüketimi									
	Robot sayısı									
	Maliyet	√		√						√
En Büyükleme Yönlü	Kar							√		
	Kaynaklardan yararlanma									
	Maliyet etkinliği						√			
	CO_2 kazanım oranı									
	Demontaj derinliği									
	Geridönüşüm oranı									

Çizelge 3.2. Amaç Fonksiyonlarına Göre Makalelerin Dağılımı (Devam)

		Agrawal ve Tiwari, 2008	Altekin vd., 2008	Güngör ve Gupta, 2002	McGovern ve Gupta, 2007a	Tang ve Zhou, 2006	McGovern ve Gupta, 2006	McGovern ve Gupta, 2015	Gungor ve Gupta, 2001
En küçükleme Yönlü	Toplam boş süre	√		√	√	√	√	√	
	Çevrim süresi								
	İstasyon sayısı						√		√
	Her bir istasyondaki boş sürelerin benzer olması	√		√			√		
	Tehlikeli parçaların erken demonte edilmesi			√	√		√	√	
	Yüksek talebi olan parçaların erken demonte edilmesi			√	√		√	√	
	Yön değiştirme sayısı			√	√		√	√	
	Kolaylıkla ulaşılabilen parçaların erken demonte edilmesi							√	
	Geridönüşüm maliyeti								
	Enerji tüketimi								
	Robot sayısı								
	Maliyet								
En Büyükleme Yönlü	Kar		√						
	Kaynaklardan yararlanma	√							
	Maliyet etkinliği								
	CO_2 kazanım oranı								
	Demontaj derinliği								
	Geridönüşüm oranı								

3.4. Tez Çalışmasının Literatüre Katkısı

Literatür taraması sonucunda tespit edilen boşluktan hareketle bu tez kapsamında geliştirilen modelde işgörenlerin işçi, robot ve işbirlikçi robot olabildiği DHDİAP üzerinde çalışılmaktadır. Çalışmada yer alan işgücü tipleri; sadece insan, sadece robot ve insan-robot olarak heterojen bir yapıdadır. Bu üç farklı işgücünün görev zamanları ve birim işgücü maliyetleri de birbirinden farklıdır. Ayrıca işçiler de kendi içinde heterojen yapıdadır. DHD literatüründe insan ile birlikte hem robot hem işbirlikçi robotların kullanıldığı ve söz konusu işçilerin kendi içinde heterojen oldukları durum ilk kez incelenmektedir. Çalışmanın benzer çalışmalardan ayırıcı yönleri Çizelge 3.3'te yer almaktadır. Tablodan görüleceği üzere bu çalışma sadece problem yapısı yönüyle değil, aynı zamanda çok amaçlı yapısının çözüm yaklaşımı yönüyle de özgündür.

Model, maliyetin enküçüklenmesi ve işçiye yönelik tehlikenin enküçüklenmesi olmak üzere iki amaçtan oluşmaktadır. İlk amaçta yer alan maliyet, istasyon açma maliyeti ve işgören maliyetinin toplamından oluşmaktadır. DHD konusunda gerçekleştirilen ilk çalışmadan (Gungor ve Gupta, 2001) bugüne kadar problemi çok amaçlı olarak ele alan araştırmacılar genellikle tehlikeye ilişkin bir amaç tanımlamışlardır (Güngör ve Gupta, 2002; McGovern ve Gupta 2007a; Kalaycı ve Gupta, 2013a; Tuncel vd. 2014; Seidi ve Saghari, 2016; Xiao vd. 2017; Ren vd. 2018; Zhu vd. 2018; Li vd. 2019a). Söz konusu amaç fonksiyonunda öncelikle tehlikeli parçaların demonte edilmesi amaçlanmıştır. Ancak bu çalışmalarda bu tehlikenin işçiye yönelik etkisi incelenmemiştir.

DHDP'nin gerçek hayat uygulamalarını gözlemlemek amacıyla gerçekleştirilen teknik gezilerde bazı parçaların zararlı gaz salınımı gibi nedenlerle insan sağlığına zararlı olabileceği görülmüştür. Örneğin buzdolabı demontajında, demonte edilecek buzdolaplarının ikinci durağı gaz çekme makinesidir. Bu istasyonda herhangi bir işçi görev almamaktadır. Burada gazı alınan buzdolabı ilerleyerek üçüncü istasyona gelmektedir. Bu istasyonda da bir robot kolu yer almaktadır. Bir personel robot kolu ile birlikte çalışarak kompresörün demontajını gerçekleştirmektedir. Böylece ergonomik anlamda insana zarar verebilecek bir işte robot kolundan yararlanıldığı görülmüştür.

Çizelge 3.3. Çalışmanın Benzer Çalışmalardan Ayırıcı Yönleri

	DHD	**İşçi Atama**		**Otomasyon Düzeyi**		**Çok Amaçlı Yapı**	**Skalerleştirme Tekniği**		**ÇÖKV**
		Homojen	*Heterojen*	*Robot*	*İşbirlikçi Robot*		*Ağırlıklı Toplam*	*Epsilon Kısıt*	
Weckenborg 2020		√		√	√				
Fang 2020a Fang 2020b Fang 2020c	√			√		√		√	
Liu vd. 2020a	√			√		√	√		
Çil vd. 2020a		√		√					
Çil vd. 2020b	√			√					
Yılmaz ve Yazıcı, 2021	√		√			√		√	
Kökhan vd., 2020		√		√	√				
Liu vd. 2021	√		√						
Bu çalışma	√		√	√	√	√		√	√

Demirkol Akyol ve Baykasoğlu'nun (2019) çalışmasında da risk faktörleri belli bir eşik değerini geçen görevlerin ergonomik olarak insan sağlığına zarar verdiği ifade edilmektedir. Kazançoğlu ve Özkan-Özen (2020) ise gerçekleştirmiş oldukları Delphi analizi sonrasında insan güvenliği boyutu altında ergonomik riskler, kaza riskleri, kırılganlık ve elektrik kaçağını ele almaktadır. Özellikle elektronik atıklar tehlikeli parçalar (kurşun, cıva, kadmiyum, krom gibi ağır metaller, halojenleştirilmiş malzemeler, plastikler ve devre kartları gibi) içermekte ve bu durum insan için potansiyel risk içermektedir. Bu malzemeler yandığında dioksin ve furan, arsenik, asbest, nikel ve bakır artışına neden olabilir. Uluslararası Tehlikeli Malların Taşınması Raporu'nda (2012) risk faktörleri patlayıcı, toksik, yanıcı, bulaşıcı, radyoaktif, korozif, paslanma, beklenmeyen tutuşma olarak sıralamaktadır. Thais vd. (2017) demontajın çevresel risklerini fiziksel zararlar, kimyasal riskler, ergonomik riskler ve kaza riskleri olarak sınıflandırmıştır. Liqui-Cel Membrane Contactors Demontaj ve Montaj El Kitabı'nda (2015) temel risk ölçütleri patlama, çarpma veya etki, kaldırma ve taşıma zararları ve çevresel etkidir. Zhu vd. (2018) demontaj süreçlerindeki tehlike değerlendirme üzerine çalışmış ve tehlikeleri nesne çarpma zararları, mekanik mekanik zararlar, düşme, yangın, elektrik şoku, patlama, zehirlenme ve boğulma, araç kazaları olarak sıralamışlardır (Kazançoğlu ve Özkan-Özen, 2020). Ayrıca hat dengeleme problemlerinde sadece görev sürelerine odaklanılması belli işgörenlere işlerin atanmasında aşırı bir yüklemeye neden olur. Bu aşırı yüklenme de yorgunluk ve hat etkinliğinde düşüşe neden olur. Ayrıca kalite problemleri ve iş kaynaklı sakatlıklar da artar (Mutlu ve Özgörmüş, 2012).

Bu gözlemler ve literatürdeki bilgilerden hareketle her bir görevin işçiye yönelik iki tür tehlike içerebileceği öngörülmüştür. Birinci tür tehlike kaynağı gaz salınımında olduğu gibi hem manuel olarak çalışan işçiye hem de işbirlikçi robot ile çalışan işçiye yöneliktir. İkinci tür tehlike ise, görevin yapılışı esnasında oluşan yorgunluk gibi bireysel ergonomik risklerden kaynaklı işçiye yönelik tehlikedir. Bu riskin sadece manuel çalışan istasyonda ortaya çıktığı, işbirlikçi çalışma durumunda oluşmadığı varsayılmaktadır (Bkz. Çizelge 3.4). Her ne kadar robot ve işbirlikçi robot kullanımı maliyeti arttırsa da, işçiye yönelik tehlikenin azaltılması için önemli bir katkı sağlamaktadır.

Çizelge 3.4. İşçiye Yönelik Tehlike Türlerinin Tanımlanması

Tehlike kaynağı	**Robot**	**İşçi (Manuel)**	**İşbirlikçi robot**
Çevresel ergonomik risklerden kaynaklı tehlike		√	√
Bireysel ergonomik rislerden kaynaklı tehlike		√	

Geliştirilen çok amaçlı modelin çözümünde "epsilon kısıt yöntemi" kullanılmıştır. Çalışmanın diğer bir katkısı da karar vericiye destek sağlamak amacıyla bir yöntem geliştirilmesidir. Bu sistemde öncelikle karar verme ölçütleri belirlenmiştir. İdeal noktaya uzaklık ve etkinlik yüzdesi belirlenen ilk iki ölçüttür. Bu ölçütlerden üçüncüsü de çalışmanın doğasına uygun olarak özgün olarak geliştirilen "otomasyon oranı" ölçütüdür. Söz konusu ölçüt ağırlıklarının belirlenmesinde nesnel bir ağırlıklandırma yöntemi olan entropi ağırlıklandırma yöntemi kullanılmıştır. Son olarak genel kabul görmüş çok ölçütlü karar verme tekniklerinden TOPSIS ve PROMETHEE yöntemleri kullanılarak elde edilen çözümlerin sıralaması gerçekleştirilmiştir. Ayrıca duyarlılık analizi ile sıralama üzerinde ağırlıkların etkisi araştırılmıştır.

DHD probleminde çok amaçlı matematiksel modellerin herhangi bir skalerleştirme yaklaşımı ile çözülerek elde edilen Pareto en iyi çözümlerin ÇÖKV teknikleri kullanılarak sıralandığı iki çalışma Yang vd. (2019) ile Yuan vd. (2020) tarafından gerçekleştirilmiştir. Yang vd. (2019) elde ettikleri Pareto en iyi çözümün değerlendirilmesi ve en tatmin edici demontaj sırasını elde etmek için bulanık AHP kullanmışlardır. Yuan vd. (2020) ise baskın olmayan sıralama genetik algoritma yaklaşımı ile elde edilen Pareto en iyi çözümler VZA aracılığı ile sıralanmıştır.

RDHDP literatüründe ise ÇÖKV kullanımı araştırıldığında Liu vd. (2020d) çalışmasına ulaşılmıştır. Ancak bu çalışmada ANP, amaçların ağırlıklarının belirlenmesi amacıyla kullanılmıştır. Sonuç olarak RDHDP literatüründe epsilon kısıt yöntemi ile elde edilen Pareto en iyi çözümlerin ÇÖKV teknikleri ile sıralandığı bir çalışma ilk kez gerçekleştirilmiştir.

4. MATERYAL VE YÖNTEM

Çalışmada DHDP ile İAP'yi birlikte ele alan çok amaçlı bir matematiksel model geliştirilmiştir. Çok amaçlı matematiksel modelin çözümünde epsilon kısıt yöntemi kullanılmıştır. Epsilon kısıt yöntemiyle elde edilen çözümlerin sıralanmasında entropi tabanlı TOPSIS ve PROMETHEE yöntemleri ile ÇÖKV yaklaşımı geliştirmiştir. Bu bölümde kullanılan Çizelge 4.1'de kullanım amaçları ile birlikte yer alan yöntemlere ilişkin kuramsal bilgiye yer verilecektir.

Çizelge 4.1. Çalışma Kapsamında Kullanılan Yöntemler

Yöntem	**Kullanım Amacı**
Epsilon kısıt	İki amaçlı matematiksel modelin çözümü
Entropi	Ölçütlerin ağırlıklandırılması
TOPSIS ve PROMETHEE	Pareto en iyi seçeneklerin sıralanması
Tam Faktör Deney Tasarımı	Faktörlerin çözüm süresine etkisinin incelenmesi

4.1. Çok Amaçlı Tamsayılı Programlamaya İlişkin Temel Kavramlar

Çok amaçlı tamsayı programlama (ÇATP) problemlerinde söz konusu çelişen amaçlar nedeniyle çözüm kümesi, tek bir en iyi nokta yerine "en az bir amaç fonksiyonundan ödün vermeden başka bir amaç fonksiyonunda iyileştirme yapılması mümkün olmayan" *baskın noktalar* içerir. Çok amaçlı problemlerin büyüklüğünün artması ile birlikte hem baskın çözümü bulmak zorlaşır, hem de baskın nokta sayısı da üssel bir büyüme gösterir. Çok amaçlı problemlerin anlaşılması için bilinmesi gereken temel kavramlar şu şekildedir (Lokman, 2017):

p amaçlı en küçükleme yönlü bir tamsayı en iyileme problemi

enk (f_1 (x), ... , f_p (x))
k.a. $x \in \mathcal{X}$

şeklinde tanımlanmış olsun. Burada $\mathcal{X}$ uygun karar vektörü kümesini göstermektedir ve $\mathcal{Y} := f(\mathcal{X})$ bu kümenin amaç uzayındaki yansımasıdır.

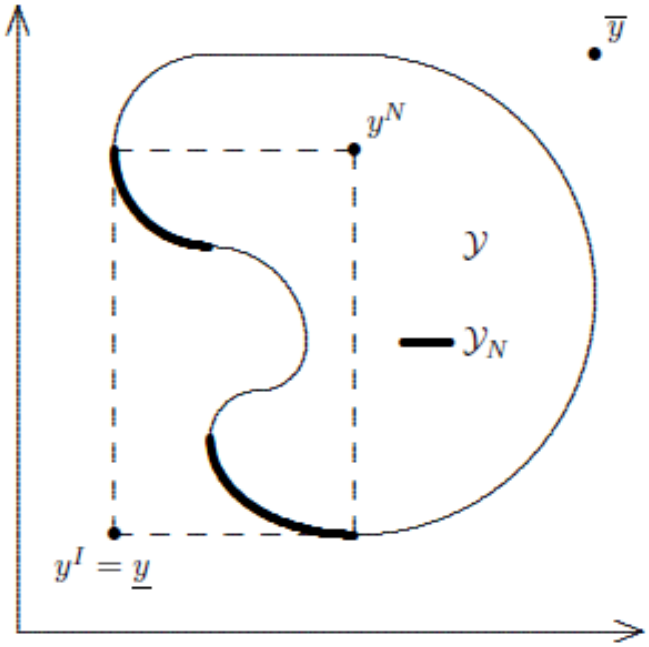
Tanım 1: $\hat{x} \in \mathcal{X}$ uygun çözümü eğer $f(x) \leq f(\hat{x})$ koşullarını sağlayan başka bir $x \in \mathcal{X}$ çözümü olmaması durumunda etkin veya Pareto en iyi olarak adlandırılır. $\hat{x}$ etkin çözüm ise $f(\hat{x})$ baskın noktadır (Ehrgott, 2005).

Tanım 2: $x^1, x^2 \in \mathcal{X}$ ve $f(x^1) \leq f(x^2)$ ise x^1, x^2 yi ve $f(x^1)$ de $f(x^2)$ yi baskılamaktadır. Tüm etkin çözümlerden oluşan $\hat{x} \in \mathcal{X}$ küme $\mathcal{X}_E$ olarak gösterilir ve *etkin küme* olarak adlandırılır. $\hat{x} \in \mathcal{X}$ iken tüm baskın noktalardan $\hat{y} = f(\hat{x}) \in \mathcal{Y}$ oluşan küme ise $\mathcal{Y}_N$ olarak gösterilir ve baskın küme olarak adlandırılır (Ehrgott, 2005).

Tanım 3: Her amaç fonksiyonunun alabileceği en iyi değerlerden oluşan nokta *ideal nokta* olarak adlandırılır. İdeal nokta $enk_{x \in \mathcal{X}}(f_1(x), \ldots . (f_p(x))$ problemi için ideal nokta $y^I = (y_1^I, \ldots\ldots, y_p^I))$ ile gösterilir ve $y_k^I = enk_{x \in X} f_k(x) = enk_{y \in \mathcal{Y}} y_k$ olarak ifade edilir (Ehrgott, 2005).

Tanım 4: Nadir nokta, $y^N = (y_1^N, \ldots\ldots, y_p^N)$ ile gösterilir ve $y_k^N = enb_{x \in \mathcal{X}_E} f_k(x) = enb_{y \in \mathcal{Y}_N} y_k$ olarak ifade edilir (Ehrgott, 2005).

Dışbükey olmayan bir problem için ideal ve nadir noktalar Şekil 4.1'de gösterilmektedir. Herhangi bir $y \in \mathcal{Y}_N$ için $y_k^I \leq y_k$ ve $y_k \leq y_k^N$ olacağı açık olduğu için etkin küme üzerinde sıkı alt ve üst sınırlar olacaktır.



Şekil 4.1. Etkin küme, İdeal ve Nadir Nokta (Ehrgott, 2005)

İdeal nokta kolaylıkla, sırasıyla her bir amaç fonksiyonunun en iyilendiği tek amaçlı problemlerin çözülerek bulunabilirken; nadir noktanın bulunması daha zordur. Bu amaçla geliştirilen algoritmalar bulunmaktadır (Lokman, 2017). İki amaçlı modellerde nadir noktanın bulunması için Ehrgott (2005) tarafından önerilen Algoritma 1'in kullanımı yaygındır. Söz konusu algoritmanın şu şekildedir:

Algoritma 1 (p=2 için nadir nokta):

Girdi: *$\mathcal{X}$ uygun küme ve f amaç fonksiyonu*

Tek amaçlı $enk_{x\in\mathcal{X}} f_1(x)$ ve $enk_{x\in\mathcal{X}} f_2(x)$ problemlerini çözün ve en iyi amaç değerlerini y_1^I ve y_2^I olarak göster

$enk_{x\in\mathcal{X}} f_2(x)$ problemini $f_1(x) \leq y_1^I$ ek kısıtı ile çöz

$enk_{x\in\mathcal{X}} f_1(x)$ problemini $f_2(x) \leq y_2^I$ ek kısıtı ile çöz

Amaç fonksiyonu değerlerini sırasıyla y_2^N vey_1^N olarak göster

Çıktı: *Nadir nokta $y^N = (y_1^N, y_2^N)$ ve ideal nokta $y^I = (y_1^I, y_2^I)$*

Bu algoritma uyarınca öncelikle bir amaç fonksiyonu en iyilenirken, diğer amaç fonksiyonuna ilişkin ideal değer modele kısıt olarak eklenir. Bu işlem her iki amaç için de gerçekleştirilir. Böylece bir amaç için en iyi değer korunurken, diğer amacın alabileceği eniyi değer tespit edilmiş olur.

ÇATP yöntemleri karar vericinin karar verme sürecine dâhil olduğu aşamaya göre önsel (apriori), etkileşimli ve sonsal (posteriori) yöntemler şeklinde üçe ayrılmaktadır (Hwang ve Masud, 1979'dan aktaran Floritos ve Mavrotas, 2014). Önsel yöntemlerde karar verici önceliklerini çözüm sürecinden önce belirler (amaçların belirlenmesi veya amaç fonsiyonlarının ağırlıklarının belirlenmesi). Bu yöntemlere yapılan eleştiri de karar vericinin tercihlerini hassas bir şekilde sayısallaştıramayacağı düşüncesidir. Etkileşimli yöntemlerde karar verici ile diyalog aşamaları birkaç ardıştırmadan sonra genellikle en çok tercih edilen çözüme yakınsar ancak hiçbir zaman resmin bütününü (Pareto kümesini) göremez. Dolayısıyla en çok tercih edlen çözüm karar vericinin o ana kadar karşılaştırdıkları arasından en iyisidir (Mavrotas, 2009).

Her ne kadar önsel yöntemler daha yaygın olsa da etkileşimli ve sonsal yöntemler karar vericiye daha fazla bilgi sağlar. Özellikle sonsal modeller karar vericiye son kararını vermeden önce nihai kararı konusunda desteklemek için bütün resmi (örn. Pareto küme) sağlarlar. Çözüm süreci iki aşamadan oluşmaktadır. Öncelikle etkin çözümler türetilir ve ikinci aşamada karar verici sürece dâhil edilir ve olası seçenekler arasından tercihte bulunur. Tüm potansiyel sonuçların türetilmiş olması, karar vericinin son kararı üzerinde güven duymasını sağlar. Buna rağmen sonsal yöntemler hesaplama çabalarının fazlalığı ve uygun yazılım eksikliği nedeniyle daha az yaygındır. Küçük ve orta boyutta özel tür ÇATP problemleri (genellikle doğrusal

problemler) için tüm etkin seti üretebilen yöntemler bulunmaktadır. Genellikle en fazla kullanılan sonsal yöntemler ağırlıklandırma ve epsilon kısıt yöntemleridir (Mavrotas, 2009).

Söz konusu tüm baskın noktaları veya bir kısmını bulmak için önerilen birçok yöntemden ilki ve en çok kullanılanı, amaç fonksiyonlarının pozitif ağırlıklandırılarak çok amaçlı eniyileme probleminin tek amaçlı eniyileme problemine dönüştürülmesidir. Bu yöntemde, farklı pozitif ağırlıklar kullanılarak bulunabilen noktalar, "*destekli baskın nokta"* olarak adlandırılır. Ancak *ağırlıklandırma yöntemi* ile bulunması mümkün olmayan "*desteksiz baskın noktalar"* da mevcuttur (Lokman, 2017).

4.2. Epsilon Kısıt Yöntemi

*Epsilon-kısıt yöntemi b*askın noktaların bulunması için uygulanan bir yöntemdir. Bu yöntemin temel felsefesi, amaç fonksiyonlarından biri dışında diğerlerinin kısıtlara eklenmesidir. Bu yöntemde amaç fonksiyonunda tek bir amacın yer alması, baskın olmayan "zayıf baskın noktalar" bulunmasına neden olabileceği için epsilon kısıt yöntemi de geliştirilmiştir (Lokman, 2017).

İzleyen çok amaçlı programlama modelinde x karar değişkenleri vektörü, $f_1(x), f_2(x), \ldots . f_p(x)$ p sayıda amaç fonksiyonu ve $\mathcal{X}$ uygun çözüm alanı olsun.

$$\text{enk } (f_1(x), f_2(x), \ldots . f_p(x)) \tag{4.1}$$

k.a.

$$x \in \mathcal{X} \tag{4.2}$$

Epsilon kısıt yönteminde (4.1) de yer alan amaç fonksiyonlarından biri amaç fonksiyonunda kalırken (4.3) diğer amaç fonksiyonları ilave kısıtlara (4.4-4.5) dönüştürülmektedir (Mavrotas, 2009). İlave kısıtların sağ tarafında yer alan epsilon değerleri her bir ardıştırmada çözüm uzayını tarayacak şekilde arttırılır (Şimşek, 2018).

$$enk\ f_1(x) \tag{4.3}$$

k.a.

$$f_2(x) \leq \varepsilon_2 \tag{4.4}$$

$$f_3(x) \leq \varepsilon_3 \tag{4.5}$$

...

$$f_p(x) \leq \varepsilon_p \tag{4.6}$$

$$x \in \mathcal{X} \tag{4.7}$$

Epsilon kısıt yöntemi ağırlıklandırma yöntemi ile kıyaslandığında birtakım avantajlara sahiptir. Doğrusal problemlerde ağırlıklandırma yöntemi sadece etkin uç noktaları bulabilmektedir. Bu nedenle de birçok ağırlık kombinasyonu aynı uç noktayı bulur ve gereksiz sayıda çözüm gerçekleştirilir. Epsilon kısıt yöntemi ise uç olmayan etkin çözümleri de üretebilmektedir ve genellikle farklı çözümler üretir. Böylece etkin küme daha zengin hale gelir. Ağırlıklandırma yöntemi çok amaçlı tamsayılı ve karma tamsayılı programlama modelleri için desteklenmemiş etkin çözümleri üretemezken, epsilon kısıt yönteminde bu tehlike yoktur. Ağırlıklandırma yönteminde amaç fonksiyonlarının ölçeklendirmesi elde edilen sonuç üzerinde güçlü bir etkiye sahip olduğu için ağırlıklandırılmış toplam elde edilmeden önce amaç fonksiyonlarının ortak bir ölçeğe dönüştürülmesi gerekirken epsilon kısıt yönteminde böyle bir gereksinim yoktur. Epsilon kısıt yönteminin diğer bir avantajı da elde edilen etkin çözüm sayısını kontrol edebilmektedir (Mavrotas, 2009).

4.3. Çok Amaçlı Problemlerde Karar Vericiye Yardımcı Yöntemler

Çok amaçlı problemlerin eniyileme ve karar destek olmak üzere iki yönü vardır. Herhangi bir bilgi olmadığında türetilen Pareto en iyi çözümlerden hangisinin diğerlerinden daha iyi olduğu bilinemez. Genellikle, karar vericinin en çok tercih edilen çözümü bulması için ilave tercih bilgisini sağlaması gerekir (Şimşek, 2018). Karar verici, Pareto en iyi çözümler arasından seçilecek çözüm için tercihlerini ifade ederek karar verme sürecine dâhil olur. Bu nedenle çok amaçlı en iyileme yöntemleri en iyileme ve karar desteği birleştirmektedir (Floritos ve Mavrotas 2014).

Şimşek (2018) epsilon kısıt yöntemi uyguladıktan sonra karar vericinin çözümler arasında en iyi beş çözümü seçmesine dayalı etkileşimli bir yaklaşım kullanmıştır. He ve ark.

(2020b) epsilon kısıt yöntemi ile elde ettikleri Pareto en iyi çözümler içerisinden karar vericinin hangi çözümü tercih etmesine ilişkin önerdikleri yaklaşımda amaç fonksiyonunda kalan amacın ideal ve nadir noktalarından hareketle bir normalleştirme işlemi gerçekleştirmiş, bu değeri bulanık üyelik fonksiyonu olarak kullanmışlardır. Daha sonra da her iki amacı belirledikleri ağırlıklar üzerinden ağırlıklı toplamlarını almışlardır.

Elde edilen çözümlerin sıralanması için bu çalışmada RDHDP literatüründe ilk kez entropi ağırlıklandırmaya dayalı TOPSIS ve PROMETHEE çok ölçütlü karar verme teknikleri kullanılmıştır.

4.3.1. Entropi yöntemi

Shannon entropi, bilgideki belirsizliğin bir ölçütüdür (Shannon, 1948). Bilgi teorisindeki bu kavram, çok ölçütlü karar verme alanında uzmanlardan alınan bilgiler sonucunda öznel olan teknikler yerine ölçütlerin ağırlıklarının karar matrisindeki değerlerden hareketle nesnel bir şekilde belirlenmesinde kullanılmaktadır. Bu yönteme göre dağılım değeri büyük olan ölçüt daha önemli kabul edilmektedir (Karami, 2014; Singh vd. 2020). Bu çalışmada da belirlenen ölçütlerin tümünün niceliksel olması nedeniyle entropi yöntemi tercih edilmiştir. Entropi yöntemi dört adımdan oluşmaktadır.

Değişik birim ve ölçeklerden kaynaklı sapmaların yok edilmesi için ilk adım normalleştirme adımıdır. Normalleştirme için kullanılan Denklem (4.8) de p_{ij}, i. seçeneğin j. ölçütünün normalleştirilmiş değerini ifade etmektedir. m seçenek sayısını göstermektedir.

$$p_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^{m} x_{ij}} \tag{4.8}$$

İkinci adımda (4.9) denklemi ile her bir ölçüte ait entropi değeri (e_j) hesaplanmaktadır.

$$e_j = -\frac{1}{lnm}\left(\sum_{i=1}^{m} p_{ij} lnp_{ij}\right) \tag{4.9}$$

Üçüncü adım her bir ölçütün dağılım değerinin (d_j) hesaplanması içindir.

$$d_j = \left|1 - e_j\right| \tag{4.10}$$

Dördüncü ve son adımda ise her bir ölçütün ağırlığı (w_j) Denklem (4.11) aracılığıyla hesaplanır.

$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{i=1}^{m} d_j} \tag{4.11}$$

4.3.2. TOPSIS yöntemi

Technique for Order Performance by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) Hwang ve Yoon (1981) tarafından geliştirilen en bilinen ÇÖKV tekniklerinden birisidir. Hem ideal hem de anti-ideal çözümleri dikkate alması, basit ve kolay uygulanabilir olması nedeniyle kullanımı çok yaygındır (Mohammed vd. 2019). Bu nedenle bu çalışmada da TOPSIS yönteminin kullanılmasına karar verilmiştir.

TOPSIS yöntemi beş adımdan oluşmaktadır (Behzadian vd. 2012). İlk adım Denklem (4.12) aracılığıyla normalleştirilmiş karar matrisinin oluşturulması ile başlamaktadır. Azadfallah (2017), geleneksel normalizasyon haricinde Juttler – Korth, doğrusal olmayan, logaritmik vb. diğer normalleştirme yaklaşımlarının sıralama üzerine etkisini incelediği çalışmalarında herhangi bir farklılık olmadığını ortaya koymuştur. Chakraborty ve Yeh (2009) de TOPSIS için farklı normalleştirme süreçleri için gerçekleştirdiği benzetim çalışması sonucunda vektör normalizasyonunun kullanımını tavsiye etmektedir. Buradan hareketle geleneksel TOPSIS yaklaşımındaki vektör normalizasyonu kullanılmıştır.

$$p_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\left(\sum x_{ij}^2\right)}} \tag{4.12}$$

Daha sonra elde edilen matris, ölçüt ağırlıkları ile çarpılarak ağırlıklandırılmış normalleştirilmiş matrise dönüştürülür.

$$v_{ij} = w_j p_{ij} \tag{4.13}$$

Seçenekler içerisinde söz konusu ölçüte göre en iyi çözüm olan İdeal (A^*) ve en kötü çözüm olan negatif ideal (A') çözümler sırasıyla izleyen (4.14a) ve (4.14b) denklemleri

yardımıyla hesaplanır. Bu noktada ölçütlerin yönü önem kazanır. Zira maliyet (en küçükleme) yönlü ölçütleri için (J') en küçük değer ideal iken, kar (en büyükleme) yönlü ölçütler (J) için en büyük değer idealdir. Aynı mantık negatif ideal çözümler için de geçerlidir.

$$A^* = \{v_1^*, \dots\dots, v_n^*\} \qquad v_i^* = \{\max(v_{ij})\ if\ j\ \in J; \min(v_{ij})\ if\ j\ \in J'\} \tag{4.14a}$$

$$A' = \{v_1', \dots\dots, v_n'\} \qquad v_i' = \{\min(v_{ij})\ if\ j\ \in J; \max(v_{ij})\ if\ j\ \in J'\} \tag{4.14b}$$

Dördüncü adım her bir seçenek için ayrım ölçümlerinin hesaplanmasını içerir. Bu ölçümler de sırasıyla Denklem (4.15a) ve (4.15b) den hareketle hesaplanır.

$$D_i^* = \left[\sum \left(v_i^* - v_{ij}\right)^2\right]^{1/2} \quad i = 1, \dots\dots, m \tag{4.15a}$$

$$D_i' = \left[\sum \left(v_j^* - v_{ij}\right)^2\right]^{1/2} \quad i = 1, \dots\dots, m \tag{4.15b}$$

Beşinci ve son adım ise ideal çözüme göreli yakınlık değerinin (C_i^*) Denklem (4.16) aracılığı ile hesaplanmasıdır. Bu değer 0-1 arasında değer alır ve 1'e en yakın seçenek en iyidir.

$$C_i^* = \frac{D_i^*}{D_i^* + D_i'} \tag{4.16}$$

4.3.3. PROMETHEE yöntemi

ÇÖKV tekniklerinden biri olan PROMETHEE (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations), 1982 yılında Brans tarafından ortaya konmuş, 1985 yılında ise Brans ve Vincke tarafından geliştirilmiş seçim ve sıralamada kullanılan bir yöntemdir. PROMETHEE yöntemini diğer ÇÖKV yöntemlerinden ayıran özellik, seçeneklerin her bir ölçüte göre ikili karşılaştırılmasında, ölçütlerin özelliklerine uygun bir tercih fonksiyonunun kullanılmasına imkân sağlamasıdır. Söz konusu tercih fonksiyonları olağan, U Tipi, V Tipi, seviyeli, doğrusal ve Gaussian olmak üzere altı şekilde olabilmektedir (Brans ve Vincke, 1985). Tercih fonksiyonlarının belirlenmesinde tercih parametreleri ile fonksiyonların tercih ölçütü oluşturma özellikleri dikkate alınarak daha rasyonel temellere dayanan ve gerçek yaşama uygun kararlar alınabilmesi mümkün olabilmektedir (Paksoy, 2017). PROMETHEE hem akademisyen hem de uygulamacılar tarafından geniş kabul görmüş bir yöntemdir. İmalat

ve montaj hattı dengeleme yazınında da kullanılmıştır. Ayrıca Dağdeviren (2008) ile Opricovic ve Tzeng (2007) tarafından TOPSIS ile birlikte de kullanılmıştır (Behzadian vd. 2010).

PROMETHEE, beş adımdan oluşmaktadır (Brans ve Vincke, 1985; Behzadian vd., 2010; Dağ ve Yıldırım, 2018). $A = (a, b, \dots n)$, mümkün seçeneklerin sonlu kümesi, j ölçüt indeksi ve w_j her bir ölçütün ağırlığını göstermektedir.

İlk adım sapmaların belirlenmesi adımıdır. $g_j(a)$, a seçeneğinin herhangi bir j ölçütü için tercih fonksiyonu olsun. a ve b seçeneklerinin herhangi bir j ölçütü için aldığı değerler arasındaki fark Denklem (4.17) ile ifade edilir.

$$d_j(a,b) = g_j(a) - g_j(b) \tag{4.17}$$

Tercih fonksiyonu ikinci adımda uygulanmaktadır. $P_j(a,b)$, a ve b seçeneklerinin herhangi bir j ölçütü için tercih fonksiyonunu ve F_j, $g_j(a)$ ve $g_j(b)$ arasında gözlemlenen sapmanın azalmayan bir fonksiyonunu göstermekte olsun. Bu durumda tercih fonksiyonu en büyükleme yönlü ölçütler için Denklem (4.18a) ile, en küçükleme yönlü ölçütler için ise Denklem (4.18b) ile ifade edilir.

$$P_j(a,b) = F_j\left[d_j(a,b)\right] \quad \forall\, a,b \in A \tag{4.18a}$$

$$P_j(a,b) = F_j\left[-d_j(a,b)\right] \quad \forall\, a,b \in A \tag{4.18b}$$

Üçüncü adım tercih indekslerinin belirlenmesi adımıdır. $\pi(a,b)$ tüm ölçütler için a ölçütünün b ölçütüne tercih edilme derecesini gösterirken, $\pi(b,a)$ b ölçütünün a ölçütüne tercih edilme derecesini göstermekte iken sırasıyla Denklem (4.19a) ve Denklem (4.19b) aracılığıyla hesaplanır.

$$\pi(a,b) = \sum_j P_j(a,b) w_j \tag{4.19a}$$

$$\pi(b,a) = \sum_j P_j(b,a) w_j \tag{4.19b}$$

PROMETHEE yönteminde PROMETHEE-I ile kısmi sıralama, PROMETHEE-II ile de tam sıralama elde edilmektedir. Dördüncü adımda PROMETHEE I ile seçeneklerin kısmi

sırasının elde edilmesi gerçekleştirilmektedir. Seçeneklerin arasında sıralama yapılması için her bir seçenek için pozitif ($\emptyset^+(a)$) ve negatif ($\emptyset^-(a)$) üstünlük akımları *x* a seçeneği dışındaki her bir seçeneği $(b, c, d \ldots . n)$ göstermek üzere Denklem (4.20a) ve Denklem (4.20b) ile hesaplanır.

$$\emptyset^+(a) = \frac{1}{n-1}\sum_{x \epsilon A} \pi(a, x) \tag{4.19a}$$

$$\emptyset^-(a) = \frac{1}{n-1}\sum_{x \epsilon A} \pi(x, a) \tag{4.19b}$$

$\emptyset^+(a)$, a seçeneğinin A'daki mevcut diğer seçeneklere nasıl üstün geldiğinin bir göstergesi olduğu için daha yüksek değer alması, daha iyi bir seçenek olduğunu göstermektedir. Diğer taraftan $\emptyset^-(a)$, a seçeneğinin A'daki mevcut diğer seçenekler tarafından nasıl bastırıldığının göstergesidir. Bu nedenle iyi seçimlerin negatif üstünlük değerlerinin daha küçük olması beklenir.

Son adımda ise PROMETHEE II ile seçeneklerin tam sırası elde edilmektedir. $\emptyset\ (a)$ her bir seçeneğin net üstünlük değerini göstermek üzere net üstünlük akımları Denklem (4.20) ile hesaplanmaktadır.

$$\emptyset\ (a) = \emptyset^+(a) - \ \emptyset^-(a) \tag{4.20}$$

5. ROBOT, İŞBİRLİKÇİ ROBOT VE HETEROJEN İŞÇİ VARLIĞINDA DEMONTAJ HATTI DENGELEME VE İŞGÖREN ATAMA PROBLEMİ

Bu çalışma kapsamında DHDİAP birlikte ele alınmaktadır. Ele alınan problemde *H* işgören birbirleri ile *VE/VEYA öncül* öncelik ilişkisi ile bağlı *N* adet görevin yerine getirilmesi için çalışmaktadır. Söz konusu işgörenler robotlar, heterojen işçiler ve işbirlikçi robotlar şeklindedir. Robotlar bazı görevleri gerçekleştiremezken, işçi ve işbirlikçi robotlar her işi farklı görev sürelerinde gerçekleştirme kabiliyetine sahiptir. Her işgören türünün maliyeti farklıdır. En yüksek maliyetli işgören türü robotlar iken, en düşük maliyetli işgören türü işçilerdir. Ancak en maliyetli işgören türü olan robotların kullanılması durumunda işçiye yönelik bir tehlike oluşmamaktadır. İşçiye yönelik tehlike iki türlü oluşabilmektedir. Birinci tür tehlike zehirli gaz salınımı gibi çevresel ergonomik risk nedeniyle oluşmaktadır. İşçiler ister manuel, ister işbirlikçi robotlarla birlikte çalışsınlar, bu tehlikeye maruz kalmaktadırlar. İkinci tür tehlike ise işin yapısına bağlı olarak yorgunluk gibi bireysel ergonomik riskten kaynaklanmaktadır. İşbirlikçi robotlarla çalışılması durumunda işçiye yönelik böyle bir tehlikenin oluşmadığı varsayılmaktadır. Böylelikle robot ve işbirlikçi robotların kullanımı ile maliyet artışı gerçekleşmekle birlikte ergonomik yarar artmaktadır. Bu çalışma kapsamında birbiri ile çelişen iki amacın eş zamanlı olarak en iyilenmesi amaçlanmaktadır. Çalışmanın çerçevesi Şekil 5.1'de akış şeması halinde görselleştirilmiştir.

5.1. Matematiksel Modelin Kurulması

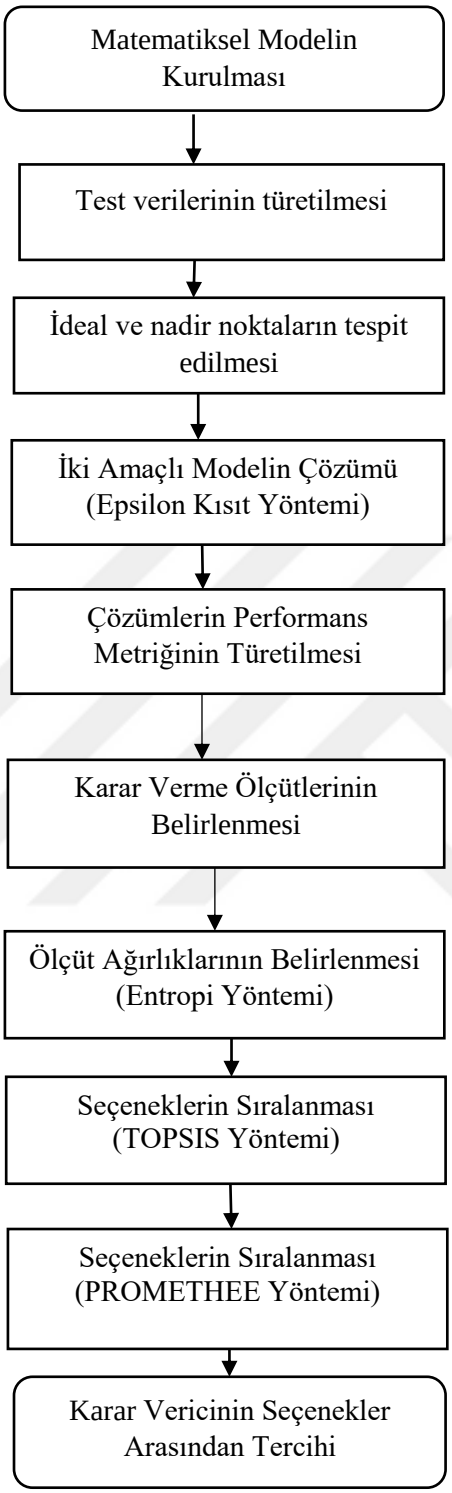
Şekil 5.1'den görüleceği üzere çalışmanın ilk adımı matematiksel modelin kurulmasıdır. Modelin ilk amacı istasyon açma ve işgören maliyet toplamının en küçüklenmesi olarak belirlenmiştir. İkinci amaç ise işçiye yönelik tehlikenin en küçüklenmesi şeklinde özgün bir şekilde tanımlanmıştır. Çizelge 5.1'de ise modelde yer alan indis, parametre ve karar değişkenlerine yer verilmiştir.

Matematiksel model McGovern ve Gupta (2005), Zhang vd. (2017), Miralles vd. (2008), Sungur ve Yavuz (2015) ve Kökhan (2020) modellerinden yararlanılarak izleyen şekilde tanımlanmıştır. Problemin varsayımları izleyen şekilde ifade edilmiştir.

Varsayımlar

- Demontaj hattında tek bir modelin demontajı gerçekleştirilmektedir.
- Demontajı yapılacak üründen yeterince vardır ve içinde tüm parçaları tamdır.
- Her bir parçaya olan talep sınırsızdır.
- Hat yerleşimi doğrusaldır, paralel istasyonlara izin verilmemektedir.
- Çevrim süresi bilinmektedir ve sabittir.
- Öncelik ilişkileri bilinmektedir. Öncelik diyagramında sadece *VE* ile *VEYA öncül* tipi öncelik ilişkisi bulunmaktadır.
- Görev süreleri görevlerin sıralamasına bağlı değildir. Robotların işlem süreleri sabit iken, işçilerin işlem süresi yeteneklerine göre değişkendir.
- İşgörenler işletmenin sahip olduğu işgören havuzundan seçilecektir.
- Her istasyona sadece işçi, sadece robot veya işçi ve işbirlikçi robot birlikte atanabilir.
- Robotların yapabileceği işler sınırlıdır.
- İşbirlikçi çalışma biçiminde işçi ve robot, eş zamanlı olarak çalışmaktadır.
- Her işçi her işi yapabilmektedir ancak yetenek seviyelerine göre görev süreleri değişkenlik göstermektedir. İşçiler yetenekli olduğu görevi daha kısa sürede gerçekleştirmektedir.
- Yetenek seviyeleri her bir görev için değişkenlik göstermektedir. Bir görevde çok yetenekli olan bir işçi başka bir işte az yetenekli olabilir.
- İşçi yeteneklerinin sabit olduğu varsayılmaktadır. Yani öğrenme ve unutma dikkate alınmamıştır.

Şekil 5.1. Çalışmanın Çerçevesi



Çizelge 5.1. Modelde Yer Alan İndis, Parametre ve Karar Değişkenleri

	İndisler
i,j	Görev kümesinin elemanları $i,j \in \{1,2,\ldots..,N\}$
h	İşgören kümesinin elemanları $h \in \{1,2,\ldots..,H\}$
s	İstasyon kümesinin elemanları $s \in \{1,2,\ldots..,S\}$
	Parametreler
N	Görev sayısı
H	İşgören (robot, işçi ve işbirlikçi robot toplam) sayısı
S	İstasyon sayısı
$PAND\,(i,j)$	j. görev için *VE* öncelik matrisindeki görevler kümesi
$POR\,(i,j)$	j. görev için *VEYA öncül* öncelik matrisindeki görevler kümesi
C	Çevrim süresi
t_{ih}	h işgöreninin i. görevi gerçekleştirme süresi
b_{ih}	i. görevin h işgörenine yönelik oluşturduğu tehlike
m_h	h işgöreninin birim maliyeti katsayısı
α	İstasyon açma maliyeti katsayısı
	Karar Değişkenleri
g_s	s. istasyon açıldı ise 1; diğer durumda 0
y_{hs}	h. işgören s. istasyona atandı ise 1; diğer durumda 0
x_{ihs}	i. görev h. işgören tarafından s. istasyona atandı ise 1; diğer durumda 0

Matematiksel Model

Amaç fonksiyonları

$$\text{Min } f_1 = \sum_{i\in N}\sum_{h\in H}\sum_{s\in S} m_h t_{ih} x_{ihs} + \sum_{s\in S} \alpha g_s \tag{5.1}$$

$$Min\ f_2 = \sum_{h\in H}\sum_{i\in N}\sum_{s\in S} b_{ih}\, x_{ihs} \tag{5.2}$$

Kısıtları Altında

$$\sum_{h\in H}\sum_{s\in S} x_{ihs} = 1 \qquad \forall\, i \in N \tag{5.3}$$

$$\sum_{i\in N} x_{ihs} \le N\, y_{hs} \qquad \forall\, h \in \{1,2,\dots..,H\}, \forall\, s \in \{1,2,\dots..,S\} \tag{5.4}$$

$$\sum_{s\in S} y_{hs} \le 1 \qquad \forall\, h \in \{1,2,\dots..,H\} \tag{5.5}$$

$$\sum_{h\in H} y_{hs} = g_s \qquad \forall\, s \in \{1,2,\dots..,S\} \tag{5.6}$$

$$\sum_{h\in H} s\, x_{ihs} \le \sum_{h\in H}\sum_{s\in S} s\, x_{jhs} \qquad \forall\,(i,j) \in PAND\ (i,j), i,j \in \{1,2,\dots..,N\} \tag{5.7}$$

$$\sum_{h\in H} s\, x_{ihs} \le \sum_{h\in H}\sum_{s\in S} s\, x_{jhs}\ \forall\,(i,j) \in POR(i,j), i,j \in \{1,2,\dots..,N\} \tag{5.8}$$

$$\sum_{h\in H}\sum_{i\in N} t_{ih}\, x_{ihs} \le g_s\, C \qquad \forall s \in \{1,2,\dots..,S\} \tag{5.9}$$

$$g_{s+1} \le g_s \qquad \forall\, s \in \{1,2,\dots..,S\} \tag{5.10}$$

$$g_s \in [0,1] \qquad \forall\, s \in \{1,2,\dots..,S\} \tag{5.11}$$

$$Y_{hs} \in [0,1] \qquad \forall\, h \in \{1,2,\dots..,H\}, \forall s \in \{1,2,\dots..,S\} \tag{5.12}$$

$$X_{ihs} \in [0,1] \quad \forall\, i \in \{1,2,\dots..,N\}, \forall\, h \in \{1,2,\dots..,H\}, \forall s \in \{1,2,\dots..,S\} \tag{5.13}$$

İlk amaç (5.1) toplam maliyetin, ikinci amaç (5.2) ise ergonomik yararın enbüyüklenmesi amacıyla işçiye yönelik tehlikenin en küçüklenmesidir. (5.3) numaralı kısıt her görevin bir istasyona ve bir işgörene atanmasını sağlarken; bir görevin söz konusu istasyona ve işgörene atanabilmesi için, söz konusu işgörenin ilgili istasyona atanması gerekliliği (5.4) numaralı kısıt ile tanımlanmıştır. (5.5) numaralı kısıt her işgörenin en fazla bir istasyona atanabilmesini mümkün kılmaktadır. Diğer taraftan (5.6) numaralı kısıt ile açılan her istasyonda sadece bir işgören olması garanti altına alınmaktadır. (5.7) ve (5.8) numaralı kısıtlar sırasıyla *VE* ile *VEYA öncül* (*POR*) öncüllük ilişkilerini sağlamaktadır. Açılan istasyona atanacak işlerin sürelerinin toplamının, çevrim süresini aşmaması (5.9) numaralı kısıtta tanımlanmıştır. Modele ayrıca istasyonların sıra ile açılmasını sağlamak üzere (5.10) numaralı kısıt ilave edilmiştir. Karar değişkenlerine ait işaret değişken kısıtları (5.11)-(5.13) ile ifade edilmiştir.

Modelin karmaşıklığını arttırmamak amacıyla robot, işçi ve işbirlikçi robotlar için ayrı karar değişkenleri tanımlanmamıştır. Buradan hareketle karar değişkeni $S + HS + NHS$ adettir. İzleyen tabloda kısıtlara ilişkin karmaşıklık analizi yer almaktadır. Burada (4.7) numaralı denklemin boyutu *PAND* (*i*) *PAND* (*i*) iken üst sınırı *N* (*N-1*) / 2' dir (İmat, 2014). (8) numaralı denklem için üst sınır ise *kN* (*N-1*) / 2 haline gelmektedir. Buradan hareketle modelin kısıtlarla ilgili toplam boyutu ayrıntıları Çizelge 5.2'de görüleceği üzere $N(1\text{-}k) + N^2(1+k)+H(S+1)+3S$ ile ifade edilebilir.

Çizelge 5.2. Modelin Kısıt Karmaşıklığı

Kısıt Kümesi	**Sayı**
3	N
4	HS
5	H
6	S
7	$N(N\text{-}1)/2$
8	$k\,N\,(N\text{-}1\,)/2$
9	S
10	S
TOPLAM	$N(1\text{-}k) + N^2(1+k)+ H(S+1) + 3\,S$

5.2. Epsilon Kısıt Matematiksel Modelinin Türetilmesi

Bu çalışmada çok amaçlı matematiksel programlamada Pareto en iyi çözümlerin türetilmesi için epsilon kısıt yöntemi uygulanmıştır. İki amaçlı matematiksel modelde yer alan ilk amaç (demontaj maliyetinini en küçüklenmesi), epsilon kısıt modelinin amaç fonksiyonunda (5.14) bulunmaktadır. İkinci amaç (işçiye yönelik tehlikenin en küçüklenmesi) ise epsilon kısıt modeline ilave kısıt (5.15) olarak eklenmiştir. Ele alınan problemin ε-kısıt yöntemi ile skalerleştirilmiş modeli aşağıda verilmiştir

$$\text{Min } f_1 = \sum_{i\in N}\sum_{h\in H}\sum_{s\in S} m_h t_{ih} X_{ihs} + \sum_{s\in S} \alpha g_s \qquad (5.14)$$

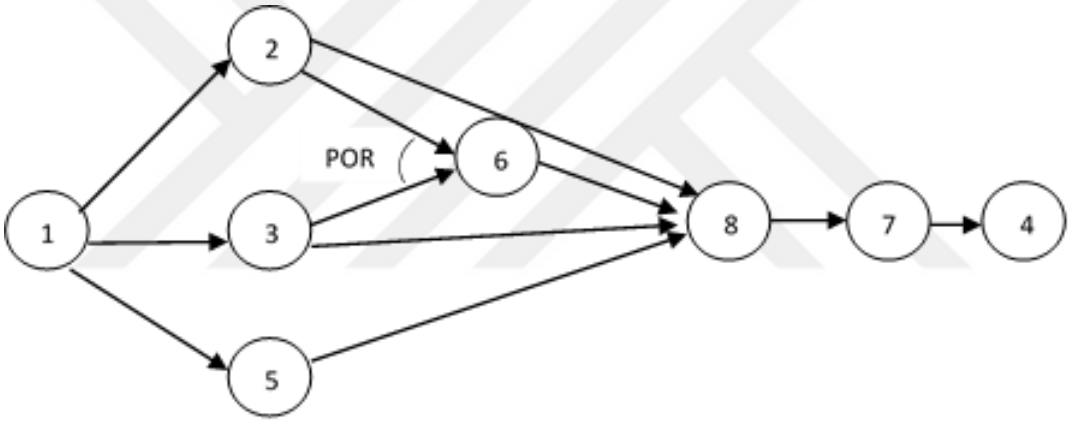
(5.3) - (5.13)

$$\sum_{h\in H}\sum_{i\in N}\sum_{s\in S} b_{ih}\, x_{ihs} \;\leq\; \varepsilon \qquad (5.15)$$

ε değerinin belirlenmesi için sırasıyla ideal ve nadir noktaların hesaplanması gerekmektedir. İdeal noktaların belirlenmesi için her bir amaç fonksiyonun tek başına en iyilendiği değerleri bulmak yeterli olurken, nadir noktaların belirlenmesi zordur. Nadir noktaların belirlenmesinde Bölüm 4.1'de ayrıntıları verilen Ehrgott (2005) tarafından iki amaçlı modeller için önerilen algoritma kullanılmıştır.

5.3. Örnek Problem

Geliştirilen model, Göksoy (2010) çalışmasında yer alan Şekil 5.2'de gösterilen öncelik diyagramına sahip küçük bir örnek problem kullanılarak sınanmıştır.



Şekil 5.2. 8 Görevli Demontaj İşlemine Ait Öncelik Diyagramı

Bu modelde *VE* ve *VEYA öncül* öncelik ilişkileri bulunan ve Çizelge 5.3'te açıklamaları ve süreleri verilen toplam sekiz adet görev yer almaktadır.

Çevrim süresi 35 s ve başlangıç istasyon sayısı 4 olarak belirlenmiştir. İki robot (h_1, h_2), beş işçi (h_3, h_5, h_7, h_9, h_{11}) ve beş işbirlikçi robot (h_4, h_6, h_8, h_{10}, h_{12}) olmak üzere toplam 12 işgören bulunmaktadır. Görev süreleri Çizelge 5.4'te yer almaktadır. Burada ∞ ilgili görevin işgili işgören tarafından gerçekleştirilemediğini göstermektedir.

Çizelge 5.3. 8 Görevli Demontaj İşlemi Bilgileri

Görev	Tanım	Süre
1	PC'nin üst kapağının çıkarılması	12
2	Disket sürücüsünün çıkarılması	14
3	Sabit sürücünün çıkarılması	12
4	Arka düzlemin kaldırılması	7
5	PCI kartların çıkarılması	10
6	İki RAM modülünün çıkarılması	2
7	Güç ünitesinin çıkarılması	15
8	Anakartın çıkarılması	12

Çizelge 5.4. İşgörenlere Ait Görev Süreleri

	Robot 1	Robot 2	İşçi 1	Cobot 1	İşçi 2	Cobot 2	İşçi 3	Cobot 3	İşçi 4	Cobot 4	İşçi 5	Cobot 5
i	h_1	h_2	h_3	h_4	h_5	h_6	h_7	h_8	h_9	h_{10}	h_{11}	h_{12}
1	∞	∞	6	3	18	9	9	5	14	7	11	6
2	5	5	20	10	16	8	9	5	22	11	11	6
3	4	4	13	7	11	6	13	7	10	5	18	9
4	3	3	11	6	9	5	9	5	11	6	6	3
5	4	4	12	6	6	3	11	6	15	8	15	8
6	1	1	2	1	2	1	1	1	1	1	2	1
7	∞	∞	22	11	21	11	23	12	17	9	9	5
8	4	4	10	5	9	5	14	7	6	3	13	7

Çizelge 5.5'te verilen işgören maliyetleri, robot, işçi ve işbirlikçi robot için maliyet katsayılarının sırasıyla 0,24; 0,07 ve 0,15 alınmasıyla elde edilmiştir (Kökhan, 2020). Bu durum işbirlikçi robot maliyetinin işçi maliyetinin yaklaşık 2 katı, robot maliyetinin ise işçi maliyetinin yaklaşık 3,5 katı olduğu durumu tarif etmektedir. Robot maliyeti ise yaklaşık olarak işbirlikçi robot maliyetinin 1,5 katıdır. İstasyon açma maliyet katsayısı 1 olarak alınmıştır. Her bir görevin işçiye yönelik durum bilgisi ise Çizelge 5.6'te yer almaktadır.

Çizelge 5.5. İşgören Maliyetleri

	Robot 1	Robot 2	İşçi 1	Cobot 1	İşçi 2	Cobot 2	İşçi 3	Cobot 3	İşçi 4	Cobot 4	İşçi 5	Cobot 5
i	h_1	h_2	h_3	h_4	h_5	h_6	h_7	h_8	h_9	h_{10}	h_{11}	h_{12}
1	∞	∞	0,42	0,45	1,26	1,35	0,63	0,75	0,98	1,05	0,77	0,9
2	1,2	1,2	1,4	1,5	1,12	1,2	0,63	0,75	1,54	1,65	0,77	0,9
3	0,96	0,96	0,91	1,05	0,77	0,9	0,91	1,05	0,7	0,75	1,26	1,35
4	0,72	0,72	0,77	0,9	0,63	0,75	0,63	0,75	0,77	0,9	0,42	0,45
5	0,96	0,96	0,84	0,9	0,42	0,45	0,77	0,9	1,05	1,2	1,05	1,2
6	0,24	0,24	0,14	0,15	0,14	0,15	0,07	0,15	0,07	0,15	0,14	0,15
7	∞	∞	1,54	1,65	1,47	1,65	1,61	1,8	1,19	1,35	0,63	0,75
8	0,96	0,96	0,7	0,75	0,63	0,75	0,98	1,05	0,42	0,45	0,91	1,05

Çizelge 5.6. Görevlerin İşçiye Yönelik Tehlike Durum Bilgisi

	Robot 1	Robot 2	İşçi 1	Cobot 1	İşçi 2	Cobot 2	İşçi 3	Cobot 3	İşçi 4	Cobot 4	İşçi 5	Cobot 5
i	h_1	h_2	h_3	h_4	h_5	h_6	h_7	h_8	h_9	h_{10}	h_{11}	h_{12}
1	∞	∞	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	∞	∞	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Örnek problem için ideal nokta (7,27;1), nadir nokta ise (8,77;3) olarak tespit edilmiştir. Epsilon kısıt modelinde kısıta alınan amacın ikinci amaç fonksiyonu olması nedeniyle bu amacın ideal ve nadir noktaları arasındaki tüm değerler epsilon değerlerinin tespit edilmesinde kullanılmıştır. Buradan hareketle epsilon kısıt modelinde epsilon değeri sırasıyla {1, 2, 3} olacak şekilde model, 3 ardıştırma şeklinde çözülmüştür. GAMS/Cplex ile elde edilen sonuçlar Çizelge 5.7'de özetlenmiştir.

Çizelge 5.7. Epsilon Kısıt Yöntemi Sonuçları

Epsilon	**Çözüm Süresi (s)**	f_1	f_2	**Etkinlik (%)**	**Açılan İstasyon**	**Atanan İşgörenler**
1	0,16	8,77	1	46,67	3	3, 1, 12
2	0,11	7,42	2	51,43	3	7, 5, 12
3	0,16	7,27	3	58,10	3	7, 9, 11

Çizelge 5.7'de açılan her bir istasyona hangi işgörenin ve görevlerin atandığı yer almaktadır. Örneğin ilk ardıştırmada üç istasyon açılmış ve bu istasyonlara sırasıyla 3, 1 ve 12. işgörenler atanmıştır. Ayrıca amaç fonksiyonu ve etkinlik değeri ile saniye cinsinden çözüm zamanı bilgisi de bulunmaktadır.

6. BULGULAR VE TARTIŞMA

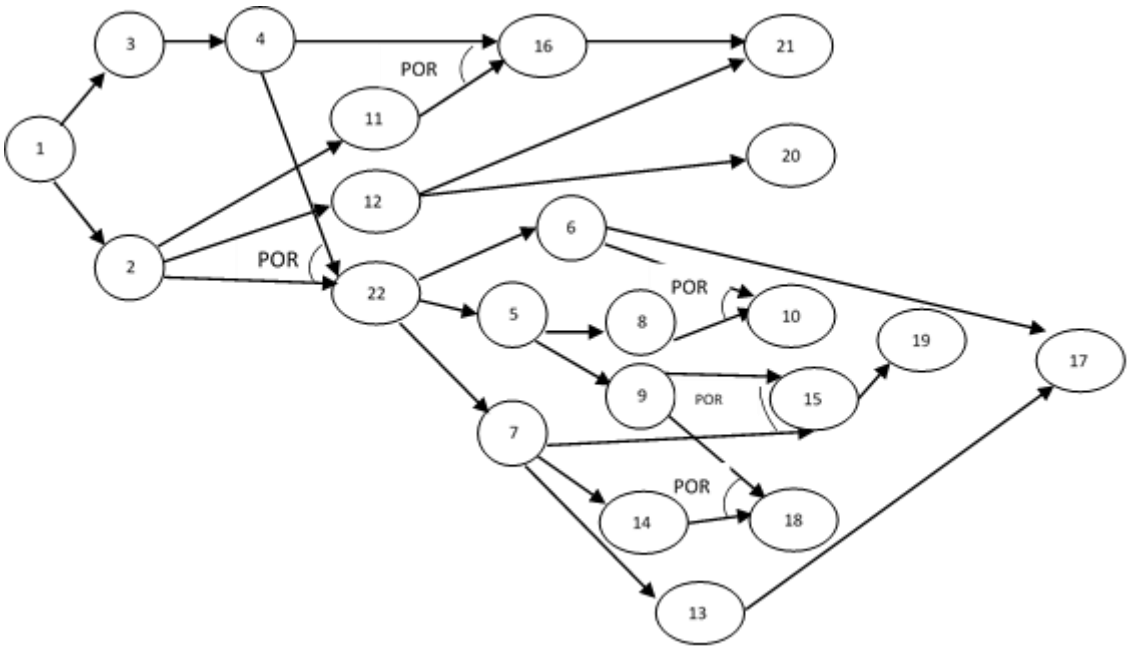
Bu bölümde öncelikle test problemlerinin özellikleri ve çözüm sonuçlarına yer verilecektir. Sonrasında deney tasarımında belirlenen faktör düzeylerinin çözüm süresine etkilerinin incelendiği istatistiksel analiz sonuçları yer almaktadır. Çözüm performansı değerlendirildikten sonra, karar vericiye yardımcı olacak yöntemin geliştirilmesi ve sonuçlarına ilişkin bilgilere yer verilmiştir.

6.1. Test Problemlerinin Türetilmesi

Test problemleri için literatürdeki kaynaklardan yararlanılarak aşağıda düzeyleri ile ifade edilen üç faktör belirlenmiştir:

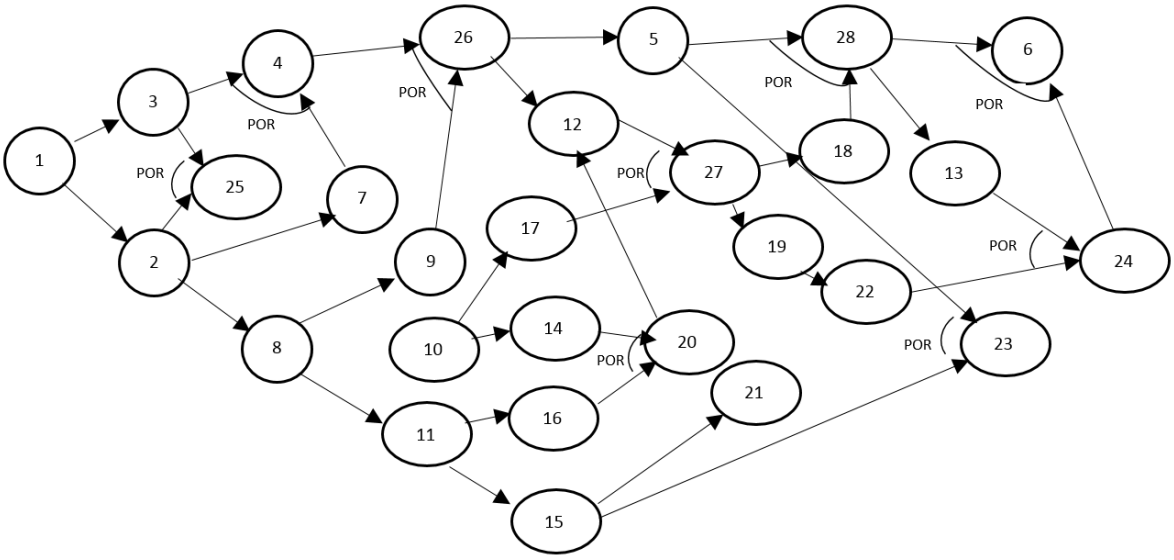
Faktör 1. Görev düzey sayısı (*i*): 22 ve 28 görevden oluşan iki düzey içermektedir.

Düzey 1.1: 22 görev: Şekil 6.1'de yer alan 22 görevden oluşan öncelik diyagramı Lambert'in kalem örneğinden hareketle uyarlanmıştır. Söz konusu örnekte sadece *VE* türünde öncelik ilişkileri mevcut olup, Göksoy (2010) öncelik diyagramına *VEYA* türünde öncelik ilişkileri de eklemiştir.



Şekil 6.1. 22 Görevli Demontaj İşlemine Ait Öncelik Diyagramı

Düzey 1.2: 28 görev: Şekil 6.2'de yer alan 28 görevden oluşan öncelik diyagramı Göksoy (2010)'un Lambert'in radyo örneğinden hareketle uyarladığı 34 görevli demontaj işleminden uyarlanmıştır.



Şekil 6.2. 28 Görevli Demontaj İşlemine Ait Öncelik Diyagramı

Faktör 2. İşçi sayısı: Modelin varsayımlarından birisi farklı yetenek seviyelerine sahip işçilerden oluşan bir işçi havuzu olduğu şeklindedir. Bu bağlamda işçi sayısının problemin çözümüne etkisinin incelenmesi amacıyla işçi sayısı teorik en küçük istasyon sayısına (s_{enk}) bağlı olarak iki düzeyli incelenmiştir. Burada s_{enk}, $\sum_{i=1}^{i} t_i / C$ aracılığı ile hesaplanmaktadır.

Düzey 2.1: Teorik enküçük istasyon sayısının % 10 fazlası ($1{,}10\ s_{enk}$)
Düzey 2.2: Teorik enküçük istasyon sayısının % 30 fazlası ($1{,}30\ s_{enk}$)

Faktör 3. İşçilerin görev süreleri değişkenliği (t_{ih}): 22 görevden oluşan demontaj işlemine ait süreler Kalaycılar vd. (2016) makalesinden alınmıştır. 28 görevli problem için ortalama işlem süreleri ise Kalaycılar vd. (2016) benzer yaklaşımla 1 ile 19 arasında düzgün dağılımdan türetilmiştir. İşçilerin görev süreleri Agrawal ve Tiwari (2008) çalışmasında olduğu gibi benzer ve benzer olmayan süreler olmak üzere iki düzeyli incelenmiştir.

Düzey 3.1: $t_{ih} \sim U\ [0{,}75\ t_i - 1{,}25\ t_i]$
Düzey 3.2: $t_{ih} \sim U[0{,}4\ t_i - 1{,}6 t_i]$

Her bir durum için 3 tekrar yapılarak 2^3 x 3 = 24 test problemi türetilmiştir. Test problemleri türetilirken dikkate alınması gereken diğer faktörler olan çevrim süresi, istasyon sayısı, robot sayısı, robot esnekliği ve görevin zararlı olma durumları da izleyen şekilde belirlenmiştir.

Çevrim süresi (C) : Her bir işçinin işlem süreleri farklı olduğu için öncelikle her bir görev için t_{enk}, t_{enb} ve t_{ort} değerleri elde edilmiş ve Denklem (6.1)'de yer alan Beta dağılımından hareketle beklenen görev süresi (t_e) hesaplanmıştır (Demirkol Akyol ve Baykasoğlu, 2019). Sonrasında çevrim süresi, Denklem (6.2)'de açıklandığı üzere en büyük beklenen süreye sahip görevin iki katı olacak şekilde belirlenmiştir.

$$t_{ei} = \frac{t_{enk} + 4t_{ort} + t_{enb}}{6} \tag{6.1}$$

$$C = 2enb\{t_{ei}\} \tag{6.2}$$

Başlangıç istasyon sayısı (s_{ilk}): Teorik en küçük istasyon sayısının (s_{enk}) %30 fazlası olarak belirlenmiştir.

Robot sayısı: Robot sayısı başlangıç istasyon sayısının (s_{ilk}) %40'ı olacak şekilde belirlenmiştir (Weckenborg, 2020).

Robot görev süresi: Robotların yapabileceği işler için deterministik sürenin %33'ü (Kökhan, 2020) olarak belirlenmiştir.

Robot esnekliği (RE): Modelin varsayımları arasında robotların her görevi gerçekleştiremediği yer almaktadır. Bu nedenle robotların görevlerin %20'sini gerçekleştiremediği (Weckenborg, 2020) varsayılarak robotların gerçekleştirebildiği görevler rassal olarak türetilmiştir.

İşbirlikçi robot görev süresi: İşbirlikçi robotların yapabileceği işler için her bir işçi için belirlenen sürenin %50'si (Kökhan, 2020) olacak şekilde belirlenmiştir.

Görevin işçiye yönelik tehlike durumu: Veriler hipotetik olarak geliştirildiği için her bir görevin işçiye yönelik oluşturabileceği tehlike durumu her iki risk türü için de %20 oranında rassal olarak türetilmiştir. Belirli bir risk düzeyinin üzerinde olan görevlerin 1, altında olan görevlerin 0 değerini alacağı varsayılmıştır. Robotlar için herhangi bir tehlike tanımlanmazken, işbirlikçi robotlarla çalışılması durumu için sadece çevresel risk nedeniyle işçiye yönelik tehlike oluşmaktadır. İşçiler için ise görevlerin risk durumu, rassal olarak türetilen çevresel ve bireysel ergonomik risk değerleri toplamından hareketle belirlenmiştir. Dolayısıyla işçiye yönelik tehlike durumu 0, 1 veya 2 değerini alabilmektedir. Böylelikle toplam tehlike değerleri tam sayı değerler alacak ve epsilon kısıt yönteminde tüm uzay taranabilecektir.

Maliyet katsayıları: İşgören maliyetleri hesabında, robot, işçi ve işbirlikçi robot için maliyet katsayıları sırasıyla 0,24; 0,07 ve 0,15 şeklinde alınmıştır. Bu maliyet katsayıları içerisinde işçi için aylık ücret, robotlar için satın alma ve enerji giderleri, işbirlikçi robot işgücü tipi için de satın alma ve enerji gideri ile maaş bilgileri yer almaktadır (Kökhan, 2020). İstasyon açma maliyet katsayısı 1 olarak alınmıştır.

6.2. Test Sonuçları

Test problemleri, özelliklerine göre dört bileşenden oluşan bir yapıyla isimlendirilmiştir. İlk bileşen görev sayısına ilişkindir (22-28). İkinci bileşen işçi sayısını, üçüncü bileşen işçi görev sürelerinin değişkenlik düzeyini göstermektedir. Örneğin 22-1-2-3 adlı test problemi 22 görevli, teorik en küçük istasyon sayısının 1,1 katı kadar işçi sayısının olduğu, işçi görev sürelerinin $[0{,}4t_i - 1{,}6t_i]$ aralığında düzgün dağılım gösterdiği durumun 3. tekrarını temsil etmektedir.

Geliştirilen iki amaçlı matematiksel model, GAMS/Cplex çözücüsü ile her bir test problemi için süre kısıtı 7200 s olacak şekilde çözdürülmüştür. Kullanılan bilgisayar 8 GB RAM, Intel ® Core ™ i5, 7400 CPU, 3.00 Ghz işlemci ve 64 bit işletim sistemine sahiptir. Öncelikle her bir test problemi için her iki amaca ilişkin ideal ve nadir noktalar tayin edilmiştir. İkinci amaç fonksiyonu modele kısıt olarak ilave edileceği için $İdeal_2$ ve $Nadir_2$ noktaları epsilon değerlerinin en küçük ve en büyük değerlerini ifade etmektedir. Test problemleri için elde edilen ideal ve nadir noktalar Çizelge 6.1'de yer almaktadır.

Çizelge 6.1. Test Problemlerine İlişkin İdeal ve Nadir Noktalar

No	**Test Problemi**	***İdeal*$_1$**	***İdeal*$_2$**	***Nadir*$_1$**	***Nadir*$_2$**
1	22-1-1-1	19,85	1	22,5	7
2	22-1-1-2	19,20	1	22,06	5
3	22-1-1-3	19,44	1	22,03	4
4	22-1-2-1	13,15	1	17,53	7
5	22-1-2-2	14,85	1	19,42	7
6	22-1-2-3	14,85	1	18,76	1
7	22-2-1-1	19,19	1	21,76	6
8	22-2-1-2	19,19	1	21,84	4
9	22-2-1-3	18,90	1	21,82	6
10	22-2-2-1	14,99	1	18,98	7
11	22-2-2-2	15,36	1	18,99	7
12	22-2-2-3	14,01	1	17,61	7
13	28-1-1-1	20,05	4	21,29	6
14	28-1-1-2	19,34	4	20,43	5
15	28-1-1-3	19,84	4	21,23	9
16	28-1-2-1	15,97	1	18,77	5
17	28-1-2-2	14,34	1	18,28	5
18	28-1-2-3	15,06	1	16,2	5
19	28-2-1-1	19,84	4	21,39	9
20	28-2-1-2	19,89	4	21,41	8
21	28-2-1-3	19,53	4	21,06	7
22	28-2-2-1	14,99	4	17,93	9
23	28-2-2-2	14,78	4	17,53	9
24	28-2-2-3	14,69	4	17,17	9

Bu çizelgede her bir test problemine ilişkin $Nadir_2$ ve $İdeal_2$ değerlerinden hareketle her bir test problemi için epsilon değeri belirlenmiştir. Örneğin ilk test problemi olan 22-1-1-1 için $Nadir_2$ değeri 7 ve $İdeal_2$ değeri 1 olarak tespit edildiği için {1,2,3,4,5,6,7} olmak üzere toplam yedi epsilon değeri tespit edilmiştir. Sadece 22-1-2-3 kodlu test probleminde tek bir epsilon değeri tespit edilmiştir. Tüm test problemleri için aynı işlem gerçekleştirildiğinde toplam 125 deney gerçekleştirilmiştir. Test problemlerinin önerilen matematiksel modelin çözümü sonucunda elde edilen sonuçları ise Çizelge 6.2'de verilmiştir. Bu çizelgede amaç fonksiyonu değerlerinin yanısıra etkinlik yüzdesi, çözüm süresi ve ideal çözüme uzaklık (d_{xy}) değerleri yer almaktadır. Etkinlik yüzdesi (6.3) denklemi aracılığıyla istasyonlardaki doluluk oranlarının ($\sum_s TS_s$) istasyon sayısı (s) ile çevrim süresinin (C) çarpımına oranlanmasından hareketle hesaplanmaktadır.

$$Etkinlik\ yüzdesi = \frac{\sum_s TS_s}{s\ C} \tag{6.3}$$

Literatürde çok amaçlı programlama sonucu elde edilen çözümlerin performansını ölçmek için çeşitli değerlendirme metrikleri kullanılmaktadır. Bunlardan bazıları iki çözümü karşılaştırmak için kullanılırken; bazıları çözümlerin bireysel performansı hakkında bilgi vermektedir. Bu çalışmada çözümlerin bireysel performanslarını değerlendirmek için Ischibuchi vd. (2003) tarafından kullanılan ve bir çözüm kümesinin en iyi veya en iyiye yakın Pareto en iyi sonucu ifade eden referans bir kümeye (S^*) olan uzaklığını ölçen yaklaşım kullanılmıştır. Söz konusu uzaklığın küçük olduğu çözüm daha iyidir. (6.4) numaralı denklemde iki amaçlı durum için amaç fonksiyonlarının normalize edildiği uzayda herhangi bir x çözümünün y referans çözümü ile arasındaki uzaklık hesabı yer almaktadır. Bu denklemde yer alan * ifadesine sahip öğeler amaç fonksiyonunun normalize edilmiş değerler olduğunu göstermektedir. (6.5) numaralı denklem fonksiyonun S^* kümesi ile normalizasyonunun nasıl gerçekleştirileceğine ilişkindir. $f_{max}(S^*)$ ve $f_{min}(S^*)$ sırasıyla S^* kümesinin en büyük ve en küçük değerlerini göstermektedir (Yazıcı, 2020).

$$d_{xy} = \sqrt{\left(f_1^*(y) - f_1^*(x)\right)^2 + \left(f_2^*(y) - f_2^*(x)\right)^2} \tag{6.4}$$

$$f_i^*(.) = \frac{f_i(.) - f_{min}(S^*)}{f_{max}(S^*) - f_{min}(S^*)} \tag{6.5}$$

Çizelge 6.2. Test Sonuçları

No	Test Problemi	f_1	f_2	Etkinlik %	Süre	d_{xy}
1	22-1-1-1	22,50	2	58,26	90,94	1,00
		21,27	2	83,70	65,22	0,54
		20,20	3	80,43	19,72	0,21
		19,97	4	97,28	27,36	0,34
		19,85	7	95,11	58,14	0,83
2	22-1-1-2	22,06	1	64,58	54,38	1,00
		20,74	2	68,75	45,77	0,59
		19,42	3	93,06	9,30	0,51
		19,26	4	92,71	24,11	0,75
		19,20	5	91,67	26,00	1,00
3	22-1-1-3	22,03	1	58,15	78,22	1,00
		20,80	2	68,48	34,97	0,62
		19,72	3	98,55	19,45	0,68
		19,44	4	95,65	20,67	1,00
4	22-1-2-1	17,53	1	22,41	22,63	1,00
		15,94	2	32,76	34,63	0,66
		14,55	3	44,25	12,70	0,46
		14,09	4	44,40	15,81	0,54
		13,74	5	72,41	12,89	0,68
		13,53	6	54,74	11,72	0,84
		13,15	7	83,33	2,61	1,00
5	22-1-2-2	19,34	1	30,75	22,00	0,98
		17,55	2	35,34	56,19	0,61
		15,79	3	50,43	21,14	0,39
		15,51	4	52,16	25,41	0,52
		15,25	5	56,47	23,09	0,67
		15,05	6	58,19	20,78	0,83
		14,85	7	66,81	6,97	1,00
6	22-1-2-3	18,76	1	27,22	7,78	-

Çizelge 6.2. Test Sonuçları (Devam)

No	Test Problemi	f_1	f_2	Etkinlik %	Süre	d_{xy}
7	22-2-1-1	21,76	1	62,50	54,64	1,00
		20,59	2	68,23	67,52	0,58
		19,28	3	91,67	20,86	0,40
		19,19	6	92,19	40,09	1,00
8	22-2-1-2	21,84	1	56,09	54,95	1,00
		20,60	2	69,57	45,83	0,63
		19,47	3	80,98	20,44	0,67
		19,19	4	91,85	50,55	1,00
9	22-2-1-3	21,82	1	58,70	52,34	1,00
		20,38	2	71,20	50,23	0,54
		19,05	3	94,93	11,44	0,40
		18,91	4	93,48	29,17	0,60
		18,90	6	90,22	41,58	1,00
10	22-2-2-1	18,98	1	31,67	32,34	1,00
		17,57	2	38,00	63,13	0,67
		16,28	3	34,67	38,66	0,46
		15,75	4	41,67	31,42	0,54
		15,36	5	60,00	27,64	0,67
		15,09	6	61,25	17,58	0,83
		14,99	7	65,42	5,38	1,00
11	22-2-2-2	18,99	1	28,33	60,6	1,00
		17,19	2	30,83	44,61	0,53
		16,08	3	38,67	52,95	0,39
		15,75	4	44,33	37,78	0,51
		15,63	5	45,67	98,78	0,67
		15,62	6	48,67	73,94	0,84
		15,36	7	49,33	49,70	1,00

Çizelge 6.2. Test Sonuçları (Devam)

No	Test Problemi	f_1	f_2	Etkinlik %	Süre	d_{xy}
12	22-2-2-3	17,61	1	35,33	8,48	1,00
		16,07	2	44,17	18,08	0,60
		14,55	3	60,56	6,95	0,37
		14,35	4	62,78	10,98	0,51
		14,11	6	55,42	20,27	0,83
		14,01	7	59,58	4,56	1,00
13	28-1-1-1	21,29	4	73,37	91,13	1,00
		20,31	5	83,15	78,75	0,54
		20,05	6	84,24	117,06	1,00
14	28-1-1-2	20,43	4	70,31	40,05	1,00
		19,34	5	94,44	18,95	1,00
15	28-1-1-3	21,23	4	75,00	187,33	1,00
		19,89	5	85,23	103,88	0,20
		19,84	9	96,82	183,3	1,00
16	28-1-2-1	18,77	1	49,71	95,89	1,00
		16,11	2	79,31	19,67	0,25
		16,04	3	72,41	38,41	0,50
		15,97	5	71,98	44,83	1,00
17	28-1-2-2	18,28	1	48,33	59,81	1,00
		16,55	2	56,00	12,39	0,61
		15,78	3	52,33	19,92	0,62
		15,34	4	67,5	21,08	0,79
		14,34	5	91,11	5,30	1,00
18	28-1-2-3	16,20	1	55,86	10,53	1,00
		15,62	2	77,16	19,13	0,55
		15,27	3	71,98	21,55	0,53
		15,06	4	70,69	43,98	0,75

Çizelge 6.2. Test Sonuçları (Devam)

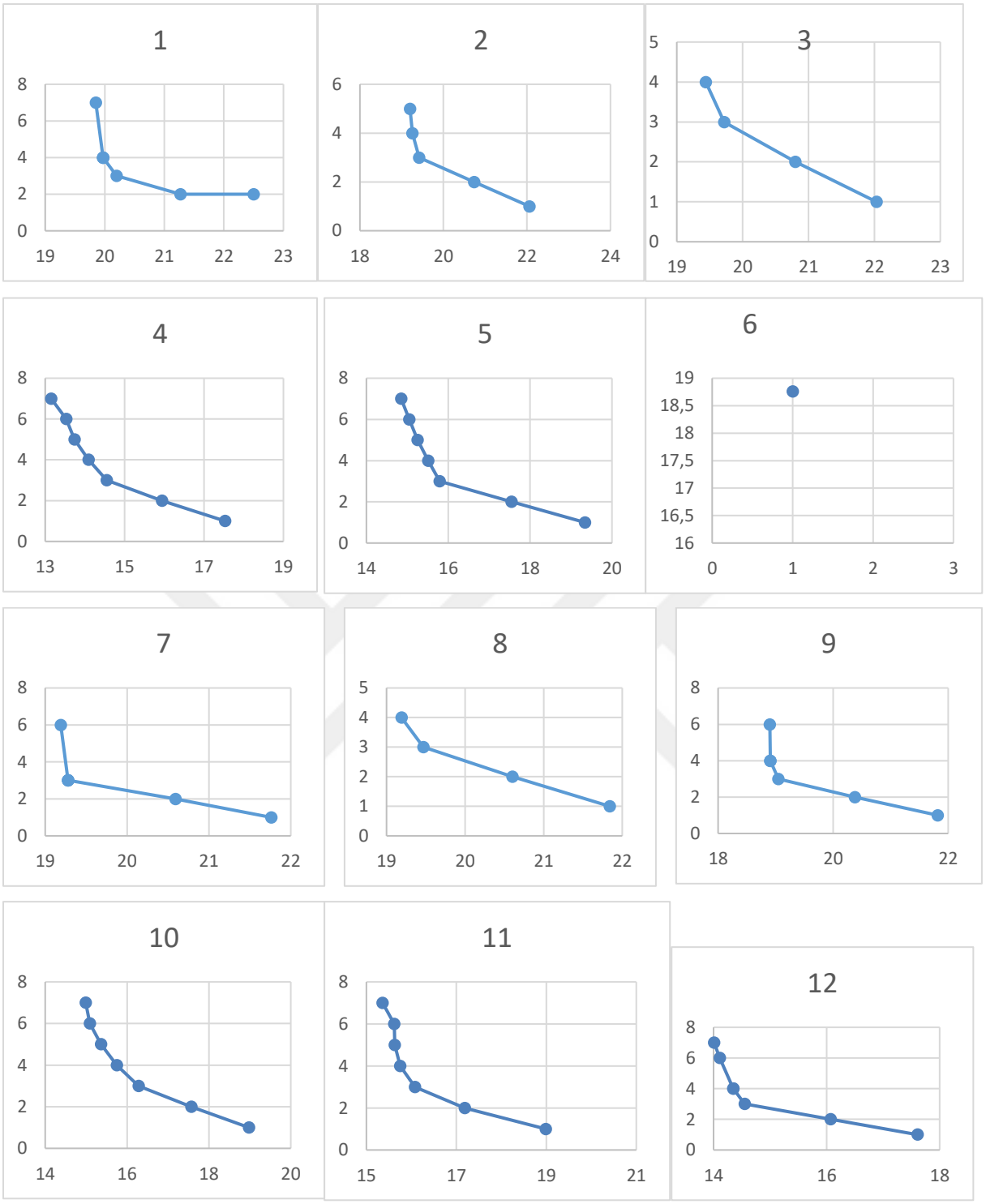
No	Test Problemi	f_1	f_2	Etkinlik %	Süre	d_{xy}
19	28-2-1-1	21,39	4	67,27	197,11	1,00
		20,29	5	84,66	156,63	0,35
		20,14	6	87,50	420,05	0,44
		20,11	8	86,82	669,78	0,82
		19,84	9	97,27	222,16	1,00
20	28-2-1-2	21,41	4	66,67	148,05	1,00
		20,43	5	94,27	273,45	0,43
		20,18	6	94,79	266,11	0,54
		19,95	7	94,79	157,25	0,75
		19,89	8	93,75	248,20	1,00
21	28-2-1-3	21,06	4	73,91	87,23	1,00
		20,08	5	77,72	143,66	0,49
		19,83	6	79,35	220,86	0,69
		19,53	7	95,65	218,28	1,00
22	28-2-2-1	17,93	4	33,91	171,98	1,00
		16,51	5	47,41	234,8	0,55
		15,94	6	54,31	281,64	0,51
		15,60	7	62,07	156,08	0,63
		15,26	8	62,93	139,2	0,81
		14,99	9	67,67	75,81	1,00
23	28-2-2-2	17,53	4	41,33	165,3	1,00
		16,08	5	69,44	133,19	0,51
		15,51	6	70,00	140,38	0,48
		15,11	7	60,83	128,5	0,61
		15,09	8	61,67	84,13	0,81
		14,78	9	65,42	60,50	1,00

Çizelge 6.2. Test Sonuçları (Devam)

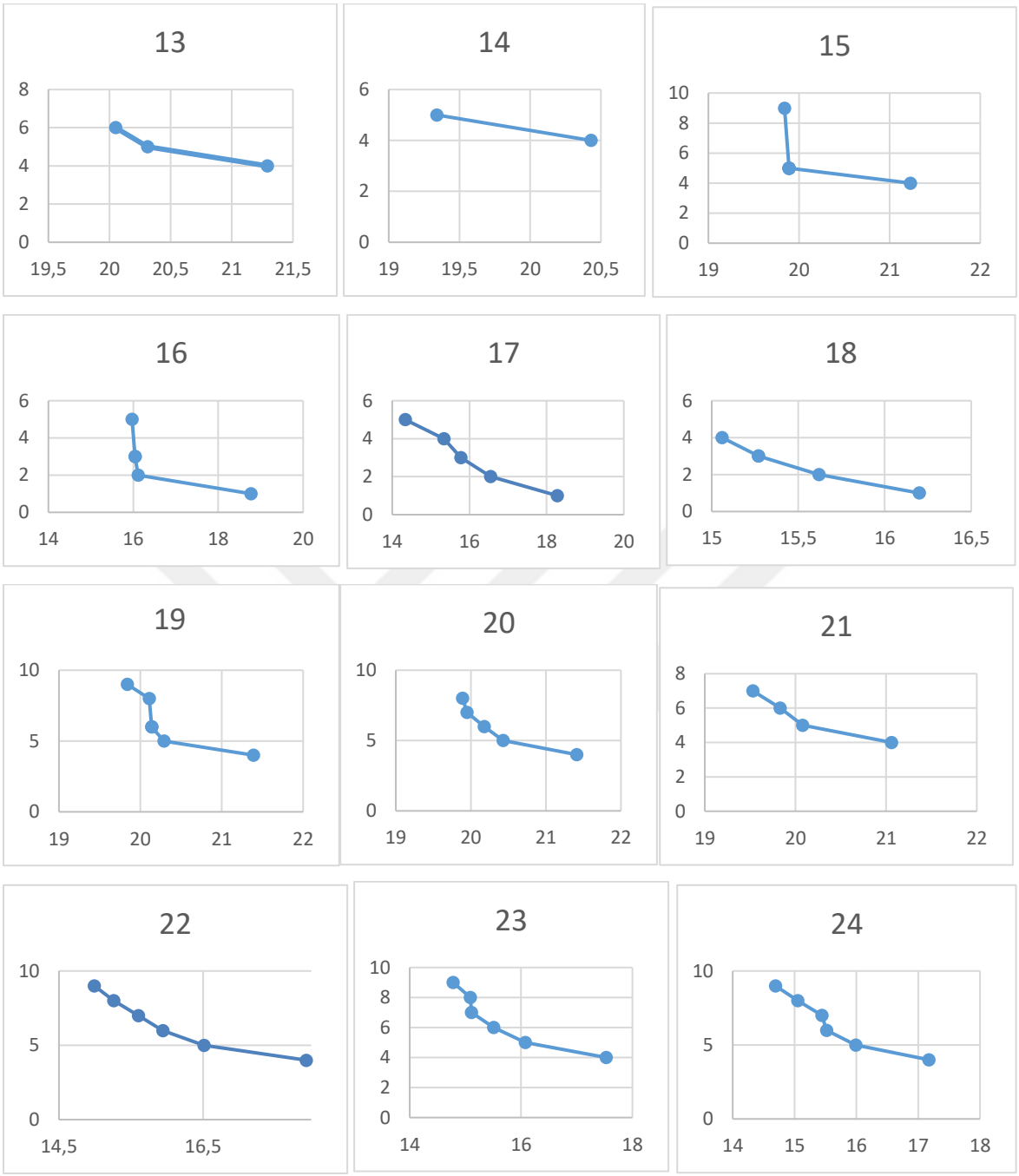
No	Test Problemi	f_1	f_2	Etkinlik %	Süre	d_{xy}
24	28-2-2-3	17,17	4	40,33	94,78	1,00
		15,99	5	50,83	175,20	0,56
		15,52	6	60,42	141,47	0,52
		15,44	7	59,17	126,59	0,67
		15,05	8	59,58	111,66	0,81
		14,69	9	92,78	66,73	1,00

Çizelge 6.2 incelendiğinde etkinlik yüzdelerinin %22,41 ile %98,55 arasında değişkenlik gösterdiği görülmektedir. Ardıştırma bazında çözüm süreleri incelendiğinde en kısa süren deney 2,61; en uzun süren deney 880,38 s olarak tespit edilmiştir. Test problemi bazında toplam iterasyon sürelerine bakıldığında ise 2.546,11 s ile 28-2-1-1 kodlu on dokuzuncu test problemi olmuştur.

Ayrıca Şekil 6.3 ve Şekil 6.4'te sırasıyla 22 ve 28 görevden oluşan test problemlerinin Pareto etkinlik sınırları görselleştirilmiştir. Şekil 6.3'te yer alan 22-1-1-1 problemine ilişkin Pareto eğrisi incelendiğinde sadece bu test probleminde zayıf etkin bir çözümün elde edildiği görülmektedir. Diğer test problemlerinin sonuçlarında böyle bir durum gerçekleşmemiştir.



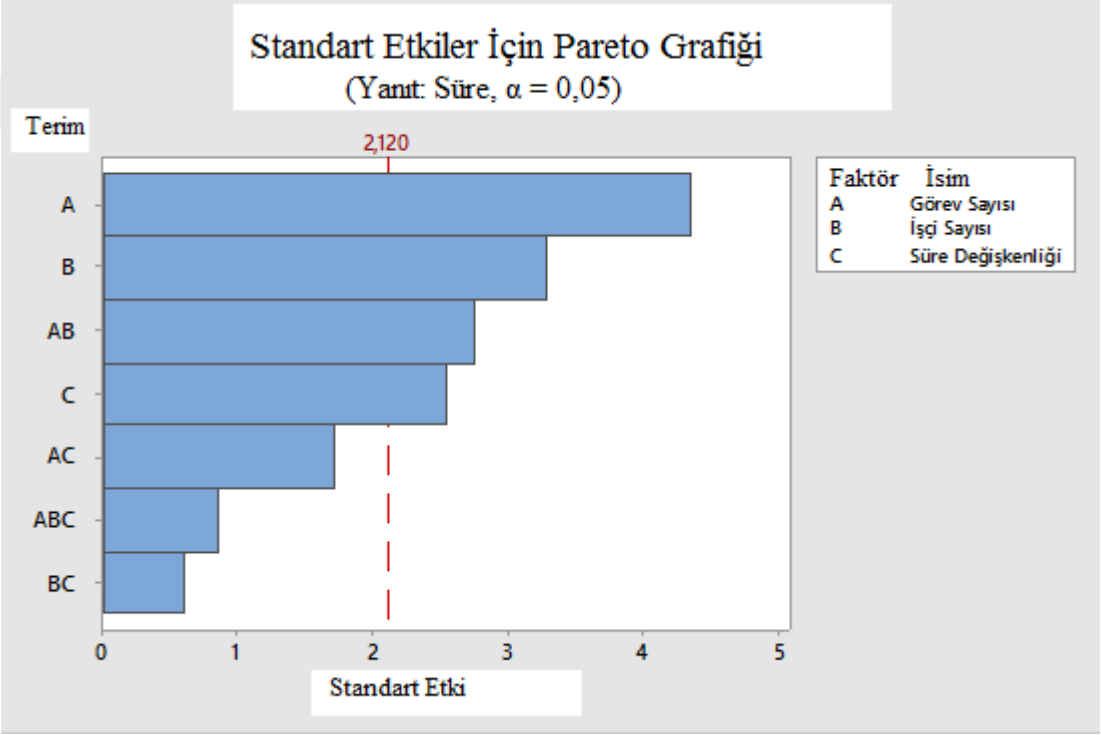
Şekil 6.3. 22 görev test problemlerinin Pareto eğrileri



Şekil 6.4. 28 görev test problemlerinin Pareto eğrileri

6.3. Test Problem Sonuçlarının İstatistiksel Analizi

Çalışma kapsamında tam faktöriyel deney tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda üç faktörün çözüm süresine etkisi MINITAB aracılığı ile analiz edilmiştir: Görev sayısı, işçi sayısı, işçi görev süreleri arası değişkenlik. Ayrıca bu faktörlerin birleşik etkileri de analiz edilmiştir. Şekil 6.5'te görülen Pareto grafiğinde en fazla etkiye sahip faktörler A (görev sayısı), B (İşçi sayısı) AB (Görev Sayısı-İşçi sayısı) ve C (Süre değişkenliği) olarak tespit edilmiştir.



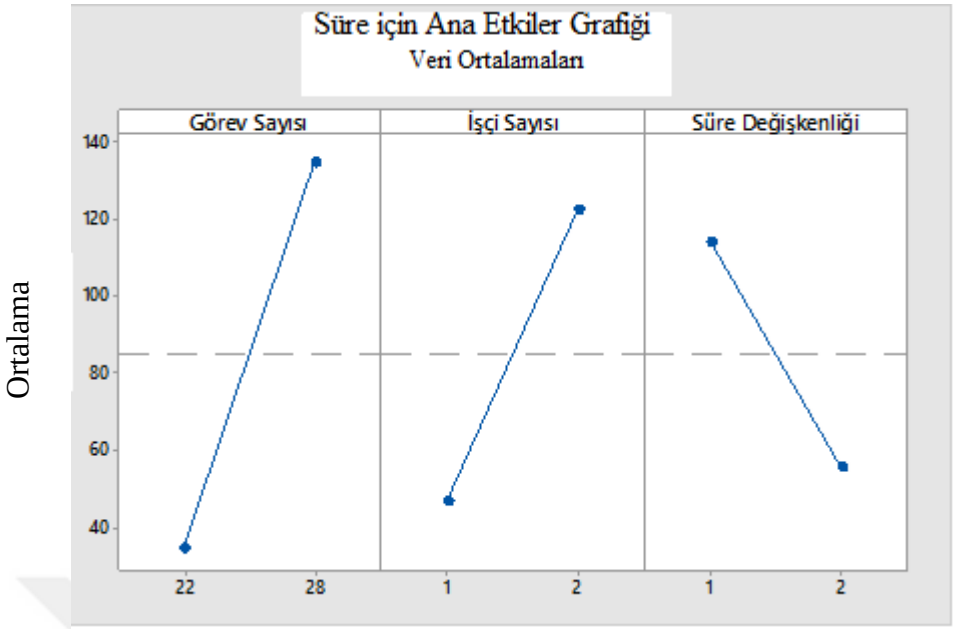
Şekil 6.5. Standartlaştırılmış Etkinin Pareto Grafiği

Çizelge 6.3'te yer alan ANOVA tablosunda da görev sayısı (0,000), işçi sayısı (0,005) görev sayısı - işçi sayısı (0,014) ve süre değişkenliği (0,022) *p* değerlerinin 0,05'ten küçük olduğu görülmektedir. Diğer etkileşimlerin 0,05 değerinden büyük *p* değerlerine sahip olması istatistiksel anlamda çözüm süresinde etkileri olmadığını göstermektedir.

Çizelge 6.3. MINITAB Varyans Analizi ANOVA Sonucu

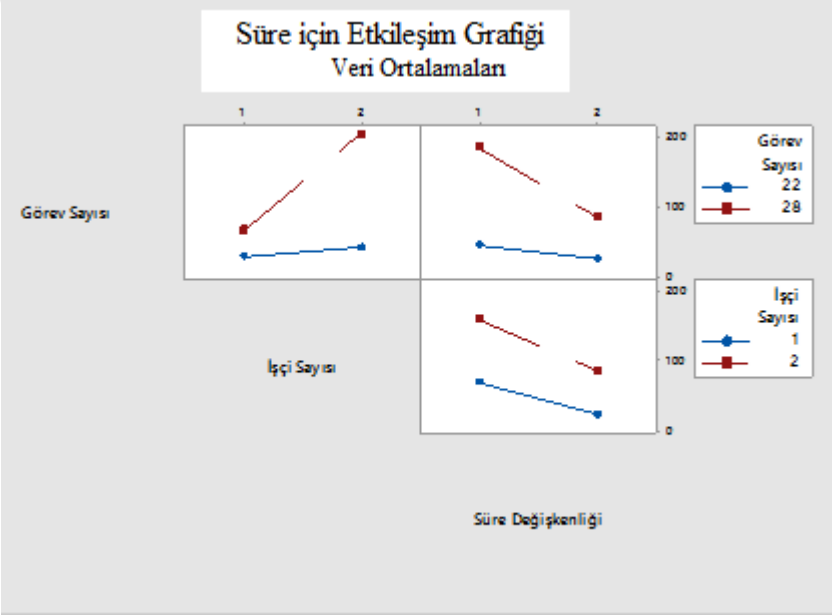
Kaynak	Serbestlik Derecesi	Düzeltilmiş Kareler Toplamı	Düzeltilmiş Kareler Ortalaması	*F*-değeri	*P*-değeri
Model	7	151842	21692	6,84	0,001
Doğrusal	3	114733	38244	12,06	0,000
Görev Sayısı	1	59970	59970	18,90	0,000
İşçi Sayısı	1	34225	34225	10,79	0,005
Süre Değişkenliği	1	20538	20538	6,47	0,022
2-Yönlü Etkileşimler	3	34753	11584	3,65	0,035
Görev Sayısı-İşçi Sayısı	1	24169	24169	7,62	0,014
Görev Sayısı-Süre Değişkenliği	1	9403	9403	2,96	0,104
İşçi Sayısı-Süre Değişkenliği	1	1181	1181	0,37	0,550
3-Yönlü Etkileşimler	1	2356	2356	0,74	0,402
Görev Sayısı-İşçi Sayısı-Süre Değişkenliği	1	2356	2356	0,74	0,402
Hata	16	50757	3172		
Toplam	23	202599			

Şekil 6.6'da faktörlerin ana etki grafiği yer almaktadır. Çözüm süresi, görev sayısı ve işçi sayısındaki artışa bağlı olarak artarken; süre değişkenliğinin fazla olması çözüm süresinde azalmaya yol açmıştır.



Şekil 6.6. Faktörlere Ait Ana Etkiler Grafiği

Faktörler arası etkileşim grafiği Şekil 6.7'de yer almaktadır. Sadece görev sayısı ile işçi sayısının etkileşimi çözüm süresi üzerinde istatistiksel olarak anlamlı etkiye neden olmuştur.



Şekil 6.7. Faktörler Arası Etkileşim Grafiği

6.4. Çok Ölçütlü Karar Verme Tekniklerine Dayalı Yöntem Geliştirilmesi

Bu çalışma kapsamında ÇÖKV tekniklerinden TOPSIS ve PROMETHEE yöntemleri kullanılacaktır. Ayrıca ölçüt ağırlıkları da entropi ağırlıklandırma yöntemi ile belirlenecektir.

6.4.1. Ölçütlerin belirlenmesi

Karar vericiye destek olmak için geliştirilecek çok ölçütlü karar verme modelinde ilk aşama ölçütlerin belirlenmesidir. Bu çalışmada çözümlerin değerlendirilmesinde dört ölçüt dikkate alınmıştır. İlk ölçüt Denklem (6.4) aracılığıyla hesaplanan ideal noktaya olan uzaklık (d_{xy}) değeridir. İdeal çözüm istenen çözümdür ve elde edilen çözüm ideal noktadan ne kadar uzaklaşırsa o kadar kötüleşir. Elde edilen çözüm ideal noktaya yaklaştıkça, uzaklık değeri azalır ve bu değerin küçük olması çözümün daha iyi olduğunun göstergesidir.

İkinci ölçüt hat dengeleme problemlerinde önemli bir değerlendirme ölçütü olan ve Denklem (6.3) ile hesaplanan etkinlik yüzdesidir. Etkinlik yüzdesinin büyük olması arzu edilir.

Bu çalışma kapsamında amaçlanan yüksek otomasyon seviyesidir. Literatürde daha önce Li vd. (2019b) tarafından robotların gerçekleştirdiği görev süresinin, manuel gerçekleştirilen süreye oranından hareketle hesaplanan "toplam demontaj süresi oranı" adlı bir ölçüt kullanılmıştır. Buradan hareketle elde edilen çözümlerin karşılaştırılmasında kullanılacak, robot ve işbirlikçi robotları otomasyon seviyelerine göre birlikte ele alan "Otomasyon Oranı (OO)" adlı yeni bir ölçüt geliştirilmiştir. Söz konusu ölçüt, elde edilen çözümde işgörenlere atanam sürelerden hareketle (6.6) denklemini kullanarak hesaplanmaktadır. Bu denklemde sırasıyla robota (t_R), işçiye (t_H) ve işbirlikçi robota (t_C) atanan görev süreleri toplamını temsil etmektedir. Atanan tüm işgörenler robot ve işbirlikçi robotlardan oluşuyorsa bu oran 1 değerini almaktadır. Diğer taraftan atanan tüm işgörenler işçi ise bu oran 0 değerini almaktadır.

$$OO = (t_R + t_C)/(t_R+t_H+t_C) \tag{6.6}$$

22 numaralı 28-2-2-1 kodlu test problemi için elde edilen 6 Pareto en iyi çözüm için belirlenen ölçüt değerleri Çizelge 6.4'te yer almaktadır. $Ö_1$ en küçükleme yönlü bir ölçüt olduğu için bu sütunda yer alan en küçük değer en iyi değerdir. $Ö_2$ ve $Ö_3$ ölçütleri en büyükleme yönlü olduğu için sütunlarda yer alan en büyük değerler en iyi değerlerdir. Karar verici tek bir ölçüte göre karar vermek isterse koyu renk ile vurgulanmış seçenekleri seçebilir. Örneğin karar verici sadece etkinlik yüzdesine göre karar vermek istiyorsa altıncı seçenek %67,67 ile en iyi değere sahiptir. Bu analiz aynı zamanda ölçütlerin çelişip çelişmediğinin tespit edilmesi için de gereklidir. Belirlenen her bir ölçüte göre farklı çözümlerin en iyi olması ölçütlerin çeliştiğinin göstergesidir.

Çizelge 6.4. 28-2-2-1 Test Problemi İçin Ölçütlerin Aldıkları Değerler

Seçenekler	**İdeal noktaya uzaklık ($Ö_1$)**	**Etkinlik ($Ö_2$)**	**Otomasyon oranı ($Ö_3$)**
	enk	**enb**	**enb**
S_1	1,00	33,91	0,28
S_2	0,55	47,41	**0,56**
S_3	**0,51**	54,31	0,34
S_4	0,63	62,07	0,13
S_5	0,81	62,93	0,09
S_6	1,00	**67,67**	0,00

6.4.2. Entropi yöntemi ile ölçütlerin ağırlıklandırması

Bölüm 4.3.1'de verilen Denklem (4.8) aracılığıyla oluşturulan normalleştirilmiş karar matrisi Çizelge 6.5'te yer almaktadır.

Çizelge 6.5. Normalleştirilmiş Karar Matrisi

	Ö₁	**Ö₂**	**Ö₃**
S₁	0,22	0,10	0,20
S₂	0,12	0,14	0,40
S₃	0,11	0,17	0,24
S₄	0,14	0,19	0,09
S₅	0,18	0,19	0,06
S₆	0,22	0,21	0,00

İkinci ve üçüncü adım sonuçları ile dördüncü adımda sonuç olarak elde edilen ağırlık değerleri Çizelge 6.6'da özetlenmiştir.

Çizelge 6.6. Entropi Ağırlıkları

	Ö₁	**Ö₂**	**Ö₃**
e_j	0,98	0,99	0,80
d_j	0,02	0,01	0,20
w_j	0,08	0,05	0,86

Çizelge 6.6'nın son satırında yer alan ağırlık değerleri incelendiğinde en fazla ağırlığa sahip ölçütün 0,86 ile otomasyon oranı olduğu görülmektedir. İkinci önemli olan ölçüt ise 0,08 ile in iyi değere uzaklıktır. En düşük ağırlığa sahip ölçüt ise 0,05 ağırlık değeri ile etkinliktir. Bu ağırlık sonuçlarının uzman değerlendirmesine dayalı öznel bir değerlendirmeden ziyade karar matrisindeki her bir seçeneğe ilişkin ölçüt değerlerine bağlı nesnel bir değerlendirmeye bağlı olduğuna dikkat edilmelidir. Farklı seçeneklerin değerlendirilmesinde aynı ölçütler kullanılıyor olsa da farklı ağırlıklar elde edilmesi mümkündür. Ölçüt ağırlıklarının robust olup olmadığını test etmek adına 4, 7, 11 ve 22 numaralı test problemleri için ağırlık değerleri belirlenmiştir. Çizelge 6.7'de bu ağırlık değerlerine yer verilmiştir.

Çizelge 6.7. Farklı Test Problemleri için Ölçüt Ağırlıkları

Test Problemi No	**Test Problemi Kodu**	$w_{Ö_1}$	$w_{Ö_2}$	$w_{Ö_3}$
4	22-1-2-1	0,07	0,15	0,79
7	22-2-1-1	0,38	0,08	0,54
11	22-2-2-2	0,11	0,04	0,86
22	28-2-2-1	0,08	0,05	0,86

Çizelge 6.7'deki sonuçlar her durumda otomasyon oranı adlı Ö3'ün en yüksek ağırlık değerine sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca bu değerler arasındaki ilişkinin belirlenmesi için korelasyon analizi gerçekleştirilmiş ve Çizelge 6.8'de yer alan değerler elde edilmiştir. Korelasyon analizi sonuçları ağırlıklar arasında pozitif yönlü güçlü bir ilişki olduğunu göstermektedir.

Çizelge 6.8. Ağırlık Değerleri Arasındaki Korelasyon Analizi Sonuçları

	4	**7**	**11**	**22**
4	1			
7	0,71	1		
11	0,98	0,82	1	
22	0,99	0,79	0,99	1

6.4.3. TOPSIS ile sıralama

Bölüm 4.3.2'de verilen Denklem (4.12) aracılığıyla gerçekleştirilen normalleştirme süreci ve sonuçları sırasıyla Çizelge 6.9 ve Çizelge 6.10'da gösterilmektedir.

Çizelge 6.9. Karar Matrisi

	$Ö_1$	**$Ö_2$**	**$Ö_3$**
S_1	1,00	33,91	0,28
S_2	0,55	47,41	0,56
S_3	0,51	54,31	0,34
S_4	0,63	62,07	0,13
S_5	0,81	62,93	0,09
S_6	1,00	67,67	0,00
Kareler toplamı	3,62	18739,27	0,53
Karekök	1,90	136,89	0,73

Çizelge 6.10. Normalize Karar Matrisi

	$Ö_1$	**$Ö_2$**	**$Ö_3$**
S_1	0,53	0,25	0,38
S_2	0,29	0,35	0,77
S_3	0,27	0,40	0,47
S_4	0,33	0,45	0,18
S_5	0,43	0,46	0,12
S_6	0,53	0,49	0,00

Hesaplanan ağırlıklandırılmış normalize matris ile birlikte ideal ve negatif ideal noktalar Çizelge 6.11'de yer almaktadır.

Çizelge 6.11. Ağırlıklandırılmış Normalize Matris ve İdeal/Negatif İdeal Noktalar

	Ö₁	**Ö₂**	**Ö₃**
S₁	0,04	0,01	0,33
S₂	0,02	0,02	0,66
S₃	0,02	0,02	0,40
S₄	0,03	0,02	0,15
S₅	0,04	0,03	0,11
S₆	0,04	0,03	0,00
İdeal	0,02	0,03	0,66
Negatif ideal	0,04	0,01	0,00

Seçeneklerin belirlenen ideal ve negatif ideale olan uzaklık değerleri Çizelge 6.12'de yer almaktadır.

Çizelge 6.12. İdeal ve Negatif İdeale Uzaklık

	D_i^-	D_i^*
S₁	0,33	0,33
S₂	0,66	0,01
S₃	0,40	0,26
S₄	0,15	0,51
S₅	0,11	0,55
S₆	0,01	0,66

Her bir seçeneğe ilişkin göreli yakınlık değerleri ise Çizelge 6.13'te sıralanmıştır.

Çizelge 6.13. TOPSIS Sonucu Elde Edilen Sıralama

Seçenek	C_i^*
S_1	0,50
S_2	0,99
S_3	0,61
S_4	0,23
S_5	0,16
S_6	0,02

Çizelge 6.13'teki göreli yakınlık değerleri büyükten küçüğe sıralandığında elde edilen sıralama en iyiden en kötüye olacak şekilde $S_2>S_3>S_1>S_4>S_5>S_6$ olarak belirlenmiştir. Bu durumda Pareto en iyi çözümler arasından ikinci çözüm, karar verici için en iyi çözüm olarak önerilmektedir. Pareto en iyi çözüm seçenekleri arasında altıncı çözüm ise en sonda yer almaktadır.

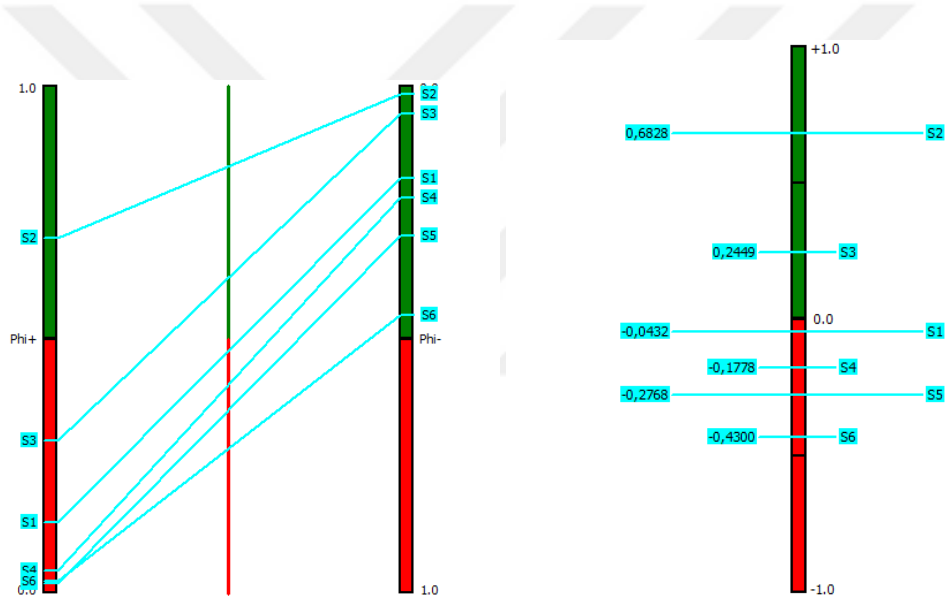
Herhangi bir ağırlıklandırma yöntemi kullanılmamış olsa idi, tüm ölçütlere eşit ağırlık verilerek de ÇÖKV teknikleri uygulanabilirdi. Bu durumda sıralama sonuçlarında herhangi bir değişiklik olup olmayacağını gözlemlemek amacıyla TOPSIS yöntemi bir kez de eşit ağırlıklı (üç ölçüt olması durumunda her bir ölçütün ağırlığı 1/3 olacak şekilde) durum için uygulanmıştır. Bu durumda seçeneklerin sıralaması değişmemiş ve $S_2>S_3>S_1>S_4>S_5>S_6$ şeklinde gerçekleşmiştir.

6.4.4. PROMETHEE ile sıralama

PROMETHE-I kısmi ve PROMETHEE-II tam sıralamaların elde edilmesinde Visual PROMETHEE adlı yazılım kullanılmıştır. Yazılım, fonksiyon tiplerinin, tercih ve farksızlık değerlerinin belirlenmesinde de kullanıcıya öneriler sunarak yardımcı olmaktadır (Dağ ve Yıldırım, 2018). Bu çalışmada belirlenen üç ölçüt için de yazılımın önerdiği doğrusal tercih fonksiyonu ile tercih ve farksızlık değerleri kullanılmıştır. Sıralama sonuçları Çizelge 6.14'te yer almaktadır. Kısmi ve tam sıralama sonuçları ise Şekil 6.8a ve 6.8b'de gösterilmektedir.

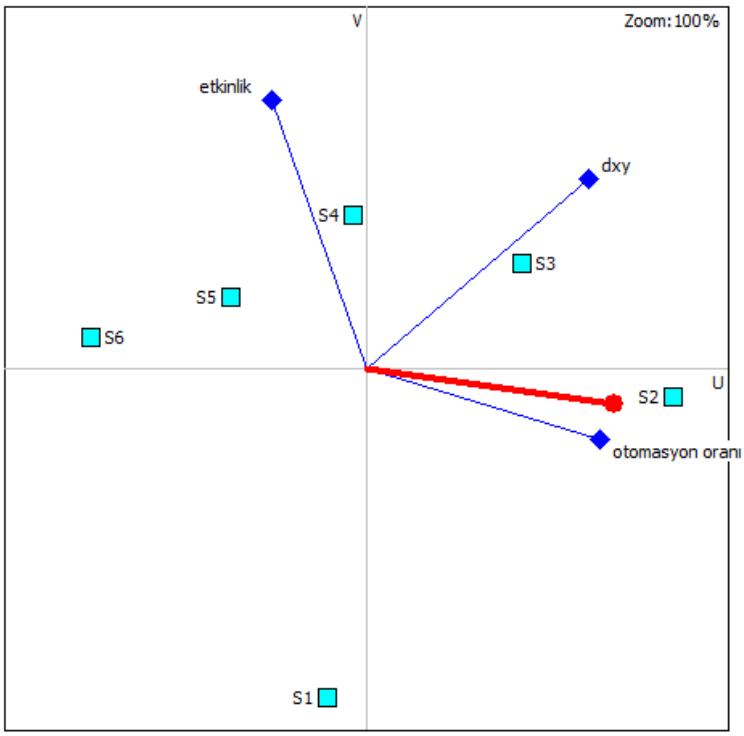
Çizelge 6.14 PROMETHEE Sıralama Sonuçları

Sıra		Ø (Phi)	$Ø^{+}$(Phi +)	$Ø^{-}$(Phi -)
1	S_2	0,68	0,69	0,02
2	S_3	0,24	0,29	0,05
3	S_1	-0,04	0,14	0,18
4	S_4	-0,18	0,04	0,22
5	S_5	-0,28	0,02	0,29
6	S_6	-0,43	0,02	0,45

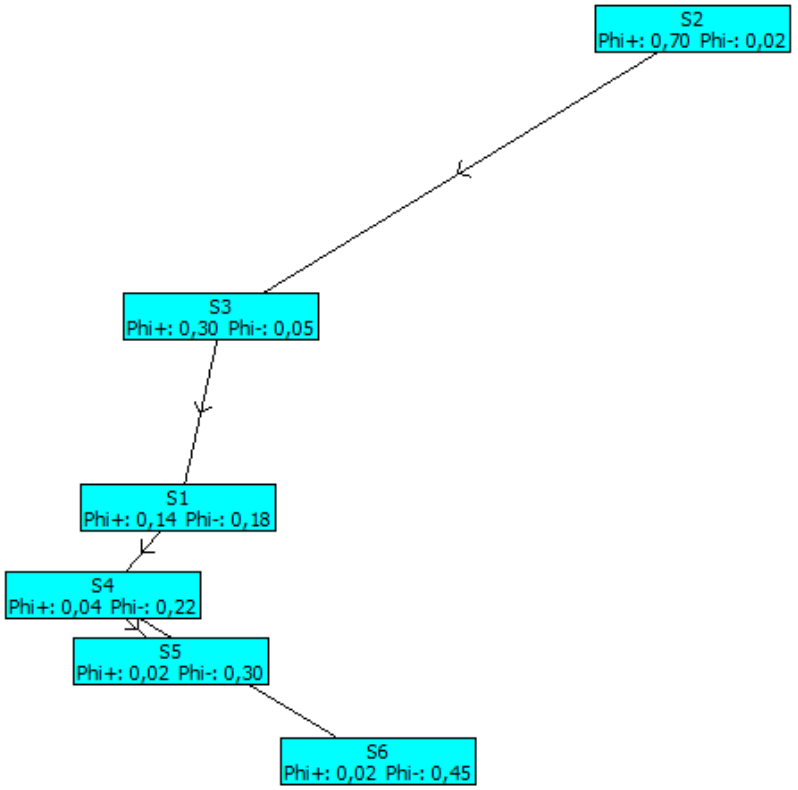


Şekil 6.8.a. PROMETHEE I Kısmi Sıralama b. PROMETHEE II Tam Sıralama

Visual PROMETHEE, kısmi ve tam sıralamaların yanı sıra GAIA düzlemini de sağlamaktadır. GAIA (Geometrical Analysis for Interactive Assistance) düzlemi, karar vericinin yorum yapmasını kolaylaştırmak amacıyla karar probleminin iki boyutlu sunumu olarak ifade edilmektedir (Dağ ve Yıldırım, 2018). GAIA düzlemi ana bileşenler analizinin bir sonucu olarak çok boyutlu bir yapıyı iki boyutlu bir yapıya indirgemektedir (Behzadian vd. 2010). Şekil 6.9'da söz konusu GAIA düzlemi yer almaktadır. Ayrıca Şekil 6.10'da elde edilen çözümün ağ diyagramın da görselleştirilmiştir.



Şekil 6.9. GAIA Düzlemi



Şekil 6.10. Ağ Diyagramı

PROMETHEE yöntemi de TOPSIS yönteminde olduğu gibi ağırlık etkisini gözlemlemek adına eşit ağırlık ile tekrarlanmıştır. Eşit ağırlıklı durumda S_2> S_3> S_4> S_5> S_6 >S_1 sıralaması elde edilmiştir. Bu sıralamada en iyi çözüm önerisi değişmemekle birlikte sıralamada farklılık meydana gelmiştir. Üçüncü sıralamada yer alan S_1 son sıraya gerilemiştir.

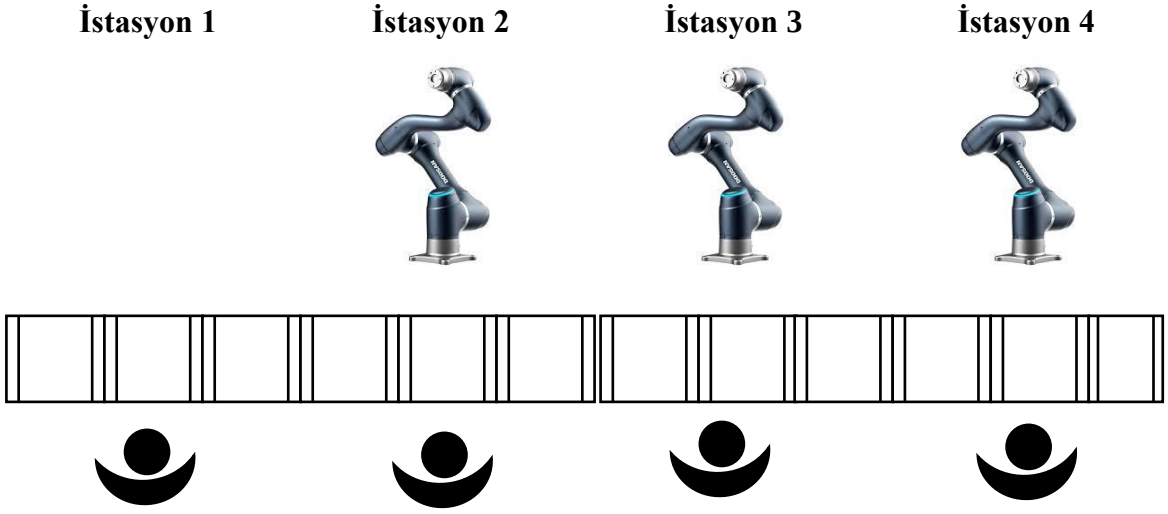
6.4.5. Karar verici için çözüm önerisi

Entropi yöntemi ile belirlenen ağırlıklar ve eşit ağırlıklar kullanılarak TOPSIS ve PROMETHEE ile 28-2-2-1 kodlu test probleminin epsilon kısıt yöntemi sonucu elde edilen altı seçeneğinden hangisinin önerileceğine ilişkin gerçekleştirilen çalışma sonucunda Çizelge 6.15'te görüleceği üzere aynı sıralamalar elde edilmiştir. Sadece eşit ağırlıklı PROMETHEE yönteminde S_1 üçüncü sıradan altıncı sıraya gerilemiştir.

Çizelge 6.15. TOPSIS ve PROMETHEE Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Sıra	**Entopi Tabanlı TOPSIS**	**Eşit Ağırlıklı TOPSIS**	**Entopi Tabanlı PROMETHEE**	**Eşit Ağırlıklı PROMETHEE**
1	S_2	S_2	S_2	S_2
2	S_3	S_3	S_3	S_3
3	S_1	S_1	S_1	S_4
4	S_4	S_4	S_4	S_5
5	S_5	S_5	S_5	S_6
6	S_6	S_6	S_6	S_1

Yapılan tüm analizler neticesinde karar vericiye S_2 önerilmektedir. S2 otomasyon oranının en yüksek olduğu seçenek olmanın yanısıra, ideal noktaya en yakın ikinci seçenektir. Her ne kadar etkinlik değeri yüksek olmasa da ağırlıkları daha yüksek olan iki ölçüt, seçeneği ilk sıraya taşımıştır. Şekil 6.11'de S_2 görselleştirilmiştir. Görüleceği üzere ilk istasyonda işçi türünde işgören çalışırken, diğer üç istasyonda işbirlikçi robot türünde işgören çalışmaktadır. Çizelge 6.16, elde edilen çözümün detaylı bilgilerini içermektedir.



Şekil 6.11. Karar Vericiye Önerilen Çözüm

Çizelge 6.16. Karar Vericiye Önerilen Çözümün Ayrıntıları

İstasyon	İşgören	İşgören Türü	Görev	Görev Süresi	İstasyon süresi	Görev tehlikesi	İstasyon tehlikesi	Görev maliyeti	İstasyon maliyeti
1	8	İşçi	1	8	48	0	1	0,56	5,44
			2	2		0		0,14	
			3	15		0		1,05	
			7	2		0		0,45	
			8	8		0		0,30	
			9	7		0		0,75	
			11	2		0		0,14	
			15	1		0		0,56	
			21	3		1		0,49	
2	21	Cobot	4	3	27	0	1	0,15	5,11
			5	2		0		0,14	
			10	1		0		0,45	
			14	5		0		0,60	
			16	2		1		0,75	
			17	5		0		0,07	
			23	1		0		0,3	
			25	1		0		0,75	
			26	7		0		0,9	
3	25	Cobot	12	3	19	0	2	0,60	3,31
			18	6		1		0,30	
			19	4		0		0,21	
			20	2		0		0,45	
			27	2		0		0,15	
			28	2		1		0,60	
4	11	Cobot	6	5	16	0	1	0,45	2,65

İstasyon	İşgören	İşgören Türü	Görev	Görev Süresi	İstasyon süresi	Görev tehlikesi	İstasyon tehlikesi	Görev maliyeti	İstasyon maliyeti
			13	4		0		0,75	
			22	3		1		0,15	
			24	4		0		0,30	
TOPLAM				110	C=58	TOPLAM	5	TOPLAM	16,51

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Dijital dönüşümün etkisiyle RDHDP konusu üzerinde çalışılmaya başlanmıştır. Bu çalışmalarda genellikle daha az sayıda robotun kullanıldığı ve daha az enerjinin harcandığı durumlar ele alınmaktadır. Diğer taraftan DHD yazınında heterojen işçilerin varlığı da yeni çalışılmaya başlanan diğer bir konudur. Bu çalışmada söz konusu çalışmalardan farklı olarak öncelikle literatürde ilk kez heterojen işçi, robot ve işbirlikçi robotlardan oluşan işgörenlerin varlığında DHDİAP'nin eş zamanlı çözümü üzerinde çalışılmıştır. İşbirlikçi robotların modele dâhil edilmesi robotların yapamadığı işlerde hattın otomasyonuna izin vermektedir.

Ayrıca çalışma amaç fonksiyonları açısından da literatürdeki çalışmalardan ayrışmaktadır. Çalışma kapsamında geliştirilen iki amaçlı tamsayılı modelde ilk amaç istasyon açma ve işgören maliyetlerinin toplamının en küçüklenmesi iken, ikinci amaç ergonomik faydanın en büyüklenmesidir. İkinci amaç fonksiyonunda yer alan ergonomik faydanın en büyüklenmesi, çevresel ve bireysel ergonomik risklerden kaynaklı işçiye yönelik tehlikenin en küçüklenmesi şeklinde ifade edilmiştir. Bu iki amaç birbirleriyle çelişen amaçlardır. Zira en yüksek maliyetli işgören seçeneği olan robotlarla çalışılması durumunda insana yönelik tehlike en küçüklenmektedir. Dijital dönüşümün de etkisiyle tekrarlı ve işçiler için tehlikeli işlerin yerini robotların alması veya işbirlikçi robotların işçilere destek olması konusu üzerinde daha çok çalışılmaktadır. İşbirlikçi robotların modele dâhil olması bu noktada da hem maliyet hem de ergonomik katkı noktasında orta yol olması açısından önemlidir. İki amaçlı modelin çözümünde epsilon kısıt yöntemi kullanılmıştır.

Tam faktör deney tasarımından yararlanılan çalışmada görev sayısı, işçi sayısı ve görev süreleri arası değişkenlik olmak üzere üç faktör belirlenmiştir. Her faktörün iki düzeyli olduğu ve 3 tekrarlı olarak gerçekleştirilmesi durumunda 24 test problemi rassal olarak türetilmiştir. Epsilon kısıt yönteminde ideal ve nadir noktaların belirlenmesinde Ehrgott (2005) tarafından iki amaçlı modeller için önerilen algoritmadan yararlanılmıştır. Bu aşamada 96 kez model çalıştırılmış ve her bir test problemi ve her iki amaç için ideal ve nadir noktalar belirlenmiştir. Buradan elde edilen sonuçlarla her bir test problemi için belirlenen epsilon değerlerinden hareketle 125 kez epsilon kısıt modeli çalıştırılmış ve Pareto en iyi sonuçlar elde edilmiştir. Elde edilen çözümlerde her bir amaç fonksiyonunun aldığı

değerler ve çözüm süresinin yanısıra etkinlik yüzdeleri de belirtilmiştir. Ayrıca çözümlerin performansının göstergesi olan ideal noktaya uzaklık değerleri de hesaplanmıştır.

Deney tasarımı sonucunda elde edilen çözüm süresi değerleri üzerinde hangi faktörlerin istatistiksel olarak anlamlı düzeyde etkiye sahip olduğu ANOVA testi ile incelenmiş olup tüm faktörlerin (görev sayısı, işçi sayısı ve görev süreleri arası değişkenlik) etkili olduğu tespit edilmiştir. Faktörlerin birleşik etkileri incelendiğinde ise sadece görev sayısı ile işçi sayısının birleşik etkisinin istatistiksel olarak anlamlı olduğu belirlenmiştir. Üstelik bu birleşik etki görev süreleri arasındaki değişkenlikten daha etkili olmuştur. Diğer taraftan görev sayısı ile görev süreleri arası değişkenliğin ve işçi sayısı ile görev süreleri arası değişkenliğin birleşik etkisinin istatistiksel olarak anlamlı olmadığı tespit edilmiştir.

Ayrıca epsilon kısıt yöntemi sonucunda türetilen Pareto en iyi çözümler arasından hangi çözümün seçilmesi gerektiğine dair karar vericiye yol gösterilmesi amacıyla ÇÖKV tekniklerine dayalı bir yöntem geliştirilmiştir. Söz konusu yöntemde ölçütlerin ağırlıklarının belirlenmesi için nesnel bir ağırlıklandırma yöntemi olan entropi yöntemi tercih edilmiştir. Pareto en iyi çözümlerin sıralanması için ise TOPSIS ve PROMETHEE yöntemlerinden faydalanılmıştır. Bu kapsamda öncelikle ölçütler belirlenmiştir. Söz konusu ölçütlerden ilki çok amaçlı çözümün performansının değerlendirilmesi için kullanılan ideal noktaya uzaklık değeridir. İkinci ölçüt atama sonucu hesaplanan hattın etkinlik yüzdesi iken, üçüncü ölçüt olarak otomasyon oranı olarak yeni bir ölçüt önerilmiştir. Otomasyon oranı, robot ve işbirlikçi robotlara atanan görevlerin süre toplamının, tüm işgörenlere atanan görevlerin süre toplamına oranlanması ile elde edilmiştir. Entropi ağırlıklandırma sonuçlarına göre en yüksek ağırlığa sahip ölçüt otomasyon oranı, en düşük ağırlığa sahip ölçüt ise istasyon sayısı olarak belirlenmiştir. Elde edilen ağırlık değerleri TOPSIS ve PROMETHEE yöntemlerinde seçeneklerin sıralanmasında kullanılmıştır.

Çalışmanın sonuçları sürdürülebilirlik, döngüsel ekonomi ve özellikle demontaj hatlarının dengelenmesi konusunda çalışan araştırmacılar için faydalı sonuçlar içermektedir. Zira çok amaçlı programlama sayesinde farklı işgören tiplerinin, farklı etkinlik yüzdelerinde ve farklı otomasyon oranlarında atamalarına ilişkin çözüm zenginliği sağlamaktadır. Ayrıca modelin kısa sürede çözüm elde edebilecek sade bir şekilde tasarlanması ve karar vericiye

yardımcı olmak için geliştirilen yöntem de katkısı ile bu alanda çalışan uygulamacılar için de yararlı olacaktır.

Güncel anlamda ürün tasarımında insan ve robotların işbirliği durumunda montajın kolay yapılabilirliğine ilişkin çalışmalar gerçekleştirilmeye başladığı görülmektedir (Malik ve Bilberg, 2019). Demontajın insan ve robot işbirliğinde daha kolay yapılabilmesini sağlayacak ürün tasarımlarına da ihtiyaç vardır.

Çalışmanın temel sınırlılığı hipotetik veriler ile çalışmak olup, geliştirilen model gelecek çalışmalarda gerçek hayat problemleri üzerinde uygulanabilir. Ayrıca işçilerin hem bireysel hem de işbirlikçi robot ile çalışmaları durumunda öğrenme/unutma etkisi de dikkate alınabilir. Çok amaçlı modelin en iyilenmesi noktasında farklı skalerleştirme tekniklerinin kullanılması da diğer bir gelecek çalışma önerisidir. Ayrıca karar vericiye yardımcı olmak için hem ağırlıklandırma hem de sıralama amacıyla farklı ÇÖKV tekniklerinin kullanımı da mümkündür. Söz konusu ÇÖKV tekniklerinde ilave ölçütler de dâhil edilebilir durumdadır. Ayrıca çözüm süresi üzerine etkisi olabilecek pratik ve teorik ölçütler de eklenebilir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Agrawal, S., Tiwari, M. K., 2008, A collaborative ant colony algorithm to stochastic mixed-model U-shaped disassembly line balancing and sequencing problem, International Journal of Production Research, 46 (6), 1405-1429.

Al-Hawari T, Ali M, Al-Araidah O, Mumani A. 2015, Development of a genetic algorithm for multi-objective assembly line balancing using multiple assignment approach. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 77(5/6/7/8): 1419–1432.

Alkan, M. A., 2021, https://www.endustri40.com/cobotlar-endustri-4-0-robotlari/, erişim tarihi: 01.07.2021Altekin, F.T., Kandiller, L., Ozdemirel. N.E. 2004, Disassembly line balancing with limited supply and subassembly, Environmentally Conscious Manufacturing, 59

Altekin, F. T., Kandiller, L., Ozdemirel, N. E., 2008, Profit-oriented disassembly-line balancing, International Journal of Production Research, 46 (10), 2675-2693.

Altekin, F. T., Akkan, C., 2012, Task-failure-driven rebalancing of disassembly lines, International Journal of Production Research, 50 (18), 4955-4976.

Altekin, F. T., Bayindir, Z. P., Gumuskaya, V., 2016, Remedial actions for disassembly lines with stochastic task times, Computers & Industrial Engineering, 99, 78-96.

Altekin F.T. 2017, A comparison of piecewise linear programming formulations for stochastic disassembly line balancing, International Journal of Production Research 55 (24), 7412-7434

Anonim, 2018, https://www.apple.com/tr/newsroom/2018/04/apple-adds-earth-day-donations-to-trade-in-and-recycling-program/, erişim tarihi: 01.07.2021

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.

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.

Aydemir-Karadağ, A., Turkbey, O., 2013, Multi-objective optimization of stochastic disassembly line balancing with station paralleling, Computers & Industrial Engineering, 65 (3), 413-425.

Azadfallah, M. 2017, Influence of the Different Measurement Scale and Normalizatıon Method on Results in TOPSIS, NJSIT, 10 (1), 81-90.

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

Bentaha, M. L., Battaia, O., Dolgui, A., 2014, A sample average approximation method for disassembly line balancing problem under uncertainty, Computers & Operations Research, 51, 111-122.

Bentaha, M. L., Battaia, O., Dolgui, A., 2015a, An exact solution approach for disassembly line balancing problem under uncertainty of the task processing times, International Journal of Production Research, 53 (6), 1807-181.Bentaha, M. L., Battaia, O., Dolgui, A., 2015b, Second order conic approximation for disassembly line design with joint probabilistic constraints, European Journal of Operational Research, 247 (3), 957-967.

Behzadian, M., Kazemzadeh, R. B., Albadvi, A., Aghdasi, M., 2010, PROMETHEE: A comprehensive literature review on methodologies and applications, European Journal of Operational Research, 200, 198–215.

Behzadian, M.S., Otaghsara, K. Yazdani, M. and Ignatius, J. 2012, A state-of the-art survey of TOPSIS applications, Expert Systems with Applications, 39, pp. 13051–13069.

Bogue, R. 2019, Robots in recycling and disassembly, Industrial Robot: the International Journal of Robotics Research And Application, 46 (4), 461–466.

Brans, J. P., Vincke, P. 1985, A Preference Ranking Organisation Method: (The PROMETHEE Method for Multiple Criteria Decision-Making, Management Science, 31 (6), 647-656.

Bruecker, P. Bergh, J. Beliën J. Demeulemeester E. 2015, Workforce planning incorporating skills: State of the art, European Journal of Operational Research, vol. 243, issue 1, 1-16

Budak A, 2020, Sustainable Reverse Logistics Optimization with Triple Bottom Line Approach: An Integration of Disassembly Line Balancing, Journal of Cleaner Production, 270, 122475, https:// doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122475.

Chakraborty, S., Yeh, C. H. 2009, A Simulation Comparison of Normalization Procedures for TOPSIS, IEEE, 1815-1820.

Chen, W.H., Wegener, K., Dietrich, F. 2014, A robot assistant for unscrewing in hybrid human-robot disassembly,Proceedings of the 2014 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics,December 5-10, Bali, Indonesia.

Cheng, H., Xua, W., Ai, Q., Liu, Q. Zhou, Z., Pham, D. T. 2017, Manufacturing Capability Assessment for Human-Robot Collaborative Disassembly based on Multi-Data Fusion, Procedia Manufacturing, 10, 26 – 36.

Çengil M. F., 2018, Heuristic approaches for assembly line balancing and competent worker assignment problem (ALWABP), Thesis (M.A.)--Özyeğin University, Graduate School of Sciences and Engineering, Department of Industrial Engineering

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

Çevikcan, E., Aslan, D., Yeni, F. B. 2020, Disassembly line design with multi-manned workstations: A novel heuristic optimisation approach, International Journal of Production Research, 58 (3):649-670.

Çil, Z. A., Li, Z., Mete, S., Özceylan, E. 2020a, Mathematical model and bee algorithms for mixed-model assembly line balancing problem with physical human–robot collaboration, Applied Soft Computing Journal, 93,106394.

Çil, Z.A., Mete, S., Serin, F. 2020b, Robotic disassembly line balancing problem: A mathematical model and ant colony optimization , Applied Mathematical Modelling, 86, 335–348.

Dağ, S., Yıldırım, B. F. 2018. PROMETHEE, (Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri içinde (Ed. Yıldırım B. F., Önder, E.), Dora Yayınevi: Bursa.

Deniz, N., Özçelik, F., 2019a, 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., Özçelik, F., 2019b, A Solution Approach Proposal for Disassembly Line Balancing Based on ELECTRE, Alphanumeric Journal, 7 (2).

Demirkol Akyol S.,·Baykasoğlu A. 2019, A multiple-rule based constructive randomized search algorithm for solving assembly line worker assignment and balancing problem, J Intell Manuf, 30, 557–573.

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.

Dinler E. 2015, Tehlikeli ve patlayıcı madde içeren ürünlerin geri dönüşümü için bulanık çok amaçlı planlama, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara.

Diri Kenger, Z., Koç, Ç. , Özceylan, E. 2020, Integrated disassembly line balancing and routing problem, International Journal of Production Research, 1-19. https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1740346.

Edis, E. B. 2021, Constraint programming approaches to disassembly line balancing problem with sequencing decisions, Computers and Operations Research, 126, 105111.

Efe, B., Okudan Kremer, G. E., Kurt M. 2018, Age and gender-based workload constraint for assembly line worker assignment and balancing problem in a textile firm, International Journal of Industrial Engineering, 25 (1), 1-17,

Ehrgott, M. 2005, Multicriteria Optimization, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

Fang, Y., Liu Q., Li M., Laili Y. Pham D. T. 2019, Evolutionary many-objective optimization for mixed-model disassembly line balancing with multi-robotic workstations, European Journal of Operational Research, 276, 160–174.

Fang, Y. Ming, H. Li, M. Liu Q. & Pham D.T. 2020a, Multiobjective evolutionary simulated annealing optimisation for mixed-model multi-robotic disassembly line balancing with interval processing time, International Journal of Production Research, 58, 3, 846-862.

Fang, Y. Xu, Y. H., Pham, D. T. 2020b, Evolutionary optimization using epsilon method for resource-constrained multi-robotic disassembly line balancing, Journal of Manufacturing Systems, 56, 392–413.

Fang, Y. Xu, H. 2020c, Constraint Handling Methods for Resource-Constrained Robotic Disassembly Line Balancing Problem, J. Phys.: Conf. Ser. 1576 012039. doi:10.1088/1742-6596/1576/1/012039

Floritos, K., Mavrotas, G. 2014, Generation of the exact Pareto set in Multi-Objective Traveling Salesman and Set Covering Problems, Applied Mathematics and Computation, 237, 1–19.

Gao, K.Z., He, Z.M., Huang, Y., Duan, P.Y., Suganthan, P.N. 2020, A survey on meta-heuristics for solving disassembly line balancing, planning and scheduling problems in remanufacturing, Swarm and Evolutionary Computation, 57, 100719.

Göksoy, E., 2010, Disassembly line balancing problem with fixed number of workstations and finite supply, Master of Science, Middle East Technical University, Ankara.

Gungor A, Gupta S.M. 1999, Disassembly line balancing. Proceedings of the 1999 Annual Meeting of the Northeast Decision Sciences Institute. 193–5.

Gungor, 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

Güngör, A., Gupta, S.M., 2002, Disassembly line in product recovery, International Journal of Production Research, 40 (11), 2569-2589.

Gümüşkaya, V., 2013, Profit-oriented disassembly line balancing with stochastic task times in hybrid lines, Master of Science, Middle East Technical University, Ankara.

Hashemi-Petroodi S. E., Thevenin, S., Kovalev, S., Dolgui, A. 2020, Operations management issues in design and control of hybrid human-robot collaborative manufacturing systems: a survey, Annual Reviews in Control, 49, 264–276.

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

He, J. Chu, F. Zheng, F., Liu, M. 2020a, A green-oriented bi-objective disassembly line balancing problem with stochastic task processing times, Annals of Operations Research https://doi.org/10.1007/s10479-020-03558-z

He, J. Chu, F. Zheng, F., Liu, M., Chu, C. 2020b, A multi-objective distribution-free model and method for stochastic disassembly line balancing problem, International Journal of Production Research, 58 (18), 5721–5737.

Hezer, S., Kara, Y., 2015, A network-based shortest route model for parallel disassembly line balancing problem, International Journal of Production Research, 53 (6), 1849-1865.

Hwang, C.L. and Yoon, K. 1981, Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications, New York: Springer-Verlag.

Igarashi, K., Yamada, T., Gupta, S. M., 2016, Disassembly system modeling and design with parts selection for cost, recycling and CO2 saving rates using multi criteria optimization, Journal of Manufacturing Systems, 38, 151-164.

Ilgın, M. A., Akcay, H., Araz, C., 2017, Disassembly line balancing using linear physical programming, International Journal of Production Research, 55 (20), 6108-6119.

Ilgın, M.A. (2018) A DEMATEL-Based Disassembly Line Balancing Heuristic, Journal of Manufacturing Science Engineering, 141 (2).

Ilgın, M. A., 2010, Kanban-controlled disassembly line with sensor embedded products, Doctor of philosophy, Northeastern University, Boston, Massachusetts.

İmat, S. 2014, Workload Smooting in Assembly Lines, Master of science, Middle East Technical University, Ankara.

Kalaycı, C. B., Gupta, S. M., 2013a, Artificial bee colony algorithm for solving sequence-dependent disassembly line balancing problem, Expert Systems with Applications, 40 (18), 7231-7241.

Kalaycı, C. B., Gupta, S. M., 2013b, 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.

Kalayci, C.B., Gupta S.M., 2013c, Artificial bee colony algorithm for solving sequence-dependent disassembly line balancing problem, Expert Systems with Applications 40 (18), 7231-7241

Kalaycı, C. B., Gupta, S. M. A., 2014, Tabu search algorithm for balancing a sequence-dependent disassembly line, Production Planning & Control, 25 (Special Issue), 149-160.

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

Kalaycı, C. B., Hancilar, A., Güngör, A., 2015a, Multi-objective fuzzy disassembly line balancing using a hybrid discrete artificial bee colony algorithm, Journal of Manufacturing Systems, 37 (Special Issue), 672-682.

Kalaycı, C. B., Polat, O., Gupta, S. M., 2015b, A variable neighbourhood search algorithm for disassembly lines, Journal of Manufacturing Technology Management, 26 (Special Issue), 182-194.

Kalaycı, C. B., Polat, O., Gupta, S. M., 2016, A hybrid genetic algorithm for sequence-dependent disassembly line balancing problem, Annals of Operations Research, 242 (2), 321-354.

Kalaycılar, E. G., Azizoglu, M., Yeralan, S., 2016, A disassembly line balancing problem with fixed number of workstations, European Journal of Operational Research, 249 (2), 592-604.

Kaipu, W., Xinyu, L., Liang, G., Garg, A. 2019, Partial disassembly line balancing for energy consumption and profit under uncertainty. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 59, 235–251.

Kannan, D., Garg, K., Jha, P. C., 2017, Integrating diassembly line balancing in the planning of a reverse logistics network from the perspective of a third party provider, Annals of Operations Research, 253 (1), 353-376.

Karami A, Johansson R. 2014, Utilization of multi attribute decision making techniques to integrate automatic and manual ranking of options. J Inf Sci Eng, 30: 519-534.

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

Kazancoglu Y. Ozkan-Ozen Y.D. (2020) Sustainable disassembly line balancing model based on triple bottom line, International Journal of Production Research, 58 (14), 4246-4266, DOI: 10.1080/00207543.2019.1651456

Koç, 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.

Kökhan, S. 2020, Farklı Tipte İşgücüne Sahip Maliyet Yönelimli Paralel Montaj Hattı Dengeleme Problemi İçin Modelleme ve Çözüm Yaklaşımları, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Kökhan, S. Baykoç, Ö.F., İşleyen, S.K. 2020, Heterojen İşgücüne Sahip Paralel Montaj Hatları İçin Maliyet Yönelimli Matematiksel Bir Model ve Sezgisel Bir Yaklaşım, Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi, 8 (2), 418-431.

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

Kulkarni, H. M., 2010, Reinforcement learning approach for disassembly, Master of science, Northeastern University, Boston, Massachusetts.

Küçükkoç, I. 2020, Balancing of two sided disassembly lines: Problem definition, MILP model and genetic algorithm approach, Computers and Operations Research, 124, 105064.

Küçükkoç, I., Li,·Z. Li, Y. 2020, Type-E disassembly line balancing problem with multi-manned workstations, Optimization and Engineering, 21, 611–630.

Laili, Y., Lia, Y., Fang, Y., Pham, D.T., Zhang, L. 2020, Model review and algorithm comparison on multi-objective disassembly line balancing, Journal of Manufacturing Systems, 56, 484–500.

Lambert, A. J. D., Gupta, S. N., 2005, Disassembly Modeling for Assembly, Maintenance, Reuse, and Recycling, CRC Press.

Li, J., Chen, X., Zhu, Z., Yang, C., Chu, C. 2019a, A branch, bound, and remember algorithm for the simple disassembly line balancing problem, Computers and Operations Research, 105 47–57.

Li, J., Barwood, M., Rahimifard S., 2019b, A multi-criteria assessment of robotic disassembly to support recycling and recovery, Conservation & Recycling Resources, Conservation & Recycling, 140, 158–165.

Liang, J., Guo, S., Du, B., Li, Y., Guo, J., Yang, Z., Pang, S. 2021, Minimizing energy consumption in multi-objective two-sided disassembly line balancing problem with complex execution constraints using dual-individual simulated annealing algorithm, Journal of Cleaner Production, 284, 125418.

Liu, M., Liu, Z. Liu, X., Chu, F. 2019a, Entropy-based bi-objective disassembly line balancing problem International Conference on Industrial Engineering and Systems Management (IESM 2019), Shanghai, China. 156681.

Liu, Q., Liu, Z., Xu, W. Tang, Q. Zhou, Z., Pham D. T. 2019b, Human-robot collaboration in disassembly for sustainable manufacturing, International Journal of Production Research, 57 (12), 4027-4044.

Liu, B., Xu, W., Liu, J. Yao, B. Zhou, Z. Pham D. T. 2019c, Human-robot collaboration for disassembly line balancing problem in remanufacturing, ASME 2019 14th International Manufacturing Science and Engineering Conference, MSEC 2019 ISBN: 0-7918-5874-X, 978-0-7918-5874-5.

Liu, J., Zhou, Z., Pham D. T., Xu W., Yan J., Liu A., Ji, C., Liu, Q., 2018, An improved multi-objective discrete bees algorithm for robotic disassembly line balancing problem in remanufacturing, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 97:3937–3962

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

Liu, J., Wang, S., 2017, Balancing disassembly line in product recovery to promote the coordinated development of economy and environment, Sustainability, 9, 2.

Liu, J., Zhou, Z., Pham, D. T. Xu, W. Ji, C., Liu, Q. 2020a, Collaborative optimization of robotic disassembly sequence planning and robotic disassembly line balancing problem using improved discrete Bees algorithm in remanufacturing, Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 61,101829.

Liu, M., Liu, X., Chu, F., Zheng, F. & Chu, C. 2020b, An exact method for disassembly line balancing problem with limited distributional information, International Journal of Production Research, DOI: 10.1080/00207543.2019.1704092.

Liu, M., Liu, X., Chu, F., Zheng, F. & Chu, C. 2020c, Robust disassembly line balancing with ambiguous task processing times, International Journal of Production Research, 58 (19), 5806-5835.

Liu, J., Zhou, Z., Pham, D.T., Xu, W., Cui, J., Yang, C. 2020d, Service Platform for Robotic Disassembly Planning in Remanufacturing, Journal of Manufacturing Systems, 57, 338–356.

Liu, X., Chu, F., Zheng, F., Chu, C., Liu M. 2021, Distributionally robust and risk-averse optimisation for the stochastic multi-product disassembly line balancing problem with workforce assignment, International Journal of Production Research, DOI:10.1080/00207543.2021.1881648.

Lokman, B. 2017, Çok Amaçlı Tamsayı Programlama Problemleri İçin Temsili Çözüm Üreten Yaklaşımların ve Kalite Ölçülerinin İncelenmesi, Endüstri Mühendisliği Dergisi, 28 (1), 19-39.

Malik, A. A., Bilberg, A. 2019, Complexity-based task allocation in human-robot collaborative assembly, Industrial Robot: The International Journal of Robotics Research and Application, 46, 4471–480.

Mavrotas, G. 2009 Effective implementation of the e-constraint method in Multi-Objective Mathematical Programming problems Applied Mathematics and Computation 213 455–465.

McGovern, S.M. and Gupta, S.M. 2005, Uninformed and probabilistic distributed agent combinatorial searches for the unary NP–complete disassembly line balancing problem. In Proc. SPIE 5997, Environmentally Conscious Manufacturing V, 59970B.

McGovern, S. M., Gupta, S.M., 2006, Ant colony optimization for disassembly sequencing with multiple objectives, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 30 (5-6), 481-496.

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

Mcgovern, S. M., Gupta, S. M., 2007a, Combinatorial optimization analysis of the unary NP-complete disassembly line balancing problem, International Journal of Production Research, 45 (18-19), 4485-4511.

McGovern, S. M., Gupta, S. M., 2007b, 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., 2011, The Disassembly Line- Balancing and Modeling, Mc Graw Hill.

McGovern, S. M., Gupta, S. M., 2015, Unified assembly- and disassembly-line model formulae, Journal of Manufacturing Technology Management, 26 (Special Issue), 195-212.

Meng, W., Zhang, X. 2020, Optimization of Remanufacturing Disassembly Line Balance Considering Multiple Failures and Material Hazards Sustainability, 1-16. doi:10.3390/su12187318.

Mete, S., Cil, Z. A., Agpak, K., Özceylan, E., Dolgui, A. 2016, A solution approach based on beam search algorithm for disassembly line balancing problem, Journal of Manufacturing Systems, 41, 188-200.

Mete, S., Çil, Z.A., Özceylan, E., Ağpak, K. 2016, Resource constrained disassembly line balancing problem. IFAC-PapersOnLine, 49 (12), 921-925.

Minca, E., Filipescu, A., Voda, A., 2014, Modelling and control of an assembly/disassembly mechatronics line by mobile robot with manipulator, Control Engineering Practice, 31 (Special Issue), 50-62.

Miralles C, Garcia-Sabater JP, Andres C, Cardos M, 2008. Branch and bound procedures for solving the assembly line worker assignment and balancing problem: Application to sheltered work centers for disabled. Discrete Applied Mathematics. 156 (3): 352– 367.

Mohammed, A., Harris, I. and Abdulsalam, D. 2019, A trasilient decision making tool for vendor selection: a hybrid-MCDM algorithm, Management Decision, 57 (2), pp. 372-395

Mura M.D.,·Pistolesi, F., Dini, G. Lazzerini, B. 2020, End-of-life product disassembly with priority-based extraction of dangerous parts, Journal of Intelligent Manufacturing, https://doi.org/10.1007/s10845-020-01592-z

Mutlu, Ö. Özgörmüş, E. 2012, A fuzzy assembly line balancing problem with physical workload constraints, International Journal of Production Research 50 (18), 5281-5291

Özceylan, E., Paksoy, T., 2013, Reverse supply chain optimisation with disassembly line balancing, International Journal of Production Research, 51 (20), 5985-6001.

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

Özceylan, E., Paksoy, T., 2014a, Fuzzy mathematical programming approaches for reverse supply chain optimization with disassembly line balancing problem, Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 26 (4), 1969-1985.

Özceylan, E., Paksoy, T., 2014b, Interactive fuzzy programming approaches to the strategic and tactical planning of a closed-loop supply chain under uncertainty, International Journal of Production Research, 52 (8), 2363-2387.

Özceylan, E., Paksoy, T., Bektas, T., 2014, Modeling and optimizing the integrated problem of closed-loop supply chain network design and disassembly line balancing, Transportation Research Part e-Logistics and Transportation Review, 61, 142-164.

Özceylan, E., Kalaycı, C. B., Güngor, A., & Gupta, S. M. 2019, Disassembly line balancing problem: a review of the state of the art and future directions. International Journal of Production Research

Özceylan, E., 2013, Demontaj hattı dengeleme problemi içeren kapalı çevrim tedarik zincirlerinin bulanık ortamda modellenmesi ve optimizasyonu, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi, Konya.

Özcan U., 2009, Çift taraflı montaj hattı dengeleme problemleri için yeni çözüm önerileri, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Paksoy, T., Güngör, A., Özceylan, E., Hancılar, A. 2013, Mixed model disassembly line balancing problem with fuzzy goals, International Journal of Production Research, 51 (20), 6082-6096.

Paksoy, S. 2017, Çok Kriterli Karar Vermede Güncel Yaklaşımlar, Karahan Kitabevi: Adana.

Prakash, A., M. K. Tiwari. 2005. Solving a Disassembly Line Balancing with Task Failure a Psycho-Clonal Algorithm. In Proceedings of the ASME International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, 393–399, Long Beach, CA

Poschmann, H. Bruggemann, H. & Goldmann, D. 2020, Disassembly 4.0: A Review on Using Robotics in Disassembly Tasks as a Way of Automation Chem. Ing. Tech., 92, No. 4, 341–359.

Priyono, A., Ijomah, W. Bititci, U.S. 2016, Disassembly for remanufacturing: A systematic literature review, new model development and future research needs, Journal of Industrial Engineering and Management (JIEM), 9 (4), 899-932.

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.

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

Ren, Y., Yu, D. Zhang, C. Tian, G. Meng, L. Zhou, X. 2017, An improved gravitational search algorithm for profit-oriented partial disassembly line balancing problem, International Journal of Production Research 55 (24) 7302- 7316.

Renteria, A., Alvarez-de-los-Mozos, E. 2019, Human-Robot colloboration as a new paradigm in circular economy for WEE management, Procedia Manufacturing, 38, 375-382.

Riggs, R.J., Battaia, O., Hu, S. J., 2015, Disassembly line balancing under high variety of end of life states using a joint precedence graph approach, Journal of Manufacturing Systems, 37 (Special Issue), 638-648.

Roblek V., Meško, M. Krapež, A. 2016, A Complex View of Industry 4.0, SAGE Open, 1–11.

Seidi, M., Saghari, S., 2016, The balancing of disassembly line of automobile engine using genetic algorithm (GA) in fuzzy environment, Industrial Engineering and Management Systems, 15 (4), 364-373.

Shannon, C.E., 1948, A Mathematical Theory of Communication, The Bell System Technical Journal, 27, 379–423.

Singh, M., Pant, M., Godiyal, R.D., et al. 2020, MCDM approach for selection of raw material in pulp and papermaking industry. Mater Manuf Process. 35, 241-249.

Şimşek, E. 2018, Bi-objective assembly line re-balancing problem with equipment assignment. Yüksek Lisans Tezi, İzmir Ekonomi Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.

Sungur, B. Yavuz, 2015, Assembly line balancing with hierarchical worker assignment, Journal of Manufacturing Systems, 37(1):290-298 10.1016/j.jmsy.2014.08.004

Tang, Y., Zhou, M. C., 2006, A systematic approach to design and operation of disassembly lines, IEEE Transactions on Automation Scıence and Engineering, 3 (3), 324-330.

Thais, A.R. Santos, M. B. G. Ronildo, O. O. 2017, Occupational risks in the Disassembly, Transportation and Reassembly (DTR) operations of drilling probes, CRC Press eBook ISBN9781315164809

Thuemmler C., Bai C. 2017, Chapter 2: Health 4.0: Application of Industry 4.0 Design Principles in Future Asthma Management in Health 4.0: How Virtualization and Big Data are Revolutionizing Healthcare 2017 Editors: Thuemmler, C., Bai**,** C. (Eds.) Springer.

Tuncel, E., Zeid, A., Kamarthi, S., 2014, Solving large scale disassembly line balancing problem with uncertainty using reinforcement learning, Journal of Intelligent Manufacturing, 25 (4), 647-659.

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

Wang, T.C., Lee, H.D. 2009, Developing a fuzzy TOPSIS approach based on subjective weights and objective weights. Expert Systems with Applications; 36:8980-8985.

Wang, K., Li, X., Gao, L. 2019, Modeling and optimization of multi-objective partial disassembly line balancing problem considering hazard and profit, Journal of Cleaner Production 211, 115-133.

Wang, K., Gao, L., Li, X. 2020a, A multi-objective algorithm for U-shaped disassembly line balancing with partial destructive mode, Neural Computing and Applications

Wang, K., Li, X., Gao, L., Li, P. 2020b, Energy consumption and profit-oriented disassembly line balancing for waste electrical and electronic equipment, Journal of Cleaner Production 265, 121829

Wang, K.·Li, X. Gao, L.·Li, P.2020c, Modeling and Balancing for Green Disassembly Line Using Associated Parts Precedence Graph and Multi-objective Genetic Simulated Annealing, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, https://doi.org/10.1007/s40684-020-00259-7.

Weckenborg, C., Kieckhafer, K., Muller, C., Grunewald, M., Spengler, T.S. 2020, Balancing of assembly lines with collaborative robots Business Research, 13, 93–132

Xiao, S., and S.-K. Nie. 2017. An Improved Adaptive Multi-Objective Particle Swarm Optimization for Disassembly Line Balancing Problem. International Journal of Research in Engineering and Science 5 (5): 55–61

Xiao, Q., Guo X. & Li D. 2020, Partial disassembly line balancing under uncertainty: robust optimisation models and an improved migrating birds optimisation algorithm, International Journal of Production Research, DOI: 10.1080/00207543.2020.1744765

Yang, Y., Yuan, G., Zhuang, Q., Tian, G. 2019, Multi-objective low-carbon disassembly line balancing for agricultural machinery using MDFOA and fuzzy AHP, Journal of Cleaner Production, 233, 1465-1474.

Yılmaz, Ö.F., Yazıcı, B. 2021, Tactical level strategies for multi-objective disassembly line balancing problem with multi-manned stations:An optimization model and solution approaches, Annals of Operations Research.

Yuan, G., Yang, Y., Pham, D. T. 2020, Multiobjective ecological strategy optimization for two-stage disassembly line balancing with constrained-resource, IEEE Access Special Section on Intelligent Logistics Based on Big Data, 88745- 88758 10.1109/ACCESS.2020.2994065

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

Zheng, F., He, J., Chu, F., Liu, M. 2018, A new distribution-free model for disassembly line balancing problem with stochastic task processing times, International Journal of Production Research, 56:24, 7341-7353.

Zhu, L., Zhang Z., Wang Y. 2018, A Pareto firefly algorithm for multiobjective disassembly line balancing problems with hazard evaluation, International Journal of Production Research, 56:24, 7354-7374.

Zhu, L., Zhang,·Z., Wang, Y. Cai, N. 2020a, On the end-of-life state oriented multi-objective disassembly line balancing problem, Journal of Intelligent Manufacturing, (Inpress)

Zhu, L., Zhang, Z., Guan,C. 2020b, Multi-objective partial parallel disassembly line balancing problem using hybrid group neighborhood search algorithm, Journal of Manufacturing Systems, 56, 252-269.

Zhang, Z., Wang, K.; Zhu, L., 2017, A Pareto improved artificial fish swarm algorithm for solving a multi-objective fuzzy disassembly linebalancing problem, Expert Systems with Applications, 86,165-176.

Zhou Y., Guo X., Li, D. 2020, A dynamic programming approach to amulti-objective disassembly line balancing problem, Annals of Operations Research, https://doi.org/10.1007/s10479-020-03797-0.

EK AÇIKLAMALAR

A.1. 22-1-1-1 Problemi için Görev Süreleri (t_{ih})
A.2. 22-1-1-1 Problemi için İşçiye Yönelik Tehlike Değerleri (b_{ih})
B.1. 22-1-1-2 Problemi için Görev Süreleri (t_{ih})
B.2. 22-1-1-2 Problemi için İşçiye Yönelik Tehlike Değerleri (b_{ih})
C.1. 22-1-1-3 Problemi için Görev Süreleri (t_{ih})
C.2. 22-1-1-3 Problemi için İşçiye Yönelik Tehlike Değerleri (b_{ih})
Ç.1. 22-1-2-1 Problemi için Görev Süreleri (t_{ih})
Ç.2. 22-1-2-1 Problemi için İşçiye Yönelik Tehlike Değerleri (b_{ih})
D.1. 22-1-2-2 Problemi için Görev Süreleri (t_{ih})
D.2. 22-1-2-2 Problemi için İşçiye Yönelik Tehlike Değerleri (b_{ih})
E.1. 22-1-2-3 Problemi için Görev Süreleri (t_{ih})
E.2. 22-1-2-3 Problemi için İşçiye Yönelik Tehlike Değerleri (b_{ih})
F.1. 22-2-1-1 Problemi için Görev Süreleri (t_{ih})
F.2. 22-2-1-1 Problemi için İşçiye Yönelik Tehlike Değerleri (b_{ih})
G.1. 22-2-1-2 Problemi için Görev Süreleri (t_{ih})
G.2. 22-2-1-2 Problemi için İşçiye Yönelik Tehlike Değerleri (b_{ih})
Ğ.1. 22-2-1-3 Problemi için Görev Süreleri (t_{ih})
Ğ.2. 22-2-1-3 Problemi için İşçiye Yönelik Tehlike Değerleri (b_{ih})
H.1. 22-2-2-1 Problemi için Görev Süreleri (t_{ih})
H.2. 22-2-2-1 Problemi için İşçiye Yönelik Tehlike Değerleri (b_{ih})
I.1. 22-2-2-2 Problemi için Görev Süreleri (t_{ih})
I.2. 22-2-2-2 Problemi için İşçiye Yönelik Tehlike Değerleri (b_{ih})
İ.1. 22-2-2-3 Problemi için Görev Süreleri (t_{ih})
İ.2. 22-2-2-3 Problemi için İşçiye Yönelik Tehlike Değerleri (b_{ih})
J.1. 28-1-1-1 Problemi için Görev Süreleri (t_{ih})
J.2. 28-1-1-1 Problemi için İşçiye Yönelik Tehlike Değerleri (b_{ih})
K.1. 28-1-1-2 Problemi için Görev Süreleri (t_{ih})
K.2. 28-1-1-2 Problemi için İşçiye Yönelik Tehlike Değerleri (b_{ih})
L.1. 28-1-1-3 Problemi için Görev Süreleri (t_{ih})

EK AÇIKLAMALAR (DEVAM)

L.2. 28-1-1-3 Problemi için İşçiye Yönelik Tehlike Değerleri (b_{ih})
M.1. 28-1-2-1 Problemi için Görev Süreleri (t_{ih})
M.2. 28-1-2-1 Problemi için İşçiye Yönelik Tehlike Değerleri (b_{ih})
N.1. 28-1-2-2 Problemi için Görev Süreleri (t_{ih})
N.2. 28-1-2-2 Problemi için İşçiye Yönelik Tehlike Değerleri (b_{ih})
O.1. 28-1-2-3 Problemi için Görev Süreleri (t_{ih})
O.2. 28-1-2-3 Problemi için İşçiye Yönelik Tehlike Değerleri (b_{ih})
Ö.1. 28-2-1-1 Problemi için Görev Süreleri (t_{ih})
Ö.2. 28-2-1-1 Problemi için İşçiye Yönelik Tehlike Değerleri (b_{ih})
P.1. 28-2-1-2 Problemi için Görev Süreleri (t_{ih})
P.2. 28-2-1-2 Problemi için İşçiye Yönelik Tehlike Değerleri (b_{ih})
R.1. 28-2-1-3 Problemi için Görev Süreleri (t_{ih})
R.2. 28-2-1-3 Problemi için İşçiye Yönelik Tehlike Değerleri (b_{ih})
S.1. 28-2-2-1 Problemi için Görev Süreleri (t_{ih})
S.2. 28-2-2-1 Problemi için İşçiye Yönelik Tehlike Değerleri (b_{ih})
Ş.1. 28-2-2-2 Problemi için Görev Süreleri (t_{ih})
Ş.2. 28-2-2-2 Problemi için İşçiye Yönelik Tehlike Değerleri (b_{ih})
T.1. 28-2-2-3 Problemi için Görev Süreleri (t_{ih})
T.2. 28-2-2-3 Problemi için İşçiye Yönelik Tehlike Değerleri (b_{ih})

Ek Açıklamalar A.1. 22-1-1-1 Problemi için Görev Süreleri (t_{ih})

*i**h*	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	5	5	5	5	12	6	15	8	11	6	11	6	16	8	14	7	14	7	14	7	13	7	14	7
2	3	3	3	3	8	4	8	4	8	4	7	4	7	4	8	4	6	3	7	4	6	3	8	4
3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4	∞	∞	∞	∞	6	3	6	3	6	3	6	3	6	3	7	4	7	4	7	4	6	3	6	3
5	3	3	3	3	6	3	8	4	8	4	8	4	8	4	7	4	8	4	8	4	7	4	8	4
6	2	2	2	2	4	2	6	3	4	2	6	3	5	3	6	3	5	3	5	3	4	2	6	3
7	5	5	5	5	17	9	17	9	13	7	15	8	14	7	14	7	17	9	17	9	17	9	18	9
8	3	3	3	3	7	4	10	5	7	4	9	5	6	3	6	3	7	4	6	3	6	3	10	5
9	6	6	6	6	19	10	20	10	20	10	19	10	14	7	18	9	18	9	18	9	21	11	17	9
10	1	1	1	1	4	2	3	2	2	1	3	2	3	2	2	1	3	2	3	2	3	2	3	2
11	5	5	5	5	13	7	14	7	16	8	15	8	17	9	14	7	16	8	12	6	14	7	17	9
12	∞	∞	∞	∞	14	7	11	6	14	7	15	8	15	8	11	6	11	6	15	8	14	7	12	6
13	∞	∞	∞	∞	18	9	19	10	13	7	20	10	16	8	16	8	13	7	15	8	14	7	20	10
14	2	2	2	2	3	2	3	2	4	2	5	3	4	2	3	2	3	2	5	3	5	3	3	2
15	4	4	4	4	13	7	9	5	11	6	14	7	14	7	14	7	12	6	10	5	9	5	12	6
16	6	6	6	6	14	7	22	11	16	8	19	10	19	10	19	10	17	9	17	9	15	8	20	10
17	5	5	5	5	18	9	16	8	12	6	11	6	17	9	18	9	14	7	12	6	15	8	17	9
18	7	7	7	7	16	8	16	8	16	8	16	8	22	11	15	8	22	11	18	9	23	12	18	9
19	∞	∞	∞	∞	3	2	4	2	4	2	3	2	4	2	3	2	4	2	4	2	4	2	4	2
20	6	6	6	6	15	8	14	7	18	9	16	8	20	10	21	11	22	11	17	9	16	8	15	8
21	6	6	6	6	18	9	13	7	19	10	19	10	17	9	14	7	19	10	16	8	13	7	13	7
22	7	7	7	7	19	10	17	9	22	11	17	9	21	11	20	10	19	10	17	9	19	10	16	8

Ek Açıklamalar A.2. 22-1-1-1 Problemi için İşçiye Yönelik Tehlike Değerleri (b_{ih})

*i**h*	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
17	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
22	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0

Ek Açıklamalar B.1. 22-1-1-2 Problemi için Görev Süreleri (t_{ih})

i\h	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	5	5	5	5	11	6	11	6	13	7	16	8	12	6	11	6	10	5	10	5	14	7	11	6
2	3	3	3	3	8	4	7	4	7	4	8	4	8	4	8	4	6	3	6	3	9	5	5	3
3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4	∞	∞	∞	∞	5	3	6	3	6	3	6	3	7	4	6	3	6	3	6	3	7	4	5	3
5	3	3	3	3	8	4	6	3	6	3	9	5	6	3	6	3	9	5	6	3	7	4	5	3
6	2	2	2	2	6	3	6	3	5	3	6	3	4	2	5	3	6	3	5	3	5	3	4	2
7	5	5	5	5	13	7	17	9	15	8	12	6	16	8	15	8	18	9	16	8	14	7	15	8
8	3	3	3	3	7	4	9	5	8	4	9	5	8	4	7	4	6	3	9	5	6	3	7	4
9	6	6	6	6	15	8	20	10	15	8	20	10	15	8	15	8	18	9	21	11	21	11	16	8
10	1	1	1	1	3	2	3	2	2	1	3	2	3	2	3	2	3	2	4	2	3	2	3	2
11	5	5	5	5	11	6	12	6	11	6	12	6	13	7	14	7	16	8	17	9	12	6	16	8
12	∞	∞	∞	∞	11	6	11	6	14	7	9	5	15	8	11	6	12	6	11	6	10	5	13	7
13	∞	∞	∞	∞	21	11	16	8	17	9	14	7	17	9	18	9	16	8	19	10	21	11	18	9
14	2	2	2	2	4	2	4	2	3	2	4	2	4	2	5	3	4	2	3	2	5	3	5	3
15	4	4	4	4	12	6	9	5	11	6	13	7	11	6	11	6	13	7	13	7	13	7	8	4
16	6	6	6	6	17	9	20	10	21	11	22	11	14	7	21	11	16	8	14	7	18	9	18	9
17	5	5	5	5	12	6	15	8	13	7	16	8	12	6	15	8	15	8	15	8	15	8	16	8
18	7	7	7	7	17	9	19	10	19	10	15	8	21	11	16	8	21	11	21	11	24	12	21	11
19	∞	∞	∞	∞	5	3	5	3	4	2	4	2	4	2	4	2	3	2	4	2	4	2	3	2
20	6	6	6	6	15	8	22	11	19	10	20	10	18	9	17	9	14	7	19	10	17	9	16	8
21	6	6	6	6	18	9	19	10	13	7	18	9	14	7	15	8	16	8	16	8	14	7	14	7
22	7	7	7	7	23	12	15	8	16	8	17	9	19	10	18	9	19	10	15	8	23	12	16	8

Ek Açıklamalar B.2. 22-1-1-2 Deney İşçiye Yönelik Tehlike Bilgisi (b_{ih})

i\h	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
17	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
22	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0

Ek Açıklamalar C.1. 22-1-1-3 Problemi için Görev Süreleri (t_{ih})

*i**h*	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	5	5	5	5	15	8	10	5	16	8	11	6	13	7	11	6	15	8	12	6	12	6	12	6
2	3	3	3	3	8	4	8	4	7	4	6	3	7	4	9	5	7	4	8	4	8	4	7	4
3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4	∞	∞	∞	∞	5	3	5	3	7	4	5	3	6	3	7	4	6	3	6	3	6	3	7	4
5	3	3	3	3	6	3	5	3	7	4	8	4	8	4	6	3	6	3	7	4	9	5	8	4
6	2	2	2	2	6	3	5	3	4	2	5	3	6	3	6	3	4	2	4	2	6	3	6	3
7	5	5	5	5	16	8	18	9	15	8	16	8	16	8	12	6	16	8	13	7	17	9	15	8
8	3	3	3	3	8	4	8	4	8	4	7	4	9	5	9	5	10	5	9	5	7	4	9	5
9	6	6	6	6	15	8	14	7	20	10	13	7	15	8	14	7	21	11	19	10	20	10	15	8
10	1	1	1	1	3	2	2	1	3	2	3	2	4	2	2	1	3	2	3	2	2	1	3	2
11	5	5	5	5	17	9	14	7	15	8	16	8	12	6	13	7	15	8	16	8	13	7	14	7
12	∞	∞	∞	∞	12	6	9	5	14	7	15	8	12	6	11	6	10	5	13	7	13	7	10	5
13	∞	∞	∞	∞	13	7	18	9	15	8	15	8	19	10	20	10	14	7	13	7	16	8	15	8
14	2	2	2	2	4	2	5	3	4	2	5	3	4	2	5	3	4	2	4	2	4	2	5	3
15	4	4	4	4	13	7	13	7	9	5	14	7	14	7	9	5	12	6	13	7	12	6	10	5
16	6	6	6	6	20	10	20	10	15	8	14	7	15	8	14	7	14	7	15	8	21	11	20	10
17	5	5	5	5	15	8	14	7	18	9	13	7	11	6	12	6	18	9	13	7	18	9	16	8
18	7	7	7	7	19	10	18	9	21	11	16	8	18	9	15	8	15	8	23	12	16	8	18	9
19	∞	∞	∞	∞	3	2	4	2	4	2	4	2	5	3	5	3	5	3	4	2	5	3	4	2
20	6	6	6	6	15	8	21	11	16	8	18	9	17	9	21	11	19	10	21	11	21	11	20	10
21	6	6	6	6	20	10	20	10	18	9	19	10	19	10	14	7	18	9	17	9	15	8	13	7
22	7	7	7	7	16	8	21	11	19	10	23	12	15	8	18	9	16	8	18	9	21	11	18	9

Ek Açıklamalar C.2. 22-1-1-3 Problemi için İşçiye Yönelik Tehlike Değerleri (b_{ih})

*i**h*	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
17	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
22	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0

Ek Açıklamalar-Ç.1- 22-1-2-1 Problemi için Görev Süreleri (t_{ih})

$i \setminus h$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
1	5	5	5	12	6	10	5	10	5	17	9	9	5	19	10	17	9	7	4	11	6	10	5
2	3	3	3	6	3	7	4	9	5	6	3	9	5	3	2	8	4	3	2	7	4	4	2
3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4	∞	∞	∞	6	3	3	2	6	3	7	4	4	2	7	4	3	2	4	2	3	2	9	5
5	3	3	3	5	3	5	3	6	3	8	4	5	3	6	3	5	3	9	5	7	4	10	5
6	2	2	2	6	3	3	2	2	1	7	4	5	3	6	3	5	3	6	3	8	4	3	2
7	5	5	5	17	9	20	10	8	4	9	5	16	8	14	7	6	3	13	7	15	8	23	12
8	3	3	3	5	3	8	4	5	3	11	6	11	6	4	2	10	5	5	3	9	5	3	2
9	6	6	6	14	7	11	6	26	13	15	8	18	9	10	5	15	8	27	14	9	5	23	12
10	1	1	1	1	1	2	1	4	2	3	2	4	2	4	2	5	3	2	1	3	2	3	2
11	5	5	5	12	6	6	3	6	3	11	6	15	8	11	6	8	4	7	4	15	8	17	9
12	∞	∞	∞	7	4	5	3	13	7	16	8	11	6	7	4	10	5	11	6	12	6	17	9
13	∞	∞	∞	27	14	11	6	18	9	25	13	19	10	10	5	27	14	9	5	21	11	19	10
14	2	2	2	5	3	4	2	3	2	6	3	5	3	4	2	2	1	2	1	6	3	5	3
15	4	4	4	9	5	12	6	12	6	6	3	16	8	7	4	5	3	11	6	16	8	17	9
16	6	6	6	19	10	22	11	27	14	20	10	20	10	14	7	18	9	8	4	9	5	9	5
17	5	5	5	15	8	22	11	9	5	8	4	10	5	8	4	15	8	22	11	18	9	12	6
18	7	7	7	20	10	13	7	13	7	23	12	18	9	17	9	21	11	9	5	9	5	15	8
19	∞	∞	∞	3	2	5	3	3	2	6	3	5	3	5	3	2	1	3	2	6	3	3	2
20	6	6	6	14	7	16	8	24	12	24	12	24	12	7	4	26	13	28	14	21	11	10	5
21	6	6	6	19	10	7	4	22	11	25	13	8	4	26	13	18	9	13	7	11	6	7	4
22	7	7	7	17	9	8	4	15	8	27	14	27	14	17	9	29	15	18	9	24	12	23	12

Ek Açıklama-Ç.2- 22-1-2-1 Problemi için İşçiye Yönelik Tehlike Değerleri (b_{ih})

*i**h*	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
17	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
22	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0

Ek Açıklamalar D.1. 22-1-2-2 Problemi için Görev Süreleri (t_{ih})

i\h	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
1	5	5	5	17	9	12	6	6	3	9	5	17	9	10	5	15	8	15	8	15	8	16	8
2	3	3	3	10	5	6	3	8	4	4	2	7	4	8	4	6	3	6	3	11	6	3	2
3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4	∞	∞	∞	5	3	9	5	3	2	6	3	3	2	5	3	7	4	3	2	5	3	8	4
5	3	3	3	7	4	3	2	5	3	9	5	5	3	10	5	9	5	11	6	5	3	5	3
6	2	2	2	3	2	6	3	6	3	8	4	3	2	4	2	7	4	4	2	4	2	5	3
7	5	5	5	14	7	20	10	24	12	23	12	22	11	6	3	13	7	21	11	15	8	11	6
8	3	3	3	9	5	4	2	8	4	9	5	7	4	11	6	10	5	3	2	11	6	7	4
9	6	6	6	26	13	15	8	14	7	13	7	9	5	10	5	21	11	10	5	9	5	9	5
10	1	1	1	3	2	4	2	2	1	4	2	3	2	3	2	4	2	2	1	4	2	4	2
11	5	5	5	14	7	21	11	15	8	21	11	12	6	9	5	15	8	16	8	20	10	19	10
12	∞	∞	∞	8	4	6	3	7	4	8	4	6	3	14	7	11	6	5	3	7	4	19	10
13	∞	∞	∞	12	6	18	9	22	11	27	14	13	7	22	11	22	11	19	10	26	13	19	10
14	2	2	2	4	2	2	1	6	3	3	2	5	3	3	2	4	2	2	1	3	2	6	3
15	4	4	4	5	3	6	3	6	3	16	8	6	3	6	3	10	5	12	6	16	8	5	3
16	6	6	6	16	8	15	8	11	6	9	5	20	10	23	12	22	11	15	8	26	13	10	5
17	5	5	5	7	4	23	12	18	9	18	9	20	10	18	9	9	5	18	9	9	5	13	7
18	7	7	7	23	12	21	11	8	4	25	13	21	11	21	11	21	11	11	6	17	9	20	10
19	∞	∞	∞	5	3	5	3	3	2	4	2	5	3	2	1	5	3	6	3	4	2	3	2
20	6	6	6	24	12	10	5	13	7	24	12	10	5	22	11	8	4	20	10	14	7	10	5
21	6	6	6	10	5	23	12	9	5	19	10	13	7	16	8	12	6	13	7	19	10	7	4
22	7	7	7	29	15	22	11	14	7	12	6	15	8	27	14	25	13	23	12	14	7	27	14

Ek Açıklamalar D.2. 22-1-2-2 Problemi için İşçiye Yönelik Tehlike Değerleri (b_{ih})

*i**h*	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
17	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
22	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0

Ek Açıklamalar E.1. 22-1-2-3 Problemi için Görev Süreleri (t_{ih})

i\h	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
1	5	5	5	7	4	10	5	18	9	6	3	10	5	15	8	20	10	9	5	9	5	21	11
2	3	3	3	8	4	5	3	9	5	5	3	3	2	6	3	3	2	9	5	6	3	8	4
3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4	∞	∞	∞	5	3	8	4	7	4	10	5	8	4	3	2	7	4	9	5	8	4	6	3
5	3	3	3	10	5	8	4	10	5	9	5	8	4	4	2	7	4	9	5	8	4	4	2
6	2	2	2	3	2	6	3	7	4	6	3	5	3	5	3	5	3	7	4	5	3	7	4
7	5	5	5	17	9	17	9	6	3	9	5	15	8	16	8	14	7	23	12	23	12	20	10
8	3	3	3	11	6	4	2	4	2	11	6	10	5	8	4	7	4	5	3	4	2	7	4
9	6	6	6	24	12	21	11	20	10	10	5	20	10	26	13	14	7	9	5	23	12	7	4
10	1	1	1	4	2	2	1	2	1	2	1	3	2	3	2	2	1	2	1	5	3	2	1
11	5	5	5	20	10	6	3	19	10	14	7	7	4	17	9	9	5	13	7	17	9	17	9
12	∞	∞	∞	18	9	15	8	9	5	16	8	16	8	9	5	11	6	11	6	9	5	19	10
13	∞	∞	∞	24	12	25	13	8	4	20	10	19	10	19	10	26	13	10	5	27	14	15	8
14	2	2	2	5	3	5	3	5	3	2	1	4	2	4	2	4	2	6	3	4	2	5	3
15	4	4	4	13	7	9	5	6	3	14	7	11	6	7	4	7	4	10	5	5	3	8	4
16	6	6	6	8	4	11	6	9	5	23	12	17	9	17	9	25	13	25	13	16	8	14	7
17	5	5	5	10	5	14	7	16	8	6	3	13	7	19	10	20	10	22	11	11	6	21	11
18	7	7	7	11	6	30	15	20	10	19	10	26	13	13	7	26	13	22	11	20	10	17	9
19	∞	∞	∞	3	2	2	1	2	1	4	2	2	1	2	1	3	2	5	3	2	1	3	2
20	6	6	6	22	11	23	12	25	13	18	9	26	13	21	11	12	6	26	13	26	13	14	7
21	6	6	6	16	8	22	11	9	5	7	4	23	12	8	4	10	5	14	7	16	8	20	10
22	7	7	7	17	9	10	5	16	8	25	13	27	14	9	5	24	12	27	14	17	9	14	7

Ek Açıklamalar E.2. 22-1-2-3 Problemi için İşçiye Yönelik Tehlike Değerleri (b_{ih})

*i**h*	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
17	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
22	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0

Ek Açıklamalar F.1. 22-2-1-1 Problemi için Görev Süreleri (t_{ih})

i\h	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
1	5	5	5	5	12	6	14	7	15	8	13	7	12	6	16	8	10	5	11	6	14	7	11	6	10	5	14	7
2	3	3	3	3	8	4	6	3	8	4	7	4	7	4	6	3	6	3	6	3	9	5	7	4	7	4	8	4
3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4	∞	∞	∞	∞	6	3	6	3	5	3	6	3	6	3	5	3	6	3	5	3	5	3	6	3	5	3	5	3
5	3	3	3	3	8	4	8	4	8	4	7	4	6	3	6	3	8	4	6	3	7	4	6	3	9	5	7	4
6	2	2	2	2	6	3	4	2	6	3	4	2	5	3	4	2	4	2	4	2	4	2	5	3	4	2	5	3
7	5	5	5	5	13	7	15	8	17	9	15	8	14	7	15	8	13	7	18	9	12	6	15	8	13	7	12	6
8	3	3	3	3	10	5	9	5	8	4	9	5	9	5	6	3	9	5	8	4	8	4	8	4	9	5	10	5
9	6	6	6	6	17	9	15	8	19	10	21	11	17	9	15	8	15	8	17	9	14	7	19	10	19	10	15	8
10	1	1	1	1	3	2	2	1	2	1	2	1	3	2	2	1	2	1	3	2	3	2	3	2	4	2	3	2
11	5	5	5	5	17	9	16	8	13	7	16	8	13	7	15	8	15	8	15	8	11	6	12	6	13	7	15	8
12	∞	∞	∞	∞	14	7	15	8	9	5	13	7	15	8	10	5	13	7	13	7	14	7	13	7	10	5	11	6
13	∞	∞	∞	∞	18	9	21	11	21	11	15	8	19	10	13	7	13	7	18	9	21	11	14	7	17	9	20	10
14	2	2	2	2	3	2	3	2	3	2	5	3	4	2	4	2	4	2	3	2	4	2	3	2	3	2	4	2
15	4	4	4	4	12	6	11	6	11	6	11	6	13	7	12	6	14	7	9	5	11	6	9	5	11	6	9	5
16	6	6	6	6	20	10	16	8	22	11	20	10	15	8	22	11	17	9	20	10	20	10	22	11	14	7	19	10
17	5	5	5	5	16	8	19	10	12	6	17	9	17	9	13	7	13	7	13	7	16	8	15	8	12	6	13	7
18	7	7	7	7	21	11	19	10	18	9	14	7	19	10	16	8	18	9	19	10	18	9	22	11	21	11	16	8
19	∞	∞	∞	∞	4	2	4	2	5	3	4	2	3	2	3	2	3	2	3	2	4	2	5	3	4	2	4	2
20	6	6	6	6	21	11	14	7	17	9	22	11	14	7	21	11	17	9	18	9	19	10	22	11	17	9	20	10
21	6	6	6	6	17	9	17	9	16	8	16	8	19	10	13	7	13	7	18	9	17	9	18	9	19	10	13	7
22	7	7	7	7	15	8	22	11	17	9	23	12	19	10	18	9	15	8	24	12	16	8	23	12	21	11	18	9

Ek Açıklamalar F.2. 22-2-1-1 Problemi için İşçiye Yönelik Tehlike Değerleri (b_{ih})

*i**h*	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
17	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
22	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0

Ek Açıklamalar G.1. 22-2-1-2 Problemi için Görev Süreleri (t_{ih})

*i**h*	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
1	5	5	5	5	11	6	15	8	15	8	15	8	15	8	14	7	15	8	11	6	11	6	10	5	11	6	14	7
2	3	3	3	3	6	3	7	4	8	4	8	4	6	3	7	4	7	4	6	3	7	4	6	3	6	3	8	4
3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4	∞	∞	∞	∞	5	3	7	4	5	3	7	4	6	3	6	3	6	3	6	3	7	4	6	3	7	4	5	3
5	3	3	3	3	6	3	7	4	7	4	7	4	5	3	6	3	6	3	8	4	5	3	7	4	6	3	5	3
6	2	2	2	2	6	3	5	3	6	3	5	3	4	2	5	3	5	3	5	3	6	3	5	3	4	2	5	3
7	5	5	5	5	14	7	13	7	12	6	13	7	13	7	13	7	15	8	14	7	16	8	14	7	13	7	13	7
8	3	3	3	3	9	5	9	5	9	5	6	3	9	5	8	4	10	5	8	4	8	4	10	5	9	5	8	4
9	6	6	6	6	19	10	14	7	14	7	20	10	15	8	15	8	15	8	21	11	16	8	21	11	18	9	14	7
10	1	1	1	1	3	2	2	1	3	2	4	2	4	2	4	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2
11	5	5	5	5	16	8	17	9	13	7	15	8	11	6	13	7	12	6	15	8	16	8	11	6	15	8	11	6
12	∞	∞	∞	∞	12	6	12	6	13	7	13	7	10	5	10	5	15	8	10	5	11	6	13	7	14	7	9	5
13	∞	∞	∞	∞	16	8	16	8	21	11	18	9	20	10	15	8	20	10	14	7	18	9	13	7	13	7	18	9
14	2	2	2	2	4	2	5	3	4	2	5	3	3	2	5	3	4	2	5	3	4	2	5	3	3	2	5	3
15	4	4	4	4	12	6	12	6	10	5	11	6	14	7	12	6	11	6	13	7	10	5	11	6	10	5	12	6
16	6	6	6	6	19	10	20	10	22	11	16	8	18	9	18	9	17	9	22	11	14	7	15	8	15	8	19	10
17	5	5	5	5	18	9	16	8	18	9	19	10	16	8	16	8	14	7	13	7	17	9	13	7	18	9	17	9
18	7	7	7	7	16	8	16	8	23	12	21	11	18	9	22	11	14	7	22	11	19	10	17	9	17	9	23	12
19	∞	∞	∞	∞	4	2	4	2	4	2	5	3	3	2	4	2	4	2	3	2	4	2	4	2	3	2	3	2
20	6	6	6	6	19	10	17	9	15	8	21	11	18	9	14	7	14	7	21	11	20	10	15	8	21	11	16	8
21	6	6	6	6	15	8	14	7	20	10	19	10	17	9	18	9	19	10	14	7	17	9	19	10	13	7	17	9
22	7	7	7	7	22	11	20	10	19	10	15	8	18	9	14	7	15	8	21	11	20	10	17	9	18	9	19	10

Ek Açıklamalar G.2. 22-2-1-2 Problemi için İşçiye Yönelik Tehlike Değerleri (b_{ih})

*i**h*	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
17	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
22	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0

Ek Açıklamalar Ğ.1. 22-2-1-3 Problemi için Görev Süreleri (t_{ih})

*i**h*	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
1	5	5	5	5	13	7	13	7	12	6	10	5	14	7	14	7	14	7	14	7	11	6	12	6	15	8	11	6
2	3	3	3	3	6	3	7	4	6	3	6	3	8	4	8	4	8	4	8	4	6	3	6	3	6	3	8	4
3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4	∞	∞	∞	∞	7	4	7	4	6	3	5	3	5	3	6	3	7	4	6	3	6	3	6	3	7	4	7	4
5	3	3	3	3	8	4	8	4	6	3	9	5	7	4	6	3	8	4	8	4	6	3	8	4	7	4	6	3
6	2	2	2	2	6	3	6	3	4	2	4	2	6	3	4	2	5	3	6	3	5	3	6	3	4	2	5	3
7	5	5	5	5	17	9	12	6	12	6	16	8	17	9	17	9	16	8	15	8	17	9	12	6	13	7	14	7
8	3	3	3	3	7	4	9	5	8	4	8	4	9	5	7	4	8	4	7	4	9	5	7	4	6	3	6	3
9	6	6	6	6	13	7	13	7	16	8	18	9	20	10	20	10	19	10	16	8	13	7	15	8	15	8	16	8
10	1	1	1	1	2	1	3	2	2	1	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2
11	5	5	5	5	17	9	11	6	14	7	13	7	14	7	15	8	11	6	13	7	16	8	13	7	17	9	13	7
12	∞	∞	∞	∞	14	7	12	6	9	5	10	5	14	7	14	7	13	7	10	5	9	5	14	7	15	8	12	6
13	∞	∞	∞	∞	16	8	16	8	18	9	15	8	19	10	17	9	16	8	20	10	14	7	14	7	20	10	17	9
14	2	2	2	2	3	2	4	2	4	2	3	2	4	2	4	2	4	2	4	2	3	2	4	2	3	2	4	2
15	4	4	4	4	11	6	9	5	13	7	10	5	11	6	13	7	11	6	9	5	11	6	13	7	9	5	11	6
16	6	6	6	6	18	9	21	11	17	9	16	8	16	8	21	11	19	10	16	8	21	11	21	11	19	10	14	7
17	5	5	5	5	19	10	15	8	12	6	13	7	12	6	19	10	18	9	17	9	11	6	18	9	13	7	17	9
18	7	7	7	7	17	9	17	9	15	8	19	10	18	9	14	7	14	7	22	11	16	8	18	9	22	11	16	8
19	∞	∞	∞	∞	4	2	3	2	4	2	5	3	3	2	3	2	5	3	5	3	4	2	4	2	5	3	4	2
20	6	6	6	6	21	11	22	11	17	9	16	8	15	8	16	8	19	10	20	10	18	9	17	9	19	10	21	11
21	6	6	6	6	14	7	13	7	17	9	15	8	20	10	17	9	14	7	17	9	12	6	14	7	15	8	14	7
22	7	7	7	7	21	11	18	9	17	9	16	8	19	10	23	12	20	10	19	10	16	8	18	9	17	9	23	12

Ek Açıklamalar Ğ.2. 22-2-1-3 Problemi için İşçiye Yönelik Tehlike Değerleri (b_{ih})

*i**h*	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
17	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
22	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0

Ek Açıklamalar H.1. 22-2-2-1 Problemi için Görev Süreleri (t_{ih})

*i**h*	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
1	5	5	5	7	4	6	3	6	3	11	6	20	10	10	5	10	5	7	4	12	6	13	7	6	3	12	6
2	3	3	3	8	4	7	4	9	5	9	5	6	3	5	3	6	3	8	4	7	4	4	2	7	4	9	5
3	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1
4	∞	∞	∞	3	2	7	4	8	4	7	4	3	2	9	5	9	5	9	5	7	4	6	3	3	2	5	3
5	3	3	3	4	2	7	4	4	2	9	5	6	3	9	5	4	2	11	6	7	4	5	3	7	4	10	5
6	2	2	2	3	2	8	4	2	1	3	2	4	2	4	2	7	4	2	1	7	4	7	4	4	2	3	2
7	5	5	5	19	10	9	5	8	4	7	4	6	3	19	10	20	10	12	6	8	4	12	6	13	7	19	10
8	3	3	3	7	4	4	2	4	2	4	2	10	5	11	6	11	6	4	2	6	3	6	3	7	4	5	3
9	6	6	6	10	5	25	13	15	8	20	10	17	9	22	11	20	10	27	14	12	6	25	13	23	12	24	12
10	1	1	1	2	1	1	1	4	2	3	2	3	2	4	2	2	1	4	2	3	2	3	2	5	3	4	2
11	5	5	5	12	6	13	7	9	5	12	6	11	6	19	10	18	9	17	9	21	11	12	6	11	6	15	8
12	∞	∞	∞	15	8	18	9	15	8	17	9	8	4	8	4	15	8	12	6	17	9	18	9	8	4	9	5
13	∞	∞	∞	22	11	26	13	11	6	27	14	14	7	19	10	18	9	19	10	26	13	16	8	15	8	19	10
14	2	2	2	6	3	2	1	6	3	3	2	5	3	3	2	3	2	4	2	5	3	6	3	2	1	6	3
15	4	4	4	11	6	9	5	14	7	11	6	17	9	8	4	15	8	10	5	11	6	14	7	10	5	5	3
16	6	6	6	22	11	11	6	26	13	21	11	15	8	16	8	21	11	15	8	29	15	20	10	26	13	28	14
17	5	5	5	10	5	17	9	18	9	11	6	14	7	23	12	11	6	22	11	15	8	14	7	17	9	18	9
18	7	7	7	29	15	8	4	27	14	29	15	13	7	19	10	23	12	24	12	13	7	29	15	17	9	17	9
19	∞	∞	∞	2	1	2	1	6	3	4	2	5	3	3	2	5	3	5	3	2	1	2	1	4	2	6	3
20	6	6	6	18	9	22	11	23	12	25	13	27	14	24	12	20	10	27	14	10	5	29	15	18	9	9	5
21	6	6	6	20	10	13	7	14	7	8	4	25	13	24	12	9	5	10	5	26	13	22	11	8	4	21	11
22	7	7	7	29	15	24	12	28	14	23	12	15	8	16	8	29	15	30	15	19	10	13	7	26	13	8	4

Ek Açıklamalar H.2. 22-2-2-1 Problemi için İşçiye Yönelik Tehlike Değerleri (b_{ih})

*i**h*	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
17	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
22	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0

Ek Açıklamalar I.1. 22-2-2-2 Problemi için Görev Süreleri (t_{ih})

*i**h*	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
1	5	5	5	16	8	11	6	7	4	13	7	12	6	7	4	19	10	18	9	20	10	11	6	12	6	18	9
2	3	3	3	6	3	7	4	10	5	5	3	11	6	4	2	6	3	5	3	11	6	10	5	11	6	5	3
3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4	∞	∞	∞	3	2	7	4	8	4	3	2	9	5	3	2	3	2	9	5	3	2	5	3	6	3	7	4
5	3	3	3	4	2	3	2	3	2	4	2	6	3	8	4	7	4	6	3	5	3	5	3	8	4	7	4
6	2	2	2	3	2	2	1	4	2	3	2	7	4	7	4	4	2	8	4	6	3	3	2	5	3	6	3
7	5	5	5	20	10	11	6	18	9	23	12	9	5	8	4	21	11	12	6	21	11	16	8	13	7	19	10
8	3	3	3	6	3	7	4	9	5	9	5	10	5	12	6	7	4	11	6	12	6	9	5	11	6	4	2
9	6	6	6	15	8	9	5	13	7	13	7	14	7	23	12	15	8	13	7	13	7	24	12	13	7	8	4
10	1	1	1	2	1	2	1	4	2	1	1	3	2	2	1	3	2	1	1	1	1	3	2	4	2	3	2
11	5	5	5	17	9	17	9	21	11	9	5	11	6	19	10	18	9	10	5	22	11	16	8	14	7	8	4
12	∞	∞	∞	11	6	9	5	7	4	10	5	15	8	7	4	8	4	5	3	12	6	7	4	9	5	13	7
13	∞	∞	∞	10	5	19	10	25	13	17	9	11	6	13	7	21	11	10	5	21	11	20	10	21	11	8	4
14	2	2	2	3	2	4	2	2	1	4	2	4	2	6	3	2	1	2	1	2	1	4	2	2	1	5	3
15	4	4	4	15	8	8	4	9	5	10	5	8	4	14	7	7	4	12	6	8	4	6	3	7	4	12	6
16	6	6	6	11	6	25	13	26	13	13	7	12	6	22	11	7	4	22	11	26	13	18	9	20	10	23	12
17	5	5	5	11	6	16	8	9	5	14	7	18	9	10	5	17	9	23	12	14	7	6	3	23	12	21	11
18	7	7	7	28	14	20	10	15	8	26	13	28	14	16	8	22	11	22	11	24	12	28	14	24	12	29	15
19	∞	∞	∞	6	3	5	3	2	1	4	2	4	2	3	2	3	2	4	2	3	2	2	1	4	2	3	2
20	6	6	6	13	7	19	10	8	4	18	9	13	7	17	9	28	14	25	13	14	7	10	5	17	9	12	6
21	6	6	6	19	10	9	5	14	7	8	4	10	5	19	10	17	9	21	11	16	8	13	7	7	4	21	11
22	7	7	7	28	14	30	15	26	13	23	12	21	11	28	14	9	5	23	12	14	7	24	12	15	8	29	15

Ek Açıklamalar I.2. 22-2-2-2 Problemi için İşçiye Yönelik Tehlike Değerleri (b_{ih})

*i**h*	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
17	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
22	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0

Ek Açıklamalar İ.1. 22-2-2-3 Problemi için Görev Süreleri (t_{ih})

i\h	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
1	5	5	5	20	10	12	6	7	4	6	3	18	9	14	7	14	7	7	4	9	5	5	3	10	5	17	9
2	3	3	3	4	2	8	4	7	4	4	2	6	3	7	4	8	4	9	5	9	5	8	4	6	3	9	5
3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	2	1
4	∞	∞	∞	5	3	9	5	4	2	5	3	6	3	5	3	3	2	7	4	6	3	9	5	5	3	3	2
5	3	3	3	5	3	6	3	11	6	6	3	8	4	8	4	7	4	9	5	4	2	10	5	4	2	7	4
6	2	2	2	4	2	8	4	6	3	5	3	6	3	5	3	5	3	7	4	5	3	7	4	7	4	2	1
7	5	5	5	9	5	11	6	6	3	15	8	9	5	21	11	11	6	21	11	12	6	22	11	10	5	7	4
8	3	3	3	9	5	5	3	8	4	10	5	9	5	5	3	4	2	4	2	11	6	12	6	11	6	13	7
9	6	6	6	13	7	18	9	24	12	25	13	11	6	25	13	16	8	18	9	20	10	7	4	20	10	13	7
10	1	1	1	2	1	3	2	4	2	4	2	1	1	3	2	3	2	4	2	5	3	4	2	2	1	2	1
11	5	5	5	9	5	14	7	16	8	9	5	21	11	16	8	22	11	7	4	7	4	21	11	6	3	20	10
12	∞	∞	∞	11	6	15	8	12	6	15	8	7	4	15	8	17	9	11	6	14	7	19	10	8	4	16	8
13	∞	∞	∞	8	4	14	7	17	9	11	6	18	9	15	8	15	8	10	5	27	14	8	4	10	5	8	4
14	2	2	2	6	3	5	3	2	1	6	3	3	2	6	3	6	3	2	1	3	2	6	3	5	3	6	3
15	4	4	4	14	7	11	6	16	8	16	8	10	5	8	4	9	5	6	3	14	7	13	7	13	7	13	7
16	6	6	6	24	12	11	6	25	13	12	6	24	12	19	10	24	12	27	14	18	9	18	9	16	8	22	11
17	5	5	5	17	9	15	8	23	12	17	9	13	7	7	4	7	4	18	9	9	5	15	8	17	9	6	3
18	7	7	7	30	15	26	13	13	7	24	12	9	5	27	14	18	9	11	6	10	5	27	14	24	12	28	14
19	∞	∞	∞	3	2	5	3	5	3	6	3	4	2	4	2	6	3	5	3	2	1	4	2	2	1	2	1
20	6	6	6	9	5	20	10	7	4	17	9	9	5	23	12	22	11	14	7	25	13	17	9	24	12	21	11
21	6	6	6	22	11	12	6	19	10	18	9	24	12	20	10	7	4	13	7	24	12	17	9	12	6	17	9
22	7	7	7	16	8	8	4	19	10	12	6	13	7	10	5	14	7	30	15	22	11	15	8	8	4	24	12

Ek Açıklamalar İ.2. 22-2-2-3 Problemi için İşçiye Yönelik Tehlike Değerleri (b_{ih})

*i**h*	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
17	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
22	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0

Ek Açıklamalar J.1. 28-1-1-1 Problemi için Görev Süreleri (t_{ih})

i\h	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	4	4	4	4	12	6	10	5	13	7	11	6	12	6	12	6	13	7	13	7	10	5	9	5
2	2	2	2	2	4	2	4	2	4	2	4	2	5	3	5	3	4	2	4	2	5	3	4	2
3	6	6	6	6	14	7	14	7	17	9	18	9	19	10	18	9	16	8	18	9	17	9	15	8
4	2	2	2	2	6	3	5	3	5	3	7	4	7	4	7	4	5	3	5	3	5	3	5	3
5	1	1	1	1	4	2	3	2	3	2	3	2	3	2	4	2	3	2	3	2	4	2	4	2
6	∞	∞	∞	∞	21	11	19	10	17	9	19	10	20	10	21	11	14	7	19	10	18	9	15	8
7	1	1	1	1	4	2	3	2	2	1	2	1	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2
8	3	3	3	3	5	3	7	4	7	4	7	4	6	3	7	4	6	3	7	4	6	3	8	4
9	∞	∞	∞	∞	16	8	13	7	18	9	12	6	17	9	12	6	18	9	16	8	14	7	18	9
10	1	1	1	1	4	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	2	1	3	2	4	2	3	2
11	1	1	1	1	4	2	4	2	4	2	3	2	4	2	3	2	3	2	4	2	4	2	4	2
12	2	2	2	2	5	3	3	2	5	3	3	2	4	2	3	2	4	2	5	3	4	2	3	2
13	4	4	4	4	10	5	9	5	11	6	11	6	11	6	8	4	12	6	10	5	10	5	11	6
14	∞	∞	∞	∞	15	8	16	8	14	7	15	8	15	8	14	7	16	8	14	7	20	10	13	7
15	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
16	3	3	3	3	9	5	9	5	10	5	9	5	7	4	8	4	7	4	6	3	6	3	9	5
17	5	5	5	5	13	7	17	9	14	7	15	8	17	9	14	7	11	6	12	6	12	6	16	8
18	7	7	7	7	23	12	22	11	18	9	16	8	19	10	23	12	16	8	21	11	20	10	23	12
19	6	6	6	6	17	9	14	7	14	7	21	11	14	7	20	10	19	10	20	10	14	7	21	11
20	∞	∞	∞	∞	7	4	8	4	9	5	7	4	9	5	7	4	10	5	9	5	9	5	7	4
21	2	2	2	2	5	3	4	2	3	2	5	3	4	2	4	2	5	3	4	2	4	2	4	2
22	5	5	5	5	15	8	15	8	16	8	11	6	10	5	13	7	11	6	16	8	10	5	16	8
23	2	2	2	2	4	2	4	2	5	3	3	2	5	3	5	3	5	3	5	3	4	2	4	2
24	∞	∞	∞	∞	13	7	17	9	15	8	13	7	19	10	20	10	14	7	15	8	21	11	16	8
25	∞	∞	∞	∞	2	1	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	2	1	3	2	3	2	3	2
26	5	5	5	5	17	9	14	7	16	8	11	6	16	8	13	7	12	6	12	6	11	6	17	9
27	1	1	1	1	2	1	3	2	3	2	2	1	3	2	2	1	3	2	4	2	3	2	3	2
28	1	1	1	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1

Ek Açıklamalar J.2. 28-1-1-1 Problemi için İşçiye Yönelik Tehlike Değerleri (b_{ih})

i\h	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
14	0	0	0	0	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
25	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27	0	0	0	0	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1
28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Ek Açıklamalar K.1. 28-1-1-2 Problemi için Görev Süreleri (t_{ih})

*i**h*	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	4	4	4	4	13	7	9	5	13	7	11	6	9	5	9	5	11	6	10	5	12	6	13	7
2	2	2	2	2	5	3	3	2	4	2	3	2	3	2	4	2	4	2	4	2	5	3	4	2
3	6	6	6	6	12	6	20	10	12	6	19	10	17	9	19	10	18	9	15	8	16	8	19	10
4	2	2	2	2	5	3	6	3	5	3	5	3	6	3	6	3	6	3	7	4	5	3	5	3
5	1	1	1	1	3	2	3	2	3	2	4	2	4	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2
6	∞	∞	∞	∞	16	8	21	11	14	7	19	10	14	7	17	9	16	8	18	9	20	10	20	10
7	1	1	1	1	2	1	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	4	2	3	2	4	2	2	1
8	3	3	3	3	8	4	8	4	9	5	6	3	8	4	8	4	8	4	6	3	6	3	7	4
9	∞	∞	∞	∞	15	8	12	6	12	6	18	9	15	8	12	6	16	8	13	7	13	7	18	9
10	1	1	1	1	4	2	3	2	3	2	3	2	2	1	3	2	3	2	3	2	2	1	3	2
11	1	1	1	1	4	2	4	2	3	2	2	1	3	2	3	2	3	2	4	2	3	2	4	2
12	2	2	2	2	3	2	3	2	4	2	4	2	4	2	5	3	5	3	4	2	4	2	5	3
13	4	4	4	4	12	6	10	5	9	5	10	5	8	4	10	5	8	4	12	6	9	5	8	4
14	∞	∞	∞	∞	14	7	16	8	16	8	18	9	16	8	15	8	17	9	16	8	16	8	19	10
15	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
16	3	3	3	3	6	3	8	4	6	3	7	4	6	3	9	5	8	4	9	5	7	4	8	4
17	5	5	5	5	15	8	16	8	13	7	16	8	13	7	11	6	12	6	11	6	14	7	16	8
18	7	7	7	7	15	8	24	12	20	10	23	12	17	9	18	9	16	8	20	10	21	11	15	8
19	6	6	6	6	13	7	21	11	18	9	20	10	15	8	14	7	15	8	14	7	19	10	21	11
20	∞	∞	∞	∞	6	3	7	4	6	3	8	4	8	4	9	5	7	4	8	4	7	4	8	4
21	2	2	2	2	4	2	3	2	5	3	5	3	3	2	3	2	3	2	4	2	3	2	4	2
22	5	5	5	5	14	7	15	8	11	6	12	6	12	6	13	7	11	6	16	8	14	7	15	8
23	2	2	2	2	4	2	3	2	4	2	4	2	3	2	4	2	5	3	4	2	4	2	4	2
24	∞	∞	∞	∞	19	10	19	10	13	7	16	8	20	10	16	8	16	8	14	7	19	10	15	8
25	∞	∞	∞	∞	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	4	2	3	2	3	2	2	1
26	5	5	5	5	15	8	16	8	16	8	13	7	14	7	11	6	12	6	17	9	12	6	11	6
27	1	1	1	1	4	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	2	1	3	2	3	2	3	2
28	1	1	1	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1

Ek Açıklamalar K.2. 28-1-1-2 Problemi için İşçiye Yönelik Tehlike Değerleri (b_{ih})

*i**h*	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
14	0	0	0	0	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
25	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27	0	0	0	0	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1
28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Ek Açıklamalar L.1. 28-1-1-3 Problemi için Görev Süreleri (t_{ih})

i\h	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	4	4	4	4	11	6	11	6	8	4	13	7	12	6	11	6	9	5	9	5	9	5	10	5
2	2	2	2	2	5	3	5	3	4	2	4	2	4	2	3	2	4	2	4	2	5	3	4	2
3	6	6	6	6	12	6	18	9	14	7	15	8	12	6	16	8	12	6	15	8	13	7	13	7
4	2	2	2	2	7	4	6	3	5	3	7	4	6	3	7	4	7	4	7	4	6	3	5	3
5	1	1	1	1	3	2	3	2	2	1	4	2	2	1	3	2	2	1	4	2	3	2	4	2
6	∞	∞	∞	∞	20	10	14	7	15	8	14	7	22	11	17	9	15	8	15	8	15	8	16	8
7	1	1	1	1	3	2	2	1	3	2	3	2	2	1	2	1	3	2	2	1	3	2	2	1
8	3	3	3	3	7	4	8	4	7	4	9	5	6	3	8	4	6	3	6	3	8	4	6	3
9	∞	∞	∞	∞	12	6	15	8	19	10	15	8	13	7	19	10	13	7	12	6	15	8	11	6
10	1	1	1	1	3	2	2	1	2	1	3	2	4	2	3	2	3	2	3	2	2	1	3	2
11	1	1	1	1	2	1	3	2	4	2	3	2	2	1	3	2	2	1	2	1	3	2	3	2
12	2	2	2	2	4	2	5	3	3	2	3	2	4	2	4	2	4	2	4	2	5	3	3	2
13	4	4	4	4	8	4	8	4	12	6	11	6	10	5	11	6	11	6	12	6	10	5	10	5
14	∞	∞	∞	∞	15	8	19	10	14	7	21	11	19	10	17	9	18	9	14	7	20	10	18	9
15	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
16	3	3	3	3	7	4	8	4	8	4	9	5	8	4	10	5	9	5	7	4	9	5	8	4
17	5	5	5	5	11	6	13	7	17	9	16	8	12	6	15	8	12	6	14	7	17	9	11	6
18	7	7	7	7	21	11	20	10	16	8	17	9	20	10	15	8	19	10	21	11	14	7	17	9
19	6	6	6	6	20	10	15	8	17	9	21	11	20	10	14	7	16	8	17	9	19	10	20	10
20	∞	∞	∞	∞	10	5	7	4	7	4	8	4	9	5	10	5	7	4	9	5	10	5	10	5
21	2	2	2	2	5	3	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	3	2	4	2	5	3	4	2
22	5	5	5	5	12	6	11	6	13	7	15	8	16	8	15	8	11	6	11	6	10	5	14	7
23	2	2	2	2	4	2	4	2	3	2	3	2	5	3	4	2	5	3	4	2	4	2	4	2
24	∞	∞	∞	∞	13	7	19	10	17	9	18	9	20	10	20	10	13	7	21	11	21	11	16	8
25	∞	∞	∞	∞	4	2	3	2	3	2	3	2	2	1	2	1	3	2	3	2	2	1	3	2
26	5	5	5	5	14	7	11	6	17	9	13	7	17	9	16	8	15	8	15	8	12	6	17	9
27	1	1	1	1	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	4	2	3	2
28	1	1	1	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1

Ek Açıklamalar L.2. 28-1-1-3 Problemi için İşçiye Yönelik Tehlike Değerleri (b_{ih})

*i**h*	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
14	0	0	0	0	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
25	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27	0	0	0	0	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1
28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Ek Açıklamalar M.1. 28-1-2-1 Problemi için Görev Süreleri (t_{ih})

i\h	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
1	4	4	4	12	6	12	6	15	8	10	5	17	9	17	9	9	5	9	5	15	8	14	7
2	2	2	2	4	2	3	2	5	3	6	3	6	3	4	2	5	3	3	2	6	3	6	3
3	6	6	6	20	10	13	7	21	11	23	12	13	7	8	4	19	10	18	9	11	6	16	8
4	2	2	2	7	4	5	3	5	3	4	2	5	3	5	3	8	4	9	5	5	3	7	4
5	1	1	1	2	1	1	1	2	1	2	1	2	1	4	2	2	1	3	2	3	2	4	2
6	∞	∞	∞	12	6	10	5	28	14	24	12	20	10	21	11	9	5	14	7	25	13	14	7
7	1	1	1	1	1	3	2	4	2	2	1	2	1	4	2	1	1	2	1	3	2	4	2
8	3	3	3	4	2	7	4	7	4	8	4	3	2	11	6	5	3	6	3	8	4	3	2
9	∞	∞	∞	20	10	20	10	21	11	9	5	21	11	7	4	9	5	13	7	18	9	11	6
10	1	1	1	4	2	3	2	3	2	4	2	2	1	4	2	4	2	3	2	5	3	3	2
11	1	1	1	4	2	3	2	5	3	1	1	1	1	3	2	1	1	4	2	1	1	3	2
12	2	2	2	5	3	3	2	3	2	4	2	4	2	2	1	2	1	3	2	5	3	5	3
13	4	4	4	12	6	10	5	16	8	14	7	7	4	12	6	10	5	14	7	8	4	16	8
14	∞	∞	∞	7	4	19	10	18	9	10	5	22	11	11	6	20	10	9	5	20	10	18	9
15	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	2	1	1	1	2	1	1	1
16	3	3	3	8	4	8	4	9	5	8	4	11	6	12	6	10	5	6	3	9	5	8	4
17	5	5	5	14	7	13	7	18	9	6	3	18	9	10	5	12	6	16	8	9	5	15	8
18	7	7	7	9	5	11	6	15	8	11	6	19	10	22	11	15	8	29	15	14	7	18	9
19	6	6	6	22	11	9	5	20	10	20	10	23	12	26	13	17	9	27	14	25	13	22	11
20	∞	∞	∞	4	2	4	2	6	3	9	5	7	4	7	4	8	4	9	5	12	6	5	3
21	2	2	2	3	2	6	3	5	3	5	3	3	2	4	2	4	2	3	2	5	3	6	3
22	5	5	5	13	7	16	8	16	8	10	5	19	10	8	4	10	5	16	8	17	9	9	5
23	2	2	2	4	2	4	2	3	2	5	3	4	2	5	3	5	3	2	1	5	3	3	2
24	∞	∞	∞	22	11	8	4	22	11	15	8	11	6	26	13	18	9	23	12	13	7	7	4
25	∞	∞	∞	1	1	4	2	5	3	4	2	4	2	5	3	4	2	5	3	4	2	3	2
26	5	5	5	21	11	9	5	8	4	10	5	10	5	10	5	14	7	11	6	19	10	8	4
27	1	1	1	5	3	4	2	4	2	4	2	4	2	3	2	2	1	1	1	2	1	4	2
28	1	1	1	2	1	2	1	1	1	2	1	1	1	3	2	1	1	1	1	2	1	1	1

Ek Açıklamalar M.2. 28-1-2-1 Problemi için İşçiye Yönelik Tehlike Değerleri (b_{ih})

*i**h*	1	2	3	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
14	0	0	0	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
25	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27	0	0	0	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Ek Açıklamalar N.1. 28-1-2-2 Problemi için Görev Süreleri (t_{ih})

*i**h*	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
1	4	4	4	10	5	6	3	7	4	13	7	7	4	12	6	14	7	5	3	15	8	11	6
2	2	2	2	5	3	3	2	2	1	3	2	3	2	5	3	3	2	5	3	4	2	2	1
3	6	6	6	8	4	12	6	24	12	8	4	17	9	8	4	6	3	14	7	18	9	13	7
4	2	2	2	8	4	6	3	4	2	3	2	3	2	4	2	7	4	5	3	4	2	7	4
5	1	1	1	1	1	3	2	4	2	4	2	1	1	2	1	4	2	4	2	4	2	1	1
6	∞	∞	∞	16	8	11	6	9	5	25	13	25	13	20	10	14	7	11	6	14	7	17	9
7	1	1	1	3	2	5	3	3	2	3	2	2	1	4	2	4	2	5	3	2	1	4	2
8	3	3	3	4	2	10	5	9	5	6	3	3	2	3	2	5	3	6	3	8	4	4	2
9	∞	∞	∞	20	10	14	7	15	8	20	10	18	9	13	7	21	11	15	8	22	11	12	6
10	1	1	1	1	1	2	1	5	3	4	2	2	1	1	1	4	2	2	1	2	1	3	2
11	1	1	1	2	1	1	1	3	2	2	1	4	2	1	1	4	2	2	1	2	1	1	1
12	2	2	2	3	2	6	3	4	2	3	2	3	2	4	2	6	3	5	3	3	2	6	3
13	4	4	4	12	6	4	2	9	5	7	4	6	3	11	6	14	7	8	4	8	4	11	6
14	∞	∞	∞	18	9	22	11	21	11	15	8	18	9	26	13	16	8	13	7	7	4	14	7
15	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
16	3	3	3	5	3	13	7	6	3	3	2	12	6	4	2	5	3	9	5	8	4	8	4
17	5	5	5	20	10	16	8	10	5	12	6	22	11	9	5	20	10	20	10	21	11	8	4
18	7	7	7	18	9	8	4	22	11	14	7	30	15	27	14	9	5	28	14	23	12	8	4
19	6	6	6	16	8	27	14	13	7	14	7	9	5	16	8	24	12	9	5	13	7	9	5
20	∞	∞	∞	9	5	5	3	10	5	8	4	11	6	10	5	13	7	9	5	3	2	6	3
21	2	2	2	4	2	4	2	5	3	3	2	5	3	5	3	5	3	5	3	2	1	3	2
22	5	5	5	10	5	18	9	10	5	10	5	10	5	10	5	17	9	8	4	9	5	17	9
23	2	2	2	4	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	6	3	4	2	6	3	4	2
24	∞	∞	∞	16	8	18	9	13	7	11	6	14	7	11	6	8	4	11	6	14	7	22	11
25	∞	∞	∞	4	2	2	1	4	2	3	2	1	1	2	1	4	2	3	2	3	2	1	1
26	5	5	5	12	6	11	6	14	7	19	10	7	4	18	9	17	9	7	4	10	5	12	6
27	1	1	1	3	2	2	1	3	2	4	2	2	1	2	1	5	3	2	1	2	1	3	2
28	1	1	1	3	2	3	2	3	2	1	1	2	1	2	1	3	2	3	2	2	1	1	1

Ek Açıklamalar N.2. 28-1-2-2 Problemi için İşçiye Yönelik Tehlike Değerleri (b_{ih})

*i**h*	1	2	3	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
14	0	0	0	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
25	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27	0	0	0	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Ek Açıklamalar O.1. 28-1-2-3 Problemi için Görev Süreleri (t_{ih})

i\h	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
1	4	4	4	9	5	5	3	6	3	13	7	14	7	16	8	14	7	4	2	17	9	6	3
2	2	2	2	3	2	5	3	5	3	4	2	3	2	2	1	5	3	2	1	6	3	3	2
3	6	6	6	14	7	13	7	23	12	23	12	14	7	7	4	13	7	15	8	22	11	24	12
4	2	2	2	8	4	6	3	8	4	5	3	6	3	4	2	9	5	8	4	9	5	6	3
5	1	1	1	2	1	4	2	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	5	3	4	2	5	3
6	∞	∞	∞	16	8	13	7	22	11	13	7	26	13	24	12	28	14	9	5	19	10	17	9
7	1	1	1	2	1	4	2	5	3	2	1	2	1	1	1	3	2	2	1	3	2	4	2
8	3	3	3	5	3	9	5	6	3	9	5	10	5	10	5	7	4	6	3	7	4	11	6
9	∞	∞	∞	15	8	11	6	24	12	13	7	7	4	13	7	7	4	10	5	19	10	11	6
10	1	1	1	2	1	5	3	2	1	1	1	2	1	4	2	5	3	3	2	2	1	1	1
11	1	1	1	2	1	2	1	3	2	4	2	1	1	3	2	2	1	2	1	4	2	2	1
12	2	2	2	2	1	4	2	3	2	5	3	4	2	6	3	3	2	5	3	3	2	6	3
13	4	4	4	16	8	6	3	11	6	7	4	13	7	4	2	12	6	12	6	6	3	15	8
14	∞	∞	∞	7	4	8	4	20	10	22	11	9	5	7	4	9	5	17	9	7	4	14	7
15	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	2	1	0	0	1	1	1	1	1	1	2	1
16	3	3	3	5	3	12	6	13	7	5	3	7	4	6	3	9	5	12	6	5	3	7	4
17	5	5	5	11	6	11	6	16	8	17	9	20	10	6	3	18	9	13	7	11	6	13	7
18	7	7	7	29	15	19	10	18	9	28	14	27	14	21	11	16	8	16	8	20	10	14	7
19	6	6	6	20	10	17	9	15	8	10	5	14	7	13	7	17	9	25	13	11	6	17	9
20	∞	∞	∞	6	3	7	4	4	2	10	5	3	2	8	4	6	3	6	3	10	5	5	3
21	2	2	2	3	2	2	1	4	2	5	3	3	2	5	3	3	2	2	1	5	3	3	2
22	5	5	5	15	8	9	5	10	5	16	8	12	6	15	8	15	8	15	8	10	5	17	9
23	2	2	2	5	3	6	3	6	3	4	2	4	2	4	2	5	3	2	1	5	3	2	1
24	∞	∞	∞	14	7	17	9	23	12	8	4	7	4	21	11	9	5	27	14	16	8	20	10
25	∞	∞	∞	4	2	4	2	2	1	1	1	2	1	5	3	1	1	2	1	4	2	2	1
26	5	5	5	6	3	9	5	13	7	10	5	17	9	15	8	12	6	13	7	15	8	16	8
27	1	1	1	4	2	3	2	2	1	5	3	2	1	4	2	3	2	2	1	4	2	4	2
28	1	1	1	2	1	1	1	3	2	2	1	3	2	2	1	1	1	1	1	3	2	2	1

Ek Açıklamalar O.2. 28-1-2-3 Problemi için İşçiye Yönelik Tehlike Değerleri (b_{ih})

*i**h*	1	2	3	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
14	0	0	0	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
25	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27	0	0	0	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Ek Açıklamalar Ö.1. 28-2-1-1 Problemi için Görev Süreleri (t_{ih})

*i**h*	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
1	4	4	4	4	9	5	11	6	12	6	11	6	12	6	11	6	11	6	8	4	11	6	11	6	10	5	12	6
2	2	2	2	2	5	3	4	2	5	3	5	3	3	2	5	3	3	2	3	2	5	3	3	2	4	2	4	2
3	6	6	6	6	13	7	18	9	13	7	15	8	15	8	16	8	12	6	16	8	16	8	14	7	16	8	14	7
4	2	2	2	2	6	3	5	3	6	3	5	3	7	4	6	3	7	4	5	3	7	4	6	3	7	4	7	4
5	1	1	1	1	3	2	3	2	2	1	3	2	4	2	2	1	3	2	4	2	3	2	4	2	3	2	3	2
6	∞	∞	∞	∞	22	11	15	8	14	7	18	9	21	11	15	8	19	10	22	11	20	10	19	10	19	10	14	7
7	1	1	1	1	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	2	1	3	2	3	2	4	2	4	2	4	2	3	2
8	3	3	3	3	6	3	7	4	6	3	7	4	8	4	6	3	8	4	7	4	8	4	7	4	7	4	6	3
9	∞	∞	∞	∞	18	9	16	8	13	7	12	6	11	6	18	9	12	6	13	7	15	8	19	10	16	8	13	7
10	1	1	1	1	3	2	3	2	3	2	2	1	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	4	2	4	2
11	1	1	1	1	2	1	3	2	3	2	4	2	4	2	4	2	4	2	3	2	3	2	3	2	3	2	4	2
12	2	2	2	2	4	2	4	2	3	2	5	3	5	3	3	2	4	2	4	2	3	2	4	2	5	3	5	3
13	4	4	4	4	9	5	10	5	12	6	10	5	9	5	8	4	12	6	10	5	8	4	8	4	9	5	12	6
14	∞	∞	∞	∞	18	9	16	8	14	7	21	11	15	8	16	8	19	10	14	7	19	10	15	8	20	10	16	8
15	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
16	3	3	3	3	7	4	7	4	7	4	9	5	6	3	8	4	9	5	7	4	9	5	6	3	9	5	8	4
17	5	5	5	5	13	7	15	8	13	7	15	8	14	7	14	7	11	6	12	6	15	8	11	6	17	9	13	7
18	7	7	7	7	17	9	15	8	18	9	22	11	15	8	21	11	16	8	21	11	18	9	19	10	17	9	16	8
19	6	6	6	6	20	10	21	11	14	7	19	10	17	9	18	9	13	7	19	10	13	7	16	8	16	8	18	9
20	∞	∞	∞	∞	8	4	8	4	10	5	9	5	6	3	8	4	10	5	7	4	7	4	9	5	7	4	8	4
21	2	2	2	2	4	2	4	2	5	3	4	2	4	2	5	3	4	2	4	2	3	2	4	2	4	2	5	3
22	5	5	5	5	14	7	12	6	13	7	13	7	14	7	14	7	12	6	10	5	13	7	15	8	16	8	12	6
23	2	2	2	2	5	3	4	2	3	2	3	2	4	2	5	3	4	2	3	2	4	2	3	2	3	2	3	2
24	∞	∞	∞	∞	19	10	20	10	14	7	16	8	17	9	21	11	18	9	15	8	17	9	16	8	18	9	17	9
25	∞	∞	∞	∞	2	1	3	2	3	2	3	2	2	1	3	2	3	2	4	2	3	2	3	2	4	2	3	2
26	5	5	5	5	13	7	13	7	16	8	12	6	14	7	12	6	15	8	16	8	15	8	13	7	15	8	12	6
27	1	1	1	1	3	2	2	1	2	1	3	2	2	1	3	2	3	2	3	2	3	2	2	1	3	2	3	2
28	1	1	1	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1

Ek Açıklamalar Ö.2. 28-2-1-1 Problemi için İşçiye Yönelik Tehlike Değerleri (b_{ih})

*i**h*	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
14	0	0	0	0	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
25	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27	0	0	0	0	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1
28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Ek Açıklamalar P.1. 28-2-1-2 Problemi için Görev Süreleri (t_{ih})

*i**h*	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
1	4	4	4	4	11	6	10	5	9	5	10	5	13	7	10	5	10	5	11	6	11	6	11	6	14	7	10	5
2	2	2	2	2	4	2	4	2	5	3	5	3	3	2	5	3	4	2	3	2	5	3	3	2	3	2	4	2
3	6	6	6	6	19	10	16	8	18	9	18	9	15	8	16	8	14	7	17	9	15	8	13	7	14	7	18	9
4	2	2	2	2	6	3	7	4	6	3	7	4	7	4	6	3	5	3	5	3	5	3	6	3	5	3	6	3
5	1	1	1	1	3	2	3	2	2	1	2	1	2	1	4	2	3	2	4	2	2	1	3	2	4	2	3	2
6	∞	∞	∞	∞	14	7	20	10	15	8	18	9	16	8	20	10	22	11	15	8	18	9	18	9	15	8	18	9
7	1	1	1	1	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	4	2	3	2	3	2
8	3	3	3	3	8	4	8	4	7	4	7	4	9	5	8	4	7	4	7	4	6	3	8	4	6	3	7	4
9	∞	∞	∞	∞	14	7	18	9	15	8	16	8	18	9	16	8	15	8	16	8	13	7	18	9	13	7	15	8
10	1	1	1	1	2	1	3	2	3	2	3	2	4	2	3	2	3	2	3	2	2	1	3	2	3	2	2	1
11	1	1	1	1	3	2	3	2	3	2	3	2	2	1	4	2	4	2	3	2	2	1	3	2	3	2	3	2
12	2	2	2	2	4	2	5	3	5	3	4	2	4	2	5	3	4	2	5	3	5	3	4	2	4	2	5	3
13	4	4	4	4	10	5	12	6	11	6	12	6	8	4	8	4	11	6	10	5	10	5	11	6	12	6	9	5
14	∞	∞	∞	∞	18	9	14	7	14	7	16	8	16	8	20	10	14	7	14	7	17	9	20	10	20	10	20	10
15	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
16	3	3	3	3	6	3	9	5	6	3	7	4	8	4	6	3	7	4	9	5	9	5	8	4	10	5	6	3
17	5	5	5	5	17	9	16	8	16	8	12	6	14	7	13	7	13	7	12	6	17	9	13	7	17	9	17	9
18	7	7	7	7	19	10	21	11	22	11	17	9	22	11	22	11	18	9	23	12	15	8	18	9	24	12	22	11
19	6	6	6	6	18	9	20	10	17	9	16	8	18	9	15	8	13	7	18	9	15	8	15	8	15	8	14	7
20	∞	∞	∞	∞	10	5	8	4	8	4	8	4	9	5	6	3	10	5	6	3	7	4	7	4	8	4	7	4
21	2	2	2	2	5	3	3	2	3	2	4	2	4	2	3	2	5	3	5	3	3	2	4	2	3	2	4	2
22	5	5	5	5	12	6	13	7	13	7	11	6	16	8	12	6	14	7	12	6	11	6	10	5	14	7	13	7
23	2	2	2	2	4	2	3	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	3	2	3	2	5	3	4	2	5	3
24	∞	∞	∞	∞	16	8	14	7	16	8	17	9	15	8	20	10	19	10	17	9	18	9	19	10	17	9	13	7
25	∞	∞	∞	∞	3	2	2	1	3	2	3	2	2	1	2	1	3	2	3	2	2	1	3	2	3	2	3	2
26	5	5	5	5	14	7	17	9	13	7	14	7	15	8	17	9	13	7	14	7	13	7	16	8	14	7	11	6
27	1	1	1	1	3	2	3	2	4	2	3	2	2	1	2	1	2	1	3	2	2	1	4	2	4	2	3	2
28	1	1	1	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1

Ek Açıklamalar P.2. 28-2-1-2 Problemi için İşçiye Yönelik Tehlike Değerleri (b_{ih})

*i**h*	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
14	0	0	0	0	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
25	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27	0	0	0	0	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1
28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Ek Açıklamalar R.1. 28-2-1-3 Problemi için Görev Süreleri (t_{ih})

*i**h*	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
1	4	4	4	4	13	7	9	5	13	7	11	6	12	6	11	6	12	6	14	7	13	7	11	6	11	6	10	5
2	2	2	2	2	4	2	4	2	5	3	4	2	3	2	5	3	4	2	4	2	4	2	4	2	5	3	4	2
3	6	6	6	6	17	9	14	7	17	9	20	10	18	9	12	6	15	8	17	9	19	10	16	8	14	7	13	7
4	2	2	2	2	7	4	6	3	5	3	5	3	6	3	7	4	5	3	5	3	6	3	5	3	7	4	7	4
5	1	1	1	1	3	2	3	2	3	2	2	1	2	1	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	2	1	3	2
6	∞	∞	∞	∞	22	11	16	8	21	11	16	8	22	11	15	8	16	8	19	10	16	8	17	9	15	8	18	9
7	1	1	1	1	3	2	4	2	2	1	4	2	4	2	3	2	3	2	4	2	3	2	3	2	3	2	2	1
8	3	3	3	3	8	4	6	3	8	4	6	3	7	4	6	3	8	4	8	4	8	4	8	4	6	3	8	4
9	∞	∞	∞	∞	11	6	15	8	19	10	17	9	15	8	15	8	15	8	11	6	11	6	12	6	19	10	13	7
10	1	1	1	1	3	2	3	2	3	2	4	2	3	2	3	2	3	2	4	2	3	2	4	2	4	2	3	2
11	1	1	1	1	3	2	4	2	3	2	3	2	3	2	3	2	4	2	3	2	3	2	4	2	3	2	4	2
12	2	2	2	2	3	2	4	2	4	2	4	2	5	3	4	2	4	2	3	2	4	2	3	2	4	2	4	2
13	4	4	4	4	11	6	9	5	10	5	9	5	9	5	10	5	12	6	10	5	9	5	8	4	11	6	12	6
14	∞	∞	∞	∞	17	9	15	8	15	8	15	8	20	10	18	9	13	7	14	7	14	7	17	9	20	10	19	10
15	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
16	3	3	3	3	8	4	9	5	7	4	10	5	9	5	7	4	8	4	9	5	8	4	10	5	6	3	10	5
17	5	5	5	5	16	8	17	9	12	6	11	6	11	6	16	8	12	6	16	8	16	8	13	7	14	7	12	6
18	7	7	7	7	18	9	17	9	23	12	22	11	17	9	18	9	21	11	14	7	22	11	20	10	19	10	22	11
19	6	6	6	6	19	10	17	9	19	10	15	8	20	10	17	9	15	8	17	9	17	9	14	7	14	7	21	11
20	∞	∞	∞	∞	7	4	8	4	9	5	7	4	9	5	8	4	7	4	8	4	9	5	6	3	7	4	9	5
21	2	2	2	2	4	2	5	3	3	2	4	2	5	3	4	2	3	2	5	3	4	2	5	3	4	2	4	2
22	5	5	5	5	12	6	10	5	12	6	16	8	12	6	13	7	16	8	13	7	12	6	10	5	15	8	16	8
23	2	2	2	2	4	2	4	2	5	3	3	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	3	2
24	∞	∞	∞	∞	14	7	16	8	18	9	15	8	15	8	15	8	16	8	18	9	16	8	14	7	15	8	14	7
25	∞	∞	∞	∞	3	2	4	2	3	2	4	2	2	1	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2
26	5	5	5	5	14	7	17	9	17	9	14	7	12	6	14	7	14	7	16	8	17	9	16	8	15	8	17	9
27	1	1	1	1	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	4	2	2	1	3	2	3	2	3	2	3	2
28	1	1	1	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1

Ek Açıklamalar R.2. 28-2-1-3 Problemi için İşçiye Yönelik Tehlike Değerleri (b_{ih})

*i**h*	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
14	0	0	0	0	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
25	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27	0	0	0	0	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1
28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Ek Açıklamalar S.1. 28-2-2-1 Problemi için Görev Süreleri (t_{ih})

*i**h*	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
1	4	4	4	9	5	11	6	8	4	17	9	17	9	13	7	9	5	6	3	12	6	13	7	5	3	15	8
2	2	2	2	6	3	5	3	2	1	2	1	6	3	3	2	2	1	6	3	5	3	4	2	2	1	3	2
3	6	6	6	22	11	18	9	15	8	24	12	24	12	20	10	14	7	7	4	24	12	16	8	9	5	15	8
4	2	2	2	4	2	7	4	8	4	7	4	4	2	8	4	7	4	8	4	5	3	4	2	8	4	6	3
5	1	1	1	2	1	3	2	3	2	3	2	2	1	1	1	3	2	4	2	3	2	2	1	4	2	2	1
6	∞	∞	∞	27	14	19	10	9	5	9	5	23	12	14	7	9	5	12	6	27	14	10	5	26	13	9	5
7	1	1	1	3	2	3	2	2	1	3	2	3	2	4	2	5	3	2	1	2	1	5	3	4	2	5	3
8	3	3	3	11	6	6	3	8	4	9	5	3	2	8	4	9	5	3	2	9	5	6	3	3	2	9	5
9	∞	∞	∞	21	11	20	10	7	4	14	7	15	8	10	5	18	9	21	11	19	10	11	6	20	10	16	8
10	1	1	1	2	1	4	2	4	2	2	1	4	2	3	2	4	2	4	2	2	1	4	2	5	3	5	3
11	1	1	1	4	2	3	2	2	1	4	2	4	2	5	3	2	1	2	1	4	2	4	2	3	2	2	1
12	2	2	2	4	2	6	3	5	3	6	3	6	3	2	1	5	3	4	2	6	3	5	3	5	3	6	3
13	4	4	4	8	4	15	8	14	7	8	4	15	8	12	6	5	3	16	8	5	3	4	2	12	6	13	7
14	∞	∞	∞	26	13	18	9	15	8	26	13	17	9	21	11	23	12	22	11	9	5	14	7	27	14	9	5
15	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	2	1	2	1	1	1	1	1
16	3	3	3	11	6	4	2	10	5	11	6	9	5	9	5	12	6	12	6	4	2	4	2	10	5	9	5
17	5	5	5	17	9	21	11	13	7	7	4	8	4	10	5	19	10	21	11	9	5	12	6	10	5	11	6
18	7	7	7	17	9	23	12	17	9	25	13	14	7	29	15	22	11	20	10	29	15	21	11	11	6	13	7
19	6	6	6	8	4	14	7	11	6	26	13	12	6	15	8	10	5	27	14	14	7	9	5	8	4	25	13
20	∞	∞	∞	10	5	10	5	6	3	4	2	4	2	7	4	4	2	7	4	12	6	9	5	4	2	12	6
21	2	2	2	4	2	3	2	3	2	4	2	5	3	3	2	4	2	6	3	5	3	5	3	5	3	4	2
22	5	5	5	9	5	15	8	19	10	6	3	13	7	21	11	10	5	11	6	8	4	14	7	15	8	11	6
23	2	2	2	5	3	2	1	5	3	5	3	4	2	3	2	2	1	3	2	2	1	5	3	4	2	5	3
24	∞	∞	∞	23	12	8	4	10	5	8	4	17	9	11	6	19	10	27	14	10	5	22	11	22	11	18	9
25	∞	∞	∞	3	2	1	1	5	3	2	1	4	2	2	1	4	2	3	2	2	1	4	2	3	2	2	1
26	5	5	5	20	10	15	8	7	4	22	11	20	10	15	8	19	10	16	8	13	7	21	11	6	3	9	5
27	1	1	1	3	2	2	1	2	1	3	2	3	2	2	1	3	2	2	1	4	2	1	1	4	2	4	2
28	1	1	1	2	1	2	1	1	1	3	2	3	2	1	1	2	1	2	1	2	1	2	1	3	2	2	1

Ek Açıklamalar S.2. 28-2-2-1 Problemi için İşçiye Yönelik Tehlike Değerleri (b_{ih})

*i**h*	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
14	0	0	0	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
25	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27	0	0	0	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1
28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Ek Açıklamalar Ş.1. 28-2-2-2 Problemi için Görev Süreleri (t_{ih})

i\h	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
1	4	4	4	6	3	12	6	17	9	17	9	15	8	17	9	6	3	15	8	7	4	9	5	12	6	14	7
2	2	2	2	2	1	5	3	5	3	6	3	2	1	6	3	2	1	5	3	3	2	6	3	3	2	4	2
3	6	6	6	13	7	20	10	25	13	23	12	7	4	12	6	24	12	21	11	6	3	25	13	15	8	15	8
4	2	2	2	9	5	9	5	2	1	8	4	8	4	6	3	9	5	3	2	4	2	4	2	5	3	9	5
5	1	1	1	1	1	4	2	2	1	2	1	1	1	2	1	3	2	4	2	1	1	4	2	4	2	3	2
6	∞	∞	∞	14	7	20	10	12	6	19	10	9	5	24	12	13	7	28	14	18	9	8	4	29	15	13	7
7	1	1	1	2	1	3	2	4	2	4	2	3	2	4	2	4	2	4	2	3	2	1	1	4	2	3	2
8	3	3	3	10	5	10	5	9	5	5	3	5	3	7	4	9	5	8	4	4	2	9	5	5	3	7	4
9	∞	∞	∞	19	10	8	4	17	9	17	9	17	9	23	12	8	4	18	9	8	4	24	12	21	11	6	3
10	1	1	1	3	2	3	2	3	2	4	2	3	2	3	2	4	2	3	2	5	3	1	1	4	2	2	1
11	1	1	1	2	1	4	2	2	1	4	2	2	1	2	1	4	2	3	2	4	2	4	2	1	1	1	1
12	2	2	2	3	2	5	3	5	3	3	2	6	3	2	1	3	2	6	3	3	2	2	1	4	2	4	2
13	4	4	4	4	2	15	8	5	3	11	6	7	4	5	3	15	8	11	6	14	7	8	4	9	5	9	5
14	∞	∞	∞	19	10	20	10	22	11	24	12	22	11	19	10	15	8	13	7	14	7	23	12	14	7	9	5
15	1	1	1	2	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
16	3	3	3	11	6	8	4	6	3	10	5	10	5	12	6	12	6	12	6	12	6	5	3	10	5	5	3
17	5	5	5	12	6	14	7	7	4	16	8	17	9	13	7	19	10	7	4	6	3	12	6	17	9	9	5
18	7	7	7	24	12	28	14	24	12	30	15	11	6	17	9	10	5	22	11	11	6	28	14	22	11	27	14
19	6	6	6	9	5	9	5	23	12	10	5	15	8	24	12	11	6	9	5	25	13	14	7	15	8	17	9
20	∞	∞	∞	5	3	11	6	6	3	4	2	5	3	12	6	3	2	11	6	7	4	12	6	4	2	9	5
21	2	2	2	5	3	2	1	4	2	6	3	2	1	3	2	4	2	6	3	5	3	6	3	6	3	3	2
22	5	5	5	9	5	20	10	16	8	13	7	7	4	21	11	15	8	21	11	9	5	13	7	17	9	7	4
23	2	2	2	5	3	6	3	2	1	5	3	5	3	5	3	6	3	3	2	3	2	6	3	5	3	3	2
24	∞	∞	∞	18	9	7	4	17	9	12	6	26	13	12	6	8	4	18	9	26	13	19	10	17	9	17	9
25	∞	∞	∞	4	2	2	1	5	3	4	2	5	3	2	1	4	2	5	3	3	2	4	2	4	2	5	3
26	5	5	5	16	8	11	6	12	6	22	11	17	9	16	8	7	4	13	7	9	5	15	8	19	10	9	5
27	1	1	1	3	2	2	1	4	2	4	2	2	1	2	1	4	2	4	2	3	2	2	1	5	3	3	2
28	1	1	1	1	1	2	1	3	2	2	1	2	1	1	1	3	2	2	1	2	1	1	1	2	1	3	2

Ek Açıklamalar Ş.2. 28-2-2-2 Problemi için İşçiye Yönelik Tehlike Değerleri (b_{ih})

*i**h*	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
14	0	0	0	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
25	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27	0	0	0	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1
28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Ek Açıklamalar T.1. 28-2-2-3 Problemi için Görev Süreleri (t_{ih})

i\h	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
1	4	4	4	4	2	14	7	15	8	13	7	5	3	6	3	17	9	5	3	13	7	12	6	10	5	8	4
2	2	2	2	5	3	2	1	5	3	5	3	4	2	6	3	4	2	6	3	2	1	2	1	4	2	2	1
3	6	6	6	9	5	21	11	18	9	14	7	24	12	10	5	21	11	17	9	14	7	19	10	15	8	20	10
4	2	2	2	3	2	3	2	5	3	5	3	8	4	5	3	7	4	4	2	6	3	3	2	4	2	8	4
5	1	1	1	4	2	1	1	2	1	4	2	3	2	5	3	3	2	4	2	1	1	4	2	3	2	4	2
6	∞	∞	∞	12	6	25	13	19	10	27	14	22	11	15	8	22	11	11	6	23	12	11	6	24	12	19	10
7	1	1	1	5	3	3	2	2	1	2	1	4	2	2	1	4	2	2	1	2	1	2	1	3	2	4	2
8	3	3	3	7	4	8	4	5	3	3	2	11	6	5	3	4	2	7	4	6	3	3	2	4	2	5	3
9	∞	∞	∞	21	11	21	11	23	12	21	11	21	11	14	7	13	7	13	7	10	5	15	8	15	8	19	10
10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	4	2	4	2	1	1	4	2	4	2	2	1	5	3	4	2
11	1	1	1	4	2	4	2	3	2	2	1	2	1	2	1	3	2	3	2	4	2	3	2	2	1	3	2
12	2	2	2	5	3	4	2	2	1	3	2	6	3	6	3	5	3	5	3	4	2	6	3	3	2	2	1
13	4	4	4	7	4	14	7	9	5	9	5	9	5	7	4	12	6	7	4	15	8	16	8	5	3	10	5
14	∞	∞	∞	10	5	15	8	10	5	16	8	9	5	22	11	17	9	16	8	26	13	12	6	19	10	15	8
15	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1
16	3	3	3	11	6	4	2	9	5	9	5	7	4	6	3	11	6	4	2	4	2	13	7	7	4	6	3
17	5	5	5	8	4	15	8	19	10	9	5	12	6	14	7	9	5	9	5	22	11	17	9	8	4	11	6
18	7	7	7	27	14	29	15	12	6	10	5	29	15	30	15	18	9	28	14	19	10	30	15	10	5	15	8
19	6	6	6	19	10	22	11	22	11	10	5	24	12	17	9	24	12	9	5	7	4	22	11	18	9	11	6
20	∞	∞	∞	4	2	9	5	12	6	6	3	11	6	6	3	13	7	11	6	9	5	5	3	11	6	6	3
21	2	2	2	5	3	6	3	5	3	3	2	5	3	3	2	2	1	3	2	3	2	3	2	2	1	4	2
22	5	5	5	19	10	20	10	16	8	8	4	19	10	8	4	14	7	7	4	18	9	8	4	10	5	7	4
23	2	2	2	6	3	5	3	2	1	4	2	6	3	5	3	5	3	3	2	3	2	4	2	2	1	6	3
24	∞	∞	∞	25	13	16	8	15	8	22	11	12	6	13	7	13	7	9	5	15	8	9	5	25	13	18	9
25	∞	∞	∞	3	2	3	2	4	2	4	2	5	3	3	2	2	1	4	2	3	2	4	2	3	2	2	1
26	5	5	5	11	6	17	9	22	11	13	7	8	4	16	8	8	4	7	4	9	5	17	9	7	4	11	6
27	1	1	1	2	1	4	2	3	2	4	2	2	1	1	1	3	2	2	1	3	2	5	3	3	2	3	2
28	1	1	1	2	1	2	1	3	2	1	1	2	1	1	1	2	1	3	2	3	2	1	1	3	2	2	1

Ek Açıklamalar T.2. 28-2-2-3 Problemi için İşçiye Yönelik Tehlike Değerleri (b_{ih})

*i**h*	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
14	0	0	0	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
25	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27	0	0	0	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1
28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0