

**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ DOKTORA PROGRAMI**

**MONTAJ HATTI DENGEME VE İŞÇİ ATAMA PROBLEMİNDE
ERGONOMİK UZANTILI YENİ MODELLER**

HAZIRLAYAN

YELDA YENER

DOKTORA TEZİ

ANKARA – 2023

**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ DOKTORA PROGRAMI**

**MONTAJ HATTI DENGELEME VE İŞÇİ ATAMA PROBLEMİNDE
ERGONOMİK UZANTILI YENİ MODELLER**

HAZIRLAYAN

YELDA YENER

DOKTORA TEZİ

TEZ DANIŞMANI

DOÇ. DR. GÜLİN FERYAL CAN

ANKARA – 2023

BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı Endüstri Mühendisliği Doktora Programı çerçevesinde Yelda YENER tarafından hazırlanan bu çalışma, aşağıdaki jüri tarafından Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Savunma Tarihi: 04/08/2023

Tez Adı: Montaj Hattı Dengeleme ve İşçi Atama Probleminde Ergonomik Uzantılı Yeni Modeller

Tez Jüri Üyeleri (Unvanı, Adı - Soyadı, Kurumu)		İmza
Doç.Dr. Gülin Feryal CAN	Başkent Üniversitesi	
Prof.Dr. Ergün ERASLAN	Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi	
Dr.Öğr.Üyesi Tusan DERYA	Başkent Üniversitesi	
Prof.Dr. Kumru Didem ATALAY	Başkent Üniversitesi	
Doç.Dr. Aylin ADEM	Gazi Üniversitesi	

ONAY

Prof.Dr. Faruk ELALDI
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü
Tarih : ... / ... /

BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS / DOKTORA TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

Tarih: ... / ... / 20...

Öğrencinin Adı, Soyadı: Yelda YENER

Öğrencinin Numarası: 21710414

Anabilim Dalı: Endüstri Mühendisliği

Programı: Endüstri Mühendisliği

Danışmanın Unvanı/Adı, Soyadı: Doç.Dr. Gülin Feryal CAN

Tez Başlığı: Montaj Hattı Dengeleme ve İşçi Atama Probleminde Ergonomik Uzantılı
Yeni Modeller

Yukarıda başlığı belirtilen Doktora tez çalışmamın; Giriş, Ana Bölümler ve Sonuç Bölümünden oluşan, toplam 130 sayfalık kısmına ilişkin, 27 / 08 / 2023 tarihinde şahsım/tez danışmanım tarafından Turnitin adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 8'dir. Uygulanan filtrelemeler:

1. Kaynakça hariç
2. Alıntılar hariç
3. Beş (5) kelimeden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

“Başkent Üniversitesi Enstitüleri Tez Çalışması Orijinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Usul ve Esaslarını” inceledim ve bu uygulama esaslarında belirtilen azami benzerlik oranlarına tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Öğrenci İmzası:.....

ONAY

Tarih: ... / ... / 2023

Öğrenci Danışmanı

Doç.Dr. Gülin Feryal CAN

TEŞEKKÜR

Doktora tez sürecim boyunca yardımlarını hiç esirgemeyen, fikir ve yönlendirmeleriyle akademik kariyerime büyük katkısı olan Tez Danışmanım Sayın Doç.Dr. Gülin Feryal CAN'a saygılarımı sunar ve sonsuz teşekkürü bir borç bilirim.

Tez çalışmamın her aşamasında değerli katkılarda bulunan, tez izleme jürisindeki değerli Hocalarım Prof. Dr. Ergün ERASLAN ve Dr. Öğr. Üyesi Tusan DERYA'ya şükranlarımı sunarım.

Son olarak, hayatımın her döneminde olduğu gibi, tez sürecimin her aşamasında da manevi destekleriyle yanımda olan aileme, akademik ve manevi desteğini esirgemeyen Eşim Mehmet Erdem'e ve neşe kaynağımız, oğlum Kemal Eren'e anlayışları için teşekkür eder, sevgilerimi sunarım.

ÖZET

Yelda YENER

MONTAJ HATTI DENGELEME VE İŞÇİ ATAMA PROBLEMİNDE ERGONOMİK UZANTILI YENİ MODELLER

Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

2023

İşgücünün üretimde yoğun olarak yer aldığı montaj hatlarının verimliliği, bu hatlarda çalışan işçilerin performans düzeylerine bağlıdır. İşçilerin performans düzeyleri ise, heterojen yapıdaki işçi özelliklerinden etkilenmektedir. Söz konusu heterojen özellikler, çalışma ortamı koşullarından da işçilerin farklı düzeylerde etkilenmelerini beraberinde getirmektedir. Bu nedenle, insan ve çalışma ortamı arasındaki uyumu sağlamaya yönelik sistematik faaliyetlerin gerçekleştirildiği ergonomi biliminden, Montaj Hattı Dengeleme ve İşçi Atama Problemlerinde (MHDİAP) yararlanılması gereklidir. Böylece, işçilerin heterojen özelliklerini dikkate alan ve gerçek üretim koşullarını yansıtabilecek Ergonomik Montaj Hattı Dengeleme ve İşçi Atama Problemi (Ergo-MHDİAP) modelleri kurulabilecek ve hatların verimlilik düzeyleri daha güvenilir bir şekilde belirlenebilecektir. Bu kapsamda tez çalışmasında, farklı ergonomik risk faktörlerinin dikkate alındığı altı Ergo-MHDİAP modeli önerilmiştir: Birinci modelde, çevresel risk faktörlerinden aydınlatma ve gürültü faktörleri ile Uygun olmayan Çalışma Duruşları (UOÇD) kısıtlarda yer almış ve çevrim süresinin en küçüklenmesi amaçlanmıştır. Çalışma duruşlarına ilişkin risk düzeyinin belirlenmesi amacıyla Hızlı Tüm Vücut Değerlendirme (Rapid Entire Body Assessment-REBA) yöntemi, duruşların sergilenme sürelerine bağlı olarak kullanılmıştır. İkinci modelde, çevresel risk faktörleri ve UOÇD kısıtlarda yer almış ve çevrim süresinin en küçüklenmesi ile psikolojik risk faktörü kapsamında işçilerin tercih ettikleri görev/leri yapabilmelerinin en büyüklenmesi amaçlanmıştır Üçüncü modelde, bireysel risk faktörleri kapsamında işçilerin farklı özellikleri dikkate alınarak hesaplanan iş kazası yapma olasılığı, çevrim süresi ile en küçüklenmiş, çevresel risk faktörleri ile UOÇD kısıtlarda yer almıştır. Dördüncü modelde, çevresel risk faktörleri ile UOÇD kısıtlarda yer almış, işçilerin enerji tüketim miktarları ve çevrim süresi en küçüklenmiştir. Beşinci modelde, çevresel risk

faktörleri ve UOÇD kısıtlarda yer verilmiş, çevrim süresi en küçüklenerek, işçilerin deneyim düzeylerine göre uygun görevlere atanabilmeleri en büyüklenmiştir. Son modelde ise, çalışmada dikkate alınan bütün ergonomik risk faktörlerinin yer aldığı bütünleşik bir MHDİAP modeli önerilmiştir. Geliştirilen ilk model, tek amaçlı olduğundan matematiksel modelleme ile çözülmüştür. İkinci, üçüncü, dördüncü ve beşinci modeller iki amaçlı olmaları sebebiyle Pareto Çözümler (Pareto Solutions-PSs) ortaya konulmuştur. Son model için ise, Uzlaşık Çözümler (Compromise Solution-CSs) elde edilmiştir. Önerilen matematiksel modellerin çözümlerinde, 18 görevin ve 7 işçinin yer aldığı, gerçek bir üretim ortamına ait veriler kullanılmıştır. Ayrıca, başka araştırmacılar tarafından daha önce geliştirilen 24 ve 28 görevli MHDİAP test verileri kullanılarak performans analizleri altı model için de yapılmıştır. Çalışma sonucunda, geliştirilen modeller ile makul sürelerde en iyi sonuca ulaşıldığı görülmüştür. Buna göre önerilen bütünleşik modelin, Ergo-MHIADP literatürü açısından katkı sağlayabilecek, orijinal ve detaylı bir yapıya sahip olduğu değerlendirilmiştir. Ayrıca karar vericilere, heterojen işçi özellikleri ve ergonomik risk faktörleri dikkate alınarak, montaj hatlarının verimliliğini artırabilmek açısından bir karar mekanizması olarak destek sağlayabilecektir.

ANAHTAR KELİMELELER: MHDİAP, Ergonomik Risk Faktörleri, Gürültü, Aydınlatma, Çalışma Duruşu, Görev Seçimi, Enerji Tüketimi, İş Kazası Olasılığı, İşçi-Görev Uyumu.

ABSTRACT

Yelda YENER

NEW MODELS WITH ERGONOMIC EXTENSION IN THE ASSEMBLY LINE WORKER ASSIGNMENT AND BALANCING PROBLEM

Baskent University Institute of Science and Engineering

Department of Industrial Engineering

2023

The efficiency of assembly lines where workers are taken place intensively depends on the performance levels of the workers working on these lines. The performance levels of the workers are affected by the heterogeneous worker characteristics. These heterogeneous features cause workers to be affected by working environment conditions at different levels. For this reason, it is necessary to benefit from the science of ergonomics in Assembly Line Worker Assignment and Balancing Problem (ALWABP), where systematic activities are carried out to ensure harmony between human and working environment. Therefore, Ergonomic Assembly Line Worker Assignment and Balancing Problem (Ergo-ALWABP) models considered the heterogeneous characteristics of the workers and reflect the real production conditions will be established and the productivity levels of the lines will be determined more reliably. In this context throughout the theses study, six Ergo-ALWABP models have been proposed, in which different ergonomic risk factors are taken into account. In the first model, environmental risk factors such as illumination and noise factors and Inappropriate Working Postures (IWP) are included in the constraints and it is aimed to minimize the cycle time. The Rapid Entire Body Assessment (REBA) method was used to determine the risk level of working postures, depending on the duration of the postures being used. In the second model, environmental risk factors and IWP are included in the constraints and it is aimed to minimize the cycle time and maximize the ability of workers to perform their preferred task/s considering the psychological risk factor. In the third model, the probability of having an occupational accident, which is calculated by considering the different characteristics of the workers within the scope of individual risk factors, is minimized with the cycle time and with that, environmental risk factors and IWP are included in the constraints. In the fourth model, environmental risk factors and IWP are

included in the constraints, and the energy expenditure amounts of the workers and cycle times are minimized. In the fifth model, environmental risk factors and IWP are included in the constraints, the cycle time is minimized and the assignment of workers to appropriate tasks according to their experience level is maximized. In the last model, an integrated ALWABP model is proposed, which includes all the ergonomic risk factors considered in the study. Since the first model developed was single-objective, it was solved by mathematical modeling. Since the second, third, fourth and fifth models are two-objective, Pareto Solutions (PSs) has been put forward. For the last model, Compromise Solution-CSs were obtained. In the solutions of the proposed mathematical models, data belonging to a real production environment with 18 tasks and 7 workers were used. In addition, performance analysis for the 24 and 28 tasks ALWABP test data which previously developed by other researchers was performed for all of the six models. As a result of the study, it was seen that the best results were achieved in reasonable times with the developed models. Accordingly, it has been evaluated that the proposed integrated model has an original and detailed structure that can contribute to the Ergo-ALWABP literature. In addition, it will be able to support decision makers as a decision mechanism in order to increase the efficiency of assembly lines, considering heterogeneous worker characteristics and ergonomic risk factors.

KEYWORDS: ALWABP, Ergonomic Risk Factors, Noise, Illumination, Working Posture, Task Selection, Energy Expenditure, Occupational Accident Probability, Worker-Task Compatibility.

İÇİNDEKİLER LİSTESİ

TEŞEKKÜR.....	i
ÖZET	ii
ABSTRACT	iv
İÇİNDEKİLER LİSTESİ	vi
TABLolar LİSTESİ	viii
ŞEKİLLER LİSTESİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	xiii
1 GİRİŞ.....	1
2 MONTAJ HATTI Dengeleme ve İŞÇİ ATAMA PROBLEMİ (MHDİAP)...	6
3 LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	11
3.1 Literatürde Ergonomik Montaj Hattı Dengeleme Problemini (Ergo-MHDP) konu alan çalışmalar	11
3.2 Literatürde Ergonomik İşçi Çizelgeleme Problemini (Ergo-İÇP) Konu Alan Çalışmalar	31
3.3 Literatürde Ergonomik Montaj Hattı Dengeleme ve İşçi Atama Problemini (Ergo-MHDİAP) konu alan çalışmalar	46
3.4 Tez Çalışmasının Literatüre Katkısı.....	52
4 ÇALIŞMADA KULLANILAN YÖNTEMLER	54
4.1 Pareto Çözüm	55
4.2 Uzlaşık Çözüm.....	58
5 ÇALIŞMADA DİKKATE ALINAN ERGONOMİK RİSK FAKTÖRLERİ.....	59
5.1 Psikolojik Faktör: İşçilerin Görev Tercihleri.....	59
5.2 Fizyolojik Faktör: Enerji Tüketimi.....	60
5.3 Bireysel Faktör: İş Kazası Olasılığı.....	61
5.4 Deneyim uygunluk eşleştirmesi	65

5.5	Çevresel Risk Faktörleri	68
5.5.1	Aydınlatma	68
5.5.2	Gürültü	69
5.6	Uygun olmayan çalışma duruşları (UOÇD)	71
6	Ergo-MHDİA PROBLEMİNİN TANIMLANMASI	73
6.1	Önerilen Matematiksel Modeller	74
6.1.1	Model 1:MHDİAP_ÇF_ÇD	77
6.1.1.1	MHDİAP_ÇF_ÇD Modelinin Uygulaması	80
6.1.1.1.1	Aydınlatma faktörünün kısıt olarak eklendiği tek amaçlı modelin çözümü.....	83
6.1.1.1.2	Gürültü faktörünün kısıt olarak eklendiği tek amaçlı modelin çözümü.....	84
6.1.1.1.3	Uygun olmayan çalışma duruşu faktörünün kısıt olarak eklendiği tek amaçlı modelin çözümü	86
6.1.1.1.4	MHDİAP_ÇF_ÇD modelinin çözümü.....	89
6.1.2	Model 2: Ergo-MHDİAP_GT	91
6.1.2.1	Ergo-MHDİAP_GT Uygulaması	92
6.1.3	Model 3: Ergo-MHDİAP_İKO.....	96
6.1.3.1	Ergo-MHDİAP_İKO Uygulaması	97
6.1.4	Model 4 : Ergo-MHDİAP_ET	102
6.1.4.1	Model 4: Ergo-MHDİAP_ET Uygulaması.....	102
6.1.5	Model 5: Ergo-MHDİAP_D.....	107
6.1.5.1	Ergo-MHDİAP_D Uygulaması	108
6.1.6	Model 6: ERGO-MHDİAP	112
6.1.6.1	Ergo-MHDİAP Uygulaması	114
7	ÖNERİLEN MODELİN PERFORMANS ANALİZİ.....	120
8	SONUÇ VE ÖNERİLER	131
	KAYNAKLAR.....	135

TABLÖLER LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1. MHDİAP'ye Ait Notasyonlar	7
Tablo 3.1. Literatürde Ergo-MHDP'yi konu alan çalışmalarda dikkate alınan ergonomik risk faktörlerine ilişkin bilgiler	25
Tablo 3.2. Literatürde Ergo-İÇP'yi konu alan çalışmalarda dikkate alınan ergonomik risk faktörlerine ilişkin bilgiler	39
Tablo 3.3. Literatürde Ergo-MHDİAP'yi konu alan çalışmalarda dikkate alınan ergonomik risk faktörlerine ilişkin bilgiler	49
Tablo 5.1. İşçilerin bireysel özellikleri	62
Tablo 5.2. Sınıflandırma Tablosu	64
Tablo 5.3. Lojistik regresyon analizi sonuçları	65
Tablo 5.4. Görevlerin gerektirdiği deneyim düzeyleri	66
Tablo 5.5. İşçilerin dahil oldukları deneyim düzeyleri	67
Tablo 5.6. Deneyim gruplarına göre kötü atama örneği	67
Tablo 5.7. Deneyim gruplarına göre iyi atama örneği	67
Tablo 5.8. REBA Yöntemindeki Eylem Düzeyleri	72
Tablo 6.1. Geliştirilen matematiksel modellerin özet tanıtımı	74
Tablo 6.2. Her işçi için görev tamamlama süreleri (dk^{-3})	81
Tablo 6.3. MHDİAP modeline aydınlatma faktörü kısıt olarak eklendiğinde elde edilen sonuçlar	83
Tablo 6.4. MHDİAP modeline aydınlatma kısıtının eklendiğinde ve $as^{\ddot{u}}=3$ iken oluşan gürültü seviyeleri	84
Tablo 6.5. MHDİAP modeline gürültü faktörü kısıt olarak eklendiğinde elde edilen sonuçlar	85
Tablo 6.6. MHDİAP modelinde gürültü kısıtı eklendiğinde istasyonlarda oluşan gürültü seviyeleri	85
Tablo 6.7. MHDİAP modeline UOÇD faktörü kısıt olarak eklendiğinde elde edilen sonuçlar	86
Tablo 6.8. MHDİAP modelinde UOÇD faktörü dikkate alındığında oluşan gürültü seviyeleri	88

Tablo 6.9. MHDİAP_ÇF_ÇD sonuçları	89
Tablo 6.10. $as^{\ddot{u}}$ 'nün değişen değerlerine göre MHDİAP_ÇF_ÇD modelinden elde edilen gürültü seviyeleri	90
Tablo 6.11. Ergo-MHDİAP_GT'de seçilen bir çözüm için elde edilen sonuçlar	94
Tablo 6.12. MHDİAP_GT için değişen $as^{\ddot{u}}$ değerlerine göre ortaya çıkan gürültü seviyeleri (dB)	95
Tablo 6.13. Ergo-MHDİAP_İKO modelinin $as^{\ddot{u}}$ 'nün değişen değerlerine göre elde edilen sonuçları.....	99
Tablo 6.14. MHDİAP_İKO modelinde $as^{\ddot{u}}$ 'nün değişen değerlerine göre ortaya çıkan gürültü seviyeleri (dB).....	100
Tablo 6.15. MHDİAP_İKO PS'den elde edilen Z değerlerine göre iş kazası olasılık değerleri	101
Tablo 6.16. Ergo-MHDİAP_ET modelinde değişen $as^{\ddot{u}}$ değerlerine göre elde edilen sonuçlar.....	104
Tablo 6.17. MHDİAP_ET için $as^{\ddot{u}}$ 'nün değişen değerlerine göre ortaya çıkan gürültü seviyeleri (dB)	105
Tablo 6.18. İşçilerin deneyimlerine göre tanımlanan Y_h deneyim düzeyi puanı	107
Tablo 6.19. Ergo-MHDİAP_D modelinde $as^{\ddot{u}}$ değerlerine göre elde edilen sonuçlar.....	110
Tablo 6.20. MHDİAP_D için değişen $as^{\ddot{u}}$ değerlerine göre ortaya çıkan gürültü seviyeleri (dB).....	111
Tablo 6.21. Değişen $as^{\ddot{u}}$ değerlerine göre önerilen bütünleşik Ergo-MHDİAP modelinden elde edilen sonuçlar	114
Tablo 6.22. Ergo-MHDİAP için değişen $as^{\ddot{u}}$ değerlerine göre ortaya çıkan gürültü seviyeleri (dB)	115
Tablo 6.23. MHDİAP VE MHDİAP_ÇF_ÇD modellerinin atama sonuçlarına göre amaç fonksiyonu değerleri	118
Tablo 7.1. MHDİAP_ÇF_ÇD için test problemi sonuçları ve çözüm süreleri.....	120
Tablo 7.2. Ergo-MHDİAP_GT için test problemi sonuçları ve çözüm süreleri.....	122
Tablo 7.3. Ergo-MHDİAP_İKO için test problemi sonuçları ve çözüm süreleri.....	123
Tablo 7.4. Ergo-MHDİAP_ET için test problemi sonuçları ve çözüm süreleri	125
Tablo 7.5. Ergo-MHDİAP_D için test problemi sonuçları ve çözüm süreleri	127
Tablo 7.6. Ergo-MHDİAP için test problemi sonuçları ve çözüm süreleri	128

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 3.1. Literatürde Ergo-MHDP'ye odaklanan çalışmaların amaç fonksiyonlarına göre dağılımları.	29
Şekil 3.2. Literatürde Ergo-MHDP'ye odaklanan çalışmaların uygulama alanlarına göre dağılımları	30
Şekil 3.3. Literatürde Ergo-MHDP'ye odaklanan çalışmaların kullandıkları çözüm yöntemlerine göre dağılımları.	30
Şekil 3.4. Literatürde Ergo-İÇP'ye odaklanan çalışmaların amaç fonksiyonlarına göre dağılımları	45
Şekil 3.5. Literatürde Ergo-İÇP'ye odaklanan çalışmaların uygulama alanlarına göre dağılımları	45
Şekil 3.6. Literatürde Ergo-İÇP'ye odaklanan çalışmaların kullanılan çözüm yöntemlerine göre dağılımları	46
Şekil 3.7. Literatürde Ergo-MHDİA'ya odaklanan çalışmaların amaç fonksiyonlarına göre dağılımları	51
Şekil 3.8. Literatürde Ergo-MHDİA'ya odaklanan çalışmaların uygulama alanlarına göre dağılımları	51
Şekil 3.9. Literatürde Ergo-MHDİA'ya odaklanan çalışmaların kullanılan çözüm yöntemlerine göre dağılımları	51
Şekil 5.1. Çoklu Kaynak Kullanımında Gürültü Seviyeleri	70
Şekil 6.1. Çalışmada önerilen modelin hiyerarşik gösterimi	75
Şekil 6.2. Görevlerin öncelik ilişkileri.....	82
Şekil 6.3. Miralles vd. (2007) tarafından önerilen MHDİAP'nin çözümü.....	82
Şekil 6.4. MHDİAP modelinde $as^{\ddot{U}} = 2$ olduğu zaman elde edilen çözüm.....	83
Şekil 6.5. Temel MHDİAP modelinde $as^{\ddot{U}} = 3$ olduğu zaman elde edilen çözüm.....	83
Şekil 6.6. MHDİAP modelinde gürültü faktörü dikkate alındığında elde edilen çözüm	85
Şekil 6.7. MHDİAP modelinde UOÇD faktörü dikkate alındığında elde edilen çözüm.....	86

Şekil 6.8. MHDİAP modelinde UOÇD faktörü dikkate alınmadığında ortaya çıkan süre bağımlı REBA skoru dağılımları	87
Şekil 6.9. MHDİAP modelinde UOÇD faktörü dikkate alındığında ortaya çıkan süre bağımlı REBA skoru dağılımları	87
Şekil 6.10. $as^{\ddot{U}} = 2$ olduğunda MHDİAP_ÇF_ÇD'den elde edilen çözüm.....	89
Şekil 6.11. $as^{\ddot{U}} = 3$ olduğunda MHDİAP_ÇF_ÇD'den elde edilen çözüm.....	89
Şekil 6.12. MHDİAP_ÇF_ÇD kapsamında UOÇD için süre bağımlı REBA skoru dağılımları	90
Şekil 6.13. $as^{\ddot{U}} = 3$ olduğunda Ergo-MHDİAP_GT için elde edilen sonuçlar	92
Şekil 6.14. $as^{\ddot{U}} = 2$ olduğunda Ergo-MHDİAP_GT için elde edilen sonuçlar	93
Şekil 6.15. Ergo-MHDİAP_GT modelinde $as^{\ddot{U}} = 2$ olduğunda elde edilen çözüm	94
Şekil 6.16. Ergo-MHDİAP_GT modelinde $as^{\ddot{U}} = 3$ olduğunda elde edilen çözüm	94
Şekil 6.17. MHDİAP_ÇF_ÇD kapsamında UOÇD için süre bağımlı REBA skoru dağılımları.....	96
Şekil 6.18. $as^{\ddot{U}} = 3$ olduğunda Ergo-MHDİAP_İKO için elde edilen sonuçlar	98
Şekil 6.19. $as^{\ddot{U}} = 2$ olduğunda Ergo-MHDİAP_İKO için elde edilen sonuçlar	98
Şekil 6.20. $as^{\ddot{U}} = 2$ olduğunda Ergo-MHDİAP_İKO için elde edilen çözüm	100
Şekil 6.21. $as^{\ddot{U}} = 2$ olduğunda Ergo-MHDİAP_İKO için elde edilen çözüm	100
Şekil 6.22. MHDİAP_İKO kapsamında UOÇD için süre bağımlı REBA skoru dağılımları	101
Şekil 6.23. $as^{\ddot{U}} = 3$ olduğunda Ergo-MHDİAP_ET için elde edilen sonuçlar.....	103
Şekil 6.24. $as^{\ddot{U}} = 2$ olduğunda Ergo-MHDİAP_ET için elde edilen sonuçlar.....	103
Şekil 6.25. $as^{\ddot{U}} = 2$ olduğunda Ergo-MHDİAP_ET modelinden elde edilen çözüm.....	104
Şekil 6.26. $as^{\ddot{U}} = 3$ olduğunda Ergo-MHDİAP_ET modelinden elde edilen çözüm.....	104
Şekil 6.27. MHDİAP_ÇF_ÇD kapsamında UOÇD için süre bağımlı REBA skoru dağılımları.....	106
Şekil 6.28. MHDİAP modelinde enerji tüketimi düzgünlüğü sağlanmadan önceki iş istasyonlarına ait enerji tüketimi dağılımı	106
Şekil 6.29. Erg-MHDİAP_ET modelinde enerji tüketimi düzgünlüğü sağlandıktan sonra iş istasyonlarına ait enerji tüketimi dağılımı	107
Şekil 6.30. $as^{\ddot{U}} = 3$ olduğunda Ergo-MHDİAP_D modelinden elde edilen sonuçlar.....	109

Şekil 6.31. $as^{\ddot{U}} = 2$ olduğunda Ergo-MHDİAP_D modelinden elde edilen sonuçlar.....	109
Şekil 6.32. $as^{\ddot{U}} = 2$ olduğunda Ergo-MHDİAP_D modelinden elde edilen çözüm.....	110
Şekil 6.33. $as^{\ddot{U}} = 3$ olduğunda Ergo-MHDİAP_D modelinden elde edilen çözüm.....	110
Şekil 6.34. MHDİAP_D kapsamında UOÇD için süre bağımlı REBA skorları dağılımları	112
Şekil 6.35. $as^{\ddot{U}} = 2$ olduğunda Ergo-MHDİAP modelinden elde edilen çözüm	115
Şekil 6.36. $as^{\ddot{U}} = 3$ olduğunda Ergo-MHDİAP modelinden elde edilen çözüm	115
Şekil 6.37. Ergo-MHDİAP kapsamında UOÇD için süre bağımlı REBA skorlarının dağılımları	116
Şekil 6.38. Ergo-MHDİAP kapsamında iş istasyonlarının enerji tüketim miktarı.....	116

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

2SSA	Two Phase Simulating Annealing (İki Aşamalı Tavlama Benzetimi)
ACGIH	American Conference of Governmental Industrial Hygienists (Devlet Endüstriyel Hijyenistlerin Amerikan Konferansı)
ARP	Accumulated Risk of Postures (Birikimli Duruş Riski)
BDA	Benders Decomposition Algorithm (Benders Ayrıştırma Algoritması)
BIP	Binary Integer Programming (0-1 Tam Sayılı Programlama)
BMHDP-1	Basit Montaj Hattı Dengeleme Problemi-1
BMHDP-2	Basit Montaj Hattı Dengeleme Problemi-2
BWM	Best-Worst Method (En İyi-En Kötü Yöntemi)
CEMM	Conditional Exponential Mathematical Model (Üstel Koşullu Matematiksel Model)
CGA	Column Generation Algorithm (Sütun Geliştirme Yaklaşımı)
COMSOAL	Computer Method for Sequencing Operations for Assembly Lines
CP	Constraint Programming (Kısıt programlama)
CS	Compromise Solution (Uzlaşık Çözüm)
DA	Dragonfly Algorithm (Yusufçuk Algoritması)
EAWS	Ergonomic Assessment Worksheet (Ergonomik Değerlendirme Formu)
ECRot	Ergonomic and Competent Rotation (Ergonomik ve Yeterlilik Rotasyon Modeli)
ELECTRE	Elimination and Choice Translating Reality
Ergo-ALWARBP	Ergonomic Assembly Line Balancing and Re-Balancing Problem
Ergo-İAP	Ergonomik İşçi Atama Problemi
Ergo-İÇP	Ergonomik İş Çizelgeleme Problemi
Ergo-MHDİAP	Ergonomik Montaj Hattı Dengeleme ve İşçi Atama Problemi
Ergo-MHDİAP_D	Deneyimin dikkate alındığı Ergo-MHDİAP
Ergo-MHDİAP_ET	Enerji Tüketiminin dikkate alındığı Ergo-MHDİAP
Ergo-MHDİAP_GT	Görev tercihinin dikkate alındığı Ergo-MHDİAP
Ergo-MHDİAP_İKO	İş kazası olasılığının dikkate alındığı Ergo-MHDİAP
Ergo-MHDP	Ergonomik Montaj Hattı Dengeleme Problemi

FGP	Fuzzy Goal Programming (Bulanık Hedef Programlama)
GA	Genetic Algorithm (Genetik Algoritma)
GAMS	Genel Cebirsel Modelleme Sistemi
GGA	Group Genetic Algorithm (Grup Genetik Algoritma)
GP	Goal Programming (Hedef Programlama)
GRASP	Greedy Randomized Adaptive Search Procedure (Açgözlü Rastgele Adaptif Arama Prosedürü)
GWO	Grey Wolf Optimizer (Gri Kurt Optimizasyonu)
HA	Heuristic Algorithm
HGA	Hybrid Problem Space Genetic Algorithm (Hibrit Problem Uzayı Genetik Algoritması)
JSI	Job Severity Index (Görev Şiddet İndeksi)
KİSR	Kas-İskelet Sistemi Rahatsızlıkları
LS	Local Search (Yerel Arama)
MHDİAP	Montaj Hattı Dengeleme ve İşçi Atama Problemi
MHDİAP_ÇF_ÇD	Çevresel faktörler ile UOÇD'nun dikkate alındığı MHDİAP
MHDP	Montaj Hattı Dengeleme Problemi
MIP	Mixed Integer Programming (Tam Sayılı Programlama)
MOGA	Multi Objective Genetic Algorithm (Çok Amaçlı Genetik Algoritma)
MRH	Multi Ranking Heuristic (Çoklu Sıralama Sezgiseli)
NA	Normal Seviye Aydınlatma
NASA-TLX	NASA Task Load Index (NASA İş Yüğü İndeksi)
NIOSH	National Institute of Occupational Safety and Health Lifting Equation (Ulusal Mesleki Güvenlik ve Sağlık Enstitüsü Kaldırma Eşitliği)
NPF	Normalized Peak Force (Normalleştirilmiş Tepe Kuvveti)
OCRA	Occupational Repetitive Action Index (Mesleki Tekrarlı Hareket İndeksi)
OSHA	Occupational Safety and Health Administration (İş Güvenliği ve Sağlığı Kurumu)
OWAS	Ovako Working Posture Assessment System (Ovako Çalışma Duruşu Analiz Sistemi)
PMES	Predetermined Motion Energy System (Belirlenmiş Hareket Enerji Sistemi)
PSO	Particle Swarm Optimization (Parçacık Sürüşü Optimizasyonu)
PSs	Pareto Solutions (Pareto Çözümler)
RBSA	Rule Based Search Algorithm (Kural Tabanlı Arama Algoritması)

REBA	Rapid Entire Body Assesment (Hızlı Tüm Vücut Değerlendirme Yöntemi)
RIPGA	Restarted Iterated Pareto Greedy Algorithm (Yeniden Başlamalı İteratif Açgözlü Pareto Algoritması)
RULA	Rapid Upper Limb Assessment (Hızlı Üst Ekstremité Değerlendirme)
SSA	Salp Swarm Algorithm (Salp Sürüsü Optimizasyonu)
SWD	Sheltered Work Centres for Disabled (Engelliler İçin Korunaklı İş Merkezleri)
TS	Tabu Search (Tabu Arama)
UOÇD	Uygun Olmayan Çalışma Duruşları
WBGT	Wet Bulb Globe Temperature
WOS	Web of Science
WTCM	The Worker Tasks Categorization Matrix (İşçi-Görev Sınıflandırma Matrisi)
YA	Yüksek Seviye Aydınlatma
C	Çevrim süresi

1 GİRİŞ

Yoğun rekabetin yaşandığı günümüz pazar koşullarında, üretim maliyetlerinin düşürülmesi amacıyla üretim kaynaklarının etkin kullanılması daha fazla önem kazanmıştır. Bu durum, üreticileri seri üretime yöneltmiştir. Seri üretimde, standart ürünler yüksek hacimlerde üretilmektedir. Bu nedenle seri üretim sistemlerinde, montaj hatları ve bu hatların etkinliği çok önemli bir yere sahiptir. Montaj hatlarının etkinliği ise, ilgili hatlarda yer alan iş istasyonlarına ait istasyon sürelerinin dengelenmesi ile mümkündür. İstasyon süresi, söz konusu istasyonlara atanan görevlerin tamamlanma sürelerinin toplamıdır [1]. İstasyon süresinin, her bir iş istasyonu için aynı ya da yakın bir değer olarak ortaya çıkması, istasyon kapasitelerinin en yüksek düzeyde kullanılmasını da beraberinde getirmektedir. Bu kapsamda Montaj Hattı Dengeleme Problemi (MHDP) için çözüm arayışı, üretim verimliliğinin artırılması açısından ortaya çıkmaktadır. MHDP, belirli üretim koşulları altında, yüksek kaliteye ulaşmak ve üretim maliyetlerini azaltmak için kurulan montaj hatlarında, yapılması gereken görevlerin hattaki istasyonlara, ürün ve üretim kısıtlarına bağlı kalacak ve istasyonlar arası iş yükü dengesini sağlayacak şekilde atanması ile çözülmektedir [2]. MHDP’de, montaj sürecinin gerçekleştirilmesi amacıyla yapılması gereken görevler, bu görevlerin tamamlanma süreleri ve aralarındaki öncelik ilişkileri verildiğinde, görevlerin bir performans ölçütünü eniyileyecek şekilde, sıralı iş istasyonlarına atanması amaçlanmaktadır [3]. Hat üzerinde yer alan istasyonlarda bulunan işçiler ya da robotlar, montajı gerçekleştirilecek ürün, kendi iş istasyonlarına geldiğinde, kendilerine atanmış görevi veya görevleri gerçekleştirirler. MHDP, 1955 yılında Salveson tarafından ortaya konulmuştur [4]. Jackson [5] ise, ilk olarak iş istasyonlarına görevlerin atanması için matematiksel model geliştirmiş ve geliştirdiği bu modeli dinamik programlama kullanarak çözmüştür.

Montaj hatlarının etkin bir şekilde tasarlanması sürecinde kullanılan performans ölçütleri genellikle; toplam iş istasyonu sayısının veya hatta üretilecek her bir ürün için çevrim süresinin (C) en küçüklenmesidir [6]. Bu çerçevede dengelenmiş montaj hatlarının tasarımı; üretim hızının artırılması, etkin bir üretim planlamanın yapılabilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Bununla birlikte hat dengeleme çalışmaları, üretim sisteminin değişimlere cevap verebilecek esneklikte olmasını sağlamak için de gerçekleştirilmelidir. Bu nedenle, hat tasarımı ve dengelemesi konularına duyulan ilgi her geçen gün artmaktadır [7].

Ancak literatür incelendiğinde yapılan çalışmaların çoğunun teorik düzeyde kaldığı, gerçek hayat uygulamalarına yönelik çok az sayıda çalışmanın olduğu belirlenmiştir. Bu kapsamda, MHDP konusunda yapılan çalışmalarda, gerçek hayata uyumlu yaklaşımlarla sonuca gidilmesi önem taşımaktadır. Gerçek hayata uyumlu yaklaşımlarla MHDP çalışmalarının yapılamamasının başlıca sebeplerinden bir tanesi, uygulamada hat dengeleme esnasında ortaya çıkan ve ihmal edilen heterojen işçi özellikleridir. “Heterojen” kavramı ile işçilerin farklı yeteneklere, farklı performans düzeylerine, farklı kişisel özelliklere, farklı sağlık durumlarına vb. sahip oldukları ifade edilmektedir. Söz konusu farklılıklar, işçilerin çalışma ortamı koşullarından da farklı düzeylerde etkilenmelerini beraberinde getirmektedir. İşgücünün yoğun olarak kullanıldığı montaj hatlarının etkinliği, bu hatlarda çalışan işçilerin performans düzeylerine bağlı olduğu için tüm bu farklılıklardan etkilenmektedir. Bu kapsamda, heterojen işgücü temelinde gerçek üretim koşullarını yansıtabilecek MHDP modellerinin kurulması, daha güvenilir sonuçlara ulaşılması açısından fayda sağlayacaktır.

Bununla birlikte, işçilerin söz konusu farklı özellikleri ve çalışma koşullarından etkilenme düzeyleri, ergonomi kapsamında dikkate alınan konulardır ve ergonomik risk faktörleri olarak literatürde yer almaktadırlar. Ergonomi biliminde, uygun olmayan çalışma ortamı koşullarının işçilerde farklı olumsuz zihinsel ve fizyolojik yansımaları beraberinde getirdiği savunulmaktadır. Bununla birlikte, üretim girdileri olarak tanımlanan makine, hammadde, insan gücü, yönetsel araçlar ve sermaye arasında diğerlerine göre yönetimi daha zor olanın insan olduğu belirtilmektedir. Üretimden istenen verimliliğin alınabilmesi, diğer kaynakların yönetimiyle beraber yüksek oranda işgücünün konforlu bir ortamda ve sağlık bütünlüğü bozulmadan çalışabilmesine bağlıdır. Diğer üretim girdilerinden farklı olarak işgücü yönetimi, birtakım hesaplamalarla elde edilen sonuçlara göre gerçekleştirilememektedir. Bunun en büyük sebebi, insanın duygusal bir varlık olması ve çevresindeki değişimlerden etkilenmesidir. Üretim verimliliğinin artırılması açısından insan kaynağına duyarlı yaklaşımların kullanılması çok önemlidir. Bu yaklaşımların belirlenmesi ve kullanılmalarına devam edilmesi ise, ergonomi biliminin süreç içinde yer alması ile mümkündür. Özellikle, emek yoğun üretim süreçlerinde ergonomik risk faktörlerinin değerlendirilmesi ve oluşabilecek problemlerin önüne geçilmesi, işçiler, aileleri, ülke ekonomisi ve işletmenin prestiji açısından da olumlu sonuçlar doğuracaktır.

Literatür incelendiğinde, işçilerin üretim alanlarında güvenli ve konforlu bir şekilde çalışmalarının sağlanması amacıyla yapılan çalışmalarda, genellikle ergonomik risk faktörleri arasından çalışma duruşlarına odaklanıldığı görülmektedir [8]. Ancak, işçilerin

daha kolay bir şekilde görevlerini yerine getirebilmeleri için sadece çalışma duruşlarına ait risk düzeyinin değerlendirilerek iyileştirilmesi yeterli değildir. Çevresel, bireysel, psikolojik ve fizyolojik risk faktörleri gibi farklı kategorilerdeki ergonomik risk faktörlerinin de işgücünün performansı üzerindeki etkileri incelenmelidir. Bu sebeple montaj hatlarının tasarımı sırasında, görevleri ergonomik karakteristiklerine göre gruplamak ve işçi-görev uyumunu dikkate alarak işçileri atamak tercih edilmesi gereken bir yaklaşım olmalıdır. Ele alınan bu yaklaşım, üretim verimliliğini artırırken, işçi özelliklerine dayalı atama gerçekleştirilmesi ile iş kazalarının ve meslek hastalıklarının azaltılmasında da etkin olacaktır.

MHDP’de heterojen işçi özelliklerinin dikkate alınması, gerçekte var olan başka bir sorunu da ortaya çıkarmaktadır. Bu sorun, işçiye atanan iş yükü düzeyidir. Bir hatta çalışan işçiye kapasitesinden fazla iş yükü atandığında, işçinin fizyolojik kapasitesi aşılır ve yorgunluk ortaya çıkar. Yorgunluk ise bıkkınlık, bitkinlik, isteksizlik, beceriksizlik ve işten kaçma haline dönüşebilmektedir. Bir süre sonra, hattın üretim hızında azalma, süreç içi stoklarda, ürünlerdeki kalite problemlerinde artış, termin sürelerinde sapmalar ortaya çıkmaktadır. Bu nedenlerle, montaj hatlarının dengelenmesinde ergonomik faktörler göz ardı edilmemelidir [9].

Bununla birlikte, gerçek anlamda, verimlilik ve karlılığı yakalamak isteyen endüstriyel işletmeler, montaj hatları için atama ve dengeleme problemlerini birlikte ele almalıdır. Ancak literatürde, montaj hatlarında işçi atama konusu ayrı bir başlık altında incelenerek, dengeleme probleminden ayrı tutulmaktadır. Bu çerçevede, 2007 yılında Miralles et al. [10] tarafından geliştirilen model, işçi atama ve MHD problemlerini bir arada çözmeyi amaçlayan ilk model olarak tanımlanmaktadır ve Montaj Hattı Dengeleme ve İşçi Atama Problemi (MHDİAP) olarak adlandırılmaktadır. Önerilen modelde, sadece işçi farklılıkları dikkate alınmış, çalışma koşullarının etkisine değinilmemiştir. Ancak model sayesinde, işçi farklılıkları, işgücü yoğun montaj hatlarını dengeleme süreçlerine yansıtılmıştır.

Buna göre tez çalışmasında, montaj hatlarında etkinliğin gerçek anlamda sağlanabilmesi için ergonomik risk faktörlerinin de dikkate alındığı, Ergonomik Montaj Hattı Dengeleme ve İşçi Atama Problemi (Ergo-MHDİAP)’ne çözüm aranması amaçlanmıştır. Böylece, MHDİAP’de ergonomik risk faktörlerinin etkisi görülerek değerlendirilebilecek ve üretim ortamlarında karşılaşılan gerçek kısıtlar dikkate alınarak MHDP’nin çözümü sağlanacaktır. Bu kapsamda, tez çalışmasında hem görev hem işçi ataması yapılırken, heterojen özelliklere sahip işçilerin varlığını kabul eden ve ergonomik

risk faktörlerinin işgücü performansını etkilediğini ön gören bir MHDİAP için çözüm sunan modeller geliştirilmiştir. Geliştirilen modeller, Ergo-MHDİAP'ye ait modeller olarak da tanımlanabilir. Söz konusu modellerde fiziksel, çevresel, psikolojik, bireysel ve fizyolojik risk faktörleri dikkate alınmıştır. Fiziksel risk faktörleri kapsamında mesleki kas-iskelet sistemi rahatsızlıkları (MKİSR)'nin en önemli nedenlerinden birisi olan çalışma duruşlarının risk düzeylerine odaklanılmıştır ve çalışma duruşları, Hızlı Tüm Vücut Değerlendirme Yöntemi (Rapid Entire Body Assessment-REBA) ile analiz edilmiştir. Çevresel risk faktörlerinden, işgücünün üretim hızını direkt olarak etkileyen aydınlatma ve gürültü düzeyi değerlendirilmiştir. Psikolojik risk faktörü kapsamında, işçinin ilgili görevi yapmayı tercih edip etmemesi dikkate alınmıştır. Bireysel risk faktörlerinin değerlendirilmesi için cinsiyet, yaş, deneyim, ilgili firmada çalışılan süre, uyku süresi üzerinde durulmuştur. Son olarak fizyolojik risk faktörü ise, enerji tüketim düzeyi belirlenerek modele dahil edilmiştir. Enerji tüketim düzeyi hesaplanırken işçinin kilo, cinsiyet gibi bireysel özellikleri ile görev süresi ve görevler bazında varsa kaldırılan ağırlık, kaldırma yüksekliği göz önünde bulundurulmuştur. Çevresel ve fizyolojik risk faktörlerinin değerlendirilmesinde literatürde kabul görmüş yaklaşımlar kullanılmış, psikolojik ve bireysel risk faktörleri için ise işçilerden geri bildirim alınmıştır. Ayrıca önerilen Ergo-MHDİAP modelinde, MHDİAP'de var olan görev-işçi önceliği, görev-işçi uyumuna dönüştürülerek işçilerin deneyim seviyelerine uygun görevlere atanmaları sağlanmıştır. Bahsedilen ergonomik risk faktörleri, teker teker 2007 yılında Miralles et al. [10] tarafından geliştirilen temel modele eklenmiş ve C'yi en küçükleyen bir yapı oluşturularak farklı modeller geliştirilmiştir. Bununla birlikte, dikkate alınan ergonomik risk faktörleri için ağırlık veya öncelik belirlemenin doğru bir yaklaşım olmayacağı düşünülerek, birbirleriyle olan ödünleşim noktalarının paylaşıldığı Pareto Çözümler (Pareto Solutions-PSs)'in elde edildiği matematiksel modeller sunulmuştur. MHDİAP'yi ergonomik perspektifte bütünsel olarak değerlendirebilmek ve bazı ergonomik risk faktörlerine ait hedef belirlemenin zor olması sebepleriyle Uzlaşık Çözüm (Compromise Solution-CS) ortaya koyan bütüncül bir matematiksel model geliştirilmiştir. Böylece, işçi atama ve MHDP'yi aynı anda gerçekleştiren ve MHDİAP'yi ergonomik risk faktörleri ile destekleyen bir genel model ortaya konulmuştur. Önerilen modelde, C'nin en küçüklenmesine ek olarak, işçinin tercih ettiği görevi yapmasını en büyükleyen, iş kazası olasılığını en küçükleyen, görevin gerektirdiği deneyim seviyesi ile işçinin deneyim seviyesi arasındaki en büyük farkı en küçükleyen ve en büyük enerji tüketim miktarını en küçükleyen çok amaçlı bir model geliştirilmiştir. Modelin çözümünde, çok amaçlı programlama kullanılmıştır. Burada, işçinin bireysel özelliklerinden kaynaklanan iş kazası olasılığını en

küçükleme amaçlanırken, traktör üretimi yapan bir firmadan elde edilen gerçek veriler kullanılmış ve lojistik regresyon modeli kurulmuştur. Elde edilen regresyon denklemi, gerçek veriler üzerinden oluşturulması sebebiyle, hem işçilerin bireysel özellikleri dikkate alınarak tanımlanan bağımsız değişkenler sürece dahil edilmiş, hem de elde edilen regresyon katsayıları bağımsız değişkenlerin birbirlerine göre ağırlıklarını ortaya koymuştur. Bu ağırlıklar ise, önerilen Ergo-MHDİAP modelinde dikkate alınmıştır. Enerji tüketiminde ise, istasyonlar arasında enerji tüketimi açısından düzgünlük sağlanmak istenmiştir. Bu sebeple, istasyonlara atanan görevlerin iş istasyonlarında ortaya çıkardığı toplam enerjinin en büyüğünü en küçükleyen bir yaklaşım ele alınmıştır.

Tez çalışmasının kalan bölümleri şu şekilde organize edilmiştir. İkinci bölümde MHDİAP'ye ilişkin teorik bilgiler aktarılmış ve üçüncü bölümde Ergo-MHDP, Ergo- İAP ve Ergo-MHDİAP ile ilgili literatürde yer alan çalışmalara değinilerek, bu çalışmalarda dikkate alınan ergonomik risk faktörleri hakkında bilgi verilmiş ve tez kapsamında geliştirilen model ve bu modelin MHDİAP'ye katkısından bahsedilmiştir. Çalışmanın dördüncü bölümünde, tez çalışmasında geliştirilen çok amaçlı modelin çözümü için kullanılan PS ve CS'ler paylaşılmıştır. Beşinci bölümünde, önerilen Ergo-MHDİA modelinde dikkate alınan ergonomik risk faktörlerine ilişkin bilgiler paylaşılmıştır. Bu bölümde, söz konusu risk faktörleri ile ilgili kavramsal bilgiler ve bu faktörlerin nasıl değerlendirilebileceği hakkında bilgi verilmiştir. Altıncı bölümde, dikkate alınan ergonomik risk faktörlerinin teker teker temel modele eklenmesiyle geliştirilen farklı matematiksel modellere yer verilmiş ve bu modellerin çözümleri ile çözüm performanslarına ilişkin bilgiler paylaşılmıştır. Yedinci bölümde, test problemleri açıklanmış ve matematiksel modelin sonuçları incelenmiştir. Son olarak, çalışmanın sekizinci bölümünde ise, elde edilen sonuçlar yorumlanarak gelecek çalışmalar için öneriler sunulmuştur. Bu bölümde, temel atama ve dengeleme modeli dikkate alınarak, elde edilen çözümlerin ergonomik risk faktörleri dikkate alındığında nasıl etkilendiği ortaya konulmuştur.

2 MONTAJ HATTI DENGELEME VE İŞÇİ ATAMA PROBLEMİ (MHDİAP)

Mevcut kaynakların kısıtlı olduğu montaj hatları; görev süresinin, görevleri gerçekleştiren işçiye bağlı olarak farklılaştığı ve aynı zamanda, bazı görev-işçi uyumsuzluklarının da yaşandığı yerlerdir. Bu tanım ilk kez, Miralles vd. tarafından 2007 yılında ortaya atılmıştır. MHDİAP, görevlerin istasyonlara atanması ve mevcut işçilerin istasyonlara atanması olmak üzere eş zamanlı iki çözümü gerektirir [11]. Miralles et al. [11], MHDİAP'yi, engelli işçileri temel alarak değerlendirmiş ve çözüm önerisi sunmuştur.

Miralles et al. [11]'nin çalışmalarında da belirtildiği gibi, bazı ülkelerde, engelli bireylerin sosyal hayatta var olabilmelerinin sağlanması ve tedavilerine iyi geldiğine inanılması nedenleriyle, diğer insanlar gibi çalışma hayatına dahil olabildikleri, “Engelliler İçin Korunaklı İş Merkezleri (Sheltered Work Centres for Disabled-SWD)” olarak adlandırılan uygulamalar geliştirilmiştir. Bu merkezlerde, engelli işçiler kendilerine uygun görevlere atanırlar ve böylece, ilgili işçilerin engelleri görünmez hale gelir. Böyle bir ortamda uygulanan dengeleme faaliyetleri aşağıda yer alan hedefleri içermektedir [10]:

- Her istasyonda, her bir işçiye atanan iş yükünü dengeleyerek, hattın verimliliğini en üst seviyeye çıkarmak,
- İşçilere görev atanırken, ilgili işçilerin mevcut engellerini dikkate almak ve bu engellere saygı duymak.

MHDİAP’de amaç, bir montaj hattı için, işçileri montaj hattında açılan iş istasyonlarına; C ’yi en küçükleyecek şekilde atamak ve istasyon sürelerini dengelemektir. Buna göre, MHDİAP’de bazı varsayımlar dikkate alınmaktadır:

1. Görev zamanları ve öncelik ilişkileri bilinmektedir.
2. Tek bir modelin üretimi gerçekleştirilmektedir.
3. Tamponların dikkate alınmadığı, seri üretimin yapıldığı bir hat tanımlanmaktadır.
4. Görev süreleri, çalışanların farklı yeteneklere sahip olmaları nedeniyle değişmektedir.

5. Genel olarak, yavaş veya hızlı çalışan yoktur. İşçiler bazı görevleri yerine getirirken çok yavaş, hatta yetersiz kalabilirler; ancak bazı görevleri gerçekleştirirken de çok hızlı olabilirler.
6. Her işçi, sadece bir iş istasyonuna atanabilir.
7. Bir görev için seçilen işçinin, görevi yerine getirebilmesi ve görevler arasındaki öncelik ilişkilerinin dikkate alınması koşullarıyla her görev, sadece bir iş istasyonuna atanır.

Bununla beraber, her problem yapısında olduğu gibi MHDİAP’de de belirli kısıtların sağlanması beklenmektedir:

- Her görev, bir iş istasyonuna ve bir işçiye atanmalıdır.
- Her işçi, sadece bir istasyona atanmalı ve her istasyona sadece bir işçi atanmalıdır.
- Görevlerin öncelik ilişkileri tanımlanmalıdır.
- İstasyonlara C aşılmadığı sürece birden fazla görev atanabilmelidir.
- Kurulacak istasyon sayısı, işçi sayısına eşit ya da daha az olmalıdır.

Miralles et al., [9] tarafından önerilen SWD'de önemli olan, her görev için belirlenmiş sürelerin olması, belirlenen bu sürelerde görevleri tamamlayabilecek işçilerin olması ve hat üzerindeki verimliliğin artırılmasıdır. C , iş parçasının montaj hattının bir istasyonu tarafından işlenebileceği süreyi temsil eden karar değişkenidir ve üretim oranının tersidir [12]. Bu nedenle, verimliliği en üst düzeye çıkartmak, Eşitlik (2.1)-(2.7) ile verilen modelin karar değişkeni olarak tanımlanan C 'nin en küçüklenmesi anlamına gelir. Bu sebeple, C 'yi en küçükleyen çözümlere odaklanılması amaçlanmıştır.

MHDİAP’nin Tam Sayılı Programlama (Mixed Integer Programming-MIP) modeli, Tablo 2.1’de tanımları paylaşılan notasyonlar kullanılarak, Eşitlik (2.1)-(2.7)’de verilmiştir [9].

Tablo 2.1. MHDİAP’ye Ait Notasyonlar

i, j	Görev
h	İşçi
s	İş istasyonu
N	Görev kümesi
H	Uygun işçi kümesi
S	İş istasyonu kümesi

Tablo 2.1. devam ediyor.

A	Öncelikli görev-işçi kümesi (i, h)
Z	Öncelikli işçi-iş istasyonu kümesi (h, s)
C	Çevrim süresi
m	İş istasyonu sayısı
p_{hi}	h işçisinin i görevini gerçekleştirmesi durumunda i görevinin tamamlama süresi
D_j	j görevi için öncelik matrisindeki öncelikli görevler kümesi
x_{shi}	$\begin{cases} 1, i \text{ görevinin } h \text{ işçisi tarafından } s \text{ istasyonunda yapılması durumunda} \\ 0, \text{ diğer durumlarda} \end{cases}$
y_{sh}	$\begin{cases} 1, h \text{ işçisinin } s \text{ istasyonuna atanması durumunda} \\ 0, \text{ diğer durumlarda} \end{cases}$

$$\text{Min } C \quad (2.1)$$

k. a.

$$\sum_{h \in H} \sum_{s \in S} x_{shi} = 1 \quad \forall i \in N \quad (2.2)$$

$$\sum_{s \in S} y_{sh} \leq 1, \quad \forall h \in H \quad (2.3)$$

$$\sum_{h \in H} y_{sh} \leq 1, \quad \forall s \in S \quad (2.4)$$

$$\sum_{h \in H} \sum_{s \in S} s \cdot x_{shi} \leq \sum_{s \in S} s \cdot x_{shj}, \quad \forall i, j / i \in D_j \quad (2.5)$$

$$\sum_{i \in N} p_{hi} \cdot x_{shi} \leq C, \quad \forall h \in H, \quad \forall s \in S \quad (2.6)$$

$$\sum_{i \in N} x_{shi} \leq M \cdot y_{sh}, \quad \forall h \in H, \quad \forall s \in S \quad (2.7)$$

$$M > \sum_{h \in H} \sum_{i \in N} p_{hi} \quad (2.8)$$

$$y_{sh} \in [0, 1], \quad \forall h \in H, \forall s \in S \quad (2.9)$$

$$x_{shi} \in [0, 1], \quad \forall h \in H, \forall s \in S, \forall i \in N \quad (2.10)$$

Burada,

Eşitlik (2.1)'de verilen amaç fonksiyonu, C 'yi en küçüklemeyi amaçlamaktadır.

Eşitlik (2.2)'de verilen kısıt ile her i görevi, tek bir iş istasyonuna (s) ve tek bir işçiye (h) atanmaktadır.

Eşitlik (2.3)'te verilen kısıt, her bir h işçisinin en fazla bir iş istasyonuna (s) atanmasını sağlamaktadır.

Eşitlik (2.4)'te verilen kısıt, her bir s iş istasyonuna bir işçi (h) atanmasını sağlamaktadır.

Eşitlik (2.5)'te verilen kısıt, i . görevin j . görevin öncülü olduğunu göstermektedir.

Eşitlik (2.6)'da verilen kısıt ve Eşitlik (2.7)'de verilen kısıt ile s istasyonuna atanmış bir h işçisine C aşılmadığı takdirde, birden fazla görev atanabileceği ifade edilmektedir. C ve y_{sh} karar değişkeni oldukları için, Eşitlik (2.6)'da ve Eşitlik (2.7)'de verilen kısıtlar, modelin doğrusallığını sağlayabilmek amacıyla ayrı ayrı tanımlanmıştır.

Eşitlik (2.9) ve Eşitlik (2.10) ise, karar değişkenlerinin negatif olmama koşulunu içeren işaret kısıtlardır.

Modelde, özel ortamlar olan SWD'ler için bazı ek kısıtlar da bulunmaktadır. Bu kısıtlar, Eşitlik (2.11), (2.12) ve (2.13)'te tanımlanmıştır:

$$\sum_{s \in S} x_{shi} = 1, \quad \forall (i, h) \in A \quad (2.11)$$

$$y_{sh} = 1, \quad \forall (s, h) \in Z \quad (2.12)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{s \in S} x_{shi} \geq 1, \quad \forall h \in H \quad (2.13)$$

Eşitlik (2.11)'de verilen kısıt ile özel nedenlerden dolayı, bazı görev-işçi atamalarının öncelikli olarak kabul edilmesi gerektiği ifade edilmektedir.

Eşitlik (2.12)'de verilen kısıt ile engelli işçilerin farklı fiziksel özelliklerinden dolayı, bazı işçi-iş istasyonu atamalarının, öncelikli olarak kabul edilmesi sağlanmaktadır.

Eşitlik (2.13)'te verilen kısıt ile SWD'nin felsefesi engelli insanları iş hayatına kazandırmak olduğu için, tüm işçilerin en az bir görevi üstlenmesi gerektiği belirtilir. Bu kısıt, ancak görev sayısının mevcut işçi sayısını aştığı durumda uygulanabilir.

MHDİAP, literatürde birçok kez çalışılan “MHDP'nin amaç fonksiyonlarına göre yapılan sınıflandırmasına” göre, ikinci tip problem yapısına benzemektedir. Bu problem yapısı literatürde, C 'nin en küçüklenmesini ele alan, Basit Montaj Hattı Dengeleme

Problemi-2 (BMHDP-2) olarak yer almaktadır [1] Yukarıda yer verilen MHDİA modeli, SWD ortamları için özel olarak tanımlanan, MHDİAP-2 şeklinde adlandırılmaktadır. Bu problemde, belirli işçiler ve onların özel durumları dikkate alınarak, C 'nin en küçüklenmesi amaçlanmaktadır.

MHDP'lerin sınıflandırmasında ayrıca, Basit Montaj Hattı Dengeleme Problemi-1 (BMHDP-1) olarak adlandırılan problem türünde, belirli bir C için, uygun iş istasyonu sayısının belirlenmesi amaçlanmaktadır [1]. BMHDP-1'e uygun bir şekilde de, MHDİA modelleri kurularak, MHDİAP-1 problem yapısı oluşturulabilir. Ancak MHDİAP-1 yapısı, SWD ortamı için ulaşılmak istenen amaçları karşılamamaktadır. Çünkü SWD ortamları için kurulan MHDİA modelinde, mevcut işçilerin etkin kullanımı ve daha fazla istihdam sağlanması önemsenmektedir.

3 LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Uygun ergonomik koşulların sağlanamaması, işgücü verimliliğini düşürmekte, iş kazalarına ve/veya meslek hastalıklarına yol açmaktadır [13]. Montaj hatlarının etkinliği açısından en önemli unsur işçidir ve işçiler, üretim ortamındaki ergonomik risk faktörlerinden etkilenirler. Bu faktörler, literatürde genelde ayrı ayrı hat dengeleme ve işçi atama problemlerinde incelenmiş olsalar da MHİADP alanında kısıtlı sayıda gerçekleştirilen çalışmalarda göz önüne alındıkları belirlenmiştir. Bu bölümde, ergonomik risk faktörlerinin dikkate alındığı, Ergo-MHDİAP, Ergonomik MHDİP (Ergo-MHDİP) ve Ergonomik İşçi Atama Problemi (Ergo-İAP)'ni konu alan çalışmalar aktarılmıştır. Burada dikkat çeken nokta, Ergo-İAP ile ilgili sadece tek bir çalışmanın olması ve literatürde bu konu kapsamında daha çok Ergonomik İşçi Çizelgeleme Problemi (Ergo-İÇP) üzerinde durulmuş olmasıdır. Bu nedenle çalışmada, Ergo-İÇP kapsamında literatürde gerçekleştirilen araştırmalardan bahsedilmiştir. Yine literatürde gerçekleştirilen çalışmalara bakıldığında, Ergo-MHDİAP kapsamında sayılı birkaç çalışmanın yer aldığı da belirlenmiştir. Tezde gerçekleştirilen literatür araştırmasında amaçlanan, ergonomik faktörleri dikkate alarak MHD, İA veya her ikisinin bir arada gerçekleştirildiği çalışmalarda, göz önünde bulundurulanan ergonomik risk faktörleri, kullanılan ergonomik analiz yöntemleri, ergonomik risk faktörlerinin modellerde bulundukları konumlar, modellerin çözümünde kullanılan yaklaşımları belirleyerek gelinen noktayı değerlendirmektir. Bu şekilde, gelecek dönemlerde konu ile ilgili gerçekleştirilebilecek ya da gereksinim duyulabilecek araştırma fikirlerine de ulaşılacaktır.

3.1 Literatürde Ergonomik Montaj Hattı Dengeleme Problemini (Ergo-MHDİP) konu alan çalışmalar

Bu bölümde, Ergo-MHDİP kapsamında literatürde yer alan çalışmalara, bu çalışmalar sonucunda gelinen noktaya ve gelecek dönemlerde yapılabilecek çalışmalara ilişkin değerlendirmeler paylaşılmıştır. Bu kapsamda, Web of Science (WOS) ve Google scholar veri tabanında var olan ve 2000 yılı ve sonrasında gerçekleştirilen toplam 31 adet çalışma, güncel gelişmeleri yansıtabilmek için incelenmiştir. Söz konusu çalışmalara ilişkin bilgiler aşağıda yer almaktadır.

Carnahan et al. [14], BMHDP-2 için, fiziksel yorgunluk düzeyini de dikkate alan bir model ele almışlardır. Ele alınan yaklaşımda, işçinin manuel görevlerde uyguladığı kavrama kuvvetinin dikkate alındığı bir yaklaşım kullanılarak kavrama kuvveti oranı, fiziksel yorgunluk şeklinde tanımlanmıştır. Modelin çözümü, Genetik Algoritma (Genetic Algorithm-GA), Hibrit Problem Uzayı Genetik Algoritması (Hybrid Problem Space Genetic Algorithm-HGA) ve Çoklu Sıralama Sezgiseli (Multi Ranking Heuristic-MRH) yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Test problemleri aracılığıyla modelin kesin çözümü ve sezgiseller kullanılarak çözümleri elde edilmiştir. İlk etapta, C ve belirlenen diğer bir kriter olan fiziksel yorgunluk birer birer amaç fonksiyonu şeklinde modele eklenerek çözülmüş, ardından, söz konusu iki amaç ağırlıklandırma yöntemi ile birleştirilerek tek bir amaç fonksiyonu haline getirilmiştir. Sezgisel yöntemler için iki faktörlü ANOVA modeli kullanılarak, hat dengelemedeki etkinlikleri değerlendirilmiştir. Sonuç olarak, HGA'nın daha düşük fiziksel yorgunluk düzeyi ve en kısa C 'ye sahip çözümleri ürettiği belirlenmiştir.

Özgörmüş [15], istasyon sayısının en küçüklenmesini amaçlayan BMHDP-1 için, farklı ergonomik faktörlerin dikkate alındığı ve bunların kısıtlarda kullanıldığı bulanık bir matematiksel model geliştirmişlerdir. Ergonomik risk faktörleri olarak; monotonluk, görevlerin risk derecesi ve görevlerin zorluk derecesi bulanık olarak tanımlanmış ve bu faktörlerin kabul edilebilir maksimum sınır değerleri belirlenerek tüm iş istasyonları için kısıt şeklinde eklenmiştir. Kısıtlar ve amaç fonksiyonunun bulanıklıklaştırıldığı matematiksel model için Jackson [5] test problemi kullanılmış ve LINGO paket programıyla çözümler elde edilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, istasyon sayısı artırımına gitmeden ergonomik koşullar açısından daha dengeli iş istasyonlarının oluşturulabildiği görülmüştür.

Choi [16], hat dengelemede görev tamamlanma süresinin yanında fiziksel iş yükünü de dikkate alan yeni bir matematiksel model geliştirmiştir. Burada fiziksel iş yükü, üç unsur üzerinden tanımlanmıştır. İlki, kaldırma sıklığı, ikincisi çalışma ortamı koşullarıdır. Çalışma ortamı koşulları kapsamında, sıcaklık, aydınlatma, gürültü, titreşim ve kimyasallara maruziyet dikkate alınmıştır. Üçüncüsü ise, işçi tarafından sergilenen çalışma duruşlarıdır. Çalışmada, bu üç fiziksel iş yükü unsuru ağırlıklandırılarak amaç fonksiyonunda yer almıştır. Araştırmacı, fiziksel iş yükü ve görev süresini bütünleştiren 0-1 Tam Sayılı Programlama (Binary Integer Programming-BIP) modelini önermiştir. Burada, görev süreleri de ikinci amaç fonksiyonu olarak tanımlanmış ve modelin çözümünde, Hedef Programlama (Goal Programming-GP) kullanılmıştır. Çalışmada, iki varsayım dikkate alınmıştır. İlk varsayım, farklı ürünlere ait aynı görevlerin, aynı iş istasyonunda yapıldığı

varsayımdır. İkinci varsayım ise, farklı ürünlere ait aynı görevlerin farklı iş istasyonlarında yapılabilir olması varsayımdır. Çalışmada önerilen modelin etkinliği, çeşitli test problemleri kullanılarak incelenmiştir.

Güner ve Hasgöl [9], U-tipi yerleşim düzeninde üretimin gerçekleştirildiği montaj hatları için ergonomik faktörlerin dikkate alındığı MIP modeli geliştirmişlerdir. Çalışmada, her bir görevin gerektirdiği enerji düzeyi hesaplanarak, görevler arasındaki uyumsuzluklar dikkate alınmış ve bir vardiyada, bir istasyonda gerçekleştirilen görevlerin işçilerin sürekli performans sınırını aşmaması sağlanmıştır. Bununla birlikte, tecrübe, cinsiyet, yaş gibi işçilerin farklı özelliklerinin kapsandığı performans düzeyleri belirlenmiş ve görevlerin belirlenen performans düzeylerine göre atanması sağlanmıştır. Geliştirilen modelde, küçük ve orta boyutlu test problemleri için değerlendirme fonksiyonu istasyon sayısının en küçüklemesi olarak belirlenmiş ve GAMS paket programıyla sonuçlar elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, gerçek üretim sürecine yakınsayan bir MHDP modelinin geliştirildiğini göstermiştir.

Xu vd. [21], MHDP’de dikkate alınan ergonomik faktörler için üst sınır belirleyerek yeni bir doğrusal model önermişlerdir. Bu modelin amacı, C , el aktivitesi ve el-kol titreşimini göz önünde bulundurarak, iş istasyonu sayısını en aza indirmektir. Karar değişkeni, iş istasyonlarına görev atamasını temsil etmektedir. Model, ergonomik ve geleneksel montaj hattı tasarım kısıtları olmak üzere iki tür kısıt içermektedir. Ergonomik kısıtlar, el hareket sıklığı, C boşluk oranı, normalleştirilmiş tepe kuvveti (Normalized Peak Force-NPF), titreşim ivmesi ve titreşim süresini içermektedir. Geleneksel montaj hattı tasarım kısıtları, C ’yi ve öncüllük ilişkilerini içermektedir. Bu çalışmada, işçilerin montaj görevlerini standart bir prosedüre göre yürüttüğü, böylece her işçinin aynı görevi, aynı çalışma hızıyla gerçekleştirirken aynı kuvveti uyguladığı varsayılmıştır. Bununla birlikte, titreşim ivmesinin, kavrama kuvveti değişimlerinden etkilenmediği, tüm görevlerin ayakta durarak gerçekleştirildiği varsayılmıştır. Geliştirilen model, BIP ile kurulmuştur. Modelde, test problemi verileri kullanılarak GAMS paket programı yardımıyla kesin çözüm elde edilmiş ve sonuçta, daha düşük ergonomik risk düzeyine sahip istasyonların oluşturulması istasyon sayısı artırımına gitmeden sağlanmıştır. Çalışma sonucunda, hat etkinliğinin önemsenecek bir düzeyde azaldığı ve ergonomik faktörlere ilişkin maruziyet seviyelerine ait üst limitlerin etkili bir şekilde dengelenebildiği ve kontrol altına alınabildiği belirlenmiştir.

Otto and Scholl [22], çalışmalarında, ergonomik faktörlerin MHDP kapsamında dikkate alındığı bir matematiksel model geliştirmişlerdir. MIP olarak geliştirdikleri modelde, ergonomik risk tahmin yöntemi olarak doğrusal olmayan fonksiyonlar tanımlamışlardır. Sonuç olarak, önerilen model ergonomik risk düzeyini büyük oranda azaltmıştır. Ergonomik kısıtlar, NIOSH Kaldırma Denklemi (National Institute of Occupational Safety and Health Lifting Equation), Mesleki Tekrarlı Hareket İndeksi (Occupational Repetitive Action Index-OCRA), Ergonomik Değerlendirme Formu (Ergonomic Assessment Worksheet-EAWS) yöntemleri kullanılarak oluşturulmuştur. Yazarlar, dikkate aldıkları ergonomik risk faktörleri ile iş istasyonu sayısı arasında ödünleşim barındıran sonuçların bulunması için, amaçların ağırlıklandırılması ve tek bir amaç şeklinde değerlendirme kriteri olarak eklenmesi durumlarını karşılaştırmışlardır. Amaç fonksiyonunda bulunan ergonomik risk iki farklı şekilde tanımlanmıştır. Eğer işçi rotasyonu olabiliyorsa, ortalama ergonomik risk düzeyinin en küçüklenmesi amaçlanmıştır. Eğer işçi rotasyonu yapılamıyorsa, hattın ergonomik risk düzeyindeki sapmalarının kareleri toplamının en küçüklenmesi amaç fonksiyonuna eklenmiştir. Model, İki Aşamalı Tavlama Benzetimi (Two Phase Simulating Annealing-2SSA) ve Yerel Arama (Local Search-LS) sezgiselleri kullanılarak çözülmüştür. İş istasyonlarının ergonomik risk düzeyini belirlemek için OCRA, NIOSH, EAWS yöntemleri kullanılarak, oluşturulan 268 adet test probleminde denemeler yapılmış ve alternatif dengeleme sonuçları elde edilmiştir. Sonuçlara bakıldığında, yukarıda tanımlanan iki farklı amaç fonksiyonunun yer aldığı modellerin her ikisinin sonuçlarında iyileşme sağlandığı ve ergonomik risklerin azaldığı tespit edilmiştir. Daha düşük OCRA değeri ortalaması olduğu için yüksek riskli istasyonların sayısının azaldığı ve ergonomik risklerin daha düzgün dağıldığı görülmüştür. Ardından, otomotiv endüstrisinde faaliyet gösteren bir firmanın montaj hattında uygulama yapılmıştır. Çalışmada, ergonomik risk değerlendirme yöntemlerinin çoğunun, doğrusal olmayan fonksiyonları içermesine rağmen, düşük ek hesaplama maliyetlerine katlanılarak, MHDP modelleriyle bütünleştirilebildiği gösterilmiştir. Elde edilen çözümlerin yarısında, ek bir iş istasyonuna gerek olmadan, kabul edilebilir risk düzeyine sahip bir dengeleme yapılmıştır. İş istasyonu sayısında artışa gerek duyulan durumlarda ise, hat kapasitesinde yaklaşık %4'lük bir artış sağlanmıştır.

Cheshmehgaz vd. [23], MHDP için geliştirdikleri yeni modelde çalışma duruşlarından kaynaklanan risklerin değerlendirilmesini dikkate almışlardır. Tekrarlayan çalışma duruşlarından kaynaklanan ergonomik riskler azaltılarak, farklı çalışma duruşlarıyla

gerçekleştirilebilecek bir iş tasarımı önerilmiştir. Çalışmada, işçinin vücudunun farklı bölgeleri için (kolar, sırt ve bacaklar) dikkate alınan Birikimli Duruş Riski (Accumulated Risk of Postures-ARP)'nin değerlendirilmesine yönelik bir yaklaşım kullanmışlardır. Çalışma duruşlarından kaynaklanan risklerin değerlendirilmesinde, Ovako Çalışma Duruşu Analiz Sistemi (Ovako Working Posture Assessment System-OWAS) metodunu uygulamışlardır. Yazarlar tarafından; istasyonlar arasında belirlenen ve olması beklenen ideal iş istasyonu zamanından en büyük sapmanın en küçüklenmesi, iş istasyonlarında oluşacak toplam ergonomik risk düzeyinin belirlenen ve olması beklenen ideal risk düzeyinden en büyük sapmasının en küçüklenmesi ve ARP'nin en küçüklenmesinden oluşan amaçların bulunduğu bir matematiksel model geliştirilmiştir. Bu amaçlara ait değerleri net bir şekilde belirlemek zor olduğu için Bulanık Hedef Programlama (Fuzzy Goal Programming-FGP) modeli kullanılarak amaçlar bulanıklaştırılmıştır. Çalışmada, 5 farklı model kurularak test problemlerinde denenmiş ve çözüm yöntemi olarak GA kullanılmıştır. Sonuçta, geliştirilen matematiksel modelden iyi sonuçlar elde edildiği gözlenmesine rağmen, istasyon sayısı arttıkça, çözüm süresi uzamış ve daha az sayıda uygun çözüm bulunmuştur.

Chen et al. [24], giyim sanayisinde farklı yeteneklere sahip işçilerin çalıştıkları dikiş hatlarının dengelemesi için Grup Genetik Algoritmayı (Group Genetic Algorithm-GGA) kullanmışlardır. Kullanılan GGA Yöntemi ile işçiler arasında iş yükü dağılımı yapılarak, iş yükleri açısından ortalama mutlak sapmalar en küçüklenmiştir. Giyim sanayisinden elde edilen gerçek veriler ile deney tasarımı kullanılmış ve GGA'nın performansı incelenmiştir. Yazarlar, kısa C ve yüksek işgücü kullanımı gibi önemli hedefler doğrultusunda, dikiş hatları tasarımında elde edilen sonuçların kullanabileceklerini belirtmişlerdir.

Kara et al. [25], ürün çeşidi bakımından tek model üretilen montaj hatlarında, ergonomik ve kaynak kısıtlarını kapsayan çok amaçlı matematiksel model önermişlerdir. Bu çalışmada, ergonomik risk faktörlerinin dikkate alınmasının maliyet artışı getireceği düşüncesiyle maliyet tabanlı bir yaklaşım ele alınmıştır. Modelde işçiler, görevlere göre aydınlatma maliyeti, görevin ilave işçi gerektirmesi durumuna bağlı olarak ortaya çıkabilecek yardımcı işçi maliyeti, ekipman kullanım maliyeti ve ayakta çalışan işçi sayısının en küçüklenmesi dikkate alınarak atanmıştır. Geliştirilen modelde, klasik MHDP'deki atama ve öncelik kısıtlarına yedi adet kısıt daha eklenmiştir. Çalışmada, görevlerin yapılış şekli bakımından esnek olması psikolojik talep olarak değerlendirilmiş ve ağırlıklandırma yöntemi ile modele eklenmiştir. İşçilerin görevleri yerine getirirken

harcadıkları oksijen miktarı, kalori/dk cinsinden kilo kaloriye çevrilerek enerji tüketimi hesaplanmış ve kısıtlara dahil edilmiştir. Her görevin gerektirdiği beceri düzeyi, her işçinin beceri düzeyi ile entegre edilerek beceri kısıtı şeklinde eklenmiştir. Ağır ve uzun süren görevler için başka bir işçiye gerek görülmesi durumu da göz önünde bulundurularak, her iş istasyonunda ihtiyaç dahilinde görevlendirilebilecek yardımcı işçi sayısı kısıtı değerlendirmeye dahil edilmiştir. Aynı iş istasyonunda görevlerin tamamlanabilmesi için kullanılacak ekipmanlar aynı ise, bu ekipmanların bir arada olmasını sağlayacak bir kısıt ilavesi yapılmıştır. Bu beş kısıta ek olarak, literatürde daha önce kullanılmayan, işçilerin görevleri yerine getirirken sergiledikleri duruşların risk düzeyleri ve bu görevler için gerekli aydınlatma seviyesi kısıtları eklenmiştir. Çalışma duruşu faktörü, ayakta ve oturarak çalışmanın enerji tüketiminde değişiklik yaratması nedeniyle ayrı ayrı ele alınmıştır. Bu nedenle modelde, aynı duruşların gerçekleştirildiği görevlerin bir arada atamasının yapılabilmesi amacıyla aynı istasyona atanmalarını sağlayacak bir kısıt eklenmiştir. En sonunda ise, normal ve yüksek seviye olmak üzere görevlerin gerektirdiği iki aydınlatma seviyesi tanımlanarak, aynı aydınlatma seviyesine ihtiyaç duyan görevlerin, aynı istasyonlara atanmasını garanti etmişlerdir. Kara vd.'nin önerdiği bu model, 30 görevi olan örnek bir uygulamada kullanılmıştır. Birbirinden farklı C 'ler ve kısıt çıkarılması/eklenmesi ile denemeler yapılarak modelin duyarlılık analizleri yapılmıştır. Sonuçlar, dikkate alınan ergonomik kısıtların maliyetleri arttırdığını ancak, verimlilik ve kaliteyi de iyileştirdiğini göstermişlerdir.

Baykasoglu ve Akyol [26] istasyon süreleri eşit olan, iki farklı istasyonda gerçekleştirilen görevlerin aynı olmayabileceğini belirtmişler ve bu nedenle, ilgili istasyonlardaki zorlanma düzeylerinin de farklılık gösterebileceğini vurgulamışlardır. Ayrıca, özellikle emek yoğun çalışılan montaj hatlarında, bir istasyonda, benzer görevlerin tekrarlı bir şekilde, uzun süre yapılması sonucunda, işçi üzerindeki zorlanmanın giderek artacağı üzerinde durmuşlardır. Yazarlar, ergonomik anlamda iyi tasarlanmamış montaj hatlarının, yalnızca verimlilik kayıplarına sebep olmakla kalmayacağını, aynı zamanda işçilerde meslek hastalıklarına ve hatta kalıcı sağlık problemlerine yol açabileceğini belirtmişlerdir. Bu tür problemleri önlemek için, montaj hattını dengelerken, her bir istasyon için kabul edilebilecek en yüksek risk seviyesini belirlemek ve ergonomik faktörlere ait risk düzeylerinin bu seviyenin üstüne çıkmasına izin vermemek gerektiğini vurgulamışlardır. Bu kapsamda çalışmada, ergonomik risk seviyesini belirlemek amacıyla çalışma duruşlarına ait risk düzeyini değerlendiren OCRA yöntemi kullanılmıştır. Çalışma sonucunda, ergonomik

faktörleri dikkate alarak tasarlanan montaj hattı ile klasik yaklaşımla tasarlanan hat arasındaki farklar vurgulanmıştır. COMSOAL yöntemi kullanılarak elde edilen çözümlere bakıldığında, ergonomik risk düzeyleri açısından daha kabul edilebilir bir dengeleme sağlandığı görülmüştür.

Polat et al. [27], BMHDP-2 için *C*'ye ek olarak iş istasyonlarının ergonomik risk düzeylerini de en küçüklemeyi amaçladıkları çok amaçlı bir model önermişlerdir. Ergonomik risk düzeyi kapsamında çalışma duruşlarına ait risk düzeyleri dikkate alınmış ve bu amaçla REBA yöntemi kullanılmıştır. Buna göre, her bir istasyonda ortaya çıkabilecek en yüksek risk düzeyi hedefi belirlenerek, bu hedeften pozitif sapmaların en küçüklenmesi sağlanmıştır. Geliştirilen model, küçük boyutlu bir test problemine uygulanarak GAMS paket programı yardımıyla çözülmüştür. Sonuçlara bakıldığında, ergonomik risk düzeyi açısından daha dengeli bir hat oluşturulması amacıyla *C*'nin bir birim uzaması gerekmiştir.

Battini et al. [28] BMHDP-2 tipi için dört farklı amacı barındıran çok amaçlı bir model önermişlerdir. Amaçlardan ikisi, istasyonlar arası iş yükü dağılımının eşit olmasını sağlayan düzgünlük indeksi ve toplam üretim miktarının artırılmasını hedefleyen maksimum istasyon süresinin en küçüklenmesidir. Diğer iki amaç ise, ergonomik faktörlere yönelik belirlenmiştir. Çalışmada, görevlerin ergonomik risk düzeylerinin modele dahil edilmesi hedeflendiği için metabolik enerji tüketimi dikkate alınmıştır. Bu amaçla, Önceden Belirlenmiş Hareket Enerji Sistemi (Predetermined Motion Energy System-PMES) olarak adlandırılan bir sistem geliştirilmiştir. Bu yöntemde, Garg et al. [28]'nin ortaya koydukları, görevi gerçekleştirirken sergilenen vücut duruşlarına göre değişen ortalama metabolik enerji tüketim hızı kullanılmıştır. Bu yaklaşım, toplam enerji tüketiminin, görevin gerçekleştirilme süresiyle bağlantılı olduğu düşüncesine dayanmaktadır ve toplam enerji tüketim hızının, toplam görev süresine bölünmesiyle elde edilmektedir. Net metabolik enerji tüketim miktarının her bir görev için hesaplanması amacıyla işçinin kilo, cinsiyet, varsa kaldırılan ağırlık, varsa kaldırma yüksekliği gibi bilgileri kullanılmaktadır. İşçiler arasında fiziksel iş yükünün eşit seviyelerde dağıtılmasını sağlamak amacıyla belirlenen diğer bir amaç ise, enerji düzgünlük indeksidir. Çalışmada, en yüksek enerji tüketiminin gerçekleştirildiği iş istasyonunun bu tüketimini en küçükleyerek, iş istasyonlarının risk düzeylerini azaltan iki tane amaç fonksiyonu tanımlanmıştır. İş istasyonları arasında süre ve enerji tüketimi düzgünlüğünün sağlandığı model, küçük boyutlu bir gerçek hayat uygulamasında kullanılarak, Epsilon Kısıt Yöntemiyle (Epsilon-Constrained Method) çözüm sağlanmıştır.

Sonrasında, süre ve enerji tabanlı amaçların sonuca olan etkileri tartışılarak duyarlılık analizleri gerçekleştirilmiştir.

Battini et al. [29], BMHDP-1 tipinde, karışık model üreten hatlar için iş istasyonlarına malzeme stokunun sağlanması ve ergonomik kısıtların aynı anda değerlendirilmesini sağlayan yeni bir model önermişlerdir. Ergonomik kısıtlar kapsamında, her bir görev için kcal/dk birimi üzerinden tüketilen enerji miktarı dikkate alınmıştır. Bunun hesaplanabilmesi amacıyla kapsamlı bir enerji tüketimi denklemine ihtiyaç duyulmuş ve Garg et al. [28] tarafından geliştirilen yaklaşım kullanılmıştır. Bunlara ilaveten, her işçi için verilmesi gereken dinlenme süreleri de kısıt olarak tanımlanmıştır. Bu çerçevede işçinin enerji tüketimi miktarı, sınır değerini görevler bazında her aştığında, işçinin bir sonraki görevi yerine getirebilmesi için ek dinlenme süresi verilmesi uygun bulunmuştur.

Bautista et al. [30] tekrarlı hareketler, uygun olmayan çalışma duruşu ve elle taşıma gibi farklı ergonomik faktörleri bir arada değerlendiren bir sınıflandırma önermişlerdir. Risk düzeyleri dört ayrı kategoriye ayrılarak bu kategoriler için yapılması gerekenler belirlenmiştir. Bu kategorilendirme, farklı ergonomik kriterlerin eşzamanlı dikkate alınmasını sağlamış ve buna dayalı olarak, bir görevin toplam risk düzeyi belirlenebilmiştir. Çalışmada, hangi yöntemlerin kullanıldığı incelendiğinde, REBA, çalışma duruşların analizi için, OCRA, tekrarlı hareketlerin değerlendirilmesi için ve NIOSH, elle taşıma görevlerini analiz etmek için kullanılmış ve işçilerin gün boyu maruz kaldıkları toplam risk düzeyleri elde edilmiştir. Ergo-saniye olarak adlandırdıkları bu kapsamlı çözüm yöntemi, tekrarlı hareketler, çalışma duruşları ve yük kaldırma nedenleriyle ortaya çıkan ergonomik risklerin bütüncül bir şekilde değerlendirilmesine imkân sağlamıştır. Önerilen söz konusu risk düzeyi değerlendirme yöntemi, 9 farklı ürünün üretildiği bir hatta talep miktarları dikkate alınarak denenmiştir. Çalışmada, bilinen MHDP kısıtlarına ek olarak; ergonomik risk düzeyi açısından kabul edilebilir bir risk düzeyi tanımlanmış ve her bir iş istasyonunda bu belirlenen düzey ile ortalama risk düzeyi arasında oluşan pozitif ve negatif sapmalar kısıta ilave edilmiştir. Bu kısıtların değerlendirilmesi için ise, *C* ile birlikte istasyonlardaki iş yükü düzeyine, görev tamamlanma sürelerine ve görevlerin gerçekleştirildiği mekana ilişkin ergonomik risk düzeyleri olmak üzere üç farklı değerlendirme kriteri dikkate alınmıştır. Bu amaçlar iki farklı yaklaşım ile oluşturulmuştur. Birincisinde, söz konusu üç kriter için sınır değerler getirilerek bu sınır değerlerin, her bir iş istasyonu için bu iş istasyonlarının ihtiyaç duydukları değerlerden en büyük olanına eşit olması sağlanmıştır. İkincisinde ise, daha önce belirlenen olması gereken değerler ile gerçekleşen değerler arasındaki farkı diğer bir deyişle,

sapmaları en küçüklemek amaçlanmıştır. Burada ise, birincisi direkt toplayarak, ikincisi karelerini toplayarak, üçüncüsü kareler toplamının karekökünü alarak olmak üzere, farklı yaklaşımlar denenmiştir. Söz konusu amaç fonksiyonlarına eşit ağırlık verilerek hat dengelemesi yapılmıştır. Üç amaç için oluşturulan farklı kombinasyonlarla kurulan modeller için pek çok çözüm ortaya konulmuştur. En iyi çözümü bulabilmek amacıyla, bir karar destek sistemi önerilmiştir. Sonuçta; en iyi çözümü ortaya koyan üç alternatif çözüm elde edilmiştir.

Bautista et al. [31], MHDP’de karışık model üretimi gerçekleştirilen hatlar için, iş istasyonlarında tanımlanan ergonomik risk seviyelerinin ortalama sapmalarını en küçüklemelerini sağlayan bir matematiksel model geliştirmişlerdir. Tek amaçlı olarak geliştirilen model, MIP yöntemi ve Açgözlü Rastgele Adaptif Arama Prosedürü (Greedy Randomized Adaptive Search Procedure-GRASP) metotları ile elde edilen iki farklı çözüm ile kıyaslanmıştır. Modelde kullanılan ergonomik risk faktörleri için Bautista vd. [30]’nin ele aldıkları yaklaşımdan farklı olarak REBA yerine Hızlı Üst Ekstremité Değerlendirme (Rapid Upper Limb Assessment-RULA) yöntemi kullanılmış olup, OCRA ve NIOSH yöntemleri de aynı şekilde uygulanmıştır. Bu ergonomik amaç fonksiyonları, MHDP’nin 1. ve 2. tipi için ele alınmış ve kesin çözümle elde edilen sonuç ile GRASP’ın performansı karşılaştırılmıştır. Kıyaslama yapabilmek için veriler, araba üretilen bir montaj hattından elde edilmiştir. Maksimum ergonomik riski en küçükleyen yaklaşımda, iki problem tipi için de MIP’ten elde edilen sonuçlar doğrultusunda, GRASP sonuçlarının MIP çözümünden elde edilen en iyi değerden %3’lük bir sapma gösterdiği ortaya konulmuştur. Bu sonuç ta, geliştirilen GRASP yönteminin etkinliğini göstermiştir. Ayrıca, IP’den daha uzun çözüm süreleri ile optimum çözümler elde edilirken, GRASP algoritması en yüksek ergonomik risk açısından en iyi çözümlere ulaşmıştır.

Takanokura et al. [32], montaj hatlarının ergonomik risk düzeyi açısından değerlendirilebilmesi amacıyla birikimli günlük fiziksel iş yükünü tanımlayan bir yöntem önermişlerdir. Belirli bir iş istasyonuna ataması yapılan görevlerin tamamlanma sürelerine göre ağırlıklandırılarak C ’ye bölünmesiyle birikimli iş yükü düzeyi belirlenmiştir. Burada, işçinin ilgili güne ait üretim miktarı kullanılarak, ağırlıklı iş yükü ile çarpılmış ve günlük birikimli iş yükleri elde edilmiştir. Fiziksel iş yükü ölçümü için REBA ve RULA yöntemleri entegre edilmiştir. Tanımladıkları bu metot, bir otomat makinesi montaj hattında kullanılmıştır. Problem yapısı ve görevlerin tamamlanma süreleri, hat dengeleme için geliştirilen paket yazılım aracılığıyla üretilmiş ardından, iş yükleri belirlenmiştir. Hesaplama

sonucunda, yüksek iş yükünün ortaya çıktığı iş istasyonları belirlenmiş ve Kaizen çalışmaları planlanarak riskin daha düşük seviyelere çekilmesi sağlanmıştır.

Bortolini et al. [33], montaj hatlarında var olan görevlere ilave olarak montaj işlemi için kullanılan malzemelerin iş istasyonuna getirilmesini de görev olarak dikkate almışlardır. Yeni tanımlanan görevler hem süre bazında hem de ergonomik risk çerçevesinde değerlendirilmiştir. Yeni *C* tanımı, her bir iş istasyonu için görev süresi, malzeme getirme süresi ve görevler arası boş kalma süresinin toplamından elde edilmektedir. Ergonomik risk düzeyi, REBA yönteminin sonuçları kullanılarak belirlenmiştir. İşçinin toplam ergonomik risk düzeyi, montaj işlemi esnasında ortaya çıkan risk düzeyi, malzeme getirilirken ortaya çıkan risk düzeyi ve boş kalma veya dinlenmenin kas ve iskelet sistemi rahatsızlıklarına olumlu etkisini tanımlayan risk düzeyi ile bütünleştirilerek belirlenmiştir. Araştırmacılar çalışmada, maksimum istasyon zamanlarını ve beraberinde maksimum iş istasyonu ergonomik risk seviyelerini en küçükleyen iki amaçlı bir yaklaşım önermişlerdir. Çok amaçlı olması sebebiyle, Messac vd. (2003) tarafından ortaya konulan, baskın olmayan çözümlerin yer aldığı PS'lerin tümünü içeren kümeyi belirleyen bir yaklaşım kullanılmıştır. Tüm çözümleri barındıran bu küme, en son ampirik kurallarla yapılan arama ile en iyi çözümü ortaya koymaktadır. Bu sebeple, ele alınan çok amaçlı problemde en iyi çözüm elde edilmiştir. Sonuçlara bakıldığında ise, her iki amaç fonksiyonu kendi içinde değerlendirme kriteri olarak çözüldüğünde, elde edilen en iyi değerlerinden %2 kötüleşme görülmüştür ve birden fazla amaç olduğu için CS elde edilmiştir. Ergonomik risk düzeyi açısından ise, işçiler arasında daha dengeli bir görev dağılımı gerçekleştirilmiştir.

Tiacci and Mimmi [34], stokastik görev sürelerine sahip karışık modelleri paralel hatlarda üreten montaj hatları için ergonomik risk faktörlerini de dikkate alan bir MHDP önermişlerdir. Ergonomik risk düzeyinin ölçümü için tekrarlı hareketlerden yola çıkarak, OCRA yöntemi kullanılmıştır. Modelin amaç fonksiyonu maliyet tabanlı belirlenmiştir. Ekipman, işçilik, hat besleme maliyeti, hattın belirlenen risk düzeyi ve hattın *C*'si aşıldığında oluşan ceza maliyeti belirlenen maliyet kalemleridir. Bunlar tek bir denklem şeklinde tanımlanmış ve en küçüklenmesi hedeflenmiştir. Model, daha önce Tiacci [35] tarafından önerilen GA adımları kullanılarak çözülmüştür. Çözüm hem OCRA indeksi dahil edilerek, hem de hariç tutularak elde edilen sonuçları barındırmaktadır. Beklenildiği gibi, OCRA indeksinin dahil edildiği model sonuçları istenilen ergonomik risk düzeylerini sağlarken; dahil edilmediğinde, bu sonuçların %80 gerilediği görülmektedir. OCRA indeksinin dahil edilmesi gerektiği sonucu sadece bununla değil; maliyet sonuçları incelendiğinde de

görülmektedir. Çalışmada, risk düzeyleri düşürülürken, ortaya çıkan maliyet te düşük seviyelerde kalmıştır.

Kahya vd. [36], öncelik ilişkileri ve C kısıtlarına ilaveten, çalışma duruşlarına ait risk düzeyini de dikkate alarak istasyon sayısını belirleyen, yeni bir MHD modeli geliştirmişlerdir. Önerilen modelde, COMSOAL algoritması kullanılmıştır. Geliştirilen modelin sonuçlarını, COMSOAL ile geliştirilen modelin sonuçlarıyla karşılaştırmışlardır. Karşılaştırmada, C ve çalışma duruşu risk düzeyinin bileşkesinden oluşan, yeni bir performans ölçütü önerilmiştir. Geliştirilen model, fırın üreten bir işletmenin montaj hattı için uygulanmıştır. Montaj hattında, görev süreleri ölçülmüş, öncelik ilişkileri çıkarılmış ve REBA yöntemi ile çalışma duruşlarına ait risk düzeyleri hesaplanmıştır.

Polat et al. [37], BMHD-2 problemini ergonomik kısıtlar altında çözmek için bir model geliştirmişlerdir. İstasyonlardaki fiziksel iş yükünü hesaplamak için REBA yönteminden faydalanmışlardır. REBA sonuçlarını kullanarak, her istasyon için maksimum iş yükünün aşılmamasını sağlayan bir kısıt ilave etmişler ve C yanında, ikinci bir hedef olarak modele eklemişlerdir. Önerilen model, üretilen test problemleri kullanılarak çözülmüştür.

Şahin ve Kahya [38], beyaz eşya ve metal imalat sanayisinde faaliyette bulunan bir işletmede, tek modelli BMHDP'yi ergonomik faktörleri dikkate alarak modellemişlerdir. Amaç fonksiyonu olarak, iş istasyonu sayılarının ve belirlenen en yüksek iş yükünden sapmaların en aza indirilmek istendiği modelde, çözüm yöntemi olarak HP kullanılmıştır. İş yükü faktörü, görevlerin ergonomik risk düzeyi olarak tanımlanmış ve REBA metoduyla analiz edilmiştir. Bununla birlikte aşılması istenmeyen REBA skoru da aynı zamanda modele kısıt olarak eklenmiştir. Her bir istasyon için aşılmaması istenen REBA skor değeri "10" olarak tanımlanmış ve GAMS paket programı ile model çözülmüştür. Sonuçların kıyaslanabilmesi için, istasyon zamanları ve risk değerlerini içeren sapmaların ortalamasını dikkate alan bir değerlendirme ölçütü belirlenmiştir. Geliştirilen yaklaşım incelendiğinde hem ergonomik risk seviyesi hem de iş istasyon sayısı açısından daha dengeli bir dağılım sağlandığı gözlenmiştir.

Kahya and Yetkin [39], bir önceki çalışmalarına benzer şekilde iş istasyonu zamanını ve işçilerin ergonomik risk seviyelerini aynı anda dengelemeyi hedeflemişler ve çözüm için sezgisel bir algoritma geliştirmişlerdir. İlk etapta, başlangıç ataması için COMSOAL algoritması kullanılmıştır. Ardından, ilk etapta gerçekleştirilen atama, işçiler arasında ergonomik risk seviyelerinin dengelenmesi için risk skorları göz önünde bulundurularak

yeniden gerçekleştirilmiştir. Ergonomik risk seviyeleri ise REBA ile elde edilmiştir. Her bir iş istasyonunun risk seviyesi ise, görevlerin risk seviyeleri toplanarak elde edilmiştir. Sonuçların kıyaslanabilmesi için bir önceki çalışmalarında olduğu gibi, istasyon zamanı ve ergonomik risk seviyesi dikkate alınarak sapmaların ortalamasını temel alan iki tane performans ölçütü belirlenmiştir. Şahin ve Kahya [38] ve Kahya ve Yetkin [39]'in çalışmalarında da olduğu gibi, her bir görevin ergonomik risk seviyesi belirlenmiştir. Buna göre, bir işçiye çalıştığı iş istasyonunda ataması gerçekleştirilen görevlerin ergonomik risk seviyelerinin toplamının, önceden tanımlanmış, kabul edilebilir en büyük risk düzeyini aşmamasını sağlayan bir kısıt modele eklenmiştir. Önerilen model, gerçek bir montaj hattında uygulanmış ancak çözüm aşamasında, problem boyutunun büyük olması ve ergonomik risk seviyesinin dengelenmesinin problemi zorlaştırması sebebiyle IP kullanılarak en iyi çözüm istenen sürede elde edilememiştir. Bu sebeple, çözüm için Kısıt programlama (Constraint Programming-CP) kullanılmış ve yaklaşımın en iyi çözüme mümkün olan en kısa sürede ulaştığı görülmüştür.

Alghazi and Kurz [40], karma modellenin üretiminde gerçekleştirildiği paralel montaj hatları için görev atama ve dengeleme çalışmasını gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada, görevlerin benzerliklerine dayalı oluşturdukları ergonomik risk skorunun dikkate alındığı ve toplam işçi sayısını en aza indirmeyi amaçlayan bir matematiksel model önermişlerdir. Ele alınan problem CP ile çözülmüştür.

Abdous et al. [41], MHDP'de ürün çeşitliliğinin sağlandığı karma modellenin için işçilerin yorgunluk düzeylerini dikkate alan bir model önermişlerdir. Yorgunluk düzeyleri daha önce Ma et al. [42] tarafından önerilen genel kas yorgunluğu formülünü kullanarak, ergonomik açıdan montaj hatlarının değerlendirilmesini sağlayan bir yaklaşım ile ele alınmıştır. İlgili formül, doğrusal bir şekle dönüştürülmüş ve istasyon sayısı ile en yüksek yorgunluk seviyesinin en küçükleme hedeflenmiştir. Geliştirilen model, yaygın olarak kullanılan test problemlerinde denenmiş ve Epsilon Kısıt yöntemiyle çözülmüştür.

Finco et al. [43], BMHDP-2 için, hattın düzgünlük indeksi ile beraber işçinin enerji tüketim miktarının bir arada değerlendirildiği bir yaklaşım önermişlerdir. Enerji tüketim miktarları ve dinlenme süreleri daha önce Battini et al. [28] tarafından geliştirilen yöntem ile hesaplanmış ve dinlenme sürelerinin belirlenmesinde Price [44]'in çalışmasında tanımladığı formül kullanılarak hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Dinlenme sürelerinin modele ilavesi, dengeleme öncesi, dengeleme esnası ve dengeleme sonrası olmak üzere üç zaman aralığına ayrılarak gerçekleştirilmiştir. Problemin kesin çözümü için matematiksel programlama

kullanılmış, ardından problem, sezgisel bir algoritma (Heuristic Algorithm-HA) daha geliştirilerek çözülmüş ve sonuçların etkinliği tartışılmıştır. Sonuçlar, C ve düzgünlük indeksi kriterleri dikkate alınarak değerlendirildiğinde, belirlenen üç farklı zaman dilimi arasında dinlenme süresi kısıtının özellikle dengeleme sırasında modele eklenmesinin daha iyi sonuçlar ortaya çıkardığı görülmüştür. Dinlenme süreleri dâhil edilerek problemin çözülmesinde elde edilen sonuçlarda dikkat çeken diğer bir husus ise, C 'nin artma eğiliminde olduğudur.

Mura and Dini [45] tarafından, bir iş istasyonuna herhangi bir görev atandığında, ilgili görevin gerektirdiği enerji tüketim düzeyinin hesaplandığı bir yaklaşım önerilmiştir. Hat içerisindeki, istasyon sayısı ve yetenekli işçi sayısı değerlendirme kriteri olarak kullanılırken, işçiler arası enerji-iş yükü dengesi ise, değişkenler arası ilişkileri tanımlamak için kullanılmıştır. Bu denge, işçilerin antropometrik ve fizyolojik karakteristikleri kullanılarak tanımlanmıştır. Öncelikle, her görev için gereken yetenek seviyeleri tanımlanmış; ardından işçiler için belirlenen yetenek düzeylerine göre görevlere atama gerçekleştirilmiştir. Ardından, enerji tüketimi fazla olan iş istasyonu için atamada yaş, kilo ve cinsiyet faktörleri dikkate alınmıştır. Çalışmada, GA kullanılarak atamalar gerçekleştirilmiştir.

Mokhtarzadeh et al. [46], U tipi montaj hatları için ergonomik risk düzeylerini göz önünde bulunduran, MIP önermişlerdir. Geliştirdikleri yaklaşım iki aşamalıdır. Birinci aşamada, görevleri kolay, orta ve zor olarak kategorilere ayırmışlar ve bunun için En İyi-En Kötü Yöntemi (Best-Worst Method-BWM) ile ELECTRE TRI kullanmışlardır. Burada, NIOSH, REBA, OCRA, JSI, ve EAWS ergonomik risk değerlendirme yöntemleri ağırlıklandırılarak amaç fonksiyonu şeklinde eklenmiş ve istasyon sayısı ile beraber, iki amaç olarak kullanılmıştır. İkinci aşamada ise, tanımlanan bu sınıfların iş istasyonları arasında dengeli dağılmasını sağlayan matematiksel bir model geliştirmişlerdir. Modelin çözümü için, CP, Tabu Arama (Tabu Search-TS), GA, Parçacık Sürüşü Optimizasyonu (Particle Swarm Optimization-PSO), Yusufçuk Algoritması (Dragonfly Algorithm-DA), Salp Sürüşü Optimizasyonu (Salp Swarm Algorithm-SSA) ve Gri Kurt Optimizasyonu (Grey Wolf Optimizer-GWO) yöntemleri kullanılarak sonuçlar elde edilmiş ve değerlendirilmiştir.

Özdemir et al. [47], ergonomik risk faktörlerini dikkate alan montaj hatlarını tasarlamak için bir model geliştirmişlerdir. Ergonomik risk faktörleri, görevleri yerine

getiren işçilerin sergiledikleri çalışma duruşlarına ek olarak tüm parça ve ekipmanların ağırlığı, boyutu ve şekli gibi faktörlerdir. Bu değerlendirme kapsamında, simülasyon yazılımı kullanılarak görevler için ergonomik risk analizi yapılmış ve sonuçları, geliştirilen modele dahil edilmiştir. Problemden birbiriyle çelişen iki amaç olduğu için çok amaçlı çözüm modeli kullanılmıştır. Sonuç olarak, problemin amaçlarının belirsizlik içerdiği değerlendirilmiş ve model, bulanık yaklaşımla ele alınarak bir buzdolabı firmasına ait gerçek hayat verileri kullanılarak çözülmüştür.

Bortolini et al. [48], montaj hatlarının daha etkin ve verimli çalışabilmesi için üç amacın yer aldığı bir matematiksel model geliştirmişlerdir. Birinci amaç, işçi başına yıllık sabit ve değişken maliyetin en küçüklenmesi; ikinci amaç, iş istasyonlarına ait düzgünlük indeksinin en küçüklenmesi; üçüncü amaç ise yorgunluk düzeyinin en küçüklenmesidir. Görevlerin atamasını içeren kısıtlara ilaveten, aşılmaması istenen yorgunluk düzeyi de kısıt olarak eklenmiştir. Küçük boyutlu örnek bir problem üzerinden PS elde edilmiştir.

Finco et al. [49], karma modellenmiş montaj hatları için fiziksel yorgunluk ve dinlenme payı ergonomik faktörlerini dikkate alan bir yaklaşım önermişlerdir. C 'nin en küçüklendiği modelde, ergonomik değerlendirme, yaş, deneyim, enerji tüketimi ve dinlenme süreleri kullanılarak sağlanmıştır. Küçük boyutlu bir problemde sonuçlar incelenmiştir.

Stecke and Mokhtarzadeh [50], insan ve robotların bir arada kullanıldığı montaj hatlarında dengeleme problemini ele almışlardır. Hareketli ve hareketsiz olmak üzere, iki çeşit robot üzerinde uygulama yapılmıştır. Burada, görevlerin tamamlanma süreleri ve görevler için gereken enerji düzeylerine dayalı bir fonksiyon geliştirilerek amaç fonksiyonu oluşturulmuştur. Örnek problem üzerinde CP ve Benders Ayırıştırma Algoritması (Benders Decomposition Algorithm-BDA) uygulanarak sonuçlar değerlendirilmiştir.

Literatür incelendiğinde, birçok ergonomik değerlendirme yönteminin başarılı bir şekilde MHDP'ye entegre edilebildiği görülmüştür. Söz konusu çalışmaların genelinde, ergonomik risk düzeyinin azaltılmasının, C 'yi ya da istasyon sayısını artırdığı belirlenmiştir. Bu durum, montaj hattına ait performans göstergelerinin kötüleşmesi anlamını taşımaktadır. Bununla birlikte birçok çalışmada, farklı ergonomik risk değerlendirme yöntemlerinin farklı üretim hatlarına uygulanabilmesini sağlayan esnek modeller geliştirilmiştir. İlgili çalışmalar değerlendirildiğinde, çalışmalarda kullanılan ergonomik değerlendirme yöntemlerinin basit gözleme dayanan yöntemler (REBA, RULA, OCRA, OWAS vb.) ve direkt ölçüm yöntemlerinden oluştuğu belirlenmiştir. Gözleme dayalı yöntemler, çalışma duruşlarının

analizinde kullanılmış, kas yorgunluğu, enerji tüketim miktarları vb. ise, direkt ölçüm yöntemleri kullanılarak ölçülmüştür. Buna karşın, gözleme dayalı yöntemler ile elde edilen ergonomik risk düzeylerinin ve direkt ölçüm yöntemleriyle belirlenen fizyolojik göstergelerin MHDP'ye nasıl yansıtılacağı tartışma konusu olmuştur. Buna göre, ergonomik risk faktörlerinin analizinde kullanılan yöntemlerin MHD modeline nasıl entegre edileceği, bu faktörlerin kısıt veya amaçta ne şekilde yer alacağı, kısıtta yer aldıklarında faktörlere ait hangi sınır değerlerin kullanılacağı, amaç fonksiyonunda yer aldıklarında MHDP'nin yapısını yeterli düzeyde temsil edip edemeyecekleri tartışma konularını oluşturmaktadır.

Montaj hatlarında işçiler, birden fazla görevi tekrarlı bir şekilde gerçekleştirirler ve farklı ergonomik risk faktörlerine maruz kalırlar. Bu kapsamda literatürde, işçinin ergonomik risk düzeyinin belirlenmesi konusunda kümülatif risk düzeyini değerlendirebilen bir yaklaşım eksikliği vardır. Literatürdeki bazı çalışmalarda, hem basit hem de kompleks analizler kullanılarak bu eksiklik giderilmeye çalışılmış, bazı çalışmalarda ise birtakım varsayımlar altında ergonomik risk seviyeleri elde edilmiştir.

Tablo 3.1'de, yukarıda bahsedilen Ergo-MHDP'yi konu alan çalışmalar, çalışmalarda dikkate alınan ergonomik risk faktörleri, ergonomik faktörlerin analizinde kullanılan yöntemler, ergonomik risk faktörünün MHDP modelinde bulunduğu konum ve MHDP'nin çözümünde kullanılan yaklaşımlar açısından özetlenmiştir.

Tablo 3.1. Literatürde Ergo-MHDP'yi konu alan çalışmalarda dikkate alınan ergonomik risk faktörlerine ilişkin bilgiler

Çalışma	Ergonomik Risk Faktörü	Ergonomik Risk Faktörü için Kullanılan Analiz Yöntemi	Ergonomik Risk Faktörünün Modelde Bulunduğu Konum		Önerilen Model ve Çözüm Yöntemi
			Kısıtta	Amaç fonksiyonunda	
Choi [15]	Çevresel koşullar, çalışma duruşu, fiziksel yorgunluk	Belirlenen ergonomik riskleri içeren fonksiyonlar		×	GP
Xu vd. [21]	El aktivitesi ve el-kol titreşimi	Riskleri sınırlandıran bir kısıtın eklendiği matematiksel model	×		BIP

Tablo 3.1. devam ediyor.

Abdous et al. [41]	Kas yorgunluğu	Genel kas yorgunluğu formülü	×	Epsilon Kısıt Yöntemi
Carnahan et al [17]	Fiziksel yorgunluk	Kavrama kuvvetini içeren fonksiyon	×	GA
Finco et al. [43]	Enerji tüketimi	Dinlenme sürelerini içeren enerji tüketimi fonksiyonu	×	MIP, HA
Mura ve Dini [44]	Enerji-yük dengesi	Yaş, kilo ve cinsiyete bağlı enerji tüketimi değerlendirme yaklaşımı	×	GA
Finco vd. [48]	Enerji tüketimi, yaş, deneyim, dinlenme süresi	Belirlenen ergonomik riskleri içeren fonksiyon	×	HA
Özgörmüş and Mutlu [18]	Görevlerin zorluk derecesi, risk derecesi ve monotonluk	Belirlenen ergonomik riskleri içeren fonksiyon	×	MIP
Güner and Hasgöl [20]	Görevlerin enerji ihtiyacı, bazı görevlerin bir arada yapılamaması	Belirlenen ergonomik riskleri sınırlandıran bir kısıtın eklendiği matematiksel model	×	MIP
Kara et. al [25]	Enerji tüketimi, aydınlatma seviyesi	Belirlenen ergonomik riskleri sınırlandıran bir kısıtın eklendiği matematiksel model	×	MIP
Alghazi and Kurz [40]	Görevlerin benzerlikleri, görevlerin gerektirdiği çalışma duruşları	Ergonomik risk skoru değerlendirme yaklaşımı	×	CP

Tablo 3.1. devam ediyor.

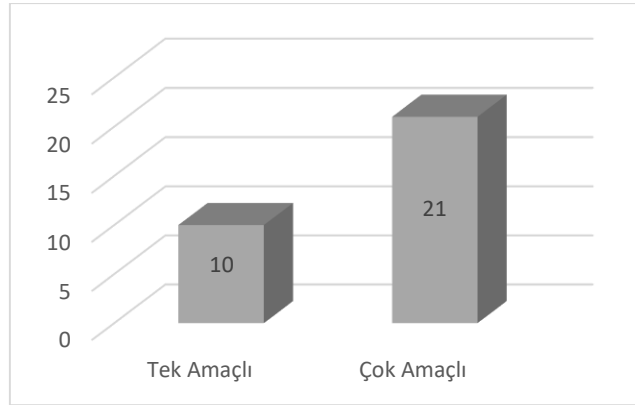
Battini et al. [28]	Enerji Tüketimi	PMES		×	Epsilon Kısıt Yöntemi
Battini et al. [29]	Metabolik enerji tüketimi, işçi için gerekli dinlenme süreleri	Belirlenen ergonomik riskleri içeren fonksiyon		×	Epsilon Kısıt Yöntemi
Polat et al. [27]	Çalışma duruşu	REBA	×	×	GP
Bautista et al. [30]	Fiziksel zorlanma	Ergo-Saniye		×	MIP
Bortolini et al. [33]	Çalışma duruşu	REBA		×	PS
Polat et al. [37]	Çalışma duruşu	REBA	×	×	GP
Şahin and Kahya [38]	Çalışma duruşu	REBA	×	×	GP
Kahya and Yetkin [39]	Çalışma duruşu	REBA	×	×	CP
Özdemir et al. [46]	Kullanılan parçaların ağırlığı, çalışma duruşundaki eklemler ve buna maruz kalınan süre	Belirlenen ergonomik riskleri içeren fonksiyon	×	×	PS
Bortolini et al. [47]	Yorgunluk	Göreve özgü yorgunluk düzeyi ataması	×	×	PS
Stecke ve Mokhtarza deh [49]	Enerji tüketimi	Süre ve görev bağımlı enerji tüketim fonksiyonu		×	MIP
Otto and Scholl [22]	Çalışma duruşu	NIOSH, OCRA, EAWS	×	×	LS, SA
Cheshmeh gaz et al. [23]	Çalışma duruşu	ARP, OWAS		×	GP, GA

Tablo 3.1. devam ediyor.

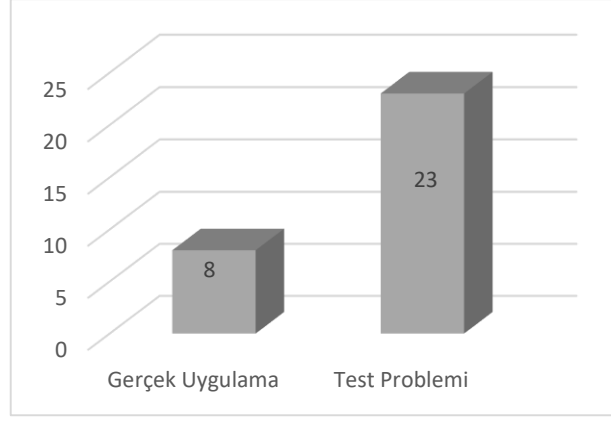
Chen et al. [24]	Yetenekli işçiler arasında görev dağılımı düzgünlüğü	Belirlenen ergonomik riskleri içeren fonksiyon		×	GGA
Baykasoğlu and Akyol [26]	Çalışma duruşu	OCRA		×	COMSO AL
Bautista et al. [31]	Çalışma duruşu	REBA, OCRA, NIOSH	×	×	GRASP ve MIP
Takanokura et al. [32]	İş yükü	Birikimli iş yükü değerlendirme yaklaşımı, REBA		×	Kaizen
Tiacci and Mimmi [34]	Çalışma duruşu	OCRA		×	GA, HA
BattKahya et al. [36]	Çalışma duruşu	REBA	×		COMSO AL, HA
Mokhtarzadeh et al. [45]	Çalışma duruşu, görev zorluk derecesi	NIOSH, REBA, OCRA, JSI ve EAWS	×	×	CP, HA

***NIOSH**: National Institute for Occupational Safety and Health **OCRA**: Occupational Repetitive Action Index **EAWS**: Ergonomic Assessment Worksheet **OWAS**: Ovako Working Posture Analysis System **ACGIH**: American Conference of Industrial Hygienists **REBA**: Rapid Entire Body Assessment **RULA**: Rapid Upper Limb Assessment JSI: Job Severity Index

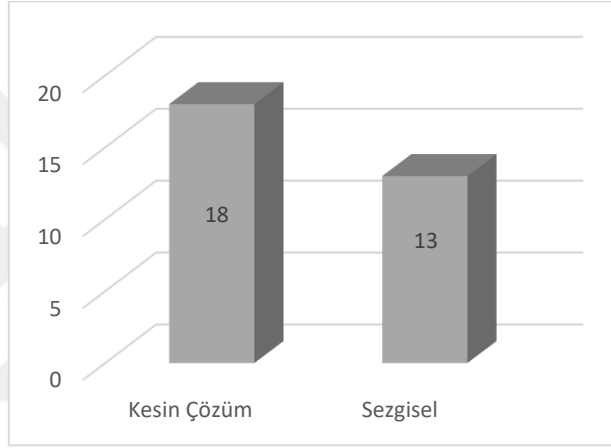
Aşağıda yer alan Şekil 3.1, Şekil 3.2 ve Şekil 3.3'te, Tablo 3.1'de sunulan çalışmalar sırasıyla, bu çalışmalarda kurulan modellerin tek amaçlı veya çok amaçlı olup olmaması, kullanılan çözüm yaklaşımı ve test problemi üzerinde uygulanması veya gerçek uygulama olması açılarından değerlendirilmiştir. Buna göre Şekil 3.1 incelendiğinde, çalışmalarda daha çok tek amaçlı problemlerin dikkate alındığı görülmektedir. Şekil 3.2'ye bakıldığında, gerçek uygulamadan ziyade test problemlerinin tercih edildiği dikkat çekmektedir. Son olarak, Şekil 3.3 incelendiğinde, MHDP için genel olarak kesin çözüm yöntemlerinin tercih edildiği belirlenmiştir. İlgili çalışmalar ergonomik açıdan incelendiğinde en çok dikkat çeken unsur, işçi-görev uyumunun çalışmalarda ön plana çıkmasıdır. Benzer şekilde grafikler değerlendirildiğinde, ergonomik faktörlerin çoğunun çalışmalarda amaç fonksiyonu olarak kullanıldığı görülmektedir. Bu durumun, ergonomik faktörlerin ölçümlerinin ve üst limitlerinin tanımlanmasının zorluğundan kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca, çalışmalarda karmaşık problemlere odaklanılmasına rağmen kesin çözüm veren yöntemlerin tercih edildiği de dikkat çekmektedir. Bunun sebebinin, problemlere ergonomik risk faktörlerinin eklenmesinin yeni bir problem yapısı ortaya çıkarması ve bu nedenle araştırmalarda çözüm elde edilmesinden ziyade, ergonomik faktörlerin ayrı ayrı sonuçlara nasıl etki ettiğinin görülmesinin amaçlanması olduğu düşünülmektedir.



Şekil 3.1. Literatürde Ergo-MHDP'ye odaklanan çalışmaların amaç fonksiyonlarına göre dağılımları.



Şekil 3.2. Literatürde Ergo-MHDP'ye odaklanan çalışmaların uygulama alanlarına göre dağılımları



Şekil 3.3. Literatürde Ergo-MHDP'ye odaklanan çalışmaların kullandıkları çözüm yöntemlerine göre dağılımları.

Daha önce de belirtildiği gibi, Ergo-MHDIAP konusunda literatüre ve pratikte uygulayıcılara katkı sağlayabilmek için Ergo-MHDIAP'nin diğer bir aşaması olan, Ergo-İAP'yi konu alan çalışmalara da odaklanmak gerekmektedir. Ancak literatürde Ergo-İAP sadece, Ayrım ve Can (2019) tarafından ele alınmıştır. Ayrım ve Can [51]'in çalışmalarında, üretim miktarı, çalışma ortamındaki sıcaklık, aydınlatma, gürültü, birlikte çalışılan yükün ağırlığı ve çalışma duruşu faktörlerini dikkate alan ve iş yükü düzeyinin en küçüklemesini hedefleyen bir işçi atama modeli önerilmiştir. Önerilen model, bir reklam firmasının kutu harf üretim alanında gerçekleştirilen görevlere işçilerin atanması amacıyla kullanılmış ve böylece, zorlanma düzeyini en küçükleyen bir işçi ataması yapılmıştır. Ergo-İAP anahtar kelimeleriyle aratıldığında, literatürde sadece Ergonomik İş Çizelgeleme Problemi (Ergo-İÇP) üzerine gerçekleştirilen çalışmalarla karşılaşmaktadır. Bu nedenle, aşağıda Ergo-İÇP üzerine yapılan çalışmalara değinilmiştir.

3.2 Literatürde Ergonomik İşçi Çizelgeleme Problemini (Ergo-İÇP) Konu Alan Çalışmalar

Bu bölümde, literatürde Ergo-İÇP konusunda gerçekleştirilen çalışmalara ilişkin bilgi verilmiş, Ergo-İÇP kapsamında geline nokta ve gelecek dönemlerde yapılabilecek çalışmalarla ilgili değerlendirmeler yapılmıştır. Web of Science (WOS) ve Google scholar veri tabanında var olan Ergo-İÇP için özellikle, 2000 yılı ve sonrasında yapılan çalışmalar güncel gelişmeleri yansıtabilmek için ele alınmıştır. Bu kapsamda, toplam 28 adet çalışma incelenmiş ve bu çalışmalar detaylı bir şekilde aşağıda sunulmuştur.

Literatür incelendiğinde Ergo-İA kapsamındaki çalışmalarda, genelde iş organizasyonu stratejilerinin uygulandığı görülmektedir. Ergonomik risk düzeyinin azaltılmasında, iş organizasyonu stratejilerinin uygulanması büyük önem taşımaktadır. Bu stratejiler ile işçi daha etkin bir şekilde üretim sürecine katılabilir ve işçinin yetenekleri geliştirilerek; gerçekleştirebildiği görevler niteliksel ve niceliksel olarak artırılabilir. Ayrıca iş organizasyonu stratejilerinin uygulanması sayesinde işçiler, farklı görevleri gerçekleştirdikleri için aynı kas gruplarına yüklenerek çalışmak zorunda kalmayacaklardır. Böylece, erken dönemde yorgunluk ve üretim süresinin uzaması gibi problemlerin önüne geçilebilmektedir.

Çalışmalarda iş organizasyonu stratejileri arasından en fazla iş rotasyonu stratejisinin uygulandığı belirlenmiştir. İş rotasyonu, işçinin monotonluktan kurtulmasını sağlayan ve iş istasyonunun ergonomik ilkelere uygun olmayan tasarımlarında, işçide oluşabilecek zorlanmayı azaltan bir etkiye sahiptir. İş rotasyonu ile işçinin hangi süreler arasında, hangi görevi gerçekleştireceğine dair bir çizelge elde edilir. Ergonomi prensiplerinin dikkate alınmasıyla gerçekleştirilen işçi çizelgelemesini Ergo-İÇP olarak tanımlamak mümkündür [52]. Ergo-İÇP’de, sadece hangi görevleri, hangi periyotlarda, hangi işçinin yapacağı sorusunun cevaplandırılmasından ziyade, işçinin periyodik olarak farklı görevlere atandığı durumda, yaşayabileceği zorlanma seviyesinin de dikkate alınması amaçlanmaktadır.

İÇP’lerin, literatürde genellikle üç sınıfa ayrıldıkları görülmektedir [53]. Birinci tip çizelgeleme, vardiya çizelgelemedir. Bu tür bir çizelgelemede, işçilerin vardiyalara doğru sayıda atanması ve vardiyada hangi işçilerin çalışması gerektiğinin belirlenmesi amaçlanır. İkinci tip çizelgeleme ise, izin günü çizelgelemedir. Bu tür bir çizelgelemede, işçilerin çizelgeleme periyodu boyunca, hangi zaman aralıklarında izin kullanacakları belirlenir. Üçüncü tip çizelgeleme ise, ilk iki tipin birlikte yapıldığı tur çizelgelemedir. Firma için, söz

konusu çizelgeleme türlerinden hangisi yapılırsa yapılsın, iyi bir çizelgenin sağlayacağı katkılar sayılamayacak kadar çoktur. Bu katkılara örnek olarak, işçilerin işletmeye olan bağlılıklarının artması, işçiler arasında eşitlik duygusunun yaygınlaşması, iş yükünün dengeli dağılması gösterilebilir. Literatür incelendiğinde, Ergo-İÇP konusunda sınırlı sayıda çalışmanın olduğu görülmektedir. Bu çalışmalardan aşağıda özetle bahsedilmiştir.

Carnahan et al. [54] çalışmalarında, kaldırma işlerindeki fiziksel iş yükü düzeyini belirlemeyi amaçlayan, Görev Şiddet İndeksi (Job Severity Index-JSI) yöntemini uygulayarak, bir iş rotasyonu önermişlerdir. Modelin çözümü için kesin çözüm içeren yaklaşımı ve sezgisel yaklaşımları uygulayan araştırmacılar, işçilerin iş kazası nedeniyle yaralanma potansiyellerini en küçükleyecek bir iş rotasyon çizelgesini, otomotiv sektöründe faaliyet gösteren bir firma için elde etmeye çalışmışlardır.

Seçkiner ve Kurt [55] yaptıkları çalışmada, tur çizelgeleme yaparak, radyografi çalışanlarının iş yüklerinin en küçüklenmesini amaçlamışlardır. Çizelgelemede, izin günleri dikkate alınmıştır. Çalışanların birimler arası rotasyon yapmalarının sebebi, hizmet sağladıkları hasta sayısının düzgün dağılımının sağlanmasıdır. Rotasyon çizelgeleme modeline, tur çizelgelemesinden elde ettikleri ihtiyaç duyulan en az çalışan sayısını, en küçük kabul edilebilir limit değeri temsil edecek şekilde kısıt olarak eklemişlerdir. Burada, çalışan başına hizmet edilen hasta sayısının en küçüklenmesi hedeflenmiştir. Ele alınan problemde süre kısıtının önemli olmadığı vurgulanmış ve önerilen matematiksel model, kendi ürettikleri test verileri kullanılarak bir hafta çalıştırılmıştır.

Yaoyuenyong and Nanthavanij [56], çalışmalarında, sanayide çalışan işçiler için gürültü seviyesine bağlı olarak yaşadıkları duyma kaybının önemine vurgu yaparak, bunun rotasyon ile ortadan kaldırılabilceğini belirtmişlerdir. Önerdikleri BIP modelini, günlük gürültü maruziyet seviyesini aşmayacak şekilde kurmuşlardır. Burada amaç, belirtilen maruziyet seviyesinin 90 dBA'yı aşmayacak şekilde, ihtiyaç duyulan en az işçi sayısını belirlemektir. İşçilerin maruz kaldıkları gürültü seviyesinin bilindiği varsayımıyla kurdukları modelin çözümü için hibrit bir sezgisel algoritma kullanarak, görevlerin iş istasyonlarına atanmasını sağlamışlardır. Çalışmada, kendi ürettikleri veriler kullanılarak önerilen modelin çözümü elde edilmiştir.

Asawarungsaengkul and Nanthavanij [57], Yaoyuenyong and Nanthavanij [56]'nin çalışmasında bahsedilen kısıtlara ek olarak, bir üretim ortamında gürültü için alınan önlemlerin ek maliyet getirebileceği (gürültü önleyici bariyerlerin kullanımı, kulak tıkaçları

vb.) düşüncesinden yola çıkarak, bu maliyetlerin en küçüklenmesini sağlayacak bir iş rotasyon modeli önermişlerdir. Bu kapsamda, birincisi maliyeti en küçükleyen ikincisi, çalışma periyodu içindeki en yüksek gürültü maruziyetini en küçükleyen iki farklı model geliştirmişlerdir. Yazarlar, önerdikleri BIP modelin çözümünü, beş makine ve dört işçiden oluşan bir üretim ortamı oluşturarak, rassal verilerle gerçekleştirmişlerdir.

Aryanezhad et al. [58], işçilerin maruz kalabilecekleri gürültü seviyesi ve sırt ağrısı yaşama risklerinin toplamını en küçükledikleri bir iş rotasyon modeli önermişlerdir. Önerilen modelin çözümü için literatürden aldıkları verilerden yararlanarak, matematiksel model ile kesin çözüm elde etmeye çalışmışlardır.

Diego-Mas et al. [59], kas-iskelet sistemine ilişkin rahatsızlık riskini en küçükleyen, aynı zamanda iş çeşitliliğini en büyükleyen bir iş rotasyonu önermişlerdir. Çözüm için GA kullanılmıştır. Çalışmada amaçlanan, bir otomobil parçası tedarikçisine ait montaj fabrikasında bulunan, 18 iş istasyonundan oluşan bir hat için iş rotasyon çizelgesi elde etmektir. 18 iş istasyonunun her birine işçilerin atanması için, dört farklı grupta toplam 45 kriter seçilmiştir. İlk grup, bir işçinin, her bir iş istasyonundaki görevleri yerine getirirken gerçekleştirdiği hareketleri değerlendirmektedir. Bu hareketler, istasyonlardaki ilgili görevlerde yoğun olarak kullanılmayan “Ayak Bilekleri/Ayaklar/Ayak parmakları” dışında, Rodgers tarafından geliştirilen, iş değerlendirme tekniğinde ([60], [61]) tanımlanan, altı temel kas grubuna göre sınıflandırılmıştır. İkinci grup (Genel Yetenekler), farklı görevler için gerekli genel yetenek türlerini (ayakta durma, oturma, yürümek, tırmanmak, koordineli hareketler vb.) değerlendiren maddeleri içermektedir. Üçüncü ve dördüncü gruplar, zihinsel ve iletişim yeteneklerini içermektedir. Zihinsel yetenekler kapsamında, karmaşık kararlar alabilme, sorumluluk alabilme, diğer iş arkadaşları ile çalışabilme, konsantrasyon vb., iletişim yetenekleri kapsamında ise, duyabilme, sesin geldiği yönü algılayabilme, koku alabilme, yazı yazabilme vb. yetenekler dikkate alınmıştır.

Nanthavanij et al. [62] gürültü düzeyi için üst sınır koyarak iş rotasyonu modeli geliştirmişlerdir. Bu modelde, verimlilik ve güvenlik aynı anda sağlanmaya çalışılmıştır. Verimlilik, işçi yeteneklerinin en büyüklenmesi şeklinde ilave edilerek; güvenlik ise, gürültü üst sınırının dikkate alınmasıyla modele yansıtılmıştır. Geliştirdikleri modelin çözümü için kendi ürettikleri test verileri ile yine kendi geliştirdikleri sezgisel yaklaşımı kullanmışlardır. Yazarlar, Yaoyuenyong and Nanthavanij [56] ve Asawarungsaengkul and Nanthavanij [57] ile aynı gürültü formülünü kullanarak gürültü faktörünün değerlendirilmesini sağlamışlardır.

Asensio-Cuesta et al. [63] çalışmalarında geliştirdikleri çizelgede, birikimli zorlanma sonucu kas-iskelet hastalıklarının ortaya çıkmasını önleyen, en uygun işçi-görev atamasını gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada, ergonomik kriterler, fiziksel beceri kriterleri, yeterlilik kriterleri olmak üzere üç kriter grubu belirlenerek değerlendirilmiştir. Kol abduksiyonu, el-kol-bilek bükülmesi gibi faktörlerin yer aldığı ergonomik kriterler; oturma, tırmanma, yazma, duyma, fare ve klavye kullanımı gibi faktörlerin yer aldığı fiziksel beceri kriterleri; firma stratejileri ve politikaları, öğrenme becerileri, istek ve heyecan gibi faktörlerin yer aldığı yeterlilik kriterleri göz önüne alınmıştır. Çalışmada, rotasyon çizelgesini hazırlamak için ergonomik ve yeterlilik rotasyon modeli (Ergonomic and Competent Rotation-ECRot) olarak adlandırdıkları modelin çözümü için, Çok Amaçlı Genetik Algoritma (Multi Objective Genetic Algorithm-MOGA) kullanmışlardır.

Wongwien and Nanthavanij [64], maruz kalınan ergonomik riski kabul edilebilir en büyük sınır risk değeriyle kısıtladıkları problemde, rotasyon uygulanan işçi sayısının en küçüklenmesini amaçlamışlardır. Ergonomik risklerin belirlenebilmesi için genel geçer bir yöntem kullanılmamış, her bir iş istasyonuna kendi belirledikleri rassal bir ergonomik risk değeri atayarak, işçilerin günlük risk maruziyet değerleri, zaman ağırlıklı ortalama ile belirlenmiştir. IP ile çözdükleri modelin verilerini rassal olarak kendileri üretmiştir.

Wongwien and Nanthavanij [65], verimlilik ve işçi memnuniyeti çerçevesinde Ergonomik İş Gücü Çizelgelemesi (Ergonomic Workforce Scheduling)'ni gerçekleştirmişlerdir. Wongwien ve Nanthavanij [60] tarafından daha önce tanımlanan yaklaşımla benzer şekilde, günlük tehlike düzeyi için en büyük kabul edilebilir sınır değeri modele entegre edilmiştir. Yazarlar, yetenek seviyeleri bakımından işgücünün farklılaştığı kabulüyle işçilere, birlikte çalışmaya istekli oldukları iş arkadaşlarını seçme imkânını tanımışlardır. Her işçinin, her bir görevi gerçekleştirirken ortaya çıkan iş yükünü ölçebilmek amacıyla Toplam İş Skoru (Total Work Score) yaklaşımını kullanmışlardır. Bu iki amacın en büyüklendiği modelin çözümünü rassal olarak ürettikleri verilerle gerçekleştirmişlerdir.

Rattanamanee and Nanthavanij [66] İÇP'de, 6 günlük rotasyonu belirleyen ve bu kapsamda ergonomik kısıtları dikkate alan bir çizelge önermişlerdir. Görevlerin atandığı iş istasyonları için belirli bir ergonomik risk değeri rassal olarak belirlenmiş ve işçilerin günlük olarak daha önce belirlenen bu sınır değeri aşmayacak şekilde atanması sağlanmıştır. Çalışmada, makine rotasyonunun görev çizelgesi ve makinelerin dolu veya boş kalma durumlarının dikkate alınarak gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Problem, işi aktif olarak

gerçekleştiren işçilerin sayısının en küçüklenmesi amaçlanarak değerlendirilmiştir. Çözüm için CPLEX programının kullanıldığı modelde, rassal verilerden yararlanılmıştır.

Wang and Liu [67], işçilerin uyku düzensizliklerinin en büyük sebebinin vardiyalı çalışma olduğunu ve bu uykusuzluğun performans düşüklüğünü beraberinde getirdiğini vurgulamışlardır. Buna göre, yorgunluk düzeyini en küçükleyen bir amaç fonksiyonuna sahip vardiya çizelgeleme modeli önermişlerdir. Amaçlarını gerçekleştirmek için Üstel Koşullu Matematiksel Model (Conditional Exponential Mathematical Model-CEMM) kullanmışlardır. Kurdukları yorgunluk temelli modelde, işçilerin istekleri, yasal gereklilikler ve iş gücü talepleri gibi durumları dikkate almışlardır. Problemi, MIP ile Xpress IVE kullanarak modellemişler ve elde edilen modelin hassasiyetinin gösterilebilmesi için ise duyarlılık analizi kapsamında, farklı parametrelere göre çalıştırarak elde edilen sonuçları paylaşmışlardır.

Boenzi et al. [68], iş rotasyonunda yaş faktörünü dikkate alan bir çizelgeleme önermişlerdir. Tekrarlı hareketler üzerine eğilen yazarlar, bunun ölçümü için OCRA metodunu kullanmışlar ve kendi ürettikleri rassal veriler ile modeli çözmüşlerdir.

Dewi and Septina [69], fiziksel ve zihinsel iş yükünün birlikte ele alındığı bir çizelgeleme yaklaşımı önermişlerdir. Zihinsel iş yükünü, NASA İş Yüğü İndeksi (NASA Task Load Index-TLX)'ni kullanarak, fiziksel iş yükünü ise, bazal metabolizmaya bağlı olarak değişen kalori tüketimine göre ölçmüşlerdir. Tedarik hizmeti veren bir işletmede önerilen çizelgeleme modeli uygulanmıştır. İki amaçlı olan model, HP ile çözülmüştür.

Akbari [70], yarı zamanlı işçilerin yorgunluk düzeylerini göz önünde bulunduran bir tur çizelgeleme yaklaşımı önermiştir. Önerilen modelde amaç, işçi maliyetlerinin en küçüklenmesidir. Modelde, işçilerin yorgunluk oranları (Fatigue Rate) değerlendirilerek vardiyalara atamaları yapılmış ve modelin çözümü için GA kullanılmıştır.

Song et al. [71], çizelgeleme çalışması kapsamında ergonomik kriterlerin dahil edildiği bir algoritma önermişlerdir. Görevi gerçekleştirirken vücudun aktif olan bölgesini dikkate alarak, ilgili göreve belirli puanlar atanmış ve bu puanların en küçüklenmesi amaçlanmıştır. Önerilen model, kesin çözüm veren IP ile çözülmüştür.

Moussavi et al. [72] C 'nin en küçüklenmesini amaçlayan, Ergo-İÇP üzerinde çalışmışlardır. Modelde, yetenek seviyesi, yaş, boy ve tecrübe ergonomik faktörleri dikkate alınmıştır. Montaj hattında gün içinde rotasyon değil, haftanın belirli günlerinde rotasyon

için çizelgeleme gerçekleştirilmiştir. Bu sebeple, ek olarak her işçinin bir gün boyunca aynı görevde çalışması ve hattın 7 gün boyunca aralıksız çalışması durumları dikkate alınmıştır. Önerilen model, GUROBI ile çözülmüştür.

Mossa et al. [73], OCRA metodunu uygulayarak, üretim verimliliğinin göz önüne alındığı bir rotasyon çizelgelemesi üzerinde çalışmışlardır. MIP yaklaşımının kullanıldığı modelde, günlük iş rotasyon çizelgesini elde etmeyi amaçlamışlardır.

Yıldız et al. [74] yaptıkları çalışmada, hava yolu ekipleri için işçi-görev eşleşmesine ilişkin yorgunluk faktörünü göz önünde bulunduran bir modelleme yaklaşımı geliştirmişlerdir. Yorgunluk durumunu değerlendirirken, Üç Süreçli Yorgunluk Modeli (Three Process Model of Alertness) olarak adlandırdıkları bir yaklaşım kullanmışlardır. Bu yaklaşımda, işçinin homeostatik ve biyolojik saatine dayanan iki farklı süreç birleştirilmiştir. Homeostatik durum, kişinin uyanık olduğu ve uyku halinde olduğu sırada vücut iç denge halini göstermekte, biyolojik saat ise, vücutta uyanık kalınan sürelerin etkisini yansıtmaktadır. Ekibin toplam yorgunluğunu hesaplayan model, Sütun Geliştirme Yaklaşımı (Column Generation Algorithm-CGA) ile çözülmüştür.

Ferjani et al. [75], atama yapılırken işçilerin yorgunluk düzeylerinin dikkate alınması gerektiğini belirtmişlerdir. Yazarlar, yorgunluğun görevin beklenen tamamlanma süresinden daha uzun sürede bitmesine yol açacağını değerlendirmişlerdir. Görev süresinde yorgunluk etkisinin incelendiği çalışmada, çok kriterli sezgisel bir yöntem kullanılmış ve daha dinamik bir rotasyon gerçekleştirilmiştir. Uzman karar vericilerin olmaması nedeniyle simülasyon tabanlı ağırlıklandırma yöntemi kullanılmış ve sonuçlar değerlendirilmiştir. Sonuçlara bakıldığında, yorgunluğun görev süresi üzerinde kesinlikle etkisinin olduğu ve sezgisel yaklaşımın da iyi sonuçlar verdiği belirlenmiştir. Ferjani et al. [75]'nin çıkardığı bir başka sonuç ise, atama problemlerinde görev sürelerinin pek çok faktöre bağlı olabileceği ve bu faktörlerin hem niteliksel hem niceliksel olabileceğidir. Yazarlar, niteliksel olması durumunda bulanık mantıktan yararlanılabileceğini ifade etmişlerdir.

Wongwien and Nanthavanij [76], çok amaçlı Ergo-İÇ yaptıkları çalışmalarında, işçi sayısı ve buna dayalı olarak işçinin verimlilik ve iş tatminini artıracak şekilde kendisine uygun göreve atanmasını sağlayan bir yaklaşım ele almışlardır. Problem birden fazla amaç içerdiği için HP yaklaşımı kullanılarak, MIP yapısından faydalanılmasıyla günlük iş rotasyon çizelgesinin oluşturulması sağlanmıştır.

Hochdörffer et al. [77], kısa dönemli iş rotasyon çizelgeleri için yoğun olarak el-parmak kullanımına ilişkin ergonomik değerlendirmenin yer aldığı bir model geliştirmişlerdir. Önerilen modelin çözümü için geliştirdikleri kural tabanlı bir sezgisel yöntemden faydalanmışlardır.

Şenyiğit and Atıcı [78], öğrenme etkisinin ve ergonomik faktörlerin çizelgeleme problemindeki yansımalarını görebilmek için matematiksel model geliştirmişlerdir. Çalışma duruşu olarak belirlenen ergonomik risk faktörünün değerlendirilmesi için RULA yöntemini kullanmışlardır. Çalışmada, tek makine çizelgeleme problemi kapsamında C 'yi en küçüklemek amaçlanmıştır.

Moussavi et al. [79], ergonomik iş rotasyon çizelgesi elde edebilmek için fiziksel iş yükünü ve C 'yi en küçüklemeyi hedeflemişlerdir. Görevlerin fiziksel iş yükü düzeyleri, “1” ile “10” arasında puan verilerek tanımlanmıştır. Fiziksel iş yükü, düşük, orta ve yüksek derece olmak üzere 3 kategoriye ayrılmıştır. Buna göre, 1-4 arası düşük, 5-7 arası orta ve 8-10 arası yüksek iş yükünü temsil etmektedir. Çalışmada, matematiksel model kurularak çözümler elde edilmiştir.

Sana et al. [80], sadece tek bir işçinin uygun ergonomik koşullarda çalışmasını sağlamak yerine tüm işçilere aynı koşulların sağlanması amacıyla iş rotasyon çizelgesini yaparken ergonomik risk faktörlerini de dikkate almışlardır. Bu kapsamda, OCRA, RULA ve NIOSH kaldırma yöntemlerine göre belirlenen sınır değerleri birer kısıt olarak eklemişlerdir. Çözüm yöntemi olarak [92] GA'nın özel bir türünü uygulamışlardır. Çalışmada, en yüksek malzeme taşıma risk düzeyini, en yüksek tekrarlı hareket risk düzeyini ve en yüksek çalışma duruşu risk düzeyini en küçüklemek amaçlanmıştır.

Yener vd. [81], haftalık iş rotasyonunda işçilerin izinli oldukları günleri ve performans düzeylerini dikkate alan bir ergonomik matematiksel model önermişlerdir. Üretim miktarının en büyüklenmesi ve zihinsel yorgunluk ile fiziksel yorgunluk düzeylerinin en küçüklenmesini amaçlayan yaklaşım, doğrusal olmayan BIP ile çözülmüştür. Önerilen modelde, işçilerin her bir görevi daha önceden belirlenen bir performans seviyesinde gerçekleştirdikleri varsayılmıştır. Elle yapılan tekrarlı görevlerde, işçinin performans düzeylerinin belirlenmesi amacıyla görev tamamlama süreleri ölçülmüştür. Buna göre, her bir işçiye ait performans düzeyi elde edilmiştir. Fiziksel ve zihinsel maruziyeti değerlendirmek için ise sırasıyla, REBA ve NASA-TLX metotları kullanılmıştır.

Botti et al. [82], tekrarlayan görevlerde riske maruz kalan işçileri, çeşitli iş istasyonlarına atamak için iki amaçlı bir matematiksel model sunmuşlardır. Amaçlardan birincisi, işçilerin yetenekleri ve görevler arasındaki eşleşmeleri dikkate almak, ikincisi, vardiya sürecinde görev atamalarını çeşitlendirerek, tekrarlayan görevlerin oluşturduğu ergonomik risk düzeyini azaltmaktır. Çalışmada, işçilerin fiziksel kapasitelerini, yeterliliklerini, zihinsel ve ilişkisel becerilerini, her bir iş istasyonunun gereksinimleri ile birlikte, yetenekler ve ergonomik risk düzeyi açısından analiz eden, bir işçi-görev ataması yaklaşımı önerilmiştir.

Adem and Dağdeviren [83] uzun dönemde beyaz parmak hastalığına yol açabilmesi sebebiyle el-kol titreşimini dikkate alan bir Ergo-İÇP önermişlerdir. Bilinen üretim ortamı kısıtlarına ek olarak, el-kol titreşimine dayalı risklerin en küçüklenmesi hedeflenmiştir. İşçilerin yetenekleri ve iş günü izin tercihlerini de dikkate alan modelde, işçilerin atanma maliyetleri dikkate alınmaktadır. MIP ile modellenen problem gerçek verilerle test edilmiş, ergonomik koşulların dikkate alındığı bir çözüm elde edilmiştir.

Adem ve Dağdeviren [84] üretim ortamlarındaki fiziksel risk faktörlerini değerlendirmek için termal konforu ele almışlardır. Çalışmada, yüksek sıcaklık koşullarından işçiyi korumak ve vücut sıcaklığını sabit tutmak hedeflenmiştir. Termal konfor ölçümü için Wet Bulb Globe Temperature (WBGT) indeksi kullanılmış ve uluslararası kabul gören Devlet Endüstriyel Hijyenistlerin Amerikan Konferansı (American Conference of Governmental Industrial Hygienists-ACGIH)'ın geliştirdiği limit değerler sınırlandırıcı olmuştur. Geliştirilen modelde, Adem ve Dağdeviren [83], [84] çalışmalarında olduğu gibi, işçilerin atanma maliyetleri dikkate alınmıştır.

Tablo 3.2'de, yukarıda bahsedilen, literatürdeki Ergo-İÇP çalışmaları, çalışmalarda dikkate alınan ergonomik risk faktörleri, ergonomik risk faktörlerinin analizinde kullanılan yöntemler, ergonomik risk faktörlerinin modeldeki konumları, kurulan model türü ve uygulanan çözüm yöntemi açılarından özetlenmiştir.

Tablo 3.2. Literatürde Ergo-İÇP’yi konu alan çalışmalarda dikkate alınan ergonomik risk faktörlerine ilişkin bilgiler

Çalışma	Ergonomik Risk Faktörleri	Ergonomik Analiz Yöntemi	Ergonomik Risk Faktörünün Modeldeki Konumu		Önerilen Model ve Çözüm Yöntemi
			Kısıtta	Amaç fonksiyonunda	
Wang and Liu [67]	Yorgunluk	Yorgunluk denetimi (Fatigue Audit InterDyne (FAID)) modeli	×	×	MIP
Akbari [66]	Yorgunluk	Yorgunluk oranları (Fatigue Rate)		×	MIP
Moussa vi et al. [68]	İş ve işçilerin ergonomik yeterlilik seviyeleri	Belirlenen ergonomik riskleri içeren fonksiyon	×		MIP
Diego-Mas et al. [57]	Hareketler, genel kapasite, zihinsel kapasite, iletişim becerileri	Belirlenen ergonomik riskleri içeren fonksiyon		*	GA
Asensio-Cuesta et al. [63]	Ergonomik kriterler, fiziksel beceri kriterleri, yeterlilik kriterleri	ECRot		*	MOGA
Yıldız et al. [70]	Yorgunluk	Yorgunluk fonksiyonu	×		HA
Seçkiner and Kurt [53]	Mola süreleri, iş yükü	Mola periyotları ve iş yükünün modele eklenmesi	×	×	MIP
Asawarungsaengkul and Nanthavanij [55]	Gürültü maruziyeti	Desibel cinsinden zaman ağırlıklı ortalama maruziyet	×	×	BIP
Aryanezhad and diğerleri [56]	Gürültü maruziyeti ve sırt ağrısı	Desibel cinsinden zaman ağırlıklı ortalama maruziyeti ve JSI	×	×	MIP

Tablo 3.2 devam ediyor.

Wongwi en and Nanthav anij [60]	Gürültü maruziyetini içeren ergonomik risk	Zaman ağırlıklı ortalama ile işçilerin günlük gürültü maruziyetinin değerlendirilmesi	×		BIP
Wongwi en and Nanthav anij [61]	Görevlerden kaynaklanan ergonomik risk	Her bir görev için toplam ergonomik risk skorunu değerlendiren bir yaklaşım	×	×	MIP
Rattana manee and Nanthav anij [62]	Rassal ergonomik risk	Ergonomik risk maruziyet sınırının bir kısıt olarak eklendiği matematiksel model	×		BIP
Boenzi and diğerleri [64]	Tekrarlı görevler	OCRA	×		MIP
Dewi and Septina [65]	Fiziksel ve zihinsel iş yükü	Kalori tüketimi ve NASA TLX	×	×	MIP
Song and diğerleri [67]	Fiziksel iş yükü	Kümülatif iş yükü belirleme yaklaşımı		×	MIP
Mossa et al. [69]	Çalışma duruşu	OCRA	×	×	MIP
Wongwi en and Nanthav anij [73]	Tehlike maruziyeti, görev-işçi uyumu, görev-işçi değişimi	Tehlike maruziyet düzeyi, görev-işçi uyum fonksiyonu, görev-işçi değişim fonksiyonu	×	×	MIP
Şenyiğit and Atıcı [75]	Öğrenme etkisi, çalışma duruşu	İşe bağlı öğrenme indeksi, RULA	×		MIP

Tablo 3.2 devam ediyor.

Moussa vi et al.[76]	Fiziksel iş yükü	Görev puanlarına dayalı iş yükü değerlendirme	×	×	Epsilon Kısıt Yönemi
Yener et al. [78]	Fiziksel zorlanma ve algılanan iş yükü	REBA, NASA- TLX	×		MIP
Botti et al. [79]	Yaş ve yetenek açısından ergonomik iş yükü	OCRA	×	×	BIP
Carnaha n et al. [52]	Görev zorluk derecesi	JSI	*	*	HA
Yaoyue nyong and Nanthav anij [54]	Gürültü maruziyeti	Desibel cinsinden zaman ağırlıklı ortalama maruziyet	×		HA
Nanthav anij et al. [58]	Gürültü maruziyeti	Desibel cinsinden zaman ağırlıklı ortalama maruziyet	×		HA
Hochdör ffer et al. [74]	Ergonomik yeterliliklerin dengeli dağıtılması (Balanced Ergonomic Qualification Preserving Job Rotation (BEQR))	Belirlenen ergonomik riskleri içeren fonksiyon		×	HA
Sana et al. [77]	Çalışma duruşu, yük kaldırma etkisi	OCRA, RULA, NIOSH	×	×	HA
Ferjani et al. [71]	Yorgunluk	İşçilerin yorgunluk düzeyini içeren fonksiyon		×	Simülasy on
Adem ve Dağdevi ren	El-kol titreşimi	Belirlenen ergonomik riskleri içeren fonksiyon	×		MIP

Tablo 3.2 devam ediyor.

Adem ve Dağdevi ren	Termal konfor	Belirlenen ergonomik riskleri içeren fonksiyon	×	MIP
------------------------------	---------------	---	---	-----

* Matematiksel model bulunmamaktadır.

x^* İki model geliştirilmiş olup, birinde gürültü maruziyeti amaç olarak yer almaktadır. Diğerinde ise, kısıt olarak eklenmiştir.



Tablo 3.2'den de görüldüğü gibi, literatürde sınırlı sayıda, işçi çizelgeleme kapsamında ergonomik faktörlerin dikkate alındığı çalışma bulunmaktadır. Bu alanda sınırlı sayıda çalışma olmasının sebebini von Elmbach et al. [85], ergonomik kriterlerin yöneylem araştırması ve üretim alanlarında dikkate alınmasının yeni bir konu olmasına dayandırarak açıklamışlardır.

Yapılan literatür araştırması sonucunda, Ergo-İÇP konusunda yapılan çalışmalarda ergonomik risk faktörlerinin tek bir açıdan ele alındıkları dikkat çekmektedir. Bu çalışmalarda, ergonomik risk faktörleri Ergo-İÇP alanında yeni problem tipleri oluşturmak amacıyla kullanılmıştır. Bu kapsamda literatürde ergonomik faktörler kapsamında, fiziksel iş yükü düzeyini belirleyebilmek için çalışma ortamındaki sıcaklık, aydınlatma ve gürültü düzeylerinin değerlendirildiği ya da REBA, RULA, OCRA gibi yöntemler kullanılarak çalışma duruşlarındaki risk düzeylerinin belirlendiği gözlenmiştir. Bununla birlikte, işçilerin yetenekleri ile görevlerin eşleşmesine dikkat edilen çalışmaların yapıldığı da belirlenmiştir. Ayrıca, fiziksel iş yükünü sadece yukarıda anlatılan yöntemlerle değil, görev bazında metabolik enerji tüketiminden yola çıkarak hesaplayan ya da zihinsel yorgunluktan yola çıkarak öznel olarak belirleyen ve matematiksel modellere entegre eden çalışmalar da bulunmaktadır. Önerilen çizelgeleme modellerinde, fiziksel iş yükünün eşit dağıtılmaya çalışılarak düzgünlük sağlandığı veya görevler bazında maruz kalınan fiziksel iş yükü için kabul edilebilir bir üst sınır değeri atandığı görülmüştür. Bu tür çalışmalarda araştırmacıların genelde, her bir görev için sabit ve belirli bir iş yükü değeri ataması yaptıkları görülmektedir. Bu bilgilerden hareketle, literatürde derinlemesine yapılmış bir fiziksel iş yükü değerlendirme çalışması olmadığı söylenebilir.

Fiziksel iş yükünü derinlemesine incelemeyen, sabit, belirli veya rastgele olarak tayin edilmesine benzer bir şekilde, görevlerin gerçekleştirildiği iş istasyonlarına da öznel olarak risk puanının atandığı çalışmalar da bulunmaktadır. Bu çalışmalarda, iş istasyonları için rastgele ve hangi risk faktörü ya da faktörlerine ait olduğu belirtilmeyen risk skorları atanarak, modellere ergonomik risk kısıtı şeklinde eklendiği dikkat çekmiştir.

Literatür kapsamında MHD ve iş rotasyon modelleri özelinde, matematiksel modellerde farklı ergonomik risk faktörlerinin olduğu ve MHD modellerinde daha çok çalışma duruşlarına ilişkin risk seviyelerine yönelik incelemeler yapıldığı belirlenmiştir. Çizelgeleme çalışmalarında ise, çoğunlukla fiziksel iş yükünün işçiler arasında dengeli dağılmasına dikkat edildiği görülmektedir.

Literatür araştırmasının bir diğer kritik sonucu ise, MHD ve çizelgeleme çalışmalarında hali hazırda zihinsel iş yüküne ilişkin kapsamlı değerlendirme yapan bir çalışmaya rastlanmamasıdır. Özellikle, artan zihinsel iş yükü ile işçilerin daha fazla iş kazası yaptıkları bilinmektedir. Bu duruma ilişkin literatürde 2015 yılında, Dewi and Septina [69] ve Yener vd. [81] tarafından yapılan sadece iki çalışma bulunmaktadır. Özellikle literatüre yeni giren kavramlardan biri olan nöroergonomi yöntemleri ile işçilerin gerçekleştirdikleri görevler nedeniyle yaşadıkları zihinsel zorlanma seviyeleri objektif bir biçimde belirlenerek, bu değerler üretim görevlerinin düzenlenmesi konusunda kullanılabilir. Dikkat gerektiren kritik görevlerin gerçekleştirildiği üretim ortamlarında, ergonomi kapsamında fiziksel iş yükünün yanı sıra, zihinsel iş yükünün de dikkate alınması, işçilerin bütüncül bir şekilde korunmaları açısından olumlu bir farklılık oluşturabilir.

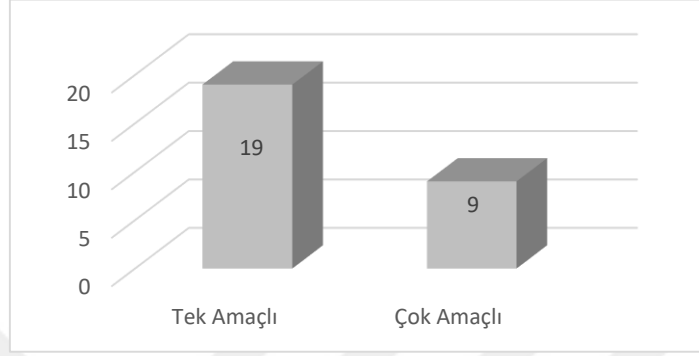
Tablo 3.2'deki model ve çözüm yöntemi sütunlarından elde edilen bilgilere göre, bu konuyu çalışan yazarların çoğunlukla MIP yaklaşımı üzerinde durdukları görülmektedir. Genellikle tek amaçlı olarak tanımlanan matematiksel modellerde, kısıtlı sayıda da olsa, çok amaçlı modellerin bulunduğu ve bunların çözümü için HP yaklaşımına başvurulduğu görülmektedir.

Carnahan vd. [55]'in geliştirdiği temel ergonomik iş rotasyon modelinin Otto and Scholl [86] tarafından çözüm süreleri bakımından NP-Zor sınıfa giren bir model olduğu kanıtlanmıştır. Bu yüzden, NP-Zor olan temel modele yapılan her türlü ekleme modelin karmaşıklığını daha da arttıracaktır. Yine Tablo 3.2'nin model ve çözüm yöntemi sütunundan da görüldüğü gibi, araştırmacıların genel olarak kesin çözüm veren paket programları kullandığı, diğerlerinin ise, önerdikleri modeller özelinde çözüm için geliştirdikleri sezgisel yaklaşımları kullandıkları belirlenmiştir.

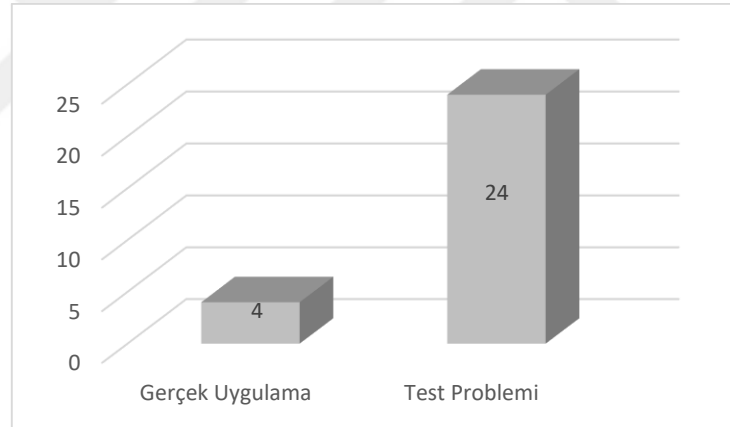
Fiziksel risk faktörlerinin atama problemlerine eklenmesi konusunda literatürde bulunan sınırlı sayıdaki kaynak incelendiğinde, gürültü düzeyinin dikkate alındığı bazı çalışmalar bulunmakla birlikte; aydınlatma gibi ergonomik faktörler temelinde henüz herhangi bir çalışmanın yapılmadığı söylenebilir. Bununla birlikte fiziksel risk faktörleri dışında, bireysel, bilişsel ve psikolojik risk faktörleri de MHDİAP'ye adapte edilebilir ve böylece gerçek üretim süreçlerine daha yakın sonuçlar elde edilebilir.

Aşağıda, Tablo 3.2'de, yukarıda detaylı bir şekilde incelenen çalışmaların sırasıyla tek amaçlı veya çok amaçlı bir model içerip içermemeleri, kullanılan çözüm yöntemi ve önerilen modelin test problemi ya da gerçek verilerle uygulanıp uygulanmaması durumlarına göre

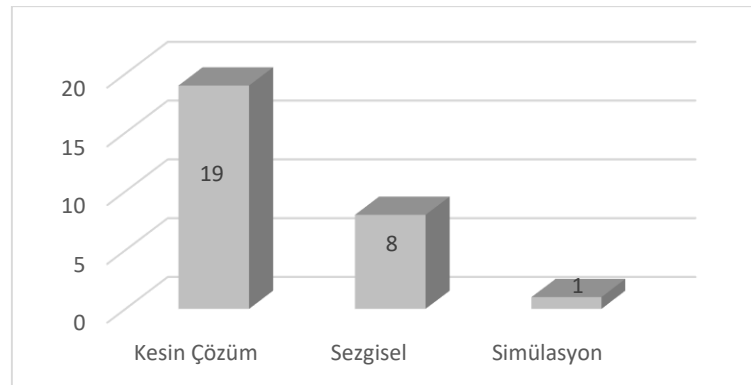
Çalışmaların dağılımları gör÷lmektedir. Şekil 3.4 incelendiğinde, literatürde daha çok tek amaçlı modellerin kurulduğu belirlenmiştir. Şekil 3.5 incelendiğinde, modelin uygulanması için gerçek verilerden ziyade test problemlerinin tercih edildiği gör÷lmektedir. Son olarak Şekil 3.6 incelendiğinde, Ergo-İÇP için genel olarak sezgisel yöntemlerin tercih edildiği dikkat çekmektedir.



Şekil 3.4. Literatürde Ergo-İÇP'ye odaklanan çalışmaların amaç fonksiyonlarına göre dağılımları



Şekil 3.5. Literatürde Ergo-İÇP'ye odaklanan çalışmaların uygulama alanlarına göre dağılımları



Şekil 3.6. Literatürde Ergo-İÇP'ye odaklanan çalışmaların kullanılan çözüm yöntemlerine göre dağılımları

3.3 Literatürde Ergonomik Montaj Hattı Dengeleme ve İşçi Atama Problemini (Ergo-MHDİAP) konu alan çalışmalar

Bu bölümde, literatürde Ergo-MHDİAP kapsamında gerçekleştirilen çalışmalara değinilmiştir. Bu kapsamda, Web of Science (WOS) ve Google scholar veri tabanında var olan Ergo-MHDİAP için özellikle, 2007 yılı ve sonrasında yapılan çalışmalar güncel gelişmeleri yansıtabilmek için ele alınmıştır. Bu kapsamda, toplam 6 adet çalışma incelenmiş ve bu çalışmalar detaylı bir şekilde aşağıda paylaşılmıştır.

Baykasoğlu et al. [87], MHDP'de işçi atama, istasyon yerleşimi konularını kapsayan ve ergonomik risk faktörlerinin montaj hattı tasarımında göz önünde bulundurulduğu bir yaklaşım ele almışlardır. MHDP'de; OCRA indeks yöntemiyle ergonomik risk seviyesi hesaplanmış ve ortalama risk seviyesini geçmeyecek şekilde görevlerin dağılımını sağlayan bir kısıt eklenmiştir. Burada, ortalama risk düzeyinden negatif yönde uzaklaşan istasyonlar kırmızı OCRA indeksini içeren iş istasyonları olarak tanımlanmış ve amaç fonksiyonu olarak ta bu tanımlamaya uygun şekilde eklenmiştir. C'nin en küçüklenmesi, OCRA indeksi yüksek istasyon sayısının, OCRA indeksinin yüksek olduğu ortalama kırmızı istasyon sayısının en küçüklenmesi ve ortalama OCRA indeksinden sapmaların en küçüklenmesi problemin amaçları olarak tanımlanmıştır. Problemden ergonomik faktörlerin dikkate alınması ve bu nedenle modelde çok sayıda amaç ve kısıtın olması, zaten zor yapıda olan problemi, kesin çözüm elde edilmesi yerine kural tabanlı bir sezgisel yöntem ile çözüme yönlendirmiştir. Bu kapsamda çalışmada, Windows tabanlı bir karar destek sistemi kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara bakıldığında, kırmızı istasyon sayısının azaldığı ve yeni bir istasyonun eklenmesi ile ergonomik risk düzeyinin düşürülebildiği görülmüştür.

Efe et al. [88], istasyon sayısını en küçüklemek amacıyla MHDİAP üzerinde çalışmışlardır. İşçiler fiziksel iş yükü düzeyleri ve buna bağlı olarak, görevleri tamamlama süreleri değerlendirilerek iş istasyonlarına atanmışlardır. Çalışmada işçilerin, altı farklı yaş sınıfına ayrılarak ve cinsiyetleri de göz önünde bulundurularak fiziksel iş yükleri değerlendirilmiştir. Çalışmada incelenen MHDİAP için, BIP önerilmiştir. Modelin etkinliği, bir tekstil firmasına ait test problemleri ve gerçek hayattaki uygulamalarla gösterilmiştir. Çalışmada, tekstil sektöründe faaliyet gösteren bir firmanın, 53 görevin gerçekleştirildiği bir montaj hattında uygulama yapılmıştır.

Demirkol Akyol and Baykasoğlu [89], ergonomik risk faktörlerinin üç alt problemde tanımlandığı bir MHDİAP üzerinde çalışmışlardır. İlk iki alt problemde, ergonomik risk düzeyi OCRA metoduyla değerlendirilmiş ve çözüm için kural tabanlı arama algoritması (Rule Based Search Algorithm-RBSA) kullanılmıştır. Üçüncü alt problemde, taşıma kısıtları altında yerleşim problemi dikkate alınarak, çözümde çeşitli komşuluk yapıları kullanılmıştır. Önerilen modelde birinci amaç, C 'yi en küçükmektir. Ek olarak, ergonomik açıdan yüksek tehlikeli olarak değerlendirilen “kırmızı istasyon” sayısını en küçükmek, kırmızı iş istasyonlarının OCRA indekslerinin ortalamasını en küçükmek, tüm iş istasyonlarının OCRA indekslerinin ortalama mutlak sapmasını en küçükmek ve tüm istasyonların OCRA indekslerinin ortalamasını en küçükmek amaçları dahilinde model, öncelikli HP yaklaşımı ile çözülmüştür. Çalışmada, iki aşamalı bir çözüm önerilmiştir. İlk aşamada, her test problemi için çözüm elde edilerek en kısa C 'li çözümler bulunmuştur. İkinci aşamada ise, aynı problem için ergonomik risk faktörleri ilave edilerek, öncelikli HP ile çözümler elde edilmiştir. Çalışma sonucunda, kabul edilebilir bir C artışı ile daha iyi ergonomik koşulların sağlanabileceği görülmüştür. Çalışmada matematiksel model kullanılmamış ve MHDİAP'den elde edilen çözümle ilerlenerek, ergonomik riski en küçükleyen bir yaklaşımla çözüm elde edilmiştir.

Zhang et al. [90], MHDİAP'yi U tipi hatlar için çözmüştür. Çalışmada, görevleri gerçekleştirirken yürüme süreleri ihmal edilmiştir. Tüm işçilerin, farklı görev tamamlama süreleri içinde her görevi yapabildikleri dikkate alınmıştır. Söz konusu U tipi hat, tek ürünün üretildiği bir hat olmakla birlikte, görevlerin öncelik ilişkileri bilinmektedir. Her görevin, bir çalışma duruşu (bir işçinin üst ekstremitelerinin konumu ve hareketi) sergilenerek gerçekleştirildiği varsayılmıştır. Bu varsayımlarla kurulan model, C ve tüm iş istasyonlarındaki toplam ergonomik risk düzeyini en küçükleyerek çözülmüştür. Çalışmada, matematiksel model kurulmuş ve test verileri kullanılarak uygulama yapılmıştır. Modelin büyük boyutlu problemler için çözümü amacıyla Yeniden Başlamalı İteratif Açgözlü Pareto Algoritması (Restarted Iterated Pareto Greedy Algorithm-RIPGA) kullanılmıştır.

Katirae et al. [91], MHDİAP için işçinin deneyimini ve maruz kaldığı fiziksel iş yükünü dikkate alarak işçi ataması gerçekleştiren matematiksel bir model geliştirmişlerdir. Çalışmada, işçiden işçiye değişen bu özellikler, İşçi-Görev Sınıflandırma Matrisi (The Worker Tasks Categorization Matrix-WTCM) kullanılarak, işçinin ergonomik risk düzeyini azaltacak şekilde atanmasını sağlayan “Borg skoru” elde edilmiştir. Yönteme göre, işçinin atanacağı görevin skor değerinin 4'ten fazla olması “yüksek deneyim ve fiziksel iş yükü

gerektiren bir görev” olduğunu göstermektedir. C ve maksimum fiziksel iş yükünün en küçüklenmesinin amaçlandığı problemde ilave kısıt olarak; aşılmaması beklenen maksimum fiziksel iş yükü düzeyi tanımlanmıştır. Model iki amaçlı olduğu için PSs elde edilerek sonuçlar aktarılmıştır.

Çimen vd. [92], Ergo-ALWARBP (Ergonomic Asssembly Line Balancing and Re-Balancing Problem) olarak isimlendirdikleri ergonomik faktörlerin yer aldığı montaj hattı yeniden dengeleme ve işçi atama problemini ele almışlardır. Geliştirilen modelde, 7 farklı değerlendirme kriteri amaç fonksiyonunda yer almıştır. Birinci amaçta, iş istasyonu açma, kapatma, görevi bir istasyondan diğerine taşıma, ilave ekipman veya işçi kullanımı, ilave kiralama veya stok gibi maliyetlerin dahil edildiği toplam yeniden dengeleme maliyetini en küçükleme; ikinci amaçta, başlangıç montaj hattı ile yeniden dengelenen montaj hattı arasındaki ortalama benzerlik oranını en küçükleme; üçüncü amaçta, başlangıç montaj hattı ile yeniden dengelenen montaj hattı arasında görevler açısından aynı işçilerin atanmasını sağlayan ortalama benzerlik oranını en büyükleme; dördüncü amaçta, OCRA indeksi kullanılarak belirlenen ergonomik risk düzeyini en küçükleme; beşinci amaçta, yeniden dengelemede taşınan görev sayılarını en küçükleme; altıncı amaçta, üretim süresi, iş istasyonu ve C 'ye dayalı hat etkinliğini en büyükleme ve son olarak yedinci amaçta, düzgünlük indeksini en küçükleme yer almaktadır. Montaj hattı yeniden dengeleme kısıtlarına ilave olarak, ortalama OCRA indeksi belirlenerek; bunun aşılmamasını sağlayan bir kısıt ta modelde kullanılmıştır. İlk kez ortaya konulan bu problem, test problemlerinde denenerek kural tabanlı sezgisel bir algoritma ile çözülmüştür.

Literatürde Ergo-MHDİAP'ye odaklanan ve yukarıda yer verilen çalışmalar, Tablo 3.3'te, çalışmalarda dikkate alınan ergonomik risk faktörleri, ergonomik risk faktörlerinin analizinde kullanılan yöntemler, ergonomik risk faktörlerinin modeldeki konumları, kurulan model türü ve uygulanan çözüm yöntemi kapsamında özetlenmiştir.

Tablo 3.3. Literatürde Ergo-MHDİAP'yi konu alan çalışmalarda dikkate alınan ergonomik risk faktörlerine ilişkin bilgiler

Çalışma	Ergonomik Risk Faktörü	Kullanılan Ergonomik Analiz Yöntemi	Ergonomik Risk Faktörün Modeldeki Konumu		Önerilen Model ve Uygulanan Çözüm Yöntemi
			Kısıtta	Amaç fonksiyonunda	
Baykasoğlu et al. [82]	Çalışma duruşu	OCRA		×	HS
Efe [83]	Yaş, cinsiyet ve iş yükü	Yaş ve cinsiyete bağlı olarak iş yükünü belirleyen bir fonksiyon	×		MIP
Demirkol Akyol and Baykasoğlu [84]	Çalışma duruşu	OCRA		×	HS
Zhang et al. [85]	Çalışma duruşu	OCRA		×	Sezgisel yaklaşım
Katiraei et al. [86]	Fiziksel zorlanma	Borg Score	×	×	PS
Çimen et al. [87]	Çalışma duruşu	OCRA	×	×	HS

Tablo 3.3'ten de görüldüğü gibi, sınırlı sayıdaki çalışmada ergonomik risk faktörleri dikkate alınarak, MHDİP'lerin işçi atama problemleri ile bir arada çözümlendiği belirlenmiştir. Literatürde yer alan Ergo-MHDİP ve Ergo-MHDİAP'leri konu edinen

Çalışmalardan yola çıkılarak, üretim verimliliğini etkileyen ergonomik risk faktörleri açısından aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

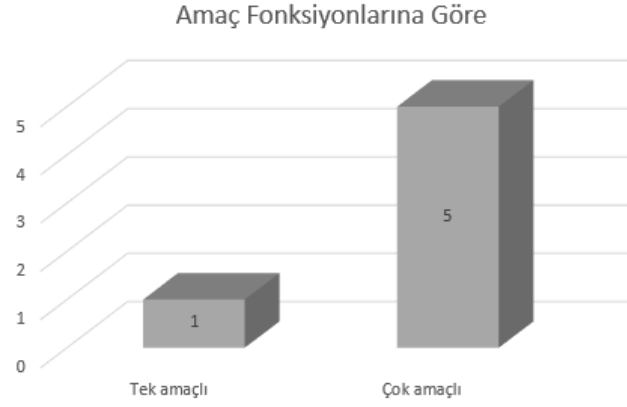
Son zamanlarda MHDİAP'lerin İAP'ler ile bir arada özmlendiğı görülmektedir. Ancak, literatürde yer alan önceki çalışmalardan da görüldüğü gibi, bu çalışmalara ergonomik risk faktörlerinin sınırlı sayıda dahil edildiğı belirlenmiştir.

Yapılan alışmalar, ergonomik risk faktörlerinin MHDİAP'ye entegre edilebileceğini göstermiştir. Buradan, ergonomik risklerin azaltılmasının, çelişen amaçlarla bir arada değeriendirilebileceğı belirlenmiştir. Literatürdeki çalışmaların çoğ, ergonomik açıdan farklı kapsamlarda geliştirilmiş risk değeriendirme metotlarını kullanmışlardır. Buna göre, literatürde kısıtlı sayıda çalışma bulunsa da ergonomik risk faktörlerinin analizinde farklı yöntemler kullanılarak, daha kapsamlı değeriendirmelerin yapılabileceğı ortaya çıkmaktadır.

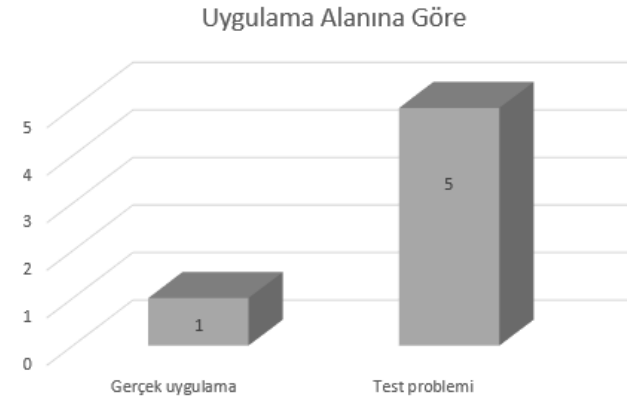
Literatürde var olan çalışmalara bakıldığında, ergonomik risk faktörlerinin basit gözleme dayalı yöntemler (OCRA, OWAS, REBA vb.) ile değeriendirilmesi yoluna gidildiğı görülmüştür. Ancak MHDİAP'de elde edilen bu risk seviyelerinin ve fizyolojik ölçüm sonuçlarının geliştirilen modellere kısıt olarak mı amaç olarak mı eklenmesi gerektiğı, kısıt olacaklarsa hangi sınır değerielerin kullanılması gerektiğı, amaçta yer alacaklarsa MHDİAP'nin yapısını yansıtıp yansıtamayacakları merak konusu olmuştur. İşçilerin montaj hatlarında varlığı, bu varlığın farklı ergonomik koşulların dikkate alınmasını gerektirdiğı ve bu koşulların dikkate alınmasının MHDİAP'ler için bir zorunluluk olarak ortaya çıktığı değeriendirilmektedir. Bu kapsamda, literatürdeki çalışmalarda, işçilerin etkilendiğı farklı ergonomik riskleri değeriendirebilen bir model/metot eksikliğinin olduğı belirlenmiştir. Literatürde yer alan kısıtlı sayıdaki çalışmada, farklı analizler yapılarak ve ergonomik risk faktörlerine ait değerielerin belirlenmesi için formüller geliştirilerek, bu ihtiyaca çözüm aranmıştır. Diğeri çalışmalarda ise, birtakım kabuller altında ergonomik riskler dikkate alınmıştır.

Aşağıda Tablo 3.3'te, yukarıda yer verilen çalışmaların sırasıyla tek amaçlı veya çok amaçlı bir modele sahip olup olmamaları, kullanılan çözüm yöntemi ve modelin test problemine veya gerçek verilere uygulanıp uygulanmadığı durumlarının çalışmalara göre dağılımları görülmektedir. Şekil 3.7 incelendiğinde, literatürde daha çok tek amaçlı modellerin dikkate alındığı görülmektedir. Şekil 3.8 incelendiğinde, gerçek uygulamadan ziyade test problemlerine önerilen modellerin uygulandığı anlaşılmaktadır. Son olarak Şekil

3.9 incelendiğinde, Ergo-MHDİAP için genel olarak sezgisel yöntemlerin tercih edildiği dikkat çekmektedir.



Şekil 3.7. Literatürde Ergo-MHDİA'ya odaklanan çalışmaların amaç fonksiyonlarına göre dağılımları



Şekil 3.8. Literatürde Ergo-MHDİA'ya odaklanan çalışmaların uygulama alanlarına göre dağılımları



Şekil 3.9. Literatürde Ergo-MHDİA'ya odaklanan çalışmaların kullanılan çözüm yöntemlerine göre dağılımları

3.4 Tez Çalışmasının Literatüre Katkısı

Çalışmada gerçekleştirilen literatür araştırmasında MHDP, İAP ve MHDİAP modellerinde dikkate alınan ergonomik risk faktörleri ayrıntılı olarak incelenmiştir. Buna göre, MHDİAP’de pratikte uygulayıcılara, akademik olarak da literatüre katkı sağlayabilecek hangi ergonomik risk faktörlerinin dikkate alınması gerektiği belirlenmiştir. Bu kapsamda, çalışmada altı farklı model önerilmiş ve sonuçları değerlendirilmiştir.

Geliştirilen birinci modelde, aydınlatma ve gürültü parametrelerinin yer aldığı çevresel faktörler kısıt olarak dikkate alınmıştır. Ayrıca, çalışma duruşlarının risk düzeyleri REBA yöntemi ile analiz edilerek, elde edilen risk skorlarına göre görev süresi de dikkate alınarak, görev bazında birikimli fiziksel zorlanma düzeyi belirlenmiş ve modele bir kısıt olarak eklenmiştir. Birinci modelde yer alan aydınlatma faktörü, daha önce MHDP’de dikkate alınmış olmakla birlikte, MHDİAP literatürü için yenidir. Gürültü faktörü ile görev süresine bağımlı REBA uygulaması ise hem MHDP hem de MHDİAP için ilk olma özeliği taşımaktadır. Burada birden fazla görev bir arada gerçekleştirildiğinde ya da görevleri gerçekleştirirken birden fazla gürültü kaynağına maruz kalındığında ortaya çıkabilecek gürültü düzeyi, görevlerin gürültü seviyelerine dayalı oluşturulmuştur. Gürültü düzeyi açısından belirlenen sınır değerin aşılması durumu, C kodu yazılarak test edilmiş ve bir arada atanmaması gereken görevler kümesi oluşturularak modele yansıtılmıştır. Birinci model, tek amaçlı bir model olup, modelde *C*’nin en küçüklenmesi amaçlanmıştır.

Geliştirilen ikinci modelde, *C* ile birlikte işçilerin tercih ettikleri görev/leri yapmaları en büyüklenmiştir. İşçilerin tercih ettikleri görevleri yapabilmelerinin en büyüklendiği yaklaşım, bu tez kapsamında tanımlanmış olup; MHDP ve MHDİAP için ilk olma özelliğini taşımaktadır.

Geliştirilen üçüncü model, *C* ve iş kazası olasılıklarının en küçüklendiği bir değerlendirme fonksiyonunu içermektedir. İş kazası olasılık değerleri, işçilerin bireysel özellikleri dikkate alınarak lojistik regresyon modelinin uygulanmasıyla elde edilmiştir. Yine bu yaklaşım da ilk defa tez çalışmasında yer almaktadır. Bununla birlikte, lojistik regresyon modelinin uygulanması sonucunda işçilerin bireysel faktörlerine ilişkin önem ağırlıkları da belirlenmiştir.

Geliştirilen dördüncü model, enerji tüketimi düzgünlüğüne dayalı değerlendirmeyi temel almaktadır. Modelde, *C* ile beraber enerji tüketim miktarının en küçüklenmesi

hedeflemektedir. Enerji tüketim miktarı, MHDP literatüründe dikkate alınmıştır ancak MHDİAP için yeni bir değerlendirmedir.

Geliştirilen beşinci modelde, lojistik regresyon modelinde baskın olduğu görülen deneyim faktörü dikkate alınarak, görevlerin gerektirdiği deneyim ile işçilerin sahip oldukları deneyim düzeylerinin uygunluğunu eşleştiren bir kısıt modele eklenmiştir. Bu yaklaşım, tez kapsamında tanımlanmış olup, söz konusu kısıt, daha önce MHDP için literatürde kullanılmıştır ancak düzgünlüğü sağlayıcı amaç fonksiyonu ilk defa bu çalışmada yer almaktadır.

Geliştirilen altıncı model, tüm ergonomik risk faktörlerinin dikkate alındığı, entegre bir çözüm sunan modeldir. Önerilen bütünleşik model, MHDP ve MHDİAP için yeni bir yaklaşımdır.

Yine, çalışmada geliştirilen iki amaçlı modeller için PSs'lerin, bütünleşik model için CS'lerin sunulması MHDİAP için gerçekleştirilen diğer yeniliklerdir. Ayrıca çalışmada, ergonomik risk faktörleri için yeni test problemleri oluşturularak literatüre katkı sağlanmıştır.

4 ÇALIŞMADA KULLANILAN YÖNTEMLER

Tez kapsamında önerilen tek amaçlı matematiksel model, MIP kullanılarak geliştirilmiştir. Çok amaçlı modeller ise, MIP ile modellenmiş ve çözüm yöntemi olarak PSs ve CSs kullanılmıştır.

Verilen kısıtlar altında birden fazla amacı en iyilemeyi amaçlayan problem, MIP problemi olarak adlandırılır. Problemin matematiksel modeli vektör maksimum problemi olarak ilk kez, Kuhn and Tucker tarafından 1951 yılında tanımlanmıştır [93]. PS ve CS kavramlarını anlayabilmek için bu problemten kısaca bahsetmek gerekmektedir.

Vektör Maksimum Problemi

Vektör maksimum probleminin ilk matematiksel gösterimi aşağıdaki gibidir [95]:

$$\{\max f(x), x \in S\} \quad (4.1)$$

Bu gösterimde, $f(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_k(x))$, $x \in R^m \rightarrow R^k$ vektör değerli bir fonksiyondur. $\bar{x} \in S$ 'nin tüm çözümlerinin kümesi, $f_l(x)$, $l = 1, 2, \dots, k$ amaç fonksiyonuna bağlı olarak tanımlanır ve aşağıdaki koşullar sağlanır;

Eğer $\bar{x} \in S$ ise, $\bar{x} \in S$ bir etkin çözümdür, öyle ki, $f_l(\bar{x}) \geq f_l(x)$, $l = 1, 2, \dots, k$ ve en az bir $l = 1, 2, \dots, k$ için, $f_l(\bar{x}) > f_l(x)$ 'dir.

Burada, MIP modeli genel olarak Eşitlik (4.2)'de verildiği gibidir.

$$f_1(x) = \sum_{j=1}^n c_{1j}x_j \rightarrow \max(\min)$$

$$f_2(x) = \sum_{j=1}^n c_{2j}x_j \rightarrow \max(\min)$$

$$f_k(x) = \sum_{j=1}^n c_{kj}x_j \rightarrow \max(\min) \quad (4.2)$$

Eşitlik (4.2)'de verilen programlama modelinde, $x_j = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$, n boyutlu sıfırdan büyük, pozitif karar değişkenleri vektörünü, $c_{lj} = (c_{l1}, c_{l2}, \dots, c_{ln})^T$ $l \times n$ boyutlu

sabit fiyat katsayılar matrisini, $(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_k(x))^T$ k boyutlu kriter vektörünü, $[a_{ij}]_{m \times n}$ kısıtların katsayılar matrisini, $b_i = [b_1, b_2, \dots, b_m]$ m boyutlu sağ taraf sabiti vektörünü göstermektedir. Problemden verilen “max/min” kelimesi amaçların en büyüklenmesi veya en küçüklenmesi anlamını taşımaktadır [95].

Eşitlik (4.2)’de verilen çok amaçlı programlama probleminde, $f_1(x)$ fonksiyonu maksimum değer ise, $-f_1(x)$ fonksiyonu amaç fonksiyonunun en küçük değeridir. $f_1(x)$ amaç fonksiyonunu en büyükleme ile $-f_1(x)$ amaç fonksiyonunu en küçükleme arasında hiçbir fark yoktur [95].

Tanım 3.1: Eşitlik (4.2)’de verilen programlama modelinde, amaç fonksiyonu ve kısıtlar doğrusal ise, problem doğrusal olarak adlandırılır. Eğer amaç fonksiyonu ya da kısıtlardan en az biri doğrusal değilse problem, doğrusal olmayan çok amaçlı programlama problemi olarak adlandırılır.

Tanım 3.2. (Optimal çözüm): Eşitlik (4.2)’de verilen çok amaçlı programlama probleminde en küçükleme istendiğinde, uygun bölgede $x \in X$ noktasının en iyi çözüm olması için gerek ve yeter şart $l = 1, 2, \dots, k$ için $f_l(\tilde{x}) \leq f_l(x)$ olacak şekilde bir $\tilde{x} \in X$ noktasının mevcut olmamasıdır.

Bununla birlikte, birden fazla amacın olması, bu amaçların birbirleriyle çelişmesini de beraberinde getirmektedir. Tüm amaçları bir arada en iyileyen tek bir en iyi çözüm bulmak her zaman mümkün olmayabilir. Bu nedenle, optimallik koşulu yanında diğer optimallik kavramı olan Pareto Optimallik kavramını ve basılamazlık kriterini tanımlamak gerekir.

4.1 Pareto Çözüm

Kriter uzayında $S = \{x \in R^n | a_{ij}x_j (\leq, =, \geq) b, x_j \geq 0\}$ uygun çözüm alanı olmak üzere; $x \in S$ vektörü verilsin. x vektörünün Eşitlik (4.2)’de verilen problemde bir PS çözüm olması için gerek ve yeter şart, tüm $l = 1, 2, \dots, k$ için $f_l(\tilde{x}) \leq f_l(x)$ ve en az bir farklı indeks r için $f_r(\tilde{x}) < f_r(x)$ olacak şekilde herhangi bir $\tilde{x} \in S$ olması koşulunda, herhangi bir $\tilde{x} \in S$ vektörünün olmamasıdır. PS’ler genellikle sonsuz sayıdadır. Bu nedenle, problemin çözümünde PS’lerin bir kümesi elde edilir.

Zayıf PS:

Kriter uzayında $S = \{x \in R^n | a_{ij}x_j (\leq, =, \geq) b, x_j \geq 0\}$ uygun çözüm alanı olmak üzere; $x \in S$ vektörü verilsin. x vektörünün bir zayıf Pareto Optimal çözüm olması için gerek ve yeter şart, tüm $l = 1, 2, \dots, k$ için $f_l(\tilde{x}) < f_l(x)$ olacak şekilde herhangi bir $\tilde{x} \in S$ vektörünün olmamasıdır.

Basılamazlık Kriteri:

Kriter uzayında $S = \{x \in R^n | a_{ij}x_j (\leq, =, \geq) b, x_j \geq 0\}$ uygun çözüm alanı olmak üzere; $x \in S$ vektörü verilsin. x vektörünün basılamaz bir çözüm olması için gerek ve yeter şart, tüm $l = 1, 2, \dots, k$ için $f_l(\tilde{x}) \leq f_l(x)$ ve $f_l(\tilde{x}) \neq f_l(x)$ olacak şekilde, herhangi bir $\tilde{x} \in X$ vektörünün olmamasıdır.

Tüm etkin çözümler **Pareto Eğrisi** olarak adlandırılır. Pareto eğrilerinin görüntüsü farklı amaç fonksiyonları arasında ödünleşimin (trade off) elde edilmesini sağlamaktadır [95].

Tanım 3.3. (Referans Noktası): Karar verme problemlerinde istenen (hedeflenen) amaç fonksiyonlarının değerleri istek seviyeleri olarak adlandırılır ve $f_1^*, l = 1, 2, \dots, k$ ile gösterilir. İstek seviyelerini oluşturan vektöre ise referans noktası adı verilir.

Tanım 3.4 (İdeal Nokta): Her bir amaç fonksiyonunu teker teker en iyileyerek elde edilen amaç fonksiyonu vektörüne ideal ya da mükemmel amaç fonksiyonu vektörü denir. Aşağıda Eşitlik (4.3) ile verilen çok amaçlı programlama problemi ele alındığında;

$$\min f_l(x), l = 1, 2, \dots, k, x \in S \quad (4.3)$$

$f_l(x)$ amaç fonksiyonunun her birinin tek tek en iyilenmesi ile elde edilen $f_l^* = (f_1^*, f_2^*, \dots, f_k^*)$ amaç fonksiyonunun değerlerinden oluşturan vektöre, ideal amaç fonksiyonu vektörü denir. İdeal amaç fonksiyonunu oluşturan her bir amaç fonksiyonu değerine, amaç fonksiyonunu oluşturan ideal noktalar adı verilir. Pek çok PS çözüm yöntemi bulunmaktadır. En yaygın olarak kullanılan Epsilon-Kısıt yöntemidir. Epsilon-Kısıt yönteminin algoritması aşağıda tanımlanmıştır [96]:

Adım 0:

$$AX = B, X \geq 0 \text{ k.a. } \text{Enb } f_1(X), \text{Enb } f_2(X)$$

Adım 1:

$$AX = B, X \geq 0 \text{ k.a. } \text{Enb } f_1(x) \text{ modelini çöz.}$$

En iyi çözüm: X_1^* , En iyi değer: $f_1(X_1^*)$

Diğer amaç fonksiyonunun değeri: $f_2(X_1^*)$

Adım 2:

$AX = B, X \geq 0$ k.a. $Enb f_2(x)$ modelini çöz.

En iyi çözüm: X_2^* , En iyi değer: $f_2(X_2^*)$

Diğer amaç fonksiyonunun değeri: $f_1(X_2^*)$

Adım 3:

$\epsilon = [f_2(X_2^*) - f_2(X_1^*)]/10$ (10 adet baskın çözüm istenirse)

Adım 4:

$i = 1, 2, \dots, 10$ için

$AX = B$

$f_2(X) \geq f_2(X_1^*) + i \times \epsilon$

$X \geq 0$

$Enb f_1(X)$ modellerini çöz.

Pareto en iyi çözümler: $X_i^\#$

Pareto en iyi değerler: $\{f_1(X_i^\#), f_2(X_i^\#)\}$

Pek çok problemde, Pareto çözüm noktalarından oluşan eğrileri etkin olarak hesaplanamaz. Teorik olarak bu noktaları tam olarak hesaplamak mümkün olsa bile, iki amaçtan fazla amacın olduğu çok amaçlı programlama problemlerinin çözümlerinin bulunması için yetersiz kalır. Bu nedenle, ağırlıklandırılmayan, önceliklendirilemeyen, hedef konulamayan ve PS sunulamayan programlama problemlerinin çözümlerinde CS yöntemi kullanılır.

4.2 Uzlaşık Çözüm

Bu yöntemde, bazı referans noktaları arasındaki mesafeler ve uygun bölge minimize edilir [94]. Bu yöntem tercih önceliği kullanmaz ve karar vericinin düşüncelerini dikkate almaz. Tanım 3.4'ten, Eşitlik (4.2)'de verilen probleminin en küçük veya en büyük ideal amaç fonksiyonu vektörü $f_l^* = (f_1^*, f_2^*, \dots, f_k^*)$ elde edilir. Bu vektör, bir referans noktası olarak kabul edilir. L_p metrikleri ise, referans noktaları arasındaki mesafelerin ölçümü için kullanılır. Böylece, amaç fonksiyonlarının referans noktalardan sapmaları minimize edilerek optimal çözümler elde edilebilir [95]. Bu yöntem, CS olarak adlandırılır ve Eşitlik (4.8)'deki gibi ifade edilebilir:

$$\min L_p = \left\{ \sum_{l=1}^k \left| \frac{f_l(x) - f_l^*}{f_1^*} \right|^p \right\}^{1/p}$$

$$\text{kısıtlar } L_p \left\{ S = \{x \in R^n | a_{ij}x_j (\leq, =, \geq) b, x_j \geq 0\} \right\} \quad (4.4)$$

Eşitlik (4.4)'de, amaç fonksiyonun tam değer almamasının sebebi, uzlaş vektörünün tam olarak bilinmemesinden kaynaklanmaktadır. L_p probleminde, p değeri genel olarak $1 \leq p \leq \infty$ aralığında tanımlanmaktadır.

Burada, Eşitlik (4.4)'te $p = \infty$ olarak alındığında, metrik Chebycheff metriği olarak adlandırılır. L_p probleminin matematiksel modeli, Eşitlik (4.5)'teki gibi tanımlanmaktadır.

$$\min \max_{l=1,2,\dots,k} \left| \frac{f_l(x) - f_l^*}{f_1^*} \right|$$

$$S = \{x \in R^n | a_{ij}x_j (\leq, =, \geq) b, x_j \geq 0\} \quad (4.5)$$

Eşitlik (4.4)'teki L_p probleminde, amaç fonksiyonu $\min \max_{l=1,2,\dots,k} |f_l(x) - f_l^*|$ olarak da kullanılabilir. Elde edilen bu fonksiyon, uzlaş fonksiyonudur ve ideal değerlerden sapmaların bir fonksiyonu olarak tanımlanır [95].

5 ÇALIŞMADA DİKKATE ALINAN ERGONOMİK RİSK FAKTÖRLERİ

Ergonominin temelinde insanın işe, işin de insana uyumu sağlanması yer almaktadır. Bununla birlikte, kişinin bulunduğu ortam koşullarında, sağlıklı bir şekilde çalışabilmesi de ergonominin temel odak noktalarından birisidir. Üretim ortamındaki risk faktörlerinin kontrol altına alınması ve böylece, iş kazası ve meslek hastalıklarının önlenmesi üretim verimliliği ve iş gücünün korunması açılarından oldukça önemlidir.

İşçilerin süreye ve gerçekleştirdikleri görevlere bağlı olarak, risk faktörleri karşısında yaşayacakları maruziyet düzeylerinin doğru bir şekilde matematiksel modellere yansıtılabilmesi için, söz konusu risk faktörlerinin çalışma ortamında doğru bir şekilde ölçülmesi ve bu risk faktörlerinin hangi seviyeden sonra çalışan sağlığına zararlı olabileceğinin objektif bir biçimde belirlenerek değerlendirilmesi gerekmektedir. Aynı zamanda, belirlenen risk faktörlerine ilişkin değerler matematiksel modelde doğrudan yer alacağı için, modelden elde edilecek sonuçların doğru ve güvenilir olmasında da rolü büyüktür. Bu kapsamda tez çalışmasında dikkate alınan her bir ergonomik risk faktörünün ölçümü konusunda detaylı araştırmalar yapılarak önerilen modellere yansıtılması sağlanmıştır. Çalışmada önerilen modellerde yer verilen ergonomik risk faktörleri aşağıda detaylı bir şekilde anlatılmıştır.

5.1 Psikolojik Faktör: İşçilerin Görev Tercihleri

İşçilerin çalışma ortamında mutluluğunu arttıran psikolojik faktörlerden birisi, işçilerin arzu ettikleri görevleri yapmalarına izin verilmesidir. Bu kapsamda, görev tercihi faktörünü modele yansıtabilmek için, işçilere yapmak istedikleri görevleri sıralayarak puan vermeleri istenmiş ve bu puanları en büyükleyen bir amaç fonksiyonu, önerilen Ergo-MHDİA modeline eklenmiştir. Puanlamalar, her bir h işçisinin i görevine “5; en yüksek”, “1; en düşük” olmak koşulu ile 1 ile 5 arasında puan vermesi ile gerçekleştirilmiştir.

5.2 Fizyolojik Faktör: Enerji Tüketimi

Görevleri gerçekleştiren işçilerin birer insan oldukları düşünüldüğünde, maruz kaldıkları fiziksel iş yükü de önem taşımaktadır. Önerilen Ergo-MHDİA modeline, enerji tüketim miktarı fiziksel iş yükünün dikkate alınabilmesi için yansıtılmıştır. Fiziksel iş yükünün ölçümü belirli bir standarda bağlı değildir. Geliştirilen modelde, görev-işçi, görev-çevresel koşullar uyumluluğu, işçi-görev uyumluluğu gibi tüm parametreler dahil edilmeye çalışıldığı için, bu amaca uygun bir fiziksel iş yükü ölçümünün gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir. İşçinin bireysel özelliklerini temel alan bir enerji tüketimini dikkate almak, bu kapsamda uygulanabilecek faydalı bir yaklaşım olacaktır. Bu sebeple, kişiden kişiye değişen enerji gereksinimi ve bunun işçiler arasında düzgün dağılımının sağlanması amaçlanmıştır. Garg et al. [28] tarafından tanımlanan ve basit insan hareketlerini dikkate alan enerji tüketim fonksiyonunu, Battini et al. [30] MHDP'ye uyarlayarak enerji düzgünlüğü fonksiyonunu geliştirmişlerdir. Bu yaklaşım, literatürde MHDP için kullanılmış olup; MHDİAP için henüz kullanılmamıştır.

Çalışmada, toplam ortalama metabolik enerji tüketimi, görevi oluşturan her bir çalışma duruşunun sergilenebilmesi için, görev süresi ile basit hareket enerji tüketim değerlerinin toplamı olarak belirlenir. Bu yaklaşım, bir görevin basit yürüme, kaldırma, geri gelme gibi faaliyetlere bölünebileceği ve her birinin uygun formüllerle hesaplanabilecek metabolik maliyeti olduğu varsayımından türetilmiştir. Garg, et al. [28]'ne göre, net metabolik enerji tüketimi cinsiyet, vücut ağırlığı, birlikte çalışılan yükün ağırlığı, dikey kaldırma/indirme yükseklikleri, kolların yatay düzlemde hareketleri, yürüme hızı ve yük taşıma, çalışma duruşları ve görevin süresinden etkilenmektedir. Aşağıda, çalışmada gerçekleştirilen enerji tüketimi hesaplama yaklaşımına ilişkin küçük bir örnek paylaşılmıştır.

80 kg. olan bir işçi, 10 kg.'lık bir yükü, 0,1 m. yükseklikten alarak; 3 m. ileriye taşımak istemektedir. Taşıma sonrasında ise ilgili yükü, 1 m. yüksekliğe kaldırıp koyacaktır. Buna göre, söz konusu görevi gerçekleştirmek için tüketilen enerji miktarı aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

- Hareket 1: Yürüme (1 m/s) 3 m ($t_1=3s$)
- Hareket 2: 10 kg. yükü 0,1 m. yükseklikten 0,8 m yüksekliğe kaldırma ($t_2=4 s$)
- Hareket 3: Yükü, 3 m. taşıma ve iş istasyonuna geri gelme ($t_3=3 s$)
- Hareket 4: Yükü, kol ile 0,8 m. yükseklikten 1m. yüksekliğe kaldırma ($t_4=2 s$)

Yukarıda aşama aşama hareketleri verilen görevin toplam süresi 12 s'dir. Aşağıda, her bir hareket için tüketilen enerji miktarları hesaplanmıştır.

Hareket 1: Yüke doğru yürüme: $E_1 = 2,5420 \times \frac{3}{60} + 0,3032 \times 0 \times \frac{3}{60} = 0,1271$ kcal/hareket

Hareket 2: Yüğü eğilerek kaldırma: $E_2 = 0,2920 + 0,0153 \times 10 + 0,0043 \times 10 \times 0 = 0,4887$ kcal/hareket

Hareket 3: Yüğü çömelerek taşıma: $E_3 = 2,7120 \times \frac{3}{60} + 1,5480 \times \frac{3}{60} + 0,0379 \times 0 \times \frac{3}{60} + 0,3032 \times 0 \times 3/60 = 0,213$ kcal/hareket

Hareket 3: Yüğü kol ile taşıma: $E_4 = 0,0094 + 0,0064 \times 10 + (-0,0010) \times 0 \times 10 = 0,0734$ kkal/hareket

$$\bar{E}_{görev} = 1,92 \times \frac{12}{60} + (0,1271 + 0,4887 + 0,213 + 0,0734) = 1.2862 \text{ kkal/görev}$$

Önerilen Ergo-MHDİA modelinde, elde edilen görev bazlı enerji tüketim miktarlarının iş istasyonları arasında düzgün dağılımını sağlayacak şekilde modele entegre edilmeleri sağlanmıştır.

5.3 Bireysel Faktör: İş Kazası Olasılığı

Üretim ortamlarında istenmeyen ve yaşanmaması için önlemler alınan en temel konulardan birisi iş kazalarıdır. İş kazaları, firmaların iş sağlığı ve güvenliği kapsamında ne kadar önlem aldığı ile bağlantılı olarak artma veya azalma eğilimi gösterir. İş kazaları, çalışma ortamının koşullarını oluşturan çevresel faktörler ve işçinin bireysel özellikleri nedeniyle yaşanabilmektedir. Tez çalışmasında, işçi atamaya dayalı bir problem yapısı ele alındığı için işçilerin bireysel özelliklerini temel alarak iş kazası yapabilme olasılıklarını atamada göz önünde bulundurmanın faydalı bir yaklaşım olacağı değerlendirilmiştir. Bu sebeple, kişiden kişiye değişen özellikler olan cinsiyet, yaş, deneyim, mevcut işletmede çalışma süresi ve ortalama uyku süresinin dikkate alınmasıyla kurulan bir lojistik regresyon modeli kullanılarak, işçilerin kendilerine uygun görevlere atanmalarının sağlanmasıyla iş kazası olasılığını azaltan bir yaklaşım ele alınmıştır. Burada elde edilen lojistik regresyon denklemi, amaç fonksiyonu olarak tanımlanmış ve çözüm uzayının değerlendirileceği bir

risk faktörü konumunda yer almıştır. Bunun sebebi, hem Ergo-MHDİAP'nin yapısına uygun olması, hem de iş kazası olasılığını sınırlayacak bir değerin olmamasıdır. Regresyon modelinden elde edilen katsayılar ise, iş kazası olasılığını belirlerken dikkate alınan her bir bireysel faktör için ağırlık değerlerini temsil etmiştir.

Lojistik regresyon analizi, bağımlı değişkenin tahmini değeri olasılık olarak hesaplayan bir yöntemdir. Çalışmada, 3 farklı lojistik regresyon yöntemi arasından ikili cevap içeren bağımlı değişkene sahip olması sebebiyle, ikili lojistik regresyon modeli kullanılmıştır. Bu regresyon modeli, iş kazası varsa “1” yoksa “0” olacak şekilde yapılandırılmıştır. Burada regresyon denklemi elde edildikten sonra, Eşitlik (5.1)'de verilen olasılık fonksiyonu kullanılarak işçilerin bireysel özelliklerine dayalı iş kazası yaşanma olasılıkları elde edilmiştir. Olasılığın en küçüklenmesinin hedeflenmesi, denklemden elde edilen sonucun da en küçüklenmesi demek olduğu için, elde edilen regresyon denklemi doğrudan amaç fonksiyonu olarak önerilen Ergo-MHDİAP modeline eklenmiştir.

Lojistik Regresyon Modeli

Bu modelin kurulmasındaki amaç, işçilerin bireysel özellikleri dikkate alınarak, bu özellikler arasından iş kazalarında etkin olan özelliğin ortaya çıkarılmasını sağlamak ve iş kazası olasılığını en küçükleyen bir işçi ataması gerçekleştirmektir. Bu kapsamda, faaliyet gösteren ve traktör üretimi yapan bir firmanın iş kazası verileri kullanılarak; iş kazaları üzerinde etkili olan bireysel risk faktörleri belirlenmiştir. Çalışmada, işçilerin yıllık kaza ve kazasızlık kayıtlarına göre 15 yıl boyunca tutulan 1052 örneklem kullanılmıştır. Firma kayıtlarında yer alan işçilerin bireysel özellikleri Tablo 5.1'de gösterilmektedir.

Tablo 5.1. İşçilerin bireysel özellikleri

	<i>X ± SD</i>
Yaş (yıl)	27.0 ± 6,32
Deneyim (yıl)	7.0 ± 5,64
Mevcut işletmedeki çalışma süresi (yıl)	4.0 ± 2,75
Ortalama uyku süresi (yıl)	6.0 ± 1,31
	<i>n(%)</i>
Cinsiyet	
Kadın	96 (9.36)
Erkek	956 (90,64)

Çalışmada cinsiyet, yaş, deneyim, mevcut firmadaki çalışma süresi, ortalama uyku süresi ve cinsiyet bireysel faktörleri dikkate alınmıştır. Analizde yaş, deneyim, mevcut firmadaki çalışma süresi, ortalama uyku süresi sürekli değişken; cinsiyet ise kategorik değişken olarak modele eklenmiştir. Cinsiyet faktöründe kadın “0”, erkek ise “1” olarak kodlanmış ve analizde ilk düzey, referans düzey olarak kabul edilmiştir. İkili lojistik regresyon modeli (Binary Logistic Model-BLM) kurularak, Tablo 5.3’teki sonuçlar elde edilmiştir. Eşitlik 5.1’de görüldüğü gibi, bir olgunun gerçekleşme olasılığı P_c , gerçekleşmeme olasılığı $(1 - P_c)$ olarak gösterildiğinde, lojistik dağılım fonksiyonu Eşitlik (5.1)’deki gibi tanımlanır [97]:

$$P_c = E(Y = 1|X_c) = \frac{1}{1 + e^{-Z}} \quad (5.1)$$

Buradan, logid katsayılarına ve odds oranlarına Eşitlik (4.2), (4.3), (4.4)’deki gibi ulaşılır.

$$Logid = L_c = \ln\left(\frac{P_c}{1 - P_c}\right) = Z \quad (5.2)$$

$$Z = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_t X_t \quad (5.3)$$

$$P_c = Odds\ oranu\ (OR) = \frac{P_c}{1 - P_c} = e^Z = e^{\beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_t X_t} \quad (5.4)$$

olarak tanımlanır. Z , X_c bağımlı değişkenlerinin elde edilen değerlerine göre regresyon denklemi sonucunda ortaya çıkan değeri ifade etmektedir. Eşitlik (4.4) ile tanımlanan her bir parametrenin $Exp(\beta)$ değeri OR olarak alınır ve Y değişkeninin X_t değişkeninin etkisi ile kaç kat daha fazla veya yüzde kaç oranda fazla görülme olasılığına sahip olduğunu belirtir. Eğer OR 1’e eşit ise, ele alınan bağımsız değişkenin (veya kategorilerinin) bağımlı değişkenden bağımsız olduğu kabul edilir. Aşağıda, lojistik regresyon uygulaması ile elde edilen sonuçlar yer almaktadır.

Katsayıların anlamlılığı: Tahmin edilen katsayıların beklenen işaretleri taşıdıkları [99] ve 0,01 düzeyinde istatistiksel açıdan anlamlı oldukları ($p < 0.01$) görülmektedir. Bu da, yaş, deneyim, mevcut firmadaki çalışma süresi, ortalama uyku süresinin iş kazalarının oluşumunda önemli birer risk faktörü olduğunu ortaya koymaktadır.

Sadece cinsiyet faktörü için $p > 0,01$ olduğu için iş kazalarında etkin olmadığı görülmüştür. Bu durumun, firmada çalışan kadın sayısının az olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Modelin genel anlamlılığı: Geliştirilen model, genel olarak anlamlı bulunmuştur [98]. Modelde yer alan bağımsız değişkenlerden en az birisinin bağımlı değişken üzerinde etkisi görülmektedir. H_0 hipotezini test etmek için ki-kare istatistiğinin (X^2) p değerine bakılması gerekmektedir. Buna göre çalışmada, $X^2 = 391,960$ ve $p = 0,000$ olarak belirlenmiştir.

Modelin uyum iyiliği: Modelin uyum iyiliği, bağımlı değişkeni açıklamak için oluşturulan en iyi modelin etkinliğinin bir ölçüsünü göstermektedir.

1. Hosmer-Lemeshow testi: Bu aşamada, kurulan lojistik modelin kullanılan verilere uygunluğu test edilmektedir. Bu amaçla, H_0 hipotezi “kurulan lojistik model uygundur” ve H_1 alternatif hipotez “kurulan lojistik model uygun değildir” şeklinde formüle edilmiştir. Çalışmada, Hosmer-Lemeshow testine ilişkin $\chi^2=14,228$ ve $p = 0,076$ olarak belirlenmiştir ve kurulan modelin verilere uygun bir model olduğu sonucuna varılmıştır.
2. Sınıflandırma tablosu: Bağımlı değişkenin çapraz sınıflandırılması ile elde edilmiştir. Çalışmada, aşağıda yer alan sınıflandırma tablosuna göre, beş bağımsız değişken ele alınarak, bulunan lojistik fonksiyonunun Tablo 5.2’de görüldüğü gibi % 70,5 oranında doğru sınıflandırma gücüne sahip olduğu saptanmıştır.

Tablo 5.2. Sınıflandırma Tablosu

Tahmin edilen				
		İş kazası var	İş kazası yok	Doğruluk yüzdesi
Gözlemlenen	İş kazası var	198	664	23
	İş kazası yok	177	1811	91,1
				70,5
$p < 0,05$				

Odds oranlarının yorumu: Tablo 5.3’teki lojistik regresyon analizi sonucuna göre [100], yaş, deneyim, mevcut işletmedeki çalışma süresinin ve uyku süresinin iş kazası olasılığını artırıcı etkiye sahip olduğu ve en önemli risk faktörleri olduğu belirlenmiştir. Cinsiyet haricinde yaş, deneyim, mevcut işletmedeki çalışma süresinin ve uyku süresinin iş kazası olasılığı üzerinde etkili olduğu ve elde edilen tüm katsayı ve OR değerlerinin anlamlı olduğu görülmektedir.

Tablo 5.3. Lojistik regresyon analizi sonuçları

Modeldeki değişkenler	Logid β	Standart hata	Wald	SD	p^*	$Exp(\beta)$ = OR
Yaş	-0,309	0,163	3,566	1	0,042	1,032
Cinsiyet (1)	-0,871	0,921	0,895	1	0,344	2,809
Deneyim	-0,361	0,257	1,982	1	0,046	1,436
Mevcut İşletmedeki Deneyim	-1.119	0.493	5.161	1	0.023	0,914
Uyku Süresi	-1,675	0,427	15,378	1	0,000	1,925
Sabit	26,438	5,308	14,824	1	0,000	0,505

Olasılık tahmini: P_c : iş kazası olma olasılığı, $1 - P_c$: iş kazası olmama olasılığı olarak tanımlandığında, Eşitlik (5,4)'teki gibi gösterilmektedir.

Logid katsayıları olarak isimlendirilen β_0, β_1 ve β_t katsayıları da Tablo 5.3'te paylaşılmıştır.

Amaç fonksiyonunda kullanılmak üzere yaş, deneyim, işletmedeki mevcut çalışma süre ve ortalama uyku süresine bağlı olarak elde edilen denklem ise, Eşitlik 5.4'teki gibidir.

$$Z = 26,438 - 0,309X_1 - 0,361X_2 - 1,119X_3 - 1,675X_4 \quad (5.5)$$

Deneyimin iş kazası olasılığı üzerinde baskın bir faktör olarak ortaya çıkması sebebiyle, geliştirilen Ergo-MHDİAP'de deneyimin işçi yeteneğini geliştirdiği varsayımıyla, görevin gerektirdiği deneyim seviyesi ile işçinin deneyim seviyesinin eşleştirilmesine dayalı işçi-görev uyumunun sağlanmasına yönelik bir yaklaşım önerilen modele entegre edilmiştir.

5.4 Deneyim uygunluk eşleştirmesi

Miralles vd. (2007) tarafından geliştirilen ilk modelde, gerekli durumlarda işçi-görev uyumsuzluğu dikkate alınarak atama yapılmasının önemi vurgulanmıştır. Bunun için Miralles et al (2007) tarafından tanımlanan kısıt ise Eşitlik (2.11)'de paylaşılmıştır. Ancak

ilgili çalışmada, bu yaklaşım kullanılarak modelleme yapılmamış ve görev-işçi ataması deneyime bağlı revize edilmiştir.

Montaj hatlarında işçilerin direkt öngörülen görevlere atanması yerine, deneyimlerine uygun görevlere atanmalarının, hattın verimliliği açısından daha faydalı olacağı bir gerçektir. Buna göre, görevin gerektirdiği en düşük deneyim düzeyine sahip işçinin ilgili göreve atamasının yapılması, Ergo-MHDİAP için daha önce denenmemiş bir yaklaşımdır. Tez çalışmasında önerilen Ergo-MHDİA modelinde, görevin gerektirdiği deneyim süresine sahip işçinin atamasının yapılması sağlanmıştır. Tez çalışmasında, işçinin deneyimi ile görevin gerektirdiği deneyim düzeyi eşleştirilmiş ve uygulamada yer alan işçiler deneyim sınıflarına göre gruplandırılmıştır. Böylece, Mura and Dini [45]'un çalışmalarında da olduğu gibi, görev-işçi uyumluluğu da garanti edilmiştir [45]. Gerçekleştirilen, deneyim grubuna göre işçilerin görevlere atanmasına ilişkin bir örnek, aşağıda verilmiştir. Bu kapsamda, Tablo 5.4'te görevlerin gerektirdiği rassal olarak üretilen deneyim düzeyleri, Tablo 5.5'te işçilerin sahip oldukları rassal olarak üretilen deneyim düzeyleri görülmektedir.

Tablo 5.4. Görevlerin gerektirdiği deneyim düzeyleri

Görevler	Gerektirdiği deneyim düzeyleri	Açıklama
i_1	1	Deneyim gereksinimi düşük seviyeli görev
i_2	1	Deneyim gereksinimi düşük seviyeli görev
i_3	2	Deneyim gereksinimi yüksek seviyeli görev
i_4	1	Deneyim gereksinimi orta seviyeli görev
i_5	1	Deneyim gereksinimi orta seviyeli görev
i_6	2	Deneyim gereksinimi yüksek seviyeli görev
i_7	1	Deneyim gereksinimi orta seviyeli görev
i_8	0	Deneyim gereksinimi düşük seviyeli görev
i_9	0	Deneyim gereksinimi düşük seviyeli görev
i_{10}	0	Deneyim gereksinimi düşük seviyeli görev

Tablo 5.5. İşçilerin dahil oldukları deneyim düzeyleri

İşçiler	İşçi deneyim düzeyleri	Açıklama
h_1	1	Görev bazında deneyimi orta seviyeli
h_2	0	Görev bazında deneyimi düşük seviyeli
h_3	2	Görev bazında deneyimi yüksek seviyeli
h_4	2	Görev bazında deneyimi yüksek seviyeli
h_5	0	Görev bazında deneyimi düşük seviyeli
h_6	1	Görev bazında deneyimi orta seviyeli
h_7	2	Görev bazında deneyimi yüksek seviyeli

Tablo 5.6. Deneyim gruplarına göre kötü atama örneği

Görevler	i_1	i_4	i_6	i_8	i_9	i_2	i_{10}	i_3	i_5	i_7
Gerektirdiği deneyim düzeyi	1	1	2	0	0	1	0	2	1	1
Atanan işçi	h_3		h_7			h_6		h_4		
İşçinin deneyim düzeyi	2		2			1		2		

Tablo 5.7. Deneyim gruplarına göre iyi atama örneği

Görevler	i_1	i_2	i_4	i_5	i_7	i_3	i_6	i_8	i_9	i_{10}
Gerektirdiği deneyim düzeyi	1	1	1	1	1	2	2	0	0	0
Atanan işçi	h_1		h_6			h_3		h_5		
İşçinin deneyim düzeyi	1		1			2		0		

Tablo 5.6 ve Tablo 5.7’de, deneyim gruplarına göre sırasıyla kötü ve iyi atama örnekleri görülmektedir. Kötü atamada, deneyim düzeyleri açısından dağınık bir görev ataması gerçekleştirilmiştir. Bununla birlikte, deneyimli işçiler daha farklı görevlerde değerlendirilebilecekken kontrolsüz atama sonucu, kendileri için uygun olmayan istasyonlarda çalışmak durumunda kalmaktadırlar. Tablo 5.7’de verilen, deneyime dayalı atamada ise, görev-işçi atamalarında daha düzgün bir dağılım görülmektedir. Mura and Dini

[45] tarafından önerilen bu yaklaşım hem işçi atama hem de hat dengeleme kapsamında, ilk defa tez çalışması kullanılarak literatüre kazandırılan bir yenilik olmuştur.

5.5 Çevresel Risk Faktörleri

5.5.1 Aydınlatma

Çalışmada çevresel risk faktörleri kapsamında, görevlerin gerektirdiği aydınlatma ve görevler gerçekleştirildiğinde orta çıkan gürültü düzeyi dikkate alınmıştır. Aydınlatma, içinde bulunulan ortamdaki nesneleri görebilmek için, bu nesnelerin çevresine ya da görülmek istenen bölgelere ışık uygulamak olarak tanımlanabilir [101]. İnsanlar, içinde bulundukları ortamı yaklaşık %80 düzeyinde görsel olarak algırlar [102]. Bu bilgi göz önüne alındığında, birim alana düşen ışık miktarı, bu ışığın şiddeti, parlaklık ya da kamaşma gibi birtakım problemlerin var olup olmaması vb., işçinin üretim verimliliğini etkileyeceği için değerlendirilmelidir. Aydınlatmaya yönelik dikkat edilmesi gereken kurallar, TSEN-1264-1 [103] dokümanında yer almaktadır.

Üretim alanlarında genellikle aydınlatma koşullarına, diğer ergonomik faktörlerden (ör: gürültü, titreşim vb.) daha az önem verilmektedir. Ancak araştırmalara göre, yapılan hataların ve iş kazalarının yaklaşık %20'sinin uygun olmayan aydınlatma koşullarından kaynakladığı bilinmektedir ([101], [104]). Aydınlatma seviyesi, sadece çalışanın hata yapmasını önlemek açısından değil, çalışanın göz sağlığının korunması açısından da oldukça önemlidir.

Bir üretim ortamında olması gereken aydınlatma düzeyi ile ilgili bir değerlendirme yapıldığında, ilk olarak yapılan görevin özelliklerine uygun aydınlatma şiddetinin sağlanması üzerinde durulmalıdır. Yapılan görevin detay ve dikkat gerektirme seviyesi arttıkça, gerekli aydınlatma seviyesi de artmaktadır. Bir işçi, yetersiz ve kalitesiz aydınlatma koşullarında görevleri yerine getirirken yorulabilir ve bu durum performansın düşmesine neden olabilir. Yeterli ve kaliteli aydınlatma, verimliliği artırarak, hata ve kaza sayısını azaltır. Bu çalışmada, yüksek ve normal aydınlatma olmak üzere iki aydınlatma seviyesi ele alınmaktadır. Yüksek hassasiyetli görevler, yüksek düzeyde aydınlatma gerektirirken, diğerleri normal düzeyde aydınlatma gerektiren görevler olarak tanımlanmıştır. Bir iş istasyonu, hem yüksek seviye aydınlatma (YA) gerektiren görevleri hem de, normal seviye

aydınlatma (NA) gerektiren görevleri içeriyorsa, bu iş istasyonu yüksek seviyede aydınlatılmalıdır. Bu çalışmada, yüksek aydınlatma gerektiren görevlerin belirli sayıda iş istasyonuna paylaştırılması şartı ile denemeler yapılarak, duyarlılık analizleri gerçekleştirilmiştir.

5.5.2 Gürültü

Bir titreşim hareketinin havada neden olduğu basınç değişimi, duyma organı tarafından ses olarak algılanır. Ses, elastik bir ortam olan havada, mekanik titreşimlerden oluşan ve havanın statik basıncına ilave olarak gelişen basınç değişiklikleri olarak da ifade edilebilir [105]. Gürültü ise, rahatsız edici sesler topluluğudur.

Gürültü ölçü birimi, onda bir anlamına gelen Latince'deki "decem" ile Graham Bell'in isminin birleştirilmesi ile ortaya çıkan desibel (dB)'dir [105]. Çeşitli standartlara göre 8 saatlik maruziyetlerde sınırlama 85 dB ya da 90 dB olarak belirlenmektedir [105]. İş Güvenliği ve Sağlığı Kurumu- (Occupational Safety and Health Administration-OSHA) tarafından yayınlanan standartta, 8 saatlik çalışma süresinde 90 dB değerini üst limit olarak değerlendirirken, ACGIH, 8 saatlik çalışma süresinde 85 dB değerini üst limit olarak belirlemiştir. Dikkate alınan sınır değerler aşıldığı zaman, işçinin acilen gürültüsüz bir ortama alınması ve çalışmasına o ortamda devam etmesi gerekir. Buna göre, işçilerin maruz kaldıkları gürültü seviyelerini, uygun görev atamaları yaparak kontrol altına almaya çalışmak mantıklı bir uygulamadır. İşçilerin yüksek gürültü düzeyinin ortaya çıktığı görevlerde çalışmaları hem zihinsel hem fiziksel yorgunluk düzeyini artırır. Bu durum, basit bir matematiksel model ile değerlendirilebilir. Böylece, hem işçilerin gürültü açısından sorun yaşamalarının önüne geçilir hem de, önerilen model özelinde firma amaçları açısından bir takım ek katkılar sağlanabilir. Bu çalışmada, görevlerin bir arada gerçekleştirilirken oluşturdukları gürültü seviyesinin, 85 dB'i aşmayacak şekilde ataması yapılarak, işçinin maruz kaldığı gürültü seviyesi azaltılmıştır.

Literatürde, çalışma ortamında işçilerin maruz kaldıkları ortak gürültü seviyesini belirlemek için, farklı formüller bulunmaktadır. Ancak tüm bu formüllerdeki ortak nokta, gürültü seviyeleri üzerinde logaritmik toplama işleminin yapıyor olmasıdır.

Gürültüye maruz kalınan süreyi dikkate alan söz konusu formüllerden birisi, Eş. (5.6)'da verilmiştir [105]:

$$L_m = 10 \log \left[1/T \sum 10^{L_i/10} * t_i \right] \quad (5.6)$$

Burada L_m , gürültü değerlendirme düzeyine işaret edilmektedir. Aslında burada amaç, bir çalışanın 4 saat boyunca 75 dB, 2 saat boyunca 40 dB gürültülü bir ortamda çalıştığında, bu 6 saatlik toplam sürede kaç dB gürültüye maruz kaldığının belirlenmesidir. t_i ifadesi ile i . gürültü düzeyine maruz kalma süresine, T ile toplam maruziyet süresine, L_i ile de ilgili sürede ortamda var olan gürültü seviyesine (dB cinsinden) işaret edilmektedir.

Benzer şekilde, aynı anda birden fazla kaynaktan gelen ortak gürültü düzeyi Eş. (5.7) ile hesaplanabilir [105]:

$$L = 10 \log \sum_{i=1}^h \left(\frac{p_i}{p_0} \right)^2 \quad (5.7)$$

Burada, L değişkeni birden fazla kaynaktan gelen gürültünün ortak değeridir. $\left(\frac{p_i}{p_0} \right)^2$ ifadesi, ilgili kaynağın ses basınç düzeyi özetle, dB cinsinden gürültü düzeyini ifade etmektedir.

Birden fazla görev bir arada yapıldığında, birden fazla gürültü kaynağı söz konusu olacağı için, Şekil 5.1’de gösterilen logaritmik hesaplamalara ihtiyaç duyulmaktadır [105]. Burada, dB değeri, logaritmik bir büyüklük olduğu için birden fazla kaynağa ait gürültü seviyeleri aritmetik olarak toplanamaz.

Toplanan iki değer arasındaki fark	Büyük değere eklenen sayı
0-1 dB	3 dB
2-3 dB	2 dB
4-9 dB	1 dB
10 dB or more	0 dB
Örnek:	
88 dB + 90 dB = 92 dB	60 dB + 40 dB = 100 dB
71 dB + 81 dB = 82 dB	60 dB + 40 dB = 60 dB
70 dB + 80 dB = 80 dB	

Şekil 5.1. Çoklu Kaynak Kullanımında Gürültü Seviyeleri

Gürültü faktörü kapsamında, görevlerin kaynak kullanımına dayanan bir yaklaşım ele alınmıştır. Eşitlik (5.7)’den yola çıkarak elde edilen ve Şekil 5.1’de gösterilen hesaplama yöntemi kullanılmıştır. Bu yaklaşımda, her bir görevin ortamda oluşturduğu gürültü seviyesi dikkate alınmıştır. İş istasyonlarında oluşabilecek tüm alternatifler C kodu ile yazılan bir

algoritma ile denenmiş ve birlikte atanmaması gereken görevler kümesi oluşturularak modele entegre edilmiştir. Bir arada atanmaması gereken görevler, 85 dB'yi aşmayacak şekilde tasarlanmıştır.

5.6 Uygun olmayan çalışma duruşları (UOÇD)

UOÇD'ler, MKİSR'nin en önemli sebeplerindendir. Özellikle, uzun süre ve tekrarlı bir şekilde UOÇD'ler sergileniyorsa, MKİSR'ye yakalanma riski artar. UOÇD'ler, bedeni zorlayan, itme-çekme, kaldırma-indirme görevlerinde ve statik duruşta çalışma sırasında ortaya çıkarlar. Bununla birlikte, MKİSR ile işle ilgili ergonomik ve psikososyal risk faktörleri arasındaki ilişki bilimsel olarak kanıtlanmıştır. 2001 yılında, ABD Ulusal Bilim Akademisi, çalışanın bel bölgesinde ve üst ekstremitesinde meydana gelen MKİSR'nin; tekrarlı ve zorlanmaya sebep olan görevler, aşırı yük kaldırma ve çalışma ortamının stresli oluşu vb. koşullara bağlı olarak oluşabileceği yönünde bilimsel kanıtların olduğunu belirtmiştir. Bununla birlikte, bu risk faktörlerinin iyi tasarlanan ergonomik çalışma ortamları ile en aza indirilebileceğini bildirmiştir [16].

UOÇD'ler, genellikle gözlemsel metotlarla değerlendirilmektedir. Gözlemsel metotlar, düşük maliyetle, kısa sürede uygulanabilmektedir. Bu yöntemler arasında, tüm vücut bölümlerinin duruşlarının değerlendirilebildiği, REBA yöntemi en sık kullanılan yöntemler arasındadır. Önerilen modelde, çalışma duruşlarına ait risk seviyelerinin modele yansıtılmasında REBA yönteminden faydalanılmıştır.

REBA yöntemi, Hignett ve McAtamney [17] tarafından geliştirilmiştir. Elle yapılan kaldırma, taşıma işlerinde sergilenen çalışma duruşlarına ait risk düzeylerini değerlendirmek amacıyla kullanılan bir yöntemdir [18]. REBA yönteminde, vücut bölümlerinin duruşları iki sınıfa ayrılarak değerlendirilmektedir. Grup A olarak adlandırılan sınıfta, gövde, boyun ve bacak duruş/hareketleri, Grup B'de ise, üst kollar, alt kollar ve bilek duruş/hareketleri değerlendirilmektedir. Vücut bölümlerinin duruşlarına atanan skorlar, matrisler kullanılarak çakıştırılır ve Grup A ve B için skorlar elde edilir. REBA'da, işçinin herhangi bir vücut bölümünün duruşu, yöntemde yer alan duruş şekilleriyle eşleştirilerek skorlanır. REBA yöntemi beş adımda uygulanmaktadır [19]. Son adımda, elde edilen skor ile Tablo 5.8'de yer alan Eylem Seviyeleri Tablosu kullanılarak; REBA skorunun hangi eylem düzeyine denk geldiği belirlenir [17].

Tablo 5.8. REBA Yöntemindeki Eylem Düzeyleri

REBA Puanı	Risk Düzeyi	Eylem Düzeyi	Eylem (İleri Değerlendirmeyi İçeren)
1	İhmal Edilebilir	0	Gerek yok
2-3	Düşük	1	Gerekli olabilir
4-7	Orta	2	Gerekli
8-10	Yüksek	3	Yakın zamanda gerekli
11-15	Çok Yüksek	4	Şimdi gerekli

6 ERGO-MHDİA PROBLEMİNİN TANIMLANMASI

MHDİAP’de heterojen işçi özelliklerinin dikkate alınması, işletmeler açısından bakıldığında maliyetli veya zaman alıcı gibi görünse de, ileriye dönük üretim performansını artırıcı etkisinin olduğu bir gerçektir. Mevcut durumda NP-Zor yapıda olan MHDP’ye, atama kısıtlarının ve ergonomik risk faktörlerinin eklenmesi, problem yapısını daha da zorlaştırmakta ve var olan çözümlerin yetersiz kalmasına sebep olmaktadır. Ergo-MHDİAP için mevcut literatür ise çok kısıtlı olmakla birlikte; var olan literatür problem yapısını ergonomik açıdan geliştirmeyi, çözüm alabilme üzerine kurgulamıştır. Literatürde Ergo-MHDİAP kapsamında, özellikle çalışma duruşlarının risk düzeylerinin belirlenmesi üzerinde durulmuştur. Ancak, işgücü veriminin artırılması için dikkate alınması gereken pek çok ergonomik risk faktörü bulunmaktadır. Bu tez kapsamında amaçlanan, MHDİAP için ergonomik uzantıları geliştirmek ve geliştirilen detaylı modelin başka üretim süreçlerine uyarlanabilirliğini diğer araştırmacılara göstermektir.

Çalışmada önerilen Ergo-MHDİAP’de, psikolojik, bireysel, fiziksel, çevresel risk faktörleri ergonomik risk faktörleri kapsamında dikkate alınmıştır. Buna göre, bütün ergonomik risk faktörlerinin bir arada bulunduğu bütünleşik model dışında beş farklı model geliştirilmiştir. Çalışmada geliştirilen tüm modellerde göz önünde bulundurulacak varsayımlar aşağıda yer almaktadır:

- Risk faktörleri birbirleriyle etkileşim içinde değildir.
- Görevler için gereken aydınlatma düzeyi bilinmektedir.
- Görevler bir arada gerçekleştirildiğinde ortaya çıkan gürültü düzeyi bilinmektedir.
- Görevler gerçekleştirildiğinde sergilenen UOÇD’lerin risk düzeyleri bilinmektedir.
- İşçilerin görev tercih puanlandırmaları bilinmektedir.
- İşçilerin deneyim, ortalama uyku süresi, cinsiyet, mevcut işletmede çalıştığı süre bilinmektedir.
- Görevlerin gerektirdiği deneyim düzeyi ile işçilerin sahip oldukları deneyim düzeyleri bilinmekte ve bu nedenle, işçi-görev uygunluğu belirlenebilmektedir.
- Çalışanların deneyim sürelerine göre ortaya çıkan deneyim düzeylerinin heterojen olduğu varsayılmıştır.

Çalışma kapsamında tanımlanan varsayımların çoğu, gerçek bir üretim ortamını yansıtmaktadır. Çalışmada, bir üretim alanındaki tüm çalışanların, tüm iş istasyonlarında görev yapacak yetenek seviyesine sahip olmamasının kabul edilmesi önerilen modeli, gerçek hayat uygulamalarına bir adım daha yaklaştırmaktadır. Bununla birlikte, ortaya çıkan gürültü düzeylerinin, gerekli aydınlatma şiddetlerinin, ortaya çıkan çalışma duruşu risk düzeylerinin görev bazında birbirinden farklı olması, önerilen modeli gerçek hayat üretim süreçlerine uyarlanabilir hale getirmiştir. Ayrıca, ele alınan deneyim faktörünün görev uygunluğu için göz önünde bulundurulması, literatürdeki MHDİAP çalışmalarında kullanılan yetenek kavramı ile karıştırılmamalıdır. MHDİAP’de her işçinin farklı görevleri farklı sürelerde gerçekleştirmesi yetenek tanımı olarak kabul edilirken; önerilen Ergo-MHDİA modelinde, görevin gerektirdiği özelliklere ilgili işçinin uygun olup olmadığını tanımlanması amacıyla kullanılmıştır.

6.1 Önerilen Matematiksel Modeller

Çalışmanın bu kısmında önerilen matematiksel modellere ilişkin detaylı bilgi verilmesi amaçlanmıştır. Önerilen modellerin hedef kitlesi küçük ölçekli işletmelerdir. Bunun sebebi, ergonomik problemlerin yoğun olarak yaşandığı işletmelerin küçük ölçekli işletmeler olması ve orta ölçekli işletmelerde bile MHDİAP için polinom zamanda çözüm alınamamasıdır.

Bu tez kapsamında MHDİAP için literatüre katkı sağlayacak altı yeni MIP modeli önerilmiştir. Söz konusu modeller, Tablo 6.1’de özetlenmiştir.

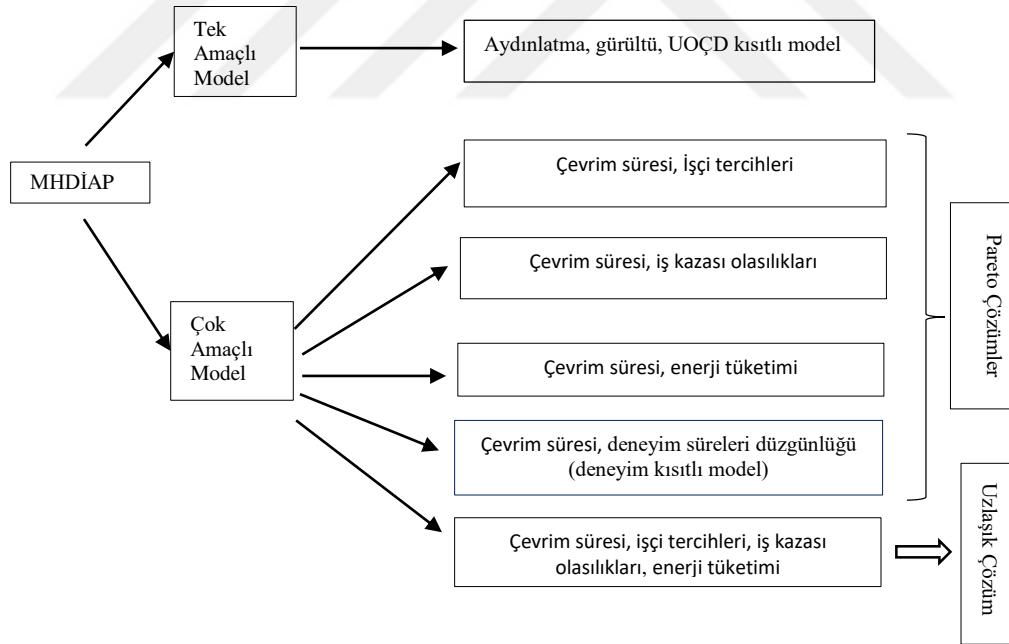
Tablo 6.1. Geliştirilen matematiksel modellerin özet tanıtımı

Model Numarası	Model Kısaltması	Açıklama
1	MHDİAP_ÇF_ÇD	MHDİAP için çevresel faktörler ve uygun olmayan çalışma duruşlarının dikkate alındığı model
2	Ergo-MHDİAP_GT	MHDİAP_ÇF_ÇD’yi <i>C</i> ve görev tercihleri ile beraber değerlendiren model

Tablo 6.1. devam ediyor

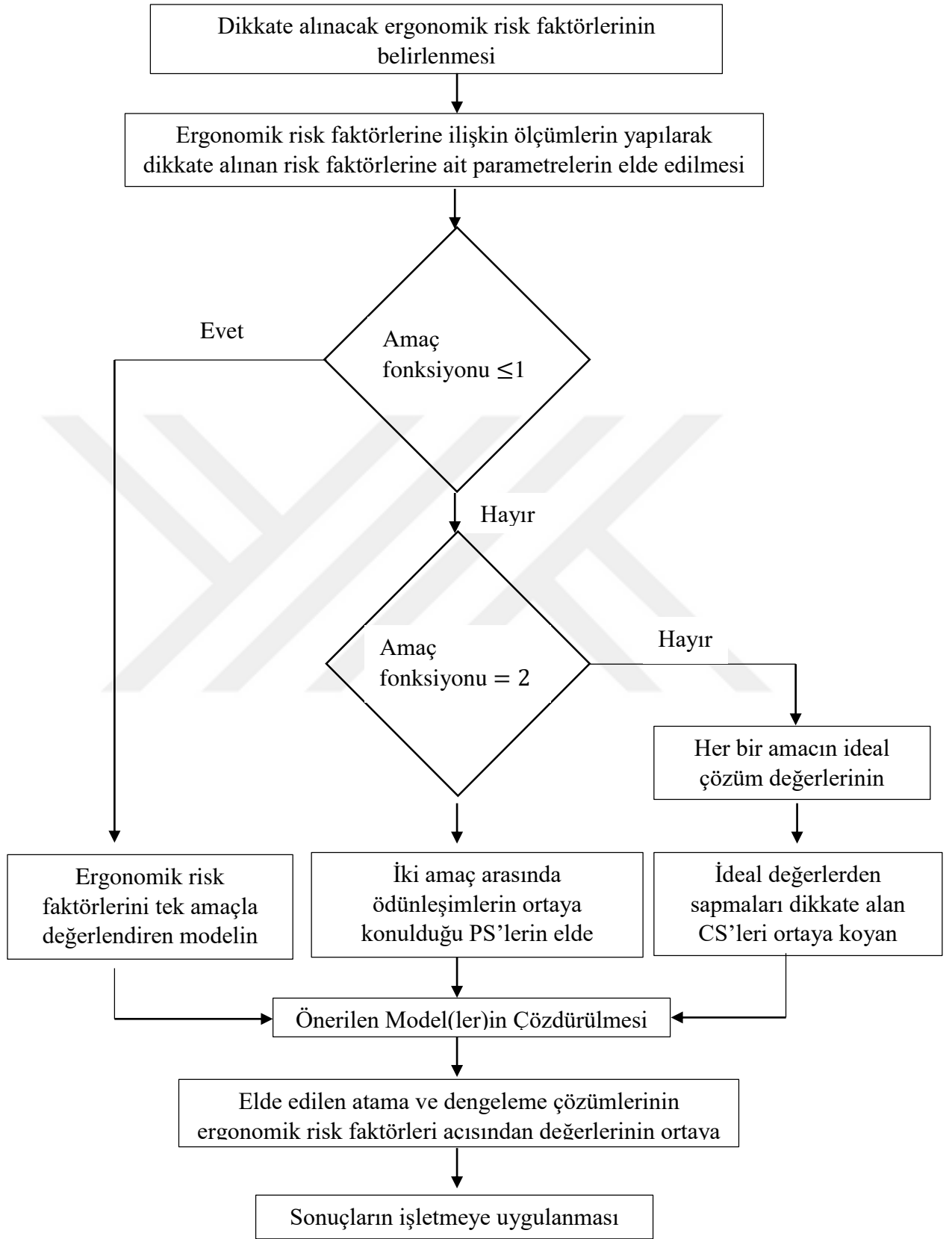
3	Ergo-MHDİAP_İKO	MHDİAP_ÇF_ÇD'yi C ve iş kazası olasılıkları ile beraber değerlendiren model
4	Ergo-MHDİAP_ET	MHDİAP_ÇF_ÇD'yi C ve enerji tüketimi fonksiyonu ile beraber değerlendiren model
5	Ergo-MHDİAP_D	MHDİAP_ÇF_ÇD'yi C ve görevin gerektirdiği deneyim fonksiyonu ile beraber değerlendiren model
6	Ergo-MHDİAP	MHDİAP_ÇF_ÇD'yi tüm amaç fonksiyonları ile beraber değerlendiren model

Şekil 6.1'de ise, önerilen modelin adım adım ilerleyişini gösteren hiyerarşik yapı paylaşılmıştır. Şekil 6.1'den de görüldüğü gibi, önce çevresel faktörler ile UOÇD faktörü tek amaçlı modelde yer almış, sonra da iki amaçlı modeller geliştirilmiş ve son olarak, tüm amaçların dahil edildiği çok amaçlı model geliştirilmiştir.



Şekil 6.1. Çalışmada önerilen modelin hiyerarşik gösterimi

Şekil 6.1'de tasarlanan model yapısında, Şekil 6.2'deki karar mekanizması kullanılarak değerlendirme süreci gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.2. Önerilen modeller için değerlendirme sürecine ilişkin akış şeması

Aşağıda, önerilen tüm matematiksel modellerin sonuçları, 18 görev ve 7 işçinin olduğu, Miralles et al. (2007) tarafından geliştirilen gerçek bir uygulamadan faydalanılarak paylaşılmıştır. Önerilen modellerin farklı boyutlardaki test problemleri kapsamındaki performanslarının incelenmesine ise, Bölüm 7’de yer verilmiştir.

6.1.1 Model 1: MHDİAP_ÇF_ÇD

Bu modelde, MHDİAP’de çevresel faktörlerden aydınlatma, gürültü ve fiziksel faktörlerden UOÇD’ye ait sınır değerler dikkate alınarak modelin kısıtları oluşturulmuştur. Amaç fonksiyonunda ise C ’nin en küçüklenmesi yer almıştır. Model, karma tam sayılı bir matematiksel modeldir. Geliştirilen tek amaçlı modele, öncelikle aydınlatma, gürültü ve UOÇD faktörleri teker teker eklenmiş ve sonuçlardaki değişim değerlendirilmiştir. Son olarak, bahsedilen faktörlerin bir arada yer aldığı MHDİAP_ÇF_ÇD modeli kurularak sonuçlar verilmiştir. MHDİAP_ÇF_ÇD modeline ait indisler, dizin kümeleri, parametreler ve karar değişkenleri aşağıda yer almaktadır.

İndisler:

i, j : Görev indisleri

h : İşçi indisi

s : İş istasyonu indisi

Dizin Kümeleri:

N : Görev Kümesi

H : Uygun işçi kümesi

S : İş istasyonu kümesi

A : Öncelikli görev-işçi kümesi (i, h)

Z : Öncelikli işçi-iş istasyonu kümesi (h, s)

D_j : j görevi için öncelik matrisindeki öncelikli görevler kümesi

YA : Yüksek aydınlatma gerektiren görevler kümesi

I_G : Aynı iş istasyonuna atanamayacak görevler kümesi

Parametreler:

p_{hi} : h işçisinin i görevini gerçekleştirmesi durumunda i görevinin tamamlama süresi

d_j : j görevi için öncelikli işler

$\|YA\|$: Yüksek aydınlatma gerektiren görevlerin sayısı

$REBA_{hi}$: h işçisinin i işini gerçekleştirirken ortaya çıkan REBA skoru

t_i : Toplam çalışma süresi boyunca i görevini tamamlama süresi

Karar değişkenleri:

C : Çevrim süresi

x_{shi} : $\begin{cases} 1, i \text{ görevinin } h \text{ işçisi tarafından } s \text{ istasyonunda yapılması durumunda} \\ 0, \text{ diğer durumlarda} \end{cases}$

y_{sh} : $\begin{cases} 1, h \text{ işçisinin } s \text{ istasyonuna atanması durumunda} \\ 0, \text{ diğer durumlarda} \end{cases}$

as_s :

$\begin{cases} 1, s \text{ istasyonuna yüksek aydınlatma gereken görevlerin atanması durumunda} \\ 0, \text{ diğer durumlarda} \end{cases}$

$$\text{Enk } C \quad (6.1)$$

k. a.

$$\sum_{h \in H} \sum_{s \in S} x_{shi} = 1 \quad \forall i \in N \quad (6.2)$$

$$\sum_{s \in S} y_{sh} \leq 1, \quad \forall h \in H \quad (6.3)$$

$$\sum_{h \in H} y_{sh} \leq 1, \quad \forall s \in S \quad (6.4)$$

$$\sum_{h \in H} \sum_{s \in S} s \cdot x_{shi} \leq \sum_{s \in S} s \cdot x_{shj}, \quad \forall i, j / i \in D_j \quad (6.5)$$

$$\sum_{i \in N} p_{hi} \cdot x_{shi} \leq C, \quad \forall h \in H, \quad \forall s \in S \quad (6.6)$$

$$\sum_{i \in N} x_{shi} \leq M \cdot y_{sh}, \quad \forall h \in H, \quad \forall s \in S \quad (6.7)$$

$$\sum_{h \in H} \sum_{i \in YA} x_{sh_i} - \|YA\| a_{s_s} \leq 0 \quad \forall s \in S \quad (6.8)$$

$$\sum_{s \in S} a_{s_s} = a_s^{\bar{U}} \quad (6.9)$$

$$\sum_{i \in I_G} \sum_{h \in H} x_{sh_i} \leq \|I_G\| - 1 \quad \forall s \in S \quad (6.10)$$

$$\sum_{s \in S} \sum_{i \in N} t_i REBA_{hi} x_{sh_i} \leq 6.5 * 7 \quad \forall h \in H \quad (6.11)$$

$$y_{sh} \in [0, 1], \quad \forall h \in H, \forall s \in S \quad (6.12)$$

$$x_{shi} \in [0, 1], \quad \forall h \in H, \forall s \in S, \forall i \in N \quad (6.13)$$

$$a_{s_s} \in [0, 1], \quad \forall s \in S \quad (6.14)$$

Burada,

Eşitlik (6.1), geliştirilen modelin amaç fonksiyonunu ifade etmektedir. Bu fonksiyon ile C 'yi en küçüklemek amaçlanmaktadır.

Eşitlik (6.2)'de verilen kısıt ile her i görevi, tek bir iş istasyonuna (s) ve tek bir işçiye (h) atanmaktadır.

Eşitlik (6.3)'te verilen kısıt, her bir h işçisinin en fazla bir iş istasyonuna atanmasını sağlamaktadır.

Eşitlik (6.4)'te verilen kısıt, her bir s iş istasyonuna bir işçi atanmasını sağlamaktadır.

Eşitlik (6.5)'te verilen kısıt, i . görevin j . görevin öncülü olduğunu göstermektedir.

Eşitlik (6.6)'da verilen kısıt ve Eşitlik (6.7)'de verilen kısıt ile s istasyonuna atanmış bir h işçisine C aşılmadığı takdirde, birden fazla görev atanabileceği ifade edilmektedir. C ve y_{sh} karar değişkeni oldukları için, Eşitlik (6.6)'da ve Eşitlik (6.7)'de verilen kısıtlar, modelin doğrusallığını sağlayabilmek amacıyla ayrı ayrı tanımlanmıştır.

Eşitlik (6.8) ile görevlere bağlı bir şekilde gerekli aydınlatma düzeyinin kontrolü sağlanarak, stroboskopik etkinin azaltılması hedeflenmiştir. Burada, görevin gerektirdiği aydınlatma düzeyine göre iş istasyonlarına ve işçilere atama yapılması sağlanmaktadır. Kara vd. (2014)'nin ele aldığı maliyet tabanlı yaklaşım, tez çalışmasında önerilen Ergo-

MHDİAP'ye uyarlanmıştır. Ancak o modelden farklı olarak, as_s karar değişkenlerinin kontrolü gerektiği için modele Eşitlik (6.9) eklenmiştir. Eşitlik (6.9)'da verilen kısıtta, iş istasyonları arasından kaç tane istasyona yüksek aydınlatma gerektiren görev ataması yapılmak istenirse, $as^{\bar{u}}$ olarak tanımlanan değer ile iş istasyonlarına atama yapılmaktadır. $as^{\bar{u}}$, kaç istasyona yüksek aydınlatma gerektiren görev ataması yapılabileceğini gösteren bir üst sınır değeridir. $as^{\bar{u}}$ değerinin çok dikkatli bir biçimde araştırmalar yapılarak belirlenmesi gerekmektedir. Literatürde bu değer belirlenmesi konusunda yapılmış herhangi bir çalışma bulunmamaktadır.

Bölüm 4'te belirtilen gürültüye dair açıklamalarda da yer aldığı gibi, görevler gerçekleştirilirken birden fazla gürültü kaynağına maruz kalınabileceği ve hatta bazı görevler bir arada yapıldığında ortamda yüksek gürültü seviyesi oluşturabileceği için modele, ilgili gürültü düzeyini yüksek değerlere çıkarabilecek görevlerin atanmasını engelleyen, Kısıt (6.10) eklenmiştir. Böylece, aynı iş istasyonuna birden fazla görev atandığında ortaya çıkacak olan gürültü maruziyetinin 85 dB'i aşmayacak şekilde olması sağlanmıştır. Birden fazla gürültü kaynağı olduğu zaman ortaya çıkan gürültü düzeyinin belirlenmesi amacıyla Eşitlik (5.6) ve (5.7) kullanılmıştır.

Bununla birlikte, her bir h işçisi farklı fizyolojik özelliklere sahip olduğundan, i işini gerçekleştirirken farklı çalışma duruşları sergileyebileceği için farklı REBA skorları ortaya çıkabilmektedir. Eşitlik (6.11) ile verilen kısıtta, farklı REBA skorları, modele ergonomik risk faktörü olarak eklenmiştir. Burada, sağ taraf sabiti olarak 6,5 değeri toplam çalışma süresini saat üzerinden; 7 ise aşılmaması gereken REBA skorunu ifade etmektedir.

Eşitlik (6.12), Eşitlik (6.13) ve Eşitlik (6.14) ise, karar değişkenlerinin negatif olmama koşulunu içeren işaret kısıtlardır.

6.1.1.1 MHDİAP_ÇF_ÇD Modelinin Uygulaması

Tez çalışmasının bu bölümünde, önerilen modelin uygulanabilirliğini ve esnekliğini göstermek için aydınlatma, gürültü ve UOÇD kapsamında rassal olarak üretilen veriler yardımı ile Miralles vd.'nin 2007 yılında ortaya koyduğu uygulama verileri ile denemeler gerçekleştirilmiştir. Bu denemelerin amacı, temel MHDİA modelinin, ergonomik risk faktörleri eklendiğinde, amaç fonksiyonu ve işçilerin ergonomik risk faktörlerine olan

maruziyetleri açılarından nasıl bir tepki verdiğinin gösterilmesidir. Çalışmada elde edilen ergonomik sonuçlar, iş istasyonlarına atanan görevler üzerinden teker teker hesaplanarak ilgili tablolara aktarılmıştır.

Çözümlerin ilk aşamasında, teker teker ergonomik faktörler modele eklenerek sonuçlar incelenmiştir. Çözümlerin son aşamasında ise, modellerin çözüm süresine ilişkin bilgiler aktarılmıştır. Literatürde, birinci modelde üzerinde durulan ergonomik faktörler temelinde, denenmiş modeller ve veri setleri olmadığı için, denemeler Ms-Excel programı kullanılarak üretilen rassal veriler aracılığı ile gerçekleştirilmiştir. Burada paylaşılan çözümler, model sonuçlarının karşılaştırmalarının daha kolay yapılabilmesi için 7 çalışan, 7 iş istasyonuna sahip, görece orta büyüklükteki bir problemin çözümleridir.

Tez kapsamında öncelikle, Miralles vd. (2007) tarafından geliştirilen model için faydalanılan gerçek uygulama verileri kullanılarak modelin çözümü elde edilmiştir. Problemin çözümü için sunulan matematiksel model, Visual Studio C programı ile kodlanmış ve çözücü olarak CPLEX 12 kullanılmıştır. Çözüm sürecinde, Intel(R) Core (TM) i7-10700CPU 2.90 GHz işlemci, 16GB RAM'e sahip bir bilgisayardan faydalanılmıştır.

Miralles vd. (2007) tarafından kullanılan veriler kapsamında, Tablo 6.2'de verilen işçilerin görevleri tamamlama süreleri ve Şekil 6.2'de verilen öncelik diyagramı dikkate alınarak, kodlama doğrulaması gerçekleştirilmiştir.

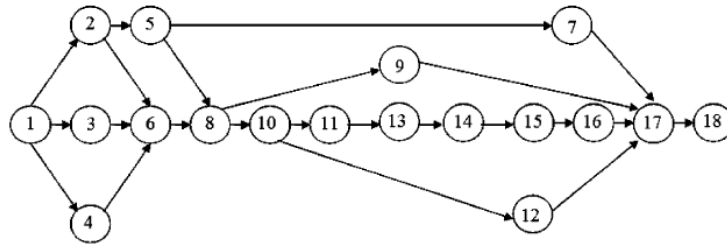
Tablo 6.2. Her işçi için görev tamamlama süreleri (dk^{-3})

Görevler	İşçiler						
	h_1	h_2	h_3	h_4	h_5	h_6	h_7
i_1	31	31	31	26	26	31	31
i_2	84	84	80	53	51	71	80
i_3	115	115	146	73	66	113	110
i_4	115	115	141	94	73	110	110
i_5	80	80	84	74	65	75	80
i_6	119	114	141	98	86	139	119
i_7	84	84	80	61	73	75	80
i_8	93	81	124	90	87	94	93
i_9	26	27	53	44	30	35	35
i_{10}	31	44	Inf	42	38	56	44
i_{11}	39	42	Inf	42	39	55	44
i_{12}	15	14	Inf	15	15	16	15
i_{13}	70	90	Inf	80	59	88	80
i_{14}	81	101	Inf	92	71	81	66
i_{15}	97	97	Inf	98	60	97	63

Tablo 6.2. devam ediyor.

i_{16}	106	106	168	82	84	98	85
i_{17}	Inf	Inf	181	Inf	Inf	124	Inf
i_{18}	Inf	Inf	26	Inf	Inf	26	Inf

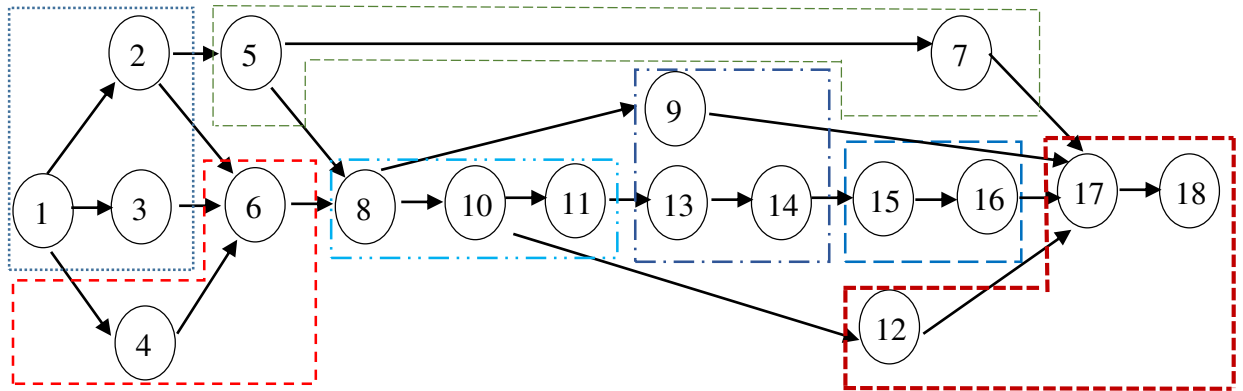
Tablo 6.2’de, görevi gerçekleştiremeyecek işçiler için “Inf” olarak görev süreleri tanımlanmıştır.



Şekil 6.2. Görevlerin öncelik ilişkileri

Modelde yer alan öncelik ilişkileri kısıtı kapsamında, ataması yapılacak görevin, bir önceki görevin atanmış olması koşuluna göre ataması gerçekleştirilmektedir.

Bu veriler ışığında model kodlanarak çözülmüş ve Miralles vd. (2007)’nin çalışmasındaki sonuçlar elde edilmiştir. Çözüm için üst süre sınırı 3600 sn. olarak alınmıştır. Matematiksel modellerde kullanılan M değeri ise, 100000 olarak belirlenmiştir. Bununla birlikte, “Inf” değeri de, 10000 olarak kullanılmıştır. Modelin çözümü ise, Şekil 6.3’te verilmiştir. Çözüm süresi 1,69 sn. olarak ortaya çıkmıştır.



$$1.(h_4): p_{4_1} + p_{4_2} + p_{4_3} = 152$$

$$2.(h_5): p_{5_4} + p_{5_6} = 159$$

$$3.(h_3): p_{3_5} + p_{3_7} = 164$$

$$4.(h_2): p_{2_8} + p_{2_{10}} + p_{2_{11}} = 167$$

$$5.(h_1): p_{1_9} + p_{1_{13}} + p_{1_{14}} = 177$$

$$6.(h_7): p_{7_{15}} + p_{7_{16}} = 148$$

$$7.(h_6): p_{6_{12}} + p_{6_{17}} + p_{6_{18}} = 166$$

Şekil 6.3. Miralles vd. (2007) tarafından önerilen MHDİAP’nin çözümü

MHDİAP_ÇF_ÇD kapsamında, Miralles vd. (2007) tarafından önerilen modele 4 ayrı kısıt ilavesi yapılmıştır. Öncelikle birinci modelde dikkate alınan ergonomik risk faktörlerine ilişkin kısıtlar teker teker Miralles vd. (2007) tarafından geliştirilen modele eklenerek, sonuçlar üzerindeki etkileri gösterilmiştir. Aşağıda söz konusu sonuçlar paylaşılmış ve MHDİAP_ÇF_ÇD modeline ilişkin sonuçlar verilmiştir.

6.1.1.1.1 Aydınlatma faktörünün kısıt olarak eklendiği tek amaçlı modelin çözümü

Miralles vd. (2007) tarafından geliştirilen temel MHDİAP'ye, sadece aydınlatma parametresi olan Eşitlik (6.8) ile (6.9) dâhil edilince elde edilen optimal amaç fonksiyonu değerleri Tablo 6.3'te gösterilmiştir. Burada, $as^{\bar{u}}$ sırasıyla “2” ve “3” olarak seçilmiş ve sonuçlar bu kapsamda elde edilmiştir. Şekil 6.4 ve Şekil 6.5'te çözümler ve çözüme dayalı elde edilen sonuçlar gösterilmektedir.

Tablo 6.3. MHDİAP modeline aydınlatma faktörü kısıt olarak eklendiğinde elde edilen sonuçlar

	$as^{\bar{u}} = 2$	$as^{\bar{u}} = 3$
$C (dk^{-3})$	189	181
Çözüm süresi	1,11	1,69

$$1.(h_3): p_{3_1} + p_{3_3} = 177$$

$$5.(h_1): p_{1_9} + p_{1_{13}} + p_{1_{14}} = 177$$

$$2.(h_5): p_{5_2} + p_{5_4} + p_{5_5} = 189$$

$$6.(h_7): p_{7_{15}} + p_{7_{16}} = 148$$

$$3.(h_4): p_{4_6} + p_{4_7} = 159$$

$$7.(h_6): p_{6_{17}} + p_{6_{18}} = 150$$

$$4.(h_2): p_{2_8} + p_{2_{10}} + p_{2_{11}} + p_{2_{12}} = 181$$

Şekil 6.4. MHDİAP modelinde $as^{\bar{u}} = 2$ olduğu zaman elde edilen çözüm

$$1.(h_5): p_{5_1} + p_{5_3} + p_{5_4} = 165$$

$$5.(h_1): p_{1_{13}} + p_{1_{14}} = 151$$

$$2.(h_4): p_{4_2} + p_{4_6} = 151$$

$$6.(h_7): p_{7_{15}} + p_{7_{16}} = 148$$

$$3.(h_3): p_{3_5} + p_{3_7} = 164$$

$$7.(h_6): p_{6_{17}} + p_{6_{18}} = 150$$

$$4.(h_2): p_{2_8} + p_{2_{10}} + p_{2_{11}} + p_{2_{12}} = 181$$

Şekil 6.5. Temel MHDİAP modelinde $as^{\bar{u}} = 3$ olduğu zaman elde edilen çözüm

Şekil 6.4 ve 6.5'te, $as^{\ddot{U}} = 2$ ve $as^{\ddot{U}} = 3$ olduğu zaman C 'nin sırasıyla, 189 ve 181 dk^{-3} olduğu görülmektedir. Burada, yüksek aydınlatma gerektiren görevlerin daha fazla sayıdaki istasyona atanması durumunda, C 'nin bir miktar arttığı görülmüştür.

Şekil 6.3'te görüldüğü gibi, yüksek aydınlatma gereken görevler kırmızı renkle belirtilmiş olup; 4 ayrı iş istasyonu veya işçiye dağıtılmıştır. Ancak görevlerin gerektirdiği aydınlatma seviyelerine göre dağılım yapılması istendiğinde Şekil 6.4 ve 6.5 elde edilmekte ve belirlenen $as^{\ddot{U}}$ değerlerine ($as^{\ddot{U}} = 2$ ve $as^{\ddot{U}} = 3$) göre atama yapılmaktadır.

Bununla birlikte Tablo 6.4'te, Eşitlik (6.8) ile (6.9) ile verilen aydınlatma kısıtları kapsamında $as^{\ddot{U}}=3$ iken oluşan gürültü seviyeleri görülmektedir.

Tablo 6.4. MHDİAP modeline aydınlatma kısıtının eklendiğinde ve $as^{\ddot{U}}=3$ iken oluşan gürültü seviyeleri

İstasyonlar	Gürültü seviyeleri dB
S_1	80
S_2	83
S_3	86
S_4	89
S_5	79
S_6	86
S_7	83

Tablo 6.4'te görüldüğü gibi, $as^{\ddot{U}}=3$ olduğu zaman gürültü düzeyinin 85 dB'yi aştığı istasyonların olduğu görülmektedir. Bu sonuç, gürültü seviyesi kısıtının modele eklenmesi gerektiğini vurgulamaktadır.

6.1.1.1.2 Gürültü faktörünün kısıt olarak eklendiği tek amaçlı modelin çözümü

Temel MHDİAP'ye sadece gürültü parametresi olan Eşitlik (6.10) dâhil edilince elde edilen optimal amaç fonksiyonu değerleri Tablo 6.5'te gösterilmiştir. Tablo 6.5 ve Şekil 6.6'da çözümler ve çözüme dayalı elde edilen sonuçlar paylaşılmıştır.

Tablo 6.5. MHDİAP modeline gürültü faktörü kısıt olarak eklendiğinde elde edilen sonuçlar

$C(\text{min}^{-3})$	177
Çözüm süresi	1.25

$$1.(h_5): p_{5_1} + p_{5_3} + p_{5_4} = 165$$

$$2.(h_4): p_{4_2} + p_{4_6} = 151$$

$$3.(h_3): p_{3_5} + p_{3_7} = 164$$

$$4.(h_2): p_{2_8} + p_{2_{10}} + p_{2_{11}} = 167$$

$$5.(h_1): p_{1_9} + p_{1_{13}} + p_{1_{14}} = 177$$

$$6.(h_7): p_{7_{12}} + p_{7_{15}} + p_{7_{16}} = 163$$

$$7.(h_6): p_{6_{17}} + p_{6_{18}} = 150$$

Şekil 6.6. MHDİAP modelinde gürültü faktörü dikkate alındığında elde edilen çözüm

Şekil 6.6'da temel atama ve dengeleme modeline göre C 'nin 177 dk^{-3} olduğu görülmektedir. MHDİAP'ye göre Tablo 6.6'da, gürültü seviyelerinin dB cinsinden değerlerine göre görevlerin iş istasyonlarına atandığı dikkat çekmektedir.

Tablo 6.6. MHDİAP modelinde gürültü kısıtı eklendiğinde istasyonlarda oluşan gürültü seviyeleri

İstasyonlar	Gürültü kısıtı eklenmeden (dB)	Gürültü kısıtı eklenerek (dB)
S_1	86	83
S_2	84	84
S_3	80	80
S_4	84	84
S_5	83	83
S_6	75	85
S_7	86	80

Önerilen tek amaçlı birinci model ile görevler gerçekleştirildiklerinde çalışma ortamına aktardıkları gürültü seviyeleri gürültü maruziyeti sınır değerini aşmayacak şekilde iş istasyonlarına atanır. Tablo 6.5'te görüldüğü gibi, gürültü kısıtı dikkate alındığında 85 dB'yi aşmayacak şekilde görev atamaları yapılmıştır. Tablo 6.5'te verilen gürültü faktörü dikkate alınmadan yapılan atamalarda ortaya çıkan yüksek gürültü düzeyleri azaltılmıştır.

Bununla birlikte elde edilen çözüme bakıldığında, yüksek aydınlatma gereken görevlerin farklı istasyonlara atanması sebebiyle aydınlatma faktörünü sınırlandıran bir kısıt olmadığı görülmektedir.

6.1.1.1.3 Uygun olmayan çalışma duruşu faktörünün kısıt olarak eklendiği tek amaçlı modelin çözümü

Temel MHDİAP'ye sadece UOÇD parametresi olan Eşitlik (6.11) dâhil edilince elde edilen optimal amaç fonksiyonu değerleri Tablo 6.7'de gösterilmiştir. Şekil 6.7 ve Şekil 6.8'de çözümler ve çözüme dayalı elde edilen sonuçlar gösterilmektedir.

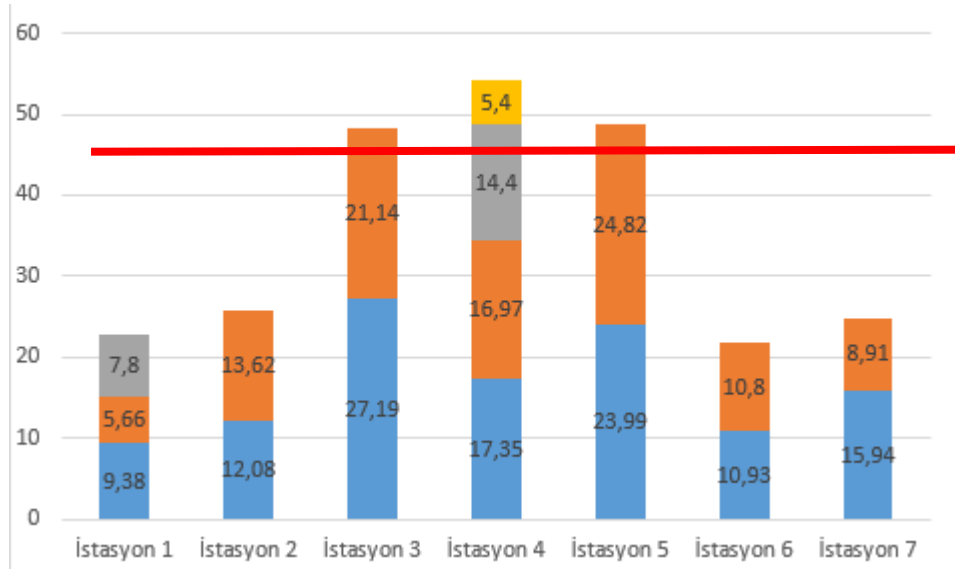
Tablo 6.7. MHDİAP modeline UOÇD faktörü kısıt olarak eklendiğinde elde edilen sonuçlar

$C(min^{-3})$	195
Çözüm süresi	0,86

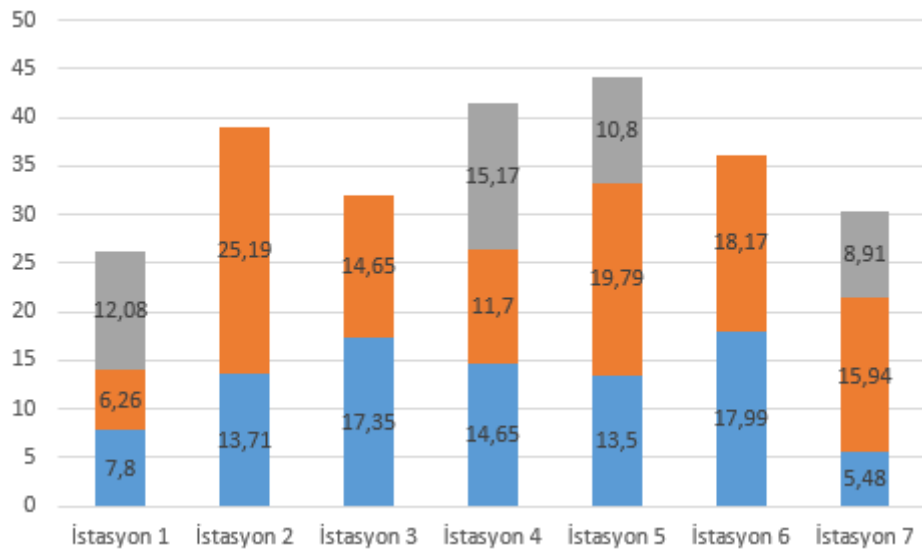
$$\begin{aligned}
 1.(h_4): p_{4_1} + p_{4_3} + p_{4_4} &= 193 & 5.(h_7): p_{7_9} + p_{7_{14}} + p_{7_{15}} &= 164 \\
 2.(h_3): p_{3_2} + p_{3_5} &= 164 & 6.(h_1): p_{1_7} + p_{1_{16}} &= 190 \\
 3.(h_2): p_{2_6} + p_{2_8} &= 195 & 7.(h_6): p_{6_{12}} + p_{6_{17}} + p_{6_{18}} &= 166 \\
 4.(h_5): p_{5_{10}} + p_{5_{11}} + p_{5_{13}} &= 136
 \end{aligned}$$

Şekil 6.7. MHDİAP modelinde UOÇD faktörü dikkate alındığında elde edilen çözüm

Tablo 6.7'de temel atama ve dengeleme modeline göre C 'nin $195 dk^{-3}$ olduğu görülmektedir. Buna göre, C 'de bir miktar artış söz konusudur. Burada, her çalışma duruşunun ne kadar süre ile sergilendiği dikkate alınarak, aktif çalışma sürelerine göre dengeli dağılımı sağlanmıştır. Şekil 6.8'de ve Şekil 6.9'da sırasıyla, istasyonların modele UOÇD faktörü dahil edilmeden ve dahil edilerek elde edilen süre temelli REBA sonuçlarının dağılımı gösteren grafik görülmektedir. İş istasyonuna atanan görevlerin süre bazlı REBA değerleri verilmektedir.



Şekil 6.8. MHDİAP modelinde UOÇD faktörü dikkate alınmadığında ortaya çıkan süre bağımlı REBA skoru dağılımları



Şekil 6.9. MHDİAP modelinde UOÇD faktörü dikkate alındığında ortaya çıkan süre bağımlı REBA skoru dağılımları

Şekil 6.8 incelendiğinde, başlangıç atamasına göre, istasyon 3, istasyon 4 ve istasyon 5'te zorlanmalar olduğu ve süre bağımlı REBA skorları açısından istasyonlar arasında düzgün bir dağılım elde edilmediği görülmektedir. Şekil 6.9'da, zorlanmaların Eşitlik (6.11) ile verilen süre bağımlı REBA kısıtı ile iyileştirildiği, belirlenen sınır değerlerin aşılmadığı ve daha dengeli bir dağılım elde edildiği görülmektedir.

Ayrıca, Şekil 6.7 ve Şekil 6.8'de yer alan çözümler, çevresel faktörler açısından incelendiğinde, sonuçların çevresel faktörler açısından iyi olmadığı görülmektedir. MHDİAP

modelinde Eşitlik (6.8) ve Eşitlik (6.9) ile verilen kısıtların kullanılması, Şekil 6.7’de kırmızı ile işaretlenmiş görevlerden ($G_4, G_5, G_8, G_{10}, G_{12}$) anlaşılmaktadır. Yüksek aydınlatma gerektiren söz konusu görevlerin farklı iş istasyonlarına atandıkları görülmüştür. Benzer şekilde, Eşitlik (6.10) ile verilen kısıtın modelde yer almadığı ve iş istasyonlarına atanan görevlerin, üst sınır olarak belirlenen 85 dB’yi aşacak şekilde istasyonlara dağıtıldığı ve birden çok görevin bir arada gerçekleştirilmesi sonucu ortaya çıkan toplam gürültü seviyesini sağlamadığı görülmüştür. Atamalara göre, dB cinsinden hesaplanan gürültü seviyeleri Tablo 6.8’de görülmektedir.

Tablo 6.8. MHDİAP modelinde UOÇD faktörü dikkate alındığında oluşan gürültü seviyeleri

İstasyonlar	Gürültü seviyeleri (dB)
S_1	82
S_2	81
S_3	86
S_4	82
S_5	83
S_6	80
S_7	86

Tablo 6.8, Şekil 6.7 ve 6.8’e bakıldığı zaman, atamalarda gürültü faktörünün dikkate alınmadığı ve 85 dB’yi aşan gürültü düzeylerinin ortaya çıktığı görülmektedir. Buna göre, temel modelde dikkate alınan UOÇD faktörüyle birlikte, diğer faktörlerin değerlendirilmesi gerektiği belirlenmiştir.

Aydınlatma, gürültü ve UOÇD risk faktörleri teker teker tek amaçlı temel modele kısıt olarak eklendiğinde, eklenmeyen diğer risk faktörlerinin birer ergonomik sorun olarak ortaya çıktığı belirlenmiştir. Buna göre, söz konusu faktörlerin bir arada kısıtlarda yer aldığı MHDİAP_ÇF_ÇD yapısının kurulmasının gerekli olduğu anlaşılmıştır.

6.1.1.1.4 MHDİAP_ÇF_ÇD modelinin çözümü

Temel MHDİAP'ye Eşitlik (6.8), (6.9), (6.10) ve (6.11) dâhil edildiğinde önerilen MHDİAP_ÇF_ÇD ortaya çıkmaktadır. MHDİAP_ÇF_ÇD modelinde elde edilen optimal amaç fonksiyonu değerleri Tablo 6.9'da gösterilmiştir. Tablo 6.8, Şekil 6.10 ve 6.11'de çözümler ve çözüme dayalı sonuçlar gösterilmektedir.

Tablo 6.9. MHDİAP_ÇF_ÇD sonuçları

	$as^{\ddot{U}} = 2$	$as^{\ddot{U}} = 3$
$C(dk^{-3})$	214	198
Çözüm süresi	1,73	1,05

$$\begin{aligned}
 1.(h_3): p_{31} + p_{32} &= 111 & 5.(h_1): p_{1,11} + p_{1,13} &= 109 \\
 2.(h_5): p_{53} + p_{54} + p_{55} &= 204 & 6.(h_7): p_{7,14} + p_{7,15} + p_{7,16} &= 214 \\
 3.(h_2): p_{26} + p_{27} &= 198 & 7.(h_6): p_{6,17} + p_{6,18} &= 185 \\
 4.(h_4): p_{48} + p_{4,10} + p_{4,12} &= 147
 \end{aligned}$$

Şekil 6.10. $as^{\ddot{U}} = 2$ olduğunda MHDİAP_ÇF_ÇD'den elde edilen çözüm

$$\begin{aligned}
 1.(h_3): p_{31} + p_{33} &= 177 & 5.(h_7): p_{7,12} + p_{7,13} + p_{7,14} &= 161 \\
 2.(h_5): p_{52} + p_{54} + p_{55} &= 189 & 6.(h_4): p_{4,15} + p_{4,16} &= 180 \\
 3.(h_2): p_{26} + p_{27} &= 198 & 7.(h_6): p_{6,17} + p_{6,18} &= 150 \\
 4.(h_1): p_{18} + p_{1,10} + p_{1,11} &= 163
 \end{aligned}$$

Şekil 6.11. $as^{\ddot{U}} = 3$ olduğunda MHDİAP_ÇF_ÇD'den elde edilen çözüm

Tablo 6.8'de görüldüğü gibi, MHDİAP_ÇF_ÇD modelinde $as^{\ddot{U}} = 2$ ve $as^{\ddot{U}} = 3$ için sırasıyla, C 'nin 214 ve 198 dk^{-3} olduğu görülmektedir. Buradan, C ' de bir miktar artış olduğu belirlenmiştir.

Aydınlatma seviyelerine göre incelediğinde, Şekil 6.10 ve 6.11'de yüksek aydınlatma gereken görevler kırmızı renkle belirtilmiş olup; sırasıyla 2 ve 3 ayrı iş istasyonu veya işçiye dağıtıldığı belirlenmiştir.

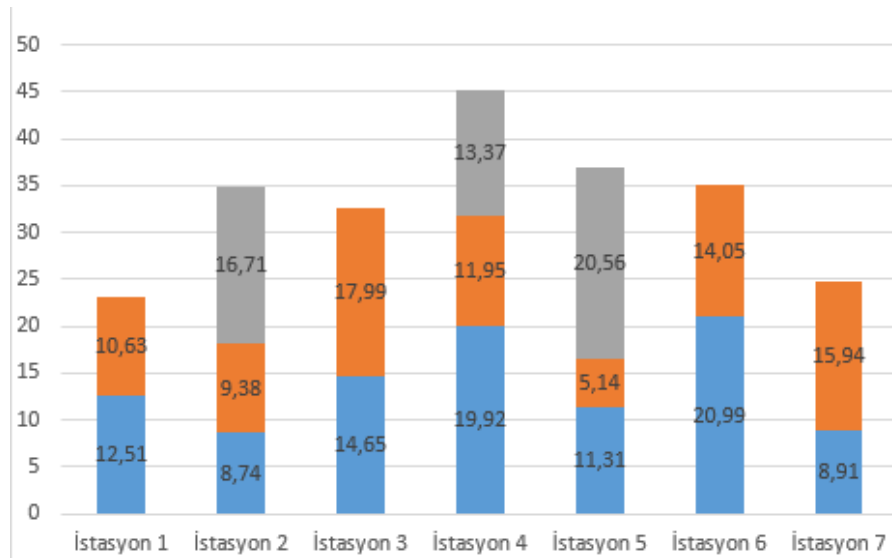
Diğer taraftan, Tablo 6.10'da gürültü parametresi olan Eşitlik (6.10) ile $as^{\ddot{U}}$ 'nün 2 veya 3 olmasına göre ortaya çıkan gürültü seviyeleri dB üzerinden görülmektedir.

Tablo 6.10. $as^{\ddot{U}}$ 'nün değişen değerlerine göre MHDİAP_ÇF_ÇD modelinden elde edilen gürültü seviyeleri

İstasyonlar	$as^{\ddot{U}} = 2$	$as^{\ddot{U}} = 3$
S_1	82	81
S_2	81	81
S_3	84	84
S_4	85	84
S_5	79	85
S_6	80	78
S_7	84	80

Önerilen MHDİAP_ÇF_ÇD modeli ile görevler gerçekleştirildiklerinde çalışma ortamına aktardıkları gürültü seviyeleri, gürültü maruziyeti sınır değerini aşmayacak şekilde iş istasyonlarına atanmaktadır. Tablo 6.10'da görüldüğü gibi gürültü kısıtı dikkate alındığında, 85 dB'yi aşmayacak şekilde görev atamaları yapılmıştır.

Eşitlik (6.11) ile sağlanan UOÇD'ye ilişkin süre bağımlı REBA skoru dağılımları, Şekil 6.12'de verilmektedir. Burada, süre bağımlı REBA skorlarının, önceden sınır değer olarak belirlenen gün içi süreye bağı REBA skorunu aşmadan bir dağılım yaptığı gözlenmektedir.



Şekil 6.12. MHDİAP_ÇF_ÇD kapsamında UOÇD için süre bağımlı REBA skoru dağılımları

MHDİAP yapısı gereği görevleri kümelendirmeye olanak tanıdığı için, çevresel risk faktörleri ve UOÇD ile çözüm uzayı oluşturulmuş ve söz konusu risk faktörleri Ergo-MHDİAP kapsamında kısıt olarak tanımlanmıştır. Ancak, bundan sonra ilave edilmesi düşünülen psikolojik, bireysel, fiziksel risk faktörleri hem görev bazında gruplandırmaya uygun olmamaları, hem de bu faktörleri kısıt olarak sınırlandırmanın doğru olmayacağı düşüncesiyle MHDİAP_ÇF_ÇD modelinde ergonomik açıdan tanımlanan çözüm uzayının C ile beraber değerlendirmesinde birer kriter olarak dikkate alınacaktır. Bu sebeple, Ergo-MHDİA modelinde amaç fonksiyonu olarak tanımlanmışlardır.

Klasik MHDİAP’de var olan C ’nin en küçüklemesine ilaveten, Eşitlik (6.15), Eşitlik (6.16), Eşitlik (6.17), Eşitlik (6.18) ve Eşitlik (6.19) teker teker ikinci amaç olarak tanımlanmış ve MHDİAP’ye ergonomik risk faktörleri eklenerek, bu faktörlerin C üzerindeki etkisinin gözlemlenmesi hedeflenmiştir. Çalışmada, önerilen iki amaçlı Ergo-MHDİAP modellerinin baskın olmayan çözümlerinin kümesi olan PS değerleri elde edilmiştir. PS değerleri, literatürde bilinen farklı yöntemler kullanılarak bulunabilir [96]. Çalışmada, en uygun çözüm yöntemlerinden biri olan Epsilon-kısıt yöntemi tercih edilmiştir. Epsilon-kısıt yöntemi ile sınırlı veri seti için tüm uygulanabilir çözümler belirlenerek Pareto sınırı tahmin edilmektedir. Burada, elde edilen her nokta, birer çözüm olmakta ve tercih karar vericilere bırakılmaktadır.

6.1.2 Model 2: Ergo-MHDİAP_GT

İkinci modelde, MHDİAP_ÇF_ÇD’de psikolojik faktörlerin yer alması hedeflenmiştir. Burada işçilerin iç huzuru ve mutluluğu yansıtılmak istendiği için görev seçimine olanak tanıyan bir fonksiyon tanımlanmıştır. Geliştirilen MHDİAP_ÇF_ÇD’yi C ile beraber görev tercihi fonksiyonu değerlendirmektedir. Buna göre, iki amaçlı problem yapısını dikkate alan Ergo-MHDİAP_GT modeli elde edilmiş ve sonuçlar verilmiştir.

Bölüm 6.1.1’de verilen parametre ve değişkenlere ek olarak aşağıda verilen tercih puanı parametresi eklenmiştir.

Parametre:

P_{ih} : h işçisinin i görevine verdiği tercih puanı

Amaç fonksiyonu:

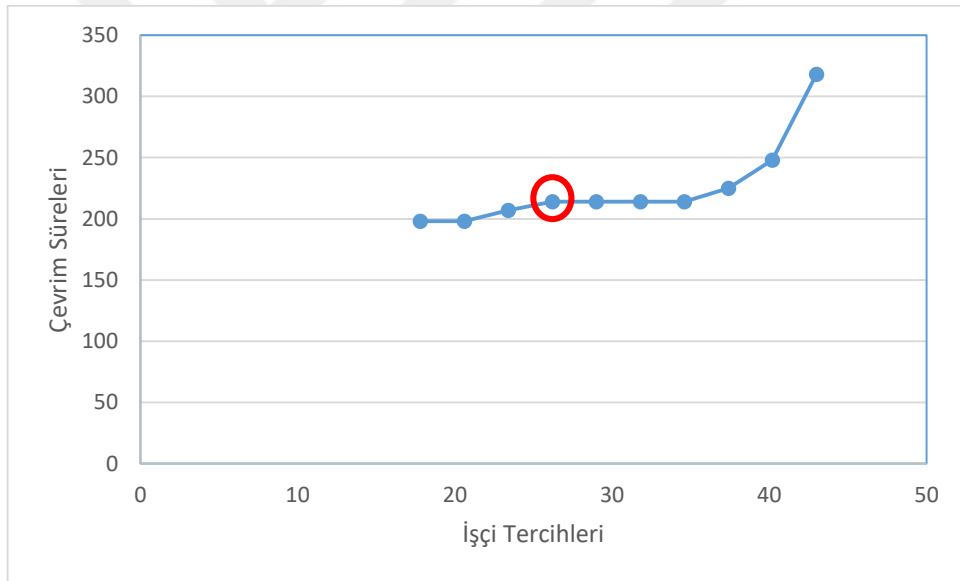
MHDİAP_ÇF_ÇD’de var olan amaca ek olarak Eşitlik (6.15) tanımlanmıştır.

$$\max \sum_{h \in H} \sum_{i \in N} \sum_{s \in S} P_{ih} x_{s_{hi}} \quad (6.15)$$

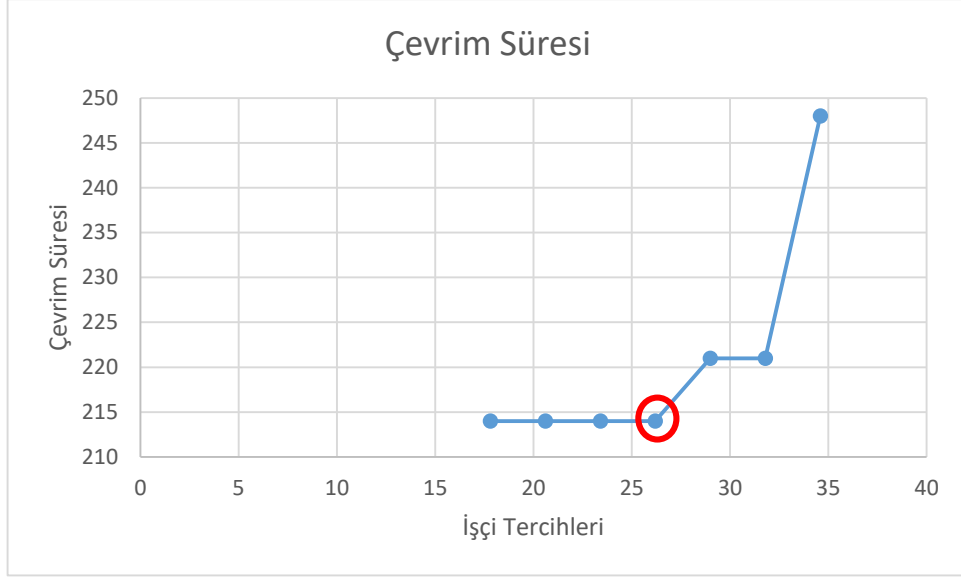
Eşitlik (6.15) ile işçilerin psikolojik konforlarının sağlanması açısından görevleri yapma isteklerine ilişkin bir yaklaşım ele alınmıştır. Burada, görevlerin tercih puanlarına göre iş istasyonlarına ve işçilere atamaları sağlanmaktadır.

6.1.2.1 Ergo-MHDİAP_GT Uygulaması

Bölüm 6.1.1.1’de tanımlanan problemde kullanılan parametrelere ek olarak, P_{ih} değerleri rassal bir şekilde üretilmiş ve $as^{\bar{u}}$ ’nün farklı değerlerine göre Şekil 6.13’de ve Şekil 6.14’te Ergo-MHDİAP_GT çözümüne yer verilmiştir.



Şekil 6.13. $as^{\bar{u}} = 3$ olduğunda Ergo-MHDİAP_GT için elde edilen sonuçlar



Şekil 6.14. $as^{\bar{U}} = 2$ olduğunda Ergo-MHDİAP_GT için elde edilen sonuçlar

Şekil 6.13 ve Şekil 6.14'te her bir nokta uygun çözümü göstermektedir. İş istasyonlarına görev ve işçi atamasında her uygun çözüm için C ve işçi istekleri hesaplanmıştır. Bu iki amaç doğrultusunda birbirlerine baskın olmayan çözümler elde edilerek PS'ler oluşturulmuştur. Söz konusu PS değerleri, hem C hem de işçi tercihleri açısından tüm uygun noktaları göstermektedir. Şekil 6.13 ve Şekil 6.14'te görüldüğü gibi, C ve işçi tercihleri fonksiyonları farklı dengeleme ve atama çözümleri vermektedir.

Önerilen modelde, Eşitlik (6.1) ile Eşitlik (6.15)'te tanımlanan çelişen iki amacın olması, Şekil 6.13 ve Şekil 6.14'teki sonuçları ortaya çıkarmaktadır. Şekil 6.13 ve Şekil 6.14'te görüldüğü gibi, C ve işçi tercihleri fonksiyonları farklı dengeleme ve atama çözümleri vermektedir. Bu durum, iki amacın farklı uygulanabilir dengeleme sonuçlarına bağlı olarak C ve işçi tercihlerinin optimal dengeleme kararını oluşturmaktadır. Karar vericilerin belirleyeceği ve kullanacağı optimum dengeleme kararı, iki çelişen amacın nasıl belirlendiği ve modelde ne şekilde kullanıldığında göre değişmektedir. Şekil 6.13 ve Şekil 6.14 incelendiğinde ilk göze çarpan durum, iki çözüm grafiğinde de soldan sağa artış gözlenmesidir. Bunun sebebi, işçilerin tercih ettikleri görevleri yapmalarını artırmaya çalışırken, C 'den feragat edilmesidir. Diğer bir deyişle, 1 birim işçi tercihi artırıldığında C 'de ne kadar artış olduğu ve optimal çözümler arasındaki farklar net bir şekilde görülmektedir. Buradan, işçilerin görev tercih değerleri artıkça C 'de de artış olduğu görülmüştür.

Önerilen modelde, aynı aydınlatma seviyelerine ihtiyaç duyan görevlerin aynı iş istasyonlarına atanması önemsendiği için, $as^{\bar{U}} = 2$ olduğunda daha dik bir yükseliş elde

edilmiştir. $as^{\ddot{u}}$ değeri, model tanımı yapılırken de bahsedildiği gibi, yüksek aydınlatma gerektiren görevlerin kaç tane iş istasyonuna atanacağını belirlemektedir. Ergo-MHDİAP_GT modelinin çözümünde, $as^{\ddot{u}}$ değeri ne kadar azalırsa, modelin çözüm uzayı o kadar daralacaktır. Buna göre, Şekil 6.13 ile kıyaslandığında Şekil 6.14'te daha büyük sıçrayışlar görülmektedir. Diğer bir ifadeyle, $as^{\ddot{u}}$ değeri 3'ten 2'ye düşürüldüğünde, bir birim işçi tercihini artırmak C 'de daha fazla artışı beraberinde getirmektedir. Bu sebeple, amaç fonksiyonları arasındaki çelişki daha belirgin görülmektedir.

Elde edilen PS çözümlerinin ergonomik faktörleri sağladığını gösterebilmek adına herhangi bir çözüm seçilmiştir ve Tablo 6.11'de amaç fonksiyonu değerleri gösterilmiştir. Değişen $as^{\ddot{u}}$ değerlerine göre ($as^{\ddot{u}} = 2$ ve $as^{\ddot{u}} = 3$ için), PS'ler arasından dördüncü noktayı gösteren çözüm, Şekil 6.15 ve 6.16'da örnek olarak ele alınmış ve sonuçlar paylaşılmıştır.

Tablo 6.11. Ergo-MHDİAP_GT'de seçilen bir çözüm için elde edilen sonuçlar

	$as^{\ddot{u}} = 2$	$as^{\ddot{u}} = 3$
$C(dk^{-3})$	214	214
Çözüm süresi	2,16	2,55

- | | |
|---|---|
| 1.(h_3): $p_{31} + p_{33} = 177$ | 5.(h_2): $p_{2,11} + p_{2,13} = 132$ |
| 2.(h_5): $p_{52} + p_{54} + p_{55} = 189$ | 6.(h_7): $p_{7,14} + p_{7,15} + p_{7,16} = 214$ |
| 3.(h_4): $p_{46} + p_{47} = 159$ | 7.(h_6): $p_{69} + p_{6,17} + p_{6,18} = 185$ |
| 4.(h_1): $p_{18} + p_{1,10} + p_{1,12} = 139$ | |

Şekil 6.15. Ergo-MHDİAP_GT modelinde $as^{\ddot{u}} = 2$ olduğunda elde edilen çözüm

- | | |
|---|---|
| 1.(h_4): $p_{41} + p_{43} + p_{44} = 193$ | 5.(h_3): $p_{37} + p_{39} = 133$ |
| 2.(h_5): $p_{52} + p_{55} + p_{56} = 202$ | 6.(h_7): $p_{7,14} + p_{7,15} + p_{7,16} = 214$ |
| 3.(h_1): $p_{18} + p_{1,10} + p_{1,12} = 139$ | 7.(h_6): $p_{6,17} + p_{6,18} = 150$ |
| 4.(h_2): $p_{2,11} + p_{2,13} = 132$ | |

Şekil 6.16. Ergo-MHDİAP_GT modelinde $as^{\ddot{u}} = 3$ olduğunda elde edilen çözüm

Tablo 6.11’de MHDİAP_GT için $as^{\ddot{U}}$ ’nün değişen değerlerine göre rasgele seçilen çözüm kapsamında, iki $as^{\ddot{U}}$ değeri için de C ’nin $214 dk^{-3}$ olduğu görülmektedir. Buna göre, C ’de MHDİAP_ÇF_ÇD’ye göre bir miktar artışın ortaya çıktığı belirlenmiştir.

Aydınlatma seviyelerine göre incelendiğinde, Şekil 6.15 ve 6.16’da yüksek aydınlatma gerektiren görevler kırmızı renkle belirtilmiş olup sırasıyla, 2 ve 3 ayrı iş istasyona veya işçiye dağıtılmıştır.

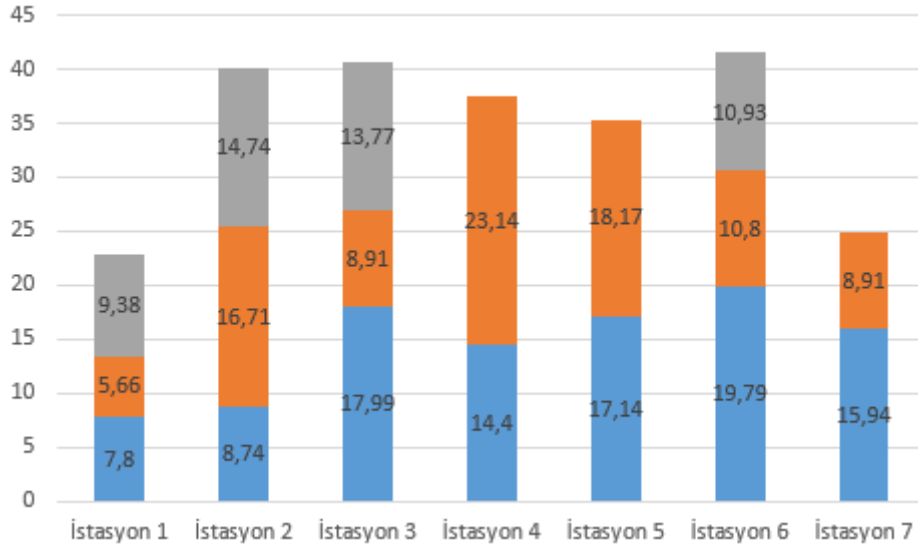
Diğer taraftan, çevresel faktörlerden gürültü seviyesi test edilmiştir. Tablo 6.12’de gürültü parametresi olan Eşitlik (6.10) ile $as^{\ddot{U}}$ ’nin değişen değerlerine göre oluşan gürültü seviyeleri görülmektedir.

Tablo 6.12. MHDİAP_GT için değişen $as^{\ddot{U}}$ değerlerine göre ortaya çıkan gürültü seviyeleri (dB)

İstasyonlar	$as^{\ddot{U}} = 2$	$as^{\ddot{U}} = 3$
S_1	81	83
S_2	81	80
S_3	84	85
S_4	85	79
S_5	79	83
S_6	80	80
S_7	85	80

Önerilen Ergo-MHDİAP_GT modeli ile görevler gerçekleştirildiklerinde çalışma ortamına aktardıkları gürültü seviyeleri, gürültü maruziyeti sınır değerini aşmayacak şekilde iş istasyonlarına atanmaktadır. Tablo 6.12’de görüldüğü gibi, gürültü kısıtı dikkate alındığında, 85 dB’yi aşmayacak şekilde görev atamaları yapılmıştır.

Eşitlik (6.11) ile sağlanan UOÇD için süre bağımlı REBA skoru dağılımları Şekil 6.17’de verilmektedir. Ergo-MHDİAP_GT modelinin belirlenen gün içi zorlanma seviyesini aşmadan bir dağılım ürettiği gözlenmektedir.



Şekil 6.17. MHDİAP_ÇF_ÇD kapsamında UOÇD için süre bağımlı REBA skoru dağılımları

Şekil 6.17’de, Ergo-MHDİAP_GT kapsamında, iş istasyonlarına atanan işçilere ait görevlerin tamamlanma süreleri ve görevlere ilişkin REBA skorlarını dikkate alarak hesaplanan, süre bağımlı REBA skorları dağılımlarının, Eşitlik (6.11)’de verilen kısıt ile sağlanan günlük süre bağımlı REBA skoru sınır değerini aşmadığı görülmektedir.

6.1.3 Model 3: Ergo-MHDİAP_İKO

Bu modelde, MHDİAP_ÇF_ÇD’de fiziksel ve bireysel faktörlerin yer alması hedeflenmiştir. LRM’ye göre elde edilen sonuç doğrultusunda işçinin yaşı, işçinin deneyimi, işçinin mevcut işletmedeki deneyimi ve uyku süreleri Ergo-MHDİAP_İKO modeli kapsamında dikkate alınmıştır. Burada işçilerin fiziksel farklılıkları nedeniyle oluşabilecek iş kazası olasılıklarını yansıtabilmek amacıyla bir fonksiyon tanımlanmıştır. Geliştirilen MHDİAP_ÇF_ÇD’yi C ile beraber iş kazası olasılık fonksiyonu değerlendirmektedir. Buna göre, iki amaçlı problem yapısını alan Ergo-MHDİAP_İKO modeli elde edilmiş ve sonuçlar verilmiştir. Sonuçlar için PS’ler sunulmuş ve seçim karar vericiye bırakılmıştır. Bölüm 4.3’te iş kazası olasılıklarının işçiler bazında nasıl elde edildiği detaylı bir şekilde anlatılmıştır. Gerçekleştirilen lojistik regresyon uygulaması sonucunda bireysel risk faktörlerinden deneyimin iş kazası üzerinde en etkili faktör olduğu belirlenmiştir. Bu sonucun, gerçek hayatı yansıttığı ve Ergo-MHDİAP’nin yapısına da uygun olduğu değerlendirilmiştir. Ayrıca görevlerin gerektirdiği deneyime göre kümelenmesi de

mümkündür. Böylece, Eşitlik (2.8)'de verilen temel MHDİAP'deki görev-işçi önceliği, önerilen Ergo-MHDİA modelinde deneyim faktöründen yola çıkılarak işçi-görev uyumuna dönüştürülmüştür. Bu sebeple, bu veriden hareketle Ergo-MHDİAP_D modeli geliştirilmiş ve Bölüm 6.1.4'te detaylı anlatılmıştır.

Bölüm 6.1.1'de verilen parametre ve değişkenlere ek olarak aşağıdaki parametreler daha önce yararlanılan lojistik regresyon analizine göre tanımlanmıştır.

Parametreler:

A_h : h işçisinin yaşı

D_{hi} : h işçisinin i görevi kapsamındaki deneyimi

MD_{hi} : h işçisinin i görevi kapsamında mevcut işletmedeki deneyimi

U_h : h işçisinin günlük ortalama uyku süresi

Amaç fonksiyonu:

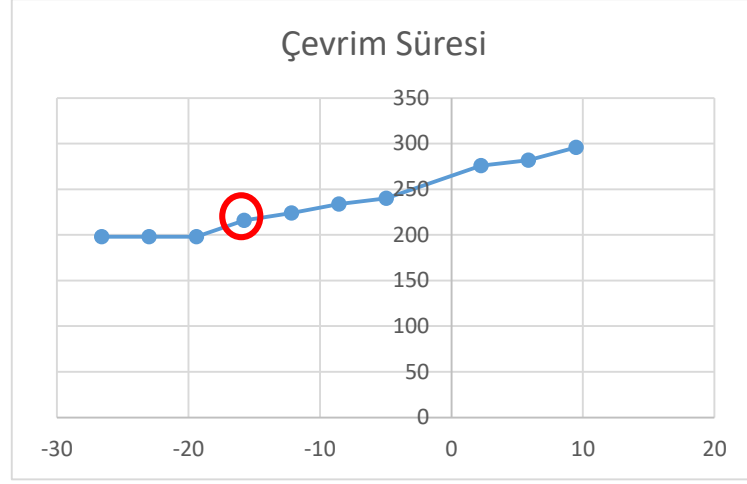
MHDİAP_ÇF_ÇD'de var olan amaca ek olarak, Eşitlik (6.16) tanımlanmıştır.

$$\text{Min} \sum_{h \in H} \sum_{i \in N} \sum_{s \in S} \beta_0 + \beta_1 A_h x_{shi} + \beta_2 D_{hi} x_{shi} + \beta_3 MD_{hi} x_{shi} + \beta_4 U_h x_{shi} \quad (6.16)$$

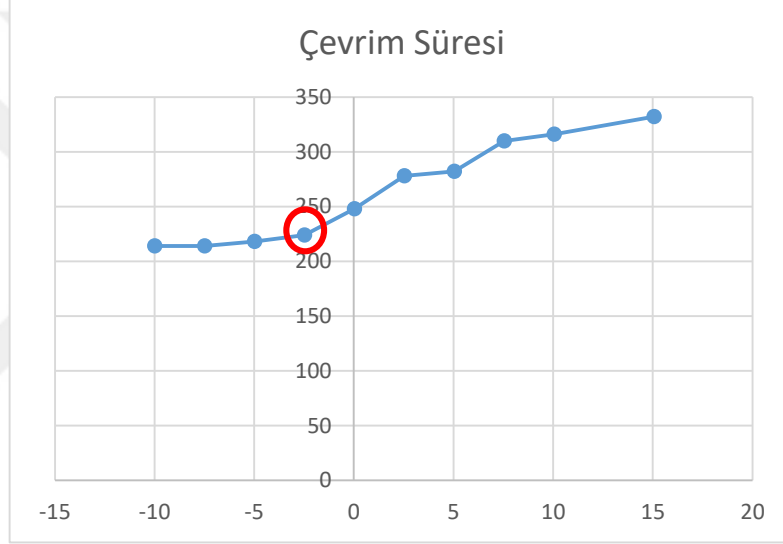
Eşitlik (6.16) ile işçilerin iş kazaları olasılıklarını en küçükleyecek şekilde bir atama ve dengeleme yapılması sağlanmıştır.

6.1.3.1 Ergo-MHDİAP_İKO Uygulaması

Bölüm 6.1.1.1'de tanımlanan problemde kullanılan parametrelere ek olarak Ergo-MHDİAP_İKO modeli için gerçek ortam verileri kullanılarak elde edilen regresyon denkleminde yararlanılmıştır. Ergo-MHDİAP_İKO modelinin parametreleri rassal olarak üretilmiştir. as^0 'nın farklı değerlerine göre, Şekil 6.18'de ve Şekil 6.19'da Ergo-MHDİAP_İKO modelden elde edilen sonuçlara yer verilmiştir.



Şekil 6.18. $as^{\ddot{u}} = 3$ olduğunda Ergo-MHDİAP_İKO için elde edilen sonuçlar



Şekil 6.19. $as^{\ddot{u}} = 2$ olduğunda Ergo-MHDİAP_İKO için elde edilen sonuçlar

Şekil 6.18 ve Şekil 6.19'da her bir nokta uygun bir çözümü göstermektedir. İş istasyonlarına görev ve işçi atamasında her uygun çözüm için C ve iş kazası olasılıkları hesaplanmıştır. Bu iki amaç doğrultusunda, birbirlerine baskın olmayan çözümler elde edilerek PS'ler oluşturulmuştur. Bu PS değerleri, hem C hem de iş kazaları açısından tüm uygun noktaları göstermektedir. Şekil 6.18 ve Şekil 6.19'da görüldüğü gibi, C ve iş kazası olasılığı fonksiyonları farklı dengeleme ve atama çözümleri vermektedir.

Sonuçlara genel olarak bakıldığında ise, önerilen modelde, Eşitlik (1) ile Eşitlik (6.16)'da tanımlanan çelişen iki amacın olması, Şekil 6.18 ve Şekil 6.19'daki sonuçları ortaya çıkarmaktadır. Her iki şekilde de görüldüğü gibi, C ve iş kazası fonksiyonları farklı dengeleme çözümleri vermektedir. Bu durum, iki amacın farklı uygulanabilir dengeleme

sonuçlarına bağlı olarak C ve iş kazalarının optimal dengeleme kararını oluşturmaktadır. Karar vericilerin belirleyeceği ve kullanacağı optimum dengeleme kararı, bu iki çelişen amacın nasıl belirlendiği ve modelde ne şekilde kullanıldığında göre değişmektedir. Şekil 6.18 ve Şekil 6.19 incelendiğinde ilk göze çarpan durum, iki çözüm grafiğinde de soldan sağa artış gözlenmesidir. Bunun sebebi, iş kazalarını azaltmaya çalışırken C 'den feragat edilmesidir. Diğer bir deyişle, 1 birim iş kazası olma olasılığını azaldıkça C 'de ne kadar artış olduğu ve optimal çözümler arasındaki farklar net bir şekilde görülmektedir. Buradan, işçilerin iş kazası olasılıklarını düşürmek istedikçe C 'de de artış olduğu görülmüştür.

Önerilen modelde, aynı aydınlatma seviyelerine ihtiyaç duyan görevlerin aynı iş istasyonlarına atanması önemsendiği için, $as^{\bar{U}} = 2$ kapsamında daha dik bir artış elde edilmiştir. Ergo-MHDİAP_İKO modelinin çözümünde, $as^{\bar{U}}$ değeri ne kadar düşürülürse modelin çözüm uzayı da o kadar daralacaktır. Buna göre, Şekil 6.18 ile kıyaslandığında Şekil 6.19'da daha büyük sıçrayışlar görülmektedir. Diğer bir ifadeyle, $as^{\bar{U}}$ değeri 3'ten 2 'ye düşürüldüğünde, bir birim iş kazası olasılığını azaltmak C 'de daha fazla artışı beraberinde getirmektedir.

Elde edilen PS çözümlerinin ergonomik faktörleri sağladığını gösterebilmek adına herhangi bir çözüm noktası seçilmiştir ve Tablo 6.13'te ilgili noktaya ait amaç fonksiyonu değerleri gösterilmiştir. Değişen $as^{\bar{U}}$ değerlerine göre ($as^{\bar{U}} = 2$ ve $as^{\bar{U}} = 3$ için) PS'ler arasından dördüncü noktayı gösteren çözüm, Şekil 6.20 ve 6.21'de örnek olarak ele alınmış ve sonuçlar paylaşılmıştır.

Tablo 6.13. Ergo-MHDİAP_İKO modelinin $as^{\bar{U}}$ 'nün değişen değerlerine göre elde edilen sonuçları

	$as^{\bar{U}} = 2$	$as^{\bar{U}} = 3$
$C(dk^{-3})$	224	216
Çözüm süresi	2,16	2,55

$$1.(h_4): p_{41} + p_{42} + p_{43} = 152$$

$$2.(h_5): p_{54} + p_{55} + p_{56} = 224$$

$$3.(h_1): p_{18} + p_{1,10} + p_{1,12} = 139$$

$$4.(h_7): p_{7,11} + p_{7,13} = 124$$

$$5.(h_6): p_{6,14} + p_{6,15} = 178$$

$$6.(h_2): p_{27} + p_{29} + p_{2,16} = 217$$

$$7.(h_3): p_{3,17} + p_{3,18} = 207$$

Şekil 6.20. $as^{\ddot{u}} = 2$ olduğunda Ergo-MHDİAP_İKO için elde edilen çözüm

$$1.(h_5): p_{51} + p_{52} + p_{53} + p_{54} = 216$$

$$2.(h_2): p_{25} + p_{26} = 194$$

$$3.(h_1): p_{18} + p_{1,10} + p_{1,12} = 139$$

$$4.(h_4): p_{4,11} + p_{4,13} = 132$$

$$5.(h_7): p_{7,14} + p_{7,15} = 126$$

$$6.(h_6): p_{67} + p_{69} + p_{6,16} = 208$$

$$7.(h_3): p_{3,17} + p_{3,18} = 207$$

Şekil 6.21. $as^{\ddot{u}} = 2$ olduğunda Ergo-MHDİAP_İKO için elde edilen çözüm

Tablo 6.13'te MHDİAP_GT için $as^{\ddot{u}}$ 'nin değişen değerlerine göre rasgele seçilen çözümde sırasıyla C 'nin 224 ve 216 dk^{-3} olduğu görülmektedir. Burada, C 'de MHDİAP_ÇF_ÇD'ye göre bir miktar artış olduğu gözlemlenmiştir.

Aydınlatma seviyelerine göre incelendiğinde, MHDİAP için Şekil 6.20 ve 6.21'de yüksek aydınlatma gereken görevler kırmızı renkle belirtilmiş olup, sırasıyla 2 ve 3 ayrı iş istasyonu veya işçiye dağıtılmıştır.

Diğer taraftan, çevresel faktörlerden gürültü seviyesi test edilmelidir. Tablo 6.14'te gürültü parametresi olan Eşitlik (6.10) ile $as^{\ddot{u}}$ 'nün değişen değerlerine göre oluşan gürültü seviyeleri görülmektedir.

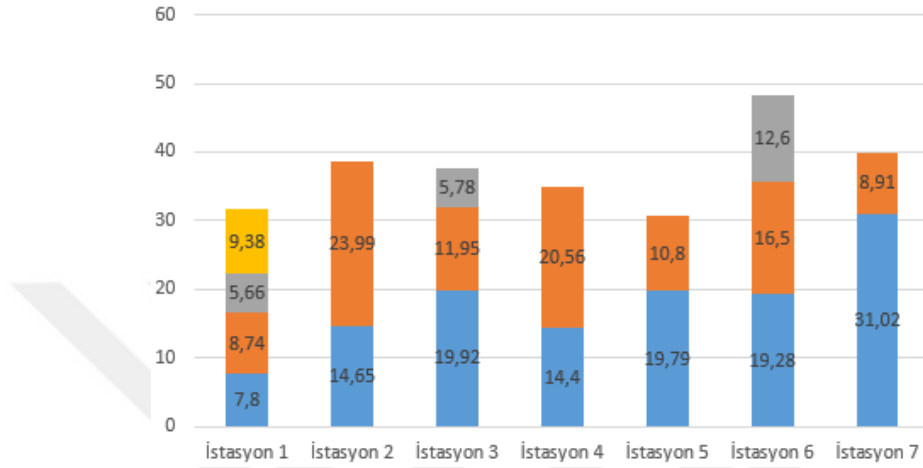
Tablo 6.14. MHDİAP_İKO modelinde $as^{\ddot{u}}$ 'nün değişen değerlerine göre ortaya çıkan gürültü seviyeleri (dB)

İstasyonlar	$as^{\ddot{u}} = 2$	$as^{\ddot{u}} = 3$
S_1	83	84
S_2	84	84
S_3	85	85
S_4	79	79
S_5	79	79
S_6	85	85
S_7	80	80

Önerilen Ergo-MHDİAP_İKO modeli ile görevler gerçekleştirildiklerinde çalışma ortamına aktardıkları gürültü seviyeleri, gürültü maruziyeti sınır değerini aşmayacak şekilde

iş istasyonlarına atanmaktadır. Tablo 6.14'te görüldüğü gibi, gürültü kısıtı dikkate alındığında, 85 dB'yi aşmayacak şekilde görev atamaları yapılmıştır.

Eşitlik (6.22) ile sağlanan, UOÇD için süre bağımlı REBA skorlarının dağılımları Şekil 6.22'de verilmektedir. Buradan süre bağımlı REBA skorlarının belirlenen gün içi zorlanma seviyesini aşmadan bir dağılım yaptığı gözlenmektedir.



Şekil 6.22. MHDİAP_İKO kapsamında UOÇD için süre bağımlı REBA skoru dağılımları

İş kazası olasılıkları kapsamında ise, Tablo 6.14'te elde edilen sonuçlara ulaşılmıştır. Tablo 6.15'te yer alan Z değerleri olasılık fonksiyon değerleri olup; h_1 işçisi için Z 'ye karşılık gelen iş kazası olasılık değerleri yine Tablo 6.14'te görülmektedir.

Tablo 6.15. MHDİAP_İKO PS'den elde edilen Z değerlerine göre iş kazası olasılık değerleri

Çözümler	$as^{\ddot{U}} = 3$		$as^{\ddot{U}} = 2$	
	h_1	İş Kazası Olasılıkları	h_1	İş Kazası olasılıkları
1.çözüm	-3,798	0,02	-1,428	0,19
2.çözüm	-3,283	0,04	-1,07	0,25
3.çözüm	-2,768	0,06	-0,712	0,33
4.çözüm	-2,253	0,10	-0,354	0,41
5.çözüm	-1,738	0,15	0,004	0,50
6.çözüm	-1,223	0,23	0,362	0,59
7.çözüm	-0,708	0,33	0,72	0,68
8.çözüm	0,322	0,58	1,078	0,75
9.çözüm	0,837	0,70	1,436	0,80
10.çözüm	1,354	0,79	2,15	0,89

İş kazası olasılıkları incelendiğinde işçi özelliklerine göre atama ve dengeleme yaptıkça C 'de artış gözlenmektedir. Burada dikkati çeken nokta, PS çözümlerinde de

görüldüğü gibi değişen $as^{\bar{u}}$ değerlerine göre artışın eğiminin değişmesidir. Bir diğer nokta ise, $as^{\bar{u}}$ değerinin 3'ten 2'ye düşmesi sonucu iş kazası olasılığının yükselmesidir.

6.1.4 Model 4: Ergo-MHDİAP_ET

Bu modelde, MHDİAP_ÇF_ÇD'de fizyolojik faktörlerin yer alması hedeflenmiştir. Burada, işçilere dengeli iş yükü dağılımının yapılması amaçlanmaktadır ve iş yükü görev bazında enerji tüketiminin belirlenmesiyle değerlendirilmiştir. Ergo-MHDİAP_ET modelinde, geliştirilen MHDİAP_ÇF_ÇD modelini C ile beraber enerji tüketimi fonksiyonu değerlendirmektedir. Buna göre, iki amaçlı Ergo-MHDİAP_ET modeli elde edilmiş ve sonuçlar verilmiştir. Sonuçlar için PS'ler sunulmuş ve seçim karar vericiye bırakılmıştır.

Ergo-MHDİAP_ET modelinde, Bölüm 6.1.1'de verilen parametre ve değişkenlere ek olarak aşağıdaki parametre eklenmiştir.

Parametre:

e_i : i görevi gerçekleştirildiğinde ortaya çıkan enerji tüketim miktarı

Amaç fonksiyonu:

MHDİAP_ÇF_ÇD'de var olan amaca ek olarak Eşitlik (6.17) tanımlanmıştır.

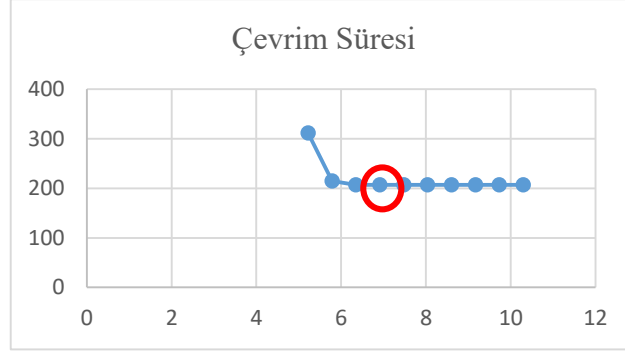
$$\text{Min} \left\{ \text{Max} \left\{ \sum_{h \in H} \sum_{i \in N} e_i x_{shi} \right\} \right\} = \text{Min } E_r, \quad \forall s \quad (6.17)$$

$$E_r = \text{Max} \left\{ \sum_{h \in H} \sum_{i \in N} e_i x_{shi} \mid s = 1, \dots, m \right\}$$

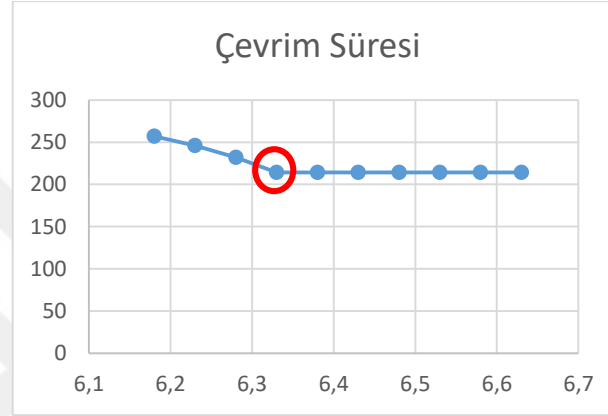
Kısıt (6.17) ile işçiler arasındaki enerji tüketim düzgünlüğü sağlanması hedeflenmiştir.

6.1.4.1 Model 4: Ergo-MHDİAP_ET Uygulaması

Bölüm 6.1.1.1'de tanımlanan problemde kullanılan parametrelere ek olarak e_i değeri rassal bir şekilde üretilmiştir. $as^{\bar{u}}$ 'nün farklı değerlerine göre, Şekil 6.23'te ve Şekil 6.24'te Ergo-MHDİAP_ET çözümüne yer verilmiştir.



Şekil 6.23. $as^U = 3$ olduğunda Ergo-MHDİAP_ET için elde edilen sonuçlar



Şekil 6.24. $as^U = 2$ olduğunda Ergo-MHDİAP_ET için elde edilen sonuçlar

Şekil 6.23'te ve Şekil 6.24'te her bir nokta uygun bir çözümü göstermektedir. İş istasyonlarına görev ve işçi atamasında her uygun çözüm için C ve enerji tüketimi hesaplanmıştır. Bu iki amaç doğrultusunda birbirlerine baskın olmayan çözümler elde edilerek PS'ler oluşturulmuştur. Bu PS değerleri, hem C hem de enerji tüketimi açısından tüm uygun noktaları göstermektedir. Şekil 6.23 ve 6.24'te görüldüğü gibi, C ve enerji tüketimi fonksiyonları farklı dengeleme ve atama çözümleri vermektedir.

Sonuçlara bakıldığında, önerilen modelde, Eşitlik (1) ile Eşitlik (6.17)'de tanımlanan çelişen iki amacın olması, Şekil 6.23 ve Şekil 6.24'deki sonuçları ortaya koymaktadır. Her iki şekilde de görüldüğü gibi, C ve enerji tüketimi fonksiyonları farklı dengeleme çözümleri vermektedir. Bu durum, iki amacın farklı uygulanabilir dengeleme sonuçlarına bağlı olarak C ve enerji tüketimi optimal dengeleme kararını oluşturmaktadır. Karar vericilerin belirleyeceği ve kullanacağı optimum dengeleme kararı, bu iki çelişen amacın nasıl belirlendiği ve modelde ne şekilde kullanıldığında göre değişmektedir. Şekil 6.23 ve Şekil 6.24 incelendiğinde ilk göze çarpan durum, iki çözüm grafiğinde de soldan sağa azalış gözlenmesidir. Bunun sebebi, enerji tüketimini dengelenmeye çalışılırken C 'den feragat

edilmesidir. Diğer bir deyişle, 1 birim en büyük enerji tüketimi azaltıldığında C 'de ne kadar artış olduğu ve optimal çözümler arasındaki farklar net bir şekilde görülmektedir. Buradan, işçilerin en büyük enerji tüketimini azalttıkça C 'de artış olduğu görülmüştür.

Önerilen modelde, aynı aydınlatma seviyelerine ihtiyaç duyan görevlerin aynı iş istasyonlarına atanması önemsendiği için, $as^{\ddot{U}} = 2$ kapsamında başlangıç Ergo-MHDİAP_ÇF_ÇD çözümüne yakın sonuçlar elde edilmesi nedeniyle büyük değişimler gözlenmemiştir. Bu nedenle, diğer faktörlerden farklı olarak büyük sıçrayışlar oluşmamıştır.

Elde edilen PS çözümlerinin ergonomik faktörleri sağladığını gösterebilmek adına herhangi bir çözüm seçilmiştir ve Tablo 6.16'da Ergo-MHDİAP_ET modeli amaç fonksiyonu değerleri elde edilmiştir. Değişen $as^{\ddot{U}}$ değerlerine göre iki çözüm olduğu için PS çözümleri arasından dördüncü noktayı gösteren çözüm ele alınmış ve Şekil 6.25 ve 6.26'da sonuçlar paylaşılmıştır.

Tablo 6.16. Ergo-MHDİAP_ET modelinde değişen $as^{\ddot{U}}$ değerlerine göre elde edilen sonuçlar

	$as^{\ddot{U}} = 2$	$as^{\ddot{U}} = 3$
$C(dk^{-3})$	214	207
Çözüm süresi	0,56	1,03

$$1.(h_3): p_{31} + p_{32} = 111$$

$$2.(h_5): p_{54} + p_{55} + p_{57} = 211$$

$$3.(h_4): p_{43} + p_{46} = 171$$

$$4.(h_2): p_{28} + p_{2,10} + p_{2,12} = 139$$

$$5.(h_1): p_{1,11} + p_{1,13} = 109$$

$$6.(h_7): p_{7,14} + p_{7,15} + p_{7,16} = 214$$

$$7.(h_6): p_{69} + p_{6,17} + p_{6,18} = 185$$

Şekil 6.25. $as^{\ddot{U}} = 2$ olduğunda Ergo-MHDİAP_ET modelinden elde edilen çözüm

$$1.(h_4): p_{41} + p_{43} + p_{44} = 193$$

$$2.(h_5): p_{52} + p_{55} + p_{56} = 202$$

$$3.(h_1): p_{18} + p_{1,10} + p_{1,12} = 139$$

$$4.(h_6): p_{67} + p_{69} + p_{6,11} = 165$$

$$5.(h_7): p_{7,13} + p_{7,14} = 146$$

$$6.(h_2): p_{2,15} + p_{2,16} = 203$$

$$7.(h_3): p_{3,17} + p_{3,18} = 207$$

Şekil 6.26. $as^{\ddot{U}} = 3$ olduğunda Ergo-MHDİAP_ET modelinden elde edilen çözüm

Tablo 6.16’da MHDİAP_ET için $as^{\ddot{U}}$ ’nin değişen değerlerine göre rasgele seçilen çözüm için sırasıyla C ’nin 214 ve 207 dk^{-3} olduğu görülmektedir. Burada, C ’de, $as^{\ddot{U}}$ değeri artıkça MHDİAP_ÇF_ÇD’ye göre bir miktar artış söz konusu olmuştur.

Aydınlatma seviyelerine göre MHDİAP_ET modeli incelendiğinde, MHDİAP için Şekil 6.25 ve 6.26’da yüksek aydınlatma gereken görevler kırmızı renkle belirtilmiş olup; sırasıyla 2 ve 3 ayrı iş istasyonuna veya işçiye dağıtılmıştır.

Diğer taraftan, çevresel faktörlerden gürültü seviyesi test edilmelidir. Tablo 6.17’de, gürültü parametresi olan Eşitlik (6.10) ile $as^{\ddot{U}}$ ’nin değişen değerlerine göre oluşan gürültü seviyeleri görülmektedir.

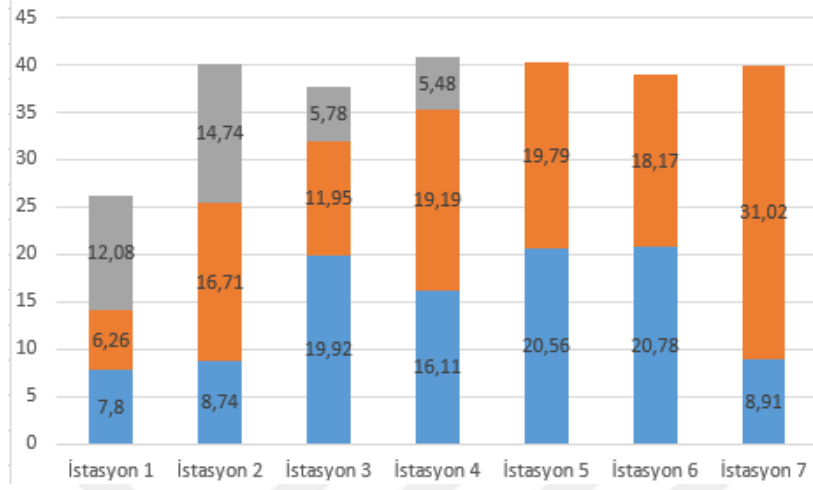
Tablo 6.17. MHDİAP_ET için $as^{\ddot{U}}$ ’nün değişen değerlerine göre ortaya çıkan gürültü seviyeleri (dB)

İstasyonlar	$as^{\ddot{U}} = 2$	$as^{\ddot{U}} = 3$
S_1	82	83
S_2	81	80
S_3	84	85
S_4	84	84
S_5	79	78
S_6	78	79
S_7	80	80

Önerilen Ergo-MHDİAP_ET modeli ile görevler gerçekleştirildiklerinde çalışma ortamına aktardıkları gürültü seviyeleri, gürültü maruziyeti sınır değerini aşmayacak şekilde iş istasyonlarına atanmaktadır. Tablo 6.17’de görüldüğü gibi, gürültü kısıtı dikkate alındığında, 85 dB’yi aşmayacak şekilde görev atamaları yapılmıştır.

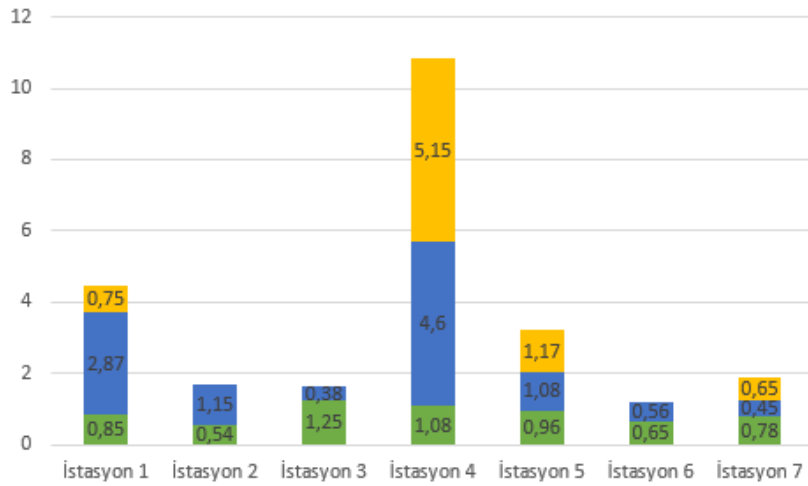
UOÇD’ye ilişkin süre bağımlı REBA skoru dağılımları ise Şekil 6.27’de verilmektedir. Şekil 6.27’de de görüldüğü gibi, süre bağımlı REBA skorlarının, Eşitlik (6.11) ile sağlanan süre bağımlı REBA skoru sınır değerini aşmadan bir dağılım yaptığı gözlenmektedir. Burada, MHDİAP_ÇF_ÇF, Ergo-MHDİAP_GT ve Ergo-MHDİAP_İKO modellerinden ele edilen süre bağımlı REBA skoru dağılımlarından farklı olarak, daha düzgün bir dağılım elde edildiği dikkat çekmektedir. Bunun sebebi, modelin amaç

fonksiyonunda yer alan enerji düzgünlüğünün de işçi ve görev özelliklerine göre sağlanmasıdır ve bu durumun, süre bağımlı REBA skorlarını daha fazla iyileştirdiği görülmektedir.

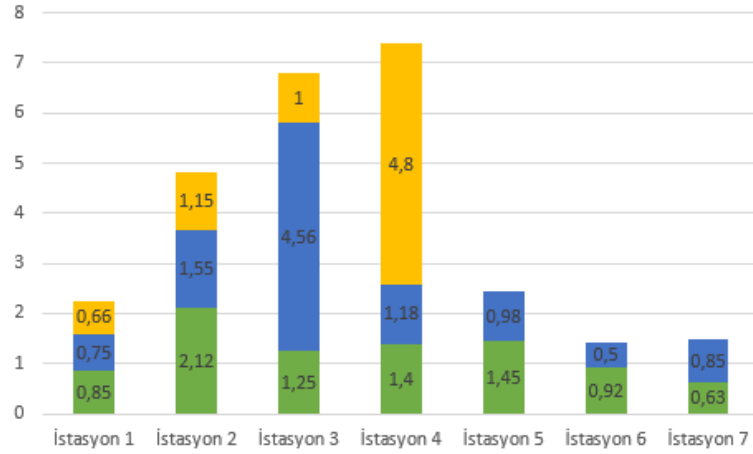


Şekil 6.27. MHDİAP_ÇF_ÇD kapsamında UOÇD için süre bağımlı REBA skoru dağılımları

Detaylı bir inceleme yapılırsa, enerji tüketim düzgünlüğü sağlanmadan öncesi ve sonrası için sırasıyla Şekil 6.28 ve 6.29 elde edilmiştir. Her ne kadar farklı veriler kullanıldığında sonuçların değişeceği düşünülse de sonuçlar ergonomik düzenlemenin gerekliliğini ortaya koymaktadır.



Şekil 6.28. MHDİAP modelinde enerji tüketimi düzgünlüğü sağlanmadan önceki iş istasyonlarına ait enerji tüketimi dağılımı



Şekil 6.29. Erg-MHDİAP_ET modelinde enerji tüketimi düzgünlüğü sağlandıktan sonra iş istasyonlarına ait enerji tüketimi dağılımı

Şekil 6.28 ve 6.29 incelendiğinde, modelde en büyük enerji tüketim miktarının en küçüklenmesi sebebiyle, bireysel faktörlere göre ve işçilerin görevlerde harcadıkları enerji miktarına göre bir atama ve dengeleme yapılması gerekliliği ortaya koyulmaktadır.

6.1.5 Model 5: Ergo-MHDİAP_D

Bu modelde, MHDİAP_ÇF_ÇD'de bireysel faktörlerden deneyim faktörü dikkate alınarak, görevlerin gerektirdiği deneyime göre işçilerin atanması sağlanmıştır. Önerilen Ergo-MHDİAP_D'de, MHDİAP_ÇF_ÇD'yi C ile beraber deneyim fonksiyonu değerlendirmektedir. İş kazası olasılıkları hesaplanırken dikkate alınan işçilerin deneyim sürelerinde yola çıkılarak Tablo 6.18'deki skala oluşturulmuştur ve geliştirilen modelde kullanılan parametreler rassal olarak elde edilmiştir. Buna göre, iki amaçlı Ergo-MHDİAP_GT modeli elde edilmiş ve sonuçlar verilmiştir. Sonuçlar için PSs sunulmuş ve seçim, karar vericiye bırakılmıştır.

Tablo 6.18. İşçilerin deneyimlerine göre tanımlanan Y_h deneyim düzeyi puanı

Deneyim yılı	Y_h
0-5 yıl	1
5-10 yıl	2
10 ve üzeri	3

Bölüm 6.1.1’de verilen parametre ve değişkenlere ek olarak aşağıdaki parametreler tanımlanmıştır.

Parametre:

Y_{hi} : h işçisinin i görevindeki deneyim düzey puanı

Y_i : i görevinin gerektirdiği deneyim düzey puanı

Y_{max_s} : s istasyonuna atanan en büyük deneyim düzey puanı

Amaç fonksiyonu:

$$\min \left\{ \max \left\{ \sum_{h \in H} \sum_{i \in N} (Y_{hi} - Y_i) x_{shi} \right\} \right\} = \min Y_{max_s} \quad \forall s \quad (6.18)$$

$$Y_{max_s} = \max \left\{ \sum_{h \in H} \sum_{i \in N} (Y_{hi} - Y_i) x_{shi} \mid s = 1, \dots, m \right\}$$

Kısıt (6.18) ile görevlerin gerektirdiği deneyim ile işçi deneyimleri arasındaki düzgünlüğün sağlanması hedeflenmiştir.

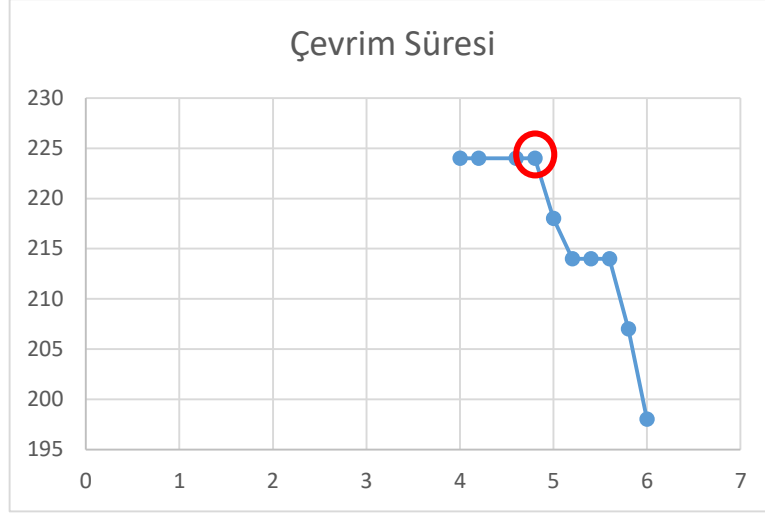
Kısıt:

Görevin gerektirdiği deneyim ile işçinin sahip olduğu deneyimi eşleştirmek amacıyla Eşitlik (6.19)’da verilen kısıt tanımlanmıştır.

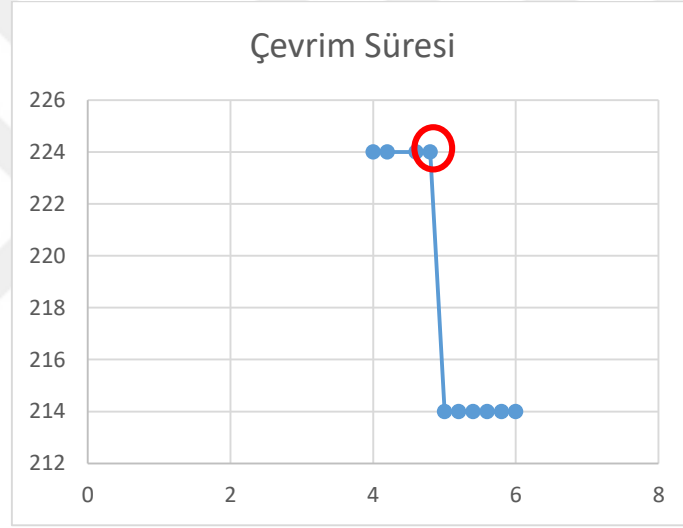
$$\sum_{s \in S} Y_{hi} x_{shi} \geq \sum_{s \in S} Y_i x_{shi} \quad (6.19)$$

6.1.5.1 Ergo-MHDİAP_D Uygulaması

Bölüm 1.1.1.1’de tanımlanan problemde kullanılan parametrelere eklenen Y_i ve Y_{hi} parametrelerinin değerleri rassal olarak üretilmiştir. $as^ü$ ’nün farklı değerlerine göre, Şekil 6.30’da ve Şekil 6.31’de Ergo-MHDİAP_D çözümüne yer verilmiştir.



Şekil 6.30. $as^{\ddot{u}} = 3$ olduğunda Ergo-MHDİAP_D modelinden elde edilen sonuçlar



Şekil 6.31. $as^{\ddot{u}} = 2$ olduğunda Ergo-MHDİAP_D modelinden elde edilen sonuçlar

Şekil 6.30'da ve Şekil 31'de, her nokta uygun bir çözümü göstermektedir. İş istasyonlarına görev ve işçi atamasında, her uygun çözüm için C ve deneyim uygunluğu ve düzgünlüğü hesaplanmıştır. Bu iki amaç doğrultusunda birbirlerine baskın olmayan çözümler elde edilerek PS'ler oluşturulmuştur. Bu PS değerleri, hem C hem de deneyim açısından tüm uygun noktaları göstermektedir. Şekil 6.30 ve 6.31'de görüldüğü gibi, C ve deneyim fonksiyonları farklı dengeleme ve atama çözümleri vermektedir.

Sonuçlara bakıldığında, önerilen modelde, Eşitlik (1) ile Eşitlik (6.18)'de tanımlanan çelişen iki amacın olması, ilaveten Eşitlik (6.19)'da deneyim uygunluk kısıtının yer alması, Şekil 6.30 ve Şekil 6.31'deki sonuçları ortaya çıkarmaktadır. Şekil 6.30 ve Şekil 6.31 incelendiğinde ilk göze çarpan durum, iki çözüm grafiğinde de soldan sağa azalış

gözlenmesidir. Bunun sebebi, deneyim düzgünlüğü dengelenmeye ve uygunluğu sağlanmaya çalışılırken C 'den feragat edilmesidir. Diğer bir deyişle, deneyim düzgünlüğü sağlandıkça çevrim süresinde ne kadar artış olduğu ve optimal çözümler arasındaki farklar net bir şekilde görülmektedir. Buradan, işçilerin düzgünlük ve uygunluk değerleri sağlandıkça C 'de artış olduğu görülmüştür.

Önerilen modelde, aynı aydınlatma seviyelerine ihtiyaç duyan görevlerin aynı iş istasyonlarına atanmasının önemszenmesi nedeniyle, $as^{\ddot{U}} = 2$ için daha dik bir azalış elde edilmiştir. $as^{\ddot{U}} = 2$ çözümünde dikkat çeken nokta, tek bir büyük sıçrayışla C 'de kötüleşme gerçekleşmesidir. Bu da uygun çözüm alanının çok daraldığı sonucunu ortaya çıkarmaktadır.

Elde edilen PS çözümlerinin ergonomik faktörleri sağladığını gösterebilmek adına herhangi bir çözüm noktası seçilmiştir ve Tablo 6.19'da bu çözüm noktası kapsamında Ergo-MHDİAP_D'ye ait amaç fonksiyonu değerleri elde edilmiştir. Değişen $as^{\ddot{U}}$ değerlerine göre iki çözüm olduğu için PS'ler arasından son çözüm ele alınmış ve Şekil 6.32 ve 6.33 ile sonuçlar paylaşılmıştır.

Tablo 6.19. Ergo-MHDİAP_D modelinde $as^{\ddot{U}}$ değerlerine göre elde edilen sonuçlar

	$as^{\ddot{U}} = 2$	$as^{\ddot{U}} = 3$
$C(dk^{-3})$	224	224
Çözüm süresi	0,34	0,45

- | | |
|---|--|
| 1.(h_6): $p_{61} + p_{62} + p_{63} = 215$ | 5.(h_1): $p_{1,13} + p_{1,14} = 151$ |
| 2.(h_5): $p_{54} + p_{55} + p_{56} = 224$ | 6.(h_2): $p_{2,15} + p_{2,16} = 203$ |
| 3.(h_4): $p_{48} + p_{4,10} + p_{4,12} = 147$ | 7.(h_3): $p_{3,17} + p_{3,18} = 207$ |
| 4.(h_7): $p_{77} + p_{79} + p_{7,11} = 159$ | |

Şekil 6.32. $as^{\ddot{U}} = 2$ olduğunda Ergo-MHDİAP_D modelinden elde edilen çözüm

- | | |
|---|---|
| 1.(h_6): $p_{61} + p_{62} + p_{63} = 215$ | 5.(h_4): $p_{4,12} + p_{4,15} + p_{4,16} = 195$ |
| 2.(h_5): $p_{54} + p_{55} + p_{56} = 224$ | 6.(h_2): $p_{2,7} + p_{2,9} = 203$ |
| 3.(h_7): $p_{78} + p_{7,10} + p_{7,11} = 181$ | 7.(h_3): $p_{3,17} + p_{3,18} = 207$ |
| 4.(h_1): $p_{1,13} + p_{1,14} = 151$ | |

Şekil 6.33. $as^{\ddot{U}} = 3$ olduğunda Ergo-MHDİAP_D modelinden elde edilen çözüm

Tablo 6.19’da MHDİAP_D için $as^{\ddot{U}}$ ’nün değişen değerlerine göre rastgele seçilen çözüm için C ’nin her iki $as^{\ddot{U}}$ değeri kapsamında 224 min^{-3} olduğu görülmektedir. Burada, C ’de MHDİAP_ÇF_ÇD’ye göre bir miktar artış olduğu belirlenmiştir.

Aydınlatma seviyelerine göre inceleme yapıldığında, Şekil 6.32 ve 6.33’te yüksek aydınlatma gereken görevler kırmızı renkle belirtilmiş olup, sırasıyla 2 ve 3 ayrı iş istasyonuna veya işçiye dağıtılmıştır.

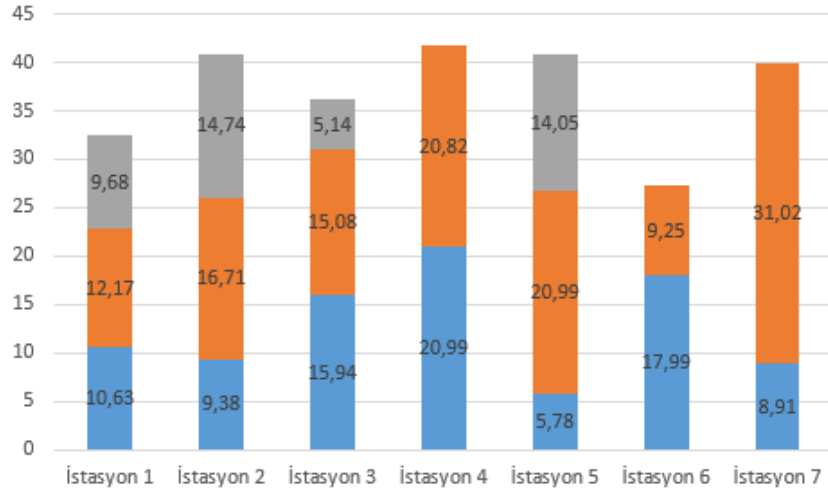
Diğer taraftan, çevresel faktörlerden gürültü seviyesi test edilmelidir. Tablo 6.20’de, gürültü parametresi olan Eşitlik (6.10) ile $as^{\ddot{U}}$ ’nin değişen değerlerine göre oluşan gürültü seviyeleri görülmektedir.

Tablo 6.20. MHDİAP_D için değişen $as^{\ddot{U}}$ değerlerine göre ortaya çıkan gürültü seviyeleri (dB)

İstasyonlar	$as^{\ddot{U}} = 2$	$as^{\ddot{U}} = 3$
S_1	83	83
S_2	84	84
S_3	85	84
S_4	84	79
S_5	79	85
S_6	78	83
S_7	80	80

Önerilen Ergo-MHDİAP_D modeli ile görevler gerçekleştirildiklerinde çalışma ortamına aktardıkları gürültü seviyeleri, gürültü maruziyeti sınır değerini aşmayacak şekilde iş istasyonlarına atanır. Tablo 6.20’de görüldüğü gibi, gürültü kısıtı dikkate alındığında, 85 dB’yi aşmayacak şekilde görev atamaları yapılmıştır.

Eşitlik (6.11) ile sağlanan UOÇD için süre bağımlı REBA skorlarının dağılımları Şekil 6.34’de verilmektedir. Burada, süre bağımlı REBA skorlarının belirlenen gün içi zorlanma seviyesini aşmadan bir dağılım yaptığı gözlenmektedir.



Şekil 6.34. MHDİAP_D kapsamında UOÇD için süre bağımlı REBA skorları dağılımları

Üretim miktarındaki artışın C ile doğrudan ilişkili olduğu bilinen bir gerçektir. Bu nedenle, PS seçimi hattın verimliliği açısından büyük öneme sahiptir. Ergonomik faktörlerin üretim verimliliğini etkiledikleri göz önüne alınırsa, genel olarak, PS'ler değerlendirilirken çözümün içerdiği ergonomik şartların da dikkate alınmasının uygun bir yaklaşım olduğu belirlenmiştir. Her ne kadar C 'nin azaltılması ön plana çıksa da önerilen modelde amaçlanan, üretim ortamının ergonomik koşullarının iyileştirilmesi ile işçi memnuniyetinin artırılmasıdır. Bu şekilde, üretim verimliliğinin artırılmasına katkı sağlanacaktır. Çalışma kapsamında ortaya konulan PS'ler, karar vericilere ergonomik risk faktörleri dikkate alınarak elde edilen sonuçlar sayesinde yol göstermektedir. Bu sebeple, montaj hattı dengeleme ve işçi atama yaparken, C ile işçi istekleri, enerji tüketimi, iş kazası olasılıkları ve deneyim değişkenlerinden nasıl etkilendiğini anlamak ve çevrim süresi ile beraber diğer ergonomik faktörlerle sırası ile karşılaştırarak en uygun çözümü tanımlamak için PS'lerin belirlenmesi karar vericilere esneklik sağlayacaktır.

6.1.6 Model 6: ERGO-MHDİAP

Bu model, MHDİAP_ÇF_ÇD, Ergo-MHDİAP_GT, Ergo-MHDİAP_İKO, Ergo-MHDİAP_E ve Ergo-MHDİAP_D'nin bir arada yer aldığı modeldir. Burada amaçlanan, tezde dikkate alınan bütün ergonomik risk faktörlerinin Ergo-MHDİA modeline entegre edilmesidir. Bu kapsamda, C 'nin en küçüklemsi üzerine dört amacın daha eklenmesi sebebiyle çok amaçlı bir değerlendirme yapılması gerekmektedir. Ergo-MHDİAP_GT, Ergo-MHDİAP_İKO, Ergo-MHDİAP_E ve Ergo-MHDİAP_D kapsamında belirlenen

amaçlar aşağıda tanımlanmış ve bir arada değerlendirebileceği tek bir amaca dönüştürülmüştür.

AF1: Eşitlik (6.1)

AF2: Eşitlik (6.15)

AF3: Eşitlik (6.16)

AF4: Eşitlik (6.17)

AF5: Eşitlik (6.18)

AF1, MHDİAP amaç fonksiyonu olup, *C*'nin en küçüklemesini;

AF2, görev tercih fonksiyonu olup, tercihin en büyüklemesini;

AF3, iş kazası olasılıkları fonksiyonu olup, iş kazası olasılığının en küçüklemesini;

AF4, enerji tüketimi fonksiyonu olup, en büyük enerji tüketiminin en küçüklemesini ve son olarak,

AF5, işçi deneyim fonksiyonu olup, görevlerin gerektirdiği deneyim düzeyi ile işçinin sahip olduğu deneyim düzeyi arasındaki farkın en küçüklemesini tanımlamaktadır.

AF1, *AF2*, *AF3*, *AF4* ve *AF5* ile tanımlanan amaçların bir arada değerlendirilmesi için çok amaçlı programlamadan yararlanılmıştır. Birlikte değerlendirilen bu amaçlar için ağırlıklandırma veya önceliklendirme yapmanın mantıklı olmayacağı Bölüm 6'da tartışılmış ve PS'ler önerilerek birbirleriyle ödünleşimleri aktarılmıştır. Ancak bu yöntem, sadece iki amaç için kullanılabildiği için ikiden fazla amaç olduğunda CSs'lerin ortaya konmasına gerek duyulmuştur. Bu kararın sebebi, her bir ergonomik risk faktörünü birbirine karşı üstün olarak tanımlamanın veya bir hedef koymanın ergonomik perspektife çok da uygun olmamasıdır.

Bu kapsamda tanımlanan uzlaş fonksiyonu (UF) Eşitlik (6.20) ile verilmiştir. Burada amaç, ideal değerlerden sapmanın bir fonksiyonunu tanımlayarak uygun çözüm alanı üzerinde optimum değeri bulmaktır. Tek tek amaç fonksiyonu olarak çözüldüklerinde elde edilen değerler sırasıyla $\overline{AF1}$, $\overline{AF2}$, $\overline{AF3}$ ve $\overline{AF4}$ olarak tanımlandığında, bu değerlerden olan mutlak sapmaların en küçüklemesi sağlanmıştır. Oluşturulan fonksiyon ile ideal değerlerden sapmaların en küçüklemesi hedeflenmektedir. Bu sebeple, UF'nin en küçüklemesi amaçlanmıştır.

$$\begin{aligned}
Min UF = & |\overline{AF1} - AF1| + |\overline{AF2} - AF2| + |\overline{AF3} - AF3| + |\overline{AF4} - AF4| \\
& + |\overline{AF5} - AF5|
\end{aligned} \tag{6.20}$$

6.1.6.1 Ergo-MHDİAP Uygulaması

Temel MHDİAP'ye görev tercihleri, iş kazası olasılığı, enerji tüketimi ve deneyim eşleştirmesi faktörlerinin C ile beraber değerlendirme kriteri olarak eklendiği, aydınlatma, gürültü, UOÇD risk faktörlerinin ve işçi-görev uygunluk durumunun ise, uygun çözüm alanını oluşturduğu model için elde edilen çözüm Tablo 6.21'de gösterilmektedir.

Tablo 6.21. Değişen $as^{\bar{u}}$ değerlerine göre önerilen bütünsel Ergo-MHDİAP modelinden elde edilen sonuçlar

	C	İşçi İstekleri	Enerji Tüketimi	İş Kazası Olasılık Değeri	Deneyim Düzgünlüğü	Uzlaşık Çözüm Değeri	Çözüm Süresi
$as^{\bar{u}} = 2$	224	23	6,18	0,41	5	31,48	1,06
$as^{\bar{u}} = 3$	215	32	5,78	0,08	5	30,3	1,36

Önerilen modelde, aynı aydınlatma seviyelerine ihtiyaç duyan görevlerin aynı iş istasyonlarına atanmasının önemsenmesi nedeniyle, $as^{\bar{u}} = 2$ için daha yüksek sonuçlar elde edilmiştir. Ergo-MHDİA modelinin çözümünde $as^{\bar{u}}$ değeri ne kadar düşürülürse, modelin çözüm uzayı daralmakta ve bu sonuçlar da makul kabul edilmektedir. Diğer bir ifadeyle, $as^{\bar{u}}$ değeri 3'ten 2'ye düşürüldüğünde, tüm amaçlarda en iyi değerden uzaklaşma açısından kötüleşmeyi beraberinde gelmektedir. Bu sebeple, amaç fonksiyonları arasındaki çelişki daha belirgin görülmektedir.

Uzlaşık çözümün detaylı sonuçları ise, Şekil 6.35 ve Şekil 6.36'da değişen $as^{\bar{u}}$ değerlerine göre verilmiştir.

$$1.(h_6): p_{61} + p_{62} + p_{63} = 215$$

$$2.(h_5): p_{54} + p_{55} + p_{56} = 224$$

$$3.(h_2): p_{28} + p_{2,10} + p_{2,12} = 139$$

$$4.(h_4): p_{47} + p_{4,11} = 103$$

$$5.(h_1): p_{1,13} + p_{1,14} = 151$$

$$6.(h_7): p_{79} + p_{7,15} + p_{7,16} = 183$$

$$7.(h_3): p_{3,17} + p_{3,18} = 207$$

Şekil 6.35. $as^{\ddot{u}} = 2$ olduğunda Ergo-MHDİAP modelinden elde edilen çözüm

$$1.(h_5): p_{51} + p_{52} + p_{54} + p_{55} = 215$$

$$2.(h_4): p_{43} + p_{46} = 171$$

$$3.(h_3): p_{37} + p_{38} = 204$$

$$4.(h_2): p_{2,10} + p_{2,11} + p_{2,12} = 110$$

$$5.(h_1): p_{1,13} + p_{1,14} = 151$$

$$6.(h_7): p_{79} + p_{7,15} + p_{7,16} = 182$$

$$7.(h_6): p_{6,17} + p_{6,18} = 150$$

Şekil 6.36. $as^{\ddot{u}} = 3$ olduğunda Ergo-MHDİAP modelinden elde edilen çözüm

Sonuçlar aydınlatma seviyelerine göre incelendiğinde, Ergo-MHDİAP için Şekil 6.25 ve 6.26'da yüksek aydınlatma gereken görevler kırmızı renkle belirtilmiş olup sırasıyla, 2 ve 3 ayrı iş istasyonu veya işçiye dağıtılmıştır.

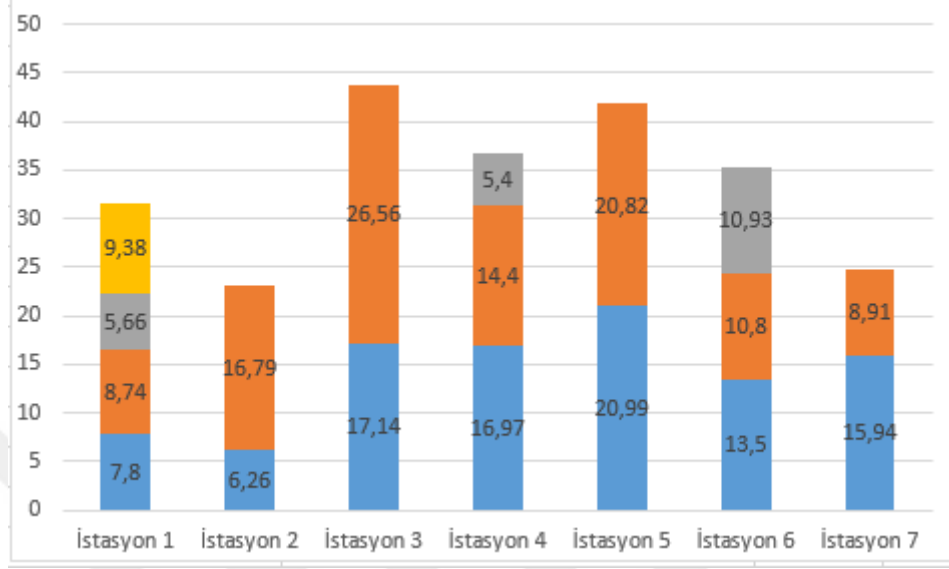
Diğer taraftan, çevresel faktörlerden gürültü seviyesi test edilmelidir. Tablo 6.22'de gürültü parametresi olan Eşitlik (6.10) ile $as^{\ddot{u}}$ 'nün değişen değerlerine göre oluşan gürültü seviyeleri görülmektedir.

Tablo 6.22. Ergo-MHDİAP için değişen $as^{\ddot{u}}$ değerlerine göre ortaya çıkan gürültü seviyeleri (dB)

İstasyonlar	$as^{\ddot{u}} = 2$	$as^{\ddot{u}} = 3$
S_1	83	83
S_2	80	84
S_3	85	84
S_4	81	81
S_5	79	79
S_6	83	83
S_7	80	80

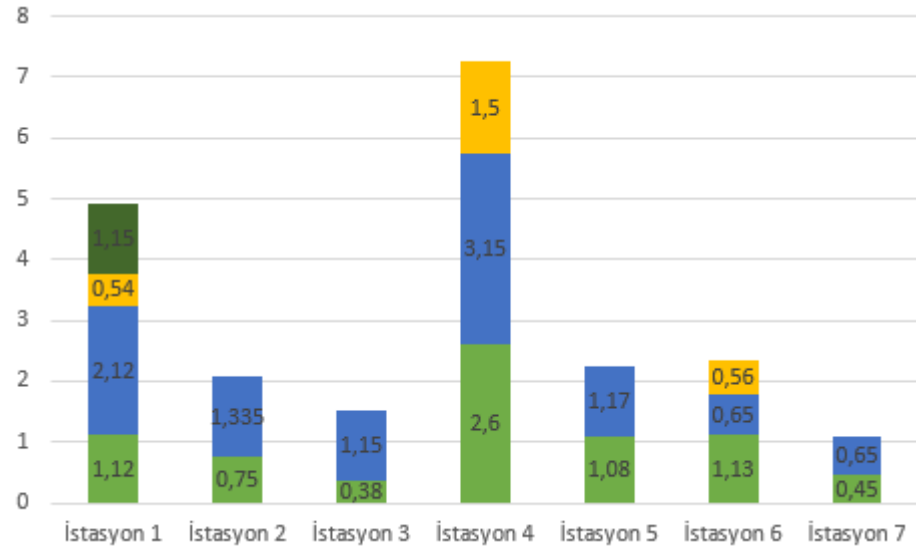
Önerilen Ergo-MHDİAP modeli ile görevler gerçekleştirildiklerinde çalışma ortamına aktardıkları gürültü seviyeleri gürültü maruziyeti sınır değerini aşmayacak şekilde iş istasyonlarına atanmaktadır. Tablo 6.20'de görüldüğü gibi, gürültü kısıtı dikkate alındığında, 85 dB'yi aşmayacak şekilde görev atamaları yapılmıştır.

Eşitlik (6.11) ile sağlanan UOÇD için süre bağımlı REBA skorlarının dağılımları Şekil 6.37 de verilmektedir. Burada, süre bağımlı REBA skorlarının belirlenen gün içi zorlanma seviyesini aşmadan bir dağılım yaptığı gözlenmektedir.



Şekil 6.37. Ergo-MHDİAP kapsamında UOÇD için süre bağımlı REBA skorlarının dağılımları

Şekil 6.38’de, Ergo-MHDİAP modelinin çözümleri görülmektedir. En büyük enerjinin en küçüklendiği yaklaşımda ideal değerlerden çok da uzaklaşılmadığı görülmektedir.



Şekil 6.38. Ergo-MHDİAP kapsamında iş istasyonlarının enerji tüketim miktarı

Uzlaşık çözümle, Ergo-MHDİAP_ÇF_ÇD arasında çözüm süresi açısından belirgin bir fark görülmemektedir. Ancak, eklenen diğer amaçların C açısından kötüleştirici bir etkisi

olmuştur. Modelin amaç fonksiyonlarında bireysel faktörlerin yer alması, süre bağımlı REBA skorlarına ve bunların dağılımlarına yansımış, Ergo-MHDİAP_İKO ve Ergo-MHDİAP_ET'deki kadar olmasa da, daha dengeli bir süre bağımlı REBA skoru dağılımı elde edilmiştir. Aydınlatma ve gürültü kısıt olarak sınırlandırma sağladığından sonuçların bir anda artışı veya azalışında etkisi büyüktür. Bununla birlikte, modeldeki tüm kısıtlar sağlanmıştır.

Ergo-MHDİAP çözümü ile Ergo-MHDİAP_GT çözümü arasında en dikkat çeken fark, süre bağımlı REBA skor dağılımlarının, birden fazla amaç olmasına rağmen düzgün dağılım ve sınır değeri aşmaması durumlarını devam ettirmesidir. Ergo-MHDİAP'de, aydınlatma ve gürültü kısıtları sağlanırken, işçi görev tercihleri için pareto eğrisinin üzerinde sonuçlar bulunmuştur. $as^{\bar{U}} = 3$ için daha yüksek tercih puanları elde edilmesi beklenen bir durumdur. En iyi değerden sapmaları daha azdır. C açısından ise, 1 birim feragat söz konusudur ve tatmin edicidir. Ancak $as^{\bar{U}} = 2$ için aynı durum söz konusu değildir. Kötüleşme çok belirgindir.

Uzlaşık çözümle, Ergo-MHDİAP_İKO arasında en dikkat çeken fark, diğer faktörlerde de kötüleştiği belirgin olarak görülen $as^{\bar{U}} = 2$ için elde edilen sonuçlardır. Ancak burada, iş kazaları beklenenden daha hızlı artış göstermektedir. Daha fazla kısıtlayıcı olması durumunda, neredeyse %90'ı aşan iş kazası olması olasılığı ile karşılaşılmaktadır. Bu durum, hiçbir işletme için kabul edilebilir değildir. Süre bağımlı REBA skoru dağılımlarında ise çok büyük bir fark gözlenmemektedir.

Uzlaşık çözümle, Ergo-MHDİAP_ET arasında en çok göze çarpan fark, süre bağımlı REBA skoru dağılımlarında düzgünlüğün devam etmemesidir. Birden fazla faktör ile değerlendirilen modelde tolere edilebilir seviyede olmakla birlikte, Ergo-MHDİAP_ET modelinin bu konudaki üstünlüğü tartışılmazdır. Bununla birlikte, C 'de feragatler devam etmektedir. Çözüm süresi açısından da belirgin bir fark görülmemiştir. Pareto eğrisi üzerinde çözümler alınmakla birlikte, $as^{\bar{U}} = 2$ ve $as^{\bar{U}} = 3$ için de en iyi çözüme yakınsayan nokta çözümleri bulunmuştur.

Ergo-MHDİAP_D, Ergo-MHDİAP_ET gibi düzgün süre bağımlı REBA skoru dağılımları ortaya koymaktadır. Bu sonucun ortaya çıkması, iki modelin de işçi özelliklerine dayalı değerlendirme yapmalarından kaynaklanmaktadır. Uzlaşık çözümle kıyaslandığında

bu durum kötüleşme göstermeye devam etmektedir. Pareto eğrisi orta noktalarında bir çözüm elde edilmiştir. Çözüm süreleri açısından da bir fark bulunmamaktadır.

Tablo 6.23. MHDİAP VE MHDİAP_ÇF_ÇD modellerinin atama sonuçlarına göre amaç fonksiyonu değerleri

	<i>C</i>	İşçi İstekleri	Enerji Tüketimi	İş Kazası Olasılık Değeri	Deneyim Düzensizliği
MHDİAP	177	31	10,86	0,62	8
MHDİAP_ÇF_ÇD	198	15	10,86	0,55	6

Tablo 6.23'te ise, temel MHDİAP ve tek amaçlı MHDİAP_ÇF_ÇD çözümleri ve enerji dağılımları yer almaktadır. Ergo-MHDİAP uzlaşık çözümleriyle kıyaslandığında bazı feragatlerin ortaya çıktığı görülmektedir. MHDİAP sonuçları ergonomik değerlendirmeyi içermeginden elde edilen sonuçların büyüklüğü veya küçüklüğü tesadüfi sonuçlardır. MHDİAP_ÇF_ÇD sonuçlarına bakıldığında ise, ergonomik çözüm uzayı eklentileri *C* de dahil tüm ergonomik amaç fonksiyonlarında kötü sonuçları ortaya koymaktadır. Bu sebeple, uzlaşık çözümlerin varlığını ortaya koymak yerinde bir tercihtir.

Sonuçlara genel olarak bakıldığında ise, önerilen modelde, çelişen birden fazla amacın olması, kendi aralarında uzlaşık bir çözümü ortaya çıkarmaktadır. Buna göre elde edilen sonuçlarda optimum değerlerden edilen feragatler görülmektedir. İşçilerin ve görevlerin ergonomik koşullar altında atanması ve hattın bu koşullar altında dengelenmesi üretim verimliliğinin artırılması için gereken bir yaklaşımdır. Literatürde MHDİAP için ergonomik çerçevede bütünleşik bir atama ve dengeleme yaklaşımı daha önce hiç ele alınmamıştır. Gerçekleştirilen doktora çalışması ile MHDİAP'nin ergonomik uzantılarının geliştirilmesi hedeflenmiştir.

Geliştirilen Ergo-MHDİAP için ulaşılan çözümlerin diğer geliştirilen alt model setlerinin sonuçlarıyla tutarlı oldukları görülmektedir. Tez kapsamında geliştirilen farklı modeller sayesinde, karar vericiler hangi ergonomik amaçları dengeleme ve işçi atamada dikkate almak istiyorlarsa, onlar kapsamında işçi ve görev dağılımlarını gerçekleştirebilirler.

Ayrıca, bütünleşik modeli de kullanarak, farklı ergonomik risk faktörlerini bir arada dikkate alarak planlamalarını yapabilirler.



7 ÖNERİLEN MODELİN PERFORMANS ANALİZİ

Bu bölümde, tez kapsamında geliştirilmiş olan matematiksel modellerin (MHDİAP_ÇF_ÇD, Ergo-MHDİAP_GT, Ergo-MHDİAP_İKO, Ergo-MHDİAP_ET, Ergo-MHDİAP_D ve Ergo-MHDİAP) performansları, Heskia ve Roszieg veri setlerinden oluşturulan toplam 240 farklı test problemi üzerinde incelenmiştir.

Test problemleri, Visual Studio C programlama dili ile kodlanmış, CPLEX 12 çözücü ile Intel(R) Core (TM) i7-10700CPU 2.90 GHz işlemci, 16GB RAM özelliklerine sahip bir bilgisayar kullanılarak çözülmüştür.

Tezde önerilen matematiksel modeller, oluşturulan test problemleri üzerinde uygulanmış ve sonuçlar verilmiştir. Model MHDİAP_ÇF_ÇD için test problemlerine ilişkin sonuçlar Tablo 7.1’de verilmiştir.

Tablo 7.1. MHDİAP_ÇF_ÇD için test problemi sonuçları ve çözüm süreleri

Test Problemleri	Problem Numarası	$C (dk^{-3})$	Süre (sn)
Heskia (28 görev 4 işçili)	1	98	2,801
	2	112	2,537
	3	145	2,525
	4	101	2,517
	5	95	2,595
	6	132	2,585
	7	95	2,683
	8	111	2,612
	9	120	2,697
	10	104	2,595
Heskia (28 görev 7 işçili)	11	95	2,980
	12	122	2,995
	13	91	2,998
	14	98	2,996
	15	102	2,995
	16	106	3,020

	17	108	2,118
	18	128	3,118
	19	106	3,001
	20	103	3,14
	21	35	2,541
	22	29	2,678
	23	18	2,541
Roszieg	24	25	2,618
(25 görev	25	22	2,697
4 işçili)	26	32	2,541
	27	24	2,697
	28	26	2,697
	29	25	2,697
	30	34	2,541
	31	28	3,874
	32	25	3,657
	33	23	3,642
Roszieg	34	24	3,542
(25 görev	35	35	3,208
6 işçili)	36	18	3,456
	37	24	3,657
	38	22	3,657
	39	29	3,874
	40	19	3,22

Tablo 7.1 incelendiğinde, Miralles et al.[9] tarafından geliştirilen veri setleri sonuçları ile kıyaslandığında her problemde C 'lerde artışın devam ettiği görülmektedir. Görev sayılarında artış meydana geldikçe, bu farklılaşma daha belirgin bir şekilde gerçekleşmektedir. Tüm veri setleri için görev sayılarının az olması sebebiyle çok kısa sürede optimal sonuca ulaşıldığı görülmektedir. Çözüm sürelerinde ise belirgin bir fark bulunmamaktadır. Hatta bazı problemlerde ergonomik risk faktörleri ilave edilmesine rağmen çözüm sürelerinde azalma gözlenmiştir.

Amaç fonksiyonu olarak C 'nin yanında görev tercihlerinin de dikkate alındığı ikinci model Ergo-MHDİAP_GT için test problemi sonuçları Tablo 7.2’de verilmiştir.

Tablo 7.2. Ergo-MHDİAP_GT için test problemi sonuçları ve çözüm süreleri

Test Problemleri	Problem Numarası	$C(dk^{-3})$	Görev tercih puanı	Süre (sn)
Heskia (28 görev 4 işçili)	1	102	40	2,901
	2	114	42	2,537
	3	156	41	2,525
	4	110	38	2,517
	5	105	45	2,592
	6	150	36	2,588
	7	110	42	2,689
	8	125	50	2,625
	9	132	43	2,625
	10	119	42	2,588
Heskia (28 görev 7 işçili)	11	101	35	2,989
	12	142	27	2,998
	13	109	32	2,989
	14	112	38	2,989
	15	145	42	2,989
	16	115	39	3,025
	17	120	37	2,118
	18	138	35	3,125
	19	114	28	3,003
	20	109	30	3,20
Roszieg (25 görev 4 işçili)	21	42	38	2,524
	22	34	42	2,702
	23	25	41	2,524
	24	29	47	2,702
	25	32	35	2,702
	26	44	28	2,524
	27	36	29	2,702

Roszieg (25 görev 6 işçili)	28	35	32	2,702
	29	29	45	2,702
	30	38	38	2,644
	31	40	43	3,986
	32	29	40	3,644
	33	31	41	3,702
	34	28	32	3,644
	35	42	38	3,809
	36	25	26	3,464
	37	29	44	3,804
	38	26	37	3,804
	39	36	36	3,988
	40	27	42	3,452

Tablo 7.2’de PS’lerden elde edilen rassal bir çözüm seçilerek sonuçlar aktarılmıştır. Sonuçlar, Miralles et al.[9] tarafından geliştirilen veri setleri sonuçları ile kıyaslandığında her problemde C ’lerde artışın devam ettiği görülmektedir. Burada, PS çözümleri arasından karar verici kendi açısından, C veya görev tercih puanını göz önünde bulundurarak en iyi çözümü dikkate almaktadır. Tüm veri setleri için görev sayılarının az olması sebebiyle çok kısa sürede optimal sonuca ulaşıldığı görülmektedir. Çözüm sürelerinde ise belirgin bir fark bulunmamaktadır. Ergonomik risk faktörleri ilave edilmesine rağmen bazı problemlerde çözüm sürelerinde azalış gözlenmektedir.

Amaç fonksiyonu olarak C ’nin yanında iş kazası olasılıklarının da dikkate alındığı üçüncü model, Ergo-MHDİAP_İKO için test problemi sonuçları Tablo 7.3’te verilmiştir.

Tablo 7.3. Ergo-MHDİAP_İKO için test problemi sonuçları ve çözüm süreleri

Test Problemleri	Problem Numarası	$C (dk^{-3})$	Olasılık değerleri	Süre(sn)
Heskia	1	102	0,54	2,537
	2	114	0,71	2,525
	3	156	0,14	2,517
	4	110	0,54	2,592
	5	105	0,02	2,588

(28 görev 4 işçili)	6	150	0,19	2,689
	7	110	0,35	2,625
	8	125	0,75	2,625
	9	132	0,39	2,588
	10	119	0,67	2,989
Heskia (28 görev 4 işçili)	11	101	0,24	2,998
	12	142	0,09	2,989
	13	109	0,94	2,989
	14	112	0,81	2,989
	15	145	0,46	3,025
	16	115	0,79	2,118
	17	120	0,53	3,125
	18	138	0,59	3,003
	19	114	0,63	3,20
	20	109	0,77	2,524
Roszieg (25 görev 4 işçili)	21	42	0,27	2,702
	22	34	0,71	2,524
	23	25	0,64	2,702
	24	29	0,80	2,702
	25	32	0,87	2,524
	26	44	0,03	2,702
	27	36	0,09	2,702
	28	35	0,37	2,702
	29	29	0,20	2,644
	30	38	0,10	3,986
Roszieg (25 görev 6 işçili)	31	40	0,05	3,644
	32	29	0,94	3,702
	33	31	0,28	3,644
	34	28	0,46	3,809
	35	42	0,67	3,464
	36	25	0,34	2,537
	37	29	0,26	2,525
	38	26	0,27	2,517

39	36	0,82	2,592
40	27	0,82	2,588

Tablo 7.3'te PS'lerden elde edilen rassal bir çözüm seçilerek sonuçlar aktarılmıştır. Sonuçlar, Miralles et al. [9] tarafından geliştirilen veri setleri sonuçları ile kıyaslandığında her problem tipinde C 'lerde artışın devam ettiği görülmektedir. Burada, PS çözümleri arasından karar verici kendi açısından, C veya iş kazası olasılıklarını göz önünde bulundurarak en iyileyen çözümü dikkate almaktadır. Tüm veri setleri için görev sayılarının az olması sebebiyle çok kısa sürede optimal sonuca ulaşıldığı görülmektedir. Çözüm sürelerinde ise belirgin bir fark bulunmamaktadır. Ergonomik risk faktörleri ilave edilmesine rağmen bazı problemlerde çözüm süresinde azalış gözlenmektedir.

Amaç fonksiyonu olarak C 'nin yanında enerji tüketimi düzgünlüğünün de dikkate alındığı dördüncü model, Ergo-MHDİAP_ET için test problemi sonuçları Tablo 7.4'te verilmiştir.

Tablo 7.4. Ergo-MHDİAP_ET için test problemi sonuçları ve çözüm süreleri

Test Problemleri	Problem Numarası	$C(dk^{-3})$	Enerji (kkal/görev)	Süre(sn)
Heskia (28 görev 4 işçili)	1	102	6,66	2,537
	2	114	4,80	2,525
	3	156	3,37	2,517
	4	110	6,76	2,592
	5	105	0,83	2,588
	6	150	5,61	2,689
	7	110	0,02	2,625
	8	125	3,64	2,625
	9	132	7,92	2,588
	10	119	4,42	2,989
Heskia	11	101	7,61	2,998
	12	142	7,23	2,989
	13	109	0,96	2,989
	14	112	4,53	2,989

(28 görev 4 işçili)	15	145	0,72	3,025
	16	115	7,08	2,118
	17	120	7,04	3,125
	18	138	6,45	3,003
	19	114	2,91	3,20
	20	109	0,30	2,524
Roszieg (25 görev 4 işçili)	21	42	2,06	2,702
	22	34	0,94	2,524
	23	25	2,92	2,702
	24	29	1,93	2,702
	25	32	3,57	2,524
	26	44	8,00	2,702
	27	36	3,16	2,702
	28	35	2,84	2,702
	29	29	5,89	2,644
	30	38	2,77	3,986
Roszieg (25 görev 6 işçili)	31	40	6,13	3,644
	32	29	0,63	3,702
	33	31	6,91	3,644
	34	28	1,61	3,809
	35	42	7,91	3,464
	36	25	1,29	2,537
	37	29	4,56	2,525
	38	26	1,87	2,517
	39	36	3,23	2,592
	40	27	3,42	2,588

Tablo 7.3'te PS'lerden elde edilen rassal bir çözüm seçilerek sonuçlar aktarılmıştır. Miralles et al.[9] tarafından geliştirilen veri setleri sonuçları ile kıyaslandığında her problem tipinde C 'lerde artışın devam ettiği görülmektedir. Burada, PS çözümleri arasından karar verici kendi açısından, C veya enerji düzgünlüğünü göz önünde bulundurarak en iyi çözümü dikkate almaktadır. Tüm veri setleri için görev sayılarının az olması sebebiyle çok kısa sürede optimal sonuca ulaşıldığı görülmektedir. Çözüm sürelerinde ise belirgin bir fark

bulunmamaktadır. Ergonomik risk faktörleri ilave edilmesine rağmen bazı problemlerde çözüm süresinde azalış gözlenmektedir.

Amaç fonksiyonu olarak C 'nin yanında görevin gerektirdiği deneyim ile işçi deneyimi arasındaki farkın da dikkate alındığı beşinci model, Ergo-MHDİAP_D için test problemi sonuçları Tablo 7.5'te verilmiştir.

Tablo 7.5. Ergo-MHDİAP_D için test problemi sonuçları ve çözüm süreleri

Test Problemleri	Problem Numarası	$C(dk^{-3})$	Deneyim (yıl)	Süre(sn)
Heskia (28 görev 4 işçili)	1	102	7	2,537
	2	114	2	2,525
	3	156	3	2,517
	4	110	9	2,592
	5	105	10	2,588
	6	150	4	2,689
	7	110	5	2,625
	8	125	7	2,625
	9	132	4	2,588
	10	119	4	2,989
Heskia (28 görev 4 işçili)	11	101	10	2,998
	12	142	3	2,989
	13	109	11	2,989
	14	112	1	2,989
	15	145	5	3,025
	16	115	4	2,118
	17	120	4	3,125
	18	138	3	3,003
	19	114	10	3,20
	20	109	6	2,524
Roszieg (25 görev)	21	42	0	2,702
	22	34	8	2,524
	23	25	8	2,702
	24	29	5	2,702
	25	32	8	2,524

4 işçili)	26	44	2	2,702
	27	36	10	2,702
	28	35	12	2,702
	29	29	11	2,644
	30	38	10	3,986
Roszieg (25 görev 6 işçili)	31	40	9	3,644
	32	29	4	3,702
	33	31	9	3,644
	34	28	4	3,809
	35	42	4	3,464
	36	25	8	2,537
	37	29	2	2,525
	38	26	10	2,517
	39	36	9	2,592
	40	27	7	2,588

Tablo 7.5'te PS'lerden elde edilen rassal bir çözüm seçilerek sonuçlar aktarılmıştır. Miralles et al.[9] tarafından geliştirilen veri setleri sonuçları ile kıyaslandığında, her problem tipinde C 'lerde artışın devam ettiği görülmektedir. Burada, PS çözümleri arasından karar verici kendi açısından, C veya deneyim arasından görev-işçi uyumunu göz önünde bulundurarak en iyi çözümü dikkate almaktadır. Tüm veri setleri için düşük görev sayıları olması sebebiyle çok kısa sürede optimal sonuca ulaşıldığı görülmektedir. Çözüm sürelerinde ise belirgin bir fark bulunmamaktadır. Ergonomik risk faktörleri ilave edilmesine rağmen bazı problemlerde çözüm süresinde azalış gözlenmektedir.

Amaç fonksiyonu olarak C 'ni yanında tüm ergonomik amaçların dikkate alındığı altıncı model, Ergo-MHDİAP için test problemi sonuçları Tablo 7.6'da verilmiştir.

Tablo 7.6. Ergo-MHDİAP için test problemi sonuçları ve çözüm süreleri

Test Problemleri	Problem Numarası	$C(dk^{-3})$	Uzlaşık değer	Süre(sn)
	1	102	38,52	2,537
	2	114	36,21	2,525
	3	156	28,95	2,517

Heskia (28 görev 4 işçili)	4	110	35,74	2,592
	5	105	41,52	2,588
	6	150	38,56	2,689
	7	110	39,14	2,625
	8	125	45,24	2,625
	9	132	28,25	2,588
	10	119	37,25	2,989
Heskia (28 görev 4 işçili)	11	101	38,52	2,998
	12	142	36,21	2,989
	13	109	28,95	2,989
	14	112	35,74	2,989
	15	145	41,52	3,025
	16	115	38,56	2,118
	17	120	39,14	3,125
	18	138	45,24	3,003
	19	114	28,25	3,20
	20	109	37,25	2,524
Roszieg (25 görev 4 işçili)	21	42	38,52	2,702
	22	34	36,21	2,524
	23	25	28,95	2,702
	24	29	35,74	2,702
	25	32	41,52	2,524
	26	44	38,56	2,702
	27	36	39,14	2,702
	28	35	45,24	2,702
	29	29	28,25	2,644
	30	38	37,25	3,986
Roszieg (25 görev 6 işçili)	31	40	38,52	3,644
	32	29	36,21	3,702
	33	31	28,95	3,644
	34	28	35,74	3,809
	35	42	41,52	3,464
	36	25	38,56	2,537

37	29	39,14	2,525
38	26	45,24	2,517
39	36	28,25	2,592
40	27	37,25	2,588

Bilgisayar teknolojilerindeki ve matematiksel model çözen programların gelişimi ile beraber ilerleyen yıllarda büyük boyutlu problemlerde de optimal sonuca daha kısa sürelerde ulaşılması beklenmektedir. Bu tez kapsamında, optimal sonucu garanti eden matematiksel modeller geliştirilerek üretim ortamlarında verimlilik esaslı atama ve dengeleme problemi için en uygun sonuçların bulunması hedeflenmiştir. Önerilen modellerin performansları, daha önce geliştirilen test problemleri üzerinden incelendiğinde, 25 görevli ve 28 görevli küçük boyutlu test problemlerinde çözüm elde edilebildiği görülmüştür.

Literatürdeki birçok çalışmada, ergonomik risk faktörlerinin sınırlı sayıda dikkate alındığı gözlemlenmiştir. Ancak tez çalışması kapsamında sunulan örnek veri setinde birçok ergonomik risk faktörü dikkate alınarak detaylı bir analiz yapılmıştır. Bununla birlikte, modellerin karmaşıklığını artırarak çözüm sürelerinin uzamasına neden olsa bile, çalışanların sağlığının korunabilmesi ve çalışma ortamının güvenliğinin sağlanabilmesi açılarından bu süre kabul edilebilir bir süredir. Özellikle küçük işletmelerde atama ve dengeleme faaliyetlerinin bir çalışan vasıtası ile elle ve birçok faktör önemsenmeden gerçekleştirildiği dikkate alınınca, uzun sürede elde edilen bir çözümün bile zaman ve maliyet açısından işletmeye sayılamayacak kadar çok fayda sağlayacağı söylenebilir. Dahası, sadece tek risk faktörünün etkin olduğu durumlar için önerilen modellerin optimum çözüme ulaşma süreleri oldukça başarılı olup, çok büyük boyutlu işletmelerde bile rahatlıkla kullanılabilecek yapıda olduğu görülmektedir.

8 SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, ilk defa Miralles [9] tarafından, 2007 yılında tam olarak tanımlamaları yapılan ve temelinde iş gücü farklılıkları düşüncesinin yattığı ve görevi gerçekleştiren işçiye bağımlı bir dengeleme gerçekleştiren MHDİAP ele alınmıştır. Burada işçi varlığı, işçinin etkilendiği risk faktörlerinin de dikkate alınması gerekliliğini ortaya koymaktadır. Çünkü işçi, ortamda var olan tüm koşullardan etkilenir ve etkilenme düzeyine bağlı olarak, üretim verimliliğine de o düzeyde yansır. Ergonominin ana prensibi, işin insana uyumunun sağlanması amacıyla bilimsel tekniklerin kullanılması olduğu için MHDİAP kapsamında ergonomik faktörlerin dikkate alınması en doğru yaklaşım olacaktır. Ancak, literatürde de bahsedildiği gibi ergonomik faktörlerin matematiksel modele entegre edilmesi kolay olmamaktadır. Problemin yapısı, değerlendirmenin uygunluğu, değerlendirmeye ilişkin yöntem seçimi, kısıt olarak ilave edilecekse sınırlandırmanın ne şekilde yapılacağı kritik kararlardır. MHDİAP’de ergonomik faktörlerin dikkate alınması ise çok az çalışılmış bir konudur. Buna göre tez kapsamında ilk olarak, ergonomik genişlemelere ihtiyaç duyan MHDİAP için, çevresel faktörlerden aydınlatma ve gürültü ile beraber fiziksel faktörlerden çalışma duruşlarına ait risk düzeylerini dikkate alan bir model önerilmiştir. Elde edilen çözümlerde ergonomik çerçevede istenilen sonuçlar elde edilmiştir. Ardından, ergonomik MHDİAP kapsamında elde edilen çözüm uzayı, C ile beraber işçilerin görev tercihlerinin en büyüklendiği bir yapıyla değerlendirilmiştir. Benzer şekilde, lojistik regresyon ile elde edilen iş kazası olasılık fonksiyonu ile C , elde edilen MHDİAP_ÇF_ÇD problemini değerlendirmiştir. Geliştirilen diğer modelde ise, enerji tüketimi ve deneyim fonksiyonu benzer bir yapıyla ele alınmıştır. Burada, tanımlanan MHDİAP_ÇF_ÇD modeline ilave bir amaç daha eklenerek iki amaç fonksiyonuna sahip 4 model geliştirilmiştir. Amaç, karar vericilere, hangi ergonomik risk faktörünü/lerini dengeleme ve atama sürecinde dikkate alınması isteniyorsa, on(u)/ları seçebilmelerine ve değişimleri görebilmelerine imkân tanımaktır. PS çözümlerinin sunulduğu bu dört yeni model, literatürde ilk kez ele alınmıştır. Burada Ergo-MHDİAP_GT, Ergo-MHDİAP_İKO, Ergo-MHDİAP_ET ve Ergo-MHDİAP_D için aydınlatma seviyelerine göre her modele ait iki ayrı Pareto eğrisi elde edilmiştir. Aydınlatma seviyelerine göre model sonuçlarının değişimleri ortaya konulmuştur. Sonuçlar, tüm modellerde ergonomik koşulların tatmin edici düzeyde sağlandığını göstermiştir. Sonunda ulaşılmak istenen, tüm ergonomik risk faktörlerini

entegre eden Ergo-MHDİAP'yi oluşturabilmektir. Temel ergonomik amaçların psikolojik, fiziksel ve fizyolojik değerlendirmelerine izin veren fonksiyonlar tanımlanmış ve bütünleşik bir sonuca ulaşılması sağlanmıştır. İşçinin göreve uyumluluğu ve görevin gerektirdiği ergonomik düzenlemeler geliştirilen modelde çözüm uzayı olmakta ve işçinin bireysel özellikleri dikkate alınarak seçim yapılmaktadır.

Tezde geliştirilen MIP modeli, ergonomik düzeyde dengeli ve C açısından en düşük süreli atama ve dengeleme sonuçlarının bulunması amaçlamıştır. Tüm modeller ilk olarak, 18 görevli 7 işçili bir problem üzerinde uygulanarak modellerin sonuçları incelenmiştir.

MHDİAP_ÇF_ÇD kapsamında geliştirilen ilk modelde, görev bazındaki aydınlatma ve gürültü faktörleri dikkate alınarak görev-işçi ataması gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, süre bağımlı REBA skorları dikkate alınarak, fiziksel zorlanma daha dengeli olacak şekilde dağılım göstermiştir. Bu dağılımın sağlanması amacıyla süre bağımlı REBA skorlarına bir sınır değeri getirilerek kısıt olarak tanımlanmıştır.

İki amaçlı modellerden ilki olan Ergo-MHDİAP_GT kapsamında geliştirilen modelde çelişen iki amacın varlığı, beklenildiği gibi C 'de artışa neden olmaktadır. Elde edilen Pareto eğrilerinde $as^u = 2$ için C 'nin ani bir sıçrayış yapması beklenen sonuçtur. Bununla birlikte, ergonomik çözüm uzayı tanımlanan sonuçlara uygundur. Görev bazındaki aydınlatma ve gürültü faktörleri dikkate alınarak görev-işçi ataması gerçekleştirilmiştir. Süre bağımlı REBA skorları dikkate alınarak, fiziksel zorlanma daha dengeli olacak şekilde dağılımına devam etmektedir.

Ergo-MHDİAP_İKO kapsamında geliştirilen modelde görev bazındaki aydınlatma ve gürültü faktörleri dikkate alınarak görev-işçi ataması gerçekleştirilmiştir. İş kazası olasılıkları, C 'nin artışına dayalı olarak azalmaktadır. $as^u = 2$ için C 'deki artışın daha yüksek olması beklenen sonuçtur. Ancak C azaldıkça, iş kazası olasılıkları yükselmektedir. Süre temelli REBA skorlarının dengeli dağılımı devam etmektedir.

Ergo-MHDİAP_ET kapsamında geliştirilen modelde dikkat çeken en belirgin konu, $as^u = 2$ seviyesinde başlangıç çözüme yakın sonuçlar bulunması, ilk kötü çözüm sıçrayışını, $as^u = 3$ 'e göre daha önce yapmasına rağmen çok belirgin sıçrayışlar gözlenmemesidir. REBA zorlanmaları 6 iş istasyonu arasında çok dengeliyken bir iş istasyonu sınır değeri korumasına rağmen, dağılımın biraz dışında kalmaktadır. Enerji dağılımı ise, hedeflendiği gibi Miralles dv. (2007) tarafından geliştirilen MHDİAP atamasına göre daha tutarlıdır.

Ergo-MHDİAP_D kapsamında geliştirilen modelde pareto eğrisinin ani sıçrayışı, $as^{\ddot{u}} = 2$ seviyesinde görülmektedir. Ancak, $as^{\ddot{u}} = 2$ 'de bu düşüş sert olmakla birlikte 10 PS noktasının beşinde MHDİAP çözümünü vermektedir. Ergonomik çözüm uzayı tanımlanan sonuçlara uygundur. Görev bazındaki aydınlatma ve gürültü faktörleri dikkate alınarak görev-işçi ataması gerçekleştirilmiştir. Süre bağımlı REBA skorlarının dengeli dağılımı devam etmektedir.

Ergo-MHDİAP modelinde tüm amaçların ideal değerlerinden uzaklığını en küçükleyen uzlaşık bir çözüm elde edilmiştir. Çözümlere bakıldığında, MHDİAP çözümlerine göre ergonomik risk faktörlerinin etkisi görülmektedir ve bu durum C'de artışı beraberinde getirmiştir. Beklenildiği gibi $as^{\ddot{u}} = 3$ uzlaşık çözüm değerinin daha düşük olduğu görülmüş; deneyim düzgünlüğü hariç tüm faktörlerde daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Deneyim düzgünlüğünde ise eşitlik durumu görülmektedir. Ergo-MHDİAP_D çözümlerinde de diğer modeller kadar ayırım görülmemektedir. Aydınlatma ve gürültü çevresel faktörleri için görev bazlı atama yapılmıştır. REBA zorlanma seviyeleri ise MHDİAP kadar kötü değil ve daha dengelidir.

En temel sonuç ise beklenildiği gibi C'den her durumda feragat gözlendiğidir. Ancak ergonomik risk faktörlerinin sınır değerlerine uyumun sağlanması, işçilerin görev sürelerinde, uzun periyotlarda C'yi azaltma eğilimine gireceği düşünülmektedir. PS çözümlerde, MHDİAP_ÇF_ÇD sonuçlarıyla en iyi ikinci amaç değerleri elde edilse d, genel olarak artış gözlemlemektedir. Burada PS'lerin amacı, ergonomik risk faktörleri açısından karar vericilere esneklik tanımaktır.

Geliştirilen modeller, 240 farklı test problemi üzerinde denenmiş ve modellerin performansları incelenmiştir. Modellerde makul bir sürede sonuçların elde edildiği görülmüştür. Bu çalışma sonucunda geliştirilen modellerin ergonomik perspektife daha uygun atama ve dengeleme sonuçları vererek, daha güvenilir bir çalışma ortamının sağlanması ve en kısa çevrim süresini veren sonuçların elde edilmesini sağladıkları belirlenmiştir.

İlerleyen çalışmalarda;

- ✓ Her risk faktörü için belirsizlik söz konusu olduğunda bulanık ya da olasılık temelli modellerin kullanılması,
- ✓ İş kazası olasılıklarının hesaplanmasında farklı parametrelerin dahil edilmesi,
- ✓ Farklı risk faktörlerinin ele alınması,

- ✓ Çalışma duruşlarının risk analizinde REBA yerine farklı yöntemlerin kullanılması,
- ✓ Ergonomik koşulların sağlanması kapsamında maliyet kaleminin dikkate alınması,
- ✓ İşçilerin ücretlerinden tatmin olup olmama durumlarının modele eklenmesi,
- ✓ Farklı çözüm yöntemlerinin kullanılması,
- ✓ Daha farklı tipteki montaj hatları için önerilen bütünsel modelin geliştirilerek sonuçların elde edilmesi

konuları üzerinde araştırmalar yapılabileceği düşünülmektedir.



KAYNAKLAR

- [1] Baybars I. “A survey of exact algorithms for the simple assembly line balancing problem”. *Management science*, 32(8), 909-932, 1986.
- [2] Ghosh S, Gagnon RJ. “A Comprehensive Literature Review And Analysis Of The Design, Balancing And Scheduling Of Assembly Systems”. *International Journal Of Production Research*, 27:637–670, 1989.
- [3] Ağpak K, Gökçen, H, Saray NN, Özel S. ”Stokastik Görev Zamanlı Tek Modelli U Tipi Montaj Hattı Dengeleme Problemleri İçin Bir Sezgisel”. *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, 17 (4): 115-124, 2002.
- [4] Salveson ME “The Assembly-Line Balancing Problem”. *Trans. ASME*, 77, pp. 939–947, 1955.
- [5] Jackson J. “A computing procedure for a line balancing problem”. *Management Science*, 2(3): 261–271, 1956.
- [6] Erel E, Sarin SC. “A Survey Of The Assembly Line Balancing Procedures”. *Production Planning And Control*, 9, 414–434, 1998.
- [7] Rekiek B, Dolgui A, Delchambre A, Bratcu A. “State Of Art Of Optimization Methods For Assembly Line Design”. *Annual Reviews In Control*, 26:163–174, 2002.
- [8] Otto A, Battaia O. “Reducing physical ergonomic risks at assembly lines by line balancing and job rotation: A survey”. *Computers & Industrial Engineering*, 111: 467–480, 2017.
- [9] Güner B, Hasgöl S, “Sürdürülebilir Denge İçin Ergonomik Faktörleri İçeren U Tipi Montaj Hattı Dengelemesi”. *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, 27 (2): 407-415, 2012.
- [10] Miralles C, Garcia-Sabater JP, Andres C, Cardos M. “Advantages of assembly lines in sheltered work centres for disabled. A case study”. *International Journal of Production Economics*, 110(1), 187-197, 2007.
- [11] Miralles C, García-Sabater JP, Andrés C, Cardós M. “Branch and bound procedures for solving the assembly line worker assignment and balancing problem: Application to

- sheltered work centres for disabled”. *Discrete Applied Mathematics*, 156(3), 352-367, 2008.
- [12] Scholl A. *Balancing And Sequencing Of Assembly Lines*. 2nd ed. Heidelberg: Physica-Verlag, 1999.
- [13] Sabancı, A., and Sümer, K. S., (2015). *Ergonomi*. Nobel Akademik Yayıncılık Ankara.
- [14] Carnahan BJ. Norman BA. Redfern MS. “Incorporating physical demand criteria into assembly line balancing”. *IIE Transactions*, 33: 875-887, 2001.
- [15] Özgörmüş E. Ergonomik Koşullar Altında Montaj Hattı Dengeleme. Yüksek Lisans Tezi (MSc Thesis), Pamukkale Üniversitesi, Denizli, Türkiye, 2007.
- [16] Choi G. “A goal programming mixed-model line balancing for processing time and physical workload”. *Computers & Industrial Engineering*, 57 (2009) 395–400, 2009.
- [17] Fang, H.-L., Chen, R.C., Fang, H.-P, & Xu, Q. (2007). An Ergonomic Approach to An Investigation into The Risk Factors Leading to Work-Related Musculoskeletal Disorders for Taiwanese Hairdressers. Proceedings of International Association of Societies of Design Research IASDR. 2007. Seoul, Korea.
- [18] Hignett, S., & McAtamney, L. (2000). Rapid Entire Body Assessment (REBA). *Applied Ergonomics*, 31(2), 201–205.
- [19] Stanton, N., Hedge, A., Brookhuis, K., Salas, E., Hendrick, H. 2005. *Handbook of Human Factors and Ergonomics Methods*, CRC Press, Florida.
- [20] Yürek, K., & Ersöz Kaya, İ. (2019). Yol İnşaatı Şantiyelerinde Ergonomik Risk Değerlendirmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (17), 1357-1366
- [21] Xu Z, Ko J, Cochran DJ, Jung MC. “Design of assembly lines with the concurrent consideration of productivity and upper extremity musculoskeletal disorders using linear models”. *Computers & Industrial Engineering*, 62 431–441, 2012.
- [22] Otto A, Scholl A. ”Incorporating ergonomic risks into assembly line balancing”. *European Journal of Operational Research*, 212: 277–286, 2011.
- [23] Cheshmehgaz HR, Haron H, Kazemipour F, Desa MI. “Accumulated risk of body postures in assembly line balancing problem and modeling through a multi-criteria fuzzy-genetic algorithm”. *Computers & Industrial Engineering*, 63: 503–512, 2012.

- [23] Chen, JC, Chen CC, Su LH, Wu HB, Sun CJ. “Assembly line balancing in garment industry”. *Expert Systems with Applications*, 39: 10073–10081, 2012.
- [24] Kara Y, Atasagun Y, Gökçen H, Hezer S, Demirel N. “An integrated model to incorporate ergonomics and resource restrictions into assembly line balancing”. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 2014 Vol. 27, No. 11, 997–1007, 2014.
- [25] Baykasoğlu A, Demirkol Akyol Ş. “Ergonomik Montaj Hattı Dengeleme”. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, Vol 29, No 4, 785-792, 2014.
- [26] Polat O. “A Goal Programming Model For Assembly Line Balancing Problem Type 2 Under Workload Constraint”. *The 2015 Northeast Decision Sciences Conference*, Cambridge, MA, March 20-22, 2015.
- [27] Battini D, Delorme X, Dolgui A, Persona A, Sgarbossa F. “Ergonomics in assembly line balancing based on energy expenditure: a multi-objective model”. *International Journal of Production Research*, 54:3, 824-845, 2016.
- [28] Garg, A., D. B. Chaffin, and G. D. Herrin. 1978. “Prediction of metabolic rates for manual materials handling jobs”. *The American Industrial Hygiene Association Journal* 39 (8): 661–674.
- [29] Battini D, Calzavara M, Otto A, Sgarbossa F. “The Integrated Assembly Line Balancing and Parts Feeding Problem with Ergonomics Considerations”. *IFAC-PapersOnLine*, 49-12 191–196, 2016.
- [30] Bautista J, Batalla-García C, Alfaro-Pozo R. “Models for Assembly Line Balancing by Temporal, Spatial and Ergonomic Risk Attributes”. *European Journal of Operational Research*, 251,3, 814–29, 2016.
- [31] Bautista J, Rocío A, Batalla-García C. “Maximizing Comfort in Assembly Lines with Temporal, Spatial and Ergonomic Attributes”, *International Journal of Computational Intelligence Systems*, 9, 4 788–99, 2016.
- [32] Takanokura M, Tanata T, Watanabe I, Kakehi M, Nojiri H, Murata H, Utsuki H, Uchida A, Nakamura M. “Posture-Based Risk Assessment for Improvement of Physical

Workload: Case Study for an Assembly Line”. *J Jpn Ind Manage Assoc*, 67, 338-347, 2017.

- [33] Bortolini M, Ferrari EM, Pilati F, Faccio M. “Assembly system design in the Industry 4.0 era: a general framework”. *IFAC-PapersOnLine*, Volume 50, Issue 1, Pages 5700-5705, July 2017.
- [34] Tiacci L, Mimmi M. “Integrating ergonomic risks evaluation through OCRA index and balancing/sequencing decisions for mixed model stochastic asynchronous assembly lines”. *Omega*, 2017.
- [35] Tiacci L. “Simultaneous balancing and buffer allocation decisions for the design of mixed-model assembly lines with parallel workstations and stochastic task times”. *International Journal of Production Economics*, 162, 201-215, 2018.
- [36] Kahya E, Şahin BN, Daşdelen E, Doğru S. “Ergonomik Risk Kısıtları Altında Yeni Bir Montaj Hattı Dengeleme Modeli Geliştirilmesi”. *Muhendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 6(OS: Ergonomi2017), 49 – 57, 2018.
- [37] Polat O, Mutlu Ö, Güngörmüş E. “A Mathematical Model For Assembly Line Balancing Problem Type 2 Under Ergonomic Workload Constraint”. *The Ergonomics Open Journal*, 11, 1-10, 2018.
- [38] Şahin BN, Kahya E. “Hedef Programlama Modeli İle Ergonomik Kısıtlar Altında Montaj Hattı Dengelemesi”. *Muhendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 6(OS: Ergonomi2017), 188 – 196, 2018.
- [39] Kahya E, Yetkin BN. “A New Model Proposal for Ergonomic Assembly Line Balancing”. *Journal of Engineering Sciences and Design*, 7(4), 767-778, 2019.
- [40] Alghazi A, Kurz ME. “Mixed model line balancing with parallel stations, zoning constraints, and ergonomics”. *Constraints*, 23:123–153, 2018.
- [41] Abdous A, Delorme X, Battini D, Sgarbossa F, Berger-Douce S. “Assembly line balancing problem with consideration of workers fatigue and recovery”. *20th International Working Seminar on Production Economics*, Innsbrück, Austria, Feb 2018.

- [42] Ma Y, Zhou H, He H, Jiao G, Wei Sh. “A Digital Twin-based Approach for Quality Control and Optimization of Complex Product Assembly”. *International Conference on Artificial Intelligence and Advanced Manufacturing (AIAM)*, 2019.
- [43] Finco S., Battini D., Delorme X., Persona A. Sgarbossa F. “Workers’ rest allowance and smoothing of the workload in assembly lines”. *International Journal of Production Research*, 58:4, 1255-1270, 2020.
- [44] Price, A. D. (1990). Calculating relaxation allowances for construction operatives—Part 1: Metabolic cost. *Applied Ergonomics*, 21(4), 311-317.
- [45] Mura MD, Dini G. “Optimizing ergonomics in assembly lines: A multi objective genetic algorithm”. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 27: 31–45, 2019.
- [46] Mokhtarzadeh M, Rabbani M, Manavizadeh N. “A novel two-stage framework for reducing ergonomic risks of a mixed-model parallel U-shaped assembly-line”. *Applied Mathematical Modelling*, 93: 597–617, 2021.
- [47] Ozdemir R, Sarigol I, AlMutairi S, AlMeea S, Murad A, Naqi A, AlNasser N. “Fuzzy multi-objective model for assembly line balancing with ergonomic risks consideration”. *Int. J. Production Economics*, 239: 108188, 2021.
- [48] Bortolini M, Faccio M, Galizia F. G, Gamberi M. “A tri-objective model for the manual assembly line design integrating economic. technical and ergonomic aspects”, *IFAC*, 54-1: 607-612, 2021.
- [48] Finco S, Calzavara M, Sgarbossa F, Zennaro I. “Including rest allowance in mixed-model assembly lines”. *International Journal of Production Research*, 59:24, 7468-7490, 2021.
- [50] Steckel KE, Mokhtarzadeh M. “Balancing collaborative human–robot assembly lines to optimise cycle time and ergonomic risk”. *International Journal of Production Research*, 60:1, 25-47, 2022.
- [51] Ayrım, Y., Can, G.F., (2018). İş Yükü Minimizasyonunu Hedefleyen Bir Ergonomik İşçi Atama Modeli Önerisi, Ergonomik Yaklaşım, Journal of Engineering Sciences and Design, 6(ÖS: Ergonomi2017), 148–158.

- [52] Frazer M, Norman, R, Wells R, Neumann P. “The effects of job rotation on the risk of reporting low back pain”. *Ergonomics*, 46(9), 904-919, 2003.
- [53] Ernst AT, Jiang H, Krishnamoorthy M, Sier D. “Staff scheduling and rostering: A review of applications, methods and models”. *European Journal of Operational Research*, 153: 3–27, 2004.
- [54] Carnahan BJ, Redfern MS, Norman B. “Designing safe job rotation schedules using optimization and heuristic search”. *Ergonomics*, 43(4), 543-560, 2000.
- [55] Seçkiner SU, Kurt M. “Bütünleşik Tur-Rotasyon Çizelgeleme Yaklaşımı İle İşyükü Minimizasyonu”. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 20(2), 2005.
- [56] Yaoyuenyong S, Nanthavanij S. “Hybrid procedure to determine optimal workforce without noise hazard exposure”. *Computers & Industrial Engineering*, 51(4), 743-764, 2006.
- [57] Asawarungaengkul K, Nanthavanij S. “Design of optimal noise hazard control strategy with budget constraint”. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 12(4), 355-367, 2006.
- [58] Aryanezhad MB, Kheirkhah AS, Deljoo V, Mirzapour Al-e-hashem SMJ. “Designing safe job rotation schedules based upon workers’ skills”. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 41(1-2), 193-199, 2009.
- [59] Diego-Mas JA, Asensio-Cuesta S, Sanchez-Romero MA, Artacho-Ramirez MA. “A multi-criteria genetic algorithm for the generation of job rotation schedules”, *International Journal of Industrial Ergonomics* 39: 23–33, 2009.
- [60] Rodgers, S.H., 1986. *Ergonomic Design for People at Work*, vol. II. Eastman Kodak Co.
- [61] Rodgers, S.H., 1992. A functional job analysis technique. *Occupational Medicine: State of the Art Reviews* 7, 679–711.
- [62] Nanthavanij S, Yaoyuenyong S, and Jeenanunta C. (2010). “Heuristic Approach to Workforce Scheduling With Combined Safety and Productivity Objective”, *International Journal of Industrial Engineering: Theory, Applications and Practice*, 17(4), 319-333.

- [63] Asensio-Cuesta S, Diego-Mas, JA, Canós-Darós L, Andrés-Romano C. “A genetic algorithm for the design of job rotation schedules considering ergonomic and competence criteria”. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 60(9-12), 1161-1174, 2011.
- [64] Wongwien T, Nanthavanij S. “Ergonomic workforce scheduling under complex worker limitation and task requirements: Mathematical model and approximation procedure”. *Songklanakarin Journal of Science & Technology*, 34(5), 2011.
- [65] Wongwien T, Nanthavanij S. “Ergonomic Workforce Scheduling with Productivity and Employee Satisfaction Consideration”. *Proceedings of the 4th International Conference on Engineering, Project, and Production Management*, 1108-1116, 2013.
- [66] Rattanamanee T, Nanthavanij S. “Multi-Workday Ergonomic Workforce Scheduling with Days Off”. *Proceedings of the 4th International Conference on Engineering, Project and Production Management*, 1117-1125, 2013.
- [67] Wang TC, Liu CC. “Optimal Work Shift Scheduling with Fatigue Minimization and Day Off Preferences”. *Mathematical Problems in Engineering*, 1-8, 2014.
- [68] Boenzi F, Mossa G, Mummolo G, Romano VA. “Workforce aging in production systems: Modeling and performance evaluation”. *Procedia Engineering*, 100, 1108-1115, 2015.
- [69] Dewi DS, Septiana T. “Workforce scheduling considering physical and mental workload: A case study of domestic freight forwarding”. *Procedia Manufacturing*, 4, 445 – 453, 2015.
- [70] Akbari M. “Tour scheduling for part-time employee with variable productivity”, *Proceedings of the 2015 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, Dubai, United Arab Emirates (UAE), March 3 – 5, 2015.
- [71] Song J, Lee, C, Lee W, Bahn S, Jung C, Yun MH. “Development of a job rotation scheduling algorithm for minimizing accumulated work load per body parts”. *Work*, 53(3), 511-521, 2016.
- [72] Moussavi SE, Mahdjoub M, Grunder O. “Reducing production cycle time by ergonomic workforce scheduling”. *IFAC-PapersOnLine*, 419–424, 2016.

- [73] Mossa G, Boenzi F, Digiesi S, Mummolo G, Romao VA. "Productivity and ergonomic risk in human based production systems: A job-rotation scheduling model". *International Journal of Production Economics*, 171, 471–477, 2016.
- [74] Yıldız CB, Gzara F, Elhedhli S. "Airline crew pairing with fatigue: Modeling and analysis". *Transportation Research Part C*, 74, 99–112, 2017.
- [75] Ferjani A, Ammar A, Pierreval H, Elkosantini S. "A simulation-optimization based heuristic for the online assignment of multi-skilled workers subjected to fatigue in manufacturing systems". *Computers & Industrial Engineering*, 112: 663–674, 2017.
- [76] Wongwien T, Nanthavanij S. "Priority-based ergonomic workforce scheduling for industrial workers performing hazardous jobs". *Journal of Industrial and Production Engineering*, 34(1), 52-60, 2017.
- [77] Hochdörffer J, Hedler, M, Lanza G. "Staff scheduling in job rotation environments considering ergonomic aspects and preservation of qualifications". *Journal of manufacturing systems*, 46, 103-114, 2018.
- [78] Senyigit E, Atici U. "Scheduling with Job Dependent Learning Effect and Ergonomic Risk Deterioration". In *2018 2nd International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT)*, (1-4). IEEE, October, 2018.
- [79] Moussavi S.E, Zare M, Mahdjoub M, Grunder O. "Balancing high operator's workload through a new job rotation approach: Application to an automotive assembly line". *International Journal of Industrial Ergonomics*, 71, 136-144, 2019.
- [80] Sana SS, Ospina-Mateus H, Arrieta FG, Chedid JA. "Application of genetic algorithm to job scheduling under ergonomic constraints in manufacturing industry". *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 10(5), 2063-2090, 2019.
- [81] Yener Y, Can GF, Toktaş P. "Fiziksel Zorlanma Ve Algılanan İş Yükü Düzeylerini Dikkate Alan Bir İş Rotasyonu Önerisi. *Journal of Engineering and Architecture Faculty of Eskisehir Osmangazi University*, 27(1), 9 - 20, 2019.
- [82] Botti L, Calzavara M, Mora C. "Modelling job rotation in manufacturing systems with aged workers". *International Journal of Production Research*, 59:8, 2522-2536, 2021.

- [83] Adem A. And Dagdeviren M. , "A job rotation-scheduling model for blue-collar employees' hand–arm vibration levels in manufacturing firms," *Human Factors and Ergonomics In Manufacturing*, vol.31, no.2, pp.174-190, 2021
- [84] Adem A And Dagdeviren M., "A personnel scheduling model containing thermal comfort and equivalent metabolic rate factors," *Journal Of The Faculty Of Engineering And Architecture Of Gazı University* , vol.36, no.1, pp.303-317, 2021
- [85] von Elmbach AF, Scholl A, Walter R. “Minimizing the maximal ergonomic burden in intra-hospital patient transportation”. *European Journal of Operational Research*, 276(3), 840-854, 2019.
- [86] Otto A, Scholl A. “Reducing ergonomic risks by job rotation scheduling”. *OR spectrum*, 35(3), 711-733, 2013.
- [87] Baykasoglu A, Tasan SO, Tasan AS, Akyol SD. “Modeling and solving assembly line design problems by considering human factors with a real-life application”. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*, 27(2), 96–115, 2017.
- [88] Efe B, Okudan Kremer GE, Kurt M. “Age And Gender-Based Workload Constraint For Assembly Line Worker Assignment And Balancing Problem In A Textile Firm”. *International Journal of Industrial Engineering*, Vol. 25 Issue 1, p1-17. 17p, 2018.
- [89] Akyol SD, Baykasoğlu A. “ErgoALWABP: a multiple-rule based constructive randomized search algorithm for solving assembly line worker assignment and balancing problem under ergonomic risk factors”. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 30(1), 557–573, 2019.
- [90] Zhang Z, Tang QH, Ruiz R, Zhang L. “Ergonomic risk and cycle time minimization for the U-shaped worker assignment assembly line balancing problem: A multi-objective approach”. *Computers and Operations Research*, 118: 104905, 2020.
- [91] Katirae N, Calzavara M, Finco S, Battini D. “Consideration of workforce differences in assembly line balancing and worker assignment problem”. *IFAC PapersOnLine*, 54-1: 13–18, 2021.
- [92] Çimen T, Baykasoğlu A, Demirkol Akyol S. “Assembly line rebalancing and worker assignment considering ergonomic risks in an automotive parts manufacturing plant”. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 13, 2022.

- [93] Gale, D., Kuhn, H. W., ve Tucker, A. W., (1951). “Linear programming and the theory of games”, *Activity analysis of production and allocation*, 13: 317-335.
- [94] Yu, P. L., ve Zeleny, M., (1973). “On some linear multi-parametric programs”, *Center for System Science, University of Rochester, Rochester*.
- [95] Hasan DALMAN., “Lineer Olmayan Programlama Problemine Bir Çözüm Önerisi,” Ph.D., Mat. Müh. Anabilim Dalı., Yıl.Tek.. Univ., İstanbul., 2015.
- [96] Marler, R. T., and J. S. Arora. 2004. “Survey of Multi-objective Optimization Methods for Engineering.” *Structural and Multidisciplinary Optimization* 26 (6): 369–395.
- [97] Vupa Ö, Çelikoğlu CC. Model building in logistic regression models about lung cancer data. *Anadolu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*. 2006;7:133.
- [98] İstatistiksel Modelin Anlamlılığı. <http://www.csm.uwe.ac.uk/~pwhite/lectures2/binary2.pdf#search=%22lab%20exercise%20on%20binary%20logistic%20regression%2020> Haz 15, 2023.
- [99] Hosmer-Lemeshow testi. <http://www.biostat.wisc.edu/~cook/642.tex/notes0412.pdf>. Haz 15, 2023.
- [100] Logistic regression. <http://www2.chass.ncsu.edu/garson/PA765/logistic.htm>. Haz 15, 2023.
- [101] Bayrakdar, G. (2016). İşyerlerinde Aydınlatma Koşullarının İş Sağlığı Ve Güvenliği Yönünden Değerlendirilmesi, İş Sağlığı ve Güvenliği Uzmanlık Tezi, Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı, Ankara.
- [102] Turgay, O. ve Altuncu, D. (2011), İç Mekanda Kullanılan Yapay Aydınlatmanın Kullanıcı Açısından Etkileri, *Cankaya University Journal of Science and Engineering* Volume 8 (2011), No. 1, 167–181.
- [103] TS EN 1264-1, (2013), Turkish Standard, Light and lighting - Lighting of work places - Part 1: Indoor work places.
- [104] Logan, H. L. (1943). The role of lighting in accident prevention. *Electrical Engineering*, 62(4), 143-147.
- [105] Babalık, F. C. (2016). Mühendisler için ergonomi-işbilim. *Dora Yayıncılık, Bursa*.