

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MONTAJ HATTI DENGELEME PROBLEMİ İÇİN BULANIK  
MANTIK TABANLI ERGONOMİK RİSK DEĞERLENDİRME  
MODELİ

DOKTORA TEZİ

Seçil KULAÇ

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Eylül 2024



T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**MONTAJ HATTI DENGELEME PROBLEMİ İÇİN BULANIK  
MANTIK TABANLI ERGONOMİK RİSK DEĞERLENDİRME  
MODELİ**

**DOKTORA TEZİ**

**Seçil KULAÇ**

**Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. Alper KİRAZ**

**Eylül 2024**



Seçil KULAÇ tarafından hazırlanan “Montaj Hattı Dengeleme Problemi İçin Bulanık Mantık Tabanlı Ergonomik Risk Değerlendirme Modeli” adlı tez çalışması 10.09.2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

### Tez Jürisi

**Jüri Başkanı :** .....

**Jüri Üyesi :** .....

**Jüri Üyesi :** .....

**Jüri Üyesi :** .....

**Jüri Üyesi :** .....



## **ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ**

Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliğine ve Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesine uygun olarak hazırlamış olduğum “Montaj Hattı Dengeleme Problemi İçin Bulanık Mantık Tabanlı Ergonomik Risk Değerlendirme Modeli” başlıklı tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın tüm aşamalarında yukarıda belirtilen yönetmelik ve yönergeye uygun davrandığımı, tezin içerdiği yenilik ve sonuçları başka bir yerden almadığımı, tezde kullandığım eserleri usulüne göre kaynak olarak gösterdiğimi, bu tezi başka bir bilim kuruluna akademik amaç ve unvan almak amacıyla vermediğimi ve 20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince Sakarya Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Enstitü tarafından belirlenmiş ölçütlere uygun rapor alındığını, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun ortaya çıkması halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi beyan ederim.

(27/09/2024).

Seçil KULAÇ





## TEŞEKKÜR

Doktora eğitimim boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, araştırmamın tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, beni teşvik eden ve yönlendiren kıymetli danışmanım Doç. Dr. Alper KİRAZ'a,

Değerli görüşleriyle araştırmamın şekillenmesini sağlayan, dikkat etmem gereken noktalarla ilgili bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım tez izleme komitesi hocalarıma ve tez savunma komitesi üyelerine,

Bu tezin uygulama aşamasında destek veren Umut TAŐDEMİR, Enis ALTINBULAK, Dilara TÜRKYILMAZ ve diğer katkı sağlayan herkese teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, bugünlere gelmemi sağlayan, aldığım kararlara her zaman saygı gösteren ve desteklerini esirgemeyen aileme teşekkür eder, bu tezi onlara ithaf ederim.

Sečil KULAÇ



## İÇİNDEKİLER

Sayfa

<b>ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ</b> .....	v
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	vii
<b>KISALTMALAR</b> .....	xi
<b>SİMGELER</b> .....	xiii
<b>TABLO LİSTESİ</b> .....	xv
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....	xvii
<b>ÖZET</b> .....	xix
<b>SUMMARY</b> .....	xxi
<b>1. GİRİŞ</b> .....	1
1.1. Çalışmanın Kapsamı ve Önemi .....	2
1.2. Çalışmanın Amacı ve Yöntemi .....	2
1.3. Araştıma Soruları .....	3
1.4. Hipotezler .....	3
1.5. Çalışmanın Kısıtları ve Sınırları .....	4
1.6. Çalışmanın Literatüre Katkıları .....	5
1.7. Tezin Organizasyonu .....	5
<b>2. MONTAJ HATTI Dengeleme VE ERGONOMİ</b> .....	7
2.1. Montaj Hattı Dengeleme Problemi .....	7
2.1.1. Montaj hattı dengeleme problemlerinin sınıflandırılması .....	7
2.1.2. MHDP çözüm yaklaşımları .....	8
2.2. Ergonomik Risk Değerlendirme .....	9
2.2.1. Ergonomik risk faktörlerinin sınıflandırılması .....	10
2.2.1.1. Fiziksel faktörler .....	10
2.2.1.2. Bilişsel Faktörler .....	10
2.2.1.3. Örgütsel faktörler .....	11
2.2.1.4. Çevresel faktörler .....	11
2.2.1.5. Kişisel faktörler .....	11
2.2.1.6. Psikososyal faktörler .....	12
2.2.2. Ergonomik risk değerlendirme yöntemleri .....	12
2.3. Montaj Hattı Dengelemede Ergonomik Faktörler .....	12
<b>3. KAYNAK ARAŞTIRMASI</b> .....	15
3.1. Ergonomik Risk Değerlendirme Yöntemlerine İlişkin Çalışmalar .....	15
3.2. Ergonomik Montaj Hattı Dengeleme Çalışmaları .....	19
<b>4. MATERYAL VE YÖNTEM</b> .....	25
4.1. Problemin Tanımı .....	25
4.2. Materyal .....	26
4.3. Yöntem .....	27
4.3.1. Ergonomik risk değerlendirme yöntemlerinin belirlenmesi .....	28
4.3.1.1. REBA yöntemi .....	38
4.3.1.2. QEC yöntemi .....	38
4.3.1.3. OCRA kontrol listesi yöntemi .....	38
4.3.1.4. COPSOQ yöntemi .....	39

4.3.2. Çok kriterli karar verme yönteminin belirlenmesi .....	39
4.3.2.1. Aralık değerli küresel bulanık analitik hiyerarşi prosesi.....	42
4.3.3. Uygulamada kullanılacak kriterler .....	42
4.3.4. IVSF-AHP uygulaması .....	44
4.3.5. Ergonomik risk değerlendirme bulanık mantık modelinin oluşturulması	49
4.3.5.1. Üyelik fonksiyonlarının belirlenmesi.....	50
4.3.5.2. Kural tabanının oluşturulması .....	53
4.3.5.3. Çıkarım ve durulaştırma işlemleri.....	57
4.3.6. Ergo-KMMHDP-2 için karma tamsayı programlama yaklaşımı .....	58
4.3.7. Performans göstergeleri.....	63
4.3.8. Test problemleri ile sınama .....	65
<b>5. UYGULAMA.....</b>	<b>69</b>
5.1. Verilerin Toplanması.....	72
5.2. Ergonomik Risk Analizi .....	76
5.3. Ergonomik Montaj Hattı Dengeleme .....	80
5.3.1. Ön montaj hattı çözüm sonuçları .....	81
5.3.2. Ana montaj hattı çözüm sonuçları.....	89
5.4. İstatistiksel Analiz .....	97
<b>6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>	<b>103</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>105</b>
<b>EKLER .....</b>	<b>115</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>133</b>

## KISALTMALAR

<b>AHP</b>	: Analitik hiyerarşi prosesi
<b>COPSOQ</b>	: Kopenhag psikososyal risk değerlendirme ölçeği
<b>CP</b>	: Kısıt programlama
<b>CR</b>	: Tutarlılık oranı
<b>ÇKKV</b>	: Çok kriterli karar verme
<b>EAWS</b>	: Avrupa ergonomik değerlendirme çalışma sayfası
<b>EE</b>	: Enerji harcaması
<b>ERDY</b>	: Ergonomik risk değerlendirme yöntemleri
<b>Ergo-KMMHDP</b>	: Ergonomik karma model montaj hattı dengeleme problemi
<b>GA</b>	: Genetik algoritma
<b>IER</b>	: Bütünleşik ergonomik risk seviyesi
<b>IVSF-AHP</b>	: Aralık değerli küresel bulanık AHP
<b>IV-SFS</b>	: Aralık değerli küresel bulanık kümeler
<b>KİSR</b>	: Kas iskelet sistemi rahatsızlıkları
<b>KMMHDP</b>	: Karma model montaj hattı dengeleme problemi
<b>KV</b>	: Karar verici
<b>MANOVA</b>	: Çok değişkenli varyans analizi
<b>ManTRA</b>	: El ile yapılan görevler için risk değerlendirme aracı
<b>MHDP</b>	: Montaj hattı dengeleme problemi
<b>MILP</b>	: Karma tam sayılı doğrusal programlama
<b>MINLP</b>	: Karma tam sayılı doğrusal olmayan programlama
<b>NIOSH</b>	: Revize edilmiş ulusal mesleki güvenlik ve sağlık enstitüsü
<b>OCRA</b>	: Mesleki tekrarlamalı hareketler indeksi
<b>OWAS</b>	: Ovako çalışma duruşu analiz sistemi
<b>PLIBEL</b>	: Ergonomik tehlikelerin tanımlanmasına yönelik kontrol listesi
<b>QEC</b>	: Hızlı maruziyet değerlendirme yöntemi
<b>REBA</b>	: Hızlı tüm vücut değerlendirmesi
<b>ROSA</b>	: Hızlı ofis gerilim değerlendirmesi
<b>RULA</b>	: Hızlı üst ekstremité değerlendirme
<b>SI</b>	: Gerinim indeksi



## SİMGELER

<b>kg</b>	: Kilogram [Birim]
<b>°C</b>	: Santigrat derece [Birim]
<b>sn</b>	: Saniye [Birim]







## TABLO LİSTESİ

### Sayfa

<b>Tablo 3.1.</b> Ergonomik risk değerlendirme yöntemlerine ilişkin çalışmalar. ....	17
<b>Tablo 3.2.</b> Ergonomik MHDP çalışmaları.....	22
<b>Tablo 4.1.</b> Ergonomik risk değerlendirme yöntemlerinin fiziksel, çevresel ve psikosoyal kapsamlarının karşılaştırılması.....	32
<b>Tablo 4.2.</b> Ergonomik risk değerlendirme yöntemlerinin kapsamlarının karşılaştırılması. ....	33
<b>Tablo 4.3.</b> MHDP çalışmalarında kullanılan ERDY'ler ve sayıları (2000-2024). ....	34
<b>Tablo 4.4.</b> Çalışmada kullanılan yöntemlerin avantaj ve dezavantajları.....	35
<b>Tablo 4.5.</b> Çalışmada tercih edilmeyen yöntemlerin avantaj ve dezavantajları.....	37
<b>Tablo 4.6.</b> Ergonomi çalışmalarında kullanılan ÇKKV yöntemleri.....	41
<b>Tablo 4.7.</b> İkili karşılaştırma matrisi. ....	45
<b>Tablo 4.8.</b> Durulaştırılmış ikili karşılaştırma matrisi. ....	45
<b>Tablo 4.9.</b> Normalize edilmiş öncelik vektörü. ....	46
<b>Tablo 4.10.</b> K1 için ağırlıklı karar matrisi. ....	46
<b>Tablo 4.11.</b> K2 için ağırlıklı karar matrisi.....	46
<b>Tablo 4.12.</b> K3 için ağırlıklı karar matrisi.....	47
<b>Tablo 4.13.</b> K4 için ağırlıklı karar matrisi.....	47
<b>Tablo 4.14.</b> K5 için ağırlıklı karar matrisi.....	47
<b>Tablo 4.15.</b> K6 için ağırlıklı karar matrisi.....	48
<b>Tablo 4.16.</b> Nihai IVSF-AHP matrisi.....	48
<b>Tablo 4.17.</b> Skor fonksiyonu ile durulaştırılmış matris.....	48
<b>Tablo 4.18.</b> Normalize edilmiş matris.....	49
<b>Tablo 4.19.</b> Sözel ifadeler.....	50
<b>Tablo 4.20.</b> IVSF-AHP yöntemine göre belirlenen ağırlıklar.....	53
<b>Tablo 4.21.</b> REBA yönteminin etki puanları.....	54
<b>Tablo 4.22.</b> QEC yönteminin etki puanları.....	54
<b>Tablo 4.23.</b> COPSOQ yönteminin etki puanları.....	54
<b>Tablo 4.24.</b> OCRA yönteminin etki puanları.....	54
<b>Tablo 4.25.</b> Bütünleşik ergonomik risk (IER) için üyelik değerleri.....	55
<b>Tablo 4.26.</b> Kuralların etki puanları ve IER sınıfı.....	56
<b>Tablo 4.27.</b> Matematiksel modellerin kapsamlarının karşılaştırılması.....	59
<b>Tablo 4.28.</b> İndisler ve kümeler.....	59
<b>Tablo 4.29.</b> Parametreler.....	60
<b>Tablo 4.30.</b> Karar değişkenleri.....	61
<b>Tablo 4.31.</b> Amaç fonksiyonu.....	61
<b>Tablo 4.32.</b> Kısıtlar.....	62
<b>Tablo 4.33.</b> Test problemi parametreleri.....	66
<b>Tablo 4.34.</b> Test sonuçları.....	67
<b>Tablo 4.35.</b> CT ve IER performansı değişim oranları.....	68
<b>Tablo 5.1.</b> Ön montaj hattı işlem süreleri.....	72
<b>Tablo 5.2.</b> Ana montaj hattı işlem süreleri.....	74

<b>Tablo 5.3.</b> Bölge kısıtlamaları. ....	75
<b>Tablo 5.4.</b> Ön montaj hattı ergonomik risk analizi. ....	76
<b>Tablo 5.5.</b> Ana montaj hattı ergonomik risk analizi. ....	78
<b>Tablo 5.6.</b> Ön montaj hattı mevcut durum dağılım bilgileri. ....	82
<b>Tablo 5.7.</b> Ön montaj hattı KMMHDP-2 için çözüm sonuçları. ....	82
<b>Tablo 5.8.</b> Ön montaj hattı Ergo-KMMHDP-2 (F2) için çözüm sonuçları. ....	83
<b>Tablo 5.9.</b> Ön montaj hattı Ergo-KMMHDP-2 (Bölgeleme Kısıtlı + F2) için çözüm sonuçları. ....	83
<b>Tablo 5.10.</b> Ön Montaj hattı Ergo-KMMHDP-2 (Bölgeleme Kısıtlı + ER Limit) için çözüm sonuçları. ....	84
<b>Tablo 5.11.</b> Ön montaj hattı çözüm sonuçlarının karşılaştırılması. ....	85
<b>Tablo 5.12.</b> Ana montaj hattı mevcut durum dağılım bilgileri. ....	89
<b>Tablo 5.13.</b> Ana montaj hattı KMMHDP-2 modeli için çözüm sonuçları. ....	89
<b>Tablo 5.14.</b> Ana montaj hattı Ergo-KMMHDP-2 (F2) modeli için çözüm sonuçları. ....	90
<b>Tablo 5.15.</b> Ana montaj hattı Ergo-KMMHDP-2 (Bölgeleme Kısıtlı + F2) modeli için çözüm sonuçları. ....	90
<b>Tablo 5.16.</b> Ana montaj hattı Ergo-KMMHDP-2 (Bölgeleme Kısıtlı + ER Limit) modeli için çözüm sonuçları. ....	91
<b>Tablo 5.17.</b> Ana montaj hattı çözüm sonuçlarının karşılaştırılması. ....	93
<b>Tablo 5.18.</b> Çok değişkenli test sonuçları. ....	99
<b>Tablo 5.19.</b> Denekler arası etki testleri. ....	99
<b>Tablo 5.20.</b> Çoklu karşılaştırmalar. ....	101

## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 2.1. MHDP sınıflandırması.....	8
Şekil 2.2. MHDP çözüm yaklaşımları.....	9
Şekil 4.1. Montaj hattı şeması.....	26
Şekil 4.2. Önerilen metodoloji.....	27
Şekil 4.3. Çalışmanın birinci aşamasına ilişkin akış şeması.....	30
Şekil 4.4. Çalışmanın ikinci aşaması akış şeması.....	31
Şekil 4.5. ERDY ağırlıkları belirleme problemi hiyerarşik yapısı.....	44
Şekil 4.6. Bütünleşik ergonomik risk değerlendirme bulanık mantık modeli.....	50
Şekil 4.7. OCRA girdi verisinin üyelik fonksiyonu.....	51
Şekil 4.8. REBA girdi verisinin üyelik fonksiyonu.....	51
Şekil 4.9. QEC girdi verisinin üyelik fonksiyonu.....	52
Şekil 4.10. COPSQ girdi verisinin üyelik fonksiyonu.....	52
Şekil 4.11. IER çıktı verisinin üyelik fonksiyonu.....	53
Şekil 4.12. Matlab kural listesi.....	55
Şekil 4.13. Bulanık kural tabanı.....	57
Şekil 4.14. Bulanık çıkarım ekranı.....	57
Şekil 5.1. Örnek kablo ağ sistemi.....	69
Şekil 5.2. Örnek kablo donanımı [84].....	70
Şekil 5.3. Montaj hattı konsepti.....	71
Şekil 5.4. Ön montaj hattı görevlerin süre ve risk düzeylerine göre sınıflandırılması.....	81
Şekil 5.5. Ana montaj hattı görevlerin süre ve risk düzeylerine göre sınıflandırılması.....	81
Şekil 5.6. Ön montaj hattı mevcut duruma göre gerçekleşen iyileşmeler.....	86
Şekil 5.7. Ön montaj hattı istasyonlarının IER değerlerine göre denge durumu.....	87
Şekil 5.8. Ön montaj hattı istasyonlarının risk sınıflarına göre denge durumu.....	88
Şekil 5.9. Ana montaj hattı mevcut duruma göre gerçekleşen iyileşmeler.....	94
Şekil 5.10. Ana montaj hattı İstasyonların IER değerlerine göre denge durumu.....	95
Şekil 5.11. Ana montaj hattı istasyonlarının risk sınıflarına göre denge durumu.....	96
Şekil 5.12. Ön montaj hattı duyarlılık analizi.....	97
Şekil 5.13. Ana montaj hattı duyarlılık analizi.....	98



## MONTAJ HATTI Dengeleme Problemi İçin Bulanık Mantık Tabanlı Ergonomik Risk Değerlendirme Modeli

### ÖZET

Montaj hattı dengeleme problemlerinde ergonomik faktörlerin dikkate alınması, iş güvenliği ve performansı iyileştirme potansiyeli taşımaktadır. Bu çalışmada, ergonomik riskler göz önünde bulundurularak karma model montaj hattı dengeleme problemi (Ergo-KMMHDP) için iki aşamalı sistematik bir yaklaşım geliştirilmiştir. İlk aşamada, aralık değerli küresel bulanık analitik hiyerarşi prosesi (IVSF-AHP) kullanılarak ergonomik risk değerlendirme yöntemlerinin ağırlıkları belirlenmiştir. Bu ağırlıklar temel alınarak, bütünleşik ergonomik risk değerlendirme bulanık mantık modeli oluşturulmuştur. Bu aşamada, REBA, OCRA, QEC ve COPSOQ yöntemlerine dayalı risk skorları üzerinden bütünleşik ergonomik risk değeri hesaplanmış ve risk sınıfları tanımlanmıştır.

İkinci aşamada ise, Ergo-KMMHDP için matematiksel modeller geliştirilmiştir. Bu modeller, çevrim süresini minimize ederken, bütünleşik ergonomik risk değerini ve her risk sınıfına ait görevlerin istasyonlar arasında dengeli bir şekilde dağıtılmasını hedeflemektedir. Geliştirilen sistematik yaklaşımın geçerliliğini test etmek ve performansını değerlendirmek amacıyla bir kablo donanımı üretim tesisinde uygulama yapılmıştır. Uygulama sonuçları, ergonomik risklerin daha dengeli bir şekilde dağıtılabileceğini ve aynı çevrim süresi ile daha yüksek ergonomik performans elde edilebileceğini göstermektedir. Ön montaj hattında yapılan iyileştirmeler neticesinde hat verimliliğinde %10-11 ve ergonomik risk dengeleme performansında %12-25 oranında iyileşme sağlanabileceği belirlenmiştir. Ana montaj hattında ise hat verimliliğinde %2-3 ve ergonomik risk dengeleme performansında %6-12 oranında iyileşme elde edilebileceği saptanmıştır.

Ergonomik amaç fonksiyonu ve bölgeleme kısıtlamalarının çevrim süresi ve ergonomik risk dengeleme performansı üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla çok değişkenli varyans analizi (MANOVA) uygulanmıştır. Çoklu karşılaştırma sonuçları, ergonomik faktörlerin modele dahil edilmesinin çevrim süresi üzerinde anlamlı bir etkisinin olmadığını, ancak ergonomik risklerin istasyonlar arasındaki dağılımını daha dengeli hale getirdiğini ortaya koymuştur. Çalışma sonuçları, önerilen yaklaşımın iş güvenliği ve verimlilik açısından önemli faydalar sağlayabileceğini göstermektedir.



# **AN INTEGRATED ERGONOMIC RISK ASSESSMENT MODEL BASED ON FUZZY LOGIC FOR ASSEMBLY LINE BALANCING PROBLEM**

## **SUMMARY**

In the contemporary industrial context, the growing demand for products can primarily be met through mass production. Despite the increasing use of automation, manual assembly stations remain prevalent and, in some cases, unavoidable. Current practices in manual assembly lines involve balancing tasks based on takt time to synchronize them. However, this approach often neglects ergonomic aspects, potentially leading to work-related musculoskeletal disorders (WMSDs) and loss of motivation among workers.

Assembly line activities encompass several risk factors, including repetitive motions, awkward postures, heavy lifting, and stress. Ignoring human factors and prioritizing higher efficiency can amplify these risk factors, leading to an increase in WMSDs. Therefore, it is crucial to integrate ergonomics into assembly line balancing. Incorporating ergonomics into assembly line balancing is expected to reduce WMSDs, decrease costs associated with absenteeism, medical treatments, and worker rehabilitation, improve working conditions, and reduce errors in manual operations.

Considering ergonomic factors in assembly line balancing problems can significantly improve ergonomic conditions. This study aims to develop a systematic approach to balance circular mixed-model assembly lines by incorporating ergonomic risk considerations, ultimately enhancing both worker safety and line efficiency. The primary objective of this research is to create a two-stage framework for the mixed-model assembly line balancing problem with ergonomic considerations (Ergo-MMALBP).

The first stage involves determining the weights of ergonomic risk assessment methods using the interval-valued spherical fuzzy analytic hierarchy process (IVSF-AHP). Based on these weights, an integrated ergonomic risk assessment fuzzy logic model was constructed. This stage calculates the integrated ergonomic risk value using the fuzzy logic model based on REBA, OCRA, QEC, and COPSOQ risk scores, identifying risk classes.

The second stage involves formulating mathematical models for the Ergo-MMALBP. These models aim to minimize cycle time while balancing the integrated ergonomic risk value and the tasks of each risk class across the stations. To validate the applicability and evaluate the performance of the proposed approach, an application was conducted in a cable harness production facility. The results indicated that ergonomic risks could be more evenly distributed, and higher ergonomic performance could be achieved with the same cycle time. Improvements in the sub-assembly line resulted in a 10-11% increase in line efficiency and a 12-25% improvement in ergonomic risk balancing performance. In the main assembly line, a 2-3% increase in line efficiency and a 6-12% improvement in ergonomic risk balancing performance were observed.

The effects of ergonomic factors on assembly line balancing were further evaluated using multivariate analysis of variance (MANOVA). The multiple comparison results indicated that incorporating ergonomic factors into the model did not significantly affect cycle time, but it made the distribution of ergonomic risks among stations more balanced. The study demonstrates that the proposed approach can significantly benefit occupational safety and performance.

Ergonomics, when integrated with assembly line balancing, offers numerous advantages. It reduces the risk of WMSDs, thereby decreasing absenteeism and associated costs while improving overall worker health and safety. Moreover, ergonomic interventions can enhance production efficiency by minimizing errors and increasing worker satisfaction and motivation. Despite these benefits, traditional assembly line balancing approaches often overlook ergonomic considerations, leading to suboptimal working conditions.

The ergonomic risk assessment methods used in this study, such as REBA, OCRA, QEC, and COPSOQ, are well-established in the literature. Each method evaluates different aspects of ergonomic risk, providing a comprehensive assessment when used together. The IVSF-AHP technique was employed to determine the relative importance of each method, reflecting their specific strengths and relevance to different risk factors.

The integrated ergonomic risk assessment fuzzy logic model developed in this study combines these methods' strengths, offering a holistic evaluation of ergonomic risks. By calculating an integrated ergonomic risk value, this model provides a more nuanced understanding of the overall ergonomic conditions in the assembly line. This integrated approach ensures that all relevant risk factors are considered, leading to more effective ergonomic interventions.

The mathematical models formulated for the Ergo-MMALBP aim to balance ergonomic risks across workstations while minimizing cycle time. This dual objective ensures that ergonomic improvements do not come at the cost of production efficiency. The application of these models in a real-world setting, such as the cable harness production facility, demonstrates their practical relevance and effectiveness.

The results of this application highlight the significant improvements in ergonomic risk distribution and line efficiency that can be achieved with the proposed approach. These findings underscore the importance of incorporating ergonomic considerations into assembly line balancing. They also provide a compelling case for the wider adoption of ergonomic risk assessment methods in industrial settings.

In addition to practical applications, this study contributes to the academic literature by developing a novel framework for ergonomic risk assessment and assembly line balancing. The use of IVSF-AHP and fuzzy logic models represents an innovative approach to integrating ergonomic considerations into production planning. This framework can be adapted to various industrial contexts, offering a versatile tool for improving workplace ergonomics and efficiency.

The limitations of this study primarily relate to the complexity and computational demands of the proposed models. Evaluating each task's ergonomic risk using multiple methods can be time-consuming, especially in large-scale assembly lines. However, this detailed assessment is essential for accurately identifying and mitigating ergonomic risks. Future research could explore the use of metaheuristic algorithms,



such as genetic algorithms or bee colony algorithms, to address these computational challenges and enhance the scalability of the proposed models.

Furthermore, the study's scope and significance extend beyond the immediate application in the cable harness production facility. The methodology developed can be tailored to different types of assembly lines, accommodating the specific ergonomic risks and production requirements of various industries. This adaptability makes the framework highly valuable for organizations aiming to improve their ergonomic standards while maintaining or even enhancing their production efficiency.

Another notable contribution of this study is the empirical validation of the proposed models through real-world application and statistical analysis. The use of MANOVA provided robust evidence of the models' effectiveness in balancing ergonomic risks without compromising cycle time. These statistical insights are crucial for demonstrating the practical benefits of integrating ergonomics into assembly line balancing, offering a solid foundation for further research and implementation in diverse industrial settings.

The study's contributions to the literature include the development of a fuzzy logic-based integrated ergonomic risk assessment model, the incorporation of physical, environmental, and psychosocial risk factors, and the creation of mathematical models for ergonomic assembly line balancing. Additionally, the use of IVSF-AHP to determine the weights of different ergonomic risk assessment methods represents a novel approach in this research area.

Overall, this study demonstrates that integrating ergonomic considerations into assembly line balancing can significantly improve working conditions and production efficiency. The proposed two-stage framework offers a comprehensive approach to assessing and balancing ergonomic risks, providing valuable insights for both researchers and practitioners in industrial engineering. As ergonomic risk assessment continues to gain importance in the workplace, the methods and models developed in this study will play a crucial role in advancing ergonomic practices and promoting occupational health and safety.



## 1. GİRİŞ

Günümüzde artan talebin karşılanması, ancak kitle üretimi ile mümkün olabilmektedir. İlk olarak 20. yüzyılın başlarında Ford firması tarafından, talep miktarı yüksek ürünlerin kitle üretimini sağlamak amacıyla geliştirilen montaj hatları, üretim maliyetlerini azaltmış ve üretim sürelerini kısaltmıştır [1].

Otomasyonun endüstride artan kullanımına rağmen, manuel montaj istasyonları hala yaygındır ve bazı durumlarda kaçınılmazdır. Manuel montaj hatlarındaki mevcut uygulama, her iş istasyonunun takt-zamanını kullanarak bunları dengelemek ve uyumlu hale getirmektir. Ancak bu yaklaşım çoğunlukla ergonomik yönleri içermemekte ve bu nedenle iş ile ilgili kas-iskelet sistemi rahatsızlıklarına (KİSR) ve motivasyon kaybına yol açabilmektedir [2].

Montaj hatlarındaki faaliyetler, tekrarlayan hareketler, uygunsuz duruşlar, ağır yük kaldırma ve stres faktörleri gibi birçok risk faktörünü içermektedir. İnsan faktörlerini dikkate almadan çalışanlar üzerinde daha yüksek verimlilik baskısı yapılması, risk faktörlerinin etkisini artırabilir ve bu da KİSR'lerin artmasına neden olabilir. Bu nedenle ergonomi, montaj hattı dengeleme ile bütünleştirilmelidir [3].

Montaj hattı dengelemede ergonominin dikkate alınması ile KİSR'in azaltılması ile iş devamsızlığı, tıbbi tedaviler, işçi rehabilitasyonu maliyetlerinde azalma, çalışma koşullarının iyileştirilmesi ve manuel operasyonlardaki hataların azaltılması beklenmektedir [4]. Literatürde ergonomik risk değerlendirmesi için birçok yöntem önerilmiştir. Bu yöntemlerin birçoğu farklı özelliklere sahip olsa da genellikle işçinin çalışma sırasındaki pozisyonunu değerlendirmek için tasarlanmıştır. Yöntemlerdeki farklılıklar, ergonomik risk değerlendiricilerinin iş için doğru yöntemi seçmesini zorlaştırmaktadır. Dolayısıyla benzer yöntemlerin sınırlılıkları nedeniyle yöntemler arasında seçim yapmak adeta ayrı bir uzmanlık gerektirmektedir [5].

Ergonomik risk seviyesi, ağır yük kaldırma, uygunsuz duruşlar, uzun süreli oturma veya ayakta durma, tekrarlayan hareketler, titreşim, sıcaklık, nem, gürültü, aydınlatma, sert fiziksel faktörlere maruz kalmanın yoğunluğu, sıklığı ve süresi dâhil

olmak üzere çeşitli faktörlere bağlıdır. Ergonomik riskleri değerlendirmeye yönelik en sık tercih edilen yöntemler arasında Hızlı Üst Uzuv Değerlendirmesi (RULA), Hızlı Tüm Vücut Değerlendirmesi (REBA), Mesleki Tekrarlamalı Hareketler İndeksi (OCRA) ve Hızlı Maruziyet Değerlendirme Yöntemi (QEC) bulunur. ISO 11.226 ve ISO 11.228 montaj hatlarında ergonomik riskleri değerlendirmek için yayınlanan standartlar arasında yer almaktadır [6].

### **1.1. Çalışmanın Kapsamı ve Önemi**

Montaj hattı dengeleme problemlerinde (MHDP) ergonomik faktörlerin dikkate alınması, işçi sağlığı ve güvenliğinin yanı sıra üretim verimliliği açısından önemlidir. Geleneksel montaj hattı dengeleme yaklaşımlarında, işçilerin maruz kaldığı ergonomik riskler genellikle göz ardı edilmekte ve bu durum, KİSR'lerin artmasına, iş devamsızlığına ve motivasyon kaybına yol açmaktadır. Bu çalışma, ergonomik risklerin sistematik bir şekilde değerlendirildiği ve dengelendiği bir montaj hattı dengeleme yaklaşımı geliştirmeyi amaçlamaktadır.

Çalışma, dairesel karma model montaj hatlarında ergonomik risklerin bütünlük bir şekilde değerlendirilmesine ve dengelemesine odaklanmaktadır. Fiziksel, çevresel ve psikososyal ergonomik risk faktörleri dikkate alınarak geliştirilen bu yaklaşım, işçi sağlığını ve güvenliğini iyileştirmenin yanı sıra üretim süreçlerinin etkinliğini ve verimliliğini artırmayı hedeflemektedir.

### **1.2. Çalışmanın Amacı ve Yöntemi**

Bu çalışmanın temel amacı, dairesel karma model montaj hatlarında ergonomik riskleri göz önünde bulundurarak hattın dengelenmesi için sistematik bir yaklaşım geliştirmektir. Bu temel amaç doğrultusunda, alt amaçlar ve bu amaçlara yönelik yöntem ve adımlar aşağıda açıklanmıştır:

- Ergonomik risk değerlendirme yöntemlerinin (ERDY) ağırlıklarının belirlenmesi: IVSF-AHP kullanılarak ERDY'lerin önem derecelerinin belirlenmesi sağlanmıştır.
- Bütünlük ergonomik risk değerlendirme modelinin oluşturulması: Belirlenen ağırlıklar temel alınarak bütünlük bir ergonomik risk değerlendirme bulanık mantık modeli geliştirilmiştir. Bu model, dört farklı ergonomik risk

değerlendirme yöntemine göre belirlenen risk seviyesine dayanarak bütünleşik ergonomik risk değerlerini hesaplamakta ve risk sınıflarını belirlemektedir.

- Matematiksel modelin formüle edilmesi: Ergo-KMMDHP için matematiksel modeller oluşturulmuştur. Bu modeller, çevrim süresini minimize ederken, bütünleşik ergonomik risk değerinin ve her bir risk sınıfına ait görevlerin istasyonlar arasında dengelenmesini amaçlamaktadır.

### 1.3. Araştırma Soruları

Bu çalışmada aşağıdaki temel araştırma sorularına yanıt aranmaktadır.

- 1) Ergonomik faktörlerin dikkate alınması, ergonomik risklerin istasyonlar arasında daha dengeli bir şekilde dağıtılmasını sağlar mı?
- 2) Montaj hattı dengelemede ergonomik risklerin dikkate alınması hat verimliliğini nasıl etkiler?
- 3) İstasyonların ergonomik risk değerlerinin ve ergonomik risk sınıflarının dengelenmesinde ergonomik risklerin modele nasıl dahil edildiği etkili midir?
- 4) Bölgeleme kısıtlarının ergonomik risk performansı ve çevrim süresi üzerindeki etkisi nasıldır?

### 1.4. Hipotezler

Hipotez 1 (H1): Ergonomik faktörlerin dikkate alındığı modeller, ergonomik risk dengeleme performansını artırır.

Hipotez 2 (H2): Montaj hattı dengelemede ergonomik risklerin dikkate alınması, hat verimliliğini olumsuz etkilemez.

Hipotez 3 (H3): Ergonomik risklerin modele amaç fonksiyonu veya kısıt olarak eklenmesi, ergonomik risk değeri ve ergonomik risk sınıflarının dengeleme performansını etkiler.

Hipotez 4 (H4): Bölgeleme kısıtları, ergonomik risk performansını ve çevrim süresini negatif yönde etkiler.

Hipotezler, MANOVA tekniği kullanılarak test edilmiştir. MANOVA, birden fazla bağımlı değişkenin aynı anda analiz edilmesine olanak tanıyan güçlü bir istatistiksel yöntemdir ve bu çalışmada ergonomik risk dengeleme performansı, çevrim süresi ve

hat verimliliği gibi çeşitli performans ölçütlerinin aynı anda değerlendirilmesi amacıyla kullanılmıştır.

Hipotezlerin test edilmesi amacıyla önerilen matematiksel modeller, ergonomik risk faktörlerinin dikkate alındığı ve alınmadığı senaryolar altında çalıştırılmıştır. Bu süreçte elde edilen veriler, IBM SPSS istatistik programı kullanılarak MANOVA tekniği ile analiz edilmiştir. Anlamlılık düzeyi (p) 0.05 olarak belirlenmiş ve analizler sonucunda hipotezlerin doğruluğu değerlendirilmiştir.

MANOVA sonuçlarına göre, ergonomik faktörlerin dikkate alındığı modellerin ergonomik risk dengeleme performansını artırıp artırmadığı, montaj hattı verimliliği üzerindeki etkileri, ergonomik risklerin modele amaç fonksiyonu veya kısıt olarak eklenmesinin performans üzerindeki etkileri ve bölgeleme kısıtlarının ergonomik risk performansı ve çevrim süresi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Analiz sonuçları, bölüm 5.4.'te sunulmuştur.

### **1.5. Çalışmanın Kısıtları ve Sınırları**

Bu çalışmada önerilen yöntemlerin çeşitli kısıtları ve sınırlamaları bulunmaktadır. İlk aşamada, her bir görevin ergonomik riski farklı değerlendirme yöntemleri kullanılarak hesaplanmıştır. Bu aşama, çeşitli endüstrilerdeki montaj görevlerinin farklı ergonomik risklerle karakterize edilmesi açısından önemlidir. Ancak, her bir görevin farklı ergonomik yöntemlerle değerlendirilmesi zaman alıcı olabilmektedir. Bu nedenle, yöntemimiz küçük veya orta ölçekli görev sayısına sahip montaj hatları için daha uygun olup, büyük ölçekli görev sayısına sahip montaj hatlarında hesaplamalar zaman alıcı olabilmektedir.

İkinci aşamada, yeni bir amaç fonksiyonu geliştirilerek, farklı ergonomik sınıflardaki görevlerin istasyonlar arasında eşit olarak dağıtılması hedeflenmiştir. Bu amaç fonksiyonu, görevleri orantılı olarak istasyonlara tahsis ederek tüm işçiler için eşit çalışma koşulları sağlamaktadır. Önceki yaklaşımlar, istasyon sayısının veya çevrim süresinin artırılmasını gerektirdiğinden, sistemlere ekstra maliyetler yüklemiştir.

Ayrıca, yüksek hesaplama gereksinimleri, modelin büyük ölçekli ve karmaşık montaj hatlarında uygulanabilirliğini sınırlayabilir. Alternatif olarak, popülasyon bazlı metasezgisel algoritmalar, örneğin genetik algoritma, arı kolonisi algoritması gibi yöntemler, büyük ölçekli problemlerin çözümünde etkili olabilir.

## 1.6. Çalışmanın Literatüre Katkıları

Bildiğimiz kadarıyla, görevlerin fiziksel, çevresel ve psikososyal risklerini kapsayan bulanık mantık tabanlı bütünleşik bir ergonomik risk değerlendirme modeli geliştirilmemiştir. Bu açıdan yapılacak çalışma literatürde bir ilk olacaktır. Ayrıca ergonomik risk seviyesinin belirlenmesi için farklı yöntemlerin bütünleştirilmesi çalışmanın farklı sektör veya montaj hatlarına uygulanmasını kolaylaştırmaktadır.

Bunlara ek olarak montaj hatlarına ilişkin önceki çalışmalarda genellikle her bir istasyonun toplam ergonomik riskleri en aza indirilmeye çalışılmıştır. Bu durum ergonomik riski yüksek olan birkaç görevi bir istasyona ve ergonomik riski düşük olan görevleri diğer istasyonlara tahsis eden uygun olmayan bir çözüme sebep olabilmektedir. Bu şekilde yapılan bir planlama çalışanları olumsuz etkileyebilmektedir. Bu problemin üstesinden gelmek için geliştirilen modelde hem her istasyondaki risk sınıflarına ait görev sayıları hem de istasyonların toplam risk seviyesi dikkate alınarak hat dengelemesi yapılmaktadır.

Bu çalışmanın ana katkıları aşağıda özetlenmiştir:

- Bulanık mantığa dayalı yeni bir entegre ergonomik risk değerlendirme modeli önerilmiştir.
- Fiziksel, çevresel ve psikososyal risk faktörleri dikkate alınmıştır.
- Ergonomik montaj hattı dengeleme problemi için matematiksel modeller formüle edilmiştir.
- Her bir ERDY'nin ağırlığı IVSF-AHP kullanılarak hesaplanmıştır.
- Vaka çalışmasına dayalı yeni bir veri seti, hesaplamalı araştırma amacıyla literatüre kazandırılmıştır.

## 1.7. Tezin Organizasyonu

Bu tez, altı bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde, tezin kapsamı ve önemi açıklanmış; araştırma soruları ve hipotezler belirlenerek çalışmanın sınırlılıkları ve literatüre katkısı tartışılmış ve yapılan çalışmanın yapısal düzeni sunulmuştur. İkinci bölümde, MHDP ve ergonominin teorik çerçevesi verilmiştir. Üçüncü bölümde, literatürde yer alan ilgili çalışmalar incelenmiştir. Dördüncü bölümde, çalışmada

geliştirilen model ve kullanılan yöntemler açıklanmıştır. Beşinci bölümde, uygulama çalışmasına yer verilmiş ve son bölümde elde edilen bulgular sunulmuştur.





## **2. MONTAJ HATTI Dengeleme ve Ergonomi**

Bu bölümde, MHDP kavramı, sınıflandırması ve çözüm yaklaşımları ile ERDY'ler açıklanmıştır.

### **2.1. Montaj Hattı Dengeleme Problemi**

MHDP, görevlerin öncelik ilişkilerini göz önünde bulundurarak belirlenen çevrim süresi içinde ve belirli bir performans ölçütünü maksimize edecek şekilde istasyonlara atanması problemidir [7].

#### **2.1.1. Montaj hattı dengeleme problemlerinin sınıflandırılması**

MHDP, çeşitli kriterlere göre sınıflandırılabilir. Dengeleme amacına göre, dört ana kategori bulunmaktadır: MHDP-1, sabit çevrim süresi ile istasyon sayısını minimize etmeyi hedefler; MHDP-2, sabit istasyon sayısı ile çevrim süresini en aza indirir; MHDP-E, hem istasyon sayısını hem de çevrim süresini birlikte minimize etmeyi amaçlar; ve MHDP-F, belirli istasyon sayısı ve çevrim süresi için uygun bir çözüm bulmayı hedefler [7].

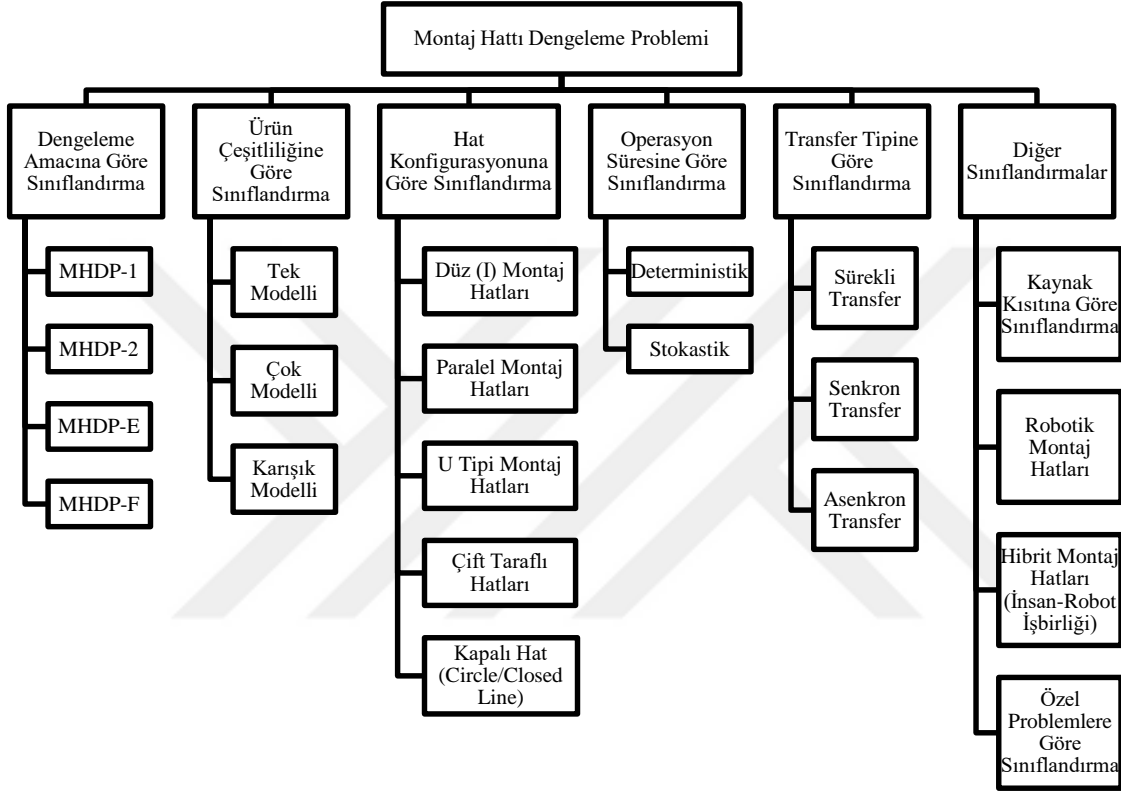
Ürün çeşitliliğine göre, tek modelli, çok modelli ve karma modelli olarak sınıflandırılabilir. Tek modelli montaj hatları sürekli olarak tek bir ürün modeli üretirken, çok modelli hatlar farklı ürün modellerini üretebilir. Karma modelli montaj hatlarında ise bir ana ürünün çeşitli modelleri aynı hatta üretilir [8].

Hat konfigürasyonuna göre montaj hatları düz, paralel, çift taraflı ve U-tipi olarak sınıflandırılabilir. Düz montaj hatlarında istasyonlar bir çizgi boyunca dizilirken [9], paralel montaj hatları benzer üretim özelliklerine sahip ürünleri üretmek için paralel yerleştirilir [10]. Çift taraflı montaj hatları büyük ve ağır ürünlerin montajında kullanılır [9], U-tipi montaj hatları ise U şeklinde yerleştirilmiş olup giriş ve çıkış aynı noktada bulunur [11].

MHDP'ler operasyon sürelerinin durumuna göre deterministik ve stokastik olarak, transfer tipine göre ise sürekli, senkron ve asenkron olarak sınıflandırılır [7].

Diğer sınıflandırmalar arasında kaynak kısıtlarına göre ve özel problemlere göre sınıflandırmalar bulunmaktadır. Kaynak kısıtlamalarına göre yapılan sınıflandırmada, malzeme, işgücü, tezgâh gibi unsurlar sınırlıdır. Robotik montaj hatları ise, endüstriyel robotların kullanıldığı hatlardır ve insan-robot işbirliğiyle veya tamamen robotik olarak yapılandırılabilir [12].

MHDP sınıflandırmaları Şekil 2.1’de gösterilmiştir.



Şekil 2.1. MHDP sınıflandırması.

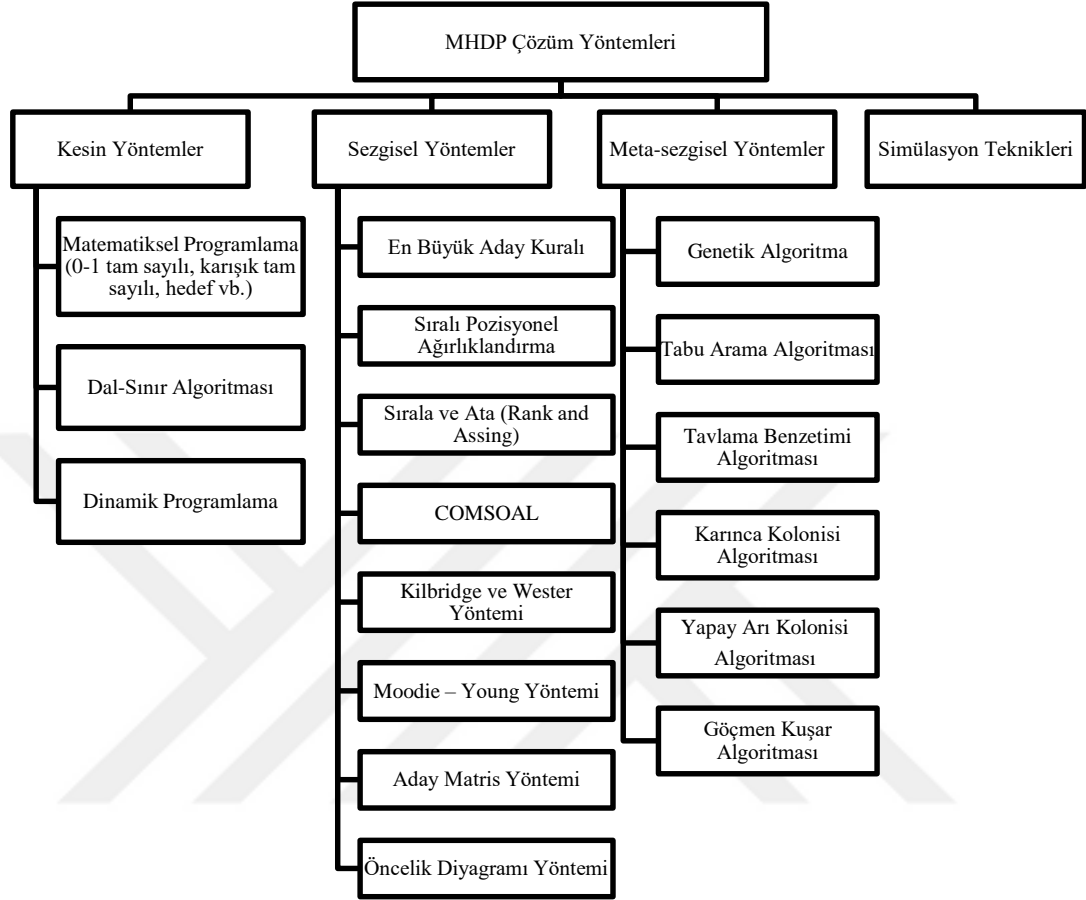
### 2.1.2. MHDP çözüm yaklaşımları

MHDP çözümü için kesin çözüm yöntemlerinin yanı sıra, en iyi çözüme yakın sonuçlar veren sezgisel, meta-sezgisel ve simülasyon yöntemlerine de başvurulmaktadır [13]. Literatürde sıklıkla kullanılan MHDP çözüm yaklaşımları, Şekil 2.2’de sınıflandırılmıştır.

Kesin yöntemler küçük boyutta problemler için en iyi sonucu kolaylıkla bulabilmektedir, fakat büyük boyutlu problemlerde en iyi sonuca ulaşma süresi kısıtlar ve diğer etmenlerin artması nedeniyle uzun olmaktadır.

Sezgisel ve meta-sezgisel yöntemler ise, sınırlı zamanda en iyiye yakın sonuçlar bulmak için kullanılan yaklaşımlardır [14].

Simülasyon teknikleri, MHDP’ni bilgisayar ortamında çözmek için kullanılan yöntemlerdir. Bu teknikler, sistemin işleyişini anlamak, olası değişiklikleri pratik olarak görmek ve değerlendirmek amacıyla uygulanmaktadır.



Şekil 2.2. MHDP çözüm yaklaşımları.

## 2.2. Ergonomik Risk Değerlendirme

Ergonomik risk değerlendirmesi, çalışma ortamında insanın fiziksel ve zihinsel olarak nasıl etkilendiğini analiz etmek için kullanılan bir süreçtir. Bu süreçte, iş yerindeki risk faktörleri belirlenir ve değerlendirilir; bu faktörler, çalışanların sağlığına ve performansına olumsuz etki edebilecek durumları içerebilir.

Bu değerlendirme genellikle ergonomi prensiplerine dayanır ve çalışanların konforu, güvenliği ve verimliliği açısından olası riskleri tanımlamayı amaçlar. Örneğin, iş yerindeki ergonomik riskler arasında yanlış pozisyonlarda oturma, tekrarlayıcı hareketler, ergonomik olmayan ekipman kullanımı ve çalışma alanlarının düzenlenmesi yer alabilir.

Ergonomik bir risk değerlendirmesi yapmanın amacı, KİSR'lere yol açabilecek mevcut veya potansiyel riskleri belirleyerek işle ilgili sağlık risklerini ortadan kaldırmaktır. Risk faktörleri tespit edildiğinde, bunları azaltmak için gerekli önlemler alınmalıdır. Risk değerlendirmeleri, işyerinde yapılan bir müdahaleyi değerlendirmek için de yararlı olabilmektedir [15].

### **2.2.1. Ergonomik risk faktörlerinin sınıflandırılması**

Aksüt ve ark. [16], ergonomik risk faktörlerine yönelik yaptıkları literatür taramasında, bu riskleri fiziksel, bilişsel, örgütsel, çevresel, kişisel ve psikososyal faktörler olarak sınıflandırmıştır.

#### **2.2.1.1. Fiziksel faktörler**

Fiziksel ergonomi, insanın fiziksel aktivitesiyle ilgili anatomik, antropometrik, fizyolojik ve biyomekanik özellikleri ifade eder [16]. Fiziksel ergonomik risklerin düzeyi, fiziksel çalışmaya maruz kalmanın yoğunluğuna, sıklığına ve süresine bağlıdır [17]. Fiziksel risk faktörleri uygunsuz duruş, uzanma, statik duruş, diz çökme, eller veya kollarla baş üstü çalışma veya aşırı güç kullanma gibi durumları içerir [16].

#### **2.2.1.2. Bilişsel Faktörler**

Bilişsel ergonomi, insan zihni ve bilişsel süreçler ile çalışma ortamları veya sistemler arasındaki etkileşimi inceler. Bu alan, insanların nasıl düşündüğünü, bilgiyi nasıl işlediğini, karar verdiğini ve bu süreçleri çalışma ortamlarında nasıl kullandığını anlamaya odaklanır [18]. Aşağıda bilişsel risk faktörleri ile ilgili kavramlar açıklanmaktadır Bilişsel risk faktörleri ile ilgili kavramlar aşağıda açıklanmıştır [16].

Zihinsel iş yükü, görevin tamamlanması için gerekli zihinsel iş miktarıdır [19]. İnsan güvenilirliği, sistemlerin güvenilirliğinin bir yönüdür ve insanların bir sistemin ne derece parçası olduklarını ve onların üzerindeki etkilerini değerlendirir. Bu, üretim süreçlerinde insan katılımının risklerini incelemeyi kapsar. İnsan bilgisayar etkileşimi, insan ve bilgisayar sistemleri arasındaki etkileşimi inceler ve bu araçların tasarımı, uygulanması ve etkilerini değerlendirir [20]. İnsan-robot etkileşimi, teknolojinin ilerlemesiyle insan-robot etkileşiminin yoğunlaştığı iş paylaşım yaklaşımlarını kapsar. İnsanlar ve robotlar arasında iş paylaşımı yapılırken, robot ve insan için çalışma alanında verimli ve güvenli bir ergonomik çalışma ortamı oluşturulması gerekmektedir [21].

### **2.2.1.3. Örgütsel faktörler**

Örgütsel ergonomi, sosyoteknik sistemlerin optimizasyonu ile ilgilenir ve örgütsel yapılar, politikalar ve süreçleri kapsar [22]. Aşağıda, örgütsel risk faktörleri ile ilgili bazı kavramlar açıklanmıştır.

İletişim, örgütsel iletişimin ergonomik boyutunu iş yeri düzeninin tasarlanmasıyla birlikte iletişim çevresinin tasarımını da kapsar. Çalışma programları ve tasarımı, çalışma ortamındaki ekipmanların düzeni, çalışma sürelerinin ve ekip çalışması gibi çalışma şekillerinin tasarımını içerir. Uzaktan çalışma, bir işverenle mevcut istihdam durumunu koruyarak şirket ofisi dışında alternatif iş yerlerinde (ev gibi) çalışma şeklidir. Sanal organizasyonlar, teknoloji içinde insan ögesini geri plana atmadan, aksine daha fazla önem vererek değerlendirilmelidir. Ekip kaynak yönetimi, her ferdin birbirleriyle uyum içerisinde çalışarak sinerji oluşturmasını sağlar [16].

### **2.2.1.4. Çevresel faktörler**

Çalışma ortamının sıcaklık, nem, aydınlatma, gürültü, titreşim, basınç gibi özellikleri, bireyin sağlığı üzerinde önemli etkilere sahiptir. Çevresel ergonomik risk faktörleri ile ilgili bazı kavramlar aşağıda açıklanmıştır.

Gürültü, uzun süre maruz kalındığında işitme kaybına, fizyolojik ve psikolojik sorunlara neden olabilir. Ayrıca, dikkat kaybına bağlı iş kazalarına yol açabilir. Termal konfor, ortamın sıcaklığının fazla olmasının çalışan üzerinde uyku hâli, yorgunluk, tansiyon düşmesi gibi olumsuz etkilere sebep olabilirken ortamın soğuk olması ise dikkat dağılması, bedensel ve zihinsel verimin düşmesi, titreme gibi olumsuz etkileri olabilir. Aydınlatma, işin kaliteli bir şekilde yapılabilmesi için yeterli seviyede olmalıdır. Kimyasal etkenler çalışma alanına karışabilen ve çevrenin sağlıklı yaşama uygun kimyasal bileşimini değişmesine neden olabilmektedir. Renk, dikkat, uyarı, motivasyon, verimlilik gibi faktörlere etki ederek çalışma koşullarını iyileştirebilir. Tozlar, solunum ve deri emilimi yoluyla sağlık riski oluşturabilir [16].

### **2.2.1.5. Kişisel faktörler**

Kişisel ergonomik risk faktörleri; alkol, tütün gibi zararlı madde kullanımı, fazla kilo, yaş, bedensel yetersizlik, solaklık, kronik rahatsızlıklara sahip olmak gibi kişisel faktörler çalışma ortamında ergonomik risklere sebep olabilmektedir.

### **2.2.1.6. Psikososyal faktörler**

Psikososyal risk faktörleri, çalışanların psikolojik ve sosyal sağlığını etkileyen iş ortamı ve organizasyonu ile ilgili faktörlerdir. İş yükü ve zaman baskısı, monotonluk, kariyer gelişim olanaklarının sınırlılığı, rol çatışması ve belirsizliği, sosyal destek eksikliği, uzun çalışma saatleri ve iş-yaşam dengesi gibi faktörler, çalışanların stres seviyelerini artırabilir, motivasyonlarını düşürebilir ve genel sağlıklarını olumsuz etkileyebilir. Bu risk faktörlerinin azaltılması için sağlıklı bir çalışma ortamı oluşturulmalı, destekleyici politikalar uygulanmalı ve açık iletişim kanalları kurulmalıdır [19].

### **2.2.2. Ergonomik risk değerlendirme yöntemleri**

Çalışan sağlığı, performansı ve iş verimliliği açısından uygun olmayan çalışma duruşlarının düzeltilmesi ve iyileştirilmesi gerekmektedir. Ergonomik riskleri değerlendirmek için kullanılan yöntemler aşağıda açıklanmıştır.

Kişisel anket yöntemleri, kontrol listeleri ve anketler kullanılarak ergonomik risklerin değerlendirilmesini sağlar. Öznel değerlendirmelerin etkin olması, düşük kaynak kullanımı ve geniş örnek büyüklüğü sağlamaları açısından avantajlıdır. Ancak, kesin bir şekilde KİSR oluşma riskini ölçememeleri ve sonuçların şüpheli olması dezavantajlarıdır. Alman KİS rahatsızlık anketi ve Cornell KİSR taraması örnek olarak verilebilir.

Doğrudan ölçüm yöntemleri, elektromiyografi, açıölçer, biyomekanik analiz ekipmanları ve optik araçlar gibi teknikler kullanılarak çalışanların duruş ve hareketlerinin değerlendirilmesini sağlar [20].

Sistemik gözleme dayalı yöntemler, KİSR oluşumu riskini kaydederek nicel değerlendirmeler yapmak için kullanılır ve basit ile gelişmiş gözleme dayalı yöntemler olarak ikiye ayrılır [21]. Örnekler arasında REBA, QEC, OCRA ve NIOSH bulunmaktadır. Gelişmiş gözleme dayalı yöntemlere örnek olarak ANYBODY, Ergo-Man ve 3D Match verilebilir.

## **2.3. Montaj Hattı Dengelemede Ergonomik Faktörler**

Üretimde montaj süreçleri emek yoğun aşamalardan biridir. Bu aşamada yapılan işlerden bazıları, işçiler için fiziksel olarak zorlayıcı veya rahatsız edici pozisyonlar içerebilir. Çalışma sırasında uzun süre ayakta durma, çömelme, eğilme, esneme veya

dönme gibi durumlar, montaj işlerinde gözlenen, işçilerin sağlığını ve performansını olumsuz etkilemektedir. Montaj hatlarındaki çalışmalar genellikle monoton olduğundan, ergonomik olarak uygun olmayan bu çalışma pozisyonları gün boyunca tekrarlanır [23].

Ayakta durmak, eğilmek, esnemek ve bir süre bu pozisyonlarda kalmak kaslardaki kan akışını azaltır. Dolaşımın azalması nedeniyle bacak, sırt, bel, boyun ve kol kaslarında yorgunluk ve ağrı oluşabilir. Bu nedenle, uzun süreler boyunca montaj hattında benzer durumlarda çalışan işçilerin yaşadığı yorgunluk ve ağrı daha sonra KİSR'lere dönüşmektedir. İşle ilgili KİSR'leri ve insan hatalarını önlemek için risk analizi gereklidir [23].







### **3. KAYNAK ARAŞTIRMASI**

Bu bölümde, ergonomik MHDP ve ERDY çalışmaları ele alınmıştır. Bölüm 3.1’de, ERDY çalışmaları detaylı bir şekilde özetlenmiştir. Bölüm 3.2’de ise ergonomik MHDP ve çözüm yöntemleri üzerine gerçekleştirilen çalışmalar özetlenmiştir.

#### **3.1. Ergonomik Risk Değerlendirme Yöntemlerine İlişkin Çalışmalar**

Ergonomik risk değerlendirme için geliştirilen ilk yaklaşımlardan biri hareketleri dört vücut bölümüne (gövde, kollar, alt gövde ve boyun) ayıran OWAS’tır [24]. OWAS’ın temel konsepti, RULA, REBA, Avrupa Ergonomik Değerlendirme Çalışma Sayfası (EAWS), NIOSH, Gerinim İndeksi (SI) ve OCRA gibi daha karmaşık yöntemlere ilham vermiştir [25-27].

Ergonomik risk değerlendirmesinde kullanılacak yöntemin belirlenmesi problemin önemli bir parçasıdır. ERDY’ler, kısmen farklı ergonomik yönleri dikkate aldığından, seçilen yöntemin probleme uygunluğu önemli bir faktördür. Literatürde birden fazla yöntemle göre risk değerlendirmesinin yapıldığı ve sonuçlarının karşılaştırıldığı çalışmalar mevcuttur. Yapılan çalışmalarda ergonomik risk değerlendirmesinin tüm riskleri kapsayacak şekilde yapılabilmesi için birkaç yöntemin bir arada kullanılması gerektiği vurgulanmaktadır.

Kee ve Karwowski [28], çalışmalarında fiziksel yükü değerlendirmek için OWAS, RULA ve REBA yöntemlerini kullanmıştır. Fiziksel yük kategorisi için yöntemler arası güvenilirlik, OWAS ve RULA arasında %29,2 ve RULA ile REBA arasında %48,2 hesaplanmıştır. Dansie [29], daha öngörülü bir ergonomik analiz aracı oluşturmak amacıyla, çeşitli analiz araçlarının çıktılarının hızlı ve mantıklı bir şekilde bir araya getirilmesini sağlayan bir uzman sistem geliştirmiştir. Çalışmada Rodgers Modeli, RULA ve SI yöntemleri kullanılmıştır. Kahraman [5] tarafından yapılan çalışmada, RULA, REBA ve SI yöntemlerinin AHP ile ağırlıklandırılması ile bütünleşik bir model geliştirmiştir. Mert [30] tarafından yapılan çalışmada, bir çanta fabrikasında ergonomik riskler ManTRA, PLIBEL, QEC, REBA ve OWAS yöntemleriyle değerlendirilmiştir. Sonuçlara göre, risk yüzdesi açısından en iyi sonuç

ManTRA, eylem seviyesi açısından ise OWAS, REBA ve QEC yöntemleriyle elde edilmiştir. Bu nedenle, eylem önceliğini belirten ancak aciliyeti belirtmeyen ManTRA'nın, QEC, REBA veya OWAS ile birlikte kullanılması önerilmiştir. Chowdhury [31], 72 bilgisayar kullanıcısının bilgisayar iş istasyonları tasarımı ve çalışma duruşlarının ergonomik değerlendirmesini yapmak için REBA ve RULA yöntemini kullanmıştır. RULA yöntemi, bilgisayarla çalışmanın üst ekstremitte aktivitelerini değerlendirmek için daha uygun bulunmuştur. Karabacak [32], diş hekimleri için tekrarlayan hareketleri, çalışma duruşlarını ve normal çalışma durumundan sapmaları analiz etmek için RULA ve CORNELL yöntemlerini kullanmıştır. Rodrigues ve ark. [33] yapılan çalışmada, ofis çalışanlarında ergonomik, fiziksel ve psikososyal faktörleri karşılaştırmak amacıyla RULA, Hızlı Ofis Gerilim Değerlendirmesi (ROSA) ve Maastricht Üst Ekstremitte Anketi yöntemlerini kullanmıştır. Köşker [34] tarafından yapılan çalışmada, ofis çalışanları için REBA, RULA ve ROSA yöntemleri kullanılarak ergonomik riskler belirlenmiştir. Bu yöntemlerin kullanılabilirlik, detaylı değerlendirme, nesnellik ve hizmet sektörüne uygunluk kriterlerine göre IF-AHP yöntemi kullanılarak ağırlıklandırılması yapılarak entegre bir risk değerlendirme modeli oluşturulmuştur. Tol [35] tarafından gemi inşa sektörü ile ilgili yapılan çalışmada, REBA, OWAS, QEC, PLIBEL ve MANTRA yöntemlerinin kullanılabilirliği incelenmiştir. PLIBEL ve MANTRA'nın uygun olmadığı, diğer yöntemlerin ise eylem sınıflarının doğru orantılı olmadığı durumlar saptanmıştır. Çalışma, birden fazla yöntemin bir arada kullanılmasının riskleri belirlemek ve eylem öncelikleri belirlemek için daha etkili olduğunu öne sürmektedir. Li ve ark. [36], hızlı işyeri tasarımı için RULA ve REBA yöntemlerini entegre ederek 3D modellemeye dayalı ergonomik risk değerlendirmesini otomatikleştiren bir sistem geliştirmiştir. Koppiahraj ve ark. [37], çalışanların karşılaştığı zorlukları ortaya çıkarmak için uygun ergonomi değerlendirme yöntemini seçmek amacıyla Fuzzy VIKOR yöntemini kullanmıştır. Beş farklı yöntem için on farklı faktöre göre yapılan değerlendirme sonucunda QEC yönteminin en iyi sonucu verdiği belirtilmiştir. Sever ve Deste [38], çalışmalarında bir cıvata fabrikasında ergonomik riskleri REBA, RULA ve QEC yöntemleri aracılığı ile değerlendirmiştir.

Kaynak araştırması aşamasında birden fazla ERDY'nin kullanıldığı çalışmalar, Tablo 3.1'de özetlenmiştir.

**Tablo 3.1.** Ergonomik risk değerlendirme yöntemlerine ilişkin çalışmalar.

Çalışma	Ergonomik risk değerlendirme yöntemi	Uygulama alanı	Entegrasyon
Kee and Karwowski [28]	OWAS, RULA, REBA	Üretim ve Sağlık	-
Dansie [29]	Rodgers, RULA, SI	-	Uzman Sistemler
Simonsson ve Rwamamara [39]	QEC, PLIBEL	İnşaat	-
Jones ve Kumar [40]	RULA, REBA, ACGIH TLV, SI, OCRA	Üretim	-
Motamedzade ve ark. [41]	REBA, QEC	Üretim	-
Kahraman [5]	RULA, REBA, SI	Üretim	AHP
Lavatelli ve ark. [42]	EAWS, OCRA	Üretim	-
Paulsen [43]	SI, OCRA	Üretim	-
Bozyer ve ark. [44]	NIOSH, risk değerlendirme anketi,	Üretim	TOPSIS
Mert [30]	ManTRA, PLIBEL QEC, REBA, OWAS	Üretim	-
Chowdhury [31]	REBA, RULA	Ofis	-
Karabacak [32]	RULA, CORNELL	Ofis	-
Koç ve Testik [45]	OWAS, REBA, QEC, ManTRA	Üretim	-
Ulutaş ve Gündüz [46]	QEC, REBA	Üretim	-
iek ve ark. [47]	REBA, OWAS, QEC	Üretim	-
Delice [48]	REBA, OWAS, QEC, MANTRA	Üretim	AHP
Yazdanirad ve ark. [49]	RULA, LUBA, NERPA	Üretim	-
Deryaoğlu ve ark. [50]	OWAS, QEC, ManTRA	Üretim	-
Köşker [34]	RULA, REBA, ROSA	Ofis	IF-AHP

**Tablo 3.1. (Devamı)** Ergonomik risk değerlendirme yöntemlerine ilişkin çalışmalar.

Çalışma	Ergonomik risk değerlendirme yöntemi	Uygulama alanı	Entegrasyon
Tol [35]	REBA, OWAS, QEC, PLIBEL, MANTRA	Üretim	-
Li ve ark. [36]	RULA, REBA	Üretim	3ds Max
Widodo ve ark. [51]	REBA, WERA, OWAS	Üretim	-
Adar ve Delice [52]	NASA-TLX, REBA	Lojistik	AHP, COPRAS
Herrera ve Davilla [53]	REBA, RULA, OCRA	Üretim	-
Sever ve Deste [38]	REBA, RULA, QEC	Üretim	Çoğunluk yaklaşımı
Lafcı [54]	OWAS, NORDIC anketi	Lojistik	-
Yomralıoğlu [55]	OWAS, CMDQ, QEC	Üretim	-
Zorlutuna ve Kılıç [56]	REBA, RULA, QEC	İnşaat	-
Battini ve ark. [57]	RULA, REBA, OWAS, PERA	General	-
Dadashi ve ark. [58]	Garg, Borg RPE, IPAQ, SWAT, NASA-TLX	Otomotiv sektörü	-
Lin ve ark. [59]	REBA, RULA, OWAS	Genel	-
Cimino ve ark. [60]	OWAS, 3DSSPP, LBA, SI, MFA, GARG, NIOSH	İnşaat	AHP
Fan ve ark. [117]	REBA, RULA	İnşaat	-
Jorgensen ve ark. [118]	Kaldırma Yorgunluğu Arıza Aracı (LİFFT), NIOSH, Distal Üst Ekstremitte Aracı, SI	Üretim	-
<b>Tez çalışması</b>	REBA, OCRA, QEC, COPSOQ	Otomotiv sektörü	Bulanık mantık ve IVSF-AHP

### 3.2. Ergonomik Montaj Hattı Dengeleme Çalışmaları

MHDP, ilk olarak 1995 yılında Salveson [61] tarafından formüle edildiğinden beri ilgi görmektedir. MHDP'nin amacı, belirlenen amaç fonksiyonuna göre istasyonlar arasında montaj görevlerinin bölümlendirilmesini optimize etmektir. Ergonomik riskleri içeren montaj hattı tasarımları, son yıllarda sağlık sorunlarına yönelik artan farkındalıkla önem kazanmaktadır. Ancak, bu çalışmalar arasında ergonomik riskleri farklı yöntemlerle değerlendirip, bu yöntemlerin entegrasyonunu içeren çalışmaların azlığı dikkat çekmektedir.

Carnahan ve ark. [62], fiziksel iş yükü kriterlerini ve her bir görevin zamanını dikkate alarak bir montaj hattını dengelemek için Sıralama Sezgisel Yöntemi (RH), Kombinatoriyal Genetik Algoritma (CGA) ve Problem Alanı Genetik Algoritması (PSGA) önermiştir. Elde ettikleri sonuçlar, hem ergonomik hem de üretim kriterlerinin dikkate alındığı bir hattı dengelemenin mümkün olduğunu göstermiştir. Otto ve Scholl [63], çalışanların sağlığını korumak için OCRA yöntemini MHDP'ye entegre etmiştir. Ergonomik risklerin, modele maksimum izin verilen ergonomik riski kısıt olarak ve amaç fonksiyonu ile eklenmesi incelenmiştir. Cheshmehgaz ve ark. [64], montaj hattı tasarımında çalışanların duruşunu değerlendiren bir model geliştirmiş ve bu model sayesinde montaj hattı, çalışanların duruşlarını düzenli olarak değiştirebilecekleri şekilde yapılandırılmıştır. OWAS yöntemi ile belirlenen risk skorları kullanılarak istasyonların risk düzeylerindeki sapmaları en küçüklenmesini sağlayan amaç fonksiyonu belirlenmiştir. Genetik Algoritma (GA) kullanılarak problem çözülmüştür. Benedetto ve Fanti [65], montaj hattındaki iş elemanları için OCRA indeksine göre risk skoru hesaplayan ErgoAnalysis adlı bir yazılım sunmuşlardır. Xu ve ark. [66], üst ekstremitelerin ergonomik ölçülerini MHDP'ye entegre etmek için kullanılabilir bir metodoloji sunmuşlardır. Ergonomik ve üretkenlik ölçülerinin karma tamsayı programlama modeli olarak entegre edilmesini sağlamak için doğrusal modeller geliştirilmiştir. Vaka çalışmaları ile yeni modelin üst ekstremitedeki maruz kalma seviyelerini etkili bir şekilde dengeleyebildiğini ve kontrol edebildiğini, hat verimini önemli ölçüde düşürmediğini gösterilmiştir. Çelik [67], U-tipi MHDP'yi ergonomik kısıtları dikkate alarak hedef programlama yöntemiyle çözmüştür. Ergonomik risklerin değerlendirilmesinde REBA yönteminden yararlanılmıştır. Baykasoğlu ve Akyol [68], COMSOAL yöntemi ile ergonomik risklerin değerlendirilmesinde OCRA yönteminden yararlanarak hat dengelemesi yapmıştır.

Battini ve ark. [69], ergonomik kısıtları MHDP'ye entegre eden yeni bir model oluşturmuştur. Bu modelde, ergonomik risk değerlendirmesi için bir görevin tamamlanması sırasında harcanan enerji miktarını hesaplayan önceden belirlenmiş bir hareket enerjisi sistemi kullanılmıştır. Amaç fonksiyonları olarak zaman düzgünlük indeksi, minimum/maksimum istasyon zamanı, enerji düzgünlük indeksi ve minimum/maksimum istasyon enerjisini dikkate almıştır. Takanokura ve ark. [70], REBA ile RULA yöntemlerini kullanarak montaj hatlarında günlük birikimli fiziksel risk yükünü hesaplayabilen bir metot önermiştir. Abdous ve ark. [71], MHDP için işçi yorgunluğunu dikkate alan karma tamsayılı doğrusal programlama (MILP) modeli önermiştir. Önerilen model, işçiler için daha az yorgunluk ile hattı dengelemeyi mümkün kılmaktadır. Maliyetteki küçük bir artış ile yorgunluk seviyesinin düşürülebileceği belirtilmektedir. Görgülü [1], Kahya ve Yetkin [72] ve Yetkin [23] çalışmalarında montaj hattındaki ergonomik risk değerlendirmesi için REBA yöntemini kullanmıştır. Zhang ve ark. [73], U-Tipi montaj hattında çevrim süresini ve ergonomik riskleri en aza indirmek amacıyla işçi atama ve dengeleme problemini formüle etmiştir. Finco ve ark. [3] çalışmalarında, MHDP-2 için enerji tüketim oranını dikkate alan MILP tabanlı yeni bir yöntem önermiştir. Ayrıca, hesaplama süresinin kısıtlı olduğu veya bir istasyona atanacak görev sayısının fazla olduğu durumlarda çözüm aramak için sezgisel bir yaklaşım geliştirmişlerdir. Sonuç olarak, önerilen modelin yalnızca üretkenlik yönlerini değil, aynı zamanda çalışanların refahını da dikkate alarak montaj sürecinin performansını iyileştirdiği belirtilmiştir. Wilhelm ve ark. [2] çalışmalarında, takt-zamanını iyileştiren ve bir montaj istasyonunun ergonomik değerlendirmesi ile zaman içindeki dengesi arasında optimumun bulunmasını sağlayan yeni bir gösterge olan ErgoTakt'ı kullanarak hat dengeleme için bütünsel bir insan merkezli optimizasyon yöntemi sunmaktadır. Sonuçlar, yeni yaklaşımın uygulanabilir olduğunu ve hem ekonomik hem de ergonomik açıdan montaj hattını optimize edebildiğini göstermektedir. Mokhtarzadeh ve ark. [6], paralel U-Tipi MHDP için iki aşamalı bir çerçeve geliştirmiştir. İlk aşamada, görevlerin risk seviyeleri belirlenmiş ve ELECTRE TRI kullanılarak görevler risk seviyesine göre sınıflandırılmıştır. İkinci aşamada, istasyonlar arasında görevlerin risk sınıflarına göre dengelenmesini ve istasyon sayısını minimize etmeyi amaçlayan matematiksel model geliştirilmiştir. Problemi çözmek için kısıt programlama modeli geliştirilmiştir. Sonuçlar, önerilen modelin ergonomik riskleri iyi bir şekilde dengeleyebileceğini göstermektedir. Özdemir ve ark. [74] çalışmalarında,

dijital insan modelleme (DHM) ve ergonomik simülasyon modelleme (ESM) kullanılarak kaldırma, kalça bükme, bilek bükme ve çömelme hareketlerinin değerlendirildiği yeni bir risk değerlendirme endeksi geliştirilmiştir. Rabbani ve ark. [75] çalışmalarında ergonomik faktörleri, müşteri davranışını ve periyodik bakımı dikkate alan karma model MHDP'yi çözmek için tabu arama algoritmasını önermiştir. Zamzam ve ark. [76] çalışmalarında diğer geleneksel hedefleri göz önünde bulundurarak, iki taraflı montaj hatlarındaki işçiler arasındaki fiziksel eforu dengelemeyi amaçlamıştır. Fiziksel eforu ölçmek için SI yöntemi kullanılmıştır. Problemin çözümü için GA kullanılmıştır. Sonuçlar, fiziksel eforu dengelemenin etkili olduğunu ve çoğu durumda hiçbir ekstra maliyet olmaksızın elde edilebileceğini kanıtlamıştır. Junior ve ark. [77], MHDP için yeni bir MILP modeli sunmuştur. Mura ve Dini [78], imalat endüstrisindeki işyerlerinin tasarımında, özellikle gürültüye maruz kalmanın çalışanların sağlığı üzerindeki etkisi ile ilgili olarak ergonominin dikkate alınmasının önemini vurgulamaktadır. Çalışma, MHDP'yi optimize etmek, çalışanların enerji harcamasını (EE) azaltmak ve gürültüye maruz kalma süresini en aza indirmek için GA'ya dayalı bir yazılım aracı önermektedir. Bu çalışmada dikkate alınmayan postural riskler ve bilişsel stres gibi parametreler de ergonomi değerlendirmesine dahil edilebilir. Ancak, EE yöntemi bu faktörleri değerlendirmek için yeterli değildir.

Araştırmacılar, MHDP'ye ergonomik faktörleri entegre etmeye çalışmışlardır. Çoğu çalışma, yalnızca tek bir ergonomik risk değerlendirme indeksini ele almaktadır. Ancak, montaj hattındaki görevler genellikle heterojen niteliktedir ve her bir görevin kendine özgü özellikleri bulunmaktadır. Bu nedenle, yalnızca tek bir yöntemle belirlenen risk seviyesi, üretim ortamının gerçek risk seviyesini tam anlamıyla yansıtmayacak ve bu verilere dayanarak dengelenen montaj hatları, istenen düzeyde gerçek zamanlı ve uygulanabilir olmayacaktır.

Ergonomik faktörleri hat dengeleme problemlerine dâhil eden çalışmalar Tablo 3.2'de sunulmaktadır.

**Tablo 3.2.** Ergonomik MHDP çalışmaları.

Çalışma	Ergonomik risk değerlendirme yöntemi	Ergonomik faktör	Kısıt olarak ergonomik risk	Amaç fonksiyonu olarak ergonomik risk	Problem tipi	Çözüm yöntemi
Carnahan ve ark. [62]	EE	Fiziksel		✓	MHDP-2	RH, CGA, PSGA
Otto ve Scholl [63]	OCRA	Fiziksel		✓	MHDP-1	Sezgisel algoritma
Cheshmehgaz ve ark. [64]	OWAS	Fiziksel		✓	MHDP-1	GA
Benedetto ve Fantini [65]	OCRA	Fiziksel		✓	MHDP-1	Diğer
Jaturanonda ve ark. [79]	RULA	Fiziksel	✓		MHDP-2	Sezgisel algoritma
Baykasoğlu ve Akyol [68]	OCRA	Fiziksel	✓	✓	MHDP-1	Diğer
Battini ve ark. [80]	EE	Fiziksel		✓	MHDP-2	MINLP
Barathwaj ve ark. [81]	RULA	Fiziksel		✓	KMMHDP-2	GA
Battini ve ark. [69]	EE	Fiziksel		✓	MHDP-2	MINLP
Bautista ve ark. [82]	Ergonomik risklerin sınıflandırılması	Fiziksel ve psikososyal	✓		KMMHDP -1	MILP
Li ve ark. [83]	EE	Fiziksel		✓	MHDP-2	MILP, tavlama benzetimi
Baykasoğlu ve ark. [84]	OCRA	Fiziksel		✓	MHDP-1	Sezgisel algoritma
Bortolini ve ark. [85]	REBA	Fiziksel		✓	MHDP-2	MINLP
Zülch M. ve Zülch G. [86]	EE	Fiziksel		✓	KMMHDP -1	Simülasyon
Takanokura ve ark. [70]	REBA, RULA	Fiziksel		✓	MHDP-2	MILP
Abdous ve ark. [71]	OCRA	Fiziksel		✓	MHDP-1	MILP, sezgisel algoritma
Tiacci ve Mimmi [87]	OCRA	Fiziksel		✓	KMMHDP -1	GA
Finco ve ark. [88]	EE	Fiziksel		✓	MHDP-2	Sezgisel algoritma
Şahin ve Kahya [89]	REBA	Fiziksel	✓	✓	MHDP-1	Hedef programlama



**Tablo 3.2. (Devamı) Ergonomik MHDP çalışmaları.**

Çalışma	Ergonomik risk değerlendirme yöntemi	Ergonomik faktör	Kısıt olarak ergonomik risk	Amaç fonksiyonu olarak ergonomik risk	Problem tipi	Çözüm yöntemi
Tiacci [90]	OCRA	Fiziksel	✓		KMMHDP -1	Simülasyon
Kahya ve Yetkin [72]	REBA	Fiziksel	✓		MHDP-2	En uzun operasyon süresi tekniği
Zhang ve ark.[73]	OCRA	Fiziksel	✓		U tipi MHDP-2	MILP
Finco ve ark. [3]	EE	Fiziksel		✓	MHDP-2	MILP
Wilhelm ve ark. [2]	RULA	Fiziksel		✓	MHDP-2	MILP
Mokhtarzadeh ve ark. [6]	NIOSH, OCRA, EAWS, COPSOQ	Fiziksel ve psikosoyal		✓	KMMHDP -1	MILP, kısıt programlama, meta-sezgisel algoritma
Ozdemir ve ark. [74]	DHM, ESM	Fiziksel		✓	MHDP-2	MILP
Zamzam ve ark. [76]	ESI	Fiziksel		✓	MHDP-1	GA
Nahmath [14]	QEC	Fiziksel		✓	MHDP-1	MILP, GA
Mura ve Dini [91]	EE	Fiziksel	✓	✓	MHDP-1	GA
Weckenborg ve ark. [92]	EE	Fiziksel		✓	Robotik MHDP	MILP
Yetkin ve Kahya [93]	REBA	Fiziksel		✓	MHDP-1	Konik skalarizasyon
Chutima ve Khotsaenlee [94]	EE	Fiziksel		✓	MHDP-E	NSTLBO III
Mura ve Dini [78]	EE	Fiziksel	✓		KMMHDP -2	GA
Abdous ve ark. [95]	EE	Fiziksel	✓		MHDP-F	MILP
Junior ve ark. [77]	OCRA	Fiziksel	✓		MHDP-F	MILP
Mura ve Dini [96]	EE	Fiziksel		✓	MHDP-1	GA
Bekdemir ve Taşan [115]	EE	Fiziksel	✓		İnsan-Robot MHDP-2	MILP
Huang ve ark. [116]	EE	Fiziksel		✓	İnsan-Robot MHDP-2	Yapay arı kolonisi algoritması
<b>Tez çalışması</b>	REBA, OCRA, QEC, COPSOQ	Fiziksel, çevresel ve psikosoyal	✓	✓	KMMHDP -2	MILP



## 4. MATERYAL VE YÖNTEM

### 4.1. Problemin Tanımı

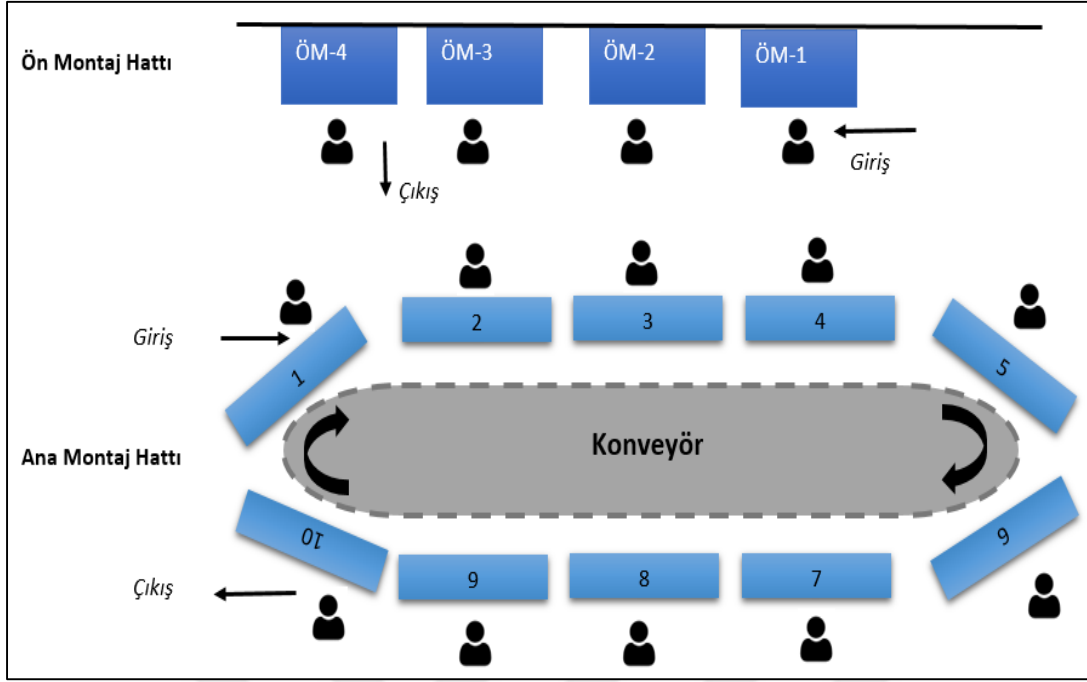
Bu çalışmada, dairesel montaj hattında Ergo-KMMHDP çözümü amaçlanmaktadır.

Dairesel üretim sistemi veya dairesel üretim hattı olarak da bilinen dairesel montaj hattı, üretim akışının daire veya döngü şeklinde düzenlendiği bir üretim süreci düzenidir. Üretim tesislerinde kullanılan geleneksel montaj hattının bir çeşididir.

Dairesel montaj hatları, üretim tesislerinde ürün montajının sürekli ve döngüsel bir şekilde gerçekleştirildiği sistemlerdir. Bu hatlarda, ürünler farklı iş istasyonlarından geçerek belirli işlemlerden geçer ve sürekli bir döngü içinde hareket eder. Her bir iş istasyonu, belirli bir montaj veya işlem görevinden sorumludur. Bu düzen, ürünlerin sorunsuz ve sürekli bir şekilde ilerlemesini sağlar ve geri izleme veya uzun mesafeler boyunca taşıma gereksinimini azaltır. Bu nedenle, özellikle otomotiv veya elektronik endüstrilerinde olduğu gibi tekrarlanan ve sıralı üretim adımlarının olduğu yerlerde kullanılmaktadır.

Bu çalışma, dairesel montaj hattında Ergo-KMMHDP çözümü hedeflemektedir. Bu çözüm, hem ana montaj hattını hem de ön montaj hattını içerecek şekilde tasarlanmıştır. Ana montaj hattı, nihai ürün montajının gerçekleştiği yerdir, ön montaj hattı ise ana montaj hattına yarı mamullerin iletilmesini sağlar. Bu şekilde, hem ön montaj hattının hem de ana montaj hattının dengeleme problemleri ele alınmaktadır.

Ana ve ön montaj hatlarının yerleşimi Şekil 4.1’de gösterilmektedir. Şekilde, üstteki düz hat ön montaj hattını, alttaki dairesel hat ise ana montaj hattını temsil etmektedir. Ön montaj hattında üretilen yarı mamuller, nihai ürünü oluşturmak üzere ana montaj hattına iletilmektedir.



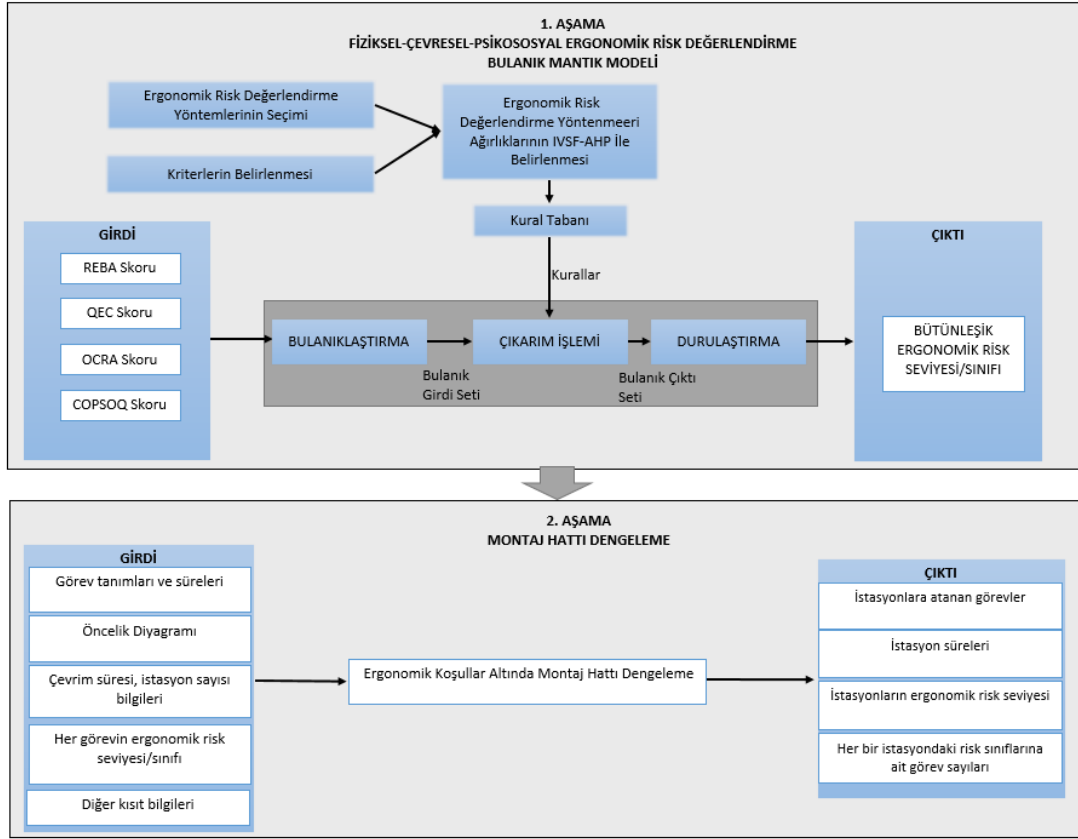
Şekil 4.1. Montaj hattı şeması.

#### 4.2. Materyal

Çalışmanın ilk aşamasında, montaj hattındaki görevlerin fiziksel, çevresel ve psikososyal ergonomik risklerini kapsayacak şekilde değerlendirilmesi için bulanık mantık tabanlı bütünlük bir risk değerlendirme modeli geliştirilmiştir. Bu modelde, görevlerin REBA, QEC, OCRA ve COPSOQ yöntemlerine göre belirlenen risk değerleri modelin girdilerini oluşturmaktadır. Modelin çıktısı ise "bütünlük ergonomik risk seviyesi (IER)"dir. Bu model ile her bir görevin ergonomik risk sınıfları belirlenmekte ve görevlerin bütünlük ergonomik risk seviyesi hesaplanmaktadır.

Çalışmanın ikinci aşamasında, görevlerin tahsisi için gereken çevrim süresini minimize edecek ve ergonomik risk seviyelerini dengeleyecek matematiksel modeller önerilmiştir. Önerilen modellerde, her bir istasyon için ergonomik risk sınıflarındaki görev sayıları ve istasyonların toplam ergonomik risk puanı değerlendirmeye alınmaktadır.

Ergo-KMMHDP için önerilen metodoloji Şekil 4.2'de gösterilmiştir.



**Şekil 4.2.** Önerilen metodoloji.

### 4.3. Yöntem

Çalışmanın ilk aşamasında, bulanık mantık tabanlı bütünleşik ergonomik risk değerlendirme modelini oluşturmak için ERDY'ler analiz edilmiş ve literatürdeki Ergo-MHDP çalışmaları incelenmiştir.

Bu çalışmada kullanılacak ERDY'ler;

- Fiziksel, çevresel ve psikososyal riskleri değerlendirme kapsamları,
- Vücut bölümleri, ağırlık, süre, frekans gibi 35 farklı alt kritere göre değerlendirme kapsamları ve
- Literatür incelemelerine göre MHDP çalışmalarında kullanım sıklığı değerlendirilerek belirlenmiştir.

Daha sonra ERDY'lerin ağırlıklarının belirlenmesi için ergonomik risk değerlendirme çalışmalarında kullanılan ÇKKV yöntemleri ve yeni geliştirilen yöntemlere yönelik literatür taraması yapılmıştır. Bu çalışmada, ergonomi çalışmalarında sıklıkla tercih

edilen AHP'nin literatürde görece yeni olan versiyonu IVSF-AHP tercih edilmiştir. Duleba ve ark. [97] tarafından geliştirilen bu yöntem, grupların çatıştığı durumlarda bile mantıklı ve nesnel bir şekilde grup uzlaşması sağlaması açısından avantaj sağlamaktadır.

Sonraki adımda, IVSF-AHP modeli kurulmuş ve ERDY'lerinin ağırlıkları belirlenmiştir. Belirlenen ağırlık değerlerine göre etki değerleri hesaplanarak bulanık mantık kural tabanı oluşturulmuştur. Son olarak, Matlab programı bulanık mantık modülü kullanılarak model oluşturulmuştur.

Çalışmanın 1. aşamasında izlenen süreç Şekil 4.3'te gösterilmektedir.

Çalışmanın ikinci aşamasında ergonomik montaj hattı dengeleme problemine yönelik matematiksel modeller incelenmiştir. İncelenen modellerde ergonomik riskin modele dâhil edilmesi için farklı yaklaşımlar olduğu görüşmüştür. Uygulama yeri ve montaj hattının belirlenmesinden sonra mevcut yaklaşımlar göz önünde bulundurularak probleme uygun matematiksel modeller geliştirilmiştir. Modelleri çözmek için IBM ILOG CPLEX programı tercih edilmiştir.

Çalışmanın 2. aşamasında izlenen süreç Şekil 4.4'te gösterilmiştir.

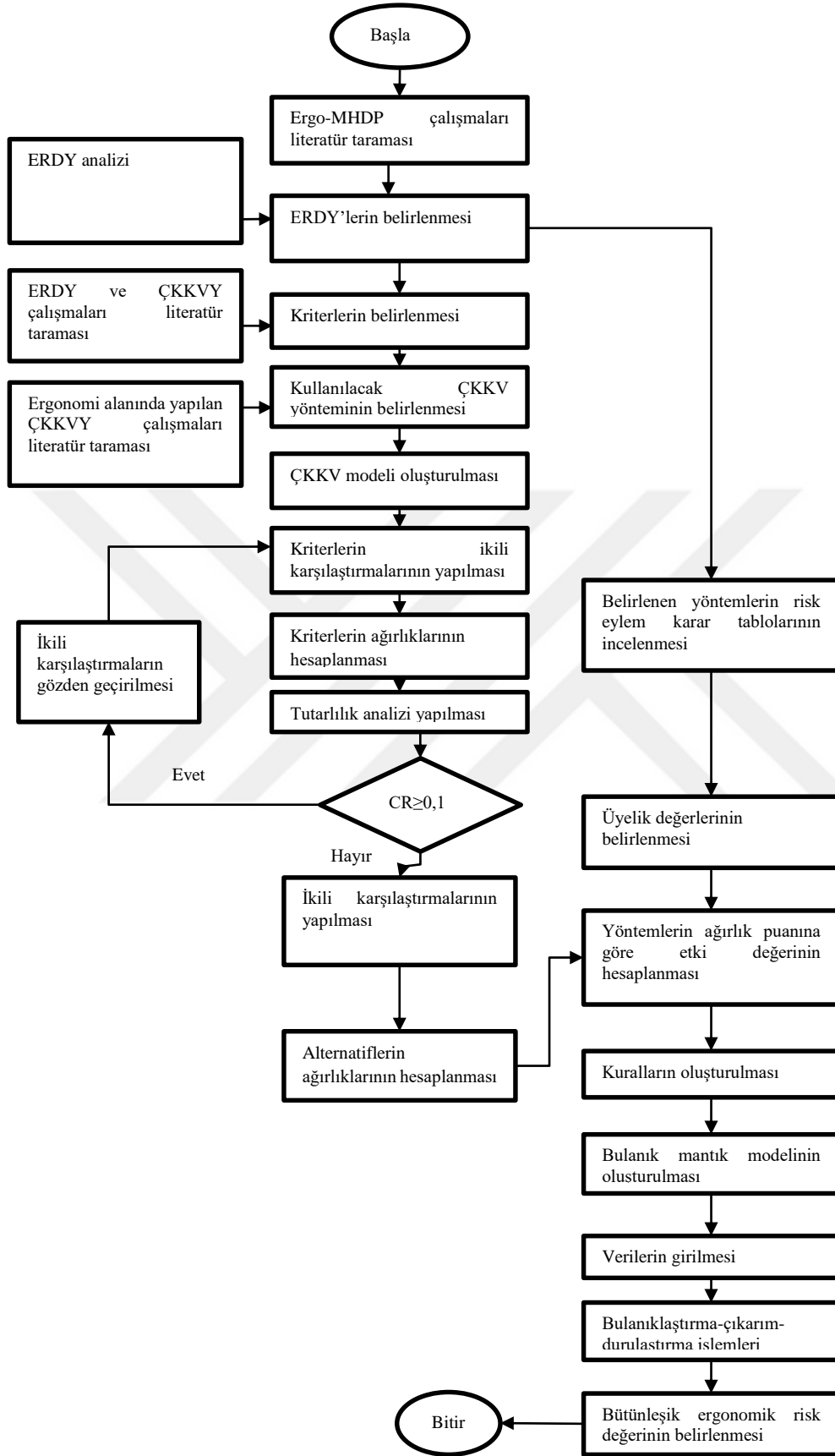
#### **4.3.1. Ergonomik risk değerlendirme yöntemlerinin belirlenmesi**

Bu çalışmada, fiziksel, çevresel ve psikososyal risklerin belirlenmesi için REBA, QEC, OCRA ve COPSOQ yöntemleri tercih edilmiştir. Bu yöntemler belirlenirken aşağıda yer alan karşılaştırma analizlerinden yararlanılmıştır.

Fiziksel risk faktörleri REBA, OCRA ve QEC yöntemleriyle, psikososyal riskler ise COPSOQ yöntemiyle değerlendirilmiştir. Fiziksel ve psikososyal risklerin değerlendirilmesine yönelik yerleşik yöntemler bulunmakla birlikte, çevresel risklerin tüm boyutlarıyla değerlendirilmesine ve puanlanmasına yönelik standart bir yöntem henüz mevcut değildir. Bu nedenle ergonomik risk değerlendirme yöntemleri belirlenirken çevresel risk değerlendirmesinin kapsamı da incelenmiştir. QEC yöntemi titreşim faktörlerini değerlendirirken, OCRA yöntemi soğuk ve sıcak ortamlarda çalışmanın yanı sıra titreşim faktörlerini de değerlendirmektedir. Ayrıca OCRA yöntemi, bir veya daha fazla ek faktörün varlığını değerlendirir. Bu ek faktörler çevresel riskleri içerebilir. Bu nedenle bu çalışmada çevresel ergonomik risklerin

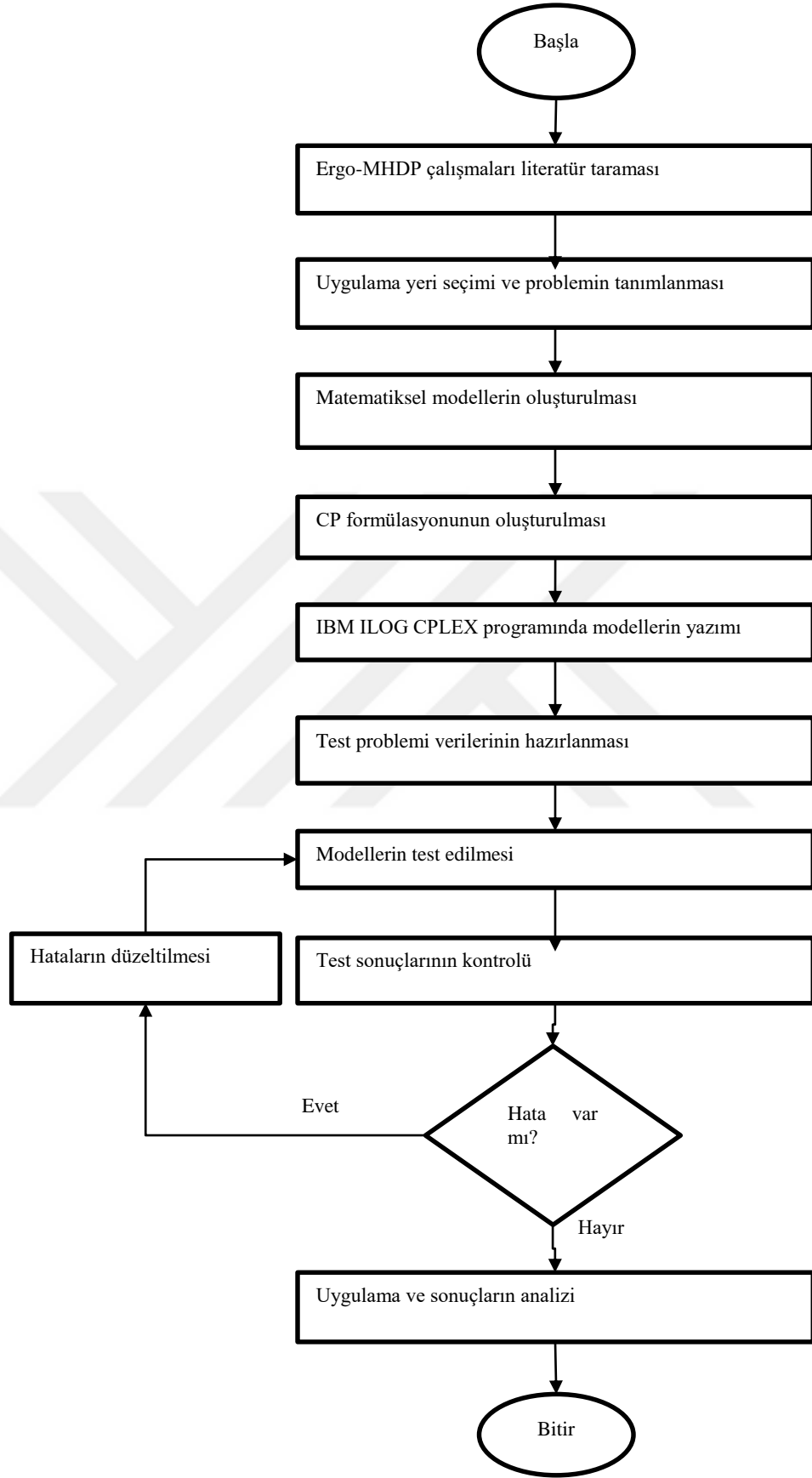
değerlendirilmesi amacıyla OCRA ve QEC yöntemleri tercih edilmiştir. Böylece çalışma kapsamındaki fiziksel, çevresel ve psikososyal riskler değerlendirilmiştir.





Şekil 4.3. Çalışmanın birinci aşamasına ilişkin akış şeması.





Şekil 4.4. Çalışmanın ikinci aşaması akış şeması.

ERDY'lerin kapsamlarının karşılaştırılması Tablo 4.1'de gösterilmiştir.

**Tablo 4.1.** Ergonomik risk değerlendirme yöntemlerinin fiziksel, çevresel ve psikososyal kapsamlarının karşılaştırılması.

Yöntem	Fiziksel				Çevresel				Psikososyal								
	Duruş	Yük/kuvvet	Hareket frekansı	Süre	Fiziksel çalışma koşulları	Gürültü	Termal Konfor	Aydınlatma	Titreşim	Diğer (Kimyasal, Toz vb.)	Yüksek Mesleki beklenti	Stres	İş Memnuniyetsizliği	Organizasyonel	Sosyal Destek	Ücret/Tazminat	Denlenme/ İyileşme
OCRA	✓	✓	✓	✓	✓		✓		✓		✓						✓
QEC	✓	✓	✓	✓					✓		✓	✓					
REBA	✓	✓	✓														
OWAS	✓	✓															
RULA	✓	✓	✓														
EAWS	✓	✓	✓	✓	✓		✓		✓								✓
COPSOQ					✓						✓	✓	✓	✓	✓	✓	
NIOSH	✓	✓	✓	✓													✓
PLIBEL	✓	✓					✓				✓	✓					✓
SI	✓	✓	✓	✓							✓						
LUBA	✓																
Üst Ekstremité Bozukluğu Rehberi	✓	✓	✓	✓			✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
İşyeri Ergonomik Risk Değerlendirmesi (WERA)	✓	✓	✓	✓				✓									

Tablo 4.2'de, ERDY'lerin kapsamlarının vücut bölümleri, süre ve frekans gibi kriterlere göre karşılaştırılması gösterilmektedir.

**Tablo 4.2.** Ergonomik risk değerlendirme yöntemlerinin kapsamlarının karşılaştırılması.

Kapsam	REBA	QEC	NIOSH	RULA	OCRA	EAWS	COPSOQ
Ağırlık		✓	✓	✓		✓	
Araç/Alet Kullanımı					✓	✓	
Asimetri			✓	✓	✓	✓	
Ayaklar	✓			✓		✓	
Beden	✓			✓	✓	✓	
Bilek	✓	✓		✓	✓	✓	
Boyun	✓	✓		✓		✓	
Dikey Mesafe			✓			✓	
Dinamik Duruş	✓				✓	✓	
Dirsek	✓					✓	
Eklemler	✓						
Frekans		✓	✓		✓	✓	
İlave Faktörler			✓		✓	✓	✓
İş Memnuniyetsizliği							✓
İyileşme					✓	✓	
Kaldırma			✓		✓	✓	
Kas Kullanımı				✓	✓	✓	
Kavrama			✓		✓	✓	
Molalar					✓	✓	
Omuz/Kol	✓	✓		✓	✓	✓	
Organizasyon		✓			✓	✓	
Organizasyon/Yönetim							✓
Sırt		✓				✓	
Sosyal Destek							✓
Statik Duruş	✓				✓	✓	
Stres		✓					✓
Süre		✓	✓		✓	✓	
Tekrarlı Hareket		✓			✓	✓	
Tempo					✓	✓	
Uygulanan Kuvvet	✓		✓	✓	✓	✓	
Ücret/Tazminat							✓
Vardiya Süresi					✓	✓	
Yatay Mesafe			✓			✓	
Yüksek Mesleki Beklenti (Zorluk)							✓

Literatür taramasında, 2000-2024 yılları arasında yayımlanan montaj hatlarında ergonomik kısıtları dikkate alan 53 çalışma incelenmiştir. Bu çalışmalarda tercih edilen ERDY'lerin kullanım sıklığı Tablo 4.3'te gösterilmektedir.

**Tablo 4.3.** MHDP çalışmalarında kullanılan ERDY'ler ve sayıları (2000-2024).

Yöntem	Sayı
OCRA	12
EE	12
REBA	9
RULA	5
NIOSH	2
Ergonomik faktörlerin sınıflandırılması	6
ACGIH Kılavuzu	1
COPSOQ	1
Çaba pürüzsüzlük indeksi (ESI)	1
DHM ve ESM kullanarak yeni bir risk değerlendirme indeksi	1
EAWS	1
QEC	1
OWAS	1

Literatür taraması ve detaylı karşılaştırma analizleri ile Tablo 4.4'te gösterilmiştir. Bu çalışmada REBA, QEC, OCRA ve COSPOQ yöntemleri tercih edilmiştir. Çalışmada tercih edilmeyen bazı yöntemlerin neden tercih edilmediği ile ilgili açıklamalar Tablo 4.5'te özetlenmiştir.

**Tablo 4.4.** Çalışmada kullanılan yöntemlerin avantaj ve dezavantajları.

Yöntem	Avantaj	Dezavantaj	Açıklama
OCRA	<p>-Tablo 4.3'e göre incelenen MHDP çalışmalarında en çok tercih edilen yöntemdir.</p> <p>-Bazı çevresel (titreşim, termal konfor) ve psikososyal (zorluk, iyileşme) faktörler dikkate alınmaktadır.</p> <p>- Tablo 4.2 incelendiğinde diğer yöntemlere göre değerlendirme kapsamı geniştir.</p> <p>-QEC ile karşılaştırıldığında sonuçları uyumludur [98].</p> <p>-İşçinin algısı dikkate alınır [98].</p>	<p>-Zaman etüdü gereklidir.</p> <p>-Büyük bir örneklemden iş istasyonlarının genel bir değerlendirilmesi için kullanılması maliyetlidir [98].</p>	<p>Belirtilen avantajlar ve MHDP çalışmalarında yaygın kullanılması nedeniyle bu yöntem modele dâhil edilmiştir.</p>
REBA	<p>-Tablo 4.3'e göre incelenen MHDP en çok tercih edilen yöntemlerden biridir.</p> <p>-Kullanımı hızlıdır [98].</p> <p>-QEC ile karşılaştırıldığında sonuçları uyumludur [98].</p> <p>-Dijitalleşme ve otomasyona uygundur.</p> <p>- Boyun, gövde, kollar, bacaklar ve bilekler dâhil olmak üzere tüm vücudu değerlendirerek ekipmanı kavrama, kaldırma ve sık tekrarlanan aktiviteler gibi çeşitli faktörleri dikkate alır.</p> <p>-Yalnızca vücut duruşlarını değil, kaldırmayı da dikkate alan bir yöntemidir.</p>	<p>-Farklı vücut bölgeleri için bir alt puan sağlamaz. Gözlemciler, çalışmanın değişken olup olmadığını hangi görevlerin değerlendirileceğine karar vermelidir [98].</p>	<p>Belirtilen avantajlar ve MHDP çalışmalarında yaygın kullanılması nedeniyle bu yöntem modele dâhil edilmiştir.</p>

**Tablo 4.4. (Devamı) Çalışmada kullanılan yöntemlerin avantaj ve dezavantajları.**

Yöntem	Avantaj	Dezavantaj	Açıklama
COPSOQ	<ul style="list-style-type: none"><li>-Psikososyal Faktörler dikkate alınmaktadır.</li><li>-Bazı fiziksel çalışma koşulları dikkate alınmaktadır.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>-Fiziksel ve çevresel faktörler dikkate alınmamaktadır.</li><li>-Nihai puan hesaplanmakta ancak sınıflandırma yapılmamaktadır.</li></ul>	<p>Çalışmada psikososyal ergonomik riskler dikkate alınacağı için bu yöntem modele dâhil edilmiştir.</p>
QEC	<ul style="list-style-type: none"><li>-Bazı çevresel ve psikososyal faktörleri dikkate almaktadır.</li><li>-Tablo 4.2 incelendiğinde diğer yöntemlere göre değerlendirme kapsamı geniştir.</li><li>-İlk tarama ve müdahaleye öncelik vermek için iyi bir yöntemdir [98].</li><li>-Öğrenmesi kolaydır [98].</li><li>-İşçinin algısı dikkate alınır [98].</li><li>-Faktörlerinin etkileşimini dikkate alır.</li><li>-İyi düzeyde hassasiyet ve kullanılabilirlik sağlar.</li><li>-En ciddi risk faktörlerinin temel nedenlerini ve en zor görevleri anlamak için faydalı bilgi kaynağıdır [98].</li><li>-Farklı vücut bölgeleri için alt puanlar sağlar [98].</li><li>-OCRA, REBA ve RULA ile sonuçları uyumludur [98].</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>-Montaj Hattı dengeleme çalışmalarında çok fazla kullanılmamıştır.</li><li>-Risk değerlendirmesi, çalışanın algısı dikkate alındığından yanı olabilir.</li></ul>	<p>MHDP çalışmalarında çok yaygın kullanılmamasına rağmen avantajlarından dolayı modele dâhil edilmiştir.</p>

**Tablo 4.5.** Çalışmada tercih edilmeyen yöntemlerin avantaj ve dezavantajları.

Yöntem	Avantaj	Dezavantaj	Açıklama
EAWS	-Diğer yöntemlere göre değerlendirme kapsamı geniştir. -OCRA yöntemiyle değerlendirme kapsamı yakındır.	-Montaj Hattı dengeleme çalışmalarında kullanım oranı düşüktür.	Değerlendirme kapsamı OCRA yöntemi ile yakın olması ve literatürde OCRA yönteminin daha fazla kullanılması nedeniyle bu yöntem modele dâhil edilmemiştir.
RULA	QEC, REBA ve RULA ile sonuçları uyumludur [98]. Kullanımı hızlıdır [98].	-Farklı vücut bölgeleri için bir alt puan sağlamaz. Gözlemciler, çalışmanın değişken olup olmadığını hangi görevlerin değerlendirileceğine karar vermelidir [98].	REBA yöntemi ile benzer değerlendirme kapsamına sahiptir. REBA yönteminden daha az MHDP çalışmalarında kullanılmıştır. OCRA, QEC ve REBA yöntemlerini modele dâhil edildiği için RULA yönteminin değerlendirmeye aldığı faktörler modele dâhil edilmiş olmaktadır. Bu nedenle RULA modele dâhil edilmemiştir.
EE	-Tablo 4.3'e göre incelenen MHDP çalışmalarında sıklıkla kullanılan yöntemlerden biridir.	-Fiziksel faktörlerin duruş, yük, frekans, süre gibi detaylı değerlendirmesini yapmamaktadır. -Ayrıca hesaplanan enerji tüketim oranı için risk sınıfları belirlenmemektedir. -Çevresel ve psikososyal faktörler dikkate alınmamaktadır.	Fiziksel faktörlerin duruş, yük, frekans gibi detaylı değerlendirmesini yapmadığı için modele dâhil edilmemiştir.
OWAS	-Fiziksel faktörleri kapsamaktadır.	-Hareket sıklığını dikkate almaz. -El ve boyun hareketlerini dikkate almaz.	Hareket sıklığını, el-boyun hareketlerini dikkate almaması ve montaj hattında genellikle tekrarlanan hareketler, işçilerin ellerini ve boyunlarını kullanmaları nedeniyle bu yöntem modele dâhil edilmemiştir.

Çalışmada kullanılan ERDY'ler aşağıda açıklanmaktadır.

#### **4.3.1.1. REBA yöntemi**

REBA yöntemi, statik veya değişken tüm vücut hareketlerinin duruş analizi için Hignett ve McAtamney [99] tarafından geliştirilen gözleme dayalı bir yöntemdir. Bu yöntem, vücudun tüm bölgelerini analiz eder ve analiz edilen çalışma duruşu veya hareketinin risk seviyesini kantitatif olarak belirler. Dinamik hareketlerin ve sabit duruşların incelenmesine imkan sağlar [84].

REBA yöntemi adımları için araştırmacılar, Hignett ve McAtamney'nin [99] çalışmasına başvurabilirler.

#### **4.3.1.2. QEC yöntemi**

Li ve Buckle [100] tarafından geliştirilen QEC, David ve ark. [101] tarafından yeniden gözden geçirilerek iyileştirilmiştir. Ölçeğin en önemli özelliklerinden biri çalışanın değerlendirme sürecine katılımını sağlamasıdır. Ölçeğe ilişkin kontrol listesi EK A'da verilmiştir. QEC yöntemi, ergonomik girişimler gerektiren öncelikli işlerin belirlenmesine ve uygulanan ergonomik programın etkinliğinin değerlendirilmesine kullanılmaktadır [102].

Uygulama adımları için araştırmacılar, David ve ark. [101] çalışmasına başvurabilirler.

#### **4.3.1.3. OCRA kontrol listesi yöntemi**

Occhipinti ve Colombini [27], işçilerin çeşitli üst ekstremite yaralanma risk faktörlerini (tekrarlama, kuvvet, garip duruşlar ve hareketler, iyileşme sürelerinin olmaması ve diğerleri ("additional/ilaveler")) içeren görevlere maruz kalmalarını analiz etmek için OCRA yöntemini geliştirdi. OCRA yöntemi, büyük ölçüde Uluslararası Ergonomi Derneği'nin (IEA) KİSR teknik komitesinin fikir birliği belgesine dayanmaktadır ve farklı görevler arasında işçi rotasyonunu da dikkate alan sentetik göstergeler üretirler. Genellikle iş istasyonlarının ve görevlerin (yeniden) tasarımı veya derinlemesine analizi için kullanılır [27]. OCRA indeksine dayanan OCRA kontrol listesinin uygulanması kolaydır ve genellikle tekrarlayan görevler içeren iş istasyonlarının ilk taraması için önerilir [103].

OCRA kontrol listesi, üst ekstremitelerin biyomekanik aşırı yüklenmesine maruz kalmayı değerlendirmek için kısaltılmış bir prosedürdür. OCRA kontrol listesi, her biri



farklı bir risk faktörünün analizine ayrılan beş bölümden oluşmaktadır. OCRA kontrol listesi EK B’de verilmiştir.

Bu risk faktörleri ikiye ayrılır:

Dört ana risk faktörü: İyileşme süresinin olmaması, hareket sıklığı, kuvvet ve garip duruşlar.

Ek risk faktörleri: El-kol sistemine iletilen titreşim, 0 °C'nin altındaki ortam sıcaklıkları, hassas çalışma, geri tepme, yetersiz eldiven kullanımı gibi faktörlerdir.

Bu faktörlere ek olarak, nihai risk tahmini aynı zamanda tekrarlanan işlere maruz kalmanın net süresini de hesaba katar.

#### **4.3.1.4. COPSOQ yöntemi**

Danimarka Ulusal İş Sağlığı Enstitüsü tarafından geliştirilen COPSOQ, psikosozal riskleri ele alan ve işyerlerinde çalışanlarla işverenler arasında bir köprü görevi gören bir araçtır. Uzun, orta ve kısa ölçekleri bulunmakta olup işyerlerinin verimliliğini artırmak için kullanılmaktadır [104].

Son çalışmalar, duygusal talepler, işin anlamı, öngörülebilirlik, rol netliği ve çatışmaları, işe bağlılık ve etkinliğin psikosozal iyilik, işten ayrılma düşüncesi ve iş devamsızlığı üzerine etkili olduğunu göstermektedir. COPSOQ’un kullanılmasıyla 2005'te bu faktörler birbirinden bağımsız psikosozal riskler olarak tanımlanmıştır. [104].

COPSOQ’a ilişkin anket soruları EK C’de verilmiştir.

#### **4.3.2. Çok kriterli karar verme yönteminin belirlenmesi**

Bu çalışmada kullanılacak ÇKKV yönteminin belirlenmesi aşamasında ilk olarak ergonomi çalışmalarında kullanılan ÇKKV yöntemleri ve kriterler incelenmiştir. İncelenen çalışmalar Tablo 4.6’da özetlenmiştir.

ERDY çalışmalarında AHP, Bulanık AHP, Tereddütlü Bulanık AHP, Bulanık TOPSİS, Bulanık VIKOR gibi yöntemlerinin tercih edildiği görülmektedir. Bu yöntemlerden AHP yönteminin daha sık kullanılması nedeniyle, bu çalışmada AHP yönteminin kullanılmasına karar verilmiştir.

Daha sonra, AHP yönteminin geliştirilen bulanık küme uzantılarına göre çeşitleri incelenmiş olup literatürde görece yeni olan IVSF-AHP yönteminin kullanılmasına karar verilmiştir.



**Tablo 4.6.** Ergonomi çalışmalarında kullanılan ÇKKV yöntemleri.

Yazar	Yıl	Kriter	ERDY	Yöntem
Kahraman [5]	2012	Etkinlik (girdi verileri, çıktı verileri), karmaşıklık (anlaşılabilirlik, uygulanabilirlik), maliyet (kullanılan malzeme, süre)	RULA, REBA ve SI	AHP
Akalp ve Özok [105]	2017	Dinamik kassal çalışma, statik kassal çalışma, burulma, vücut pozisyonu, baş üstü çalışma, eğilme, kuvvetin yönü, yükün ağırlık merkezine olan mesafesi, yük miktarı, kaldırma sıklığı.	-	Bulanık TOPSİS
Delice [48]	2018	Anlaşılabilirlik, kullanılabilirlik, süre, girdi verileri, çıktı verileri	REBA, OWAS, QEC ve MANTRA	AHP
Köşker [34]	2019	Kullanılabilirlik, ayrıntılı değerlendirme, objektiflik, hizmet sektörüne uygunluk	RULA, REBA, ROSA	IF-AHP
Adar ve Delice [52]	2020	NASA-TLX yönteminin altı boyutu	NASA-TLX ve REBA	AHP ve COPRAS
Aziz ve ark. [106]	2020	Bireysel, örgütsel, fiziksel ve psikososyal faktörler	-	AHP
Delice ve Can [107]	2020	Duruş, süre, sıklık, hareket mesafesi, bükülme açısı ve gerçek ağırlık	-	MOOSRA, COPRAS
Koppihraj ve ark. [37]	2021	Çalışma ortamı, görevlerin zorluğu, çalışma süresi, çalışma duruşları, hareketlilik sıklığı, esneklik düzeyi, algılanan stres düzeyi, işteki risk faktörleri, ağrı düzeyi ve mola verme olasılığı	REBA, QEC, JSI, EAWS ve MAC	Bulanık VIKOR
Mokhtarzadeh ve ark. [6]	2021	Belirtilmemiştir.	NIOSH, OCRA, EAWS, ve COPSOQ	BWM ve ELECTRE TRI
Aksüt [108]	2021	6 ana kriter ve 37 alt kriter (fiziksel, bilişsel, örgütsel, çevresel, kişisel, psikososyal faktörler)	Fiziksel, Çevresel, Faktörler	Bilişsel, Kişisel, Psikososyal
Barbaroz [109]	2021	Gürültü, aydınlatma, termal konfor, kullanım alanı ve ofis mobilyalarının uygunluğu	-	Bulanık AHP
Adem ve ark. [110]	2022	Yeşil ergonomi ile ilgili 4 ilke	Yeşil Ergonomi	Tereddütlü bulanık AHP

#### 4.3.2.1. Aralık değerli küresel bulanık analitik hiyerarşi prosesi

IVSF-AHP, önce tanımlanan her değerlendirici grup içinde, daha sonra katılımcı değerlendirici gruplar arasında fikir birliği oluşturan ve bir kararın ağırlık kriterlerinde nihai bir anlaşmaya varan bir model sunmaktadır. Konsensüs oluşturmak için, AHP'nin orijinal ölçeği olan Saaty ölçeğinden türetilen üyelik, üye olmama ve tereddüt olmak üzere üç tür puan değeri dikkate alınır. Model ayrıca belirsiz veya kesin olmayan değerlendirmeleri de dikkate alır ve bulanık ve aralıklı değerlerin kullanıldığı hesaplama prosedürü sonuçları daha güvenilir hale getirir [97].

IVSF-AHP;

- Tereddütlü puanlamayı göz önünde bulundurmakta ve farklı paydaş grubu görüşlerini matematiksel bir prosedürle sentezlemektedir.
- Üyelik fonksiyonunun daha esnek karakterizasyonu ile diğer uzantılardan üstündür.
- Karar vericilerin bir bulanık kümenin üyelik fonksiyonları hakkındaki yargılarını tek bir nokta yerine bir aralıkla modele dâhil etmektedir.

Aralık değerli küresel bulanık kümeler (IV-SFS) ilişkin tanımlar EK D’de ve IVSF-AHP yönteminin adımları EK E’de verilmiştir [97].

#### 4.3.3. Uygulamada kullanılacak kriterler

Literatür taraması ve uzman görüşlerinin alınması neticesinde bu çalışmada kullanılmak üzere aşağıdaki kriterler belirlenmiştir.

Anlaşılabilirlik (K1): Risk değerlendirme yönteminin anlaşılabilirliği, uygulayıcıların bu yöntemi öğrenmesinin basit olduğu ve etkili veri toplama için spesifik ergonomi bilgisine ihtiyaç duyulmadığı anlamına gelir. Delice ve ark. [48] çalışmalarında “kullanılabilirlik, anlaşılabilirlik, girdi verileri, çıktı verileri ve süre” kriterlerini kullanmıştır. Ayrıca Kahraman [5], Köşker [34] ve Dadashi [58] çalışmalarında ERDY’nin spesifik bilgi gerektirip gerektirmediği, kolay anlaşılabilir ve kullanılabilir olup olmadığını değerlendirmek için kriterler belirlemiştir.

Süre (K2): Belirlenen yöntem ile ergonomik risk değerlendirmenin yapılması için gereken süreyi ifade eder. Kahraman [5], Delice ve ark. [48] ve Dadashi [58] çalışmalarında ERDY’yi uygulamak için gereken süreyi kriter olarak belirlemiştir.

Fiziksel değerlendirme kapsamı (K3): Belirlenen yöntemin vücut bölümleri (ayak, kol, boyun, dirsek, bilek vb.), statik/dinamik duruş şekli, ağırlık, mesafe, süre, frekans gibi fiziksel risk etmenlerini kapsama derecesini ifade eder. Köşker [34] çalışmasında fiziksel risk faktörlerini değerlendirme kapsamını, Aziz ve ark. [106] fiziksel risk faktörlerini, Koppiahraj ve ark. [37] iş süresi, pozisyon, frekans gibi çeşitli fiziksel faktörleri kriter olarak belirlemiştir.

ERDY, bir iş sürecindeki belirli bir hareketin veya pozisyonun risk seviyesini ayrıntılı olarak değerlendirir, yani işlem veya pozisyonu gerçekleştirirken risk seviyesini etkileyebilecek tüm unsurları dikkate alırsa, daha doğru bir risk analizi ortaya koyar. Uygulayıcı için tüm detayları içeren bir yöntem tercih sebebidir [34].

Çevresel değerlendirme kapsamı (K4): Belirlenen yöntemin gürültü, termal konfor, aydınlatma, titreşim, kimyasal, toz gibi çevresel risk etmenlerini kapsama derecesini ifade eder. Barbaroz [109] çalışmasında gürültü, aydınlatma, termal konfor, kullanım alanı gibi çevresel faktörlerin çalışan üzerinde etkisini değerlendirmek için Bulanık AHP yöntemini kullanmış ve bu çevresel faktörleri kriter olarak belirlemiştir.

Psikososyal değerlendirme kapsamı (K5): Belirlenen yöntemin yüksek mesleki beklenti, stres, iş memnuniyetsizliği, yönetim, sosyal destek gibi Psikososyal risk etmenlerini kapsama derecesini ifade eder. Aziz ve ark. [106] çalışmasında KİSR'lere ilişkin kritik risk faktörlerini belirlemek için bireysel, organizasyonel, fiziksel ve psikososyal ana faktörleri ve 26 altı alt faktöre göre AHP karar modeli geliştirmiştir.

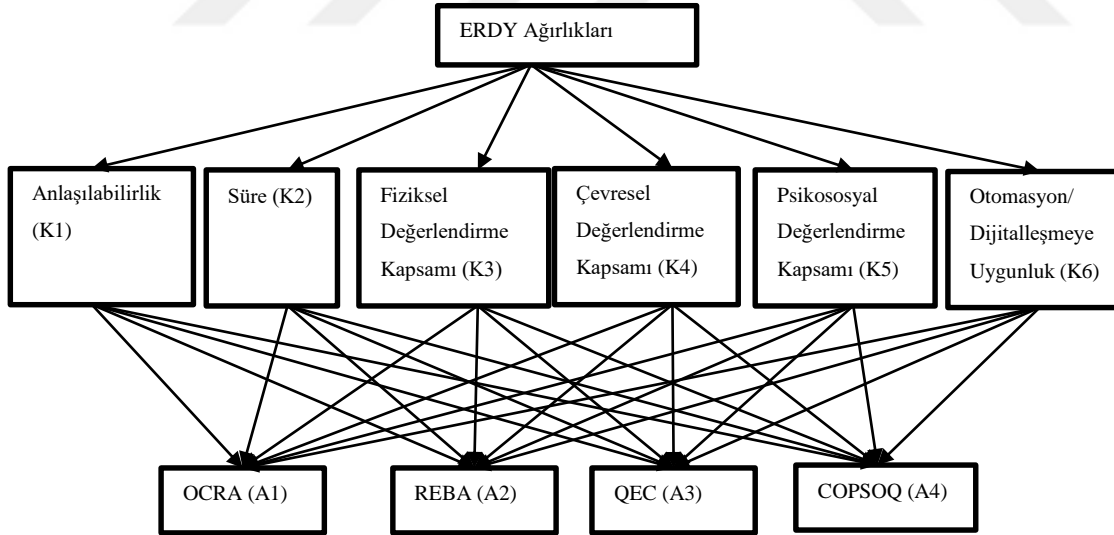
Otomasyon/dijitalleşmeye uygunluk (K6): Belirlenen yöntemin otomasyon ve dijitalleşme teknolojilerine uyum derecesini ifade eder.

Yeni veri odaklı Endüstri 5.0 çerçevesi, çalışanların faaliyetlerinin daha sistematik ve tarafsız bir şekilde toplanmasını ve analiz edilmesini gerektirmektedir. Bu, insan destekli gözlemin yetersiz olduğu imalat, inşaat ve çeşitli diğer endüstriyel ortamlardaki süreçlerin optimize edilmesine yardımcı olmaktadır. Bilgisayarla görme, insan destekli izlemeye ana alternatif haline gelmiştir. Özellikle, STAF [111] veya VIBE [112] gibi derin öğrenmeye dayalı vücut duruşu tahmini, çalışma alanı ergonomik değerlendirmesi [113] dâhil olmak üzere çeşitli bağlamlarda yeni ve önemli atılımlar gerçekleşmiştir. Bu eğilim, potansiyel olarak değerli bir veri zenginliği sağlayarak, personel faaliyetleri de dâhil olmak üzere farklı işyeri yönlerinin tamamen dijitalleştirilmesini sağlamaktadır. Örneğin, ergonomik değerlendirmede

rutin izleme, saniyede en az bir kez yaklaşık 25 eklem açısının ve bunların birleşik görelî değerlerinin değerlendirilmesini gerektirebilir. Bu nedenle, tek bir işçinin saatlik faaliyeti, keşif analizleri yapmak için yeterli araçları gerektiren büyük miktarda veri üretir. Bu, ergonomi uzmanlarının müdahale gerektiren durumları veya bağlamları belirlemesine veya dava sürecini bilgilendirebilecek ilgili durumları bulmasına yardımcı olur [114]. Bu nedenle ergonomik risk değerlendirme yönteminin otomasyon ve dijitalleşme teknolojilerine uyum sağlaması uzmanlar tarafından tercih sebebi olmaktadır. Aynı zamanda bu teknolojilere uygun yöntemin seçimi ergonomik risk seviyesinin doğru olarak belirlenmesinde önemli bir etkidir. Ergonomi alanındaki dijitalleşme eğilimi göz önünde bulundurularak yöntemlerin ağırlıklarının belirlenmesi için oluşturulacak modelde Otomasyon/ Dijitalleşmeye uygunluk seviyesi kriter olarak belirlenmiştir.

#### 4.3.4. IVSF-AHP uygulaması

Çalışmanın birinci aşamasında bulanık mantık modelinin kural tabanını oluşturulmasında kullanılmak üzere ERDY'lerin ağırlıklarını belirlemek için IVSF-AHP yöntemi tercih edilmiştir. IVSF-AHP yöntemi uygulaması için geliştirilen hiyerarşik yapı Şekil 4.5'te gösterilmektedir.



Şekil 4.5. ERDY ağırlıkları belirleme problemi hiyerarşik yapısı.

Şekil 4.5'te hiyerarşik yapıda verilen 6 kriter ve 4 alternatif için KV1, KV2, KV3, KV4 ve KV5 olmak üzere 5 karar vericinin değerlendirmeleri IVSF-AHP adımları üzerinden analiz edilmiştir. Dilsel ölçek kullanılarak, karar vericilerin IVSF-AHP anketine verdikleri cevaplardan oluşturulan kriterler için ikili karşılaştırmalar EK F'de sunulmuştur.

İkili karşılaştırmalar için, Tablo E.1'deki ikili karşılaştırma matrisindeki dilsel değişkenlere karşılık gelen skor endeksleri kullanılarak tutarlılık oranı hesaplanmıştır. Tutarlılık oranları KV1, KV2, KV3, KV4 ve KV5 için sırasıyla 0.092, 0.093, 0.085, 0.097 ve 0.067 olarak hesaplanmış ve 0.1'den küçük olduğundan, tüm karar vericilerin değerlendirmeleri tutarlı kabul edilmiştir. Bu aşamadan sonra modelin uygulanmasına geçilmiştir. İkili karşılaştırma matrisleri, denklem D.14'teki IVSWAM operatörüyle birleştirilmiş ve Tablo 4.7'de gösterilen birleştirilmiş ikili karşılaştırma matrisi elde edilmiştir. Ardından, denklem D.16 kullanılarak ikili kriter ağırlıkları durulaştırılmış ve sonuçlar Tablo 4.8'de sunulmuştur. Denklem E.1 ile kriter ağırlıkları normalize edilmiştir (Tablo 4.9). Satır bileşenlerinin aritmetik ortalaması alınarak aşağıdaki öncelik vektörü elde edilmiştir.

**Tablo 4.7.** İkili karşılaştırma matrisi.

	K1	K2	K3	K4	K5	K6
K1	([0.5, 0.55], [0.45, 0.55], [0.3, 0.4])	([0.64, 0.74], [0.21, 0.26], [0.21, 0.26])	([0.44, 0.5], [0.43, 0.52], [0.27, 0.35])	([0.59, 0.7], [0.23, 0.28], [0.23, 0.28])	([0.64, 0.74], [0.21, 0.26], [0.21, 0.26])	([0.56, 0.66], [0.27, 0.33], [0.25, 0.31])
K2		([0.5, 0.55], [0.45, 0.55], [0.3, 0.4])	([0.37, 0.44], [0.53, 0.62], [0.23, 0.3])	([0.4, 0.49], [0.41, 0.49], [0.24, 0.3])	([0.44, 0.53], [0.4, 0.47], [0.23, 0.29])	([0.37, 0.42], [0.52, 0.63], [0.27, 0.35])
K3			([0.5, 0.55], [0.45, 0.55], [0.3, 0.4])	([0.56, 0.66], [0.27, 0.33], [0.25, 0.31])	([0.63, 0.72], [0.24, 0.29], [0.22, 0.28])	([0.6, 0.71], [0.23, 0.28], [0.23, 0.28])
K4				([0.5, 0.55], [0.45, 0.55], [0.3, 0.4])	([0.54, 0.63], [0.28, 0.34], [0.26, 0.32])	([0.51, 0.61], [0.29, 0.35], [0.25, 0.3])
K5					([0.5, 0.55], [0.45, 0.55], [0.3, 0.4])	([0.39, 0.46], [0.47, 0.55], [0.26, 0.32])
K6						([0.5, 0.55], [0.45, 0.55], [0.3, 0.4])

**Tablo 4.8.** Durulaştırılmış ikili karşılaştırma matrisi.

	K1	K2	K3	K4	K5	K6
K1	1.00	1.41	0.97	1.34	1.41	1.27
K2	0.71	1.00	0.82	0.97	1.03	0.80
K3	1.03	1.23	1.00	1.27	1.37	1.35
K4	0.75	1.03	0.79	1.00	1.23	1.19
K5	0.71	0.97	0.73	0.81	1.00	0.90
K6	0.79	1.25	0.74	0.84	1.12	1.00

**Tablo 4.9.** Normalize edilmiş öncelik vektörü.

	K1	K2	K3	K4	K5	K6	Öncelik Vektörü(w)
K1	0.20	0.21	0.19	0.21	0.20	0.19	0.20
K2	0.14	0.15	0.16	0.16	0.14	0.12	0.15
K3	0.21	0.18	0.20	0.20	0.19	0.21	0.20
K4	0.15	0.15	0.16	0.16	0.17	0.18	0.16
K5	0.14	0.14	0.14	0.13	0.14	0.14	0.14
K6	0.16	0.18	0.15	0.13	0.16	0.15	0.16

Sonraki adımda, her bir karar vericinin Tablo E.1'deki dilsel ölçek kullanılarak alternatifleri değerlendirmesi sağlanmıştır. Değerlendiricilerin görüşleri EK F'de verilmiştir.

Alternatif karşılaştırma matrisleri Tablo E.1'deki dilsel ölçek yardımıyla aralık değerli küresel bulanık sayılara dönüştürülmüş ve değerlendiricilerin görüşleri IVSWAM operatörüyle birleştirilmiştir. Daha sonra denklem E.2 ile Tablo 4.10-Tablo 4.15 arasında gösterilen ağırlıklı karar matrisleri hesaplanmıştır.

**Tablo 4.10.** K1 için ağırlıklı karar matrisi.

	A1	A2	A3	A4
A1	([0.24, 0.26], [0.85, 0.89], [0.15, 0.22])	([0.18, 0.21], [0.86, 0.89], [0.12, 0.16])	([0.25, 0.31], [0.78, 0.81], [0.12, 0.16])	([0.27, 0.33], [0.79, 0.82], [0.12, 0.17])
A2		([0.24, 0.26], [0.85, 0.89], [0.15, 0.22])	([0.31, 0.37], [0.74, 0.77], [0.12, 0.17])	([0.34, 0.42], [0.71, 0.75], [0.11, 0.16])
A3			([0.24, 0.26], [0.85, 0.89], [0.15, 0.22])	([0.25, 0.3], [0.79, 0.82], [0.13, 0.18])
A4				([0.24, 0.26], [0.85, 0.89], [0.15, 0.22])

**Tablo 4.11.** K2 için ağırlıklı karar matrisi.

	A1	A2	A3	A4
A1	([0.2, 0.23], [0.89, 0.92], [0.13, 0.19])	([0.09, 0.11], [0.92, 0.94], [0.1, 0.12])	([0.16, 0.19], [0.88, 0.91], [0.1, 0.13])	([0.23, 0.28], [0.83, 0.85], [0.11, 0.16])
A2		([0.2, 0.23], [0.89, 0.92], [0.13, 0.19])	([0.22, 0.26], [0.85, 0.88], [0.11, 0.16])	([0.23, 0.27], [0.84, 0.86], [0.12, 0.16])
A3			([0.2, 0.23], [0.89, 0.92], [0.13, 0.19])	([0.21, 0.26], [0.86, 0.88], [0.11, 0.15])
A4				([0.2, 0.23], [0.89, 0.92], [0.13, 0.19])



**Tablo 4.12.** K3 için ağırlıklı karar matrisi.

	A1	A2	A3	A4
A1	([0.24, 0.26], [0.85, 0.89], [0.15, 0.22])	([0.29, 0.35], [0.76, 0.79], [0.11, 0.16])	([0.29, 0.35], [0.76, 0.79], [0.13, 0.17])	([0.42, 0.54], [0.67, 0.71], [0.07, 0.17])
A2		([0.24, 0.26], [0.85, 0.89], [0.15, 0.22])	([0.15, 0.19], [0.87, 0.9], [0.11, 0.14])	([0.4, 0.51], [0.68, 0.72], [0.08, 0.17])
A3			([0.24, 0.26], [0.85, 0.89], [0.15, 0.22])	([0.43, 0.55], [0.66, 0.71], [0.07, 0.17])
A4				([0.24, 0.26], [0.85, 0.89], [0.15, 0.22])

**Tablo 4.13.** K4 için ağırlıklı karar matrisi.

	A1	A2	A3	A4
A1	([0.21, 0.24], [0.88, 0.91], [0.14, 0.2])	([0.33, 0.41], [0.75, 0.78], [0.09, 0.15])	([0.33, 0.41], [0.75, 0.78], [0.09, 0.15])	([0.35, 0.44], [0.74, 0.77], [0.09, 0.15])
A2		([0.21, 0.24], [0.88, 0.91], [0.14, 0.2])	([0.13, 0.15], [0.9, 0.93], [0.11, 0.15])	([0.23, 0.27], [0.87, 0.89], [0.12, 0.17])
A3			([0.21, 0.24], [0.88, 0.91], [0.14, 0.2])	([0.26, 0.32], [0.81, 0.83], [0.09, 0.14])
A4				([0.21, 0.24], [0.88, 0.91], [0.14, 0.2])

**Tablo 4.14.** K5 için ağırlıklı karar matrisi.

	A1	A2	A3	A4
A1	([0.2, 0.22], [0.89, 0.92], [0.13, 0.18])	([0.23, 0.28], [0.82, 0.84], [0.11, 0.15])	([0.17, 0.2], [0.89, 0.91], [0.11, 0.15])	([0.07, 0.09], [0.95, 0.97], [0.07, 0.09])
A2		([0.2, 0.22], [0.89, 0.92], [0.13, 0.18])	([0.09, 0.11], [0.93, 0.95], [0.09, 0.11])	([0.05, 0.06], [0.97, 0.99], [0.04, 0.07])
A3			([0.2, 0.22], [0.89, 0.92], [0.13, 0.18])	([0.07, 0.09], [0.95, 0.96], [0.07, 0.1])
A4				([0.2, 0.22], [0.89, 0.92], [0.13, 0.18])

**Tablo 4.15.** K6 için ağırlıklı karar matrisi.

	A1	A2	A3	A4
A1	[[0.21, 0.23], [0.88, 0.91], [0.14, 0.19))	[[0.15, 0.18], [0.9, 0.93], [0.12, 0.16))	[[0.2, 0.24], [0.86, 0.88], [0.12, 0.17))	[[0.3, 0.37], [0.77, 0.8], [0.1, 0.14))
A2		[[0.21, 0.23], [0.88, 0.91], [0.14, 0.19))	[[0.28, 0.34], [0.78, 0.81], [0.1, 0.15))	[[0.35, 0.44], [0.74, 0.78], [0.08, 0.15))
A3			[[0.21, 0.23], [0.88, 0.91], [0.14, 0.19))	[[0.29, 0.35], [0.78, 0.81], [0.1, 0.15))
A4				[[0.21, 0.23], [0.88, 0.91], [0.14, 0.19))

Daha sonra, denklem E.3 ile Tablo 4.16’da gösterilen her alternatif için nihai IVSF-AHP matrisi hesaplanmıştır.

**Tablo 4.16.** Nihai IVSF-AHP matrisi.

	A1	A2	A3	A4
A1	[[0.5, 0.55], [0.45, 0.55], [0.3, 0.4))	[[0.53, 0.63], [0.33, 0.4], [0.23, 0.29))	[[0.56, 0.66], [0.3, 0.37], [0.23, 0.29))	[[0.66, 0.77], [0.24, 0.3], [0.18, 0.25))
A2		[[0.5, 0.55], [0.45, 0.55], [0.3, 0.4))	[[0.49, 0.58], [0.36, 0.43], [0.24, 0.29))	[[0.65, 0.76], [0.25, 0.32], [0.18, 0.25))
A3			[[0.5, 0.55], [0.45, 0.55], [0.3, 0.4))	[[0.62, 0.73], [0.27, 0.33], [0.19, 0.26))
A4				[[0.5, 0.55], [0.45, 0.55], [0.3, 0.4))

Denklem D.16 kullanarak her alternatifin nihai skoru Tablo 4.17’de gösterildiği üzere durulaştırılmış ve denklem D.17 ile durulaştırılmış değerler normalleştirilmiştir. Tablo 4.18’de normalize edilmiş matris gösterilmiş olup, her bir alternatifin ortalaması alınarak alternatiflerin ağırlıkları hesaplanmıştır.

**Tablo 4.17.** Skor fonksiyonu ile durulaştırılmış matris.

	A1	A2	A3	A4
A1	1.0	1.2	1.2	1.4
A2	0.8	1.0	1.1	1.4
A3	0.8	0.9	1.0	1.4
A4	0.7	0.7	0.74	1.0
Toplam	3.3	3.8	4.1	5.2

**Tablo 4.18.** Normalize edilmiş matris.

	A1	A2	A3	A4	Ağırlıklar
A1	0.297	0.313	0.303	0.276	0.297
A2	0.253	0.262	0.273	0.271	0.265
A3	0.241	0.237	0.243	0.262	0.246
A4	0.209	0.189	0.180	0.192	0.192
Toplam	1	1	1	1	1

OCRA (A1), REBA (A2), QEC (A3) ve COPSOQ (A4) yöntemlerinin ağırlıkları sırasıyla 0.297, 0.265, 0.246 ve 0.192 hesaplanmıştır.

#### **4.3.5. Ergonomik risk değerlendirme bulanık mantık modelinin oluşturulması**

Çalışmanın birinci aşaması olan bütünleşik ergonomik risk değerlendirme modeli Matlab programının fuzzy logic desinger ara yüzü kullanılarak oluşturulmuştur.

İşyerindeki ergonomik risklerin değerlendirilmesi, birden fazla parametrenin dikkate alındığı kapsamlı bir değerlendirme gerektirir. Bu parametrelerin kesin olarak ölçülmesi zor olabilir ve ergonomik risk değerlendirme yöntemleri genellikle çeşitli hesaplama metodolojilerini ve sınıflandırma aralıklarını içerir. Ayrıca, ergonomik bir risk değerlendirme yönteminin seçilmesine yönelik standartlaştırılmış bir protokolün bulunmaması, seçimlerini iş bağlamının belirli özelliklerine göre özelleştiren uzmanlara olan bağımlılığı artırmaktadır.

Bu değerlendirme sürecinin karmaşıklığı, değerlendirmenin doğasında olan belirsizliklerle daha da artmaktadır. Bu belirsizliklerle başa çıkmak için, montaj hattındaki görevlerin değerlendirilmesinde fiziksel, çevresel ve psikososyal riskler dikkate alınarak bulanık mantık yaklaşımının kullanılması tercih edilmiştir. Bulanık mantık, geleneksel metodolojilerin sıklıkla kapsamaya çalıştığı kesin olmayan, niteliksel ve öznel verilerin entegrasyonuna izin veren esneklik sağlamaktadır. Farklı risk faktörleri arasındaki ilişkilerin dikkate alınmasına yardımcı olarak daha kapsamlı ve bağlamsal olarak uygun bir değerlendirme sağlar.

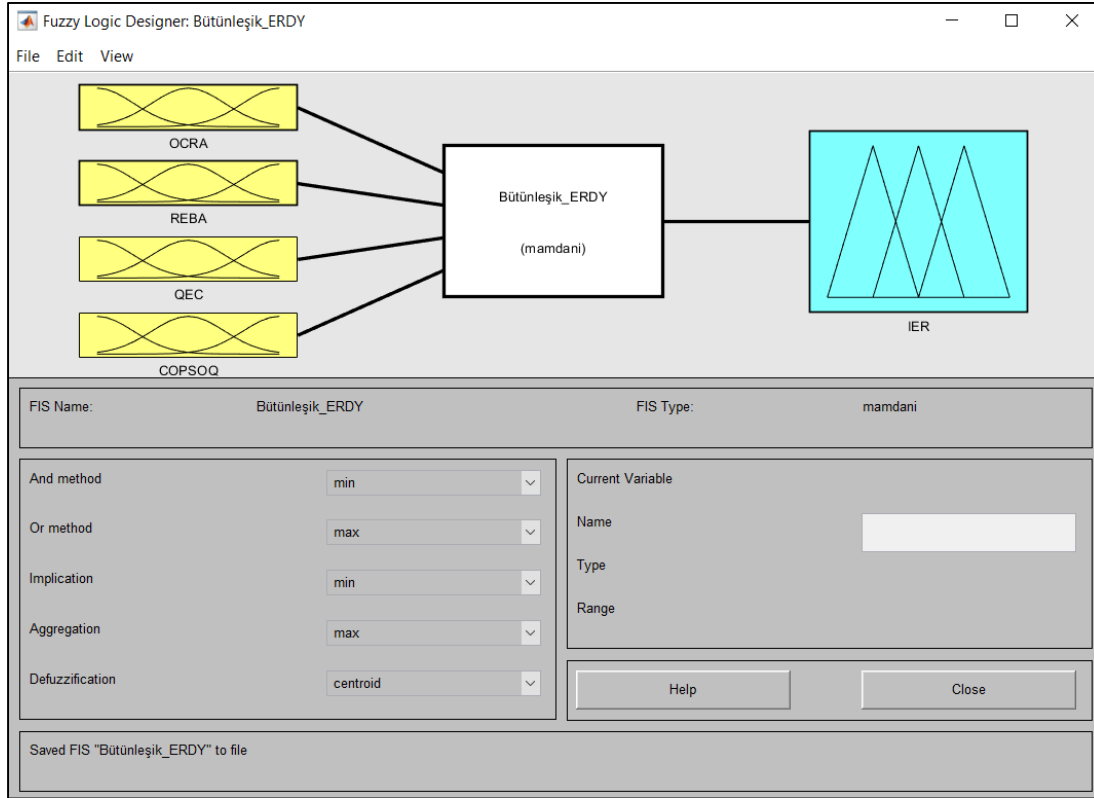
Modelde 4 bulanık girdi değişkeni yer almaktadır. Bunlar;

- OCRA
- REBA
- QEC

## - COPSOQ

Model çıktısı ise bütünleşik ergonomik risk seviyesi (IER)'dir.

Şekil 4.6'da önerilen modelin yapısı gösterilmektedir. Modelde durulaştırma işlemi için ağırlık merkezi ve çıkarım işlemi için mamdani yöntemi tercih edilmiştir.



Şekil 4.6. Bütünleşik ergonomik risk değerlendirme bulanık mantık modeli.

### 4.3.5.1. Üyelik fonksiyonlarının belirlenmesi

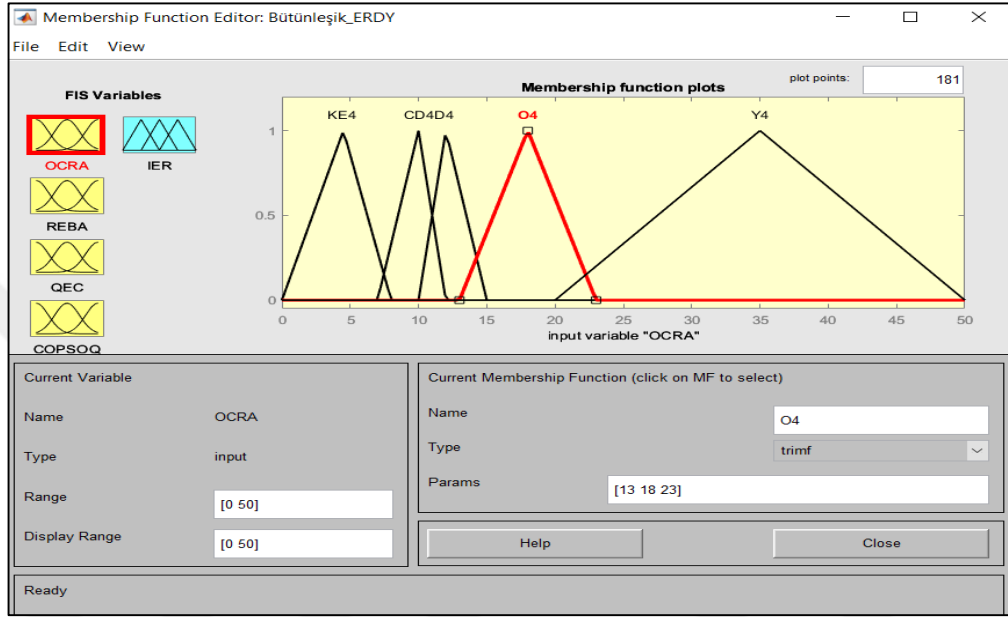
Bütün değişkenler için yamuk üyelik fonksiyonu kullanılmıştır. Sözel ifadeler Tablo 4.19'da gösterilmektedir.

Tablo 4.19. Sözel ifadeler.

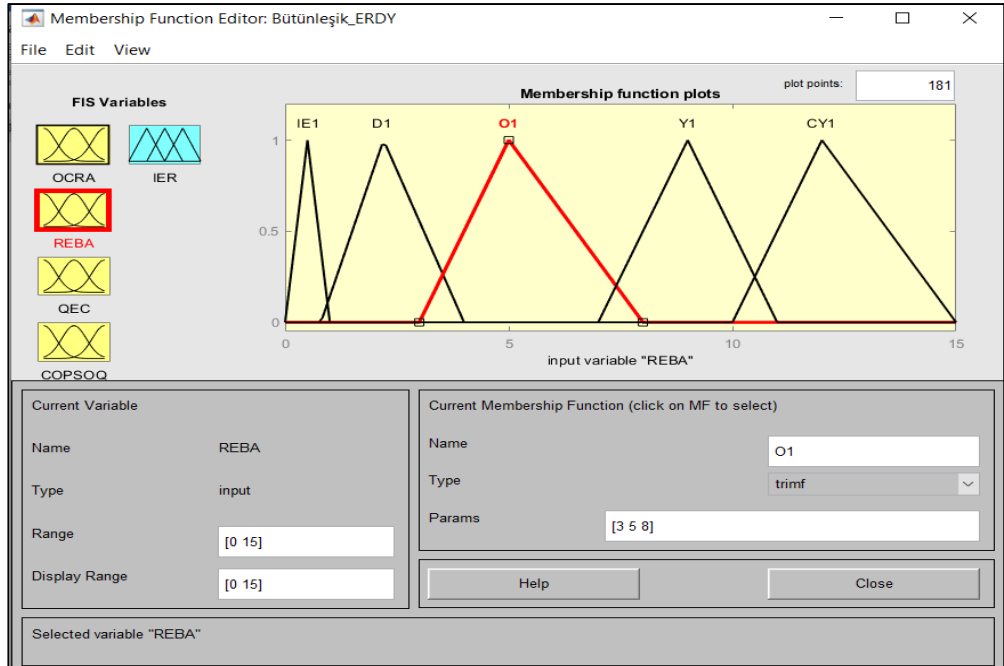
Veriler	Sözel İfadeler
OCRA	Kabul Edilebilir (KE), Çok Düşük (CD), Düşük (D), Orta (O), Yüksek (Y)
REBA	İhmal Edilebilir (IE), D, O, Y, Çok Yüksek (CY)
QEC	IE, D, O, Y, CY
COPSOQ	IE, D, O, Y, CY
IER	IE, D, O, Y, CY

Üyelik fonksiyonlarının belirlenmesinde yöntemlerin risk eylem karar tablolarından yararlanılmıştır. Ancak OCRA ve REBA yöntemlerinin 5 eylem sınıfı bulunurken

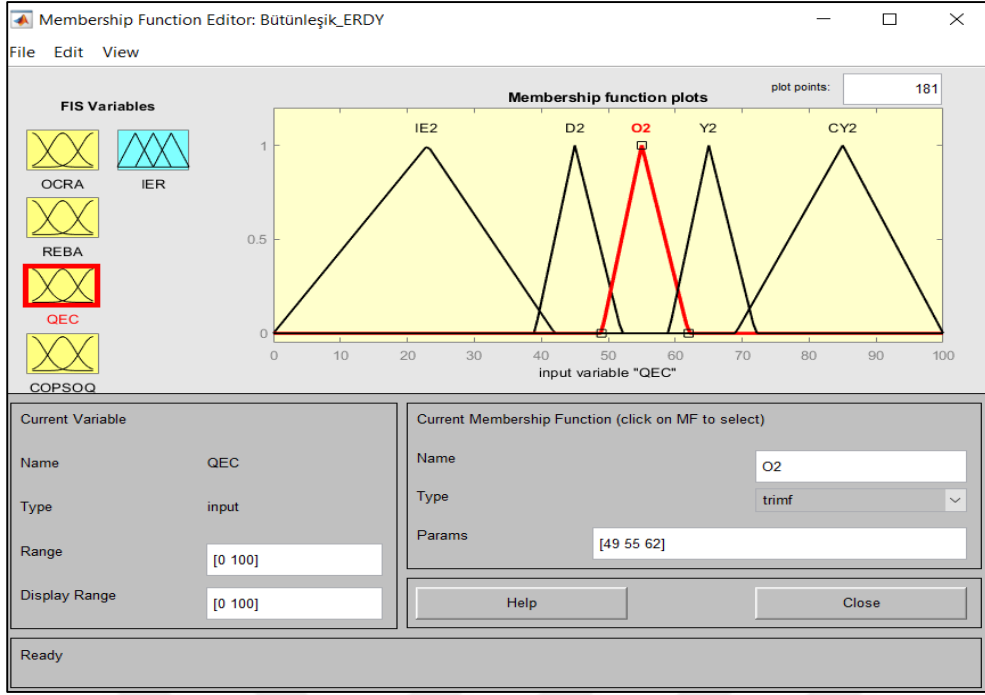
QEC yönteminin 4 eylem sınıfı bulunmakta ve COPSOQ yönteminin risk eylem karar tablosu bulunmamaktadır. Yöntemlerin “etki” puanlarını hesaplayabilmek için QEC yönteminin risk eylem tablosu revize edilmiştir. COPSOQ yöntemi için risk eylem tablosu oluşturulmuştur. Ayrıca, IER için risk eylem karar tablosu oluşturulmuştur. Revize edilen ve yeni oluşturulan bu risk eylem karar tablolarına göre belirlenen üyelik fonksiyonları Şekil 4.7-4.11’de gösterilmiştir.



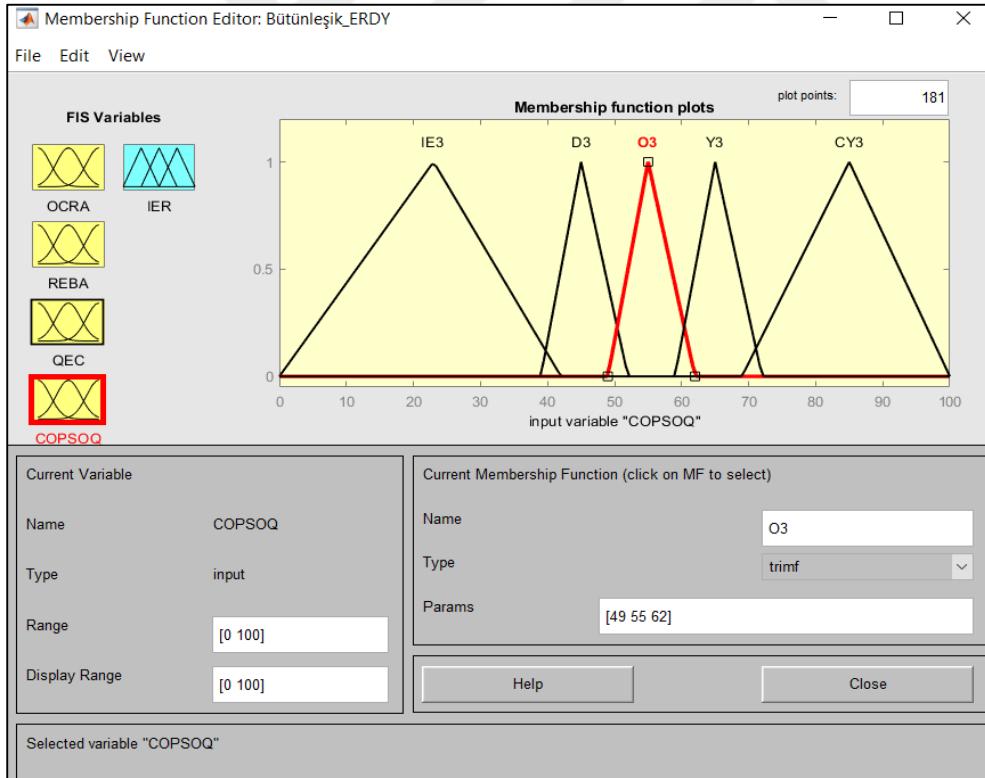
Şekil 4.7. OCRA girdi verisinin üyelik fonksiyonu.



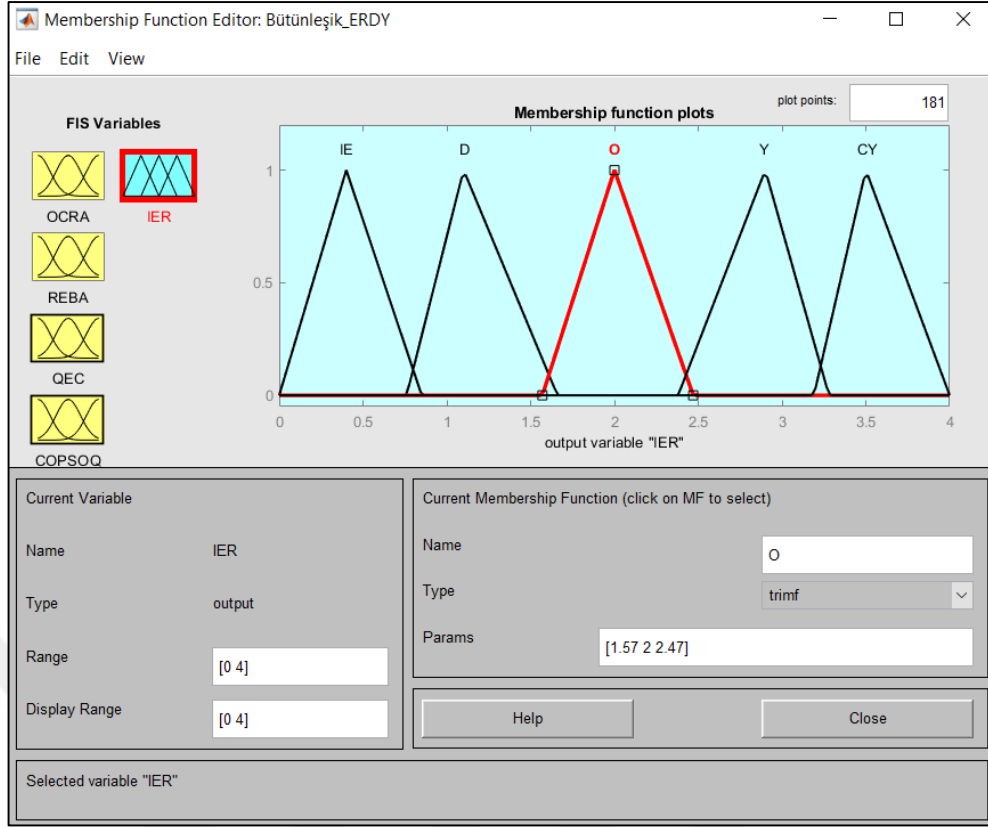
Şekil 4.8. REBA girdi verisinin üyelik fonksiyonu.



Şekil 4.9. QEC girdi verisinin üyelik fonksiyonu.



Şekil 4.10. COPSOQ girdi verisinin üyelik fonksiyonu.



Şekil 4.11. IER çıktı verisinin üyelik fonksiyonu.

#### 4.3.5.2. Kural tabanının oluşturulması

Bu çalışmada belirlenen 4 girdi verisi için 625 adet kural oluşturulmuştur. Kurallar aşağıdaki şekilde oluşturulmuştur;

**Adım 1:** IVSF-AHP yöntemine göre ERDY'lerin ağırlıkları Tablo 4.20'deki gibi belirlenmiştir.

**Tablo 4.20.** IVSF-AHP yöntemine göre belirlenen ağırlıklar.

Yöntem	Ağırlıklar
REBA	0.2648
QEC	0.2456
COPSQQ	0.1925
OCRA	0.2972

**Adım 2:** Birinci adımda belirtilen ağırlıklar ile yöntemlerin eylem seviyesi çarpılarak "etki" puanı hesaplanmıştır. Modelde kullanılan dört yöntemin etki değeri tabloları Tablo 4.21- Tablo 4.24'te gösterilmiştir.

**Tablo 4.21.** REBA yönteminin etki puanları.

Eylem Seviyesi	Üyelik	Sözel İfadeler	Eylem Durumu	Kod	Etki
0	0-1	IE (İhmal Edilebilir)	Gerek Yok	IE1	0
1	0,8-4	D (Düşük)	Gerekli Olabilir	D1	0.2648
2	3-8	O (Orta)	Gerekli	O1	0.5295
3	7-11	Y (Yüksek)	Yakın Zamanda Gerekli	Y1	0.7943
4	10-15	CY (Çok Yüksek)	Hemen Gerekli	CY1	1.059

**Tablo 4.22.** QEC yönteminin etki puanları.

Eylem Seviyesi	Üyelik	Sözel İfadeler	Eylem Durumu	Kod	Etki
0	0-42	IE (İhmal Edilebilir)	Gerek Yok	IE2	0
1	39-52	D (Düşük)	Gerekli Olabilir	D2	0.2456
2	49-62	O (Orta)	Gerekli	O2	0.4912
3	59-72	Y (Yüksek)	Yakın Zamanda Gerekli	Y2	0.7368
4	69-100	CY (Çok Yüksek)	Hemen Gerekli	CY2	0.9824

**Tablo 4.23.** COPSOQ yönteminin etki puanları.

Eylem Seviyesi	Üyelik	Sözel İfadeler	Eylem Durumu	Kod	Etki
0	0-42	IE (İhmal Edilebilir)	Gerek Yok	IE3	0
1	39-52	D (Düşük)	Gerekli Olabilir	D3	0.1925
2	49-62	O (Orta)	Gerekli	O3	0.3849
3	59-72	Y (Yüksek)	Yakın Zamanda Gerekli	Y3	0.5774
4	69-100	CY (Çok Yüksek)	Hemen Gerekli	CY3	0.7699

**Tablo 4.24.** OCRA yönteminin etki puanları.

Eylem Seviyesi	Üyelik	Sözel İfadeler	Eylem Durumu	Kod	Etki
0	0-8	KE (Kabul Edilebilir)	Gerek Yok	KE4	0
1	7-12	CD (Çok Düşük)	Gerekli Olabilir	CD4	0.2972
2	10-15	D (Düşük)	Gerekli	D4	0.5944
3	13-23	O (Orta)	Yakın Zamanda Gerekli	O4	0.8915
4	20-50	Y (Yüksek)	Hemen Gerekli	Y4	1.1887

**Adım 3:** Bütünleşik Ergonomik Risk (IER) için sınıf aralıkları, üyelik değerleri, sözel ifadeler ve eylem durumu Tablo 4.25'teki gibi belirlenmiştir.

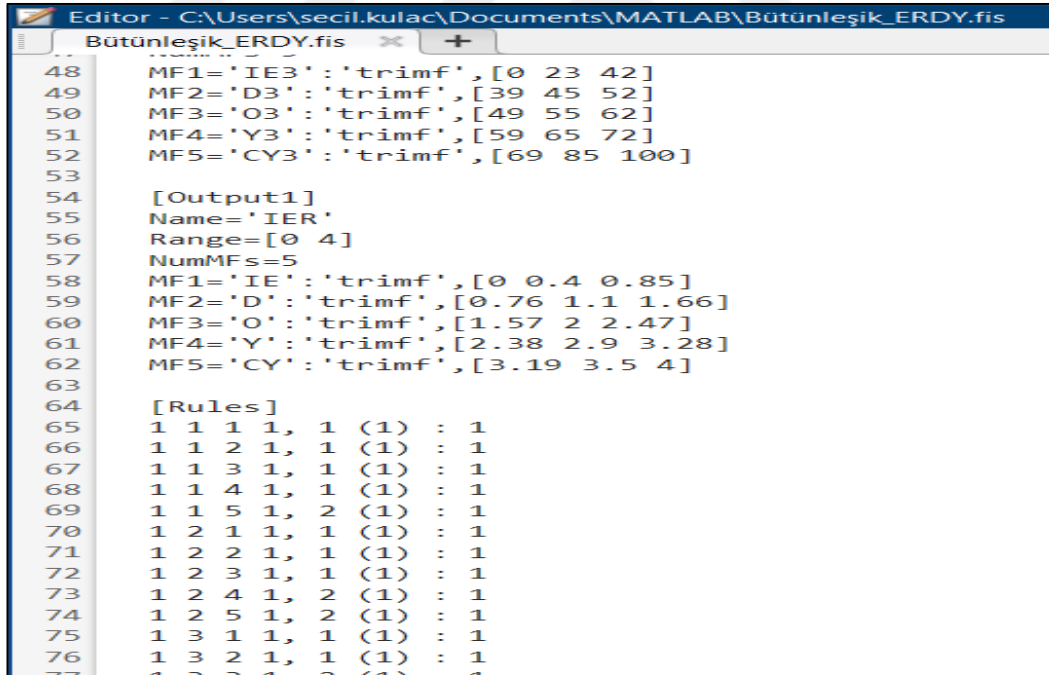


**Tablo 4.25.** Bütünleşik ergonomik risk (IER) için üyelik değerleri.

Sınıf Aralıkları	Üyelik Değerleri	Sözel İfadeler	Eylem Durumu	IER Kod
0-0.8	0-0.85	IE (İhmal Edilebilir)	Gerek Yok	IE
0.81-1.61	0.76-1.66	D (Düşük)	Gerekli Olabilir	D
1.62-2.42	1.57-2.47	O (Orta)	Gerekli	O
2.43-3.23	2.38-3.28	Y (Yüksek)	Yakın Zamanda Gerekli	Y
3.24-4	3.19-4	CY (Çok Yüksek)	Hemen Gerekli	CY

**Adım 4:** 625 adet kural için toplam etki puanı hesaplanmıştır. Tablo 4.25’te belirtilen sınıf aralıklarına göre toplam etki puanına karşılık gelen IER belirlenerek kurallar oluşturulmuştur. Oluşturulan kurallar Fuzzy Logic Designer’a girilmiştir. Tablo 4.26’da hesaplanan etki puanlarının bir bölümü ve oluşturulan kurallar gösterilmektedir.

**Adım 6:** 5. Adımda oluşturulan kural kodları Şekil 4.12’de görüldüğü üzere Matlab Editor [ Rules ] kısmına eklenmiştir.



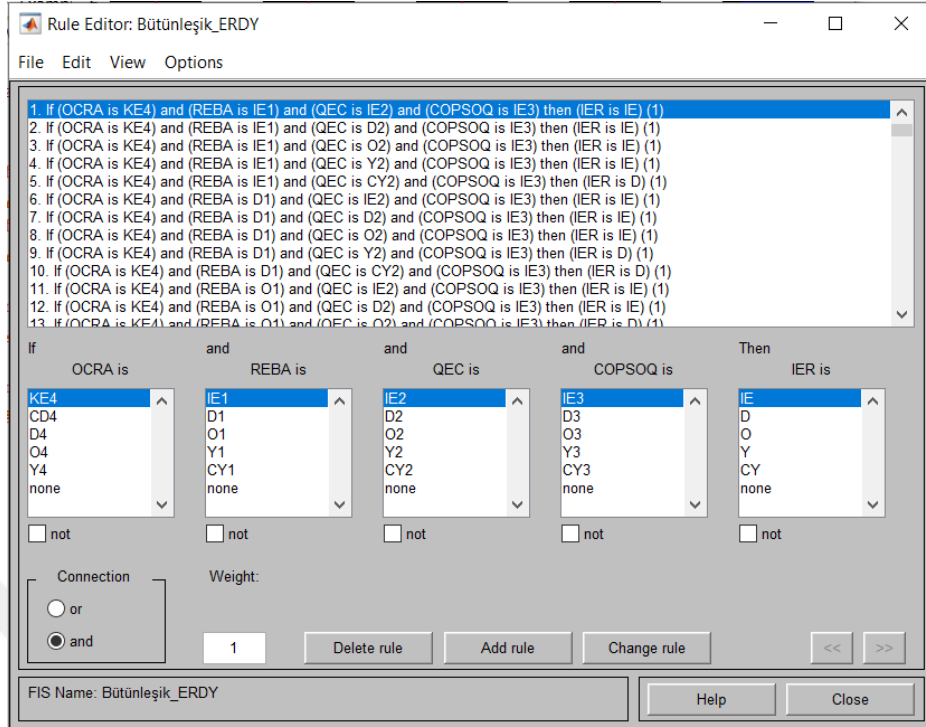
```
Editor - C:\Users\secil.kulac\Documents\MATLAB\Bütünleşik_ERDY.fis
Bütünleşik_ERDY.fis
48 MF1='IE3': 'trimf', [0 23 42]
49 MF2='D3': 'trimf', [39 45 52]
50 MF3='O3': 'trimf', [49 55 62]
51 MF4='Y3': 'trimf', [59 65 72]
52 MF5='CY3': 'trimf', [69 85 100]
53
54 [Output1]
55 Name='IER'
56 Range=[0 4]
57 NumMFs=5
58 MF1='IE': 'trimf', [0 0.4 0.85]
59 MF2='D': 'trimf', [0.76 1.1 1.66]
60 MF3='O': 'trimf', [1.57 2 2.47]
61 MF4='Y': 'trimf', [2.38 2.9 3.28]
62 MF5='CY': 'trimf', [3.19 3.5 4]
63
64 [Rules]
65 1 1 1 1, 1 (1) : 1
66 1 1 2 1, 1 (1) : 1
67 1 1 3 1, 1 (1) : 1
68 1 1 4 1, 1 (1) : 1
69 1 1 5 1, 2 (1) : 1
70 1 2 1 1, 1 (1) : 1
71 1 2 2 1, 1 (1) : 1
72 1 2 3 1, 1 (1) : 1
73 1 2 4 1, 2 (1) : 1
74 1 2 5 1, 2 (1) : 1
75 1 3 1 1, 1 (1) : 1
76 1 3 2 1, 1 (1) : 1
77 1 3 3 1, 2 (1) : 1
```

**Şekil 4.12.** Matlab kural listesi.

**Tablo 4.26.** Kuralların etki puanları ve IER sınıfı.

Kural No	Sözel İfade Kodu				Etki Puanı					Kural	IER
	OCRA	REBA	QEC	COPSOQ	OCRA	REBA	QEC	COPSOQ	Toplam		
1	KE4	IE1	IE2	IE3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	KE4-IE1-IE2-IE3	IE
2	KE4	IE1	D2	IE3	0.00	0.00	0.25	0.00	0.25	KE4-IE1-D2-IE3	IE
3	KE4	IE1	O2	IE3	0.00	0.00	0.49	0.00	0.49	KE4-IE1-O2-IE3	IE
4	KE4	IE1	Y2	IE3	0.00	0.00	0.74	0.00	0.74	KE4-IE1-Y2-IE3	IE
5	KE4	IE1	CY2	IE3	0.00	0.00	0.98	0.00	0.98	KE4-IE1-CY2-IE3	D
6	KE4	D1	IE2	IE3	0.00	0.26	0.00	0.00	0.26	KE4-D1-IE2-IE3	IE
7	KE4	D1	D2	IE3	0.00	0.26	0.25	0.00	0.51	KE4-D1-D2-IE3	IE
8	KE4	D1	O2	IE3	0.00	0.26	0.49	0.00	0.76	KE4-D1-O2-IE3	IE
9	KE4	D1	Y2	IE3	0.00	0.26	0.74	0.00	1.00	KE4-D1-Y2-IE3	D
10	KE4	D1	CY2	IE3	0.00	0.26	0.98	0.00	1.25	KE4-D1-CY2-IE3	D
11	KE4	O1	IE2	IE3	0.00	0.53	0.00	0.00	0.53	KE4-O1-IE2-IE3	IE
12	KE4	O1	D2	IE3	0.00	0.53	0.25	0.00	0.78	KE4-O1-D2-IE3	IE

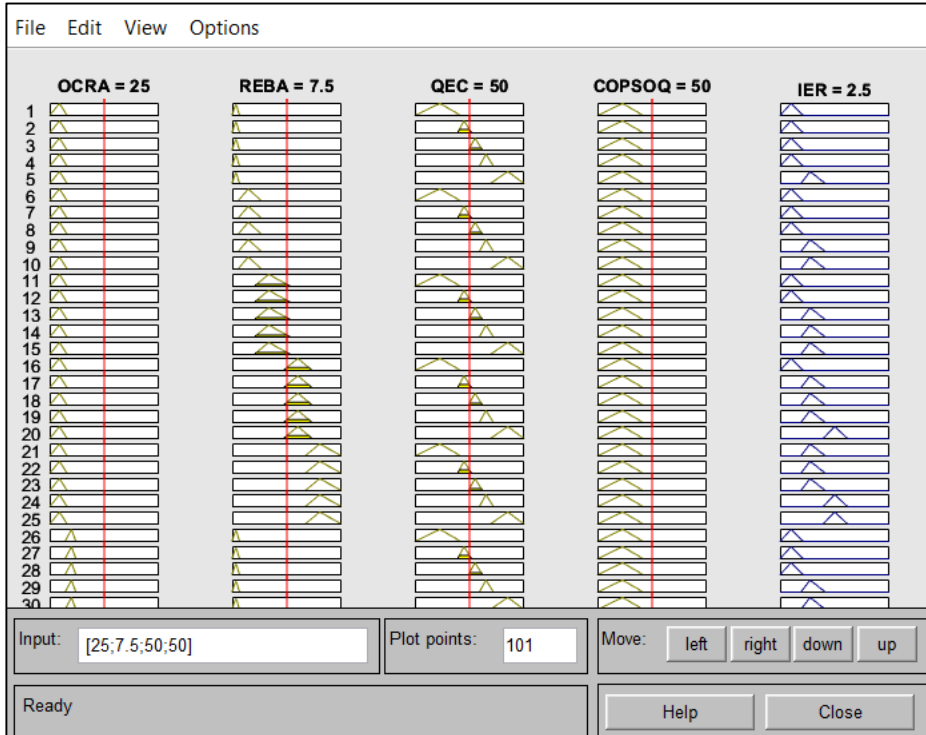
[ Rules ] kısmına eklenen kurallar Şekil 4.13'te gösterilmektedir.



Şekil 4.13. Bulanık kural tabanı.

#### 4.3.5.3. Çıkarım ve durulaştırma işlemleri

Şekil 4.14'te bulanık çıkarım ekranı gösterilmiştir.



Şekil 4.14. Bulanık çıkarım ekranı.

#### 4.3.6. Ergo-KMMHDP-2 için karma tamsayı programlama yaklaşımı

Bu bölümde Ergo-KMMHDP-2 problemi için matematiksel modeller önerilmiştir.

Ergonomik riskleri matematiksel modele entegre etmek için kullanılan yaklaşımlardan biri, toplam ergonomik risk azaltmaktır. Bu yaklaşım, yüksek ergonomik risk taşıyan görevlerin bir istasyona, düşük ergonomik risk taşıyan işlerin ise başka bir istasyona atanması gibi adaletsiz bir duruma yol açabilir. Diğer yaklaşımlardan biri ise istasyonların ergonomik risklerini sınırlayan kısıtlamaların eklenmesidir. Bu yaklaşım, ergonomik risk sınıflarının istasyonlar arasında uygun şekilde dengelenmesine engel olabilir. Benzer şekilde yüksek riskli görevlerin bir istasyona atanmasına sebep olabilir.

Ergonomik riskleri matematiksel modele entegre etmek için kullanılan yaklaşımlardan biri, toplam ergonomik riskin azaltılmasıdır. Bu yaklaşım, yüksek ergonomik risk taşıyan görevlerin bir istasyona, düşük ergonomik risk taşıyan görevlerin ise başka bir istasyona atanması gibi adaletsiz bir duruma yol açabilir. Diğer bir yaklaşım ise istasyonların ergonomik risklerini sınırlayan kısıtlamaların eklenmesidir. Ancak bu yaklaşım, ergonomik risk sınıflarının istasyonlar arasında uygun şekilde dengelenmesini engelleyebilir ve yüksek riskli görevlerin belirli istasyonlarda yoğunlaşmasına neden olabilir.

Bu çalışmada önerilen yaklaşım, ergonomik riskleri kategorilere ayırarak istasyonlar arasında risk sınıflarının dengelenmesini amaçlamaktadır. Bu doğrultuda, istasyonların ergonomik risk puanını ve her bir risk kategorisindeki görev sayısını dengelemek için yeni bir amaç fonksiyonu geliştirilmiştir. Ayrıca, her istasyonun risk oranına göre dinlenme süresi ( $r$ ) ilave eden bir kısıt da eklenmiştir (Denklem 4.26). Ek olarak, bölgeleme kısıtlamaları nedeniyle belirli görevlerin aynı istasyonda tamamlanması, bazı görevlerin ise çalışan veya teknik gereksinimlere bağlı olarak farklı istasyonlarda gerçekleştirilmesi gerektiğinden, modele pozitif ve negatif bölgeleme kısıtlamaları eklenmiştir. Ayrıca, ergonomik risklerin modele kısıt olarak eklenmesi durumunun değerlendirilmesi amacıyla önerilen yeni amaç fonksiyonunun kullanılmadığı bir model oluşturulmuştur. Modellerin kapsamların değerlendirilmesi Tablo 4.27'de gösterilmektedir.

**Tablo 4.27.** Matematiksel modellerin kapsamalarının karşılaştırılması.

Matematiksel Model		KMMHDP-2	Ergo-KMMHDP-2 (F2)	Ergo-KMMHDP-2 (Bölgeleme Kısıtı+F2)	Ergo-KMMHDP-2 (Bölgeleme Kısıtı + ER Limit)
1. Amaç Fonksiyonu (F1)	CT min.	✓	✓	✓	✓
2. Amaç Fonksiyonu (F2)	ER Sınıflarını Dengeleme	-	✓	✓	-
Bölge Kısıtlamaları	Pozitif	-	-	✓	✓
	Negatif	-	-	✓	✓
Dinlenme Süresi Kısıtı		-	✓	✓	✓
Ergonomik Risk Kısıtı	ER Maks. Limit	-	-	-	✓

Modellerin gösterimi aşağıdaki gibidir:

**Tablo 4.28.** İndisler ve kümeler.

İndis ve Kümeler	Açıklama	KMMHDP- 2	Ergo-KMMHDP- 2 (F2)	Ergo-KMMHDP-2 (Bölgeleme Kısıtı+F2)	Ergo-KMMHDP-2 (Bölgeleme Kısıtı + ER Limit)
$M=\{1, 2, \dots, m, \dots, M\}$	Tüm modellerden oluşan küme	✓	✓	✓	✓
$T=\{1, 2, \dots, t, \dots, T\}$	Tüm görevlerden oluşan küme	✓	✓	✓	✓
$S=\{1, 2, \dots, s, \dots, S\}$	Tüm istasyonlardan oluşan küme	✓	✓	✓	✓
$P_t=\{1, 2, \dots, T\}$	Görev t'nin tüm öncüllerinin kümesi	✓	✓	✓	✓
$PZC_t=\{1, 2, \dots, T\}$	Aynı istasyona atanması gereken bağlantılı görevlerin kümesi	-	-	✓	✓
$NZC_t=\{1, 2, \dots, T\}$	Aynı istasyona atanmaması gereken görevlerin kümesi	-	-	✓	✓

**Tablo 4.29.** Parametreler.

Parametre	Açıklama	KMMHDP-2	Ergo-KMMHDP-2 (F2)	Ergo-KMMHDP-2 (Bölgeleme Kısıt+F2)	Ergo-KMMHDP-2 (Bölgeleme Kısıtı + ER Limit)
$c_{t,m}$	m modeli için t görevinin işlem süresi	✓	✓	✓	✓
$\alpha_c, \alpha_y, \alpha_o, \alpha_d, \alpha_l$	Risk sınıflarının (Çok yüksek, yüksek, orta, düşük, ihmal edilebilir) amaç fonksiyonundaki önem oranları	-	-	✓	-
$\gamma_t$	Eğer t görevi Çok Yüksek riskli görev olarak sınıflandırılırsa 1; diğer durumlarda 0	-	-	✓	-
$\lambda_t$	Eğer t görevi Yüksek riskli görev olarak sınıflandırılırsa 1; diğer durumlarda 0	-	-	✓	-
$\rho_t$	Eğer t görevi Orta riskli görev olarak sınıflandırılırsa 1; diğer durumlarda 0	-	-	✓	-
$\delta_t$	Eğer t görevi Düşük riskli görev olarak sınıflandırılırsa 1; diğer durumlarda 0	-	-	✓	-
$\theta_t$	Eğer t görevi İhmal Edilebilir risk olarak sınıflandırılırsa 1; diğer durumlarda 0	-	-	✓	-
$\beta_t$	Görev t'nin Ergonomik Risk Değeri	-	-	✓	✓
r	Ergonomik riskin dinlenme süresine dönüşüm oranı	-	-	✓	✓
$ER_{max}$	Ergonomik risk puanı limiti	-	-	-	✓

**Tablo 4.30.** Karar değişkenleri.

Karar Değişkeni	Açıklama	KMMHDP-2	Ergo-KMMHDP-2 (F2)	Ergo-KMMHDP-2 (Bölgeleme Kısıtı + F2)	Ergo-KMMHDP-2 (Bölgeleme Kısıtı + ER Limit)
$x_{t,s} \in \{0,1\}$	Eğer t görevi s istasyonuna atanırsa 1; diğer durumlarda 0.	✓	✓	✓	✓
CT	Darboğaz istasyonun çevrim süresi	✓	✓	✓	✓

**Tablo 4.31.** Amaç fonksiyonu.

Amaç Fonksiyonu	KMMHDP-2	Ergo-KMMHDP-2 (F2)	Ergo-KMMHDP-2 (Bölgeleme Kısıtı + F2)	Ergo-KMMHDP-2 (Bölgeleme Kısıtı + ER Limit)	Denklem
Min $F_1 = CT$	✓	✓	✓	✓	(4.1)
Min $F_2 = \sum_{s=1}^S \left( \alpha_C \left  \sum_{t=1}^T x_{t,s} \sum_{t=1}^T \gamma_t x_{t,s} - \sum_{t=1}^T \gamma_t \right  + \alpha_Y \left  \sum_{t=1}^T x_{t,s} \sum_{t=1}^T \lambda_t x_{t,s} - \sum_{t=1}^T \lambda_t \right  + \alpha_0 \right.$					
$\left. \left  \sum_{t=1}^T x_{t,s} \sum_{t=1}^T \rho_t x_{t,s} - \sum_{t=1}^T \rho_t \right  + \alpha_D \left  \sum_{t=1}^T x_{t,s} \sum_{t=1}^T \delta_t x_{t,s} - \sum_{t=1}^T \delta_t \right  + \alpha_I \left  \sum_{t=1}^T x_{t,s} \sum_{t=1}^T \theta_t x_{t,s} - \sum_{t=1}^T \theta_t \right  \right)$		-	✓	✓	(4.2)

**Tablo 4.32. Kısıtlar.**

Kısıt	Küme	KMMHDP-2	Ergo-KMMHDP-2 (F2)	Ergo-KMMHDP-2 (Bölgeleme Kısıtı+F2)	Ergo-KMMHDP-2 (Bölgeleme Kısıtı + ER Limit)	Denklem
$\sum_{s=1}^S x_{t,s}=1$	$\forall t \in T$	✓	✓	✓	✓	(4.3)
$\sum_{t=1}^T C_{t,m}x_{t,s} \leq CT$	$\forall s \in S, m \in M$	✓	-	-	-	(4.4)
$\sum_{t=1}^T (C_{t,m} + \beta_{tr})(x_{t,s}) \leq CT$	$\forall s \in S, m \in M$	-	✓	✓	✓	(4.5)
$\sum_{s=1}^S (S-s+1)(x_{t,s} - x'_{t',s}) \geq 0$	$\forall t \in T, t' \in P_t$	✓	✓	✓	✓	(4.6)
$\sum_{t=1}^T x_{t,s} \geq 1$	$\forall s \in S$	✓	✓	✓	✓	(4.7)
$\sum_{t=1}^T x_{t,s}\beta_t \leq ER_{\max}$	$\forall s \in S$	-	-	-	✓	(4.8)
$x_{t,s} = x'_{t',s}$	$\forall t \in T, t' \in PZC_t, s \in S$	-	-	✓	✓	(4.9)
$x_{t,s} + x'_{t',s} \leq 1$	$\forall t \in T, t' \in NZC_t, s \in S$	-	-	✓	✓	(4.10)
$CT \geq 0$		✓	✓	✓	✓	(4.11)
$x_{t,s} \in \{0,1\}$	$\forall t \in T, s \in S$	✓	✓	✓	✓	(4.12)



Denklem 4.1 birinci amaç fonksiyonu olarak darboğaz istasyonun çevrim süresini en aza indirir. Denklem 4.2 ikinci amaç fonksiyonu olarak istasyonlar arasındaki her bir ergonomik risk sınıfındaki görevlerini dengeler. Denklem 4.3 görevlerin sadece bir istasyona atanmasını sağlar. Denklem 4.4 ve 4.5 istasyon sürelerinin çevrim süresini aşmamasını, başka bir deyişle çevrim süresinin maksimum istasyon süresine eşitlenmesini sağlar. Ayrıca denklem 4.5, ilgili ergonomik riske dayalı olarak her istasyon için bir dinlenme süresi belirleyerek ergonomi risk hedefi fonksiyonunu da destekler. Denklem 4.6 ile görevlerin öncelik ilişkileri sağlanmaktadır. Denklem 4.7 her iş istasyonuna en az bir görev atanmasını sağlamaktadır. Denklem 4.8, son model için herhangi bir istasyona atanan görevler için mümkün olan maksimum ergonomik risk puanını sınırlar. Denklem 4.9 bağlantılı görevlerin aynı istasyona atanmasını sağlar. Denklem 4.10 birlikte yapılması uygun olmayan görevlerin aynı istasyona atanmasını engeller. Denklem 4.11 ve 4.12 değişkenlerin pozitif ya da 0-1 tamsayı değerlerini almasını sağlar.

Önerilen modelin varsayımları şunlardır:

- Görev süresi, öncelik diyagramı, istasyon sayısı, ergonomik risk skorları deterministiktir ve önceden bilinir.
- Belirli bir montaj görevi, yalnızca tüm öncelik görevleri tamamlandıktan sonra başlatılabilir.
- Bir görev, iş istasyonları arasında bölünemez ve tam olarak bir iş istasyonuna atanmalıdır.
- Pozitif bölge kısıtlaması, görevlerin aynı iş istasyonuna atanması gerektiğini, negatif bölge kısıtlaması ise görevlerin farklı iş istasyonlarına atanması gerektiğini gösterir.
- Bir ürünün birden fazla modeli üretilmektedir.
- Operatörlerin seyahat süresi ve arıza vb. durumlardan kaynaklı duruşlar göz ardı edilmektedir.

#### **4.3.7. Performans göstergeleri**

Geliştirilen modeller için amaç fonksiyonlarına ilave olarak beş adet performans ölçütü tanımlanmıştır:

Hat Etkinliği (LE %): Verimli sürenin toplam süreye oranıdır.

$$LE(\%) = \frac{(\sum_s^S t_s)}{S \times CT} \times 100 \quad (4.13)$$

Düzensüzlük İndeksi (SI %): İş istasyonu sürelerinin düzensüzlüğünü gösterir.

$$SI(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{s=1}^S (t_{\max} - t_s)^2}}{S \times CT} \times 100 \quad (4.14)$$

Ergonomik Risk Performansı (IER %): Atamalara göre istasyonların ergonomik risk seviyelerindeki sapmaların bir ölçütüdür.

$$IER(\%) = \left( 1 - \frac{\sum_s^S |IER_{hedef} - IER_s|}{S \times IER_{hedef}} \right) \times 100 \quad (4.15)$$

Ergonomik Risk Düzensüzlük İndeksi (IER SI %): İstasyonların ergonomik risk seviyelerindeki dağılımının düzensüzlüğünü göstermektedir.

$$IER\ SI(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{s=1}^S (IER_{\max} - IER_s)^2}}{(S \times IER_{hedef})} \times 100 \quad (4.16)$$

$$IER_{hedef} = \left( \sum_{s=1}^S IER_s \right) / S \quad (4.17)$$

Ergonomik Risk Sınıfı Düzensüzlük İndeksi (IER Sınıf SI %): Her bir ergonomik risk sınıfına ait görevlerin istasyonlar arasındaki dağılımının düzensüzlüğünü göstermektedir.

$$IER\ Sınıf\ SI(\%) = \left( \sum_{j=1}^C \left( \frac{\sqrt{\sum_{s=1}^S (ERC_{\max_j} - ERC_{s_j})^2}}{(S \times ERC_{ort,j})} \right) \right) \times 100 / C \quad (4.18)$$

CT: Çevrim süresi

S: Toplam istasyon sayısı

C: Ergonomik risk sınıf sayısı

$t_s$ : s. iş istasyonunun süresi

$t_{\max}$ : En büyük istasyon süresi

$ERC_{js}$ : s. İstasyonun j. ergonomik risk sınıfındaki görev sayısı

$ERC_{max_j}$ : İş istasyonlarındaki j. ergonomik risk sınıfındaki maksimum görev sayısı

$ERC_{ort_j}$ : İstasyonlardaki j. ergonomik risk sınıfındaki ortalama görev sayısı

$IER_s$ : s. istasyonun bütünleşik ergonomik risk (IER) değeri

$IER_{max}$ : İş istasyonu IER değerlerinin en büyüğü

$IER_{hedef}$ : Montaj hattının IER hedefi

#### 4.3.8. Test problemleri ile sınıma

Modellerin test edilmesi için "<https://assembly-line-balancing.de/>" adresinde bulunan MHDP örnekleri temel alınarak toplam 16 test örneği tasarlanmıştır. Bilinmeyen parametreler Microsoft Excel ile rastgele üretilmiştir. Test problemlerini çalıştırmak için IBM ILOG CPLEX programının ücretsiz sürümü kullanılmıştır.

Parametreler ve çözüm sonuçları sırasıyla Tablo 4.33 ve Tablo 4.34'te gösterilmektedir. Tablo 4.34'te performans göstergelerine göre en iyi sonuçlar koyu renk ile belirtilmiştir. Tüm problemler için  $\alpha_C, \alpha_Y, \alpha_O, \alpha_D, \alpha_L, w_1$  parametreleri sırasıyla 0.4, 0.25, 0.2, 0.1, 0.05, 0.02 olarak belirlenmiştir. Çalışmayı sonlandırma kriteri, 500 saniye olan yürütme süresine dayanmaktadır.

Ayrıca ergonomik kısıtların dikkate alınmadığı KMMDP-2 modeli test sonuçlarına göre CT ve IER performansındaki değişim oranları Tablo 4.35'te gösterilmektedir. Bu sonuçlar çevrim süresinde bir artış olmadan veya çok az bir artış ile ergonomik risklerin dengelenebileceğini göstermektedir. Örneğin, Test 3 için ergonomik amaç fonksiyonu ve bölgeleme kısıtlarının dâhil edildiği Ergo-KMMHDP-2'ye göre çevrim süresinde artış olmadan IER performansında %18 iyileşme sağlanmaktadır. Bölgeleme kısıtları ve ER Limiti kısıtının dâhil edildiği modelde çevrim süresinde 6 saniyelik artış ile IER performansında %28 iyileşme olduğu gözükmektedir. İyileşme oranları problemin özelliklerine ve parametrelere göre değişmekle birlikte Tablo 4.33'te verilen 20 adet test için IER iyileşme oranları sırasıyla ortalama %8, %8 ve %22.4'tür.

Çalışan yorgunluğunu azaltmak için model, her döngü süresine bir dinlenme periyodunun dâhil edilmesine izin veren bir 'r' parametresi içerir. 'r' sıfırdan büyükse çevrim süresi, istasyonun toplam ergonomik risk değerine göre bir dinlenme süresi eklenerek hesaplanır. 'r' sıfıra eşitse çevrim süresine dinlenme süresi eklenmez. 'r'

parametresini değerlendirmek için aynı problem hem sıfıra hem de bire eşit olan 'r' için test edilmiştir. Örneğin, Tablo 4.34'te Test 1,  $r = 0$  için P1 probleminin sonuçlarını gösterirken, Test 2,  $r = 1$  için P1'in sonuçlarını göstermektedir. İkinci amaç fonksiyonu dâhil edilen modelin sonuçları incelendiğinde, Test 1 için döngü süresi 940 saniye, Test 2 için ise 957 saniyedir ( $r = 1$ ). Bu, her istasyona 17 saniye dinlenme süresi eklendiğini göstermektedir. Ayrıca, dinlenme süresinin eklenmesiyle IER performansının %85'ten %88'e çıktığı görülmektedir. Ancak pratik uygulamalarda çevrim süresini artırmak her zaman mümkün değildir. Denklem 4.5, döngü süresine dinlenme süresi ekleme veya eklememe seçeneğine izin vermektedir.

**Tablo 4.33.** Test problemi parametreleri.

Test No.	Problem No.	Model Sayısı	Görev Sayısı	İstasyon Sayısı	r	ER
1	P1	4	50	6	0	16
2	P1	4	50	6	1	16
3	P2	5	50	8	0	12
4	P2	5	50	8	1	12
5	P3	6	50	9	0	11
6	P3	6	50	9	1	11
7	P4	7	50	31	0	5
8	P5	8	50	8	0	12
9	P6	4	50	10	0	10
10	P7	5	50	12	0	8
11	P8	6	50	11	0	10
12	P9	7	50	7	0	14
13	P10	4	100	23	0	8
14	P11	5	100	15	0	12
15	P11	5	100	15	1	12
16	P12	6	100	14	0	15
17	P13	7	100	23	0	9
18	P14	5	100	15	0	14
19	P15	6	100	22	0	10
20	P16	8	100	13	0	15

**Tablo 4.34. Test sonuçları.**

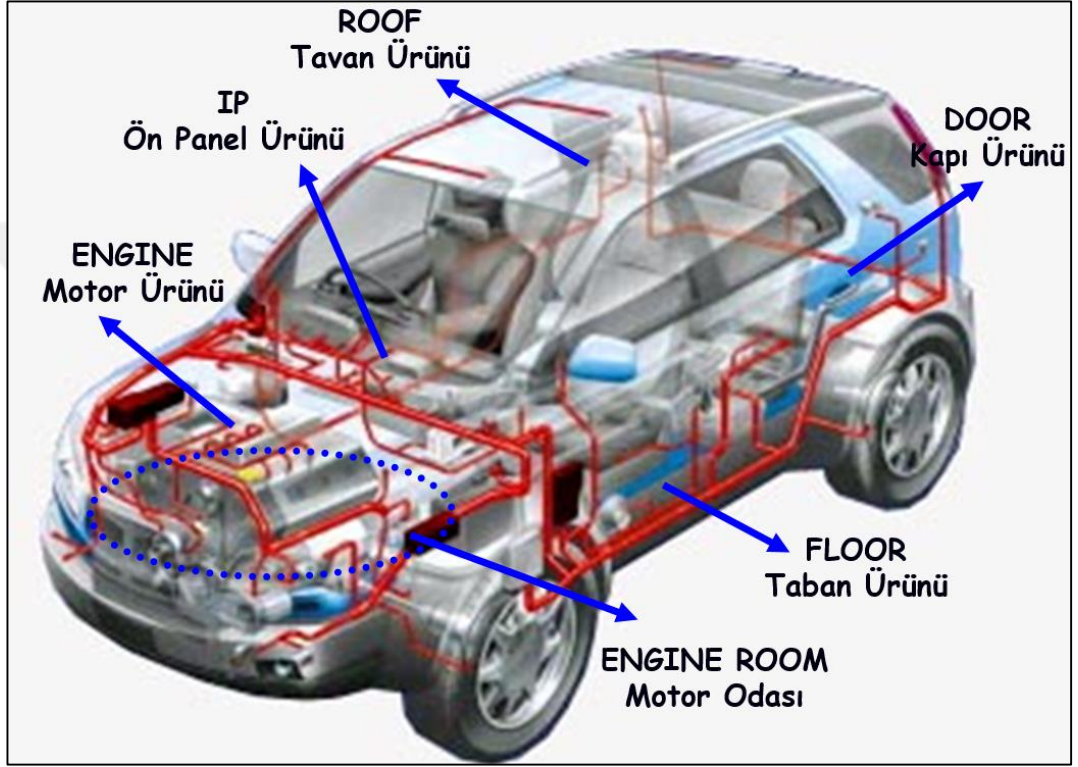
Test	KMMHDP-2						Ergo-KMMHDP-2 ( F2)						Ergo-KMMHDP-2 (Bölgeleme Kısıtlı+F2)						Ergo-KMMHDP-2 (Bölgeleme Kısıtlı+ ER Limit)						
No	CT	LE %	SI%	IER %	IER SI%	IER Sınıf SI%	CT	F2	LE %	SI%	IER %	IER SI%	IER Sınıf SI%	CT	LE %	SI%	IER %	IER SI%	IER Sınıf SI%	CT	LE %	SI%	IER %	IER SI%	IER Sınıf SI%
1	<b>940</b>	<b>99.2%</b>	0.71%	83%	13%	41%	<b>940</b>	28.5	<b>99.2%</b>	0.75%	85%	13%	46%	<b>940</b>	<b>99.2%</b>	0.72%	88%	8%	41%	946	98.6%	0.87%	<b>99.4%</b>	<b>0.29%</b>	<b>30%</b>
2	<b>940</b>	<b>99.2%</b>	0.71%	83%	13%	41%	957	19.5	99.1%	0.67%	88%	12%	24%	957	99.1%	<b>0.65%</b>	89%	8%	<b>24%</b>	962	98.6%	0.89%	<b>99.4%</b>	<b>0.31%</b>	30%
3	<b>854</b>	<b>99.1%</b>	0.38%	77%	15%	44%	<b>854</b>	32.9	<b>99.1%</b>	0.42%	91%	6%	25%	<b>854</b>	<b>99.1%</b>	<b>0.34%</b>	90%	11%	39%	862	98.2%	0.81%	<b>98.8%</b>	<b>0.43%</b>	31%
4	<b>854</b>	99.1%	0.38%	77%	15%	44%	867	25.6	99.0%	0.47%	95%	5%	23%	866	<b>99.2%</b>	<b>0.29%</b>	77%	13%	37%	874	98.2%	0.67%	<b>98.8%</b>	<b>0.44%</b>	41%
5	914	97.9%	0.73%	77%	15%	50%	914	41.8	97.9%	0.82%	<b>91%</b>	<b>6%</b>	48%	<b>911</b>	<b>98.3%</b>	0.81%	75%	19%	59%	915	97.8%	0.81%	83.8%	12.40%	49%
6	<b>914</b>	<b>97.9%</b>	0.73%	77%	15%	50%	924	38.4	97.7%	0.92%	84%	18%	47%	925	97.9%	0.89%	81%	14%	45%	925	97.8%	0.96%	<b>87.8%</b>	<b>7.79%</b>	42%
7	<b>970</b>	<b>81.3%</b>	4.11%	63%	19%	25%	<b>970</b>	25.8	<b>81.3%</b>	4.10%	62%	26%	25%	<b>970</b>	<b>81.3%</b>	4.07%	<b>67%</b>	<b>15%</b>	<b>21%</b>	-	-	-	-	-	-
8	<b>848</b>	<b>98.1%</b>	0.78%	75%	23%	35%	<b>848</b>	43.9	<b>98.1%</b>	0.79%	77%	21%	35%	849	<b>98.1%</b>	<b>0.75%</b>	79%	14%	38%	860	96.7%	1.28%	<b>92.2%</b>	<b>3.75%</b>	45%
9	<b>1030</b>	<b>92.0%</b>	3.30%	59%	34%	49%	<b>1030</b>	64.6	<b>92.0%</b>	4.06%	69%	25%	41%	1032	91.8%	3.73%	66%	25%	<b>41%</b>	-	-	-	-	-	-
10	<b>947</b>	<b>115.5%</b>	1.54%	68%	18%	48%	<b>947</b>	81.7	<b>115.5%</b>	<b>1.41%</b>	<b>68%</b>	<b>18%</b>	47%	999	109.5%	5.05%	63%	21%	<b>40%</b>	-	-	-	-	-	-
11	<b>983</b>	<b>93.7%</b>	1.97%	73%	15%	43%	<b>983</b>	55.8	<b>93.7%</b>	<b>1.94%</b>	78%	14%	36%	<b>983</b>	<b>93.7%</b>	1.95%	79%	14%	36%	1149	80.1%	9.31%	<b>93.1%</b>	<b>3.06%</b>	<b>36%</b>
12	<b>896</b>	<b>94.5%</b>	2.20%	87%	10%	31%	<b>896</b>	26.1	<b>94.5%</b>	2.31%	87%	10%	31%	<b>896</b>	<b>94.5%</b>	2.31%	87%	10%	<b>31%</b>	1015	83.4%	8.72%	<b>93.5%</b>	<b>2.82%</b>	35%
13	<b>1008</b>	<b>98.1%</b>	0.51%	68%	16%	33%	1014	227	97.6%	0.55%	77%	12%	19%	1013	97.7%	0.58%	77%	12%	23%	1032	95.9%	1.22%	<b>97.8%</b>	<b>0.57%</b>	33%
14	<b>944</b>	<b>98.4%</b>	0.52%	81%	11%	30%	<b>944</b>	99.5	<b>98.4%</b>	0.52%	86%	9%	11%	945	98.3%	0.55%	87%	7%	13%	947	98.1%	0.53%	<b>96.3%</b>	<b>1.57%</b>	34%
15	<b>944</b>	98.4%	0.52%	81%	11%	30%	955	98.7	<b>98.5%</b>	<b>0.49%</b>	82%	10%	17%	961	97.9%	0.60%	85%	8%	<b>15%</b>	966	97.3%	0.80%	<b>96.3%</b>	<b>1.24%</b>	30%
16	<b>967</b>	<b>98.7%</b>	0.45%	80%	16%	25%	968	85	98.6%	<b>0.43%</b>	91%	8%	10%	969	98.5%	0.49%	85%	9%	13%	972	98.2%	0.58%	<b>97.7%</b>	<b>0.77%</b>	27%
17	<b>1028</b>	<b>96.9%</b>	0.76%	72%	25%	44%	1031	195	96.6%	0.79%	76%	15%	26%	1032	96.5%	0.78%	78%	12%	<b>23%</b>	1062	93.8%	1.76%	<b>95.1%</b>	<b>1.33%</b>	39%
18	<b>1017</b>	<b>97.0%</b>	0.94%	76%	14%	36%	1019	140	96.8%	0.96%	76%	17%	33%	1028	96.0%	1.44%	79%	<b>11%</b>	30%	1028	96.0%	1.24%	<b>81.4%</b>	11.48%	<b>28%</b>
19	<b>1019</b>	<b>95.1%</b>	1.23%	74%	18%	44%	1025	365	<b>95.1%</b>	1.24%	75%	12%	40%	<b>1019</b>	<b>95.1%</b>	<b>1.19%</b>	77%	11%	40%	1106	87.6%	3.22%	<b>90.8%</b>	<b>3.07%</b>	<b>36%</b>
20	<b>998</b>	<b>98.3%</b>	0.59%	73%	18%	40%	999	84.5	98.2%	<b>0.58%</b>	83%	16%	25%	1000	98.1%	0.64%	84%	12%	<b>18%</b>	1050	93.4%	2.41%	<b>98.7%</b>	<b>0.51%</b>	32%

**Tablo 4.35. CT ve IER performansı değişim oranları.**

Test No	CT Değişim Oranı			IER Performansı Değişim Oranı		
	Ergo-KMMHDP-2 ( F2)	Ergo-KMMHDP-2 (Bölgeleme Kısıtlı + F2)	Ergo-KMMHDP-2 (Bölgeleme Kısıtlı + ER Limit)	Ergo-KMMHDP-2 ( F2)	Ergo-KMMHDP-2 (Bölgeleme Kısıtlı + F2)	Ergo-KMMHDP-2 (Bölgeleme Kısıtlı + ER Limit)
1	0.0%	0.0%	-0.6%	3%	3%	20%
2	-1.8%	-1.8%	-2.3%	6%	6%	20%
3	0.0%	0.0%	-0.9%	18%	18%	28%
4	-1.5%	-1.4%	-2.3%	23%	23%	28%
5	0.0%	0.3%	-0.1%	18%	18%	9%
6	-1.1%	-1.2%	-1.2%	10%	10%	14%
7	0.0%	0.0%	-	-1%	-1%	-
8	0.0%	-0.1%	-1.4%	3%	3%	23%
9	0.0%	-0.2%	-	18%	18%	-
10	0.0%	-5.5%	-	0%	0%	-
11	0.0%	0.0%	-16.9%	7%	7%	28%
12	0.0%	0.0%	-13.3%	0%	0%	7%
13	-0.6%	-0.5%	-2.4%	13%	13%	44%
14	0.0%	-0.1%	-0.3%	6%	6%	19%
15	-1.2%	-1.8%	-2.3%	2%	2%	19%
16	-0.1%	-0.2%	-0.5%	14%	14%	23%
17	-0.3%	-0.4%	-3.3%	6%	6%	33%
18	-0.2%	-1.1%	-1.1%	0%	0%	6%
19	-0.6%	0.0%	-8.5%	2%	2%	23%
20	-0.1%	-0.2%	-5.2%	13%	13%	35%
Ortalama	-0.4%	-0.7%	-3.7%	8.0%	8.0%	22.4%

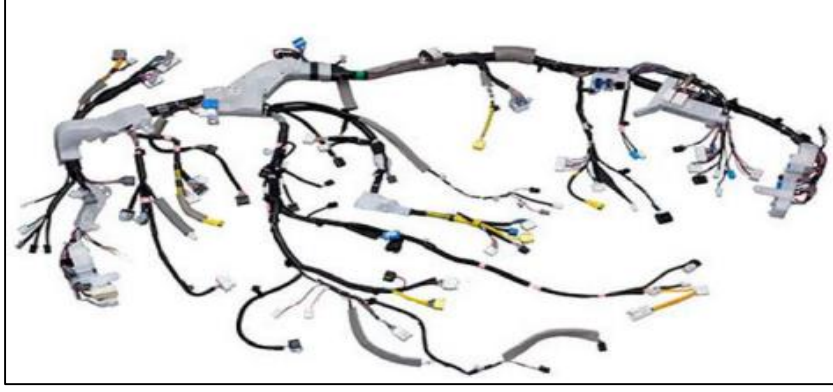
## 5. UYGULAMA

Geliştirilen sistematik yaklaşım, kablo donanımı üreten bir fabrikanın montaj hattında uygulanmıştır. Şekil 5.1, bir otomobilin kablo ağ sistemini göstermektedir.



Şekil 5.1. Örnek kablo ağ sistemi.

Otomotiv kablo donanımı, bir otomobilin elektriksel sistemlerinin çalışması için gereken kablo, konektör, sensör, anahtar ve ışık gibi bileşenlerin tamamını içeren bir settir. Bu donanım, aracın motoru, şarj sistemi, başlatma sistemi, aydınlatma sistemi ve araç içi elektronik sistemleri gibi birçok çeşitli sistem için gerekli elektrik bağlantılarını sağlamaktadır. Örnek otomobil kablo ağ sistemi Şekil 5.2'de gösterilmektedir.



**Şekil 5.2.** Örnek kablo donanımı [84].

Yeni ürün, yeni proje, ürün tasarımı ve/veya müşteri talep değişiklikleri ile yeni montaj hattı tasarlama veya mevcut montaj hattı tasarımını revize etme ihtiyacı ortaya çıkmaktadır. Çeşitli modellere ve değişken talebe sahip olan montaj hattında iş önceliği alternatifleri ve kalite beklentileri dikkate alınarak verimlilik hedefinin sağlanması için istasyonlara iş ataması yapılmaktadır. Başlangıçta bu süreç, uygulama yapılan işletmede mühendisler tarafından herhangi bir optimizasyon yazılımı kullanılmadan yapılmaktadır.

Öncelikle ürün teknik çizimleri, malzeme özellikleri ve ürün süreç bilgileri vb. dosyalar ile ön montaj hattı veya ana montaj hattında yapılması gereken görevler belirlenmektedir. Ayrıca istenilen üretim hacmine ulaşabilmek için operatör sayısı ve çevrim süreleri hesaplanmaktadır. Belirlenen operatör sayısı ve çevrim süresine göre istasyonlara görevler atanmaktadır. Teorik olarak belirlenen dağılım deneme üretimi aşamalarında uygulanmakta ve bu aşamada çeşitli dağılım iyileştirmeleri yapılmaktadır. Problemlerle ilgili tüm kısıtlamalar ve hedefler göz önüne alındığında, problemin karmaşıklığından dolayı optimum bir çözüm bulmak zordur. Bu nedenle, seri üretim aşamasında da mevcut süre analizleri belirli aralıklarda yapılmakta ve ihtiyaç durumunda dağılım güncellenmektedir.

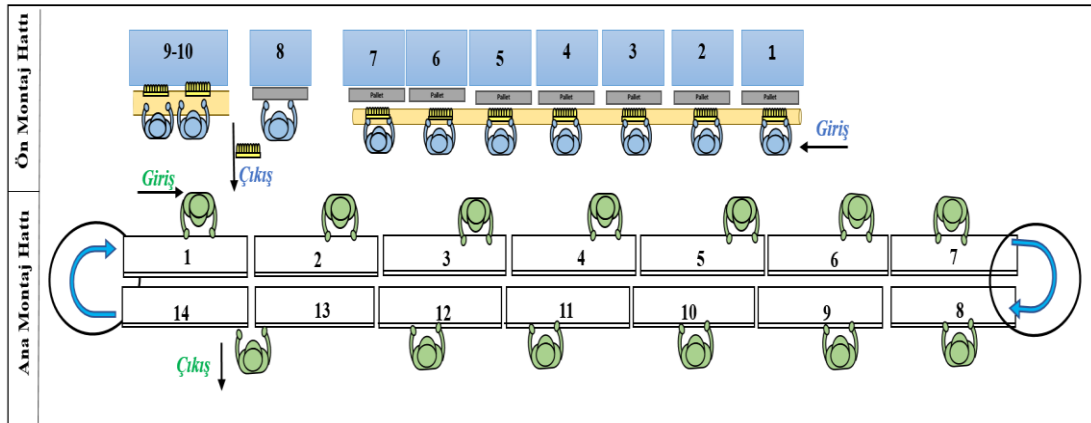
Ayrıca, uzun çalışma saatleri boyunca aynı duruşta ve tekrarlayan görevlerde çalışan montaj operatörleri, özellikle el ve bileklerinde KİSR yaşamaktadır. Mevcut durumda montaj hattı dengeleme çalışması aşamasında ergonomik risk faktörleri dikkate alınmamaktadır. Ancak, dağılım sonrasında operatörlerin fiziksel özelliklerine (boy, cinsiyet, yaş vb.) göre operatör ataması yapılarak ergonomik riskler azaltılmaya çalışılmaktadır. Operatör fiziksel özelliklerine göre atama yapılması ergonomik risklerin azaltılması veya dengelenmesi için yeterli değildir. Bu konuların ışığında,



firmanın ergonomik montaj hattı dengelemesi için bir çözüm yöntemine ihtiyaç duyduğu açıkça görülmektedir.

Uygulama yapılan montaj hattı Şekil 5.3'te gösterilmiştir. Montaj hattı, ana montaj hattını ve ön montaj hattını içermektedir. Ön montaj hattı, ana montaj hattını besleyen düz bir montaj hattıdır. Bu hatta, ön montaj setleri üretilir ve daha sonra nihai ürünü oluşturmak için ana montaj hattına aktarılır.

Günlük üretim miktarı 240 adet ve çevrim süresi 107 saniyedir. Mevcut durumda hat bir vardiya çalışmaktadır. Ön montaj hattında 10 operatör ve ana montaj hattında 2 kablo serim operatörü ve 11 bantlama operatörü olmak üzere 23 operatör mevcuttur. Ön montaj hattında 136 ve ana montaj hattında 107 görev bulunmaktadır. Ön montaj 1. ve 7. istasyonları arasında düz konveyör sistemi bulunurken, 8., 9. ve 10. istasyonlarda konveyör sistemi bulunmamaktadır. Ana montaj hattında ise 14 adet montaj masası mevcuttur ve hat dairesel konveyör sistemine sahiptir. Ön montaj istasyonlarında ürünün tüm terminal takma işlemleri ve özel bir bantlama işlemi yapılmaktadır. Ön montaj istasyonlarında işlemi tamamlanan setler SAO (Ön montaj setlerinin taşınması için tasarlanan ekipman) ile montaj hattına yerleştirilmektedir. Ana montaj hattında ise ilk iki istasyonda ön montaj istasyonlarında tamamlanan setlerin montaj masasına serimi yapılmaktadır. Sonraki istasyonlarda bantlama, klips takma, hortum takma vb. işlemler tamamlanarak ürün montaj masasından kaldırılmakta ve mandal test ürün askısına asılmaktadır. Bu aşamadan sonra sırasıyla mandal kontrol, elektrik kontrol ve görsel kontrol işlemleri yapılarak ürün paketlenmektedir. Montaj hattının dengelenmesi, i) ana montaj hattı dengelemesi ve ii) ön montaj hattı dengelemesi olmak üzere iki alt problemden oluşmaktadır.



Şekil 5.3. Montaj hattı konsepti.

Probleme ilişkin verilerin toplanması ve ergonomik risk analizi sırasıyla 5.1 ve 5.2’de açıklanmıştır. Veri toplama ve ergonomik risk analizi aşamalarından sonra 4.3.6’da verilen matematiksel modeller çalıştırılmıştır. Elde edilen bulgular 5.3’te açıklanmıştır.

### 5.1. Verilerin Toplanması

Çalışmada öncelikle mevcut işlem adımları ve süreler incelenmiştir. İşlem adımları ve süreler Tablo 5.1 ve Tablo 5.2’de verilmiştir. Mevcut işlem adımlarına göre görevler arasındaki öncelik ilişkileri analiz edilerek öncelik diyagramları oluşturulmuştur. Öncelik diyagramları ön montaj hattı ve ana montaj hattı için sırasıyla EK G ve EK H’de verilmiştir.

Uygulama yapılan montaj hattında çeşitli pozitif ve negatif bölgeleme kısıtları bulunmaktadır. Pozitif bölge kısıtlaması, iki görevin aynı iş istasyonunda atanmasını gerektirirken, negatif bölge kısıtlamasında iki görevin farklı iş istasyonlarına atanması gerekmektedir. Ayrıca bazı durumlarda belirli bir görevin belirli bir iş istasyonuna atanması gerekmektedir. Pozitif ve negatif bölge kısıtlamaları Tablo 5.3’te verilmiştir.

**Tablo 5.1.** Ön montaj hattı işlem süreleri.

Görev No.	Model A	Model B	Görev No.	Model A	Model B
1	2.74	2.74	68	3.1	3.1
2	5.54	5.54	69	4.54	4.54
3	2.1	2.1	70	5.81	5.81
4	1.94	1.94	71	8.9	8.9
5	2	2	72	18	18
6	2	2	73	23.96	23.96
7	18.2	18.2	74	2	2
8	7.09	7.09	75	15.8	15.8
9	7.95	7.95	76	2.1	2.1
10	18.23	18.23	77	2.14	2.14
11	17.21	17.21	78	25	25
12	15.18	15.18	79	3.11	3.11
13	2.2	2.2	80	1.9	0
14	2.74	2.74	81	9.76	9.76
15	2.51	2.51	82	1.24	0
16	2.24	2.24	83	19.11	0
17	5.94	5.94	84	20.13	0
18	7.97	7.97	85	4	0
19	6.24	6.24	86	4	0
20	6.5	6.5	87	0	1.24
21	6.2	6.2	88	0	19.11
22	5.4	5.4	89	0	20.13

**Tablo 5.1. (Devamı) Ön montaj hattı işlem süreleri.**

Görev No.	Model A	Model B	Görev No.	Model A	Model B
23	5.91	5.91	90	0	4
24	6.17	6.17	91	0	4
25	12.41	12.41	92	2.81	2.81
26	6.28	6.28	93	12.93	12.93
27	7.77	7.77	94	5.05	5.05
28	5.04	5.04	95	13.6	13.6
29	4.27	4.27	96	7.22	7.22
30	4.6	4.6	97	4.14	0
31	7	7	98	4.28	0
32	2.41	2.41	99	2.61	0
33	2.8	2.8	100	2.54	0
34	2.57	2.57	101	6.82	0
35	3.24	3.24	102	16.38	0
36	3.81	3.81	103	6.82	0
37	22.25	22.25	104	16.38	0
38	12.59	12.59	105	3.1	0
39	20.62	20.62	106	2.94	0
40	22.02	22.02	107	0	6.54
41	3.55	3.55	108	0	16.45
42	2.14	2.14	109	0	6.54
43	2	2	110	0	17.1
44	2	0	111	0	3.1
45	2	2	112	0	2.94
46	2	2	113	3.07	3.07
47	24.26	24.26	114	6	6
48	19.09	0	115	30	30
49	17.05	17.05	116	2.81	2.81
50	16.48	16.48	117	20	20
51	2.8	2.8	118	5.9	5.9
52	2.4	2.4	119	22	22
53	3.6	0	120	30	30
54	3.01	3.01	121	5.2	5.2
55	2.9	2.9	122	4	4
56	4	4	123	8.01	8.01
57	4	4	124	15	15
58	7.88	7.88	125	4.72	4.72
59	25.79	25.79	126	4.47	4.47
60	19.08	19.08	127	16.34	16.34
61	21.68	21.68	128	6.65	6.65
62	2.5	2.5	129	9.19	9.19
63	2.62	2.62	130	7.95	7.95
64	3	3	131	4.27	4.27
65	3	3	132	7.22	7.22
66	3.81	3.81	133	2.1	2.1
67	5.24	5.24	134	11.9	11.9
135	13.42	13.42	135	13.42	13.42
136	2.4	2.4	136	2.4	2.4

**Tablo 5.2.** Ana montaj hattı işlem süreleri.

Görev No.	Model A	Model B	Görev No.	Model A	Model B
1	5	5	55	22.42	22.42
2	8	8	56	15.22	15.22
3	9	9	57	16.85	16.85
4	13	13	58	27	27
5	10	10	59	26	26
6	9	9	60	9.28	9.28
7	17	17	61	21	21
8	9	9	62	23	23
9	15	15	63	14.78	14.78
10	6	6	64	15.05	15.05
11	4	4	65	9.34	9.34
12	20	20	66	10.54	10.54
13	12	12	67	11.84	11.84
14	7	7	68	16.92	16.92
15	6	6	69	24.62	24.62
16	4	4	70	18.32	18.32
17	6	6	71	17.56	17.56
18	8	8	72	6.38	6.38
19	12	12	73	42.53	42.53
20	8	8	74	22.1	22.1
21	12	12	75	22.56	22.56
22	8	8	76	30.29	30.29
23	3	3	77	22	22
24	6.95	6.95	78	28.11	28.11
25	7.58	7.58	79	4.79	4.79
26	7.38	7.38	80	12	12
27	12.93	12.93	81	9.9	9.9
28	14.8	14.8	82	10.91	10.91
29	19.61	19.61	83	4.54	4.54
30	7.05	7.05	84	4.19	4.19
31	18.11	18.11	85	10.61	10.61
32	10.27	10.27	86	3.87	3.87
33	22.54	22.54	87	5.48	5.48
34	30.48	30.48	88	5.21	5.21
35	32	32	89	22	22
36	5.57	5.57	90	4.65	4.65
37	4.36	4.36	91	3.08	3.08
38	12.22	12.22	92	4.18	4.18
39	12.72	12.72	93	4.11	4.11
40	13.79	13.79	94	8	8
41	12.67	12.67	95	11.3	11.3
42	8.65	0	96	7.22	7.22
43	17.87	17.87	97	6	6
44	11.6	11.6	98	4.2	4.2
45	11.59	11.59	99	10	10
46	21	21	100	11.36	11.36
47	15.22	15.22	101	4.31	4.31
48	12	12	102	5.08	5.08

**Tablo 5.2. (Devamı) Ana montaj hattı işlem süreleri.**

Görev No.	Model A	Model B	Görev No.	Model A	Model B
49	16	16	103	5.65	5.65
50	13	13	104	3	3
51	25	25	105	13	13
52	15.22	15.22	106	3	3
53	15.32	15.32	107	4	4
54	18.42	18.42			

**Tablo 5.3. Bölge kısıtlamaları.**

Ön Montaj Hattı Bölge Kısıtlamaları		Ana Montaj Hattı Bölge Kısıtlamaları		
Pozitif	Negatif	Pozitif	Negatif	Negatif
<7,8>	<2,135>	<25,26>	<25,33>	<30,46>
<8,9>		<71,72>	<33,38>	<31,47>
<9,10>		<102,103>	<46,52>	<32,48>
<70,71>		<104,106>	<52,58>	<25,59>
<71,72>		<107,107>	<58,63>	<26,60>
<72,73>		<22,23>	<79,99>	<27,61>
<73,74>		<25,26>	<24,33>	<28,62>
<78,117>		<71,72>	<24,46>	<29,58>
<80,81>		<102,103>	<24,47>	<30,59>
<82,83>		<104,106>	<24,48>	<31,60>
<83,84>		<107,107>	<24,58>	<32,61>
<84,85>		<22,23>	<25,49>	<53,59>
<85,86>			<26,50>	<54,60>
<87,88>			<25,34>	<55,61>
<88,89>			<26,35>	<56,62>
<89,90>			<27,36>	<57,58>
<90,91>			<28,37>	<52,59>
<92,93>			<29,33>	<53,60>
<93,94>			<30,34>	<54,61>
<94,95>			<31,35>	<25,47>
<113,114>			<32,36>	<26,48>
<114,115>			<32,37>	<27,49>
<123,124>			<33,52>	<28,50>
<125,126>			<34,53>	<29,51>
<126,127>			<35,54>	<51,57>
<127,128>			<36,55>	
<128,129>			<37,56>	
<129,130>			<35,57>	
<130,131>			<47,53>	
<131,132>			<48,54>	
<132,133>			<49,55>	
<133,134>			<50,56>	
<134,135>				

## 5.2. Ergonomik Risk Analizi

Bu çalışmada REBA, QEC, OCRA ve COPSOQ yöntemlerine göre ergonomik risk seviyeleri belirlenmiştir.

REBA ve OCRA risk skorları video kayıtları ve gözlemler doğrultusunda hesaplanmıştır. QEC risk skoru ise hem çalışanın değerlendirmesi hem de gözlemcinin değerlendirmesi ile belirlenmiştir. COPSOQ ise çalışanın değerlendirme sorularına yanıtlarına göre hesaplanmıştır. Bu yöntemlere göre hesaplanan risk skorları bütünleşik ergonomik risk değerlendirme bulanık mantık modeline girilerek her bir görev için IER değerleri hesaplanmıştır. Görevlerin IER değerleri Tablo 5.4 ve Tablo 5.5'te verilmiştir.

**Tablo 5.4.** Ön montaj hattı ergonomik risk analizi.

Görev No.	REBA	OCRA	QEC	COPSOQ	IER	IER Seviyesi	Risk
1	2.0	18.7	56.8	52.00	2.02	Orta	
2	6.0	18.7	60.2	52.00	2.38	Orta	
3	2.0	10.2	61.3	52.00	1.83	Orta	
4	2.0	10.2	61.3	52.00	1.83	Orta	
5	2.0	10.2	61.3	52.00	1.83	Orta	
6	2.0	10.2	61.3	52.00	1.83	Orta	
7	7.0	20.4	67.04	52.00	2.84	Yüksek	
8	5.0	20.4	67.04	52.00	2.84	Yüksek	
9	5.0	22.1	67.04	52.00	2.83	Yüksek	
10	5.0	22.1	67.04	52.00	2.83	Yüksek	
11	5.0	22.1	67.04	52.00	2.83	Yüksek	
12	6.0	22.1	67.04	52.00	2.83	Yüksek	
13	5.0	10.2	64.2	46.00	2.01	Orta	
14	5.0	10.2	64.2	46.00	2.01	Orta	
15	5.0	10.2	64.2	46.00	2.01	Orta	
16	5.0	10.2	64.2	46.00	2.01	Orta	
17	6.0	20.4	69.88	46.00	2.15	Orta	
18	6.0	20.4	69.88	46.00	2.15	Orta	
19	6.0	20.4	69.88	46.00	2.15	Orta	
20	6.0	20.4	69.88	46.00	2.15	Orta	
21	6.0	20.4	69.88	46.00	2.15	Orta	
22	6.0	20.4	69.88	46.00	2.15	Orta	
23	6.0	20.4	69.88	46.00	2.15	Orta	
24	6.0	20.4	69.88	46.00	2.15	Orta	
25	7.0	20.4	69.88	46.00	2.15	Orta	
26	7.0	20.4	69.88	46.00	2.15	Orta	
27	7.0	20.4	69.88	46.00	2.15	Orta	
28	4.0	6.8	57.38	46.00	1.19	Düşük	
29	4.0	9.35	58.52	46.00	1.19	Düşük	
30	4.0	9.35	58.52	46.00	1.19	Düşük	
31	4.0	9.35	55.1	50.00	1.51	Düşük	
32	2.0	10.2	64.2	50.00	1.51	Düşük	
33	2.0	10.2	64.2	50.00	1.51	Düşük	
34	2.0	10.2	64.2	50.00	1.51	Düşük	
35	2.0	10.2	64.2	50.00	1.51	Düşük	
36	2.0	10.2	64.2	50.00	1.51	Düşük	

**Tablo 5.4. (Devamı) Ön montaj hattı ergonomik risk analizi.**

Görev No.	REBA	OCRA	QEC	COPSOQ	IER	IER Seviyesi	Risk
37	7.0	20.4	69.88	50.00	2.33	Orta	
38	7.0	20.4	69.88	50.00	2.33	Orta	
39	7.0	20.4	69.88	50.00	2.33	Orta	
40	7.0	20.4	69.88	50.00	2.33	Orta	
41	4.0	6.8	55.11	50.00	1.20	Düşük	
42	4.0	6.8	55.11	50.00	1.20	Düşük	
43	6.0	10.2	64.2	44.00	2.01	Orta	
44	6.0	10.2	64.2	44.00	2.01	Orta	
45	6.0	10.2	64.2	44.00	2.01	Orta	
46	6.0	10.2	64.2	44.00	2.01	Orta	
47	7.0	20.4	69.88	44.00	2.15	Orta	
48	7.0	20.4	69.88	44.00	2.15	Orta	
49	7.0	20.4	69.88	44.00	2.15	Orta	
50	7.0	20.4	69.88	44.00	2.15	Orta	
51	4.0	9.35	60.79	44.00	1.71	Orta	
52	8.0	9.35	60.79	44.00	2.02	Orta	
53	4.0	6.8	60.79	44.00	1.20	Düşük	
54	6.0	10.2	64.2	47.00	2.01	Orta	
55	6.0	10.2	64.2	47.00	2.01	Orta	
56	6.0	10.2	64.2	47.00	2.01	Orta	
57	6.0	10.2	64.2	47.00	2.01	Orta	
58	7.0	20.4	69.88	47.00	2.15	Orta	
59	7.0	20.4	69.88	47.00	2.15	Orta	
60	7.0	20.4	69.88	47.00	2.15	Orta	
61	7.0	20.4	69.88	47.00	2.15	Orta	
62	4.0	6.8	65.34	47.00	1.19	Düşük	
63	4.0	6.8	65.34	47.00	1.19	Düşük	
64	6.0	10.2	64.2	45.00	2.01	Orta	
65	6.0	10.2	64.2	45.00	2.01	Orta	
66	7.0	20.4	67.61	45.00	2.08	Orta	
67	7.0	20.4	67.61	45.00	2.08	Orta	
68	7.0	20.4	67.61	45.00	2.08	Orta	
69	7.0	20.4	67.61	45.00	2.08	Orta	
70	9.0	18.7	65.34	45.00	2.85	Yüksek	
71	7.0	22.1	67.61	45.00	2.38	Orta	
72	9.0	17	69.88	45.00	2.84	Yüksek	
73	7.0	20.4	65.34	45.00	2.08	Orta	
74	4.0	6.8	55.11	45.00	1.19	Düşük	
75	7.0	20.4	65.34	45.00	2.08	Orta	
76	4.0	6.8	55.11	45.00	1.19	Düşük	
77	4.0	6.8	55.11	45.00	1.19	Düşük	
78	7.0	20.4	67.61	44.00	2.08	Orta	
79	4.0	10.2	59.1	48.00	1.37	Düşük	
80	4.0	6.8	56.8	48.00	1.19	Düşük	
81	4.0	13.6	64.7	48.00	2.02	Orta	
82	4.0	6.8	56.8	48.00	1.19	Düşük	
83	4.0	17	64.7	48.00	2.02	Orta	
84	4.0	17	64.7	48.00	2.02	Orta	
85	4.0	17	59	48.00	2.02	Orta	
86	4.0	17	59	48.00	2.02	Orta	
87	4.0	6.8	56.8	48.00	1.19	Düşük	
88	4.0	17	64.7	48.00	2.02	Orta	
89	4.0	17	64.7	48.00	2.02	Orta	
90	4.0	17	59	48.00	2.02	Orta	
91	4.0	17	59	48.00	2.02	Orta	
92	4.0	10.2	53.4	48.00	1.35	Düşük	
93	8.0	18.7	65.9	48.00	2.84	Yüksek	
94	6.0	11.475	59	48.00	1.69	Orta	
95	6.0	11.9	59	48.00	1.92	Orta	
96	4.0	10.2	57.95	52.00	2.02	Orta	
97	4.0	13.175	64.77	52.00	2.08	Orta	
98	4.0	13.175	64.77	52.00	2.08	Orta	

**Tablo 5.4. (Devamı) Ön montaj hattı ergonomik risk analizi.**

Görev No.	REBA	OCRA	QEC	COPSOQ	IER	IER Seviyesi	Risk
99	4.0	13.175	64.77	52.00	2.08	Orta	
100	4.0	13.175	64.77	52.00	2.08	Orta	
101	4.0	9.35	56.8	52.00	2.02	Orta	
102	5.0	13.6	65.9	52.00	2.21	Orta	
103	4.0	9.35	56.8	52.00	2.02	Orta	
104	5.0	13.6	65.9	52.00	2.21	Orta	
105	4.0	12.75	64.77	52.00	2.02	Orta	
106	4.0	12.75	64.77	52.00	2.02	Orta	
107	4.0	9.35	56.8	52.00	2.02	Orta	
108	5.0	13.6	65.9	52.00	2.21	Orta	
109	4.0	9.35	56.8	52.00	2.02	Orta	
110	5.0	13.6	65.9	52.00	2.21	Orta	
111	4.0	12.75	64.77	52.00	2.02	Orta	
112	4.0	12.75	64.77	52.00	2.02	Orta	
113	4.0	9.35	56.8	52.00	2.02	Orta	
114	6.0	11.475	56.8	52.00	2.02	Orta	
115	8.0	14.875	64.77	52.00	2.84	Yüksek	
116	4.0	9.35	56.8	52.00	2.02	Orta	
117	7.0	20.4	67.61	44.00	2.08	Orta	
118	5.0	6.8	65.34	44.00	1.19	Düşük	
119	7.0	20.4	67.61	44.00	2.08	Orta	
120	5.0	6.8	65.34	44.00	1.19	Düşük	
121	4.0	6.8	65.34	44.00	1.19	Düşük	
122	4.0	6.8	65.34	44.00	1.19	Düşük	
123	8.0	17	59.65	44.00	2.23	Orta	
124	1.0	6.8	53.97	44.00	1.20	Düşük	
125	8.0	17	63.63	53.00	2.84	Yüksek	
126	5.0	6.8	62.5	53.00	2.02	Orta	
127	8.0	18.7	69.32	53.00	2.84	Yüksek	
128	5.0	9.35	67.04	53.00	2.01	Orta	
129	5.0	13.6	64.77	53.00	2.21	Orta	
130	9.0	15.3	69.31	53.00	2.84	Yüksek	
131	4.0	15.3	64.77	53.00	2.84	Yüksek	
132	5.0	15.3	69.31	53.00	2.84	Yüksek	
133	4.0	6.8	57.95	53.00	1.19	Düşük	
134	5.0	15.3	62.5	53.00	2.84	Yüksek	
135	9.0	23.8	64.77	53.00	2.84	Yüksek	
136	4.0	9.35	60.79	44.00	1.71	Orta	

**Tablo 5.5. Ana montaj hattı ergonomik risk analizi.**

Görev No.	REBA	OCRA	QEC	COPSOQ	IER	IER Seviyesi	Risk
1	3	11.9	59.65	57	1.9	Orta	
2	6	11.9	59.65	57	2.02	Orta	
3	5	11.9	59.65	57	2.02	Orta	
4	5	10.2	59.65	57	2.02	Orta	
5	5	6.8	55.11	57	1.19	Düşük	
6	5	6.8	59.65	57	1.41	Düşük	
7	4	6.8	55.11	57	1.19	Düşük	
8	6	5.1	55.11	57	1.18	Düşük	
9	5	5.95	55.11	57	1.18	Düşük	
10	5	5.95	52.84	57	1.18	Düşük	
11	6	9.35	56.25	57	2.01	Orta	
12	4	10.2	53.97	58	2.02	Orta	
13	5	11.475	55.11	58	2.02	Orta	
14	5	9.35	52.84	58	2.02	Orta	
15	5	9.35	52.84	58	2.02	Orta	
16	5	8.5	52.84	58	2.02	Orta	
17	5	9.35	52.84	58	2.02	Orta	
18	5	9.35	52.84	58	2.02	Orta	
19	7	11.9	53.97	58	2.02	Orta	



**Tablo 5.5. (Devamı) Ana montaj hattı ergonomik risk analizi.**

Görev No.	REBA	OCRA	QEC	COPSOQ	IER	IER Seviyesi	Risk
20	5	10.2	55.11	58	2.02	Orta	
21	5	9.35	55.11	58	2.02	Orta	
22	5	5.95	50.56	58	1.2	Düşük	
23	1	3.4	47.15	58	1.2	Düşük	
24	3	13.175	69.88	60	2.11	Orta	
25	3	13.175	63.34	60	2.11	Orta	
26	5	11.475	67.61	60	2.33	Orta	
27	4	13.175	69.88	60	2.33	Orta	
28	8	13.175	72.16	60	2.94	Yüksek	
29	8	13.175	69.88	60	2.92	Yüksek	
30	5	11.475	67.61	60	2.33	Orta	
31	6	11.475	69.88	60	2.33	Orta	
32	5	11.475	69.88	60	2.33	Orta	
33	6	11.9	65.34	57	2.01	Orta	
34	6	11.9	65.34	57	2.01	Orta	
35	6	11.9	65.34	57	2.01	Orta	
36	5	5.95	59.65	57	1.41	Düşük	
37	5	5.95	59.65	57	1.41	Düşük	
38	6	12.325	71.59	66	2.83	Yüksek	
39	8	12.325	71.59	66	2.83	Yüksek	
40	8	12.325	71.59	66	2.83	Yüksek	
41	8	12.325	71.59	66	2.83	Yüksek	
42	6	12.325	67.04	66	2.85	Yüksek	
43	8	12.325	71.59	66	2.83	Yüksek	
44	6	12.325	67.04	66	2.85	Yüksek	
45	6	11.9	67.04	66	2.77	Yüksek	
46	5	11.9	67.04	66	2.77	Yüksek	
47	6	11.9	71.59	66	2.64	Yüksek	
48	4	9.775	67.04	66	2.02	Orta	
49	7	11.9	69.31	66	2.72	Yüksek	
50	5	11.9	69.31	66	2.73	Yüksek	
51	6	9.775	71.59	66	2.02	Orta	
52	6	10.625	65.34	63	2.32	Orta	
53	8	14.0	67.61	63	2.84	Yüksek	
54	8	14.0	67.61	63	2.84	Yüksek	
55	8	11.9	67.61	63	2.75	Yüksek	
56	8	11.9	67.61	63	2.75	Yüksek	
57	8	11.9	67.61	63	2.75	Yüksek	
58	7	11.9	71.59	71	2.62	Yüksek	
59	8	18.7	71.59	71	3.35	Çok Yüksek	
60	8	17	69.32	71	2.92	Yüksek	
61	8	17	69.32	71	2.92	Yüksek	
62	8	17	71.59	71	3.35	Çok Yüksek	
63	7	11.05	64.77	43	2.02	Orta	
64	7	11.05	64.77	43	2.02	Orta	
65	7	11.05	64.77	43	2.02	Orta	
66	7	11.05	64.77	43	2.02	Orta	
67	7	11.05	64.77	43	2.02	Orta	
68	7	11.05	64.77	43	2.02	Orta	
69	7	17.85	62.5	43	2.02	Orta	
70	7	13.6	65.91	63	2.84	Yüksek	
71	7	13.6	65.91	63	2.84	Yüksek	
72	5	13.6	63.63	63	2.84	Yüksek	
73	7	13.6	65.91	63	2.84	Yüksek	
74	5	13.6	63.63	63	2.84	Yüksek	
75	5	13.6	64.77	48	2.84	Yüksek	
76	5	15.3	64.77	48	2.02	Orta	
77	5	13.6	64.77	48	2.84	Yüksek	
78	5	15.3	65.9	48	2.02	Orta	
77	5	13.6	64.77	48	2.84	Yüksek	
79	5	13.6	65.9	49	2.02	Orta	
80	5	13.6	65.9	49	2.02	Orta	

**Tablo 5.5. (Devamı) Ana montaj hattı ergonomik risk analizi.**

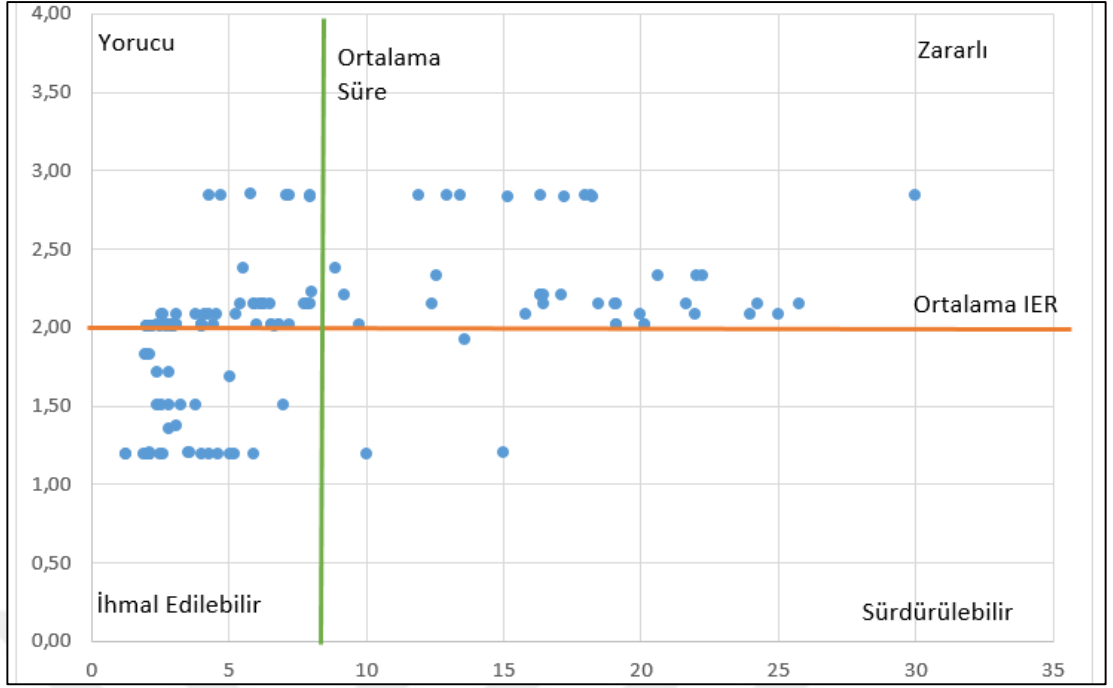
Görev No.	REBA	OCRA	QEC	COPSOQ	IER	IER Seviyesi	Risk
81	5	13.6	65.9	49	2.02	Orta	
82	7	13.6	68.18	49	2.02	Orta	
83	5	13.6	68.18	49	2.02	Orta	
84	5	13.6	68.18	49	2.02	Orta	
85	5	13.6	68.18	49	2.02	Orta	
86	5	13.6	65.9	49	2.02	Orta	
87	8	17	69.31	49	2.84	Yüksek	
88	6	10.2	67.04	49	2.02	Orta	
89	7	11.9	69.31	49	2.02	Orta	
90	4	9.775	64.77	49	2.02	Orta	
91	5	13.6	63.63	57	2.21	Orta	
92	5	13.6	63.63	57	2.21	Orta	
93	6	11.475	67.04	57	2.01	Orta	
94	8	11.475	67.04	57	2.53	Yüksek	
95	8	11.475	67.04	57	2.53	Yüksek	
96	5	15.3	63.63	57	2.84	Yüksek	
97	5	15.3	63.63	57	2.84	Yüksek	
98	5	15.3	63.63	57	2.84	Yüksek	
99	5	15.3	63.63	57	2.84	Yüksek	
100	6	13.6	62.5	57	2.21	Orta	
101	5	11.475	61.36	57	2.02	Orta	
102	5	11.475	61.36	57	2.02	Orta	
103	5	11.475	61.36	57	2.02	Orta	
104	3	6.8	59.09	57	1.19	Düşük	
105	6	6.8	61.36	57	1.83	Orta	
106	4	10.2	61.36	57	2.02	Orta	
107	4	13.6	61.36	57	2.23	Orta	

Bu çalışmada incelenen ön montaj hattı, ortalama IER skoru 2 ve ortalama işlem zamanı 8.2 saniye olan bir üretim hattıdır. Şekil 5.4'te gösterildiği gibi, IER değeri süre değerine göre sınıflandırıldığında, bu hat üzerindeki görevlerin çoğunluğunun yorucu ve zararlı iş elemanı olduğu açıkça görülmektedir. Ayrıca yapılan analizlere göre görevlerin %26'sı ihmal edilebilir ve sürdürülebilir kategorisine girmektedir.

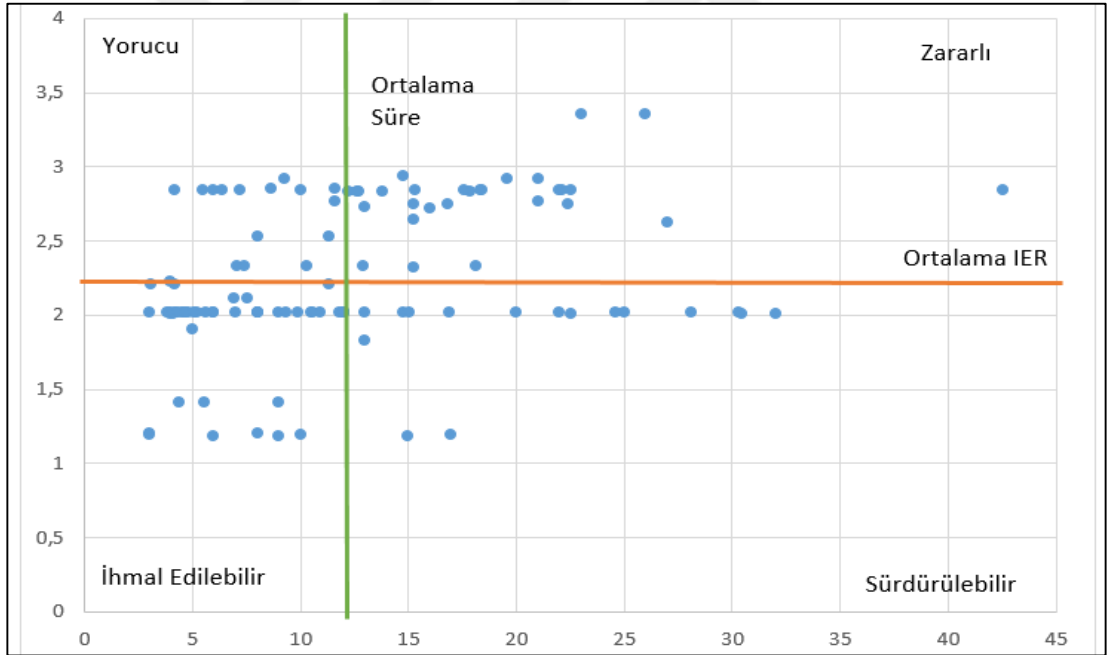
Ana montaj hattı ise ortalama IER skoru 2.25 ve ortalama işlem zamanı 12.5 saniye olan bir üretim hattıdır Şekil 5.5'te gösterildiği gibi, IER değerlerinin süre değerlerine göre sınıflandırılması sonucunda ana montaj hattındaki görevlerin %41'inin yorucu ve zararlı iş elemanı olduğu belirlenmiştir. Diğer yandan, görevlerin %59'u ihmal edilebilir ve sürdürülebilir kategorisinde bulunmaktadır.

### 5.3. Ergonomik Montaj Hattı Dengeleme

Bu bölümde, problemin 4.3.6. bölümde açıklanan matematiksel modeller ile çözümü sonucunda elde edilen bulgular analiz edilmiştir.



Şekil 5.4. Ön montaj hattı görevlerin süre ve risk düzeylerine göre sınıflandırılması.



Şekil 5.5. Ana montaj hattı görevlerin süre ve risk düzeylerine göre sınıflandırılması.

### 5.3.1. Ön montaj hattı çözüm sonuçları

Ön montaj hattındaki görevlerin mevcut durumdaki dağılımı Tablo 5.6'da verilmiştir. Dört model için çözüm sonuçları sırasıyla Tablo 5.7, Tablo 5.8, Tablo 5.9 ve Tablo 5.10'da verilmiştir.

**Tablo 5.6. Ön montaj hattı mevcut durum dağılım bilgileri.**

İstasyon No.	Toplam IER	Ergonomik Risk Sınıfları Görev Sayısı					İstasyon Süresi		Görev No.
		ÇY	Y	O	D	İE	Model A	Model B	
1	28.7	0	6	6	0	0	103	103	1-2-3-4-5-6-7-8-9-10-11-12
2	35.3	0	0	15	3	0	103	103	13-14-15-16-17-18-19-20-21-22-23-24-25-26-27-28-29-30
3	20.8	0	0	4	8	0	108	108	31-32-33-34-35-36-37-38-39-40-41-42
4	23.3	0	0	11	1	0	100	76	43-44-45-46-47-48-49-50-51-52-53-136
5	19.0	0	0	8	2	0	96	96	54-55-56-57-58-59-60-61-62-63
6	28.1	0	2	9	3	0	104	104	64-65-66-67-68-69-70-71-72-73-74-75-76-77
7	14.4	0	0	4	5	0	118	118	78-117-118-119-120-121-122-123-124
8	27.3	0	7	3	1	0	88	88	125-126-127-128-129-130-131-132-133-134-135
9	30.9	0	1	11	5	0	100	98	79-80-81-82-83-84-85-86-87-88-89-90-91-92-93-94-95
10	44.2	0	1	20	0	0	117	104	96-97-98-99-100-101-102-103-104-105-106-107-108-109-110-111-112-113-114-115-116

**Tablo 5.7. Ön montaj hattı KMMHDP-2 için çözüm sonuçları.**

İstasyon No.	Toplam IER	Ergonomik Risk Sınıfları Görev Sayısı					İstasyon Süresi		Görev No.
		ÇY	Y	O	D	İE	Model A	Model B	
1	35.2	0	4	10	3	0	106	104	1-2-3-4-5-7-8-9-10-32-45-49-54-57-79-80
2	32.9	0	1	13	3	0	104	102	11-43-44-65-75-81-82-83-84-85-86-87-88-89-90-91-92
3	23.0	0	1	10	0	0	104	99	56-61-78-93-94-95-96-97-98-99-107
4	39.9	0	0	18	2	0	103	95	6-14-16-26-35-100-101-102-103-104-105-106-108-109-110-111-112-113-117-118
5	13.4	0	0	4	4	0	104	104	25-47-119-120-121-122-123-124
6	18.3	0	1	6	2	0	104	104	12-13-36-40-55-58-59-60-62
7	15.7	0	1	6	0	0	105	86	17-37-46-48-50-114-115
8	33.8	0	0	11	8	0	101	98	15-18-19-20-21-22-23-24-27-28-30-31-33-34-38-41-51-53-76
9	25.2	0	2	8	2	0	104	104	39-42-63-64-66-67-68-69-70-71-72-73
10	34.9	0	7	5	4	0	104	104	29-52-74-77-116-125-126-127-128-129-130-131-132-133-134-135

**Tablo 5.8.** Ön montaj hattı Ergo-KMMHDP-2 (F2) için çözüm sonuçları.

İstasyon No.	Toplam IER	Ergonomik Risk Sınıfları Görev Sayısı					İstasyon Süresi		Görev No.
		ÇY	Y	O	D	İE	Model A	Model B	
1	30.7	0	2	10	3	0	105	105	1-2-3-7-8-32-33-46-50-55-57-59-64-66-79
2	26.9	0	1	10	3	0	104	102	5-9-37-54-56-61-65-67-80-81-82-83-87-88
3	26.9	0	2	9	2	0	105	88	4-10-11-36-38-44-48-53-68-84-89-90-91
4	22.0	0	0	9	3	0	105	97	6-13-16-34-45-78-85-86-117-118-119-120
5	27.1	0	1	10	3	0	103	94	17-26-69-75-92-93-94-95-96-97-98-121-122-123
6	26.1	0	1	9	3	0	104	99	14-35-39-40-41-70-99-100-101-102-107-108-124
7	26.1	0	1	9	3	0	106	106	12-18-19-20-21-22-23-25-31-42-49-58-76
8	25.6	0	1	9	3	0	101	102	15-24-27-29-30-71-72-73-74-103-104-109-110
9	24.8	0	1	9	3	0	103	103	28-43-47-60-62-63-105-106-111-112-113-114-115
10	36.0	0	7	7	2	0	103	103	51-52-77-116-125-126-127-128-129-130-131-132-133-134-135-136

**Tablo 5.9.** Ön montaj hattı Ergo-KMMHDP-2 (Bölgeleme Kısıtlı + F2) için çözüm sonuçları.

İstasyon No.	Toplam IER	Ergonomik Risk Sınıfları Görev Sayısı					İstasyon Süresi		Görev No.
		ÇY	Y	O	D	İE	Model A	Model B	
1	30.78	0	4	9	1	0	105	105	1-2-3-4-5-7-8-9-10-56-57-61-64-79
2	31.57	0	1	12	4	0	105	103	80-81-82-83-84-85-86-87-88-89-90-91-92-93-94-95-96
3	27.27	0	2	9	2	0	105	98	11-12-13-32-34-66-78-97-98-99-100-107-117
4	22.93	0	0	9	3	0	105	91	33-39-45-67-68-101-102-103-108-118-119-120
5	22.54	0	0	9	3	0	106	89	6-14-17-18-25-49-69-104-121-122-123-124
6	23.15	0	0	9	3	0	105	105	19-20-21-31-38-42-54-55-58-59-60-62
7	28.39	0	2	9	3	0	103	101	15-16-22-29-36-44-46-50-65-70-71-72-73-74
8	23.55	0	0	9	3	0	100	101	23-24-26-27-35-37-40-41-48-53-109-110
9	25.96	0	1	9	4	0	104	104	28-30-43-47-63-75-76-105-106-111-112-113-114-115
10	35.96	0	7	7	2	0	103	103	51-52-77-116-125-126-127-128-129-130-131-132-133-134-135-136

**Tablo 5.10.** Ön Montaj hattı Ergo-KMMHDP-2 (Bölgeleme Kısıtlı + ER Limit) için çözüm sonuçları.

İstasyon No.	Toplam IER	Ergonomik Risk Sınıfları Görev Sayısı					İstasyon Süresi		Görev No.
		ÇY	Y	O	D	İE	Model A	Model B	
1	27.63	0	1	11	2	0	106	104	1-2-3-4-6-12-43-47-55-57-59-79-80-81
2	26.19	0	5	6	0	0	107	107	5-7-8-9-10-11-13-16-54-56-61
3	26.86	0	0	12	2	0	105	105	14-17-78-82-83-84-85-86-87-88-89-90-91-117
4	27.54	0	1	10	3	0	107	98	18-25-33-36-58-65-75-92-93-94-95-96-97-98
5	27.56	0	0	11	3	0	104	105	19-20-31-35-40-99-100-101-102-107-108-109-118-119
6	26.66	0	0	10	4	0	106	106	21-22-23-24-29-30-32-37-38-60-62-64-66-67
7	27.93	0	2	10	1	0	106	80	26-45-52-68-69-70-71-72-73-74-103-104-105
8	26.6	0	0	9	6	0	102	98	125-126-127-128-129-130-131-132-133-134-135
9	27.82	0	1	9	6	0	105	105	15-27-34-39-44-46-48-53-110-111-120-121-122-123-124
10	27.31	0	7	3	1	0	90	90	28-41-42-49-50-51-63-76-77-106-112-113-114-115-116-136

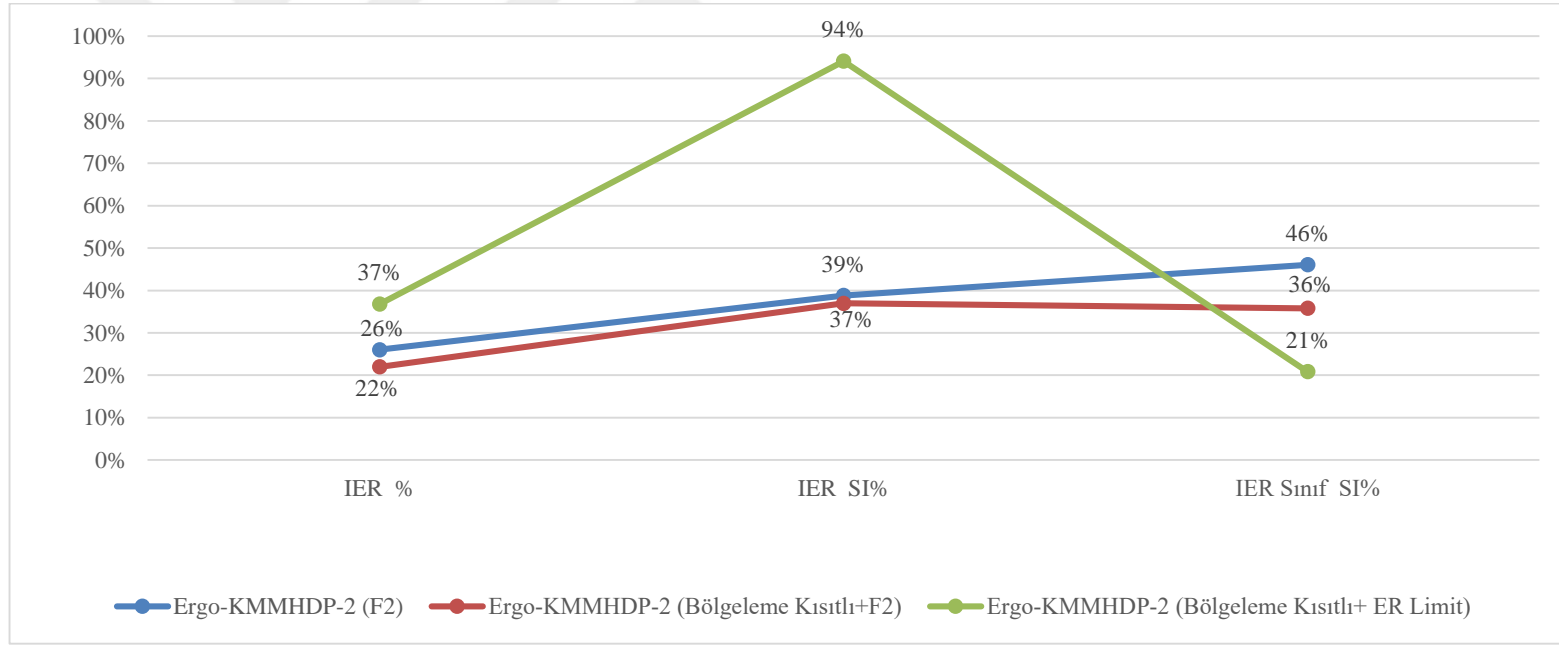
Performans göstergelerine göre çözüm sonuçlarının karşılaştırılması Tablo 5.11’de, KMMHDP-2 modeline göre iyileşme oranları ise Şekil 5.6’da özetlenmiştir. KMMHDP-2 modelinin ergonomik riskleri dikkate almadığı göz önüne alındığında, ergonomik risklerin dahil edildiği modeller ile risklerin istasyonlar arasında daha dengeli dağıtılabildiği görülmektedir. Bu sonuçlar, aynı çevrim süresi ile daha iyi bir performans elde edilmesini sağlayacak potansiyel iyileştirmeler olduğunu göstermektedir. Model sonuçları, mevcut duruma göre çevrim süresinde %10 iyileşme sağlanabileceğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, mevcut duruma göre hat etkinliğinde %10-11, IER performansında %12-25, ve IER sınıf performansında ise %25-49 arasında iyileşme elde edilebileceği belirlenmiştir. KMMHDP-2 modeli ile ergonomik risklerin dahil edildiği modeller karşılaştırıldığında, IER performansında %22-37, IER SI% sonuçlarında %37-94, ve IER sınıf performansında %21-46 arasında iyileşme sağlandığı tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, ergonomik faktörlerin dikkate alındığı modellerin ergonomik risk dengeleme performansını artırdığı yönündeki H1 hipotezini desteklemektedir. Bununla birlikte, istasyonların IER değerine ve risk sınıflarındaki görev sayısına bağlı olarak denge durumları Şekil 5.7 ve Şekil 5.8’de gösterilmiştir. Grafiklerden açıkça anlaşıldığı üzere, Ergo-KMMHDP-2 (Bölgeleme Kısıtlı + ER Limit) modeli IER değerinin dengelenmesinde en iyi sonuçları verirken,

risk sınıflarının dengelemesinde ergonomik amaç fonksiyonun (F2) dâhil edildiği modeller daha başarılı sonuçlar ortaya koymaktadır. Ergonomik amaç fonksiyonunun (F2) dâhil edildiği modellerin risk sınıflarının dengelenmesinde daha başarılı sonuçlar ortaya koyması, H3 hipotezini doğrulamaktadır.

Ayrıca, pozitif ve negatif bölge kısıtlamalarının performans sonuçlarını olumsuz etkilediği gözlemlenmiştir. Bu durum, H4 hipotezinin ergonomik risk performansı üzerindeki olumsuz etki beklentisini desteklemektedir. Bununla birlikte, ön montaj hattı için bölge kısıtlamalarının problemin yapısından kaynaklandığı göz önünde bulundurulduğunda, pozitif ve negatif bölgeleme kısıtlarının modele dâhil edilmesi gerekmektedir.

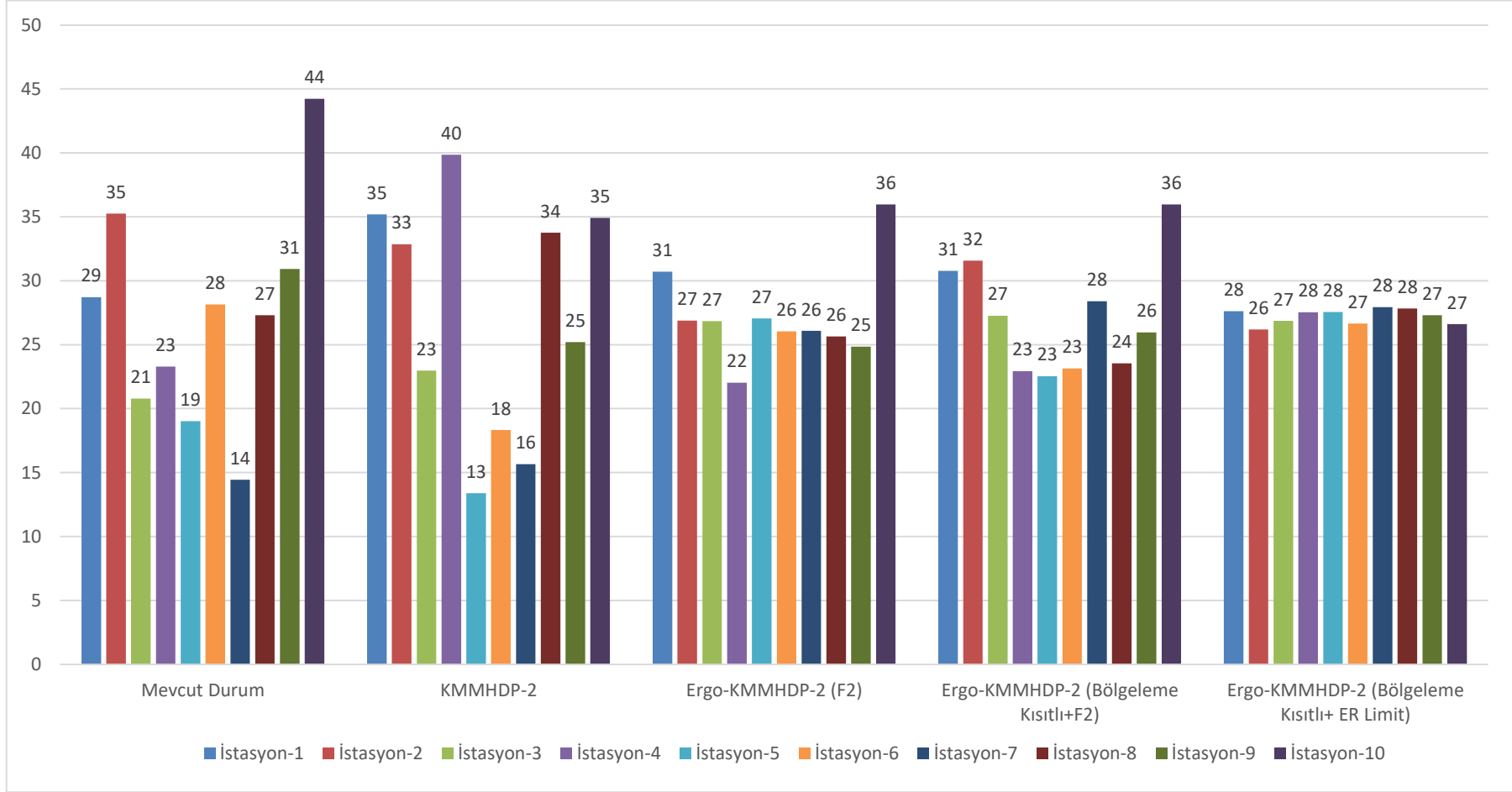
**Tablo 5.11.** Ön montaj hattı çözüm sonuçlarının karşılaştırılması.

	CT	LE%	SI%	IER %	IER SI%	IER Sınıf SI%
Mevcut Durum	118	86.3%	5.06%	78%	21.3%	64%
KMMHDP-2	106	96.1%	1.44%	71%	17%	60%
Ergo-KMMHDP-2 (F2)	106	95.8%	1.66%	90%	11%	32%
Ergo-KMMHDP-2 (Bölgeleme Kısıtlı + F2)	106	96.5%	1.43%	87%	11%	39%
Ergo-KMMHDP-2 (Bölgeleme Kısıtlı + ER Limit)	107	95.4%	2.42%	97.2%	1.03%	48%

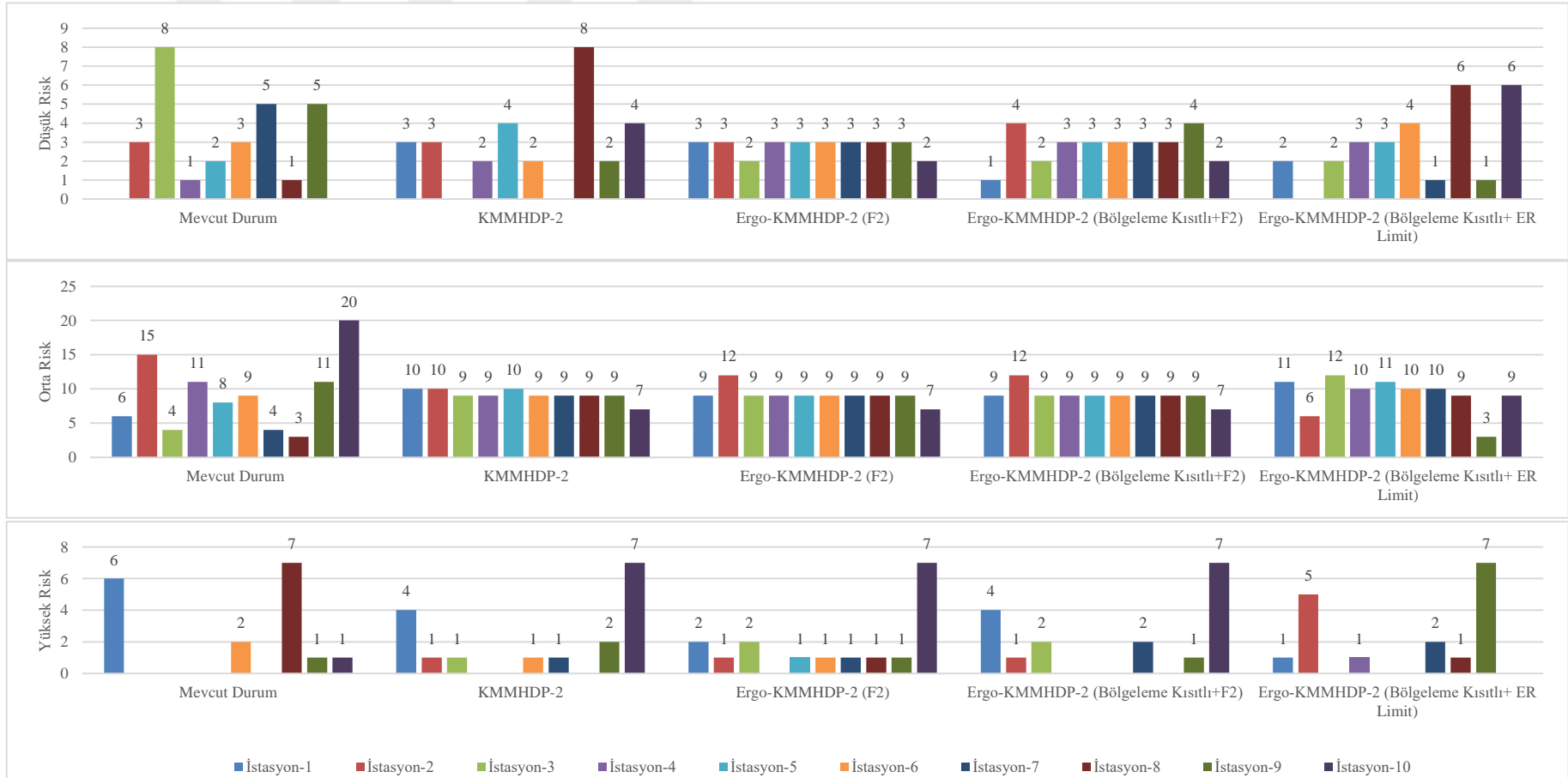


**Şekil 5.6.** Ön montaj hattı KMMHDP-2 modeline göre gerçekleşen iyileşmeler.





Şekil 5.7. Ön montaj hattı istasyonlarının IER değerlerine göre denge durumu.



Şekil 5.8. Ön montaj hattı istasyonlarının risk sınıflarına göre denge durumu.

### 5.3.2. Ana montaj hattı çözüm sonuçları

Ana montaj hattındaki görevlerin mevcut durumdaki dağılımı Tablo 5.12’de verilmiştir. Dört model için çözüm sonuçları sırasıyla Tablo 5.13, Tablo 5.14, Tablo 5.15 ve Tablo 5.16’da verilmiştir.

**Tablo 5.12.** Ana montaj hattı mevcut durum dağılım bilgileri.

İstasyon No.	Toplam IER	Ergonomik Risk Sınıfları Görev Sayısı					İstasyon Süresi		Görev No.
		ÇY	Y	O	D	İE	Model A	Model B	
1	17.3	0	0	5	6	0	105	105	1-2-3-4-5-6-7-8-9-10-11
2	22.6	0	0	10	2	0	106	106	12-13-14-15-16-17-18-19-20-21-22-23
3	21.73	0	2	7	0	0	106	106	24-25-26-27-28-29-30-31-32
4	8.85	0	0	3	2	0	96	96	33-34-35-36-37
5	22.62	0	8	0	0	0	102	93	38-39-40-41-42-43-44-45
6	14.9	0	4	2	0	0	103	103	46-47-48-49-50-51
7	16.25	0	5	1	0	0	104	104	52-53-54-55-56-57
8	15.16	2	3	0	0	0	107	107	58-59-60-61-62
9	14.14	0	0	7	0	0	104	104	63-64-65-66-67-68-69
10	14.2	0	5	0	0	0	108	108	70-71-72-73-74
11	9.72	0	2	2	0	0	104	104	75-76-77-78
12	25.06	0	1	11	0	0	99	99	79-80-81-82-83-84-85-86-87-88-89-90
13	38.39	0	6	10	1	0	107	107	91-92-93-94-95-96-97-98-99-100-101-102-103-104-105-106-107

**Tablo 5.13.** Ana montaj hattı KMMHDP-2 modeli için çözüm sonuçları.

İstasyon No.	Toplam IER	Ergonomik Risk Sınıfları Görev Sayısı					İstasyon Süresi		Görev No.
		ÇY	Y	O	D	İE	Model A	Model B	
1	21.03	0	0	8	4	0	104	104	1-2-3-4-5-6-7-14-15-16-20-22
2	17.67	0	0	7	3	0	104	104	8-9-10-11-12-13-17-18-19-21
3	17.65	0	2	5	1	0	103	103	23-24-25-26-27-28-33-58
4	16.25	0	5	1	0	0	104	104	52-53-54-55-56-57
5	18.15	0	4	3	0	0	104	104	29-30-31-32-38-46-47
6	11.7	1	1	2	1	0	104	104	34-35-36-59-60
7	21.81	0	7	1	0	0	105	96	39-40-41-42-43-44-45-63
8	16.68	0	3	4	0	0	105	105	61-64-65-66-67-70-71
9	14.67	0	4	1	1	0	104	104	37-48-49-72-73-74
10	12.14	1	1	3	0	0	104	104	50-51-62-68-69
11	9.72	0	2	2	0	0	104	104	75-76-77-78
12	32.51	0	3	12	0	0	103	103	79-80-81-82-83-84-85-86-87-88-91-92-93-94-95
13	30.94	0	4	9	1	0	103	103	89-90-96-97-98-99-100-101-102-103-104-105-106-107

**Tablo 5.14.** Ana montaj hattı Ergo-KMMHDP-2 (F2) modeli için çözüm sonuçları.

İstasyon No.	Toplam IER	Ergonomik Risk Sınıfları Görev Sayısı					İstasyon Süresi		Görev No.
		ÇY	Y	O	D	İE	Model A	Model B	
1	19.84	0	0	8	3	0	105	105	1-2-5-6-12-13-14-15-20-21-22
2	18.86	0	0	7	4	0	103	103	3-4-7-8-9-10-11-16-17-18-19
3	13.22	0	2	3	1	0	106	106	23-33-34-52-53-54
4	20.07	0	4	4	0	0	105	105	24-25-26-27-28-55-56-57
5	15.3	0	3	3	0	0	104	104	29-30-31-32-46-58
6	17.38	0	5	1	1	0	105	105	35-36-38-39-40-41-47
7	17.94	1	3	3	0	0	104	96	42-43-44-59-63-64-65
8	17.94	0	3	4	1	0	104	104	37-45-48-66-67-68-70-71
9	13.46	0	4	1	0	0	106	106	60-69-72-73-74
10	9.72	0	2	2	0	0	104	104	75-76-77-78
11	15.95	1	3	2	0	0	102	102	49-50-51-61-62-91
12	31.12	0	4	10	0	0	102	102	79-80-81-82-83-84-85-86-87-92-93-94-95-96
13	30.12	0	3	10	1	0	101	101	88-89-90-97-98-99-100-101-102-103-104-105-106-107

**Tablo 5.15.** Ana montaj hattı Ergo-KMMHDP-2 (Bölgeleme Kısıtlı + F2) modeli için çözüm sonuçları.

İstasyon No.	Toplam IER	Ergonomik Risk Sınıfları Görev Sayısı					İstasyon Süresi		Görev No.
		ÇY	Y	O	D	İE	Model A	Model B	
1	21.01	0	0	8	4	0	105	105	1-2-3-4-5-6-7-8-14-15-16-20
2	16.49	0	0	7	2	0	95	95	9-10-11-12-13-17-18-19-21
3	19.7	0	3	4	2	0	105	105	22-23-24-25-26-52-53-54-55
4	12.18	0	3	2	0	0	105	105	33-34-46-47-56
5	17.62	0	3	4	0	0	105	105	27-28-29-30-31-57-63
6	18.29	0	5	2	0	0	105	105	32-38-39-40-41-58-64
7	18.15	0	4	2	2	0	105	96	35-36-37-42-43-44-45-48
8	15.4	0	4	2	0	0	106	106	65-66-70-71-72-73
9	15.05	1	2	3	0	0	106	106	49-59-60-67-68-69
10	13.86	1	3	1	0	0	105	105	50-51-61-62-74
11	9.72	0	2	2	0	0	104	104	75-76-77-78
12	33.33	0	4	11	0	0	106	106	79-80-81-82-83-84-85-86-91-92-93-94-95-96-97
13	30.12	0	3	10	1	0	101	101	87-88-89-90-98-99-100-101-102-103-104-105-106-107

**Tablo 5.16.** Ana montaj hattı Ergo-KMMHDP-2 (Bölgeleme Kısıtlı + ER Limit) modeli için çözüm sonuçları.

İstasyon No.	Toplam IER	Ergonomik Risk Sınıfları Görev Sayısı					İstasyon Süresi		Görev No.
		ÇY	Y	O	D	İE	Model A	Model B	
1	18.98	0	0	7	4	0	95	95	1-2-3-5-6-9-10-14-15-20-21
2	18.52	0	0	8	2	0	105	105	4-7-8-11-12-13-16-17-18-19
3	18.65	0	5	1	2	0	115	115	22-23-52-53-54-55-56-57
4	18.78	0	2	6	0	0	100	100	24-25-26-27-28-29-63-64
5	17.68	0	1	7	0	0	118	118	30-31-32-33-58-65-66-67
6	18.7	1	4	2	0	0	126	126	34-38-39-40-41-59-68
7	18.92	0	6	1	0	0	122	113	35-42-43-44-45-46-70
8	18.02	0	4	2	2	0	129	129	36-37-47-48-69-71-72-73
9	18.99	0	6	1	0	0	130	130	49-50-51-60-61-74-75
10	18.5	1	1	6	0	0	127	127	62-76-77-78-82-83-84-91
11	18.18	0	3	5	0	0	63	63	79-80-85-92-93-94-95-96
12	18.81	0	3	5	0	0	51	51	86-97-98-99-100-101-102-103
13	18.19	0	1	7	1	0	70	70	81-87-88-89-90-104-105-106-107

Performans göstergelerine göre ana montaj hattı çözüm sonuçlarının karşılaştırılması Tablo 5.17’de, KMMHDP-2 modeline göre iyileşme oranları ise Şekil 5.9’da gösterilmiştir. Ön montaj hattı sonuçlarında da tespit edildiği gibi, KMMHDP-2 ile diğer modeller karşılaştırıldığında ergonomik risklerin istasyonlar arasında daha dengeli bir şekilde dağıtılabileceği görülmektedir. Sonuçlar, mevcut duruma göre çevrim süresinde ve hat etkinliğinde %2-3 oranında iyileşme sağlanabileceğini göstermektedir. Ayrıca, mevcut duruma göre IER performansında %6-12 ve IER Sınıf performansında ise %30-40 arasında iyileşme elde edilebileceği görülmektedir. KMMHDP-2 modeli ile ergonomik risklerin dahil edildiği modeller karşılaştırıldığında, IER performansında %2-34 ve IER sınıf performansında %12-14 arasında iyileşme sağlandığı tespit edilmiştir. Ergo-KMMHDP-2 (F2) model sonucuna göre, IER SI% performansında %10 iyileşme sağlanırken, Ergo-KMMHDP-2 (F2 + Bölgeleme Kısıtlı) modelinde IER SI% performansında %4 azalma görülmüştür. Bu

durum, ana montaj hattında bölgeleme kısıtlarının sonuçları olumsuz etkilediğini göstermektedir.

İstasyonların IER değerine ve risk sınıflarındaki görev sayısına bağlı olarak denge durumları Şekil 5.10 ve Şekil 5.11’de gösterilmiştir. Ergo-KMMHDP-2 (Bölgeleme Kısıtlı + ER Limit) modeli, IER değerinin dengelenmesinde en iyi sonuçları sağlarken, çevrim süresinde bir artışa neden olmaktadır. Öte yandan, F2 amaç fonksiyonunun dahil edildiği modeller, çevrim süresinde artışa yol açmaksızın risk sınıflarının dengelenmesinde daha başarılı performans sergilemektedir. Ayrıca, pozitif ve negatif bölge kısıtlamalarının performans sonuçlarını olumsuz etkilediği ana montaj hattı için de gözlemlenmektedir.

Bu bulgular, hipotezlerle şu şekilde ilişkilendirilebilir:

Hipotez 1 (H1): Ergonomik faktörlerin dikkate alındığı modeller, ergonomik risk dengeleme performansını artırır.

Ana montaj hattı sonuçlarında, KMMHDP-2 modelinin ergonomik riskleri daha dengeli dağıtması ve IER performansındaki iyileşmeler, H1 hipotezini desteklemektedir.

Hipotez 2 (H2): Montaj hattı dengelemede ergonomik risklerin dikkate alınması, hat verimliliğini olumsuz etkilemez.

Sonuçlarda görülen mevcut duruma göre çevrim süresinde ve hat etkinliğinde %2-3 oranında iyileşme, ergonomik risklerin dikkate alınmasının hat verimliliğini olumsuz etkilemediğini göstermekte ve H2 hipotezini desteklemektedir.

Hipotez 3 (H3): Ergonomik risklerin modele amaç fonksiyonu veya kısıt olarak eklenmesi, ergonomik risk değeri ve ergonomik risk sınıflarının dengeleme performansını etkiler.

Ergonomik amaç fonksiyonunun (F2) dahil edildiği modellerin, risk sınıflarının dengelenmesinde daha başarılı sonuçlar ortaya koyması, H3 hipotezini doğrulamaktadır.

Hipotez 4 (H4): Bölgeleme kısıtları, ergonomik risk performansını ve çevrim süresini negatif yönde etkiler.

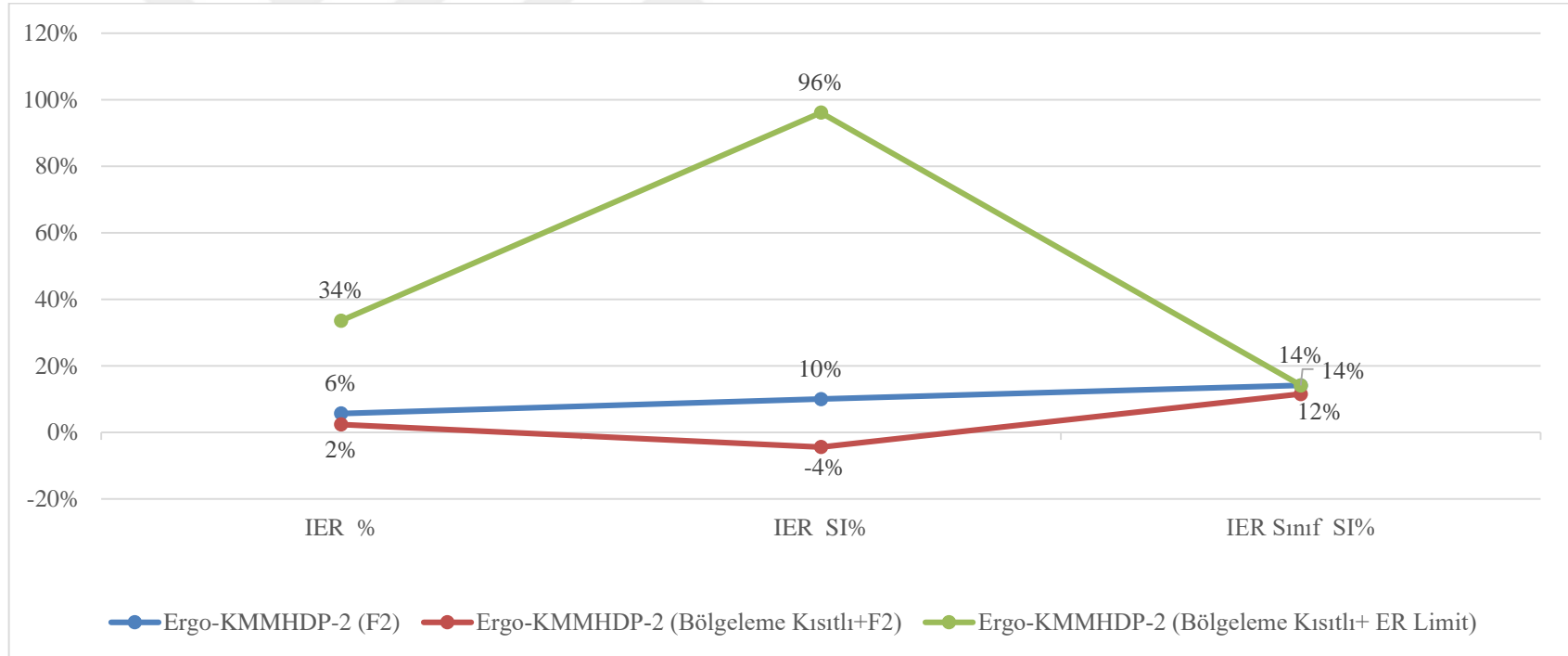
Pozitif ve negatif bölge kısıtlamalarının performans sonuçlarını olumsuz etkilediği bulgusu, H4 hipotezinin ergonomik risk performansı üzerindeki olumsuz etki

beklentisini desteklemektedir. Ancak, ana montaj hattı için de bölge kısıtlamalarının olduğu göz önünde bulundurulduğunda, Ergo-KMMHDP-2 (Bölgeleme Kısıtlı + F2) modeline göre yapılan hat dengelemesinin daha uygun olduğu değerlendirilmiştir.

Bu bulgular, ergonomik faktörlerin dikkate alındığı ve ergonomik amaç fonksiyonlarının dahil edildiği modellerin, hem ergonomik risklerin dengelenmesinde hem de performans iyileştirmelerinde önemli katkılar sağladığını göstermektedir.

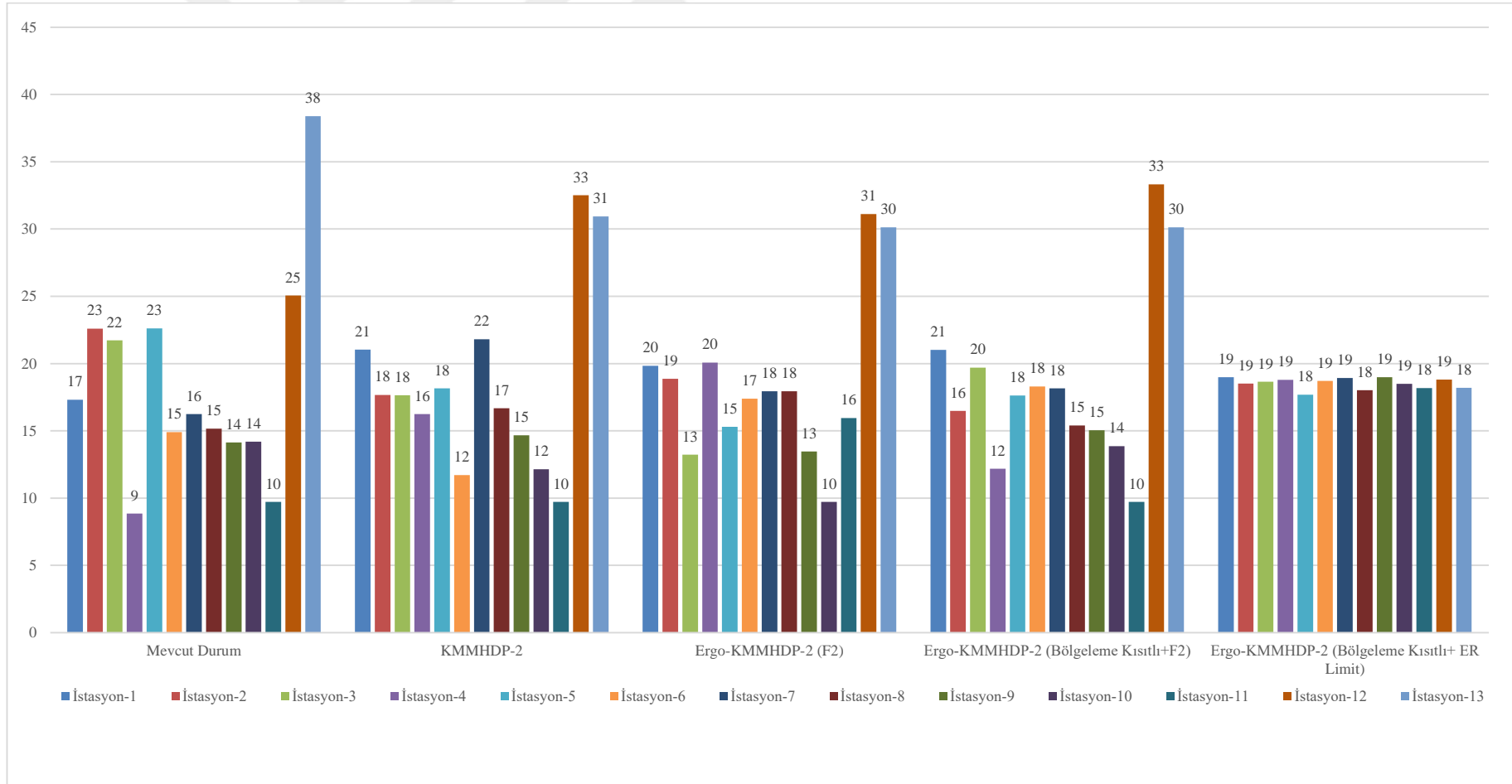
**Tablo 5.17.** Ana montaj hattı çözüm sonuçlarının karşılaştırılması.

	CT	LE%	SI%	IER %	IER SI%	IER Sınıf SI%
Mevcut Durum	108	96.1%	1.45%	69%	31.0%	75%
KMMHDP-2	105	99.1%	0.44%	73%	23%	52%
Ergo-KMMHDP-2 (F2)	106	97.8%	0.80%	77%	20%	45%
Ergo-KMMHDP-2 (Bölgeleme Kısıtlı + F2)	106	98.1%	1.00%	75%	24%	46%
Ergo-KMMHDP-2 (Bölgeleme Kısıtlı + ER Limit)	130	79.8%	7.82%	97.5%	0.88%	45%

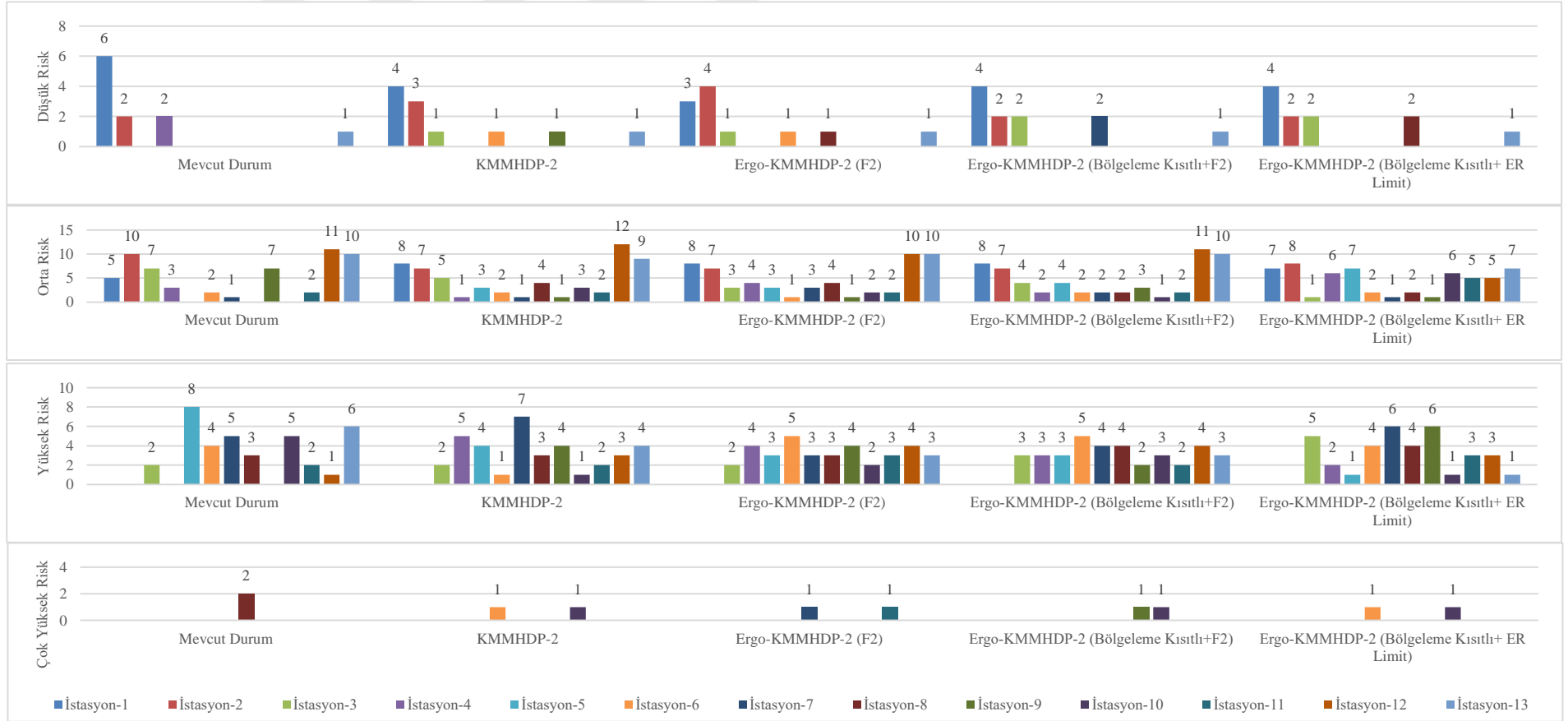


Şekil 5.9. Ana montaj hattı KMMHDP-2 modeline göre gerçekleşen iyileşmeler.





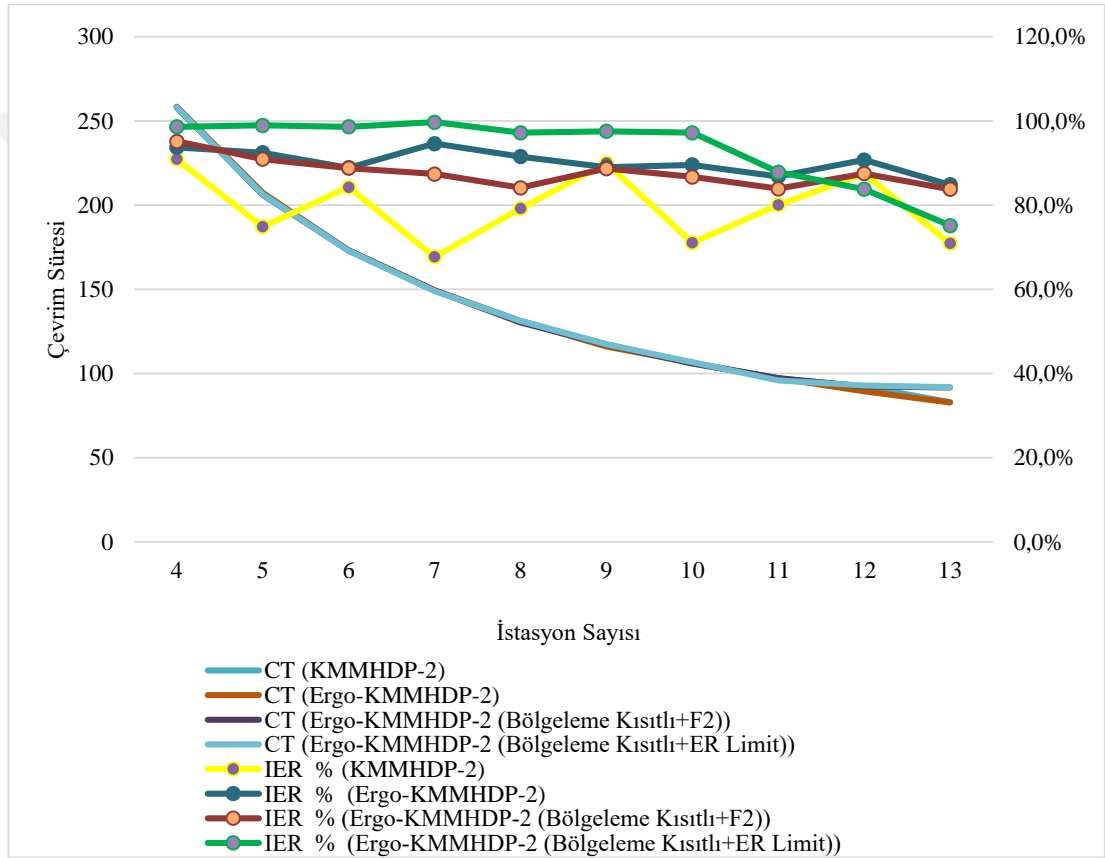
Şekil 5.10. Ana montaj hattı İstasyonların IER değerlerine göre denge durumu.



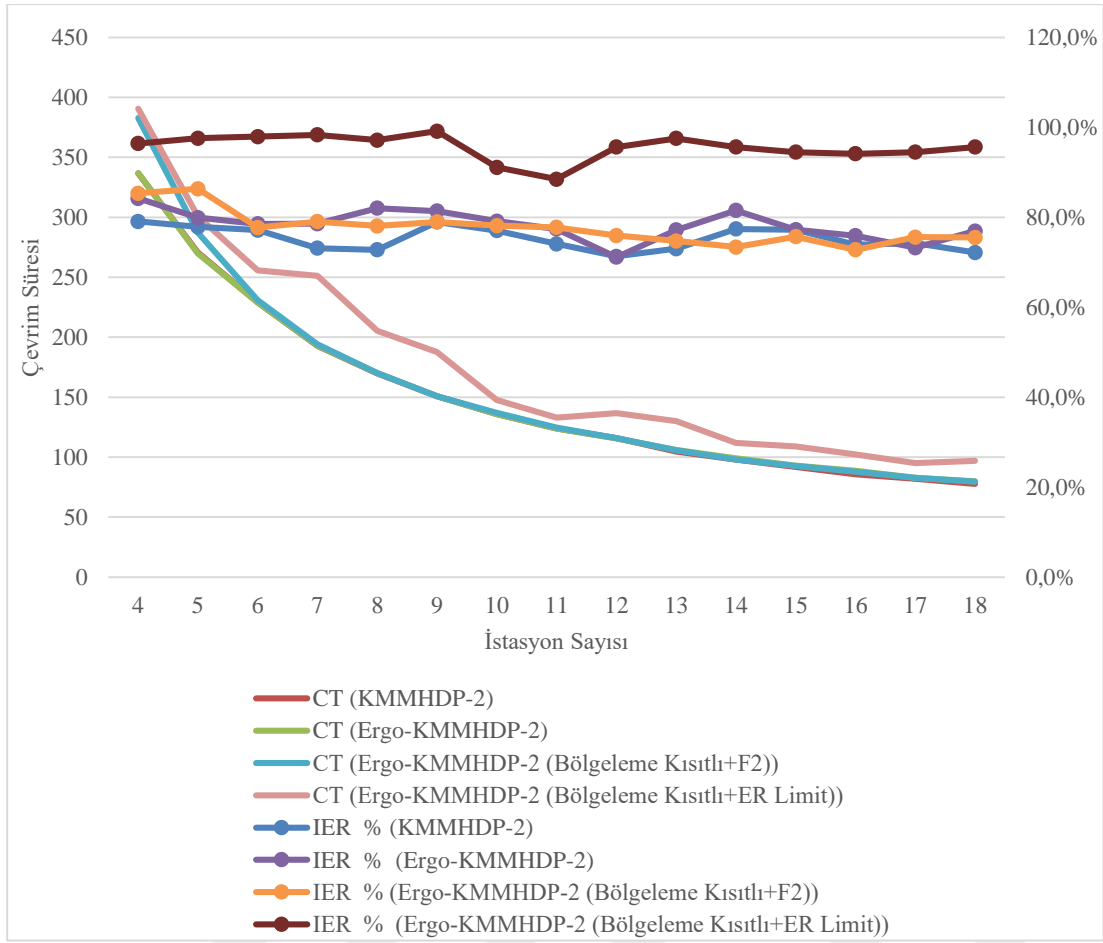
Şekil 5.11. Ana montaj hattı istasyonlarının risk sınıflarına göre denge durumu.

#### 5.4. İstatistiksel Analiz

Problemin önemli parametrelerinden olan iş istasyonu sayısının etkisini değerlendirmek amacıyla duyarlılık analizi yapılmıştır. Şekil 5.12 ve Şekil 5.13'te, ön montaj ve ana montaj hatları için istasyon sayısına göre çevrim süresi ve ergonomik risk performansı gösterilmektedir. Analiz sonuçları, ergonomik faktörleri dikkate alındığı model sonuçlarında ergonomik risklerin daha iyi dengelendiği göstermektedir. Bununla birlikte, bölgeleme kısıtlarının ergonomik risk performansı üzerinde olumsuz bir etkisi olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 5.12. Ön montaj hattı duyarlılık analizi.



Şekil 5.13. Ana montaj hattı duyarlılık analizi.

Matematiksel modelin ergonomik risk dengeleme performansı ve çevrim süresi üzerindeki etkisini değerlendirmek için MANOVA tekniği kullanılmıştır. İstatistiksel model, IBM SPSS istatistik programı kullanılarak oluşturulmuş ve anlamlılık düzeyi ( $p$ ) 0.05 olarak belirlenmiştir. MANOVA için Box'ın kovaryans matrislerinin eşitlik testi ( $p = 0.958 > 0.05$ ), çok değişkenli test ve varyansın homojenliği gibi varsayımlar kontrol edilmiştir. Levene testine göre varyans eşitliği elde edilmiştir (IER için  $p = 0.932 > 0.05$  ve CT için  $p = 0.95 > 0.05$ ).

Çok değişkenli test sonuçları (Tablo 5.18) ve denekler arası etki testleri (Tablo 5.19) incelendiğinde, matematiksel modelin ergonomik risk dengeleme performansı (IER) üzerindeki etkisinin anlamlı olduğu ( $p < 0.05$ ) görülmektedir. Bu bulgu, H1 hipotezini desteklemektedir ve ergonomik faktörlerin dikkate alındığı modellerin, ergonomik riskleri daha dengeli bir şekilde dağıttığını göstermektedir.

**Tablo 5.18.** Çok değişkenli test sonuçları.

	Etki	Değer	F	Hipotez df	Hata df	Anlamlılık.(p)
Kesişim	Pillai's Trace	.995	8842.257 <sup>a</sup>	2.000	91.000	.000
	Wilks' Lambda	.005	8842.257 <sup>a</sup>	2.000	91.000	.000
	Hotelling's Trace	194.335	8842.257 <sup>a</sup>	2.000	91.000	.000
	Roy's Largest Root	194.335	8842.257 <sup>a</sup>	2.000	91.000	.000
Matematiksel Model	Pillai's Trace	.554	11.760	6.000	184.000	.000
	Wilks' Lambda	.446	15.071 <sup>a</sup>	6.000	182.000	.000
	Hotelling's Trace	1.239	18.586	6.000	180.000	.000
	Roy's Largest Root	1.238	37.960 <sup>b</sup>	3.000	92.000	.000

a: Kesin istatistik

b: İstatistik, F üzerinde anlamlılık düzeyinde bir alt sınır veren bir üst sınırdır.

**Tablo 5.19.** Denekler arası etki testleri.

Kaynak		Tip III Kareler Toplamı	df	Ortalama Kare	F	Anlamlılık.(p)
Düzeltilmiş Model	CT	3421.083 <sup>c</sup>	3	1140.361	.336	.800
	IER	.413 <sup>d</sup>	3	.138	34.940	.000
Kesişim	CT	1971120.167	1	1971120.167	580.215	.000
	IER	67.838	1	67.838	17215.740	.000
Matematiksel Model	CT	3421.083	3	1140.361	.336	.800
	IER	.413	3	.138	34.940	.000
Hata	CT	312544.750	92	3397.226		
	IER	.363	92	.004		
Toplam	CT	2287086.000	96			
	IER	68.614	96			
Düzeltilmiş Toplam	CT	315965.833	95			
	IER	.776	95			

c: R Kare = .011 (Düzeltilmiş R Kare = -.021)

d: R Kare = .533 (Düzeltilmiş R Kare = .517)

Çoklu karşılaştırmaların sonuçları (Tablo 5.20) çevrim süresi (CT) bağımlı değişkeni açısından analiz edildiğinde, modeller arasında anlamlı bir farklılığın olmadığı ortaya çıkmaktadır. Bu durum, ergonomik risklerin dikkate alınmasının hat verimliliği üzerinde olumsuz bir etkisi olmadığını göstermektedir. Dolayısıyla, H2 hipotezi de desteklenmektedir.

Analiz sonuçları, ergonomik risklerin modele dahil edilmesinin, IER performans değeri üzerindeki etkisinin anlamlı olduğunu göstermektedir (Tablo 5.19). Bu, ergonomik risklerin modele amaç fonksiyonu veya kısıt olarak eklenmesinin,

ergonomik risk dengeleme performansını etkilediğini göstermektedir ve H3 hipotezini desteklemektedir.

Bölgeleme kısıtlarının ergonomik risk performansı ve çevrim süresi üzerindeki etkisi incelendiğinde, bölgeleme kısıtlarının ergonomik risk performansı üzerinde olumsuz bir etkisi olduğu görülmüştür. Ancak çevrim süresi üzerinde anlamlı bir etkisi bulunmamaktadır. Bu bulgu, H4 hipotezinin ergonomik risk performansı kısmını desteklemekte, ancak çevrim süresi üzerindeki negatif etki beklentisini desteklememektedir.

Çoklu karşılaştırma sonuçlarına göre (Tablo 5.20), Model 2 ve Model 4 arasındaki farkın IER performans değeri açısından anlamlı olduğu, ancak Model 3 arasındaki farkın anlamlı olmadığı görülmektedir. Bu durum, bölgeleme kısıtlarının IER ve CT performansı üzerindeki etkisinin anlamlı olmadığını göstermektedir. Model 2, Model 1'e kıyasla IER performans değerinde 0.0621'lik bir ortalama fark görülmektedir. Ayrıca, Model 3, Model 1'den 0.0471'lik bir ortalama fark göstermiştir. Bu farklılıklar, Model 2, 3 ve 4'ün ergonomik riskleri dengeleme konusunda Model 1'e göre daha başarılı olduğunu göstermektedir. Ayrıca, çevrim süresi bağımlı değişkeni analiz edildiğinde modeller arasında anlamlı bir farklılığın olmadığı ortaya çıkmaktadır. Spesifik olarak, ergonomik amaç fonksiyonu ve bölgeleme kısıtlamalarının modele dâhil edilmesi çevrim süresinde anlamlı bir artışa yol açmamaktadır.

**Tablo 5.20.** Çoklu karşılaştırmalar.

Bağımlı Değişken		Ortalama Fark (I-J)	Std. Hata	Anlamlılık	95% Güven Aralığı		
					Alt Limit	Üst Limit	
CT	Model 1	Model 2	-.2083	16.82564	1.000	-44.2346	43.8179
		Model 3	-1.5000	16.82564	1.000	-45.5262	42.5262
		Model 4	-14.2917	16.82564	.831	-58.3179	29.7346
	Model 2	Model 1	.2083	16.82564	1.000	-43.8179	44.2346
		Model 3	-1.2917	16.82564	1.000	-45.3179	42.7346
		Model 4	-14.0833	16.82564	.837	-58.1096	29.9429
	Model 3	Model 1	1.5000	16.82564	1.000	-42.5262	45.5262
		Model 2	1.2917	16.82564	1.000	-42.7346	45.3179
		Model 4	-12.7917	16.82564	.872	-56.8179	31.2346
	Model 4	Model 1	14.2917	16.82564	.831	-29.7346	58.3179
		Model 2	14.0833	16.82564	.837	-29.9429	58.1096
		Model 3	12.7917	16.82564	.872	-31.2346	56.8179
IER	Model 1	Model 2	-.0621*	.01812	.005	-.1095	-.0147
		Model 3	-.0471	.01812	.052	-.0945	.0003
		Model 4	-.1783*	.01812	.000	-.2257	-.1309
	Model 2	Model 1	.0621*	.01812	.005	.0147	.1095
		Model 3	.0150	.01812	.841	-.0324	.0624
		Model 4	-.1162*	.01812	.000	-.1637	-.0688
	Model 3	Model 1	.0471	.01812	.052	-.0003	.0945
		Model 2	-.0150	.01812	.841	-.0624	.0324
		Model 4	-.1312*	.01812	.000	-.1787	-.0838
	Model 4	Model 1	.1783*	.01812	.000	.1309	.2257
		Model 2	.1162*	.01812	.000	.0688	.1637
		Model 3	.1312*	.01812	.000	.0838	.1787

Model 1: KMMHDP-2, Model 2: Ergo-KMMHDP-2, Model 3: Ergo-KMMHDP-2 (Bölgeleme Kısıtlı+F2), Model 4: Ergo-KMMHDP-2 (Bölgeleme Kısıtlı + ER Limit),

\*: Ortalama fark 0,05 seviyesinde anlamlıdır.





## 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, ergonomik riskler göz önünde bulundurularak dairesel karma model montaj hattını dengelemek amacıyla iki aşamalı bir çerçeve önerilmiştir. İlk aşamada, IVSF-AHP yöntemi kullanılarak belirlenen ERDY ağırlıklarının temel alındığı kurallar ile bütünleşik ergonomik risk değerlendirme bulanık mantık modeli oluşturulmuştur. Bu aşamada, REBA, OCRA, QEC ve COPSOQ yöntemleri kullanılarak hesaplanan risk skorları bulanık mantık modeli kullanılarak bütünleşik ergonomik risk puanına (IER) dönüştürülmüştür. IER değerine göre görevler, ihmal edilebilir, düşük, orta, yüksek ve çok yüksek risk sınıfları şeklinde sınıflandırılmıştır.

İkinci aşamada, Ergo-KMMHDP-2 için matematiksel modeller oluşturulmuştur. Bu modeller, çevrim süresini minimize ederken, IER değerinin ve/veya her bir risk sınıfına ait görevlerin istasyonlar arasında dengelenmesini hedeflemektedir. Matematiksel modeller, test problemleri ile test edilmiş ve sonuçlar, çevrim süresinde anlamlı bir artış olmadan ergonomik risklerin istasyonlar arasında daha adil bir şekilde dağıtılabileceğini göstermiştir.

Önerilen sistematik yaklaşım otomobil üreticileri için kablo donanımı üreten bir fabrikanın montaj hattında uygulanmıştır. Montaj hattında, ana montaj hattını destekleyen bir ön montaj hattı mevcut olduğundan, önerilen modeller her iki hat üzerinde de uygulanmıştır. Ana montaj hattı ve ön montaj hattı çözüm sonuçları, ergonomik risklerin dikkate alınmasıyla istasyonlar arasında daha dengeli bir şekilde dağıtılabileceğini göstermiştir. Ayrıca bu sonuçlar, aynı çevrim süresiyle daha iyi bir performans elde etmeyi mümkün kılacak potansiyel iyileştirmelerin olduğunu ortaya koymaktadır. Ön montaj hattı sonuçları, mevcut duruma göre çevrim süresinde %10 oranında iyileşme sağlanabileceğini göstermektedir. Ayrıca, hat etkinliğinde %10-11, IER performansında %12-25 ve IER sınıf performansında ise %25-49 arasında iyileşme elde edilebileceği belirlenmiştir. Ana montaj hattı sonuçları, mevcut duruma göre çevrim süresinde ve hat etkinliğinde %2-3 oranında iyileşme sağlanabileceğini göstermektedir. Ayrıca, IER performansında %6-12 ve IER sınıf performansında %30-40 arasında iyileşme elde edilebileceği görülmektedir.

Son olarak, matematiksel modelin ergonomik risk dengeleme performansı ve çevrim süresi üzerindeki etkisini değerlendirmek için MANOVA uygulanmıştır. Çoklu karşılaştırma sonuçları, ergonomik faktörlerin modele dâhil edilmesinin çevrim süresi üzerinde herhangi bir etkisinin olmadığını, başka bir ifadeyle çevrim süresini artırmadığını ve ergonomik risklerin istasyonlar arasındaki dağılımının daha dengeli olduğunu göstermektedir. Bu sonuçlar, önerilen yaklaşımın iş güvenliğini ve genel performansı önemli ölçüde artırabileceğini göstermektedir.

Gelecekteki araştırmalar için, birden fazla çelişen hedefi aynı anda optimize etme kapasitesi ile bilinen hedef programlama metodolojisini dâhil ederek önerilen modelin geliştirilmesi önerilmektedir. Önerilen yaklaşım aynı zamanda U tipi, paralel ve/veya stokastik süreç süreli montaj hatlarında karşılaşılan benzer problemlere de uygulanabilir. Gelişen otomasyon göz önüne alındığında, gelecekteki araştırmalar, üretkenliği ve ergonomik hususları optimize etmek için insan-robot işbirliğine dayalı montaj hatları için önerilen metodolojiyi geliştirmeye odaklanmalıdır. Ayrıca, bu yaklaşımın gerçek zamanlı izleme mekanizmalarını içerecek şekilde genişletilmesi, montaj hattı ortamlarında iş güvenliğini ve operasyonel verimliliği artırabilir.

## KAYNAKLAR

- [1] Görgülü, K. G. (2019). *Ergonomik Etmenler Dikkate Alınarak Montaj Hatlarında Dengeleme Yapılması ve Bir Fabrika Uygulaması* [Yüksek lisans tezi]. İstanbul Teknik Üniversitesi.
- [2] Wilhelm, M., Manghisi, V. M., Uva, A., Fiorentino, M., Bräutigam, V., Engelmann, B., ve Schmitt, J. (2020). ErgoTakt: A novel approach of human-centered balancing of manual assembly lines. *Procedia CIRP*, 97. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.05.250>.
- [3] Finco, S., Battini, D., Delorme, X., Persona, A., ve Sgarbossa, F. (2020). Workers' rest allowance and smoothing of the workload in assembly lines. *International Journal of Production Research*, 58(4). <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1616847>.
- [4] Battini, D., Faccio, M., Persona, A., ve Sgarbossa, F. (2011). New methodological framework to improve productivity and ergonomics in assembly system design. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 41(1). <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2010.12.001>.
- [5] Kahraman, M. F. (2012). *Ergonomik risk değerlendirme yöntemlerinin çok ölçütlü karar verme teknikleri ile önceliklendirilmesi ve bütünlük bir model önerisi* [Yüksek lisans tezi]. Gazi Üniversitesi.
- [6] Mokhtarzadeh, M., Rabbani, M., ve Manavizadeh, N. (2021). A novel two-stage framework for reducing ergonomic risks of a mixed-model parallel U-shaped assembly-line. *Applied Mathematical Modelling*, 93. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2020.12.027>.
- [7] Küçükkoç, İ. (2022). *Montaj Hattı Tasarımı ve Analizi Ders Notları*.
- [8] Rekiek, B., ve Delchambre, A. (2006). Assembly Line Design: The Balancing of Mixed-Model Hybrid Assembly Lines with Genetic Algorithms. *Assembly Automation*, 26(3). <https://doi.org/10.1108/aa.2006.26.3.252.1>.
- [9] Scholl, A. (1995). Balancing and Sequencing of Assembly Lines. *In Balancing and Sequencing of Assembly Lines*.
- [10] Özcan, U. (2018). Balancing stochastic parallel assembly lines. *Computers and Operations Research*, 99, 109–122. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2018.05.006>.
- [11] Gökçen, H., Ağpak, K., ve Benzer, R. (2006). Balancing of parallel assembly lines. *International Journal of Production Economics*, 103(2). <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2005.12.001>.
- [12] Karacan, A. N., Şahin, H. İ., ve Özmen, M. (2022). İnsan-Robot İş Birliği İle Çok Amaçlı Montaj Hattı Dengeleme. *Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 16, 10–36. <https://doi.org/DOI: 10.54365/adyumbd.960059>.
- [13] Özgörmüş, E. (2007). *Ergonomik koşullar altında montaj hattı dengeleme* [Yüksek lisans tezi]. Pamukkale Üniversitesi.

- [14] Nahmatlı, M. (2021). *Ergonomik karma modellenli u-tipi montaj hattı dengelemesi* [Yüksek lisans tezi]. Eskişehir Teknik Üniversitesi.
- [15] Andreas, G.W.J., ve Johansson, E. (2018). Observational Methods for Assessing Ergonomic Risks for Work-Related Musculoskeletal Disorders. A Scoping Review. *Revista Ciencias de La Salud*, 16 (Special Issue). <https://doi.org/10.12804/revistas.urosario.edu.co/revsalud/a.6840>.
- [16] Aksüt, G., Eren, T., ve Tüfekçi, M. (2020). Ergonomik Risk Faktörlerinin Sınıflandırılması Bir Literatür Çalışması. *Ergonomi*. <https://doi.org/10.33439/ergonomi.773896>.
- [17] Otto A. ve Battaia O. (2017). Reducing physical ergonomic risks at assembly lines by line balancing and job rotation: A survey. *Computers and Industrial Engineering*, vol. 111. doi: 10.1016/j.cie.2017.04.011.
- [18] Kalakoski, V., Selinheimo, S., Valtonen, T., Turunen, J., Käpykangas, S., Ylisassi, H., Toivio, P., Järnefelt, H., Hannonen, H., ve Paajanen, T. (2020). Effects of a cognitive ergonomics workplace intervention (CogErg) on cognitive strain and well-being: A cluster-randomized controlled trial. A study protocol. *BMC Psychology*, 8(1). <https://doi.org/10.1186/s40359-019-0349-1>.
- [19] Çilingirtürk, A. M., Uyar, M., Aktaş, A., Arıcı, F., ve Yalçınay, M. (2014). Kurumsal amaçlı psikososyal risk yönetimi ölçeği. *Marmara Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 36(1), 1–13.
- [20] Özel, E., ve Çetik, O. (2010). Mesleki Görevlerin Ergonomik Analizinde Kullanılan Araçlar ve Bir Uygulama Örneği. *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 22(1).
- [21] Kahya, E., Şahin, B. N., Daşdelen, E., ve Doğru, S. (2018). Ergonomik Risk Kısıtları Altında Yeni Bir Montaj Hattı Dengeleme Modeli Geliştirilmesi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 6(0). <https://doi.org/10.21923/jesd.363560>.
- [22] *Örgütsel Ergonomi*. (2022). <https://ergo08516.wordpress.com/3-orgutsel-ergonomi/>.
- [23] Yetkin, B. N. (2019). *Solution of ergonomic assembly line balancing problem by conic scalarization method* [Yüksek lisans tezi]. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi.
- [24] Karhu, O., Kansu, P., ve Kuorinka, I. (1977). Correcting working postures in industry: A practical method for analysis. *Applied Ergonomics*, 8(4). [https://doi.org/10.1016/0003-6870\(77\)90164-8](https://doi.org/10.1016/0003-6870(77)90164-8).
- [25] McAtamney, L., ve Nigel Corlett, E. (1993). RULA: a survey method for the investigation of work-related upper limb disorders. *Applied Ergonomics*, 24(2). [https://doi.org/10.1016/0003-6870\(93\)90080-S](https://doi.org/10.1016/0003-6870(93)90080-S).
- [26] Moore, J. S., ve Garg, A. (1995). The strain index: A proposed method to analyze jobs for risk of distal upper extremity disorders. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 56(5). <https://doi.org/10.1080/15428119591016863>.
- [27] Colombini, D. (1998). An observational method for classifying exposure to repetitive movements of the upper limbs. *Ergonomics*, 41(9). <https://doi.org/10.1080/001401398186306>.

- [28] Kee, D., ve Karwowski, W. (2007). A Comparison of Three Observational Techniques for Assessing Postural Loads in Industry. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 13(1). <https://doi.org/10.1080/10803548.2007.11076704>.
- [29] Dansie, C. (2009). *Using an intelligent system to combine multiple ergonomic analytical tool outcomes into a single risk assessment* [Doktora Tezi]. The University of Utah.
- [30] Mert, E. A. (2014). *Ergonomik Risk Değerlendirme Yöntemlerinin Karşılaştırılması ve Bir Çanta İmalat Atölyesinde Uygulanması*. Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı.
- [31] Chowdhury, N. (2015). A Comparative Assessment of Ergonomic Risk Factors in University Personnel Using RULA and REBA Aiming to Study the Cause and Effect Relationship. *Louisiana State University, LSU Digital Commons*.
- [32] Karabacak, N. (2016). *Ergonomic Analysis On Dentists' Working Posture* [Yüksek Lisans Tezi]. Selçuk Üniversitesi.
- [33] Rodrigues, M. S. A., Leite, R. D. V., Lelis, C. M., ve Chaves, T. C. (2017). Differences in ergonomic and workstation factors between computer office workers with and without reported musculoskeletal pain. *Work*, 57(4). <https://doi.org/10.3233/WOR-172582>.
- [34] Köşker, T. (2019). *Prioritization of Ergonomic Risk Assessment Methods with If-AHP and Proposal of an Integrated Method* [Yüksek Lisans Tezi]. Marmara Üniversitesi.
- [35] Tol, G. (2019). *Ergonomik Risk Değerlendirme Analizlerinin Yapılması Ve Tersane Sektörüne Uygulanması* [Yüksek Lisans Tezi]. Sakarya Üniversitesi.
- [36] Li, X., Han, S. H., Gül, M., ve Al-Hussein, M. (2019). Automated post-3D visualization ergonomic analysis system for rapid workplace design in modular construction. *Automation in Construction*, 98. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.11.012>.
- [37] Koppiahraj, K., Bathrinath, S., ve Saravanasankar, S. (2021). A fuzzy VIKOR approach for selection of ergonomic assessment method. *Materials Today: Proceedings*, 45. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.725>.
- [38] Sever, S., ve Deste, M. (2021). Üretim Süreçlerinde Ergonomik Riskler ve Risk Değerlendirme Yöntemleri: Cıvata Fabrikasında Bir Uygulama. *European Journal of Science and Technology*. <https://doi.org/10.31590/ejosat.892538>.
- [39] Simonsson, P., ve Rwamamara, R. (2009). Ergonomic exposures from the usage of conventional and self compacting concrete. *Proceedings of IGLC17: 17th Annual Conference of the International Group for Lean Construction*.
- [40] Jones, T., ve Kumar, S. (2010). Comparison of ergonomic risk assessment output in four sawmill jobs. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 16(1). <https://doi.org/10.1080/10803548.2010.11076834>.
- [41] Motamedzade, M., Ashuri, M. R., Golmohammadi, R., ve Mahjuba, H. (2011). Comparison of ergonomic risk assessment outputs from rapid entire body assessment and quick exposure check in an engine oil company. *Journal of Research in Health Sciences*, 1(1).

- [42] Lavatelli, I., Schaub, K., ve Caragnano, G. (2012). Correlations in between EAWS and OCRA Index concerning the repetitive loads of the upper limbs in automobile manufacturing industries. *Work*, 41(SUPPL.1). <https://doi.org/10.3233/WOR-2012-0743-4436>.
- [43] Paulsen, R. J. (2013). *Reliability of ergonomic exposure assessment: Comparing the Strain Index and the OCRA checklist* [Yüksek Lisans Tezi]. Colorado State University.
- [44] Bozyer, Z., Alkan, A., ve Fırlalı, A. (2014). Cluster-First, Then-Route Based Heuristic Algorithm for the Solution of Capacitated Vehicle Routing Problem. *Bilişim Teknolojileri Dergisi*, 7(2). <https://doi.org/10.17671/btd.36806>.
- [45] Koç, S., ve Testik, Ö. M. (2016). Mobilya Sektöründe Yaşanan Kas-İskelet Sistemi Risklerinin Farklı Değerlendirme Metotları ile İncelenmesi ve Minimizasyonu. *Endüstri Mühendisliği*, 27(2).
- [46] Ulutaş, İ. B., ve Gündüz, T. (2017). Ergonomic Risk Analysis in Production of Automotive Wire Harnesses. *Uludağ University Journal of the Faculty of Engineering*, 22(2), 107–120. <https://doi.org/10.17482/uumfd.336440>.
- [47] Çiçek, E., Kazanç, N., ve Kahya, E. (2018). The Ergonomic Risk Analysis in A Assembly Line of Furniture Company. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 6(0), 67–82. <https://doi.org/10.21923/jesd.359455>.
- [58] Delice, E. K. (2018). Ergonomik Risk Değerlendirme Yöntemleri ve Ahp Yöntemi İle Çalışma Duruşlarının Analizi: Ağır ve Tehlikeli İşler İçin Bir Uygulama. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 6(0). <https://doi.org/10.21923/jesd.364394>.
- [49] Yazdanirad, S., Khoshakhlagh, A. H., Habibi, E., Zare, A., Zeinodini, M., ve Deghani, F. (2018). Comparing the effectiveness of three ergonomic risk assessment methods-RULA, LUBA, and NERPA-to predict the upper extremity musculoskeletal disorders. *Indian Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 22(1). [https://doi.org/10.4103/ijoem.IJOEM\\_23\\_18](https://doi.org/10.4103/ijoem.IJOEM_23_18).
- [50] Deryaoğlu, P., Atıcı, H., ve Gündüz, T. (2019). Et taşıma sürecinde karşılaşılan kas iskelet sistemi rahatsızlığı risklerinin incelenmesi. *Investigation of Musculoskeletal Disorder Risks in the Meat Transporting Process*, 25(4).
- [51] Widodo, L., Daywin, F. J., ve Nadya, M. (2019). Ergonomic risk and work load analysis on material handling of PT. XYZ. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 528(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/528/1/012030>.
- [52] Adar, T., ve Delice, E. K. (2020). Şehir içi toplu taşıma şoförlerinin toplam iş yüklerinin fiziksel ve zihinsel iş yükü ölçütlerine göre yeni bir yaklaşımla karşılaştırılması. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26(1).
- [53] Herrera, O., ve Davilla, M. (2020). Ergonomic diagnosis of postural changes and ergonomic risk assessment of a left-handed user in the operation of a drill press, using the REBA, RULA and OCRA Checklist methods. *Industrial Data*, 22(2), 139–156. <https://doi.org/10.15381/idata.v22i2.14636>.
- [54] Lafcı, Ç. (2021). *A Hybrid Model for the Assessment of Ergonomic Risk Factors in Logistics Industry (Issue January)* [Yüksek Lisans Tezi]. Yaşar Üniversitesi.

- [55] Yomralıoğlu, E. (2021). *Ergonomic risk assessment in a cable manufacturing factory: Application of OWAS, cornell musculoskeletal discomfort questionnaire and hmd method* [Yüksek Lisans Tezi]. Üsküdar Üniversitesi.
- [56] Zorlutuna, A., ve Kılıç, H. S. (2021). İnşaat sektöründeki ergonomik risklerin değerlendirilmesi ve bir uygulama. *International Journal of Advances in Engineering and Pure Sciences*. <https://doi.org/10.7240/jeps.876378>.
- [57] Battini, D., Berti, N., Finco, S., Guidolin, M., Reggiani, M., ve Tagliapietra, L. (2022). WEM-Platform: A real-time platform for full-body ergonomic assessment and feedback in manufacturing and logistics systems. *Computers and Industrial Engineering*, 164. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107881>
- [58] Dadashi, N., Lawson, G., Marshall, M., ve Stokes, G. (2022). Cognitive and metabolic workload assessment techniques: A review in automotive manufacturing context. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing*, 32(1). <https://doi.org/10.1002/hfm.20928>.
- [59] Lin, P. C., Chen, Y. J., Chen, W. S., ve Lee, Y. J. (2022). Automatic real-time occupational posture evaluation and select corresponding ergonomic assessments. *Scientific Reports*, 12(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-05812-9>.
- [60] Cimino, A., Gnoni, M. G., Longo, F., ve Nicoletti, L. (2023). A risk assessment framework based on ergonomic methods and AHP for prioritizing interventions to prevent container terminal operator's musculoskeletal disorders. *Safety Science*, 159. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2022.106017>.
- [61] Salvesson, M. E. (1955). The assembly line balancing problem. *The Journal of Industrial Engineering*, 6(3), 18–25.
- [62] Carnahan, B. J., Norman, B. A., ve Redfern, M. S. (2001). Incorporating physical demand criteria into assembly line balancing. *IIE Transactions (Institute of Industrial Engineers)*, 33(10). <https://doi.org/10.1080/07408170108936880>.
- [63] Otto, A., ve Scholl, A. (2011). Incorporating ergonomic risks into assembly line balancing. *European Journal of Operational Research*, 212(2). <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2011.01.056>.
- [64] Cheshmehgaz, H. R., Haron, H., Kazemipour, F., ve Desa, M. I. (2012). Accumulated risk of body postures in assembly line balancing problem and modeling through a multi-criteria fuzzy-genetic algorithm. *Computers and Industrial Engineering*, 63(2). <https://doi.org/10.1016/j.cie.2012.03.017>.
- [65] Benedetto, R. D., ve Fanti, M. (2012). An integrated tool to support engineers for WMSDs risk assessment during the assembly line balancing. *Work*, 41(SUPPL.1). <https://doi.org/10.3233/WOR-2012-0460-2329>.
- [66] Xu, Z., Ko, J., Cochran, D. J., ve Jung, M. C. (2012). Design of assembly lines with the concurrent consideration of productivity and upper extremity musculoskeletal disorders using linear models. *Computers and Industrial Engineering*, 62(2). <https://doi.org/10.1016/j.cie.2011.10.008>.
- [67] Çelik, E. (2012). *U-Type Assembly Line Balancing Problem Considering Ergonomics* [Yüksek Lisans Tezi]. İstanbul Teknik Üniversitesi.

- [68] Baykasoğlu, A., ve Akyol, S. D. (2014). Ergonomic Assembly Line Balancing. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 29(4), 785–792.
- [69] Battini, D., Delorme, X., Dolgui, A., Persona, A., ve Sgarbossa, F. (2016). Ergonomics in assembly line balancing based on energy expenditure: A multi-objective model. *International Journal of Production Research*, 54(3). <https://doi.org/10.1080/00207543.2015.1074299>.
- [70] Takanokura, M., Tanaka, T., Watanabe, I., Kakehi, M., Nojiri, H., Murata, H., Utsuki, H., Uchida, A., ve Nakamura, M. (2017). Posture-based risk assessment for improvement of physical workload: Case study for an assembly line. *Journal of Japan Industrial Management Association*, 67(4E). <https://doi.org/10.11221/jima.67.338>.
- [71] Abdous, M. A., Delorme, X., Battini, D., Sgarbossa, F., ve Berger-Douce, S. (2018). Multi-objective optimization of assembly lines with worker's fatigue consideration. *IFAC-PapersOnLine*, 51(11). <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.400>.
- [72] Kahya, E., ve Yetkin, B. N. (2019). A new model proposal for ergonomic assembly line balancing. *Journal of Engineering Sciences and Design*, 7(4), 767–778.
- [73] Zhang, Z., Tang, Q. H., Ruiz, R., ve Zhang, L. (2020). 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. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2020.104905>.
- [74] Ozdemir, R., Sarigol, I., AlMutairi, S., AlMeea, S., Murad, A., Naqi, A., ve AlNasser, N. (2021). Fuzzy multi-objective model for assembly line balancing with ergonomic risks consideration. *International Journal of Production Economics*, 239. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2021.108188>.
- [75] Rabbani, M., Mokhtarzadeh, M., Manavizadeh, N., ve Farsi, A. (2021). Solving a bi-objective mixed-model assembly-line sequencing using metaheuristic algorithms considering ergonomic factors, customer behavior, and periodic maintenance. *Opsearch*, 58(3). <https://doi.org/10.1007/s12597-020-00489-y>.
- [76] Zamzam, N., El-Kharbotly, A. K., ve Sadek, Y. (2021). Balancing time and physical effort in two-sided assembly lines. *Ain Shams Engineering Journal*. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.02.009>.
- [77] Junior, M. C. P., Michels, A. S., ve Magatão, L. (2023). An exact method to incorporate ergonomic risks in Assembly Line Balancing Problems. *Computers and Industrial Engineering*, 109414. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109414>.
- [78] Mura, M. D., ve Dini, G. (2023). Improving ergonomics in mixed-model assembly lines balancing noise exposure and energy expenditure. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 40. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2022.11.005>.
- [79] Jaturanonda, C., Nanthavanij, S., ve Das, S. K. (2013). Heuristic procedure for the assembly line balancing problem with postural load smoothness.



- International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 19(4).  
<https://doi.org/10.1080/10803548.2013.11077017>.
- [80] Battini, D., Delorme, X., Dolgui, A., ve Sgarbossa, F. (2015). Assembly line balancing with ergonomics paradigms: Two alternative methods. *IFAC-PapersOnLine*, 28(3). <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.145>.
- [81] Barathwaj, N., Raja, P., ve Gokulraj, S. (2015). Optimization of assembly line balancing using genetic algorithm. *Journal of Central South University*, 22(10). <https://doi.org/10.1007/s11771-015-2940-9>.
- [82] Bautista, J., Batalla-García, C., ve Alfaro-Pozo, R. (2016). Models for assembly line balancing by temporal, spatial and ergonomic risk attributes. *European Journal of Operational Research*, 251(3). <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.12.042>.
- [83] Li, Z., Tang, Q., ve Zhang, L. P. (2016). Minimizing energy consumption and cycle time in two-sided robotic assembly line systems using restarted simulated annealing algorithm. *Journal of Cleaner Production*, 135. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.131>.
- [84] Baykasoglu, A., Tasan, S. O., Tasan, A. S., ve Akyol, S. D. (2017). Modeling and solving assembly line design problems by considering human factors with a real-life application. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing*, 27(2). <https://doi.org/10.1002/hfm.20695>.
- [85] Bortolini, M., Faccio, M., Gamberi, M., ve Pilati, F. (2017). Multi-objective assembly line balancing considering component picking and ergonomic risk. *Computers and Industrial Engineering*, 112. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.08.029>.
- [86] Zülch, M., ve Zülch, G. (2017). Production logistics and ergonomic evaluation of U-shaped assembly systems. *International Journal of Production Economics*, 190. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2017.01.004>.
- [87] Tiacci L. ve Mimmi M. (2018). Integrating ergonomic risks evaluation through OCRA index and balancing/sequencing decisions for mixed model stochastic asynchronous assembly lines. *Omega (United Kingdom)*, vol. 78. doi: 10.1016/j.omega.2017.08.011.
- [88] Finco, S., Battini, D., Delorme, X., Persona, A., ve Sgarbossa, F. (2018). Heuristic methods to consider rest allowance into assembly balancing problem. *IFAC-PapersOnLine*, 51(11). <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.395>.
- [89] Şahin, B. N., ve Kahya, E. (2018). Hedef Programlama Modeli ile Ergonomik Kısıtlar Altında Montaj Hattı Dengelemesi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 6(0). <https://doi.org/10.21923/jesd.358709>.
- [90] Tiacci, L. (2018). The problem of assigning rest times to reduce physical ergonomic risk at assembly lines. *IFAC-PapersOnLine*, 51(11). <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.399>.
- [91] Mura, M. D., ve Dini, G. (2022). Job rotation and human–robot collaboration for enhancing ergonomics in assembly lines by a genetic algorithm. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 118(9–10). <https://doi.org/10.1007/s00170-021-08068-1>.

- [92] Weckenborg, C., Thies, C., ve Spengler, T. S. (2022). Harmonizing ergonomics and economics of assembly lines using collaborative robots and exoskeletons. *Journal of Manufacturing Systems*, 62. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.02.005>.
- [93] Yetkin, B. N., ve Kahya, E. (2022). A bi-objective ergonomic assembly line balancing model with conic scalarization method. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing*, 32(6). <https://doi.org/10.1002/hfm.20967>.
- [94] Chutima, P., ve Khotsaenlee, A. (2022). Multi-objective parallel adjacent U-shaped assembly line balancing collaborated by robots and normal and disabled workers. *Computers and Operations Research*, 143. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2022.105775>.
- [95] Abdous, M. A., Delorme, X., Battini, D., Sgarbossa, F., ve Berger-Douce, S. (2023). Assembly line balancing problem with ergonomics: a new fatigue and recovery model. *International Journal of Production Research*, 61(3). <https://doi.org/10.1080/00207543.2021.2015081>.
- [96] Mura, M. D., ve Dini, G. (2023). Sensitivity analysis and validation of a genetic approach to enhance ergonomics in assembly lines. *Production Engineering*, 0123456789. <https://doi.org/10.1007/s11740-023-01219-1>.
- [97] Duleba, S., Kutlu Gündoğdu, F., ve Moslem, S. (2021). Interval-Valued Spherical Fuzzy Analytic Hierarchy Process Method to Evaluate Public Transportation Development. *Informatica*, 32(4). <https://doi.org/10.15388/21-infor451>.
- [98] Chiasson, M. ève, Imbeau, D., Aubry, K., ve Delisle, A. (2012). Comparing the results of eight methods used to evaluate risk factors associated with musculoskeletal disorders. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 42(5). <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2012.07.003>.
- [99] Hignett, S., ve McAtamney, L. (2000). Rapid Entire Body Assessment (REBA). *Applied Ergonomics*, 31(2). [https://doi.org/10.1016/S0003-6870\(99\)00039-3](https://doi.org/10.1016/S0003-6870(99)00039-3).
- [100] Li, G., ve Buckle, P. (2000). Evaluating change in exposure to risk for musculoskeletal disorders - A practical tool. *Proceedings of the XIVth Triennial Congress of the International Ergonomics Association and 44th Annual Meeting of the Human Factors and Ergonomics Association, "Ergonomics for the New Millennium."* <https://doi.org/10.1177/154193120004403001>.
- [101] David, G., Woods, V., Li, G., ve Buckle, P. (2008). The development of the Quick Exposure Check (QEC) for assessing exposure to risk factors for work-related musculoskeletal disorders. *Applied Ergonomics*, 39(1). <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2007.03.002>.
- [102] Kahya, E., ve Söylemez, S. (2019). Jant Sektöründe QEC ve REBA Yöntemleriyle Ergonomik Risk Değerlendirmesi. *Karaelmas İş Sağlığı ve Güvenliği Dergisi*. <https://doi.org/10.33720/kisgd.644584>.
- [103] Colombini, D., ve Occhipinti, E. (2006). Preventing upper limb work-related musculoskeletal disorders (UL-WMSDs): New approaches in job (re)design

and current trends in standardization. *Applied Ergonomics*, 37(4 SPEC. ISS.). <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2006.04.008>.

- [104] Kristensen, T. S. (2010). A questionnaire is more than a questionnaire. *In Scandinavian Journal of Public Health* (Vol. 38, Issue SUPPL. 3). <https://doi.org/10.1177/1403494809354437>.
- [105] Akalp, G., ve Özok, A. F. (2017). Ergonomik Risklerin Bulanık Mantık Yöntemi İle Modellenmesi ve Bir Uygulama. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 5(0). <https://doi.org/10.21923/jesd.19802>.
- [106] Aziz, F. A., Ghazalli, Z., ve Mohd Zuki Mohamed, N. (2020). A web-based ergonomics assessment system for prioritizing critical work-related musculoskeletal disorders risk factor. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 788(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/788/1/012024>.
- [107] Delice, E. K., ve Can, G. F. (2020). A new approach for ergonomic risk assessment integrating KEMIRA, best–worst and MCDM methods. *Soft Computing*, 24(19). <https://doi.org/10.1007/s00500-020-05143-9>.
- [108] Aksüt, G. (2021). *Ergonomik Risklerin Değerlendirilmesi ve Personel Çizelgeleme: Tekstil Sektöründe Kadın Çalışanlar İçin Bir Uygulama* [Doktora Tezi]. Avrasya Üniversitesi.
- [109] Barbaroz, G. S. (2021). *Ofis ortamındaki fiziksel risk etmenlerinin bulanık analitik hiyerarşi prosesi ile ergonomik olarak değerlendirilmesi* [Yüksek Lisans Tezi]. İstanbul Yeni Yüzyıl Üniversitesi.
- [110] Adem, A., Çakıt, E., ve Dağdeviren, M. (2022). A fuzzy decision-making approach to analyze the design principles for green ergonomics. *Neural Computing and Applications*, 34(2). <https://doi.org/10.1007/s00521-021-06494-6>.
- [111] Raaj, Y., Idrees, H., Hidalgo, G., ve Sheikh, Y. (2019). Efficient online multi-person 2D pose tracking with recurrent spatio-temporal affinity fields. *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2019-June. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2019.00475>.
- [112] Kocabas, M., Athanasiou, N., ve Black, M. J. (2020). Vibe: Video inference for human body pose and shape estimation. *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. <https://doi.org/10.1109/CVPR42600.2020.00530>.
- [113] MassirisFernández, M., Fernández, J. Á., Bajo, J. M., ve Delrieux, C. A. (2020). Ergonomic risk assessment based on computer vision and machine learning. *Computers and Industrial Engineering*, 149. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106816>.
- [114] Fernández, M., Radoš, S., Krešimir, M., Gröller, M. E., ve Delrieux, C. (2022). ErgoExplorer: Interactive Ergonomic Risk Assessment from Video Collections. *IEEE TVCG*. <https://doi.org/https://doi.org/10.48550/arXiv.2209.05252>.
- [115] Bekdemir, P and Taşan, S. Ö. (2024). Cost-based assembly line balancing and worker-cobot assignment problem under ergonomic constraints. *Journal of the*

*Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 39:1, 461-472.  
<https://doi.org/10.17341/gazimmfd.1182311>.

- [116] Huang, Y., Sheng, B., Luo, R., Lu, Y., Fu, G. ve Yin, X. (2024). Solving human-robot collaborative mixed-model two-sided assembly line balancing using multi-objective discrete artificial bee colony algorithm. *Computers and Industrial Engineering*, vol. 187. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109776>.
- [117] Fan, C., Mei, Q. ve Li, X. (2024). 3D pose estimation dataset and deep learning-based ergonomic risk assessment in construction. *Automation in Construction*, vol. 164. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105452>.
- [118] Jorgensen, M, J., Martinez, A. ve Hakansson, N. A. (2024). Comparison of multi-task ergonomic assessment methods for risk of upper extremity and low back musculoskeletal disorders. *Applied Ergonomics*, vol. 119. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2024.104313>.



## **EKLER**

**EK A.** QEC yöntemi hızlı maruziyet kontrol listesi

**EK B.** OCRA kontrol listesi

**EK C.** Kopenhag psikososyal risk değerlendirme anketi

**EK D.** Aralık değerli küresel bulanık kümelere ilişkin tanımlar

**EK E.** IVSF-AHP yönteminin adımları

**EK F.** Kriterlerin ve alternatiflerin karar vericiler tarafından değerlendirilmesi

**EK G.** Ön montaj hattı öncelik diyagramı

**EK H.** Ana montaj hattı öncelik diyagramı

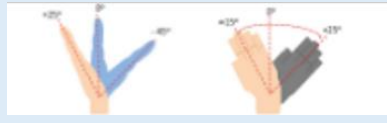
## EK A. QEC yöntemi hızlı maruziyet kontrol listesi

Çalışanın Adı/Soyadı: Hat:		Tarih / Vardiya: İstasyon:	
<p><b>Gözlemcinin Değerlendirmesi</b></p> <p><b>Bel</b></p> <p><b>A Görev yapılırken bel:(en kötü durumu seçiniz)</b></p> <p><b>A1</b> <input type="checkbox"/> Hemen hemen doğal mı?</p> <p><b>A2</b> <input type="checkbox"/> Orta derecede öne ya da yana eğilmiş veya dönmüş mü?</p> <p><b>A3</b> <input type="checkbox"/> Aşırı derecede öne ya da yana eğilmiş veya dönmüş mü?</p> <p><b>B Aşağıdakilerden <u>YALNIZCA BİRİNİ</u> seçiniz</b></p> <p><b>1. Durum Sabit, oturarak ya da ayakta yapılan görevler</b></p> <p>Sırt çoğunlukla sabit pozisyonda mı kalıyor?</p> <p><b>B1</b> <input type="checkbox"/> Hayır</p> <p><b>B2</b> <input type="checkbox"/> Evet</p> <p><b>2. Durum Kaldırma, itme/çekme ve taşıma görevleri</b></p> <p>(Bir yükün hareket ettirilmesi vb.) Sırtın Hareketi</p> <p><b>B3</b> <input type="checkbox"/> Nadiren (dakikada yaklaşık 3 kez veya daha az mı?)</p> <p><b>B4</b> <input type="checkbox"/> Sık (dakikada yaklaşık 8 kez) mi?</p> <p><b>B5</b> <input type="checkbox"/> Çok sık (dakikada yaklaşık 12 kez veya daha fazla mı?)</p>		<p><b>Çalışanın Değerlendirmesi</b></p> <p><b>H Görev yapılırken elle kaldırdığınız en fazla ağırlık?</b></p> <p><b>H1</b> <input type="checkbox"/> Hafif (5 kg veya daha az)</p> <p><b>H2</b> <input type="checkbox"/> Orta (6-10 kg)</p> <p><b>H3</b> <input type="checkbox"/> Ağır (11-20 kg)</p> <p><b>H4</b> <input type="checkbox"/> Çok ağır (20 kg'dan fazla)</p> <p><b>J Görevi yaparken günde ortalama ne kadar zaman harcıyorsunuz?</b></p> <p><b>J1</b> <input type="checkbox"/> 2 saatten daha az</p> <p><b>J2</b> <input type="checkbox"/> 2-4 saat</p> <p><b>J3</b> <input type="checkbox"/> 4 saatten daha fazla</p> <p><b>K Görev yapılırken bir elle uygulanan en fazla güç?</b></p> <p><b>K1</b> <input type="checkbox"/> Düşük (örn. 1 kg'dan daha az)</p> <p><b>K2</b> <input type="checkbox"/> Orta (örn. 1-4 kg)</p> <p><b>K3</b> <input type="checkbox"/> Yüksek (örn. 4 kg'dan daha fazla)</p>	
<p><b>Omuz/Kol</b></p> <p><b>C Görev yapılırken eller: (en kötü durumu seçiniz)</b></p> <p><b>C1</b> <input type="checkbox"/> Bel seviyesinde ya da daha aşağıda mı?</p> <p><b>C2</b> <input type="checkbox"/> Yaklaşık göğüs seviyesinde mi?</p> <p><b>C3</b> <input type="checkbox"/> Omuz seviyesinde ya da daha yukarıda mı?</p> <p><b>D Omuz/kol hareketi:</b></p> <p><b>D1</b> <input type="checkbox"/> Nadiren (aralıklı) mı?</p> <p><b>D2</b> <input type="checkbox"/> Sık (bazı duraklamalarla düzenli hareket) mi?</p> <p><b>D3</b> <input type="checkbox"/> Çok sık (hemen hemen sürekli hareket) mi?</p>		<p><b>L Görevin gerektirdiği görsel dikkat:</b></p> <p><b>L1</b> <input type="checkbox"/> Düşük (ince ayrıntıları görmeye gerek yoktur)</p> <p><b>*L2</b> <input type="checkbox"/> Yüksek (bazı ince ayrıntıları görmek gerekli) * Eğer yüksekse belirtiniz</p> <p><b>M Görevdeyken günlük taşıt kullanma süreniz:</b></p> <p><b>M1</b> <input type="checkbox"/> Bir saatten az ya da hiç mi?</p> <p><b>M2</b> <input type="checkbox"/> Günde 1-4 saat mi?</p> <p><b>M3</b> <input type="checkbox"/> Günde 4 saatten fazla mı?</p>	
<p><b>Bilek/El</b></p> <p><b>E Görev yapılırken: (en kötü durumu seçiniz)</b></p> <p><b>E1</b> <input type="checkbox"/> Yaklaşık düzgün bilek pozisyonu mu?</p> <p><b>E2</b> <input type="checkbox"/> Eğilmiş ya da dönmüş bilek pozisyonu mu?</p> <p><b>F Benzer tekrarlı hareketler:</b></p> <p><b>F1</b> <input type="checkbox"/> Dakikada 10 kez ya da daha az mı?</p> <p><b>F2</b> <input type="checkbox"/> Dakikada 11-20 kez mi?</p> <p><b>F3</b> <input type="checkbox"/> Dakikada 20'den fazla mı?</p>		<p><b>N Görevinizde titreşimli alet kullanma süreniz:</b></p> <p><b>N1</b> <input type="checkbox"/> Bir saatten az ya da hiç mi?</p> <p><b>N2</b> <input type="checkbox"/> Günde 1-4 saat mi?</p> <p><b>N3</b> <input type="checkbox"/> Günde 4 saatten fazla mı?</p> <p><b>P Bu görevi yaparken zorluk çekiyor musunuz?</b></p> <p><b>P1</b> <input type="checkbox"/> Hiçbir zaman</p> <p><b>P2</b> <input type="checkbox"/> Bazen</p> <p><b>*P3</b> <input type="checkbox"/> Sık sık</p>	
<p><b>Boyun</b></p> <p><b>G Görev yapılırken baş/boyun eğilmiş ya da dönmüş mü?</b></p> <p><b>G1</b> <input type="checkbox"/> Hayır</p> <p><b>G2</b> <input type="checkbox"/> Evet, bazen</p> <p><b>G3</b> <input type="checkbox"/> Evet, sürekli</p>		<p><b>Q Genel olarak bu işi nasıl buluyorsunuz?</b></p> <p><b>Q1</b> <input type="checkbox"/> Hiç stresli değil mi?</p> <p><b>Q2</b> <input type="checkbox"/> Biraz stresli mi?</p> <p><b>*Q3</b> <input type="checkbox"/> Orta stresli mi?</p> <p><b>*Q4</b> <input type="checkbox"/> Çok stresli mi?</p> <p>*Eğer yüksekse aşağıda detayları belirtiniz</p>	
<p>* Gerektiğinde L, P, Q için detaylı bilgiler</p> <p>* L</p> <p>* P</p> <p>* Q</p>			

## EK B. OCRA kontrol listesi

OCRA KONTROL LİSTESİ							
Firma:			Tarih/ Vardiya:				
Departman/Bölüm:			Çalışanın Adı/Soyadı:				
Hat /Istasyon/İş/Görev:							
İşin Kısa Tanımı:							
TEKRARLANAN BİR GÖREVİN VARLIĞI = Tekrarlanan iş döngüleri veya aynı çalışma eylemlerinin zamanın %50'sinden fazla tekrarlandığı görev ile karakterize edilen görev. Tanım, risk varlığı ile eşanlamı değildir.			Evet				
			Hayır				
<b>a. TEKRAR EDEN GÖREVLERİN GÜNLÜK NET SÜRESİNİN SENTEZİ</b>							
Genel Vardiya Süresi (dk)			Etkin Vardiya Süresi (dk)				
Tekrarlanmayan Görevlerin Süresi (Örneğin: Temizlik, Sarf Malzemeleri, Vb.) (Dk)							
Vardiya Esnasında Etkili Mola Sayısı (Geri Dönüş Süreleri), Mola Süresi Yaklaşık 8 Dakika (Öğle Yemeği Molası Hariç)							
Molaların Toplam Süresi (Öğle Arası Hariç)							
Vardiya Süresine Dahil İse Öğle Aralarının Süresi (Dk)							
Diğer Mola Sayısı (Örneğin, Çalışma Zamanı Dışında Öğle Molası; Farklı Şirket Yerlerinden Seyahat Zamanı)							
<b>TEKRARLAYAN GÖREV AÇIKLAMASI:</b>							
Her bir işçi için vardiyadaki parça sayısı:			Vardiyada Tekrarlayan Görevin Net Süresi (Dk.)	0			
Gözlemlenen Çevrim Süresi (Sn):			Net Döngü Süresi (Hesaplanmış) (Saniye)				
Tanımlanmış döngüler haricinde sürekli tekrar eden eylemlerin süresi (Sn):			Gözlemlenen ve hesaplanan döngü süresi arasındaki farkın yüzdesi (kabul edilen sınır %5)				
Döngü içinde iyileşme süreleri vardır (evet ise işaretleyiniz)			Adil olmayan süre(dk)				
<b>b. VARDİYA VE MOLA SIRASINDAKİ KISA AÇIKLAMA</b>							
<b>c. ANA RİSK FAKTÖRLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ</b>							
SIKLIK/FREKANS: dinamik eylemler	Gözlemlenen teknik eylem sayısını bildirin (sağ ve sol ayrı ayrı)	Sağ	Sol	Frekans	Sağ	Sol	
	Teknik eylemler çok hızlıysa ve sayılması zorsa (> 70eylem/dk), eylemleri saymadan kutuya "X" işareti koyun						
	Kısa Kesintiler Mümkündür (Tempoyu Ayarlamak Mümkündür)	Evet	Hayır				
		x					
SIKLIK: statik eylemler	Bir nesne, gözlem süresinin 2/3'ü boyunca bir veya daha fazla statik eylem gerçekleştirerek en az 5 saniye boyunca tutuluyor mu?	Evet	Sağ	Sol			
		Hayır					
	Bir nesne, gözlem süresinin 3/3'ü boyunca bir veya daha fazla statik eylem gerçekleştirerek en az 5 saniye boyunca tutuluyor mu?	Evet					
		Hayır					
<b>ÜST EKSPERTİZİN TUHAF DURUŞLARI</b>		<b>HAREKET VE GARİP POSTUR SÜRESİ</b>		<b>SKOR</b>	<b>SAĞ</b>	<b>SOL</b>	
<b>A.Omuz- Desteksiz omuzdan tutulan kol</b>							
			Zamanın 1/3'ünden Kısa:%10-%24	2			
			1/3=Zamanın %25-%45	6			
			1/2=Zamanın %45-%50	8			
			2/3=Zamanın%51-80	12			
			3/3=zamanın %80 fazla	24			
<b>B.Dirsek-Dirsekler ani hareketler yapmaktadır.(Geniş bükülme/gerilme veya pronosupinasyon,sallantılı hareket,darbeli hareket)</b>							
			Zamanın 1/3'ünden Kısa:%10-%24	1			
			1/3=Zamanın %25-%45	2			
			1/2=Zamanın %45-%50	3,5			
			2/3=Zamanın%51-80	4			
			3/3=zamanın %80 fazla	8			

C. Bilek-Bilek bükülme uç nokta veya ters bir postura maruz kalmaktadır (bükülme, gerilme veya geniş yanal sapma)



Zamanın 1/3'ünden Kısa:%10-%24	1		
1/3=Zamanın %25-%45	2		
1/2=Zamanın %45-%50	3,5		
2/3=Zamanın%51-80	4		
3/3=zamanın %80 fazla	8		

D.EI-EI bir nesneyi kavramış veya alet tutulmuş kanca tutuşu veya farklı bir kavrama şekli



Zamanın 1/3'ünden Kısa:%10-%24	1		
1/3=Zamanın %25-%45	2		
1/2=Zamanın %45-%50	3,5		
2/3=Zamanın%51-80	4		
3/3=zamanın %80 fazla	8		

E. Ön değerlendirme iki düzeyli olarak yapılabilir

Yüksek Düzey: Belirli bir teknik faaliyet bütün zaman boyunca gerçekleştirildiğinde veya çevrim süresi 8s daha az olduğu zaman (ve üst uzuvlar açık bir şekilde kullanılıyorsa) **3 puan** atanır.

Orta Düzey: Belirli bir teknik faaliyet zamanının 2/3'ünde gerçekleştirildiğinde veya çevrim süresi 8 sn veya 15 sn arası olduğunda **1,5 puan** atanır veya postür faktörü için en yüksek değerler toplanır.

KUVVET	SÜRE	SKOR	SAĞ	SOL
--------	------	------	-----	-----

Çalışma faaliyeti ORTA KUVVET gerektirir (Borg puanı 3-4)	Zamanın 1/3'ünden Kısa:%10-%24	1		
	1/3=Zamanın %25-%45	2		
	1/2=Zamanın %45-%50	4		
	2/3=Zamanın%51-80	6		
	3/3=zamanın %80 fazla	8		
Çalışma faaliyeti YOĞUN GÜÇ gerektirir (Borg ölçeğinde 5-6-7 puan)	her 10 dakikada bir 1-2 saniyelik zirveler	4		
	zamanın yaklaşık %1'i	8		
	zamanın yaklaşık %5'i	16		
	zamanın yaklaşık %10'u veya daha fazlası	24		
Çalışma faaliyeti neredeyse MAKSİMAL GÜÇ gerektirir (Borg ölçeğinde 8 veya daha fazla puan)	her 10 dakikada bir 1-2 saniyelik zirveler	6		
	zamanın yaklaşık %1'i	12		
	zamanın yaklaşık %5'i	24		
	zamanın yaklaşık %10'u veya daha fazlası	32		

GÜÇ KULLANIMINA İLİŞKİN NOTLAR

#### İLAVE FAKTÖRLER

<b>A: Fiziko-mekanik faktörler</b>	SKOR	SAĞ	SOL
Uygun olmayan eldiven (rahatsız edici, çok kalın, yanlış beden) görev süresinin yarısından fazla kullanılmakta	2		
Dakikada iki veya daha fazla ani,sarsıntılı hareketin varlığı	2		
Saatte en az 10 tekrarlanan darbenin varlığı (vurmak için ellerin alet olarak kullanılması).	2		
Soğuk yüzeylerle temas (0°C'den az) veya soğuk odalarda görevlerin yarından fazla süre ile gerçekleştirilmesi.	2		
Titreşimli aletlerin zamanın en az üçte biri oranında kullanılması. Bu aletler yüksek derecede titreşim içeriyorsa (örn. pnömomatik çekiçler, vb.) <b>4 puan verin.</b>	2 ya da 4		
Kas ve tendon yapılarının sıkışmasına neden olan aletler kullanılır (ciltte kızarıklık, nasir, yara vb. olup olmadığını kontrol edin).	2		
Zamanın yarısından fazlası, çalışanın fiziksel olarak görmeye yakın olmasını gerektiren hassas görevleri (2 veya 3 mm'den küçük alanlardaki görevler) gerçekleştirmek için harcanır.	2		
Sürenin yarısından fazlasında aynı anda birden fazla ek faktör (örn. ....) mevcuttur.	2		
Bir veya daha fazla ek faktör (örneğin, ..... ) neredeyse tüm döngüde mevcuttur.	3		
<b>B: Sosyo-örgütsel faktörler</b>	SKOR		
Çalışma hızı makine tarafından belirlenir, ancak hızın artırılmasına veya yavaşlatılmasına izin veren "tanpon/ara stok" mevcuttur.	1		
Hız tamamen makine tarafından belirlenir (hat çok yavaş hareket eder).	1,5		
Hız tamamen makine tarafından belirlenir.	2		

Notlar:

#### d. İYİLEŞME VE SÜRE ÇARPANLARI DİKKATE ALINARAK NİHAİ KONTROL LİSTESİ PUANI

(Frekans+Kuvvet+Postür+İlave Faktör) x İyileşme Çarpanı x Süre Çarpanı=

		Sağ	Sol
NİHAİ KONTROL LİSTESİ PUANI			
VARDIYA BOYUNCA YAPILAN TEKRARLI İŞİN NET SÜRESİNİN ÇARPANI			
Tekrarlanan çalışmanın net süresi (dakika)	60-120	121-180	181-240
Duration multiplier	0,5	0,65	0,75
		0,85	0,925
		0,95	1
		1,5	
İYİLEŞME ÇARPANI			
Yeterli iyileşme süresi olmayan saat sayısı	0	0,5	1
	1,5	2	2,5
	3	3,5	4
	4,5	5	5,5
	6	6,5	7
	7,5	8	
İyileşme Çarpanı	1	1,025	1,05
	1,086	1,12	1,16
	1,2	1,265	1,33
	1,4	1,48	1,58
	1,7	1,83	2
	2,25	2,5	

OCRA Puanı	Seviye	Risk
<7,5	Yeşil	Kabul edilebilir risk
7.6-11.0	Sarı	Çok düşük risk
11.1-14.0	Açık Kırmızı	Orta-düşük risk
14.1-22.5	Kırmızı	Orta risk
≥22.5	Mor	Yüksek Risk

Notlar ve öneriler:



## EK C. Kopenhag psikososyal risk değerlendirme anketi

Kopenhag Psikososyal Risk Değerlendirme Anketi (Her soru ayrı ayrı yanıtlanmalı ve her satırda bir seçenek işaretlenmelidir.)							
S.N	Boyut	Soru	Her zaman	Sıklıkla	Bazen	Nadiren	Asla/ Neredeyse hiç
1	NT	Çok hızlı çalışmak zorunda kalır mısınız?					
2	NT	İş yükünüz eşit dağıtılmadığı için birikir mi?					
3	NT	Tüm görevlerinizi tamamlamak için zamanınızın yetmediği ne sıklıkla olur?					
4	NT	Fazla mesai yapmak zorunda kalır mısınız?					
5	BT	Çalışırken çok fazla şeye dikkat etmek zorunluluğunuz var mı?					
6	BT	İşiniz çok fazla şeyi hatırlamanızı gerektirir mi?					
7	BT	İşiniz yeni fikirler ortaya koymanızı gerektirir mi?					
8	BT	İşiniz zor kararlar vermenizi gerektirir mi?					
9	DT	İşiniz sizi duygusal olarak rahatsız edici durumlara sokar mı?					
10	DT	İşiniz size duygusal olarak bir yük getiri mi?					
11	DT	İşinize duygularınızı katar mısınız?					
12	DG	İşiniz görüşlerinizi saklamanızı gerektirir mi?					
13	DG	İşiniz duygularınızı saklamanızı gerektirir mi?					
14	DT	İşiniz gözlerinizin çok net ve keskin görmesini gerektirir mi?					
15	DT	İşiniz el, kol hareketlerinizi dikkatlice yapmanızı gerektirir mi?					
16	DT	İşiniz sürekli dikkat gerektirir mi?					
17	DT	İşiniz tamamen hatasız çalışmanızı gerektirir mi?					
18	İE	İşinize ilişkin büyük oranda etki gücünüz var mı?					
19	İE	Çalışma arkadaşınızı seçme konusunda söz hakkınız var mı?					
20	İE	Size verilen iş miktarını belirlemede etkiniz olur mu?					
21	İE	İşinizde NE yapacağınıza siz karar verebiliyor musunuz?					
22	GO	İşinizde çeşitli görevleriniz var mıdır?					
23	GO	İşiniz insiyatif almanızı gerektirir mi?					
24	GO	İşinizde yeni şeyler öğrenme olanağınız var mıdır?					
25	GO	İşinizde becerilerinizi ya da uzmanlığınızı kullanabiliyor musunuz?					
26	İÖ	İşe ne zaman ara vereceğinize karar verebiliyor musunuz?					
27	İÖ	Yıllık izin zamanınız yaklaşık olarak isteğiniz doğrultusunda mı belirlenir?					
28	İÖ	Arkadaşınızla kısa bir sohbet için işinize ara verebiliyor musunuz?					
29	İÖ	Kendi işiniz için yarım saatliğine özel bir izin almadan iş yerinden ayrılabilir misiniz?					
			<b>Oldukça büyük ölçüde</b>	<b>Büyük ölçüde</b>	<b>Az çok</b>	<b>Küçük ölçüde</b>	<b>Çok küçük ölçüde</b>
30	İA	İşinizi anlamlı buluyor musunuz?					
31	İA	Yaptığınız işin önemli olduğunu hissediyor musunuz?					
32	İA	Kendinizi işinizde motive ve ilgili hissediyor musunuz?					
33	İB	Çalışma yaşamınızın geri kalan kısmında bu işyerinde kalmak ister misiniz?					
34	İB	Başkalarına iş yerinizi anlatmaktan hoşlanır mısınız?					
35	İB	İş yerinizdeki sorunların sizin de sorununuz olduğunu hissediyor musunuz?					
36	İB	İş yerinizin sizin için çok önemli bir yer olduğunu düşünüyor musunuz?					
37	Ö	İş yerinde önemli kararlar, değişiklikler veya gelecek planlarına ilişkin önceden size bilgi verilir mi?					
38	Ö	İşinizi iyi yapabilmeniz için gerek duyduğunuz bilgiyi alıyor musunuz?					
39	RA	İş yerinizde tam olarak ne kadar söz hakkınız olduğunu biliyor musunuz?					
40	RA	İşinizin amaçları belirli midir?					
41	RA	Hangi alanların kesin olarak sizin sorumluluğunuzda olduğunu biliyor musunuz?					
42	RA	İşinizde sizden beklenenleri tam olarak biliyor musunuz?					
43	RÇ	İş yerinizde bazı kişilerin kabul ettiği bazıların kabul etmediği işler yapıyor musunuz?					
44	RÇ	İşinizde size çelişkili talepler geliyor mu?					
45	RÇ	Bazen başka türlü yapılması gerektiğini düşündüğünüz şeyleri yapmak zorunda kalıyor musunuz?					
46	RÇ	Bazen size gereksizmiş gibi görünen şeyleri yapmak zorunda kalıyor musunuz?					

Bir üst amiriniz size göre ne ölçüde...			Oldukça büyük ölçüde	Büyük ölçüde	Az çok	Küçük ölçüde	Çok küçük ölçüde
47	LK	Her bir çalışan için yeterli gelişme fırsatı sağlar?					
48	LK	Çalışanların işinden memnun olmasına öncelik verir?					
49	LK	İş planlaması konusunda iyidir?					
50	LK	Çatışmaları çözme konusunda iyidir?					
			<b>Her zaman</b>	<b>Sıklıkla</b>	<b>Bazen</b>	<b>Nadiren</b>	<b>Asla/ Neredeyse hiç</b>
51	SD	İş arkadaşlarımızdan ne sıklıkla yardım ve destek alırsınız?					
52	SD	İş arkadaşlarınız sizin işle ilgili sorunlarınızı dinlemeye ne sıklıkla istek duyar?					
53	SD	Bir üst amirinizden sıklıkla yardım ve destek alır mısınız?					
54	SD	Bir üst amiriniz sizin işle ilgili sorunlarınızı dinlemeye ne sıklıkla istek duyar?					
55	GB	İşinizi nasıl yürüttüğünüz ile ilgili olarak amiriniz sizinle ne sıklıkla konuşur?					
56	GB	İşinizi nasıl yürüttüğünüz ile ilgili olarak arkadaşlarınız sizinle ne sıklıkla konuşur?					
57	Sİ	Arkadaşlarımızdan izole edilmiş olarak mı çalışırsınız?					
58	Sİ	Çalışırken arkadaşlarımızla konuşmanız mümkün mü?					
59	TD	İş yerinde arkadaşlık ortamınız iyi midir?					
60	TD	İş yerinden arkadaşlarınız arasında iyi bir işbirliği var mı?					
61	TD	İş yerinizde kendinizi bir topluluğa ait hissediyor musunuz?					
<b><u>Aşağıdakilerden kavgi duyar mısınız?</u></b>							
62	İG	İşsiz kalmaktan?					
63	İG	Yeni bir teknolojinin kullanımı ile işsiz kalmaktan?					
64	İG	İşsiz kalırsanız yeni bir iş bulmanızın zor olmasından?					
65	İG	İsteğiniz dışında başka bir işe transfer olmaktan?					
<b><u>İşiniz ile ilgili aşağıdaki vazılanlardan ne kadar memnunsunuz?</u></b>			<b>Çok memnun</b>	<b>Memnun</b>	<b>Memnun değil</b>	<b>Hiç memnun değil</b>	
66	İD	İleriye yönelik beklentilerinizden					
67	İD	Fiziksel çalışma koşulları					
68	İD	Yeteneklerinizin kullanılma şekli					
69	İD	Her şey dikkate alındığında genel olarak işinizden					

#### **EK D.** Aralık değerli küresel bulanık kümelere ilişkin tanımlar

IV-SFS, Duleba ve ark. [97] tarafından 2021 yılında geliştirilmiştir. IV-SFS, bir bulanık kümenin parametreleri üzerinde daha büyük bir belirsizliği tek bir nokta yerine bir aralıkla modele dâhil etmek için kullanılmaktadır. Bu nedenle, küresel bir bulanık kümenin üyelik, üyeliksizlik ve tereddüt derecesi değerlerinden emin olunmadığı durumlarda IV-SFS tercih edilmelidir [97].

#### **Tanım 1:**

$\tilde{A}_S$ ,  $U$  evrensel kümesinde tanımlı bir küresel bulanık küme ve  $\mu_{\tilde{A}_S}^L(u), v_{\tilde{A}_S}^L(u), \pi_{\tilde{A}_S}^L(u)$  ifadeleri sırasıyla  $u$ 'nun  $\tilde{A}_S$ 'ye üyelik, üye olmama, kararsızlık derecelerinin üst sınırını ve  $\mu_{\tilde{A}_S}^U(u), v_{\tilde{A}_S}^U(u), \pi_{\tilde{A}_S}^U(u)$  üyelik, üye olmama, kararsızlık derecelerinin alt sınırını göstermek üzere;

$$\begin{aligned} \tilde{A}_S = \{ & \langle u, ([\mu_{\tilde{A}_S}^L(u), \mu_{\tilde{A}_S}^U(u)], [v_{\tilde{A}_S}^L(u), v_{\tilde{A}_S}^U(u)], [\pi_{\tilde{A}_S}^L(u), \pi_{\tilde{A}_S}^U(u)]) \rangle | u \\ & \in U \} \end{aligned} \quad (D.1)$$
$$0 \leq \mu_{\tilde{A}_S}^L(u) \leq \mu_{\tilde{A}_S}^U(u) \leq 1, 0 \leq v_{\tilde{A}_S}^L(u) \leq v_{\tilde{A}_S}^U(u) \leq 1,$$
$$0 \leq (\mu_{\tilde{A}_S}^U(u))^2 + (v_{\tilde{A}_S}^U(u))^2 + (\pi_{\tilde{A}_S}^U(u))^2 \leq 1 \quad \forall u \in U$$

şeklinde tanımlanır.

$\tilde{A}_S$  aralık değerli küresel bulanık kümesi için  $\langle [\mu_{\tilde{A}_S}^L(u), \mu_{\tilde{A}_S}^U(u)], [v_{\tilde{A}_S}^L(u), v_{\tilde{A}_S}^U(u)], [\pi_{\tilde{A}_S}^L(u), \pi_{\tilde{A}_S}^U(u)] \rangle$  çifti aralık değerli küresel bulanık sayı olarak adlandırılır ve kullanım kolaylığı sağlaması açısından aşağıdaki şekilde gösterilir.

$[a, b] \subset [0,1], [c, d] \subset [0,1], [e, f] \subset [0,1]$  ve  $b^2 + d^2 + f^2 \leq 1$  olmak üzere  $\tilde{a} = \langle [a, b], [c, d], [e, f] \rangle$  'dir.

#### **Tanım 2:**

Aralık değerli küresel bulanık kümeler  $\tilde{a} = \langle [a, b], [c, d], [e, f] \rangle, \tilde{a}_1 = \langle [a_1, b_1], [c_1, d_1], [e_1, f_1] \rangle$  ve  $\tilde{a}_2 = \langle [a_2, b_2], [c_2, d_2], [e_2, f_2] \rangle$  ilişkin temel işlemler aşağıdaki gibidir:

Birleşim:

$$\begin{aligned} \tilde{a}_1 \cup \tilde{a}_2 = & \{[\max\{a_1, a_2\}, \max\{b_1, b_2\}], \\ & [\min\{c_1, c_2\}, \min\{d_1, d_2\}], [\min\{e_1, e_2\}, \min\{f_1, f_2\}]\} \end{aligned} \quad (D.2)$$

Kesişim:

$$\begin{aligned} \tilde{a}_1 \cap \tilde{a}_2 = & \{[\min\{a_1, a_2\}, \min\{b_1, b_2\}], \\ & [\max\{c_1, c_2\}, \max\{d_1, d_2\}], [\min\{e_1, e_2\}, \min\{f_1, f_2\}]\} \end{aligned} \quad (D.3)$$

Toplam:

$$\begin{aligned} \tilde{a}_1 \oplus \tilde{a}_2 = & \left\{ \left[ \left( (a_1)^2 + (a_2)^2 - (a_1)^2(a_2)^2 \right)^{\frac{1}{2}}, \left( (b_1)^2 + (b_2)^2 \right. \right. \\ & \left. \left. - (b_1)^2(b_2)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \right], [c_1, c_2, d_1, d_2], \left[ \left( (1 - (a_2)^2)(e_1)^2 + (1 \right. \right. \\ & \left. \left. - (a_1)^2)(e_2)^2 - (e_1)^2(e_2)^2 \right)^{1/2}, \left( (1 - (b_2)^2)(f_1)^2 + (1 \right. \right. \\ & \left. \left. - (b_1)^2)(f_2)^2 - (f_1)^2(f_2)^2 \right)^{1/2} \right] \right\} \end{aligned} \quad (D.4)$$

Çarpım:

$$\begin{aligned} \tilde{a}_1 \otimes \tilde{a}_2 = & \left\{ [a_1 a_2, b_1 b_2], \left[ \left( (c_1)^2 + (c_2)^2 - (c_1)^2(c_2)^2 \right)^{\frac{1}{2}}, \left( (d_1)^2 + (d_2)^2 \right. \right. \\ & \left. \left. - (d_1)^2(d_2)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \right], \left[ \left( (1 - (c_2)^2)(e_1)^2 + (1 - (c_1)^2)(e_2)^2 \right. \right. \\ & \left. \left. - (e_1)^2(e_2)^2 \right)^{1/2}, \left( (1 - (d_2)^2)(f_1)^2 + (1 - (d_1)^2)(f_2)^2 \right. \right. \\ & \left. \left. - (f_1)^2(f_2)^2 \right)^{1/2} \right] \right\} \end{aligned} \quad (D.5)$$

Bir skaler ile çarpım:  $\lambda > 0$

$$\begin{aligned} \lambda \cdot \tilde{a} = & \left\{ \left[ \left( (1 - (1 - a^2)^\lambda)^{1/2}, (1 - (1 - b^2)^\lambda)^{1/2} \right], [c^\lambda, d^\lambda], \left[ \left( (1 - a^2)^\lambda \right. \right. \right. \\ & \left. \left. - (1 - a^2 - e^2)^\lambda \right)^{1/2}, \left( (1 - b^2)^\lambda - (1 - b^2 - f^2)^\lambda \right)^{1/2} \right] \right\} \end{aligned} \quad (D.6)$$

$\lambda$ . Dereceden kuvvet:  $\lambda > 0$

$$\begin{aligned} \tilde{a}^\lambda = & \left\{ [a^\lambda, b^\lambda], \left[ \left( (1 - (1 - c^2)^\lambda)^{1/2}, (1 - (1 - d^2)^\lambda)^{1/2} \right], \left[ \left( (1 - c^2)^\lambda \right. \right. \right. \\ & \left. \left. - (1 - c^2 - e^2)^\lambda \right)^{1/2}, \left( (1 - d^2)^\lambda - (1 - d^2 - f^2)^\lambda \right)^{1/2} \right] \right\} \end{aligned} \quad (D.7)$$

**Tanım 3:**

$\lambda, \lambda_1, \lambda_2 \geq 0$  olmak üzere;

$$\tilde{a}_1 \oplus \tilde{a}_2 = \tilde{a}_2 \oplus \tilde{a}_1$$

$$\tilde{a}_1 \otimes \tilde{a}_2 = \tilde{a}_2 \otimes \tilde{a}_1$$

$$\lambda(\tilde{a}_1 \oplus \tilde{a}_2) = \lambda \cdot \tilde{a}_1 \oplus \lambda \tilde{a}_2$$

$$\lambda_1 \tilde{a} \oplus \lambda_2 \tilde{a} = (\lambda_1 + \lambda_2) \tilde{a}$$

$$\lambda_1 \tilde{a} \otimes \lambda_2 \tilde{a} = (\lambda_1 + \lambda_2) \tilde{a}$$

$$\tilde{a}^{\lambda_1} \oplus \tilde{a}^{\lambda_2} = \tilde{a}^{\lambda_1 + \lambda_2}$$

**Tanım 4:**

$w_i = (w_1, w_2, \dots, w_n)$  ağırlık vektörü ve  $w_i \in [0, 1]$ ;  $\sum_{i=1}^n w_i = 1$  olmak üzere,  $\tilde{a}_i = \langle [a_i, b_i], [c_i, d_i], [e_i, f_i] \rangle$  ifadesi, aralık değerli küresel ağırlıklı aritmetik ortalamanın (IVSWAM) bir koleksiyonunu temsil etmektedir. Bu durumda, aralık değerli küresel ağırlıklı aritmetik ortalamanın gösterimi aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir.

$$\begin{aligned} \text{IVSWAM}_w(\tilde{a}_1, \tilde{a}_2, \dots, \tilde{a}_n) &= w_1 \tilde{a}_1 \oplus w_2 \tilde{a}_2 \oplus \dots \oplus w_n \tilde{a}_n \\ &= \left\{ \left[ \left( 1 - \prod_{i=1}^n (1 - \tilde{a}_i^2)^{w_i} \right)^{\frac{1}{2}}, \left( 1 - \prod_{i=1}^n (1 - \tilde{b}_i^2)^{w_i} \right)^{\frac{1}{2}} \right], \left[ \prod_{i=1}^n c_i^{w_i}, \prod_{i=1}^n d_i^{w_i} \right], \left[ \left( \prod_{i=1}^n (1 - \tilde{a}_i^2)^{w_i} - \prod_{i=1}^n (1 - \tilde{a}_i^2 - \tilde{e}_i^2)^{w_i} \right)^{\frac{1}{2}}, \left( \prod_{i=1}^n (1 - \tilde{b}_i^2)^{w_i} - \prod_{i=1}^n (1 - \tilde{b}_i^2 - \tilde{f}_i^2)^{w_i} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \right\} \end{aligned} \quad (\text{D.14})$$

**Tanım 5:**

$w_i = (w_1, w_2, \dots, w_n)$  ağırlık vektörü ve  $w_i \in [0, 1]$ ;  $\sum_{i=1}^n w_i = 1$  olmak üzere,  $\tilde{a}_i = \langle [a_i, b_i], [c_i, d_i], [e_i, f_i] \rangle$  ifadesi, aralık değerli küresel ağırlıklı geometrik

ortalamanın (IVSWGGM) bir koleksiyonunu temsil etmektedir. Bu durumda, aralık değerli küresel ağırlıklı geometrik ortalamanın gösterimi aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$\begin{aligned}
\text{IVSWGGM}_w(\tilde{a}_1, \tilde{a}_2, \dots, \tilde{a}_n) &= \tilde{a}_1^{w_1} \otimes \tilde{a}_2^{w_2} \otimes \dots \otimes \tilde{a}_n^{w_n} \\
&= \left\{ \left[ \prod_{i=1}^n a_i^{w_i}, \prod_{i=1}^n b_i^{w_i} \right], \left[ \left( 1 - \prod_{i=1}^n (1 - \tilde{c}_i^2)^{w_i} \right)^{\frac{1}{2}}, \left( 1 - \prod_{i=1}^n (1 - \tilde{d}_i^2)^{w_i} \right)^{\frac{1}{2}} \right], \left[ \left( \prod_{i=1}^n (1 - \tilde{c}_i^2)^{w_i} - \prod_{i=1}^n (1 - \tilde{d}_i^2)^{w_i} \right)^{\frac{1}{2}}, \left( \prod_{i=1}^n (1 - \tilde{c}_i^2)^{w_i} - \prod_{i=1}^n (1 - \tilde{c}_i^2 - \tilde{e}_i^2)^{w_i} \right)^{\frac{1}{2}} \right], \left[ \left( \prod_{i=1}^n (1 - \tilde{d}_i^2)^{w_i} - \prod_{i=1}^n (1 - \tilde{d}_i^2 - \tilde{f}_i^2)^{w_i} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \right\} \quad (\text{D.15})
\end{aligned}$$

**Tanım 6:**

Skor ve doğruluk fonksiyonları kullanılarak IV-SFS'nin sıralanması şu şekilde yapılır:

$$\text{Skor}(\tilde{a}) = S(\tilde{a}) = \frac{a^2 + b^2 - c^2 - d^2 - \left(\frac{e}{2}\right)^2 - \left(\frac{f}{2}\right)^2}{2} + 1, S(\tilde{a}) \in [-1, +1] \quad (\text{D.16})$$

$$\text{Doğruluk}(\tilde{a}) = H(\tilde{a}) = \frac{a^2 + b^2 + c^2 + d^2 + e^2 + f^2}{2} + 1, H(\tilde{a}) \in [0,1] \quad (\text{D.17})$$

$\tilde{a}_1 < \tilde{a}_2$  durumu ancak ve ancak  $S(\tilde{a}_1) \leq S(\tilde{a}_2)$  ve  $H(\tilde{a}_1) < H(\tilde{a}_2)$  koşulu sağlandığında gerçekleşir.

## EK E. IVSF-AHP yönteminin adımları

Bu çalışmada kullanılan IVSF-AHP yönteminin adımları aşağıda gösterilmiştir [97];

### Adım 1: Hiyerarşik yapının oluşturulması

Karar problemi net bir şekilde tanımlanır ve ardından problem, amaç, kriterler ve alternatiflerden oluşan en az üç seviyeli bir hiyerarşik yapıya dönüştürülür. Yapının ilk seviyesinde skor endeksine dayalı amaç yer alır. İkinci seviyede kriterler ( $C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$ ) ve son seviyede ise alternatifler ( $X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$ ) bulunur.

### Adım 2: İkili karşılaştırma matrislerinin oluşturulması

Aralık değerli küresel bulanık değerlendirme matrislerini kullanarak ikili karşılaştırmalar yapılır. Bu karşılaştırmalar, Tablo E.1’de verilen dilsel önem terimlerine dayalı olarak oluşturulur.

**Tablo E.1.** Aralık değerli küresel bulanık sayılar için önem ölçeği [97].

Sözel ifadeler	Kod	$([a, b], [c, d], [e, f])$	Skor indeksi
Kesinlikle yüksek derecede önemli (AMI)	AMI	$([0.85, 0.95], [0.10, 0.15], [0.05, 0.15])$	9
Çok yüksek derecede önemli (VHI)	VHI	$([0.75, 0.85], [0.15, 0.20], [0.15, 0.20])$	7
Yüksek derecede önemli (HI)	HI	$([0.65, 0.75], [0.20, 0.25], [0.20, 0.25])$	5
Ortalama üssü derecede önemli (SMI)	SMI	$([0.55, 0.65], [0.25, 0.30], [0.25, 0.30])$	3
Eşit derecede önemli (EI)	EI	$([0.50, 0.55], [0.45, 0.55], [0.30, 0.40])$	1
Ortalama altı derecede önemli (SLI)	SLI	$([0.25, 0.30], [0.55, 0.65], [0.25, 0.30])$	1/3
Düşük derecede önemli (LI)	LI	$([0.20, 0.25], [0.65, 0.75], [0.20, 0.25])$	1/5
Çok düşük derecede önemli (VLI)	VLI	$([0.15, 0.20], [0.75, 0.85], [0.15, 0.20])$	1/7
Kesinlikle düşük derecede önemli (ALI)	ALI	$([0.10, 0.15], [0.85, 0.95], [0.05, 0.15])$	1/9

### Adım 3: Tutarlılık oranının hesaplanması

Her bir ikili karşılaştırma matrisinin tutarlılık oranı hesaplanır. Bunun için ikili karşılaştırma matrisindeki dil terimleri Tablo E.1’de karşılık gelen skor indekslerine çevrilir. Ardından klasik tutarlılık kontrol oranı formülü uygulanır. Tutarlılık oranı %10’dan küçük olduğunda ikili karşılaştırma matrislerinin tutarlı olduğu söylenebilir. Aksi halde karar vericiler kararlarını bir kez daha gözden geçirmelidir.

**Adım 4:** Uzmanlar tarafından oluşturulan karar matrislerinin birleştirilmesi

Denklem D.14 kullanılarak karar matrisleri birleştirilir.

**Adım 5:** Kriter ağırlıklarının durulaştırılması

Kriter ağırlıkları denklem D.16 ile durulaştırılır.

**Adım 6:** Kriter ağırlıklarının normalize edilmesi

Kriter ağırlıkları denklem E.1 kullanılarak normalize edilir. Normalize kriter ağırlıkları matrisinde satır bileşenlerinin aritmetik ortalaması alınarak her bir kriter için öncelik vektörü belirlenir.

$$w_j^s = \frac{S(\tilde{w}_j^s)}{\sum_{j=1}^n S(\tilde{w}_j^s)} \quad (E.1)$$

Bu hesaplamadan sonra, her bir kriter ve alt kriterin normalize edilmiş global ağırlıkları elde edilir. Problemden alternatiflerin bulunması durumunda, algoritma Adım 7 ile devam etmelidir.

**Adım 7:** Ağırlıklı karar matrisinin hesaplanması ve alternatifler açısından genel tercih ağırlıklarını bulunması.

Normalleştirilmiş global kriter ağırlıkları ( $w_j^s$ ), denklem E.2 kullanılarak karar matrisi ile çarpılır.

$$\begin{aligned} \tilde{a}_{s_{ij}} = w_j \cdot \tilde{a}_{s_i} = \{ & [(1 - (1 - a^2)^{w_j})^{1/2}, (1 \\ & - (1 - b^2)^{w_j})^{1/2}], [c^{w_j}, d^{w_j}], [(1 - a^2)^{w_j} \\ & - (1 - a^2 - e^2)^{w_j})^{1/2}, ((1 - b^2)^{w_j} \\ & - (1 - b^2 - f^2)^{w_j})^{1/2}] \} \end{aligned} \quad (E.2)$$

Her alternatif için nihai küresel bulanık AHP puanı ( $\tilde{A}$ ), denklem E.3'de verilen genel tercih ağırlıkları üzerinden aralık değerli küresel bulanık toplama operatörünün uygulanmasıyla elde edilir.

$$(\tilde{A}) = \sum_{j=1}^n \tilde{a}_{s_{ij}} = \tilde{a}_{s_{i1}} \oplus \tilde{a}_{s_{i2}} \dots \oplus \tilde{a}_{s_{in}} \quad \forall i \quad (E.3)$$

**Adım 8:** Ağırlıklı aralık değerli küresel bulanık karar matrisinin durulaştırılması



Denklem D.16 kullanarak her alternatifin nihai skoru durulaştırılır ve denklem E.1 ile durulaştırılmış değerler normalleştirilir.

**Adım 9:** Alternatifler arasındaki sıralamanın belirlenmesi

Normalleştirilmış ve durulaştırılmış nihai puanlara göre alternatifler arasındaki sıralama belirlenir. En iyi alternatif, en büyük nihai puan değerine sahiptir.



## EK F. Kriterlerin ve alternatiflerin karar vericiler tarafından değerlendirilmesi

Dilsel ölçek kullanılarak, karar vericilerin IVSF-AHP anketine verdikleri cevaplardan oluşturulan kriterler için ikili karşılaştırmalar Tablo F.1’de sunulmuştur.

**Tablo F.1.** Karar vericilere göre kriterlerin dilsel karşılaştırma matrisi.

	K1	K2	K3	K4	K5	K6
K1	EI, EI, EI, EI, EI	SMI, SMI, HI, HI, VHI	SMI, SLI, EI, SMI, SLI	SMI, HI, SMI	HI, VHI, HI, SMI, HI, SMI	SMI, EI, SMI, SMI, HI
K2		EI, EI, EI, EI, EI	SMI, VLI, LI, EI, VLI	SMI, SLI, SLI, SMI, LI	HI, SLI, SLI, SMI, LI	EI, SLI, LI, EI, SLI
K3			EI, EI, EI, EI, EI	EI, SMI, HI, SMI, SMI	HI, HI, EI, HI, HI	SMI, SMI, SMI, SMI, VHI
K4				EI, EI, EI, EI, EI	SMI, SMI, EI, SMI, SMI	SMI, SLI, SMI, SMI, SMI
K5					EI, EI, EI, EI, EI	SLI, LI, EI, SLI, SMI
K6						EI, EI, EI, EI, EI

Her bir karar vericinin Tablo E.1’deki dilsel ölçek kullanılarak alternatifleri değerlendirmesi sağlanmıştır. Değerlendiricilerin görüşleri sırasıyla aşağıda verilmiştir.

**Tablo F.2.** K1 için alternatiflerin değerlendirilmesi.

	A1	A2	A3	A4
A1	(EI, EI, EI, EI, EI)	(SMI, SLI, SLI, EI, LI)	(SMI, SMI, HI, SMI, LI)	(VHI, EI, SMI, LI, SMI)
A2		(EI, EI, EI, EI, EI)	(SMI, HI, VHI, SMI, SMI)	(VHI, HI, VHI, EI, HI)
A3			(EI, EI, EI, EI, EI)	(SMI, EI, SMI, SLI, HI)
A4				(EI, EI, EI, EI, EI)

**Tablo F.3.** K2 için alternatiflerin değerlendirilmesi.

	A1	A2	A3	A4
A1	(EI, EI, EI, EI, EI)	(SLI, SLI, SLI, SLI, LI)	(SLI, SMI, SMI, SLI, VLI)	(HI, EI, SMI, SMI, SMI)
A2		(EI, EI, EI, EI, EI)	(EI, HI, HI, EI, SLI)	(SMI, SMI, EI, EI, HI)
A3			(EI, EI, EI, EI, EI)	(SMI, EI, SLI, SLI, VHI)
A4				(EI, EI, EI, EI, EI)

**Tablo F.4.** K3 için alternatiflerin değerlendirilmesi.

	A1	A2	A3	A4
A1	(EI, EI, EI, EI, EI)	(HI, HI, HI, HI, SLI)	(HI, HI, EI, HI, SMI)	(VHI, AMI, AMI, AMI, AMI)
A2		(EI, EI, EI, EI, EI)	(SLI, SLI, LI, SLI, SMI)	(HI, HI, AMI, VHI, AMI)
A3			(EI, EI, EI, EI, EI)	(HI, AMI, AMI, VHI, AMI)
A4				(EI, EI, EI, EI, EI)

**Tablo F.5.** K4 için alternatiflerin değerlendirilmesi.

	A1	A2	A3	A4
A1	(EI, EI, EI, EI, EI)	(HI, VHI, SMI, HI, AMI)	(HI, VHI, SMI, HI, AMI)	(VHI, AMI, HI, VHI, HI)
A2		(EI, EI, EI, EI, EI)	(SLI, SLI, SLI, SLI, EI)	(VHI, EI, EI, EI, ALI)
A3			(EI, EI, EI, EI, EI)	(HI, HI, HI, HI, ALI)
A4				(EI, EI, EI, EI, EI)

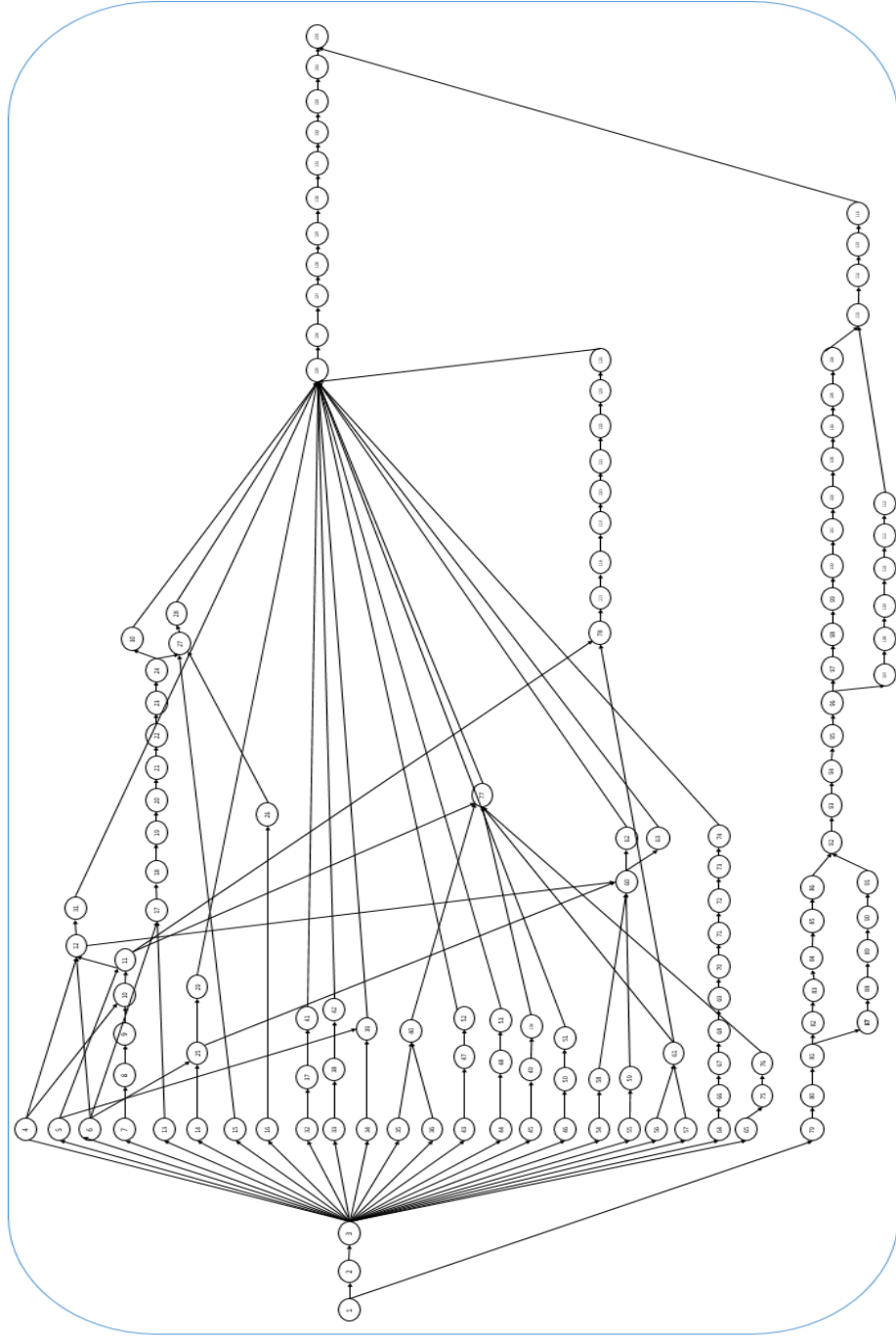
**Tablo F.6.** K5 için alternatiflerin değerlendirilmesi.

	A1	A2	A3	A4
A1	(EI, EI, EI, EI, EI)	(SMI, SMI, HI, SMI, SMI)	(SMI, SLI, EI, EI, SLI)	(VLI, SLI, LI, VLI, VLI)
A2		(EI, EI, EI, EI, EI)	(SLI, SLI, SLI, SLI, ALI)	(VLI, VLI, ALI, ALI, ALI)
A3			(EI, EI, EI, EI, EI)	(LI, LI, VLI, LI, LI)
A4				(EI, EI, EI, EI, EI)

**Tablo F.7.** K6 için alternatiflerin değerlendirilmesi.

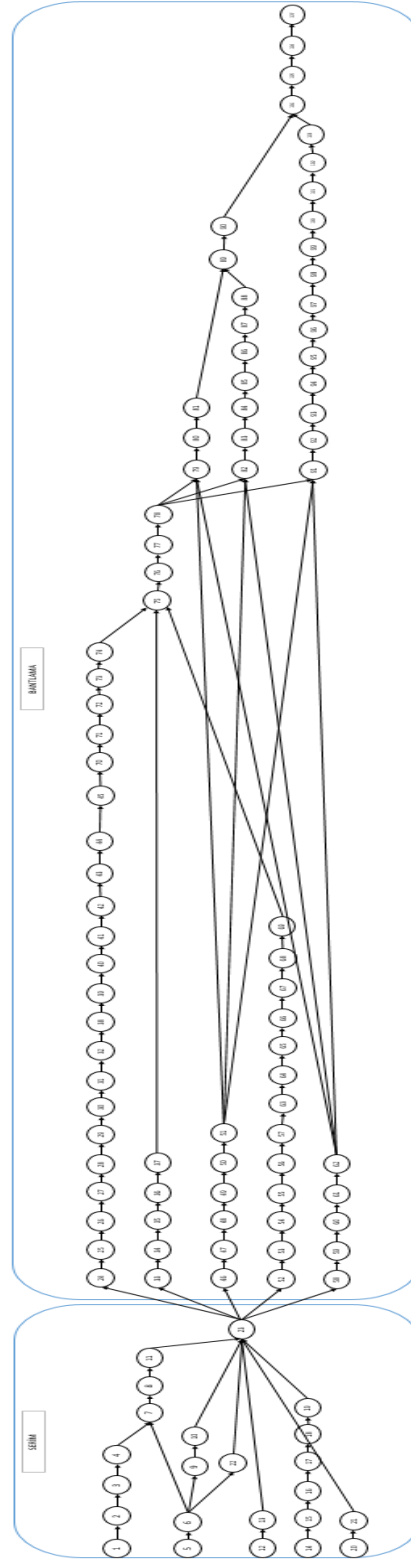
	A1	A2	A3	A4
A1	(EI, EI, EI, EI, EI)	(EI, SLI, SLI, EI, SLI)	(SMI, EI, EI, SMI, SLI)	(HI, SMI, HI, VHI, VHI)
A2		(EI, EI, EI, EI, EI)	(SMI, HI, VHI, HI, SMI)	(VHI, HI, VHI, VHI, AMI)
A3			(EI, EI, EI, EI, EI)	(HI, SMI, HI, HI, VHI)
A4				(EI, EI, EI, EI, EI)

**EK G. Ön montaj hattı öncelik diyagramı**



**Şekil G.1. Ön montaj hattı öncelik diyagramı**

**EK H.** Ana montaj hattı öncelik diyagramı



**Şekil H.1.** Ana montaj hattı öncelik diyagramı



## ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Seçil KULAÇ

### ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2011, Üniversite, Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği
- **Yüksek Lisans** : 2019, Üniversite, Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği, Endüstri Mühendisliği

### MESLEKİ DENEYİM:

- 2011-2012 yılları arasında Bezek Kauçuk San. ve Tic. A.Ş.'de üretim planlama mühendisi olarak çalıştı.
- 2012-2018 yılları arasında Yazaki Otomotiv Yan San. A.Ş.'de endüstri mühendisi ve departman lideri olarak çalıştı.
- 2021 yılından itibaren Bursa Teknik Üniversitesi'nde öğretim görevlisi olarak çalışmaktadır.

### TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER:

- Kulaç, S. ve Kiraz, A. 2024. An integrated ergonomic risk assessment framework based on fuzzy logic and IVSF-AHP for optimizing ergonomic risks in a mixed-model assembly line. *Ergonomics*.  
<https://doi.org/10.1080/00140139.2024.2368270>.

### DİĞER ESERLER:

- Kulaç, S. ve Arslankaya, S. 2024. Traffic Accident Risk Assessment with Fuzzy Logic Approach. *Trafik ve Ulaşım Araştırmaları Dergisi*, 7(1), 44-56.  
<https://doi.org/10.38002/tuad.1400522>.
- Kulaç, S. ve Çağıl G. 2019. Bir İç Lojistik Sistem Probleminin, Araç Rotalama Çözüm Yöntemleri ile İyileştirilmesi. *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, 11(2), Doi:10.29137/umagd.495518.

- Kulaç, S. ve Çağıl G. 2019. Kapasite Kısıtlı Araç Rotalama Problemi Çözüm Yöntemlerinin Bir iç Lojistik Sisteminde Uygulaması. *European Conference on Science Art & Culture*, Antalya, Türkiye.
- Kulaç, S. ve Çağıl G. 2019. Araç Rotalama Problemi Çözüm Yöntemleri ile Üretim İçi Malzeme Taşıma Sürecinin İyileştirilmesi. *European Conference on Science Art & Culture*, Antalya, Türkiye.
- Kulaç, S. ve Çağıl G. 2011. Hidrolik Hortum Sektöründe Bir Tedarik Zinciri Portalı Uygulaması. *Yöneylem Araştırması ve Endüstri Mühendisliği 31. Ulusal Kongresi*, Sakarya, Türkiye.

