
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

ROTASYON ÇİZELGELEMEDE FİZİKSEL ERGONOMİK RİSK FAKTÖRLERİNİ İÇEREN MATEMATİKSEL MODEL ÖNERİLERİ

Aylin ADEM

DOKTORA TEZİ
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

EYLÜL 2020

Aylin ADEM tarafından hazırlanan "ROTASYON ÇİZELGELEMEDE FİZİKSEL ERGONOMİK RİSK FAKTÖRLERİNİ İÇEREN MATEMATİKSEL MODEL ÖNERİLERİ" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Ana Bilim Dalında DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Metin DAĞDEVİREN

Endüstri Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum. ...……..

Başkan: Prof. Dr. Ergün ERASLAN

İş Sağlığı ve Güvenliği Ana Bilim Dalı, Yıldırım Beyazıt Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum. ……

Üye: Prof. Dr. Tamer EREN

Yöneylem Araştırması Ana Bilim Dalı, Kırıkkale Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum. ...……...

Üye: Doç. Dr. Feyzan ARIKAN

Endüstri Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum. ...……

Üye: Doç. Dr. Erman ÇAKIT

Endüstri Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum. ...……

Tez Savunma Tarihi: 01/09/2020

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Doktora Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

……

Prof. Dr. Cevriye GENCER

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Aylin ADEM
01/09/2020

ROTASYON ÇİZELGELEMEDE FİZİKSEL ERGONOMİK RİSK FAKTÖRLERİNİ İÇEREN MATEMATİKSEL MODEL ÖNERİLERİ

(Doktora Tezi)

Aylin ADEM

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Eylül 2020

ÖZET

Neredeyse tüm üretim işletmelerinde karşılaşılan fiziksel ergonomik risk parametrelerinden gürültü, titreşim, aydınlatma ve termal konfora ilişkin maruziyetler çalışanların iş yerindeki sağlığı ve güvenliği üzerinde ciddi risklere sahiptir. Bu parametrelere olan birikimli maruziyetlerin iş tatmini ve çalışan verimliliğini olumsuz etkilediği, çalışanın iş kazası yapmasına, fiziksel ve psikolojik bir takım problemlere neden olduğu, dahası meslek hastalıklarına yol açtığı bilinmektedir. Çalışanların bu riskler karşısındaki maruziyetlerini yasal sınırlarda tutmak için ekonomik, stratejik ve kolay bir yönetimsel araç olan iş rotasyon çizelgeleme modelleri kullanılabilir. Bu tez çalışması kapsamında iş rotasyon çizelgeleme modellerine ergonomik bir bakış açısı getirilmiştir. Bahsi geçen fiziksel ergonomik risk parametrelerinin klasik iş rotasyon çizelgeleri üzerindeki etkilerinin de gösterilmesinin amaçlandığı çalışmada, tek ve çok amaçlı ergonomik rotasyon modelleri geliştirilmiştir. Fiziksel risk parametrelerinin maruziyetlerinin hesaplama özellikleri gereği, geliştirilen modellerin kısıtlarında ve amaç fonksiyonlarında doğrusal olmayan ifadeler bulunmaktadır. Çok amaçlı modellerin çözümü için ağırlıklı hedef programlama yaklaşımı kullanılmıştır. Hedef ağırlıklarının belirlenmesinde, karar vericilerin karşılaştırdıkları iki faktör arasında kararsız kalabilecekleri durumlar için geliştirilen Kararsız Bulanık Dilsel Terimler setine dayalı bir karar modeli kullanılmıştır. Geliştirilen tüm matematiksel modeller GAMS 24.9.2 paket programı yardımı ile çözülmüş olup, bu çalışma ile literatürde rotasyon çizelgelerinde daha önce ele alınmamış, fiziksel ergonomik risk parametreleri ele alınarak literatüre önemli bir katkı sağlanmıştır.

Bilim Kodu : 90603
Anahtar Kelimeler : Ergonomi, fiziksel risk etmenleri, rotasyon çizelgeleme, hedef programlama
Sayfa Adedi : 192
Danışman : Prof. Dr. Metin DAĞDEVİREN

MATHEMATICAL MODEL PROPOSALS INCLUDING PHYSICAL ERGONOMIC RISK FACTORS IN ROTATION SCHEDULING

(Phd. Thesis)

Aylin ADEM

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

September 2020

ABSTRACT

Exposures related to noise, vibration, lighting, and thermal comfort, which are among the physical ergonomic risk parameters confronted in almost all production firms, have serious risks on the health and safety of the employees. It is known that cumulative exposures to these parameters negatively affect job satisfaction and employee productivity, cause occupational accidents, some physical and psychological problems, and furthermore cause occupational diseases. Job rotation scheduling models, which are an economic, strategic, and easy management tool, can be used to keep the exposure of employees against these risks within the legal limits. Within the scope of this thesis, an ergonomic perspective was brought to job rotation scheduling models. For showing the effects of the mentioned physical ergonomic risk parameters on classical job rotation schedules, single and multi-purpose ergonomic rotation models were developed in this study. There are nonlinear expressions in the constraints and objective functions of the proposed models due to the calculation features of the exposures of physical risk parameters. A weighted goal programming approach was utilized for the solution of multi-objective models. A decision model based on the Hesitant Fuzzy Linguistic Terms developed for circumstances where decision-makers may hesitate between the two factors they compare was employed in determining the weights of goals. All the developed mathematical models were solved with the help of the GAMS 24.9.2 package program. With this study, a significant contribution was made to the literature by addressing physical ergonomic risk parameters that have not been previously discussed in job rotation schedules in the literature.

Science Code : 90603
Key Words : Ergonomics, physical risk factors, rotation scheduling, goal programming
Page Number : 192
Supervisor : Prof. Dr. Metin DAĞDEVİREN

TEŞEKKÜR

Akademik hayatıma başladığım günden bu yana, engin bilgi birikimi ve hayat tecrübesi ile her anlamda yoluma ışık tutan; tez çalışmam boyunca değerli fikirleri ve yönlendirmeleri ile büyük katkılar sunan; aynı zamanda karşılaştığım tüm zorluklarda desteğini her zaman hissettirdiği ve anlayışlı yaklaşımı için çok değerli danışman hocam Sayın Prof. Dr. Metin DAĞDEVİREN'e teşekkürlerimi ve şükranlarımı sunarım.

Kıymetli fikirlerini benimle paylaşarak, tez süreci boyunca beni yönlendiren, her zaman pozitif ve teşvik edici yorumları için Tez İzleme Komitesi hocalarım, Sayın Prof. Dr. Ergün ERASLAN'a ve Sayın Doç. Dr. Feyzan ARIKAN'a çok teşekkür ederim. Bu süreçte fikirlerine başvurduğum Arş. Gör. Dr. Emre ÇALIŞKAN'a ve Arş. Gör. Dr. Ukbe Usame UÇAR'a da ayrıca teşekkür ederim.

Son olarak beni hiç yalnız bırakmayan, verdiği destekle beni hep güçlü kılan başta canım annem olmak üzere aileme de sonsuz teşekkürler.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET v

ABSTRACT vi

TEŞEKKÜR vii

İÇİNDEKİLER viii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ x

ŞEKİLLERİN LİSTESİ xv

SİMGELER VE KISALTMALAR xvi

1. GİRİŞ 1

2. İŞ ROTASYON ÇİZELGELEME 7

2.1. İş Rotasyon Çizelgeleme Literatür Araştırması 10

3. FİZİKSEL RİSK ETMENLERİ VE MATEMATİKSEL HESAPLAMALARI 23

3.1. Endüstriyel Gürültü Kavramı 24

3.1.1. Endüstriyel gürültünün ölçümü ve eşik değerler 24

3.1.2. Endüstriyel gürültünün zararlı etkileri 29

3.2. Tüm Vücut ve El-Kol Titreşimi Kavramı 31

3.2.1. El-kol titreşiminin ölçümü ve eşik değerler 32

3.2.2. El-kol titreşiminin zararlı etkileri 34

3.3. Endüstriyel Sıcaklık- Termal Konfor Kavramı 36

3.3.1. Endüstriyel sıcaklık ölçümü ve limit değerler 38

3.3.2. Endüstriyel sıcaklığın zararlı etkileri 43

3.4. Aydınlatma Kavramı 45

3.4.1. Aydınlatma ölçümü ve limit değerler 46

Sayfa

3.4.2. Yanlış aydınlatmanın zararlı etkileri 48

4. YÖNTEMLER 53

4.1. Kararsız Bulanık Dilsel Terimler Setine Dayalı Karar Modeli 53

4.2. Matematiksel Modelleme 57

4.3. Hedef Programlama 59

5. ÖNERİLEN YÖNTEM VE LİTERATÜRE KATKI 63

6. UYGULAMA 69

6.1. Problem Tanımı 69

6.2. Önerilen Matematiksel Modeller 72

6.3. Önerilen Matematiksel Modellerin Çözümleri 83

6.3.1. Tek amaçlı modellerin çözümleri 84

6.3.2. Çok amaçlı bütünleşik modellerin çözümleri 133

6.3.3. Önerilen modellerin çözüm performansları 167

7. SONUÇ ve ÖNERİLER 173

KAYNAKLAR 177

ÖZGEÇMİŞ 189

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 2.1. Literatür araştırması özet tablo 17

Çizelge 3.1. El-kol titreşimi hesaplama örnek değerler 33

Çizelge 3.2. Titreşim maruziyeti sınır değerleri 33

Çizelge 3.3. İş yüküne göre katlanılabilecek maksimum sıcaklık değerleri 40

Çizelge 3.4. İş yüküne göre katlanılabilecek maksimum sıcaklık değerleri (Al-Bouwarthan ve diğerleri, 2019) 40

Çizelge 3.5. İş yüküne göre katlanılabilecek maksimum sıcaklık değerleri (Isıya dayanıklı çalışan için) 41

Çizelge 3.6. İş yüküne göre katlanılabilecek maksimum sıcaklık değerleri (Isıya dayanıklı olmayan çalışan için) 41

Çizelge 4.1. Dilsel ifadeler için tanımlanan sayısal ölçek 55

Çizelge 4.2. En küçüklenecek sapma değişkeninin tipine karar verilmesi 60

Çizelge 4.3. Hedef programlamaya ilişkin literatür araştırması özet tablo 61

Çizelge 6.1. İş istasyonlarındaki çalışan ihtiyacı 84

Çizelge 6.2. Çalışanların iş istasyonlarındaki uzmanlık durumları (e_{ij}) 85

Çizelge 6.3. Çalışanların bir haftalık çizelgeleme periyodunda izinli olmak istedikleri gün bilgisi ($Doff_{ik}$) 86

Çizelge 6.4. Çalışanların iş istasyonlarına atanma maliyetleri(c_{ij}) 87

Çizelge 6.5. TA-MODEL-1 ile elde edilen çizelgenin birinci günü 88

Çizelge 6.6. İş istasyonlarının ergonomik özellikleri 89

Çizelge 6.7. Çalışanların iş istasyonlarında harcayacakları MOE değerleri (kcal/sa) 90

Çizelge 6.8. TA-MODEL-1'e göre çalışanların el-kol titreşim maruziyetleri (m/s^2) 91

Çizelge 6.9. TA-MODEL-1'e göre çalışanların gürültü maruziyetleri (%) 93

Çizelge 6.10. TA-MODEL-1'e göre çalışanların sıcaklık maruziyetleri (^oC) 94

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 6.11. TA-MODEL-1'e göre çalışanların MOE değerleri (kcal/sa) 95

Çizelge 6.12. TA-MODEL-1'e göre çalışanların 2.iş istasyonuna atanma sayıları 96

Çizelge 6.13. TA-MODEL-2 ile elde edilen çizelgenin birinci günü 97

Çizelge 6.14. TA-MODEL-2'ye göre çalışanların el-kol titreşim maruziyetileri (m/s^2) ... 98

Çizelge 6.15. TA-MODEL-2'ye göre çalışanların gürültü maruziyetleri (%) 99

Çizelge 6.16. TA-MODEL-2'ye göre çalışanların sıcaklık maruziyetleri (^oC) 100

Çizelge 6.17. TA-MODEL-2'ye göre çalışanların MOE değerleri(kcal/sa) 101

Çizelge 6.18. TA-MODEL-2'ye göre çalışanların 2.iş istasyonuna atanma sayıları..... 102

Çizelge 6.19. TA-MODEL-3 ile elde edilen çizelgenin birinci günü 103

Çizelge 6.20. TA-MODEL-3'e göre çalışanların el-kol titreşim maruziyetleri (m/s^2) 104

Çizelge 6.21. TA-MODEL-3'e göre çalışanların gürültü maruziyetleri (%) 105

Çizelge 6.22. TA-MODEL-3'e göre çalışanların sıcaklık maruziyetleri (^oC) 106

Çizelge 6.23. TA-MODEL-3'e göre çalışanların MOE değeri (kcal/sa) 107

Çizelge 6.24. TA-MODEL-3'e göre çalışanların 2. iş istasyonuna atanma sayıları 108

Çizelge 6.25. TA-MODEL-3'ün MOE sınırlamalarına göre amaç fonksiyonu değeri değişimi 109

Çizelge 6.26. TA-MODEL-3a ile elde edilen çizelgenin birinci günü..... 110

Çizelge 6.27. TA-MODEL-3a'ya göre çalışanların el-kol titreşim maruziyetleri(m/s^2) ... 111

Çizelge 6.28. TA-MODEL-3a'ya göre çalışanların gürültü maruziyetleri (%) 112

Çizelge 6.29. TA-MODEL-3a'ya göre çalışanların sıcaklık maruziyetleri (^oC) 113

Çizelge 6.30. TA-MODEL-3a'ya göre çalışanların MOE değerleri (kcal/sa)..... 114

Çizelge 6.31. TA-MODEL-3a'ya göre çalışanların 2. iş istasyonuna atanma sayıları 115

Çizelge 6.32. TA-MODEL-4 ile elde edilen çizelgenin birinci günü 116

Çizelge 6.33. TA-MODEL-4'e göre çalışanların el-kol titreşim maruziyetleri (m/s^2) 117

Çizelge 6.34. TA-MODEL-4'e göre çalışanların gürültü maruziyetleri (%) 118

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 6.35. TA-MODEL-4'e göre çalışanların sıcaklık maruziyetleri(^{o}C) 119

Çizelge 6.36. TA-MODEL-4'e göre çalışanların MOE değerleri (kcal/sa) 120

Çizelge 6.37. TA-MODEL-4'e göre çalışanların 2. iş istasyonuna atanma sayıları 121

Çizelge 6.38. TA-MODEL-5 ile elde edilen çizelgenin birinci günü 122

Çizelge 6.39. TA-MODEL-5'e göre çalışanların el-kol titreşim maruziyetleri (m/s^2)..... 123

Çizelge 6.40. TA-MODEL-5'e göre çalışanların gürültü maruziyetleri (%) 124

Çizelge 6.41. TA-MODEL-5'e göre çalışanların sıcaklık maruziyetleri (^{o}C)..... 125

Çizelge 6.42. TA-MODEL-5'e göre çalışanların MOE değerleri (kcal/sa) 126

Çizelge 6.43. TA-MODEL-5'e göre çalışanların 2. iş istasyonuna atanma sayıları..... 127

Çizelge 6.44. Maliyet amaçlı modellerin ergonomi performansları açısından karşılaştırmaları 127

Çizelge 6.45. Model alternatiflerinin amaç fonksiyonu değerleri..... 128

Çizelge 6.46. Çalışanların tahmin edilen vücut iç sıcaklıkları (^{o}C) 130

Çizelge 6.47. Alternatif termal konfor modelinde istasyonların WBGT değerleri..... 131

Çizelge 6.48. Alternatif termal konfor modeli ile elde edilen çizelgenin birinci günü... 131

Çizelge 6.49. Alternatif termal konfor modeline göre çalışanların vücut iç sıcaklığı 132

Çizelge 6.50. Uzmanların amaçlara ilişkin dilsel değerlendirmeleri..... 133

Çizelge 6.51. Uzmanlardan alınan dilsel değerlendirmelerin aralık biçiminde ifadesi..... 134

Çizelge 6.52. Hedeflere ilişkin kötümser ve iyimser toplamlı tercihler 135

Çizelge 6.53. Kullanılan aralıklar, aralıkların orta noktası ve hedef ağırlıkları 136

Çizelge 6.54. Hedef normalizasyonu örnek tablo-1..... 137

Çizelge 6.55. Hedef normalizasyonu örnek tablo-2..... 138

Çizelge 6.56. HP-MODEL-1 ile elde edilen çizelgenin birinci günü..... 139

Çizelge 6.57. HP-MODEL-1'e göre çalışanların el-kol titreşim maruziyetleri (m/s^2) ... 140

Çizelge 6.58. HP-MODEL-1'e göre çalışanların gürültü maruziyetleri (%)..... 141

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 6.59. HP-MODEL-1'e göre çalışanların sıcaklık maruziyetleri(^{o}C)..... 142

Çizelge 6.60. HP-MODEL-1'e göre çalışanların MOE değerleri (kcal/sa)..... 143

Çizelge 6.61. HP-MODEL-1'e göre çalışanların 2.iş istasyonuna atanma sayıları..... 144

Çizelge 6.62. HP-MODEL-2 ile elde edilen çizelgenin birinci günü..... 145

Çizelge 6.63. HP-MODEL-2'ye göre çalışanların el-kol titreşim maruziyetleri(m/s^2).. 146

Çizelge 6.64. HP-MODEL-2'ye göre çalışanların gürültü maruziyetleri (%)..... 147

Çizelge 6.65. HP-MODEL-2'ye göre çalışanların sıcaklık maruziyetleri (^{o}C)..... 148

Çizelge 6.66. HP-MODEL-2'ye göre çalışanların MOE değerleri (kcal/sa)..... 149

Çizelge 6.67. HP-MODEL-2'ye göre çalışanların 2. iş istasyonuna atanma sayıları 150

Çizelge 6.68. HP-MODEL-3 ile elde edilen çizelgenin birinci günü..... 151

Çizelge 6.69. HP-MODEL-3'e göre çalışanların el-kol titreşim maruziyetleri (m/s^2)... 153

Çizelge 6.70. HP-MODEL-3'e göre çalışanların gürültü maruziyetleri (%)..... 154

Çizelge 6.71. HP-MODEL-3'e göre çalışanların sıcaklık maruziyetleri (^{o}C)..... 155

Çizelge 6.72. HP-MODEL-3'e göre çalışanların MOE değerleri (kcal/sa)..... 156

Çizelge 6.73. HP-MODEL-3'e göre çalışanların 2.iş istasyonuna atanma sayıları..... 157

Çizelge 6.74. HP-MODEL-4 ile elde edilen çizelgenin birinci günü..... 158

Çizelge 6.75. HP-MODEL-4'e göre çalışanların el-kol titreşim maruziyetleri(m/s^2).... 160

Çizelge 6.76. HP-MODEL-4'e göre çalışanların gürültü maruziyetleri (%)..... 161

Çizelge 6.77. HP-MODEL-4'e göre çalışanların sıcaklık maruziyetleri (^{o}C)..... 162

Çizelge 6.78. HP-MODEL-4'e göre çalışanların MOE değerleri (kcal/sa)..... 163

Çizelge 6.79. HP-MODEL-4'e göre çalışanların 2. iş istasyonuna atanma sayıları..... 164

Çizelge 6.80. Çok amaçlı modellerin karşılaştırması..... 165

Çizelge 6.81. Temel atama ve aydınlatma kısıtlı modellerin çözüm performansları 168

Çizelge 6.82. Termal konfor parametreli modellerin çözüm performansı..... 169

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 6.83. Gürültü kısıtlı modelin çözüm performansı..... 169

Çizelge 6.84. Titreşim kısıtlı modelin çözüm performansı..... 170

Çizelge 6.85. Çok amaçlı modelin çözüm performansı..... 171

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 3.1. El-kol titreşimi için koordinat sistemi 32

Şekil 4.1. Üretim kuralları 56

Şekil 5.1. Önerilen yaklaşımın akış şeması 65

Şekil 6.1. Periyotlara ayrılmış bir iş günü 71

Şekil 6.2. Önerilen model alternatiflerinin hiyerarşik gösterimi 73

Şekil 6.3. MOE değerine göre amaç fonksiyonu değerlerinin değişimi 109

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	**Açıklamalar**
%	Yüzde
dB	Desibel
hz	Hertz
m	Metre
s^2	Saniye kare
^oC	Santigrat derece
sa	Saat
kcal	Kilokalori
log	Logaritma

Kısaltmalar	**Açıklamalar**
AHP	Analitik Hiyerarşi Prosesi
ÇAKV	Çok Amaçlı Karar Verme
ÇKKV	Çok Kriterli Karar Verme
ÇÖKV	Çok Ölçütlü Karar Verme
HP	Hedef Programlama
İSG	İş Sağlığı ve Güvenliği
KKD	Kişisel Koruyucu Donanım
KOBİ	Küçük ve Orta Büyüklükteki İşletmeler
KBDT	Kararsız Bulanık Dilsel Terimler
OSHA	Occupational Safety and Health Administration
OCRA	Occupational Repetitive Action
NIOSH	National İnstitute For Occupational Safety And Health
REBA	Rapid Entire Body Assessment
RULA	Rapid Upper Limb Assessment
WBGT	Wet Bulb Globe Temperature

1. GİRİŞ

Küresel rekabetin zorlu koşulları altında faaliyetlerine devam eden işletmelerin, üretimdeki sürdürülebilirliği sağlayabilmek için sürekli kontrol etmesi gereken, işletme faktörleri olarak da bilinen bir takım etmenler bulunmaktadır. Bu faktörler (makine, hammadde, insan gücü, sermaye, yönetimsel araçlar) içinde, yönetilmesi diğerlerine nazaran daha zor olan insan kaynağı oldukça kritik ve kıymetlidir. Üretimin sorunsuz devam edebilmesi, işletme ortamındaki diğer faktörlere (sermaye, makine-teçhizat vb.) olduğu kadar, hatta daha da yüksek oranda insan kaynağının sağlıklı ve konforlu olmasına bağlıdır. İnsan kaynağından en yüksek verimi alabilmek için yapılması gerekenler, diğer faktörlerde olduğu gibi bir takım matematiksel hesaplamalar ile sınırlı değildir. Duygusal bir varlık olması sebebi ile üretimdeki insan kaynağı, diğer işletme faktörlerinden ayrılmaktadır. Bu kaynağın güvende tutulup, motivasyonun artırılmasının üretimdeki sürdürülebilirliğin ve istenilen kalite seviyelerinin sağlanmasına diğer faktörlerden daha fazla hizmet verebileceği yadsınamaz bir gerçektir. İnsan kaynağının en aktif rol aldığı üretim ortamlarının çalışanların fizyolojik ve psikolojik olarak kendini rahat hissedeceği şekilde düzenlenmesi gerekmektedir. Bu düzenlemeyi sağlayabilmenin yolu, işletmelerde yapılan her türlü planlama çalışmasında ergonomi ve İş Sağlığı ve Güvenliği (İSG) kriterlerine dikkat edilmesinden geçmektedir (Adem ve Dağdeviren, 2015). Özellikle işgücünün emek yoğun bir şekilde yer aldığı Küçük ve Orta Büyüklükteki İşletmeler (KOBİ) tipindeki işletmelerde fiziksel risk etmenlerinin dikkate alınması ve üretim operasyonları ile ilgili planlamaların bu çerçevede gerçekleştirilmesi, çalışanın yaşayacağı meslek hastalıklarının önüne geçilmesi açısından oldukça önem arz etmektedir. Üretim ortamında gerçekleşen her bir kaza ya da çalışanda meydana gelen her bir meslek hastalığı sadece kazayı ya da meslek hastalığını deneyimleyen çalışan için değil, üretim ortamındaki diğer çalışanlar, işverenler, ilgili çalışanın ailesi ve ülke ekonomisi açısından da ciddi sonuçları olan olgulardır. Çalışanların iş kazası ya da meslek hastalığı neticesinde iş göremezlik raporu almaları, ya da kötü bir sonuç olan hayatları kaybetmeleri, yetişmiş iş gücünden mahrum kalmak gibi birçok olumsuz sonucu da beraberinde getirmektedir.

Çalışanların iş yerindeki güvenliği konusunda genelde çalışanların tekrarlı hareketlerinin en aza indirilmesi gibi duruş bozukluklarına ilişkin tedbirler ilk anda akla gelse de; gürültü, titreşim, termal konfor gibi fiziksel ergonomik risk parametreleri de çalışanın iş yerindeki

sağlığı ve güvenliği ile doğrudan ilişkilidir. Bu etmenlerin birikimli etkisi çalışanların ciddi sağlık sorunları ile karşı karşıya kalmalarında etkin rol oynayabilir. Fiziksel ergonomik risk parametrelerinin çalışanlarda oluşturabileceği sağlık sorunlarına örnek olarak, denge problemleri, beyaz parmak hastalığı, duyma kayıpları, tetikçi parmağı hastalığı ve görme ile ilgili genel sağlık sorunları verilebilir (İncir, 2008; Sabancı ve Sümer, 2015). Bahsi geçen fiziksel ergonomik risklerin üretim ortamında bazı protokoller izlenerek ölçülmesi gerekmektedir. Ölçme sonrasında çalışanlardaki maruziyetlerin belirlenmesi aşamasında ise teorik ve pratik bir bilgi birikimine ihtiyaç vardır. Üretim ortamlarında sıkça karşılaşılan fiziksel ergonomik risklerin nasıl değerlendirileceği ve alınan ölçümlerden yola çıkarak hesaplamaların yapılması ve ölçümlerin doğru değerlendirilmesi oldukça kritik bir konudur. Her bir fiziksel risk faktörünün çalışanda oluşturacağı maruziyetin doğru bir şekilde hesaplanması üretim ortamlarında çalışanların iş ve meslek hastalıklarına yakalanmalarını önlemek, iş verimini artırmak, üretilen ürünlerin kalitesini olumlu açıdan iyileştirmek gibi kritik işlevleri olacaktır. Maruziyet hesaplamalarının doğru yapılmasının bir diğer kritik gerekçesi ise bu verilerin üretim operasyonlarının düzenlenmesi ya da personel çizelgeleme gibi bir takım operasyonel ya da stratejik kararlarda kullanılması olarak ifade edilebilir.

Bir üretim ortamında bir takım fiziki risklerin olması kaçınılmazdır. Bu riskleri önlemede ergonomi çevrelerince kabul gören ilk yaklaşım, fiziksel risklerin ortadan kaldırılmasına yönelik idari ya da mühendislik önlemlerinin alınmasıdır. Diğer taraftan, her ne türlü önlem alınırsa alınsın üretim ortamındaki risklerin kabul edilebilir seviyeye çekilmesi çoğu durumda mümkün olmamaktadır. Bu durumda fiziki risklerin çalışan üzerinde alınacak bir takım önlemlerle engellenmesi gerekmektedir. Çalışanlar üzerinde alınacak önlemlerin büyük bir kısmı Kişisel Koruyucu Donanım (KKD) kullanımı ile sağlanmaktadır. Ancak, KKD kullanımı ile de çalışanların maruz kalacakları risklerin en aza indirilmesi durumu sağlanamamaktadır. Dahası, yapılan birçok araştırma KKD kullanımının çalışanların hareket kabiliyetlerini sınırlandırdığı, rahatsızlık hissiyatı oluşturduğu vb. gerekçelerle çalışanlar tarafından KKD kullanımının ret edildiği bilgisini vermektedir (Adem ve Dağdeviren, 2015).

Bir yandan KKD kullanımı ile çalışanlar üretim ortamındaki ergonomik risklerden korunması sağlanmaya çalışılırken, diğer yandan KKD'nin etkisi ile ikincil risklerin ortaya çıkması durumu da söz konusu olabilmektedir. Örneğin, çalışanları iş ortamındaki fiziksel

risk faktörlerinden korumak için verilen KKD'nin (örneğin: gözlük, baret, eldiven, çelik burunlu ayakkabı, iş kıyafeti vb.) kişilerin vücudunda oluşan fazla ısının uzaklaşmasını engellediği de bilinmektedir. Aslında çalışanlar mühendislik uygulamaları ile önlenemeyen risklerden KKD'ler aracılığı ile korunmaya çalışılırken hem ilgili risk faktöründen tam anlamı ile korunamazken hem de KKD'nin kendisinden kaynaklanan ikincil risklerin ortaya çıkması durumu söz konusu olmaktadır. Buradan çıkarılacak sonuç, üretim ortamında ve kişide ne kadar önlem alınırsa alınsın, bir takım risklerin yok edilmeyeceğidir. Fiziksel ergonomik parametrelere ilişkin risklerin yok edilememesi durumunda da işverenlerin çalışanların sağlığını koruma yükümlülükleri devam etmektedir. Bu yükümlülük üretimdeki sürdürülebilirlik ve kalitenin de sağlanması açısından ciddi bir süreç haline gelmektedir. Dahası üretim ortamındaki risklerin ortadan kaldırılması sırasında alınması gereken önlemler firmalar tarafından çoğu zaman maliyetli çözümler olarak değerlendirilmektedir. Üretim ortamında nihai amaç, çalışanların ortamdaki ergonomik risklerden korunması olduğu için, kullanılacak çözümün; ekonomik, hızlı ve kolay uygulanabilen bir çözüm olması gerekmektedir. Üretim ortamında fiziksel bir takım değişiklikler yapılmasının işletmelere maliyet olarak yük getirdiği varsayımından yola çıkarak, yönetimsel bir takım değişiklikler ile çalışanların ergonomik risklerden korunması işletmeler tarafından tercih edilebilecek yollardan biridir.

Çalışanların maruz kalacakları ergonomik risklerin yasal sınırlar ya da limit değerler dâhilinde tutulması için kullanılabilecek yönetimsel yollardan biri de iş rotasyon çizelgelerinin uygulanmasıdır (Frazer, Norman, Wells ve Neumann, 2003; Sana, Ospina-Mateus, Arrieta ve Chedid, 2019). İş rotasyon çizelgelerinin risklerin azaltılmasının yanı sıra çalışanların motivasyonlarının artırılması, çeşitli görevleri yapabilecek şekilde eğitilmeleri, işe bağlı stresin ve iş hayatındaki monotonluğun azaltılması, çalışanların işe devam etmeme oranının azaltılması, çalışanların değişikliklere uyum sağlama kabiliyetlerinin artırılması ve kümülatif travma hastalıklarının azaltılması gibi bir çok alanda faydası bulunmaktadır (Frazer ve diğerleri, 2003). Dahası, çalışanların farklı iş istasyonlarında görev yapması onların sadece bir görevde değil, işletmedeki tüm görevlerde çalışabilecek düzeyde uzmanlığa sahip çalışanlar olmasına katkı sağlayacaktır. Ayrıca iş rotasyon çizelgeleri uzun zaman aynı görevi yapmanın getirdiği monotonluk ve bu monotonluğa bağlı iş kazalarının da azaltılmasına da olanak sağlayacaktır.

Bu tez çalışması kapsamında üretim ortamında sıklıkla karşılaşılan ergonomik riskler temelinde iş rotasyon çizelgeleme modelleri önerilmiştir. Önerilen modeller ergonomik iş gücü çizelgeleme modelleri olarak da ifade edilebilir. Üretim ortamında sıklıkla karşılaşılan risk parametrelerinden olan endüstriyel gürültü, el-kol titreşimi, termal konfor ve aydınlatma parametreleri tez kapsamına dâhil edilmiştir. Ek olarak, ergonomik faktörler düzeyinde bir değerlendirmeyle birlikte, çalışanlar arasında sosyal barışın sağlanmasına hizmet edecek ek faktörler de dikkate alınmıştır. Bu özelliklere örnek olarak, çalışanların yetenek seviyelerine göre görevlendirilmesi, haftalık ya da aylık çizelgeleme periyotlarında izinli olmak istedikleri günlerin dikkate alınması gibi durumlar verilebilir. Aynı zamanda elde edilen iş rotasyon çizelgelerinin sürdürülebilir ve başarılı çizelgeler olabilmesi için, bu çizelgelerin hem çalışanların hem de işverenlerin isteklerini karşılaması gerekir. Bu nedenle çalışanların ergonomik açıdan korunması ve motivasyonlarının artırılmasına yönelik amaçlara hizmet eden çizelgelerin, aynı zamanda işletme amaçlarını da gözeten çizelgeler olması önemlidir. Bu çalışma kapsamında işletme amaçlarının en kıymetlilerinden biri olan atama maliyetlerinin en küçüklenmesi amacı da dikkate alınmıştır.

Tez çalışması kapsamında temel iş rotasyon çizelgelerine, fiziksel ergonomik risk parametrelerinin etkilerinin araştırılması amaçlanmaktadır. Çeşitli senaryolar altında farklılaştırılan matematiksel modellerde dikkate alınan her bir risk parametresi geliştirilen baz modele eklenerek atama maliyetlerinin en küçüklenmesi amaçlı modellerin yanı sıra, sadece ergonomik faktörlerin dikkate alındığı Çok Amaçlı Karar Verme (ÇAKV) tekniklerinden ağırlıklı Hedef Programlama (HP) yaklaşımının kullanıldığı matematiksel modeller de önerilmiştir. Ağırlıklı HP modellerinde, amaç fonksiyonundaki hedeflerin ağırlıkları belirlenirken, literatürdeki genel yaklaşımlardan biri de Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) tekniklerinden faydalanılmasıdır (Adem, 2016). Bu amaca hizmet edebilecek literatürde en yaygın şekilde kullanılan ikili karşılaştırma mantığına dayanan yöntem Analitik Hiyerarşi Prosesidir (AHP). AHP yönteminde Saaty'in geliştirdiği 1-9 skalası kullanılabileceği gibi, karar vericilerinin düşüncelerini karar verme sürecine daha kolay aktarmalarına imkân sağlamak amacı ile literatüre kazandırılan Kararsız Bulanık Dilsel Terimler (KBDT) seti de kullanılabilir (Yavuz, Oztaysi, Cevik Onar ve Kahraman, 2015). KBDT, karar vericilerin, karşılaştırdıkları iki parametre arasındaki öncelik ilişkisi ya da önem derecesine net bir şekilde karar veremeyip tereddüt ettiği durumlarda oldukça kullanışlı bir ölçektir (Rodriguez, Martinez ve Herrera, 2012). Bu çalışmada da HP

modellerinde amaç ağırlıkları belirlenirken Yavuz ve diğerleri (2015) tarafından önerilen KBDT setlerine dayalı dilsel karar modeli kullanılmıştır.

Bütün bu açıklamalar ışığında ilgili tez kapsamında ergonomi ve matematiksel modelleme konularının yapıtaşı olacağı, ÇKKV ve bulanık mantık yaklaşımlarının ise yardımcı / destekleyici faktörler olarak kullanılacağı bütünleşik, çok yönlü bir yapının ortaya konması amaçlanmaktadır. Bu amacı gerçekleştirmek üzere yapılması planlanan tez izleyen biçimde yapılandırılmıştır: ikinci bölümde iş değişim çizelgelerine ilişkin teorik bilgiler verilmiştir. Yine aynı bölümde iş değişim çizelgelerine yapılan ergonomik eklemelere ilişkin literatürde yer alan çalışmalar açıklanarak, literatürün ergonomi konusunda son yıllardaki eğilimi konusunda bilgi verilmiştir.

Çalışmanın üçüncü bölümünde, tez kapsamında ele alınan fiziksel ergonomik risk faktörlerine ilişkin çeşitli teorik bilgiler verilmiştir. Bu bölümde ilgili risk faktörlerine ilişkin kavramsal bilgi, risk faktörünün sağlığa zararlı etkileri ile risk faktörünün ölçümü ve bu faktöre ilişkin limit değerler ve yasal sınırlar hakkında da bilgi verilmiştir.

Çalışmanın dördüncü bölümünde, ilgili tez çalışmasında kullanılan yöntemler olan, ÇAKV tekniklerinden HP yaklaşımı, bulanık mantığa dayalı dilsel ölçeklerden biri olan KBDT kavramları açıklanarak, literatürdeki uygulamalarından örnekler sunulmuştur.

Çalışmanın beşinci bölümünde tez kapsamında önerilen yöntem ve bu yöntemin literatüre katkısı verilmiştir. Yine bu bölümde, çalışma boyunca izlenen yolun daha kolay bir biçimde kavranmasına olanak sağlayan bir akış şeması da gösterilmiştir.

Çalışmanın altıncı bölümünde önerilen matematiksel modeller açıklanmış ve modellerin çözümüne ve çözüm performanslarına ilişkin bilgilere yer verilmiştir.

Son olarak, çalışmanın yedinci bölümünde ise, elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır. Bu bölüm kapsamında temel atama modeli kullanılarak elde edilen çizelgelerin ergonomik parametreler eklendiğinde nasıl değiştiği, HP modellerinde modelin içindeki kısıtların elde edilen çizelgelere nasıl etki ettiği gibi soruların yanıtları verilmiştir.

2. İŞ ROTASYON ÇİZELGELEME

İş rotasyon çizelgeleme modelleri 1980'li yıllarda çalışanların esnekliğini ve performansını artırmak amacıyla organizasyonel bir strateji olarak ortaya çıkmıştır. Zaman ilerledikçe mühendisler ve yöneticiler tarafından üretim çevrim zamanlarının ve üretim maliyetlerinin azaltılması gibi çeşitli amaçlarla da kullanılmıştır (Padula, Comper, Sparer ve Dennerlein, 2017). Son yıllarda ise işe bağlı kas ve iskelet hastalıklarının önlenmesi amacı ile de kullanılmaya başlanmıştır (Frazer ve diğerleri, 2003; Mossa, Boenzi, Digiesi, Mummolo ve Romao, 2016; Sana ve diğerleri, 2019).

İş rotasyon çizelgelemenin hedeflediği çıktıya göre çeşitli tanımları mevcut ise de en genel tanımlama; belirlenen amacı gerçekleştirmek için planlama süreci boyunca çalışanların işler arasındaki en uygun değişimlerinin bulunması olarak ifade edilebilir. Eğer amaç atama maliyetlerinin en küçüklenmesi ise; bu tanım, en düşük iş atama maliyetini veren günlük, haftalık ya da aylık iş-çalışan eşleşmelerinin bulunması şekline dönüşür. Eğer işe bağlı kas ve iskelet hastalıklarının en aza indirilmesi amacı ile iş rotasyon çizelgeleme kavramı tanımlanacak ise, ilgili tanım çalışanların maruz kalacakları işe bağlı risklerin en aza indirilmesine olanak sağlayan iş atama çizelgelerinin elde edilmesi şeklinde ifade edilecektir.

İş rotasyon çizelgelerinin başarılı olması ve üretilen ürünlerin kalite açısından istenilen sınırlarda kalması için çalışanların işyerinde rotasyon yapacakları tüm görevler hakkında eğitimli olmaları gerektiği (Padula ve diğerleri, 2017), belirtilse de geliştirilen modellere çalışanların yetenek seviyelerini dikkate alan bir kısıt seti eklendiğinde bu durum iş değişim çizelgelerinin geleneksel anlamdaki başarısını etkilemeyecektir.

İş rotasyon çizelgeleme yaklaşımlarının ekonomik ve uygulaması kolay bir yönetimsel araç olduğu ve özellikle kas iskelet sistemi hastalıklarının önlenmesi açısından oldukça iyi sonuçlar verdiği bilinmektedir. İş rotasyonu bir kas grubundaki iş yükünün diğer kas gruplarına geçmesine olanak sağladığı için kas ve iskelet sistemi hastalıklarının önlenmesi için bir önlem olarak uygulanmaktadır (Moussavi, Zare, Mahdjoub ve Grunder, 2019). Bir çalışan görevler arasında rotasyona tabi tutulursa, ilgili çalışanın birden fazla kası da

harekete geçeceği için çalışanın üzerine düşen fiziksel iş yükünün de azalmasına olanak sağlanmış olmaktadır (Sana ve diğerleri, 2019).

İnsana bağlı olarak üretim yapan sistemlerde çalışanların iş tatmini, verimliliği, monotonluğun azaltılarak toplam sistem verimliliğine de olumlu etkiler sağlamak için literatürde iş rotasyon çizelgeleme yaklaşımlarına sıkça başvurulmaktadır (Mossa ve diğerleri, 2016).

İş rotasyon çizelgelerinin risklerin azaltılmasının yanı sıra çalışanların motivasyonlarının artırılması, çeşitli görevleri yapabilecek şekilde eğitilmeleri, işe bağlı stresin ve iş hayatındaki monotonluğun azaltılması, çalışanların işe devam etmememe oranın azaltılması, çalışanların değişikliklere uyum sağlama kabiliyetlerinin artırılması ve kümülatif travma hastalıklarının azaltılması gibi bir çok alanda faydası bulunmaktadır (Frazer ve diğerleri, 2003). Dahası, çalışanların farklı iş istasyonlarında görev yapması onların sadece bir görevde değil, işletmedeki tüm görevlerde çalışabilecek düzeyde çalışanlar olmasına katkı sağlayacaktır. Ayrıca iş değişim çizelgeleri uzun zaman aynı görevi yapmanın getirdiği monotonluk ve bu monotonluğa bağlı iş kazalarının da azaltılmasına olanak sağlayacaktır.

Daha açık ifade etmek gerekirse, iş rotasyonu yaklaşımı ile çalışanların iş aktivitelerinden kaynaklanan kas ve iskelet hastalıklarını, iş yükünü çalışanlar arasında eşit değere yakın bir değerde dağıtarak önlemek mümkündür. Aynı durum fiziksel ergonomik risk parametrelerinin çalışanlarda oluşturacağı meslek hastalıklarının önlenmesi bakımından da geçerlidir. Yani gürültü ya da titreşim gibi faktörlerin birikimli etkisi ile çalışanlarda oluşacak meslek hastalıkları iş rotasyon çizelgelemesi yaklaşımı ile önlenebilir. Benzer şekilde, çalışanların maruz kalacakları risk gruplarına ilişkin yasalarca belirlenen maruziyet limit değerlerinin altında risklere maruz kalmalarının sağlanması için de iş rotasyon çizelgeleri kullanılabilir.

Carnahan, Redfern ve Norman (2000)'de yayınladıkları teknik bir notta, önerdikleri ergonomi temelli iş rotasyon modeli ile bu alanda geliştirilen ilk modeli sunmuşlardır. Geliştirdikleri ve bu alanda yapılan birçok çalışmaya temel oluşturan matematiksel modeli izleyen şekilde ifade etmek mümkündür:

Setler:

$i = 1,\ldots\ldots,m$ *çalışan seti*

$j = 1,\ldots\ldots,n$ *makinelerin seti*

$t = 1,\ldots\ldots,T$ *çalışma periyodu*

Parametreler

$c_{ijt} = ergonomik\ maliyet\ değeri$

c_{ijt} parametresi kaldırma işlerindeki fiziksel stres seviyesinin ölçmeye yarayan iş şiddet indeksine (JSI- Job Severity Index) bağlı olarak işlere atanan maliyet anlamını taşımaktadır.

Karar Değişkenleri:

$$x_{ijt} = \begin{Bmatrix} 1,\ i.çalışan,\ j.görevde\ \ t.periyotta\ çalışıyor\ ise \\ 0,\ diğer\ durumda \end{Bmatrix}$$

$$\min \quad JSI \tag{2.1}$$

$$\sum_i x_{ijt} = 1 \quad \forall\ j,t \tag{2.2}$$

$$\sum_j x_{ijt} = 1 \quad \forall\ i,t \tag{2.3}$$

$$\sum_j \sum_t c_{ijt} * x_{ijt} \le JSI \quad \forall\ i \tag{2.4}$$

$$x_{ijt} \in \{0,1\} \tag{2.5}$$
$$c_{ijt} \in \Re$$

Eş. (2.1) modelin amaç fonksiyonunu göstermektedir. Modelin amaç fonksiyonu en büyük JSI değerini en küçüklemeyi amaçlamaktadır. JSI, Eş. 2.4 ile hesaplatılan çalışanların görev aldıkları istasyonlardaki iş şiddetine ilişkin toplam değerdir. Eş. 2.2 ve Eş. 2.3 atama kısıtlarıdır. Bu kısıtlar sırasıyla, her bir iş periyodunda her işe bir çalışanın, her

çalışanın da bir işe atanmasını sağlar. Eş.2.5 karar değişkenlerinin tipini gösteren işaret kısıtlarıdır.

2. 1. İş Rotasyon Çizelgeleme Literatür Araştırması

Tez çalışmasının bu kısmında literatürde, iş rotasyon çizelgelerine ergonomik özellikler ekleyen araştırmacıların çalışmalarına kronolojik olarak yer verilmiştir. Okuyucunun literatüre daha hızlı hakim olabilmesi için literatür araştırmasının sonuçları özet bir tablo ile de ifade edilmiştir (Bakınız: Çizelge 2.1). Bu bölümün son kısmında ise, literatürün "matematiksel modellerde ergonomi" konusunda son yıllardaki eğilimi ve literatürde bu konu ile ilgili olarak eksik görülen kısımlara ilişkin çıkarımlar yapılmıştır.

Carnahan ve diğerleri, (2000) çalışmalarında kaldırma işlerindeki fiziksel iş yükünü hesaplamaya yarayan iş şiddeti indeksini kullanarak bir iş değişim çizelgesi modeli önermişlerdir. Modelin çözümü için optimizasyon ve sezgisel yaklaşımları kullanan araştırmacıların nihai amacı çalışanların yaralanma potansiyellerini en aza indirecek bir iş değişim çizelgesi elde etmektir.

Seçkiner ve Kurt (2005) yaptıkları çalışmada tur ve rotasyon çizelgelerini bütünleşik bir şekilde kullanarak radyografi teknisyenlerinin üzerindeki iş yükü en küçüklenmesini amaçlamışlardır. Teknisyenlerin hizmet verdikleri hasta sayısının dengeli dağılması için teknisyenin birimler arasında rotasyon yapması gerektiğini belirtmişlerdir. Tur çizelgesinden elde ettikleri en az personel sayısını rotasyon çizelgeleme modeline bir kısıt olarak eklemişlerdir. Önerdikleri modelde teknisyen başına düşen hasta sayısını en küçüklemeyi amaçlamışlar ve modeli bir haftalık olarak düzenleyip, The General Algebraic Modeling System (GAMS) paket programında çözdürmüşlerdir. Önerdikleri modelin geçerliliğini kendi oluşturdukları rassal veriler ile test etmişlerdir.

Yaoyuenyong ve Nanthavanij (2006) yaptıkları çalışmada üretim ortamında gürültü parametresini dikkate alarak, duyma kaybının endüstriyel çalışanlar arasında çok önemli bir sorun olduğunu belirtmişlerdir. Bu problemin iş değişimi ile yok edilebileceği üzerinde durmuşlardır. Tanımladıkları problemi 0-1 tam sayılı matematiksel programlama yaklaşımı ile modellemişlerdir. Çalışmada günlük gürültü maruziyeti seviyesini 90dBA'yı geçmeyecek şekilde gerekli olan minimum çalışan sayısını belirlemeye çalışmışlar ve bu

çalışanların gürültü seviyenin bilindiği iş istasyonlarına atanmasını sağlamak için 3 yaklaşım prosedürü ve 1 çözüm algoritması göstermişlerdir. Önerdikleri modelin denenmesinde, kendi oluşturdukları rassal verileri kullanmışlardır.

Asawarungsaengkul ve Nanthavanij (2006) bir işletmede gürültüye karşı alınabilecek önlemlerin maliyetlerini (gürültü emici bariyerlerin kullanımı vb.) ve gürültü kısıtlamalarını içeren bir iş değişim modeli önerisi getirmişlerdir. Modelleme yaklaşımı olarak 0-1 tam sayılı matematiksel modelleme aracını kullanan araştırmacılar, beş makine ve dört çalışandan oluşan bir üretim ortamı olduğunu varsayarak, gürültü maruziyet dozajını dikkate alan modellerini rassal verilerle denemişlerdir.

Aryanezhad, Kheirkhah, Deljoo ve Mirzapour Al-e-hashem (2009) çalışanların maruz kalacakları gürültü maruziyeti değeri ve sırt ağrısı potansiyelleri toplamını en küçüklemeye çalışan bir iş değişim çizelgeleme modeli önerisi geliştirmişlerdir. Önerilen modelin denenmesi için araştırmacılar literatürden aldıkları altı modelin verilerini kullanarak kesin çözüm elde etmeye çalışmışlardır.

Jaber ve Neumann (2010) çalışmalarında çift kaynak kısıtlı üretim sistemlerinde işçinin yorgunluğunu ve dinlenmesini modellemişlerdir. Modelleme yaklaşımı olarak karışık tam sayılı matematiksel modelleme yaklaşımı benimseyen yazarlar LINDO programı ile önerilen modelin denemesini gerçekleştirmişlerdir.

Nanthavanij, Yaoyuenyong ve Jeenanunta (2010), yaptıkları çalışmada, gürültü üst sınırı koyarak geliştirdikleri bir iş rotasyon çizelgeleme modeli önermişlerdir. Önerdikleri modeli kendi geliştirdikleri deneme verileri ile önerdikleri sezgisel yaklaşımla çözüme ulaştırmışlardır. Araştırmacılar Yaoyuenyong ve Nanthavanij (2006) ile Asawarungsaengkul ve Nanthavanij (2006) ile aynı gürültü formülünü kullanmışlardır. Bu tez çalışmasında da, hesaplama pratikliği açısından, bahsi geçen çalışmalarda kullanılan günlük gürültü dozajı formüllerine paralel formüller kullanılmıştır.

Otto ve Scholl (2011) çalışmalarında, ergonomi kriterlerinin montaj hattı dengeleme probleminde kullanımına ilişkin bir matematiksel model geliştirmişlerdir. Modelleme aracı olarak karışık tam sayılı matematiksel modelleme yaklaşımını benimseyen araştırmacılar,

sezgisel çözüm yöntemleri ile ergonomi açısından Occupational Repetitive Action (OCRA) indeksini dikkate aldıkları modellerini çözüme kavuşturmuşlardır.

Asensio-Cuesta, Diego-Mas, Canós-Darós ve Andrés-Romano (2011) çalışmalarında çalışanların maruz kaldıkları ergonomik risklerin azaltılması için iş değişim çizelgelerinin hem çalışan hem de firma için faydalarına dikkat çekmişlerdir. Çalışmada bu iş değişim çizelgelerini hazırlamak için çok kriterli bir genetik algoritma kullanmışlardır. Yapılan çizelgelerin yorgunluk birikiminden kaynaklanan kas ve iskelet hastalıklarının önlenmesini sağlayacak en iyi, çalışan - iş atamasını sağlamasına dikkat etmişler ve kurdukları modeli bir montaj hattında uygulamışlardır.

Cheshmehgaz, Haron, Kazemipour ve Desa, (2012) çalışmalarında kötü vücut postürünün birikimli riskini dikkate alan montaj hattı dengeleme problemi üzerinde çalışmışlardır. Klasik montaj hattı dengeleme kısıtlarının yanı sıra ergonomik olarak da vücut duruşlarını da modele dâhil etmişlerdir. Klasik kısıtlardaki belirsizlikleri modele yansıtmak için bulanık HP yaklaşımını benimsemişler ve çözüm için çok kriterli bulanık genetik algoritma kullanmışlardır.

Wongwien ve Nanthavanij (2012) yaptıkları çalışmada amaçlarının rotasyona tabii tutulan çalışan sayısının en küçüklenmesi olduğunu ifade etmişler ve ergonomik tehlikeye maruz kalmanın bir kısıt olarak modele yerleştirildiği çizelgeleme problemini ele almışlardır. Problemlerini 0-1 tam sayılı programlama ile modellemişlerdir. Yazarlar her bir iş istasyonuna rasgele ergonomik risk değeri atayarak, zaman ağırlıklı ortalama ile çalışanların günlük risk maruziyetini hesaplamışlarıdır. Yazarlar kendi geliştirdikleri modelin ve yaklaşım prosedürünün denemesini kendi varsaydıkları bir iş ortamında rassal veriler ile gerçekleştirmişlerdir.

Xu, Ko, Cochran ve Jung (2012) çalışmalarında montaj hatlarının tasarımında ergonomi kriterlerini ve verimlilik olgusunu dikkate almışlardır. Üst ekstremitedeki kas-iskelet sistemi hastalıklarının engellenmesi amacıyla montaj hattı tasarımında ergonomik faktörlerin de dikkate alınması gerektiğini belirten araştırmacılar ergonomi kriterini modele entegre edebilmek için el aktivite seviyesini ölçmüşlerdir. Ergonomi ve verimlilik faktörlerini dikkate alacak şekilde tasarladıkları problemi karışık tam sayılı matematiksel

programlama yaklaşımı ile modellemişlerdir. Kesin çözüm veren paket programlar yardımı ile modellerini çözüme kavuşturmuşlardır.

Wongwien ve Nanthavanij (2013) yaptıkları çalışmada ergonomik işgücü çizelgelemesi konusunu verimlilik ve işçi memnuniyeti açısından incelemişlerdir. Günlük tehlike miktarının bir kısıt olarak modele eklemişler ve modeli karışık tam sayılı olarak modellemişlerdir. Çalışanların yetenek seviyesinin heterojen olduğunu belirtmişler ve çalışanların birlikte çalışmak istedikleri çalışanı seçmelerine fırsat vermişlerdir. Toplam sistem verimliliği ve çalışan memnuniyetinin en büyüklenmesini modele amaç olarak yerleştirmişlerdir. Önerdikleri modelin denemesini tek gün için kendi oluşturdukları rassal veriler ile yapmışlardır.

Rattanamanee ve Nanthavanij (2013) yaptıkları çalışmada işgücü çizelgeleme probleminde ergonomi kısıtını dikkate almışlardır. 6 gün için yaptıkları çizelgede iş istasyonlarına belli bir ergonomik risk değeri atayıp, çalışanların günlük olarak bu sınırı geçmeyecek şekilde makineler arasında rotasyon yapmasını sağlayacak bir model geliştirmişlerdir. Çalışmalarında iş istasyonlarının operasyon çizelgesinin bilindiğini, hangi makinenin ne zaman çalışıp, ne zaman boş kalacağının belirlendiğini varsaymışlardır. Problemlerinde ana amaç kullanılan işçi sayısının en küçüklenmesidir. Problem doğrusal tam sayılı programlama ile modellemiş ve ILOG CPLEX programı ile çözülmüştür. Modelin uygulaması türetilen sayısal veriler kullanılarak yapılmıştır.

Wang ve Liu (2014) yaptıkları çalışmada vardiyalı çalışmanın uyku düzenini bozduğunu, uykusuzluğun yorgunluğa ve performans düşüklüğüne neden olduğunu belirtmişlerdir. Bu konuya örnek olarak çalışmayı yaptıkları uçak bakım hizmetleri birimindeki çalışanların 24 saat rotasyon ile uçuşların zamanında yapılabilmesi için stres altında çalıştıkları durumunu belirtmişlerdir. Yazarlar vardiya çalışanlarının yorgunluklarını azaltmak için en uygun vardiya çizelgelemesi yapmayı amaçlamıştır. Amaçlarını gerçekleştirmek için üstel koşullu bir matematiksel model geliştirmişlerdir. Kurdukları yorgunluk modelinde çalışanların tercihlerini, yasal zorunlulukları ve iş gücü gerekleri gibi durumları da göz önüne almışlardır. Problemi karışık tam sayılı programlama ile modellemişler, Xpress IVE ile kodlayıp, farklı parametrelere göre çalıştırarak çözdürmüşlerdir.

Boenzi, Mossa, Mummolo ve Romano (2015) yaptıkları çalışmada yaşlanan çalışanların olduğu bir iş yerinde ergonomik en uygun iş değişim çizelgelerini elde etmeyi amaçlamışlardır. Yüksek tekrarlılık ancak düşük iş yükü içeren işlerin olduğu bir iş yerini temel alan araştırmacılar kurdukları modelde, ergonomik açıdan OCRA indeksini kullanmışlardır. Önerdikleri modeli kendi ürettikleri rassal veriler ile kesin çözüm veren paket programlarda denemişlerdir.

Dewi ve Septina (2015) çalışmalarında fiziksel ve zihinsel iş yükünü dikkate alan işgücü çizelgeleme modeli kurmuşlardır. Zihinsel iş yükünü NASA TLX (Task Load Index) , fiziksel iş yükünü ise kalori tüketimine göre ölçmüşlerdir. Lojistik hizmetleri sağlayan bir şirketin çalışanlarına yönelik çizelgeleme modeli kurmuşlardır.

Akbari (2015) çalışmasında yarı zamanlı çalışanların yorgunluklarını dikkate alarak tur çizelgeleme yaklaşımı geliştirmiştir. Amaç fonksiyonu olarak işçi maliyetlerini minimize ettiğini ifade eden araştırmacı çalışanların yorgunluk oranlarını dikkate alarak vardiyalara atanması problemini modellediğini belirtmiştir.

Song, Lee, Lee, Bahn, Jung ve Yun, (2016) ergonomik iş gücü çizelgeleme konusunda bir algoritma önermişlerdir. Görevle birlikte vücudun aktif olan bölgesine göre işlere spesifik puanlar atayarak, çalışanların görevlere atanmasında bu puanların toplamının en küçüklenmesini hedeflemişlerdir. Modelleme aracı olarak tam sayılı programlamayı kullanan araştırmacılar, kesin çözüm veren paket programlar ile modellerini çözmüşlerdir.

Bautista, Garcia ve Pozo (2016) çok ürünlü montaj hatlarında, ergonomik risk faktörlerine göre maksimum izin verilen risk miktarını dikkate alan bir matematiksel model geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri modeli endüstriyel ürünler üreten bir firmada uygulamışlardır.

Moussavi, Mahdjoub ve Grunder (2016) çalışmalarında çevrim süresinin kısaltılmasını amacı ile birlikte ergonomik iş gücü çizelgelemesi problemini ele almışlardır. Tam sayılı doğrusal matematiksel modelleme yaklaşımı kullanarak modelledikleri problemi, GUROBİ yazılımı ile çözmüşlerdir. Deneme verileri ile çözümledikleri problemde, ergonomik analiz olarak, boy, yaş, kişinin yetenek seviyesi ve tecrübesi durumlarını dikkate almışlardır. Montaj hattı özelinde modellediklerini problemlerinde, üretim hattının

kesintisiz bir şekilde 7 gün çalışması gerektiğini ifade etmişlerdir ve her bir çalışanın bir gün boyunca aynı işte çalışması koşulunu eklemişlerdir.

Mossa ve diğerleri (2016) OCRA indeksini dikkate alarak, verimlilik faktörünün de göz önünde alındığı iş-rotasyon çizelgelemesi üzerinde çalışmışlardır. Karışık tam sayılı modelleme yaklaşımı ile modelledikleri problemi, günlük çizelgeleme elde etmek üzere geliştirmişlerdir.

Yoon, Ko ve Jung, (2016) işlere ilişkin duruşları Rapıd Entıre Body Assessment (REBA) yöntemi ile değerlendirerek, tek günlük bir çizelge elde etmeye çalıştıkları iş değişim çizelgeleme modellerine eklemişlerdir. Bazı vücut parçalarının sürekli kullanımına dayalı kümülatif iş yükünü engellemeye çalıştıklarını belirten yazarlar bu amaç için REBA skorlarını içeren bir matematiksel model önerisinde bulunmuşlardır

Azadeh, Ravanbaskhsh, Rezaei-Malek, Sheikhalishahi, ve Moghaddam, (2017) yaptıkları çalışmada dinamik hücresel imalat sistemlerine insan faktörlerini dâhil ederek çok amaçlı bir matematiksel model geliştirmişlerdir. Maliyet, iş yükü dengelemesi gibi amaçları olan modellerinin çözümü için sezgisel algoritmalardan faydalanmışlardır.

Battini, Glock, Grosse, Persona ve Sgarbossa (2017) ergonomik ve ekonomik yönden bir çalışanın kaldırabileceği ağırlık miktarının belirlenmesi ve ne kadar çalışıp ne kadar dinleneceğini belirleyen matematiksel bir model geliştirmişlerdir. Önerdikleri yaklaşımı ergonomik parti büyüklüğü ismi ile anmışlardır.

Yıldız, Gzara ve Elhedhli (2017) yaptıkları çalışmada havayolu ekiplerinin eşleşmesine ilişkin yorgunluk durumunu dikkate alan bir modelleme gerçekleştirmişlerdir. Takımın toplam yorgunluğuna ilişkin kurdukları modeli sütün geliştirme yaklaşımı ile çözüme kavuşturmuşlardır.

Botti, Mora ve Regattieri, (2017) çalışmalarında hibrit (manuel ve makine montajının bir arada olduğu sistemler) montaj hatlarına ergonomik ve yalın üretim özelliklerinin dâhil edilmesi problemine bir matematiksel model önerisi getirmişlerdir. Ergonomik açıdan OCRA indeksinin değerleri modele dâhil edilirken, yalın üretim açısından takt zamanı,

çevrim zamanı ve tam zamanında üretim gibi prensiplerin modele dâhil edilmesine çalışılmıştır.

Wongwien ve Nanthavanij (2017) çok amaçlı ergonomik iş gücü çizelgelemesi yaptıkları çalışmalarında, iş gücü miktarı, verimlilik ve iş tatmini kriterlerini ele almışlardır. Öncelikli HP yaklaşımı ile karışık tam sayılı modelleme aracını kullanarak benimsedikleri problemi modellemişlerdir. Günlük iş rotasyon çizelgesini elde etmişlerdir.

Savino, Battini ve Riccio (2017), yaptıkları çalışmalarında yazarlar tarafından geliştirilen fiziksel iş yüküne ilişkin bir ergonomik indeks ile matematiksel modelleme yaklaşımını birleştirerek ergonomik iş değişim çizelgelerini elde etmeye çalışmışlardır.

Hochdörffer, Hedler ve Lanza, (2018) geliştirdikleri modelde, kısa dönemli planlama çalışmalarında iş değişim çizelgelerini ergonomik açıdan iş istasyonun tüm vücudu çalıştırması ya da yoğunlukla el-parmak sistemini çalıştırması özelliğini dikkate almışlardır. Çalışmalarında çözüm yaklaşımı olarak sezgisel yöntemleri kullanmışlardır.

Şenyiğit ve Atıcı (2018) geliştirdikleri matematiksel modelde, çalışanların işleri öğrenme etkilerini göz önüne almış ve Rapid Upper Limp Assessment (RULA) yöntemini kullanmışlardır. Çevrim zamanını en küçükleyen tek makine çizelgeleme modelini işe bağlı öğrenme indeksi ve RULA yöntemi ile bütünleştirerek, atama problemine dönüştürmüşlerdir.

Digiesi Facchini, Mossa ve Mummolo, (2018) çalışmalarında çalışanların duruşlarını değerlendirerek, çalışanları rotasyona tabi tutacak bir model geliştirimişlerdir. Tekrarlı hareketlerin olduğu bir iş yerinde kişilerin maruz kaldıkları riskleri en küçüklemeye dayandırdıkları modellerinde belirlenmiş bir üretim hedefine ulaşmayı da kısıt olarak eklemişlerdir.

Moussavi, Mahdjoub ve Grunder, (2018) fiziksel iş yükü ve verimlilik amaçlarını içeren çok amaçlı bir matematiksel model önerisi ile ergonomik iş değişim çizelgelerini elde etmeyi amaçlamışlardır. İşlere 1-10 arasında bir puan vererek iş yüklerini temsil etmeye çalışmışlardır. Puan olarak 4'e kadar düşük, 5-7 puan arası orta, 7'den sonra ise yüksek iş yüküne sahip işlerin olduğunu varsaymışlar ve verimlilik açısından ise üretim çevrim

zamanını dikkate alan modellerinde maksimum iş yükünün en küçüklenmesini sağlamaya çalışmışlardır.

Sana ve diğerleri (2019) iş değişim çizelgeme modeline OCRA, RULA ve National İnstitute For Occupational Safety And Health (NIOSH) kaldırma yöntemlerini birer kısıt olarak eklemişler ve genetik algoritmanın özel bir çeşidi ile çözmüşlerdir. Yazarlar, iş değişim çizelgesini kullanmalarının nedenini ise sadece tek bir çalışanı korumak yerine tüm çalışanların korunmasını sağlaması şeklinde açıklamışlardır.

Moussavi ve diğerleri (2019) çalışmalarında, 2 aşamalı bir yöntem kullanarak günlük iş değişim çizelgelerini elde etmeye çalışmışlardır. İlk aşamada işlerin fiziksel iş yüklerini hesaplamışlar, daha sonra da matematiksel modelleme ile iş değişim çizelgelerini elde etmeye çalışmışlardır.

Literatür araştırması ile ilgili özet bilgiler Çizelge 2.1'de sunulmuştur. "*" ile gösterilen yerlerdeki araştırmacılar, herhangi bir ergonomik analiz ile değil, rasgele bir değeri (0.10 gibi) o makinenin risk değeri alarak çalışmalarına eklemişlerdir.

Çizelge 2.1. Literatür araştırması özet tablo

Yazar, Yıl	Konu	Ergonomik Faktör	Modelleme Yaklaşımı	Çözüm Türü
Seçkiner ve Kurt (2005)	Tur ve rotasyon çizelgeleme	İş yükü dengeleme	0-1 Tam sayılı	Kesin
Yaoyuenyong ve Nanthavanij (2006)	Rotasyon çizelgeleme	Gürültü sınırı	0-1 Tam sayılı	Sezgisel
Asawarungsaengkul ve Nanthavanij (2006)	Personel çizelgeme	Gürültü sınırı	0-1 Tam sayılı	Kesin
Aryanezhad ve diğerleri (2009)	Personel çizelgeleme	Gürültü ve sırt ağrısı indeksi	Çok amaçlı	Kesin
Nanthavanij ve diğerleri (2010)	Rotasyon Çizelgeleme	Gürültü maruziyeti	Tam sayılı	Sezgisel
Otto ve Scholl (2011)	Montaj hattı dengeleme	OCRA indeksi	Karışık tam sayılı	Sezgisel
Asensio-Cuesta ve diğerleri (2011)	Rotasyon çizelgeleme	Yorgunluk	0-1 Tam sayılı	Sezgisel
Cheshmezgaz ve diğerleri (2012)	Montaj hattı dengeleme	Birikimli risk değeri	Bulanık hedef programlama	Sezgisel

Çizelge 2.1. (devam) Literatür araştırması özet tablo

Wongwien ve Nanthavanij (2012)	Rotasyon çizelgeleme	*	0-1 Tam sayılı	Kesin
Xu ve diğerleri (2012)	Montaj hattı dengeleme	El aktivite değeri	Karışık tam sayılı	Kesin
Wongwien ve Nanthavanij (2013)	Rotasyon çizelgeleme	*	Karışık tam sayılı	Kesin
Rattanamanee ve Nanthavanij (2013)	Rotasyon çizelgeleme	*	0-1 Tam sayılı	Kesin
Wang ve Liu (2014)	Vardiya çizelgeleme	Yorgunluk	Karışık tam sayılı	Kesin
Dewi ve Septina (2015)	Personel çizelgeleme	Fiziksel ve zihinsel iş yükü	Tam sayılı	Kesin
Boenzi ve diğerleri (2015)	Rotasyon çizelgeleme	OCRA	Karışık tam sayılı	Kesin
Akbari (2015)	Tur çizelgeleme	Yorgunluk	Tam sayılı	Sezgisel
Song ve diğerleri (2016)	Rotasyon Çizelgeleme	Fiziksel iş yükü	Tam sayılı	Kesin
Bautista ve diğerleri (2016)	Montaj hattı dengeleme	Fiziksel iş yükü	Karışık tam sayılı	Kesin
Moussavi ve diğerleri (2016)	Personel çizelgeleme	Fiziksel Özellikler	Tam sayılı	Kesin
Yoon ve diğerleri (2016)	Montaj hattı	REBA	Karışık Tam sayılı	Kesin
Wongwien ve Nanthavanij (2017)	Personel çizelgeleme	*	Karışık tam sayılı	Kesin
Azadeh ve diğerleri (2017)	Hücresel imalat sistemleri	İş yükü dengeleme	Karışık tam sayılı	Sezgisel
Yıldız ve diğerleri (2017)	Havayolu ekip eşleştirme	Yorgunluk	Karışık tam sayılı	Sezgisel
Botti ve diğerleri (2017)	Montaj hattı	OCRA indeksi	Tam sayılı	Kesin
Savino ve diğerleri (2017)	İş gücü çizelgeleme	Postural analiz	Karışık tam sayılı	Kesin
Moussavi ve diğerleri (2018)	Personel çizelgeme	Fiziksel iş yükü	Çok amaçlı karışık tam sayılı	Kesin
Hochdörffer ve diğerleri (2018)	Personel çizelgeme	İşlere risk değeri ataması	Tam sayılı	Sezgisel
Şenyiğit ve Atıcı (2018)	Personel çizelgeme	RULA	Tam sayılı	Kesin
Digiesi ve diğerleri (2018)	Montaj hatları-iş rotasyonu	RULA	Karışık tam sayılı doğrusal olmayan	Deneysel
Sana ve diğerleri (2019)	Personel çizelgeleme	OCRA, RULA, NIOSH	0-1 Tam sayılı	Sezgisel
Moussavi ve diğerleri (2019)	Montaj hatları-iş rotasyonu	Fiziksel iş yükü	Karışık tam sayılı	Kesin

Literatürde özellikle iş rotasyon çizelgelerine olan ergonomik eklemeler konusunda kısıtlı sayıda kaynak bulunmaktadır. von Elmbach, Scholl ve Walter (2019) yöneylem araştırması alanında ergonomik faktörlerin personel çizelgeme konusuna dâhil edilmesinde kısıtlı kaynak bulunmasının nedenini, bu konunun görece yeni bir konu olmasına bağlayarak açıklamışlardır.

Yapılan literatür araştırmasının sonucunda özellikle, ergonomik iş gücü çizelgeleme ve montaj hattı dengeleme konusunda yapılan çalışmalarda araştırmacıların, ergonomik faktörleri tek yönlü olarak ele aldıkları gözlenmiştir. Fiziksel ergonomik risk faktörlerini tek yönlü olarak ele alan araştırmacılar ilgilendikleri problem tiplerinin klasik özelliklerine ergonomik özellikleri de eklemeye çalışmışlardır.

Literatürde, manuel işlemlerin çoğunlukla yapıldığı varsayılan işletmelerde OCRA gibi hareket sıklığına dayalı yöntemlerin kullanıldığı çalışmalar, ya da gürültüye yönelik ses şiddeti kısıtlamalarının olduğu çalışmalar bulunmaktadır. Daha farklı açıdan düşünülürse, çalışanların fiziksel olarak maruz kaldıkları iş yükünü kişinin metabolik enerji tüketiminden yola çıkarak hesaplayan ya da zihinsel yorgunluğu sübjektif olarak ölçerek, kurdukları matematiksel modellere bu hali ile entegre eden araştırmacılar da bulunmaktadır.

Rotasyon çizelgeleme ya da montaj hattı dengeleme modellerinde fiziksel iş yükünü eşit dağıtmaya çalışan, ya da maruz kalınacak fiziksel iş yüküne bir üst sınır atayan araştırmacıların ise genelde, işlere ilişkin bir sabit bir iş yükü ataması ile amaçlarını gerçekleştirdikleri görülmektedir. Literatürde, istisnai olarak birkaç çalışma olsa da (Xu ve diğerleri (2012), el-aktivite değeri; Akbari, (2015)-yorgunluk modelleme, vb.) fiziksel iş yükünü dikkate alan çalışmalarda da derinlemesine yapılmış araştırmaya dayanan fiziksel iş yükü kısıtlamasına yönelik bir eksiklik görülmektedir.

Fiziksel iş yükünün derinlemesine araştırılmadan sabit ve rasgele olarak belirlenmesine benzer bir tavır, iş istasyonlarına risk puanı atayarak zamana bağlı ortalama alan çalışmalarda da bulunmaktadır (Wongwien ve Nanthavanij, 2012; Wongwien ve Nanthavanij, 2013; Rattanamanee ve Nanthavanij 2013; Wongwien ve Nanthavanij 2017). Bu çalışmalarda iş istasyonlarına rasgele ve hangi risk parametresini içerdiği belirtilmeyen risk değerlerinin ataması yapılarak modellere risk kısıtı olarak eklendiği görülmektedir.

Literatür araştırmasında ergonomi konusundaki eğilimin matematiksel modellere ergonomik eklemelerin montaj hattı dengeleme ve iş rotasyon çizelgeleme modelleri özelinde farklılaştığı, montaj hattı dengeleme modellerinde daha çok duruş bozukluklarına yönelik incelemelere odaklanıldığı, iş rotasyon çizelgelerinde ise fiziksel iş yükünün dengeli dağıtılmasına yönelik incelemelere odaklanıldığı görülmektedir. Aynı zamanda araştırmacıların fiziksel risk parametreleri kapsamında (ör: gürültü) da araştırmalar yaptıkları görülmektedir.

Literatür araştırmasının bir diğer kritik sonucu ise montaj hattı dengeleme ve iş değişim çizelgelerinde henüz zihinsel iş yüküne ilişkin ayrıntılı bir değerlendirme yapan çalışmaya rastlanmadığıdır. Özellikle artan zihinsel iş yükü ile çalışanların daha fazla iş kazası yaptıkları bilinmektedir. Bu duruma ilişkin literatürde sadece bir çalışma bulunmaktadır. Özellikle literatüre yeni giren kavramlardan biri olan nöroergonomi yöntemleri ile çalışanların işler karşısındaki zihinsel zorlanma seviyeleri objektif bir biçimde elde edilerek, bu değerler üretim operasyonlarının düzenlenmesi konusunda kullanılabilir. Özellikle dikkat gerektiren kritik görevlerin gerçekleştirildiği üretim ortamlarında, fiziksel risk etmenlerinin yanı sıra, zihinsel iş yükünün de dikkate alınması çalışanların bütüncül korunmaları açısından olumlu bir farklılık oluşturulabilir.

Çizelge 2.1'de modelleme yaklaşımı sütunundan elde edilen bilgiye göre, araştırmacıların çoğunlukla karışık tam sayılı matematiksel modelleme yaklaşımından faydalandıkları görülmektedir. Çoğunlukla tek amaçlı olarak geliştirilen matematiksel modellerde, araştırmacıların nadiren de olsa HP yaklaşımına da başvurdukları görülmektedir.

Carnahan ve diğerleri (2000)'in önerdikleri temel ergonomik iş rotasyon modelinin NP-Zor sınıfa ait bir model olduğu Otto ve Scholl (2013) tarafından ispatlanmıştır. Zaten Np-Zor sınıfa ait olan bu temel modele yapılan her türlü ekleme modelin karmaşıklığını daha da artıracaktır. Çizelge 2.1'in son sütununda literatürdeki araştırmacıların kullandıkları çözüm yaklaşımları gösterilmektedir. Araştırmacıların genel olarak kesin çözüm veren paket programları kullandığı, belli bir kısmının da önerdikleri modeller özelinde geliştirdikleri sezgisel çözüm yaklaşımlarını kullandığı görülmektedir.

Fiziksel risk etmenlerinin çizelgeleme çalışmalarına dâhil edilmesi konusunda literatürdeki kısıtlı kaynak incelendiğinde ise, gürültü özelinde bazı çalışmalar bulunmakla birlikte;

titreşim, termal konfor ve aydınlatma parametreleri temelinde henüz herhangi bir çalışmanın yapılmadığı kolaylıkla söylenebilir. Bu noktadan hareketle işletmelerde fiziksel risk etmenlerinin bütünleşik olarak değerlendirilmesine yönelik bir çalışmanın da henüz literatürde bulunmadığını söylemek mümkündür. Tez kapsamında geliştirilen modeller temel motivasyonunu bu düşünceden hareketle almıştır.

3. FİZİKSEL RİSK ETMENLERİ VE MATEMATİKSEL HESAPLAMALARI

Ergonominin temelinde işin insana insanın da işe uyumu vardır. Aynı zamanda kişinin çalışma hayatını sağlıklı bir şekilde sürdürmesi de ergonominin temelini oluşturmaktadır. Üretim ortamındaki fiziksel risk faktörlerinin kontrol altına alınması ve bu yolla meslek hastalıklarının önlenmesi üretim verimliliği ve işgücünün korunması açılarından da oldukça önemlidir. Tez çalışmasının bu bölümünde, üretim ortamlarında sıklıkla karşılaşılan fiziksel ergonomik risk etmenlerine ilişkin kavramsal bilgi, ilgili risk faktörünün sağlığa zararlı etkileri ile risk faktörünün ölçümü ve bu faktöre ilişkin limit değerler ve yasal sınırlar verilmiştir.

Risk parametrelerinin ölçümü, bu parametrelerin matematiksel modele aktarılması için yeterli değildir. Bu parametrelerinin zamana bağlı hesaplamalarını elde etmek, bazıları için sadece ortalama alarak mümkün iken, bazı parametrelerde logaritmik hesaplama yöntemlerinin kullanımı, bazı parametrelerde de karekök ortalama alınması ile mümkün olmaktadır. Ek olarak, farklı ergonomik özellikleri olan iş istasyonlarının risk parametre değerleri de farklı olacağından, çalışanların bir risk parametresi özelinde yaşayacakları tümleşik etkinin özel formüller ile hesaplanması gerekmektedir. Bu bölüm kapsamında bu formüllerin de verilmesi amaçlanmıştır.

Çalışanların zamana bağlı olarak, risk etmenleri karşısında yaşayacakları maruziyetlerin doğru bir şekilde matematiksel modellere aktarılabilmesi için, risk parametrelerinin iş yerinde doğru ölçülmesi ve bu risk parametrelerinin hangi seviyeden sonra çalışan sağlığına zararlı hale geldiğinin objektif bir biçimde belirlenmesi ve değerlendirilmesi gerekmektedir. Çalışanların gün sonu ilgili risk parametresine olan maruziyetlerinin belli ergonomi çevrelerince geliştirilen üst sınırlarla ya da yasalarla belirtilen değerlerle karşılaştırılması söz konusudur. Karşılaştırılacak üst değerin objektif bir biçimde belirlenmesi, çalışanın iş yerindeki sağlığı, güvenliği ve meslek hastalığı yaşama ihtimali ile doğrudan ilişkilidir. Aynı zamanda belirlenen üst limitler matematiksel modelde doğrudan yer alacağı için, limit değerlerin elde edilecek çizelgelerin doğru ve başarılı olmasında da rolü büyüktür.

Her bir risk faktörüne ilişkin kavramsal bilgi ve risk parametresinin üretim ortamında ölçümü ve matematiksel hesaplamalarında kullanılan teknikler verildikten sonra, ilgili risk parametresinin birikimli ya da anlık etkisinin, risk parametresine maruz kalan çalışan üzerinde oluşturacağı rahatsızlıklar ve meslek hastalıkları ile ilgili bilgi de verilmiştir. Bazı risk parametrelerine uzun süre maruz kalmak hem meslek hastalıklarına hem de iş kazalarına yol açarken, bazı parametrelere uzun süre maruz kalmanın bilinen herhangi bir meslek hastalığına neden olmadığı ancak iş kazası oluşumu riskini ciddi derecede arttırdığı bilinmektedir. Bu nedenle her bir risk parametresi özelinde, maruziyetlerden kaynaklanan rahatsızlıklar detaylı bir biçimde verilmiştir.

3.1. Endüstriyel Gürültü Kavramı

Bir titreşim hareketinin havada yol açtığı basınç değişimi duyma organınca ses olarak algılanır. Ses elastik bir ortam olan havada mekanik titreşimlerden oluşan ve havanın statik basıncına ek olarak gelişen basınç değişiklikleri olarak da ifade edilebilir. Dolayısı ile ses aslında bir basınç dalgasıdır (Babalık, 2016).

Ses için geliştirilen bir başka tanıma göre; titreşim yapan bir kaynağın hava basıncında yaptığı dalgalanmalar ile oluşan ve insanda işitme duygusunu uyaran fiziksel bir olaydır. (Sabancı ve Sümer, 2015). Bir başka tanıma göre ses, aslında mekanik titreşim hareketinin ortam havasında oluşturduğu basınç değişiminin kulak zarı aracılığı ile orta kulağın ve iç kulağın uyarılması sonucunda beyinin bir algısıdır (İncir, 2008).

Hoşa gitmeyen, insan sağlığını ve psikolojisini olumsuz yönde etkileyen ses ya da sesler ise gürültü olarak algılanır. Yüksek seviyeye sahip her ses gürültü olarak algılanmamalıdır. Yüksek seslerin bazıları, kişilerce gürültü anlamı ifade etmez. Fakat bir üretim ortamındaki sesler endüstriyel gürültü olarak adlandırılır ve tüm çalışanlar bu sesten rahatsız olurlar.

3.1.1. Endüstriyel gürültünün ölçümü ve eşik değerler

İnsan kulağının algılayabildiği en güçlü ve en zayıf basınç düzeyleri arasındaki oran 10^{6}'dır. Ses yoğunluğu ve duyulabilen basınç oranları ile işlem yapmak ve bu değerleri lineer ölçü sistemi ile değerlendirmek çok büyük sayılarla işlemler yapılacağı için pratik değildir. Akustik incelemelerde logaritmik büyüklükleri kullanmak daha pratik bir

yaklaşım olacaktır. Daha açık ifade etmek gerekirse; ses şiddeti hesaplanırken (L_p), ölçülen ses basıncı (p), duyma eşiği (p_o)'ne kareleri alınarak bölünür ve sonucun logaritması alınır. Fakat, elde edilen değerin birimi çok büyük olduğu için, sonuç 10 ile çarpılır. Bu birime Latincede onda bir kelimesi olan decem ile Graham Bell'in isminin birleştirilmesi ile dB (desibel) denmiştir (Babalık, 2016). Bir ortamdaki gürültünün ölçümü için literatürde sıkça başvurulan yöntemler izleyen şekilde ifade edilebilir (İncir, 2008):

- İzleme Yöntemi

Bu yöntemde basit bir ses ölçer kullanılır. Diğer yöntemlere göre az sayıda ölçüm alınarak, var olan gürültü düzeyine ilişkin bilgi toplanır.

- Mühendislik Yöntemi

İzleme yöntemine göre daha kapsamlı bir gürültü ölçüm yöntemidir. Duyarlı ses ölçerler kullanılır ve ses düzeyinin yanı sıra frekanslara ilişkin de bilgi toplanır.

- Duyarlı Yöntem

Bu yöntem ilk iki yönteme göre çok daha kapsamlı bir gürültü ölçüm yöntemidir. Ortamın diğer ergonomik özellikleri (ortamın sıcaklık ve nem oranı, rüzgâr yönü ve rüzgâr hızı vs.) de ölçülerek kayıt altına alınır. Bir üretim ortamında gürültü sorunu çok ayrıntılı bir biçimde incelenmek istenirse bu yöntemin kullanılması diğer iki yönteme göre daha uygun olacaktır. Gürültü ve ortamdaki diğer özelliklerin birlikte ele alınması, gürültü sorunun çözümü için daha kapsamlı bir verinin ele alınması ile birlikte çok boyutlu bir çözümün ortaya atılmasına olanak sağlar.

Gürültüyü ölçmede kullanılan, farklı amaçlara hizmet eden cihazlar bulunmaktadır: bir iş istasyonun ya da bir ortamın gürültü seviyesini ölçmek için basit ses ölçerler (sonometre) kullanılabilir. Ancak dozimetre denilen ve çalışanın gün boyu çalıştığı üretim ortamlarındaki gürültüden ne kadar etkilendiğini yani etkilendiği gürültü dozajı seviyesini hesaplayarak, dozaj seviyesini süre ile birlikte değerlendiren cihazlar da kullanılabilir. Çeşitli standartlara göre 8 saatlik maruziyetlerde sınırlama 85 dB ya da 90 dB olarak belirlenebilmektedir. Dozimetre kişilerin kulağına yakın bir yere konumlandırarak, ölçüm alan bir cihazdır (İncir, 2008). Bu cihaza göre toplamda belirlenen standarda göre %100

dozaj geçildiğinde çalışanın acilen gürültüsüz bir ortama alınması ve çalışmasına o ortamda devam etmesi gerekir. Böyle kritik bir konuyu çalışanın denetimine vermek hem işletme amaçları hem de çalışanın sağlığı açısından olumsuz durumlar ile karşılaşılmasına neden olacaktır. Bu nedenle çalışanların gürültü maruziyetlerini, günlük gürültü dozajı üzerinden hesaplamak mantıklı bir uygulama olmakla birlikte, üretim ortamında çalışanların dozaj seviyesini kendilerinin kontrol etmesi ve izin verilen sınır geçildiğinde üretim yerinin değiştirilmesi durumlarını çalışanların yönetimine bırakılması üretim ortamındaki düzen, uyum ve sürdürülebilirlik açısından doğru bir uygulama olmayacaktır. Çalışanların üretim ortamındaki gürültü seviyelerine göre hiçbir çalışanın %100 değerinin üzerinde maruziyet yaşamaması, basit bir matematiksel model ile günlük, haftalık ya da aylık çalışma planları belirlenerek, üretim ortamındaki düzenin korunması ile birlikte, hem çalışanların gürültü ekilenimi açısından sorun yaşamalarının önüne geçilir hem de önerilen model özelinde işletme amaçları açısından bir takım ek katkılar sağlanabilir.

Bir ortamda çalışanların maruz kaldıkları ortak gürültü seviyesini belirlemek için, çeşitli formüller bulunmaktadır. Ancak tüm formüllerdeki ortak nokta gürültü seviyeleri üzerinde logaritmik toplama işleminin yapılıyor olmasıdır.

Gürültüye maruz kalınan sürenin etkin olduğu aşağıdaki formül, Eş. 3.1 ile örnek olarak verilebilir (Babalık, 2016):

$$L_m = 10\log[1/\mathrm{T}\sum 10^{L_i/10} * t_i] \qquad (3.1)$$

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

Benzer şekilde, aynı anda birden fazla kaynaktan gelen sesin etkisine ilişkin Eş. 3.2 ile verilen formülden yararlanılabilir (Babalık, 2016):

$$L = 10.\log[\sum_{i=1}^{h}(\frac{p_i}{p_0})^2] \quad (3.2)$$

Burada L değişkeni ile ifade edilen birden fazla kaynaktan gelen gürültünün ortak değeridir. $(p_i / p_0)^2$ İfadesi ilgili kaynağın ses basıncı düzeyi yani dB cinsinden gürültü düzeyini ifade etmektedir.

Literatürde yer alan diğer ortak gürültü hesaplama formüllerinden biri de çalışanların gürültü maruziyet dozajı üzerinden geliştirilmiştir. Çalışanların belirli gürültü seviyelerine ne kadar süre maruz kalabileceklerine ilişkin formül Eş. 3.3 ile ifade edilmiştir (Tayyari ve Smith, 1997):

$$T = \frac{8}{2^{(L-90)/5}} \quad (3.3)$$

Burada L dB cinsinden maruz kalınan gürültünün şiddetini göstermektedir. T ile elde edilecek değer ise çalışanın L şiddetindeki gürültüye maruz kalınabilecek maksimum süreyi göstermektedir. Bu formül Occupational Safety and Health Administration (OSHA) Standartıdır ve 8 saatlik çalışma süresinde 90 dB değerini üst limit olarak almaktadır. Eğer American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH)'in belirlediği, 8 saatlik çalışma süresinde 85 dB değerini üst limit olarak alan standart kullanılacaksa ilgili T değeri Eş. 3.4 ile hesaplanmalıdır:

$$T = \frac{8}{2^{(L-85)/3}} \quad (3.4)$$

85 dB üzerindeki endüstriyel gürültü seviyelerinde çalışanlarda geçici ya da kalıcı duyma kayıpları olduğu bilindiği için bu değer birçok ergonomi çevresince limit değer olarak belirlenmiştir. Ancak ülkeler bazında 8 saatlik maruziyete ilişkin gürültü düzeyleri farklılıklar gösterebilmektedir. Örneğin, Almanya ve Norveç'te 8 saatlik sınır 70 dB iken, Finlandiya ve Fransa'da bu değer 85 olarak benimsenmiştir. Arjantin ve Amerika gibi ülkeler de ise daha yüksek bir değer olan 90 dB'i 8 saatlik gürültü seviyesinin üst sınırı olarak belirlemişlerdir (Sabancı ve Sümer, 2015).

Gürültü seviyesi ve bu gürültüye maruz kalınan süre gürültünün hesaplamalarında ve gürültünün çalışan sağlığına olan etkilerin belirlenmesinde doğrudan etkili olduğu için oldukça önemlidir. Bu iki değişken değerden yola çıkarak, maruziyet dozajı Eş. 3.5 ile hesaplanır:

$$D_i = \frac{C_i}{T_i} = \frac{i.\ gürültü\ seviyesine\ maruz\ kalmanın\ gerçek\ süresi}{i.gürültü\ seviyesi\ için\ hesaplanan\ izin\ verilen\ maruz\ kalma\ süresi} \tag{3.5}$$

Toplam maruz kalma dozajı ise Eş. 3.6 ile elde edilir (Tayyari ve Smith, 1997):

$$D = 100 * \sum_{i=1}^{n} \frac{C_i}{T_i} = 100 * (\frac{C_1}{T_1} + \frac{C_2}{T_2} + ... + \frac{C_n}{T_n}) \tag{3.6}$$

D izin verilen maruz kalma süresinin yüzdesi olarak toplam gürültü maruziyetini ifade etmektedir. *n* gürültü seviyelerinin gözlendiği periyot sayılarını göstermektedir. *D* değeri %100'ü geçerse çalışanın sağlığı için olumsuz bir durum ortaya çıkacağı için çalışmalarda bu değer %100'ün altında tutulmaya çalışılır. Hesaplamaların daha net bir şekilde ifadesi için aşağıdaki örnek verilmiştir:

8 saatlik bir vardiyada çalışanın 80 dB şiddetindeki gürültüye 2 saat, 90 dB şiddetindeki gürültüye 2 saat, 95 dB şiddetindeki gürültüye ise 4 saat maruz kaldığı varsayılsın.

$T_1 = \frac{8}{2^{(80-90)/5}} = 32$ saat , T_2 =8 saat, T_3 =4 saat olarak hesaplanır.

$$D = 100 * \sum_{i=1}^{3} \frac{C_i}{T_i} = 100 * (\frac{2}{32} + \frac{2}{8} + \frac{4}{4}) \simeq 131\% \tag{3.7}$$

Eş. 3.7 ile hesaplanan *D* değeri yaklaşık %131 çıktığı için mühendislik ve yönetimsel önlemlerin alınması gereklidir.

Bu formülün matematiksel modele uyarlaması noktasında ise, bir saatlik maruziyetin ilgili orana (*D*) katkısının belirlenmesi için aşağıdaki dönüşümün yapılması gerekmektedir (her

bir gürültüye maruz kalma süresini (C_i) 1 saat (1 periyot) olarak alınır.). İlgili dönüşüm Eş. 3.8 ile ifade edilebilir:

$$D_i = \frac{C_i}{T_i} = \frac{1}{T_i} = \frac{1}{\frac{8}{2^{(L_j-85)/3}}} = \frac{2^{(L_j-85)/3}}{8} \tag{3.8}$$

Gürültüye ilişkin yazılacak kısıt her gün ve çalışan için döndürülecek olan $\sum_j \sum_l \frac{2^{(L_j-85)/3}}{8} * (x_{ijkl})$ kısıtına dönüşmektedir (x_{ijkl} değişkeni ve indislerin açıklamaları tez çalışmasının *6.2.Önerilen Matematiksel Modeller* kısmında verilmiştir.

3.1.2. Endüstriyel gürültünün zararlı etkileri

Herhangi bir üretim firmasında en çok rastlanan fiziksel ergonomik risk parametrelerinden biri olan endüstriyel gürültünün temel olarak neden olduğu problem başlıkları, çalışanların endüstriyel gürültüden rahatsız olması, endüstriyel gürültünün geçici veya kalıcı işitme kayıplarına neden olması ve çalışanların iş verimliliği üzerinde olumsuz etki yapması olarak özetlenebilir. Endüstriyel gürültünün, aynı zamanda iş görenin iş yükünü etkileyen en önemli faktörlerden biri olduğu da bilinmektedir (Babalık, 2016).

Gürültünün çalışan üzerindeki etkilerini psikolojik ve fizyolojik olarak iki başlıkta incelemek mümkündür. Endüstriyel gürültünün her çalışan üzerinde farklı psikolojik etkileri olabilmektedir. Fakat en belirgin ve hemen hemen tüm çalışanlarda meydana gelen psikolojik etkiler, stres ve kaygının artmasıdır.

Bu etkilerin yanı sıra, baş dönmesi, zihinsel fonksiyonlarda bozulma gibi bir takım farklı etkiler de görülebilmektedir. Özellikle dikkat ve deneyim gerektiren işlerde 50-60 dB seviyelerindeki gürültülerin bile ciddi verim kayıplarına neden olduğu bilinmektedir (Sabancı ve Sümer, 2015). Gürültünün iş verimi üzerindeki bu ciddi etkilerinin kişinin konsantrasyonunu olumsuz yönde etkilemesinden ileri geldiği düşünülmektedir.

Fizyolojik etkilerin en belirgini ise çalışanda oluşacak duyma kaybıdır. Ancak bu etkilerin yanı sıra, yüksek gürültünün çalışanın göz bebeklerinde büyüme, kalp atış hızında artış,

mide ve karında kasılma, vücutta üretilen adrenalinde artış gibi bir takım kanıtlanmış fizyolojik etkileri de bulunmaktadır (Sabacı ve Sümer, 2015). Endüstriyel gürültünün çalışanlar üzerinde oluşturacağı duyma kayıpları geçici ya da kalıcı olabilir. Duyma kaybının tipini, çalışanın gürültüye maruz kalma süresi, gürültünün şiddeti ve duymayı sağlayan sistemin hangi kısımlarının zarar gördüğü gibi spesifik kriterler belirlemektedir.

Özellikle 90 dB ve üzerinde gürültüye uzun süre maruz kalmanın kalıcı duyma kaybına neden olduğunu kanıtlayan çalışmalar bulunmaktadır (Babalık, 2016). Eğer, endüstriyel gürültüye maruz kalma sonucunda çalışanın iç kulağı ve beynindeki duyma sinirleri zarar gördüyse kalıcı sinirsel tip işitme kaybı meydana gelmektedir. Eğer endüstriyel gürültüye maruz kalma sonucunda çalışanın orta ya da dış kulağı zarar gördüyse bu durumda, çalışanda geçici tip işitme kaybı oluşmaktadır (Tayyari ve Smith, 1997).

Çalışanların endüstriyel gürültüye maruz kaldıklarında yaşayacakları geçici ya da kalıcı duyma kayıplarının gerçekleşme olasılığı sanılanın aksine oldukça yüksektir. İş hayatına 20 yaşında başlamış bir çalışanın 80 dB gürültülü bir ortamda 15 yıl çalışması %10 olasılıkla kalıcı sağırlık riski ile karşı karşıya kalacağı anlamını taşımaktadır. Ki 80 dB değeri 8 saatlik çalışmada kişisel olarak maruz kalınması üst limit olarak belirlenen 85 dB değerinden bile daha düşük bir seviyededir. Eğer aynı çalışan 15 yıl süre ile 100 dB gürültüye maruz kalırsa, kalıcı sağırlık riski %40'a yükselmektedir. 100 dB ve üzerindeki gürültü düzeylerinde çalışılması durumunda ise, ilgili gürültüye maruz kalmanın süresi kısalsa da kalıcı sağırlıkla karşılaşma riski dramatik seviyede artmaktadır (Babalık, 2016).

Benzer şekilde Singh, Bhardwaj, ve Deepak (2013) ile literatürdeki diğer çalışmaların sonuçlarını destekleyen nitelikte deneysel çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Singh ve diğerleri (2013) Hindistan'da çelik üretimin de çalışanlar üzerinde gürültü maruziyeti konusunda ölçümlere dayalı bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Ölçüm alınan 574 çalışandan %90'nın orta ve yüksek derecede duyma kaybı yaşadığı gözlenmiştir. Yazarlar bu duyma kaybının önlenmesi için iş--rotasyon çizelgeleme yaklaşımının kullanılabileceğini ifade etmişlerdir.

Gürültünün önlenmesindeki yönetimsel araçlardan ilkinin çalışanların makineler arasında rotasyona tabi tutulması olduğu ifade edilmiştir (Tayyari ve Smith, 1997).

İşletme ortamlarında en sık karşılaşılan ve çalışanlar üzerinde hem psikolojik hem de fizyolojik açıdan olumsuz birçok etkisi olan fiziksel ergonomik risk parametrelerinden endüstriyel gürültü parametresinin, üretim ortamlarında verilmesi gereken hemen hemen tüm kararlarda dikkate alınması bir gerekliliktir. Üretim ortamında çalışanların doğrudan gürültüye maruz kalması, çalışanların görevlendirilecekleri istasyonların belirlenmesinde endüstriyel gürültünün bir karar noktası olması gerektiği açıktır. Tez çalışmasının *2. Rotasyon Çizelgeleme* başlığı altında da belirtildiği üzere, iş değişim çizelgeleri çalışanların maruz kaldıkları gürültü seviyelerinin düzenlenmesinde kullanılabilir.

3.2. Tüm Vücut ve El-Kol Titreşimi Kavramı

Tüm vücut ve el-kol titreşimi, endüstriyel işletmelerde çalışanların sıklıkla maruz kaldıkları fiziksel ergonomik risk faktörleri olarak ifade edilebilir. Titreşim basitçe, periyodik olarak ileri-geri veya yukarı-aşağı hareket olarak tanımlanabilir. Titreşim hareketinin bir diğer tanımı ise, bir mekanik sistemin hareket veya konumuna ait bir niceliğin zamana bağlı olarak düzenli veya düzensiz değişimi olarak ifade edilebilir (Sabancı ve Sümer, 2015). Titreşimin insan üzerindeki etki düzeyleri aşağıda verilen faktörlere bağlı olarak değişim göstermektedir:

- Titreşimin frekansı, şiddeti ve yönü
- Maruz kalınan süre
- Uygulandığı bölge
- Titreşime maruz kalan kişinin yaşı, cinsiyeti ve kişisel duyarlılığı ile genel sağlık durumu

Titreşimi tanımlayan büyüklüklerden frekans yani titreşimin sıklığı, çalışan üzerindeki olumsuz etkilerin ortaya çıkmasında yukarıda bahsedilen diğer faktörlerden daha fazla etkindir. Fizyolojik açıdan önemli olan titreşim frekanslarında, titreşim zorlanmasının şiddeti ivme olarak ifade edilir. Titreşim büyüklük olarak m/s^2 olarak tanımlandı ise burada titreşimin ivmesinden yani şiddetinden bahsedilmektedir.

Üretim ortamında titreşim oluşturan herhangi bir makinede, titreşen parçalar aynı zamanda makinelerin ya da iş istasyonlarının gürültü seviyesi üzerinde de olumsuz etkiler

oluşturabilir. Ancak bu durum tüm yüksek gürültü seviyesine sahip makinelerin aynı zamanda yüksek titreşim seviyesine sahip olacağı anlamına gelmemektedir.

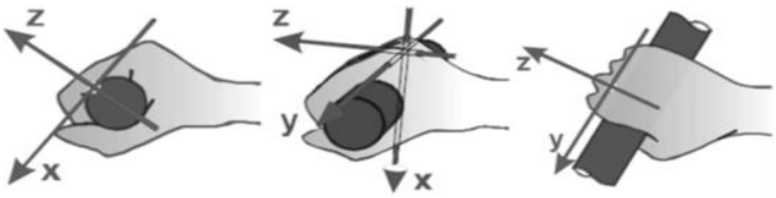
Endüstride 2 tip titreşimden bahsedilir. Birincisi El-Kol Titreşimi, diğeri ise tüm vücut titreşimidir. Tez çalışması kapsamında ele alınan titreşim maruziyet tipi, çalışanların el-kol titreşim maruziyetleridir.

3.2.1. El-kol titreşiminin ölçümü ve eşik değerler

Titreşimin hesaplanması ve belli maruziyetler için sınırlamaları kontrol edebilmek adına, titreşime maruz kalınan süreler ve titreşimin etki etki ettiği eksen üzerinden Eş. 3.9 ile verilen formül geliştirilmiştir (Tayyarı ve Smith, 1997):

$$aK_{eq} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} (aK_i)^2 \frac{T_i}{T}} \tag{3.9}$$

T_i ifadesi i. titreşim seviyesine maruz kalmanın süresini temsil etmektedir. T ise T_i'lerin toplamını göstermektedir ve saat cinsinden ifade edilmektedir. aK_i ise i. zaman dilimi için titreşimin şiddetini göstermektedir. K ise ilgili eksenin koordinatını göstermektedir. aK_{eq} ise ilgili eksek için hesaplanan toplam titreşim maruziyetini göstermektedir.



Şekil 3.1. El-kol titreşimi için koordinat sistemi

Şekil 3.1'de de açıkça görüldüğü üzere, aslında el-kol titreşimi çalışanı 3 eksenden etkiler (Çakmak, Saraçoğlu, Alayunt ve Özarslan, 2011). Ancak genellikle bu 3 eksenden birisi diğer ikisinden çok daha yüksek ve baskındır. Bu nedenle titreşim hesaplamalarında bahsi geçen aktif / dominant eksen üzerinden hesaplamalar yapılır (Tayyari ve Smith, 1997). Hesaplamayı ve maruziyet sınırlarını daha iyi ifade edebilmek için aşağıdaki örnek verilebilir.

Çizelge 3.1. El-kol titreşimi hesaplama örnek değerler

Titreşime maruz kalma süresi(saat)	Bileşen hızı (m/s^2)		
	X	Y	Z
3	3,20	7,10	6,9
1	2,40	4,5	5,3
3	4,0	3,0	7,2
1	0	0	0

$aX_{eq}=[3/7(3,20)^2 +1/7(2,40)^2 +3/7(4,0)^2]^{1/2}$ = 3,473 m/s^2 ya da 0,354 g

$aY_{eq} =[3/7(7,10)^2+1/7(4,5)^2+3/7(3,0)^2]^{1/2}$ = 5,324 m/s^2 ya da 0,542 g

$aZ_{eq} =[3/7(6,9)^2+1/7(5,3)^{2+}3/7(7,2)^2]^{1/2}$= 6,828 m/s^2 ya da 0,691 g

Günlük maruz kalma süresine göre el-kol titreşiminin maruziyet sınır değerleri Çizelge 3.2 ile verilmiştir (Tayyari ve Smith, 1997):

Çizelge 3.2. Titreşim maruziyeti sınır değerleri

	Eşik Değer	
Günlük maruziyet süresi	m/s^2	g
1 saatten az	12	1,223
1 saat ile 2 saat arası	8	0,815
2 saat ile 4 saat arası	6	0,612
4 saat ile 8 saat arası	4	0,408

Eşik değer üzerinde titreşime maruz kalan çalışanlar için uzun vadede ergonomik açıdan önlem alınması gerekmektedir. Ülkemizdeki, çalışanların titreşimle ilgili risklerden korunmalarına dair 22.08.2013 tarihli yönetmeliğe göre, titreşim için aşağıdaki sınırlamaları getirilmiştir (İnternet-1):

El – kol titreşimi için;

- Sekiz saatlik çalışma süresi için günlük maruziyet sınır değeri 5 m/s^2

- Sekiz saatlik çalışma süresi için günlük maruziyet eylem değeri 2,5 m/s^2

Tüm vücut titreşimi için;

- Sekiz saatlik çalışma süresi için günlük maruziyet sınır değeri 1,15 m/s^2
- Sekiz saatlik çalışma süresi için günlük maruziyet eylem değeri 0,5 m/s^2 olacaktır.

Bu açıklamalar ve limit değerler ışığında el-kol titreşimi için geliştirilen kısıtın ilk kısmı $\sqrt{\sum_j \sum_l v_j^2 * x_{ijkl} \Big/ 8}$ şeklinde ifade edilebilir. (x_{ijkl} değişkeni, indis ve parametrelerin açıklamaları tez çalışmasının *6.2.Önerilen Matematiksel Model* kısmında verilmiştir.

3.2.2. El-kol titreşiminin zararlı etkileri

Tüm fiziksel ergonomik risk faktörlerinde olduğu gibi, el-kol ya da tüm vücut titreşimine maruz kalmak çalışanlar üzerinde fizyolojik ve psikolojik bir takım rahatsızlıklara neden olmakla birlikte, meslek hastalığı olarak ifade edilen hastalıklara da yol açmaktadır. Her iki titreşim tipinin çalışanlarda oluşturacağı etkiler farklılıklar gösterebilir.

El-kol titreşimi mevcut titreşimin el-kol sistemine aktarıldığında, çalışanların sağlık ve güvenliği için risk oluşturan özellikle, damar, kemik, eklem sinir ve kas bozukluklarına yol açan titreşim şeklidir.

Tüm vücut titreşimi ise özellikle bel bölgesinde rahatsızlık ve omurgada travmaya yol açan titreşim şeklidir (Sabancı ve Sümer, 2015). Titreşim; devamlı baş ağrıları, uzak görme netliği kayıpları, genel denge bozuklukları, sırt ve boyun kaslarında sertlik, sindirim sistemi rahatsızlıkları gibi sorunlara sebep olabilmektedir. Tez çalışması kapsamında, üretim işletmelerinde en çok karşılaşılan titreşim tipi olan el-kol titreşimi üzerine incelemelerde bulunulmuştur. Çalışma koltuğu aracılığı ile tüm vücut titreşimine maruz kalınan meslek grupları, emek yoğun çalışmaların gerçekleştirildiği işletmeler için çoğu zaman geçerli değildir. Tüm vücut titreşiminin çalışan sağlığına etki edecek seviyede tehlikeli olduğu meslek grupları tarım ve hayvancılık sektörüne ait meslek grupları ile kamyon-tır şoförleri gibi oturarak çalışılan iş kollarıdır. Bu nedenle bu tez çalışması kapsamında tüm vücut titreşimine yer verilmemiştir. Geliştirilen matematiksel modellere titreşim parametresi el-kol titreşimi özelinde dâhil edilmiştir.

El-kol titreşimine uzun süreler maruz kalan çalışanlarda ise meydana gelen genel rahatsızlıkların yanı sıra, kalıcı etkileri olan beyaz parmak hastalığı gibi meslek hastalıkları da görülebilmektedir (Tayyari ve Smith,1997). Elle tutulan cihazlardan ya da elle yapılan işlerdeki titreşimler beyaz parmak hastalığının birinci nedenidir. Beyaz parmak hastalığı, el-kol titreşiminin neden oluğu fizyolojik etkilerin en kritik olanıdır. Bu nedenle titreşimin azaltılması yönündeki herhangi bir önlem çok önemli olacaktır. İşyerindeki çalışanlara titreşim emici eldivenlerin verilmesi de alınabilecek önlemler arasındadır. Ancak bu eldivenlerin çalışanların hareket kabiliyetini kısıtlamamalıdır.

Titreşimin çalışanlar üzerindeki olumsuz etkilerinin araştırılması için yapılan çalışmalarda uzun süre titreşime maruz kaldığında çalışanların daha fazla enerji harcadığı, kalp atışı ve nefes alma frekanslarında artış olduğu kanıtlanmıştır (Babalık, 2016). Aynı şekilde, Babalık (2016), 2,5 m/s^2 değerindeki ivmelerde çalışan hataları oldukça arttığı için bu seviyeler tehlikeli sınırlarda kabul edildiğini, 2,0 m/s^2 ivmelerde ise çalışanlarda görüş keskinliğinin yarı yarıya azaldığı belirtmiştir.

Yüksek ivmelerde titreşime maruz kalan bir çalışanın genel olarak nefes darlığı, karın ağrısı, kas reaksiyonları, genel huzursuzluk, sırt ağrıları, görme bozuklukları, boğaz ağrısı gibi bir takım şikâyetleri olabilir. El-kol titreşiminde eklem kıkırdakları zamanla aşınarak sönümleyici özelliklerini kaybeder. Sönümleyici özelliğini kaybeden kemikler birbirine doğrudan temas edince kemikler karşılıklı olarak birbirini deforme ederek çalışanın zorlanmasına ve düzeltilmesi mümkün olmayan problemlerin ortaya çıkmasına neden olabilir (Babalık, 2016).

Sanders ve McGormick (1993) titreşimin çalışanlar üzerindeki ciddi etkilerine örnek olması açısından, düşük frekanslardaki titreşim seviyelerinde maruziyetin ilk aşamalarında bile çalışanların nefes alıp verme sıklıklarının arttığını ifade etmişlerdir. Aynı zamanda, titreşimin çalışanlar üzerinde genel huzursuzluk hali ve kaygı gibi bir takım psikolojik etkilerinin de olabileceğini belirtmişlerdir.

Kia, Fitch, Newsom ve Kim (2020) çalışmalarında tüm vücut titreşiminin fizyolojik stres üzerindeki etkileri konusunda çalışmışlardır. Deneye dayalı gerçekleştirilen bu çalışmada araştırmacılar 4 saatlik bir tüm vücut titreşimi maruziyetinin çalışan üzerinde fizyolojik

stres oluşturmak için yeterli olmayacağı yönünde çıkarımlar yapmışlardır. Araştırmacılar 4 saatten fazla maruziyetlerde çalışanlar üzerinde ciddi yük oluşacağını belirtmişlerdir.

Titreşim maruziyetinden kaynaklanan, bahsedilen fizyolojik ve psikolojik etkiler ile ortaya çıkabilecek meslek hastalıklarının önlenmesinde, üretim ortamındaki iş atama problemlerinde titreşim parametresinin dikkate alınması bir gerekliliktir. Titreşimin zararlı etkilerine karşı alınabilecek stratejik seviyedeki önlemlere örnek olarak, eski tip makinelerin yeni teknoloji makineler ile değiştirilmesi, makinelerin titreşim yaratan kısımlarının çalışma zeminine sabitlenmesi, makinelerin düzenli bakımı gibi önlemler sayılabilir. Ancak, üretim ortamında doğrudan yapılacak bu tip değişiklikler, hâlihazırda birden çok maliyet kalemi ile baş etmeye çalışan işletmeler için yeterince ekonomik olmayabilir. Ekonomik ve etkili yönetimsel bir araç olan iş değişim çizelgeleme stratejileri, çalışanlar üzerindeki titreşimin azaltılmasına yönelik bir önlem olarak kullanılabilir.

3.3. Endüstriyel Sıcaklık- Termal Konfor Kavramı

Üretim ortamlarında çalışanların sağlığını olumsuz yönde etkileyen fiziksel risk faktörlerinden bir diğeri de kontrol altında tutulması gereken termal konfora ilişkin faktörlerdir. Termal konfor şartları açısından bir üretim ortamı ele alındığında, iklim şartlarını etkileyen faktörleri aşağıdaki gibi ifade etmek mümkündür (Babalık, 2016):

- Havanın Sıcaklığı
- Havanın Nemi
- Havanın Hızı
- Isıl Radyasyon, Işınım

Termal konfor şartlarının çalışanlar üzerinde oluşturduğu stres ısı stresi olarak adlandırılır ve aşağıda açıklandığı şekilde bir terminolojisi vardır.

Isı Stresi: Çevresel sıcaklık, nem, işin metabolik yükü ve çeşitli kıyafetlerin etkisinin toplam etkisi ısı stresini etkilemektedir (Bernard ve Kenney, 1994). Termal ortamı etkileyen iç ve dış faktörlerin vücut üzerindeki toplam etkisi olarak tanımlanabilir. İç faktörler olarak; metabolik ısı, çevreye uyum derecesi, vücut ısısı sayılırken, dış faktörler

olarak; ortam hava sıcaklığı, radyant ısı, havanın hızı, nem ve kıyafetlerin ısıl dirençleri sayılabilir.

Isı Yükü: Isı yükü, ısı stresine verilen, tüm biyomekanik, fizyolojik ve psikolojik yanıtların tamamının toplamıdır. Isı yükünün kişide oluşturacağı rahatsızlığın (ufak bir rahatsızlık duymaktan, ciddi rahatsızlıklar yaşamaya kadar) ciddiyeti, ısı stresinin büyüklüğüne bağlıdır.

Isı stresi limit değerleri: İnsan vücudu ancak belli bir dereceye kadar olan ısıyı tolere edebilir. Bu limit değerlerinden sonra vücutta bir takım alarmlar başlar. Bu alarm seviyesi limit değer olarak adlandırılır. Limit değerler, iş yükü ve sıcaklığa maruz kalınan süre ile ilişkilidir.

Termal Konfor: Bir insan için termal konfor kişinin kendini o ortamda sıcaklık-soğukluk dengesi açısından rahat hissetmesi anlamındadır. Termal konfor alanı tüm insanlar için birebir derecesinde aynı olmayabilir.

Metabolik ısı: Metabolizmadan gelen yiyecekleri yakarak elde edilen enerjiyi ifade etmektedir.

Vücut iç sıcaklığı, ilgili yaşamsal faaliyetlerin sürdürülebilmesi açısından oldukça kritik bir öneme sahiptir ve bu faaliyetlerin sorunsuz işleyebilmesi için vücut iç sıcaklığının çeşitli faaliyetlerle de olsa sabit tutulması gerekmektedir. Kişilerin yaşamlarını devam ettirebilmek için gerekli olan vücut sıcaklığı yaklaşık 37°C'dir. İnsan bedeni termal açıdan çekirdek ve kabuk olarak iki şekilde ifade edilirse bedenin çekirdek sıcaklığı yaklaşık 37°C'de sabit bir şekilde tutulmalıdır. Bu sıcaklığın bir derece artması ya da azalması insan bedeni açısından ciddi problemler oluşturabilmektedir. İnsanlar sıcakkanlı varlıklar olduğu için ortamdaki sıcaklığa göre (sıcak-soğuk fark etmeksizin) kişinin vücut sıcaklığını yaklaşık 37°C'de sabit tutması için harcaması gereken bir enerji vardır. Bu enerjinin fazla olması, yani kişinin termal konforunu sağlamak için fazladan çaba sarf etmesi iş yerindeki üretim verimini olumsuz etkileyebilir. Dış ortam sıcaklığı ne kadar değişirse değişsin, vücudun kendi ritmini sabit tutmak için geliştirdiği bir fizyolojik mekanizma yardımı ile iç vücut sıcaklığı sabit tutulmaktadır. Bu mekanizmada etkin rol oynayan faktörler aşağıda sıralandığı gibidir (Sabancı ve Sümer, 2015);

- Dolaşım sistemi
- Terleme
- Titreme

Terleme ve buharlaşma bedenin ısı bilançosu dengede tutan en önemli olaydır. Damlayan değil, buharlaşan ter vücut ısının azaltılması noktasında katkı sağlar. Dışa verilen ısının % 60'ı terleme, %15-25'i taşınımla, %5'i iletim, %20-40'ı radyasyon iledir. İnsan vücudu sıcakkanlı olduğu için dış dünyadaki sıcaklık değişimlerine rağmen içinde sahip olduğu bir denge mekanizması ile iç sıcaklığını sabit tutabilmektedir.

3.3.1. Endüstriyel sıcaklık ölçümü ve limit değerler

Kişinin maruz kaldığı vücut iç sıcaklığının ölçülmesi için en doğru sonucu verecek yöntem kişiye yutulabilir termometreler yutturmak ve ölçümleri doğrudan oradan almaktır (Methner ve Eisenberg, 2018). Ancak bu durum her gün ve her çalışan için tekrar edeceği ve yutulabilir termometre tek kullanımlık olduğu için oldukça maliyetlidir. Bu sebeple araştırmacıların çoğu ilgili değerleri tahmin ederek ya da sabit bir değer olarak kabul ederek çalışmalarını gerçekleştirmişlerdir. Bu tez çalışmasında da, literatürde sıklıkla kullanılan Wet Bulb Globe Temperature (WBGT) indeks ile çalışanların maruz kalacakları ısı stresinin temsil edilmesi yaklaşımı benimsenmiştir. WBGT indeksi kısaca, ortamdaki kuru ve ıslak hava sıcaklığından yola çıkılarak hesaplanan bir indeks olarak tanımlanabilir.

Bir iş periyodunda birden fazla iş yapılabileceği için kişilerin maruziyetleri belirlenirken ağırlıklı ortalama değerlerin hesaplanması gerekebilir. Bu durumunda kullanılan formüller Tayyarı ve Smith (1977) tarafından Eş. 3.10 ve Eş. 3.11 ile verilmiştir:

$$M_{TWA} = \frac{M_1 * t_1 + M_2 * t_2 + ... + M_n t_n}{t_1 + t_2 + ... + t_n} \tag{3.10}$$

$$WBGT_{TWA} = \frac{WBGT_1 * t_1 + WBGT_2 * t_2 + ... + WBGT_n * t_n}{t_1 + t_2 + ... + t_n} \tag{3.11}$$

Burada;

t_i: i. WBGT değerine maruz kalmanın süresi;

M_i: Aktivite ya da dinlenme zamanında ölçülen/tahmin edilen metabolik oran;

$WGBT_i$: Aktivite ya da dinlenme alanında hesaplanana WGBT değeri;
WGBT: Wet Bulb Globe Temperature ve yaş termometre sıcaklığı olarak açıklanabilir.

$$WGBT_{out} = 0{,}7*T_{nwb}+0{,}2*T_g+0{,}1*T_{db} \quad \text{(dış ortamda, güneş altında)} \quad (3.12)$$

$$WGBT_{in} = 0{,}7*T_{nwb}+0{,}3*T_g \quad \text{(kapalı ortamda, gölgede)} \quad (3.13)$$

Eş. 3.12 ve Eş. 3.13 açık havada ve kapalı ortamda WBGT indeksinin hesaplanmasına ilişkin formülleri vermektedir. Formüllerde geçen simgelerin açıklamaları izleyen şekilde verilmiştir:

T_{nwb} = doğal ıslak ampul küre sıcaklığı (natural wet bulb globe temperature)
T_g = küre sıcaklığı (globe temperature)
T_{db} = kuru ampul sıcaklığı (dry bulb temperature)

Islak ampul küre sıcaklığı, sıcaklık, nem, rüzgâr hızı ile görünür ve kızılötesi radyasyonun insanlar üzerindeki etkisini tahmin etmek için kullanılan bir sıcaklık türüdür. Dış ortam sıcaklığı, kuru ampul (küre) sıcaklığı da denir. Genellikle cıvalı termometre ile ölçülür. Doğal ıslak ampul (küre) sıcaklığı da yine cıvalı termometre ile ölçülür ancak civanın olduğu kısım bir pamuk fitil ile kaplıdır. Fitil tüpün tamamını kaplamalıdır. Fitil ölçümden 30 dk. önce saf su ile ıslatılmalıdır. Her yeni ölçümde temiz bir fitil kullanılmalıdır. Bu ölçümle havanın bağıl nemi veya buhar basıncı hakkında veri elde edilmiş olur. Bu ölçümlerden yola çıkarak WBGT indeksi hesaplanır.

Bu indeks bir ısı stresi indeksi olup, literatürde oldukça sık kullanılan en kabul görmüş ısı stresidir (Bernard ve Kenney, 1994; Sheffield, Herrera, Lemke, Kjellstrom ve Romeor, 2013; Rowlinson, YunyanJia, Li ve ChuanjingJu, 2014; Holmer, 2010; Villalba, Wu, Ashley ve Bernard, 2018). WBGT indeksinin literatürde yer alan diğer ısı indekslerine göre (ör: Humidex) ısı stresine bağlı riskleri tespit etmede çok daha fazla duyarlı olduğu Morris, Gonzales, Hodgson ve Tustin, tarafından 2019 yılında ispatlanmıştır. Bu indeks hava sıcaklığı, göreli nem ve rüzgâr hızını dikkate alarak hesaplanan bir indekstir (Wang ve diğerleri, 2019).

Literatürde verilen sınır değerlerinin ve ısı stresi indekslerinin tamamına yakını ısıya belli bir süre geçtikten sonra doğal olarak alışan insanlar için geliştirilmiştir (Varley, 2004). Çizelge 3.3'te ACGIH tarafından önerilen limit değerler belirtilmiştir (Tayyari ve Smith,1997).

Çizelge 3.3. İş yüküne göre katlanılabilecek maksimum sıcaklık değerleri

	İş yükünün metabolik oran (M) eşiti		
	Hafif	Orta	Ağır
İş Rejimi	M<200 kcal/sa	200<M<350 kcal/sa	350<M<500 kcal/sa
Sürekli iş	30 °C	26,7 °C	25 °C
%75 çalış, %25 dinlen	30,6 °C	28 °C	25,9 °C
%50 çalış, %50 dinlen	31,4 °C	29,4 °C	27,9 °C
%25 çalış, %75 dinlen	32,2 °C	31,1 °C	30 °C

ACGIH'ın 2009 yılında uyarladıkları WBGT indeksine bağlı maruziyet limitleri ise Çizelge 3.4'te verilmiştir (Al-Bouwarthan, Quinn, Kriebel ve Wegman, 2019) :

Çizelge 3.4. İş yüküne göre katlanılabilecek maksimum sıcaklık değerleri (Al-Bouwarthan ve diğerleri, 2019)

	İş yükünün metabolik oran (M) eşiti		
İş Rejimi	Hafif	Orta	Ağır
Sürekli iş	30,8 °C	28,2 °C	26,6 °C
%75 çalış, %25 dinlen	31,2 °C	29 °C	27,6°C
%50 çalış, %50 dinlen	31,8 °C	30,1 °C	28,8 °C
%25 çalış, %75 dinlen	32,3 °C	31,3 °C	30,5 °C

Varley (2004) tarafından, WBGT indeks değerlerine ve aktivite seviyesine göre, ısıya alışabilen / dayanıklı ve ısıya alışamayan / dayanıksız çalışanlar için geliştirdiği önerileri gösteren değerler Çizelge 3.5 ve Çizelge 3.6 ile verilmiştir.

Çizelge 3.5. İş yüküne göre katlanılabilecek maksimum sıcaklık değerleri (Isıya dayanıklı çalışan için)

	İş yükünün metabolik oran (M) eşiti			
İş Rejimi	Hafif	Orta	Ağır	Çok Ağır
Sürekli iş	29,5 °C	27,5 °C	26 °C	
%75 çalış, %25 dinlen	30,5 °C	28,5 °C	27,5 °C	
%50 çalış, %50 dinlen	31,5 °C	29,5 °C	28,5 °C	27,5 °C
%25 çalış, %75 dinlen	32,5 °C	31 °C	30 °C	29,5 °C

Çizelge 3.6. İş yüküne göre katlanılabilecek maksimum sıcaklık değerleri (Isıya dayanıklı olmayan çalışan için)

	İş yükünün metabolik oran (M) eşiti			
İş Rejimi	Hafif	Orta	Ağır	Çok Ağır
Sürekli iş	27,5 °C	25 °C	22,5 °C	
%75 çalış, %25 dinlen	29 °C	26,5 °C	24,5 °C	
%50 çalış, %50 dinlen	30 °C	28 °C	26,5 °C	25 °C
%25 çalış, %75 dinlen	31 °C	29 °C	28 °C	26,5 °C

Çalışanların ısıya alışamama durumlarındaki limit değerlerin belirlenmesinde literatürdeki bir diğer görüş ise Rowlinson ve diğerleri (2014)'ne aittir. Yazarlara göre ısıya alışamayan çalışanların limit değerinin ısıya alışabilen çalışanların limit değerlerinden yaklaşık 3°C WBGT daha az olması gerekmektedir.

İş yükünün metabolik oran eşitinin hesaplanması noktasında çalışanların iş yapma süreleri boyunca kollarına takılan ve kişinin fizyolojik özelliklerine göre ilgili görevler için ne kadar enerji harcandığını gösteren cihazlardan yardım alınabilir (İnternet-2).

Bernard ve Ashley (2009) tarafından her çalışan için farklı üst sınır elde edilmesine olanak sağlayan bir formül önerilmiştir. İşte harcanan enerjilere göre her kişi bazında limit değerleri TLV= 56,7-11,5*log10(M) formülü kullanılarak da hesaplanabilir. *M* değeri Watt

cinsinden işte harcanan enerjiyi göstermektedir Ancak literatürde genel kabul görmüş limit değerleri ACGIH tarafından önerilen değerlerdir.

İş ortamında kişilerin termal konforunu hesaplama formüllerinde kullanılabilecek bir diğer bilgi ise Meshi, Kishinhi, Mamuya ve Rusibamayila (2018)'nin yaptığı yaptıkları deneysel çalışma sonucunda elde edilmiştir. Araştırmacılar üretim ortamındaki/dış ortamdaki her 1 derece WBGT artışının, 0,174 derece vücut iç sıcaklığında artışa neden olacağını ifade etmişlerdir. İnsanların sıcakkanlı olduğu ve vücut iç sıcaklığını dengede tuttukları bilinmektedir. Ancak dış ortam sıcaklıklarının çok yüksek olduğu özellikle yaz aylarında çalışanların vücut iç sıcaklıkları belli bir dereceye kadar artış gösterebilir. Vücut iç sıcaklığının insan sağlığına zarar verecek boyuta geçeceği son derecenin, ağızdan alınan ölçümlerle 38.2^{o}C olduğu ifade edilmiştir (Sund-Levander, Forsberg ve Wahren, 2002). Bu bilgi göz önüne alınarak vücut iç sıcaklığının yaklaşık 38.2^{o}C'yi geçmesini dış ortam sıcaklığındaki artışa bağlı bir formülle ifade ederek termal konfor parametresi iş rotasyon modellerine dâhil edilebilir. Ancak bu formülde sadece dış ortam ve iç vücut sıcaklığına ilişkin değerler dikkate alınacağından, bir önceki bölümde de ifade edilen, doğrudan işlere ilişkin metabolik oran değerlerine göre bir kıyaslama yapılması söz konusu olamayacaktır. Ancak vücut iç sıcaklığına, dış ortam sıcaklığının etkisi kadar, metabolik faaliyetlerin de etki ettiği düşünülürse, çok yüksek sıcaklıkların hâkim olduğu üretim süreçlerine sahip işletmelerde (cam üretimi ya da demir çelik üretimi) çalışanların termal konforunun sağlanması için bu yaklaşım rahatlıkla kullanılabilir.

Isı stresini ve ısıdan kaynaklı zorlanmayı etkileyen faktörler izleyen şekilde sıralanabilir: çevresel termal şartlar (hava sıcaklığı, radyant ısı, nem ve havanın hızı), fiziksel iş yükü, kıyafet, yaş, cinsiyet, ırk, beslenme, sağlık geçmişi, vücut kitle indeksi, ısıya alışma derecesi.

Elbette ki bu faktörlerin tamamı ısı stresine aynı derecede etki edemez. Çevresel termal faktörler ve fiziksel iş yükü, ısı stresine doğrudan ve en yüksek derecede etki eden faktörlerdir ki bu faktörler tez kapsamında dikkate alınmıştır. Tez çalışması kapsamında yukarıda ifade edilen faktörlerden çok daha az etkiye sahip diğer faktörler değerlendirme kapsamına alınmamıştır. Çünkü işçiler aynı çalışma kıyafetini giydiği, sağlıklı erkek ve 30-40 yaş aralığındaki kişilerden seçildiği için bu faktörlerin etkisi karar noktasını değiştirecek kadar ciddi etkiye sahip olmayacaktır.

Çevresel sıcaklık ve metabolik iş yükü arttıkça vücut, iç sıcaklık dengesini sağlamakta zorlanacak ve dolaşım sistemi ile terleme mekanizmasını devreye soksa da belli bir süre sonrasında vücut iç sıcaklığı kabul edilebilir seviyenin ötesine geçecektir. Bu durumda tez çalışmasının önceki kısımlarında anlatılan ve ısı stresine bağlı olarak gelişen rahatsızlıkların ortaya çıkması kaçınılmaz olacaktır. Üretim operasyonlarının düzenlenmesinde ya da çalışanların işlere atanmasında çalışanların termal konforunu ilgilendiren faktörlerin de göz önüne alınması bir gerekliliktir.

Bu açıklamalar ışığında ilgili atama modelinde birden çok kişi ve gün söz konusu olduğu için eklenecek olan termal konfor kısıtının adaptasyonunun ilk basamağını Eş. 3.14 ve Eş. 3.15 ile ifade etmek uygun olabilir. (x_{ijkl} değişkeni, indisler ve parametrelerin açıklamaları tez çalışmasının *6.2.Önerilen Matematiksel Modeller* kısmında verilmiştir.

$$\sum_{j}\sum_{l} x_{ijkl} * WM_{j} \Big/ 8 = \mathrm{MOE}_{ik} \tag{3.14}$$

$$\sum_{j}\sum_{l} x_{ijkl} * WBGT_{j} \Big/ 8 = CTWA_{ik} \tag{3.15}$$

3.3.2. Endüstriyel sıcaklığın zararlı etkileri

Isı stresi fiziksel iş ortamının bir özelliği olarak insan sağlığını, iş güvenliği açısından doğrudan etkilemekte, aynı zamanda verimlilik açısından olumsuz sonuçlar doğurarak işletmeler için ekonomik bir yük haline gelmektedir (Meshi ve diğerleri, 2018). Çalışma ortamındaki sıcaklığın aşırı yüksek ya da düşük olması, çalışanların iş ortamına uyumunu, buna bağlı olarak da sağlığını ve verimini etkiler.

Kişinin vücut iç sıcaklığını sabit tutarak termal konforunu sağlamak için fazladan çaba sarf etmesi iş yerindeki üretim verimliliğini olumsuz etkileyebilir. Ek olarak, termal konforun sağlanmadığı işletmelerde çalışanların zihinsel olarak da olumsuz etkilendiği ve sıcaklığa bağlı olarak yapılan hataların sayısının arttığı da bilinmektedir (Babalık, 2016; Rowlinson ve diğerleri, 2014). Dahası, aşırı sıcaklığın yorgunluk ve uyku hissi vererek iş verimini azalttığı bilinmektedir (Meshi ve diğerleri, 2018). Sıcaklığın yükselmesi bir takım fiziki rahatsızlıklara neden olmakla birlikte aynı zamanda çalışanın hata yapmasına da neden

olacağı için bir takım kalite ve verim kayıplarının ortaya çıkması kaçınılmazdır. Isı stresi sadece iş performansını düşürmekle kalmaz, aynı zamanda birtakım hastalıklara da neden olarak (ısı çarpması, ısı krampları, isilik vb.) iş gücü kaybını da tetikleyebilir. Dang ve Dowell, (2014) yaptıkları deneye dayalı çalışmada; en çok karşılaşılan ısıya bağlı rahatsızlıkların kalp atımının hızlanması, baş ağrısı, kas krampları ve baş dönmesi, kusma, denge kayıpları, bilinç kaybı olduğunu ifade etmişlerdir. Aynı zamanda çalışanların vücut sıcaklıklarından bölgesel kayıpları artrit denilen eklem hastalıklarına ve diğer romatizmal hastalıklara neden olduğu bilinmektedir (Babalık, 2016).

Morris ve diğerleri (2019) çalışmalarında özellikle emek yoğun işlerde çalışanların vücutlarında fazladan ısı üretilmesi, çevresel sıcaklık faktörleri ile bütünleşerek sağlığa zarar verecek boyutlarda ısı stresine neden olabileceğini belirtilmişlerdir. Birçok KOBİ'nin emek yoğun süreçler kapsamında üretim yaptığı dikkate alınırsa ve küresel ısınma ile atmosferik şartların daha da kötüleştiği faktörü de dikkate alınınca önümüzdeki yıllarda birçok işletme için çalışanların ısı stresi kavramının İSG boyutunun ciddi bir önem kazanacağı söylemek mümkündür.

Üretim ortamlarında genellikle ortam sıcaklığının ilgili makine ve teçhizatın sürekli çalışması nedeni ile arttığı ve yüksek sıcaklıklarla mücadele edildiği bilinmektedir. Üretilen ürünlerin sağlaması gereken kalite özelliklerinden dolayı makinelerin ya da üretim birimlerinin sıcaklıklarına doğrudan müdahale edilememektedir. Çalışanları bu yüksek sıcaklıklardan alınacak kişisel önlemlerle korumak mümkün olamaz ise bir takım yönetsel önlemlerle korumak gerekmektedir. Kişisel önlemler ifadesi ile kast edilen, giysilerin üretim ortamındaki termal şartlara uygun seçilmesi, kişilerin dolaşım sistemlerinin ve terleme mekanizmalarının harekete geçmesi ve iklimlendirme cihazlarının kullanılmasıdır. Çalışanları sağlıklarını olumsuz etkileyecek yüksek sıcaklıklardan kişisel önlemlerle korumak mümkün olamazsa bir takım yönetsel önlemlerin planlanması gerekir. Ancak ürünlerin üretimi sırasında belirli seviyede tutulması gereken sıcaklıklar mevcut ise ya da üretim ortamına ekonomik gerekçeler ile müdahale edilemiyorsa, üretim ortamında termal konforu sağlamak mümkün olmayabilmektedir.

Bununla birlikte çalışanları iş ortamındaki fiziksel risk faktörlerinden korumak için verilen KKD'lerin (ör: gözlük, baret, eldiven, çelik burunlu ayakkabı, iş kıyafeti vb.) kişilerin vücudunda oluşan fazla ısının uzaklaşmasını engellediği de bilinmektedir. Çalışma

ortamında KKD'lerin bu etkisini azaltmak isteyen çalışanların genellikle iş sırasında rahatsızlık duydukları KKD'leri kullanmama eğilimi gösterdikleri gözlemlenmektedir (Adem ve Dağdeviren, 2015). Bu nedenle kişilerin hem sıcaklığa bağlı hastalıklardan korunması, hem yüksek sıcaklık kaynaklı hata risklerinin en aza indirilmesi, hem de vücutlarından sıcaklığı uzaklaştırırken diğer risklere maruz kalmamaları için iş çizelgelerinde sıcaklık faktörünün de dikkate alınması bir gereklilik olarak ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle, günlük, haftalık ya da aylık bazda personel atamaları yapılırken, çalışanların maruz kalacakları sıcaklıkların da dikkate alınması ergonomik açıdan ortaya çıkabilecek olası rahatsızlıkların önlenmesi açısından önem arz etmektedir

Termal konfor parametresi daha çok yapılan işin ağırlığı ile ilgilidir. Kişinin çok daha ağır iş yaptığı durumlar için daha düşük sıcaklıklarda çalışması istenir. Bu durumun ergonomik açıdan ifadesi ise, yapılan işin ağırlığının artması dış çevre sıcaklığının yanı sıra kişinin metabolizması sonucunda da bir sıcaklık meydana gelmesi ve dış çevre sıcaklığı ile kişi üzerinde tümleşik bir etki oluşturması şeklinde açıklanabilir. Bu nedenle, bu çalışma kapsamında üretim ortamlarının sıcaklıklarının yanı sıra, yapılan işlerin metabolik oran eşiti değerleri de dikkate alınmıştır. Bu durum termal açıdan çalışanların daha rahat edebilecekleri iş atamalarının elde edilmesine olanak sağlarken, aynı zamanda ağır işlerin de çalışanlar arasında eşit bir şekilde dağıtılmasını sağlamıştır.

3.4. Aydınlatma Kavramı

Aydınlatma, içinde bulunulan ortamdaki nesneleri görebilmek için bu nesnelerin çevresine ya da görülmek istenen bölgelere ışık uygulamak olarak tanımlanabilir (Bayrakdar, 2016). İnsanlar içinde bulundukları ortamı yaklaşık olarak %80 görsel olarak , %10 işitsel olarak, %5 ise dokunma yolu ile algılarlar. Bu bilgi göz önüne alındığında, birim yüzeye düşen ışık, bu ışığın şiddeti, parlaklık ya da kamaşma gibi bir takım terimlerin işe uygun aydınlatma düzeyinin belirlenmesinde ve aydınlatma kavramının daha iyi anlaşılmasında etkin rolü olacağından, aydınlatma faaliyetinin içinde yer alan bir takım terimlerin açıklanması gerekmektedir (Babalık, 2016) :

Işık: İnsan gözünün algılayabildiği elektromanyetik ışınım olarak tanımlanır. İnsan gözü dalga boyu 380 ile 780 nanometre(10^{-9}) arasındaki elektromanyetik ışınımları görür ve bunları ışık olarak algılar.

Işık Şiddeti: Işık kaynağında ölçülen ve bir kaynaktan belirli bir yönde yayılan ışık miktarıdır.

Işık Akısı: Işık kaynağından yayılan toplam ışık miktarıdır.

Parlaklık: Parlaklık bir yüzey tarafından yansıyan ya da emilen ışık miktarıdır.

Parıltı ve Kamaşma: Parıltı bir ışık kaynağından ya da yüzeyden ışık yayılmasıdır. Işıklılığın aşırı derecede yüksek olması ya da yayılan ışığın doğrudan göze gelerek rahatsızlık meydana getirmesi ise kamaşmadır. Birçok araştırmacı parıltıyı görsel gürültü olarak ifade etmiş ve gözü rahatsız edecek düzeydeki parlaklığın kamaşma olarak algılanacağını belirtmiştir(Sabancı ve Sümer, 2015).

Aydınlatma Şiddeti: Bir yüzeye düşen ışık miktarına aydınlatma şiddeti denir. Birimi lükstür.

Aydınlatmaya yönelik olarak dikkat edilmesi gereken kurallar, çalışanların kendilerini iyi hissedecekleri görme rahatlığının sağlanması açısından, verimliliğe doğrudan etki ettiği bilinen kurallardır (TSEN-1264-1).

3.4.1. Aydınlatma ölçümü ve limit değerler

Herhangi bir ortamda gerekli aydınlık düzeyi saptanırken, çoğunlukla aşağıdaki dört büyüklüğün durumları göz önünde bulundurulur.

- Görülmesi gereken nesnenin boyutları
- Karşıtlık
- Açıklık
- Görsel iş yapan kişinin yaşı

Bir üretim ortamında sağlanması gereken aydınlık düzeyleri ile ilgili bir değerlendirme yapıldığında tüm çalışanların farklı yaşlarda ve farklı görme özelliklerinde olduğu düşünülürse, birincil faktör olarak yapılan işin özelliklerine uygun aydınlatmanın sağlanması çalışanların tümünü kapsayabilecektir.

Çalışma ortamına ilişkin çeşitli norm ve standartları belirlemeye yetkili ulusal ve uluslararası kuruluşlar, çeşitli büyüklükleri göz önünde bulundurarak olması gereken aydınlık düzeylerini saptamışlardır.

İşletmelerde aydınlatma koşullarının nasıl olması gerektiği gerçekleştirilecek görevlerin gereklerine göre belirlenmiştir ve belirli standartlar altında toplanmıştır (TS EN 12464-1). Klasik ışıkölçerler ile işletme ortamında yerel ve genel aydınlatma seviyeleri ölçülebilir.

Bir iş yerinde aydınlık seviyesini uygun bir şekilde ölçmek için aşağıdaki adımların izlenmesi gerekir:

- İş yerinin tanımlanması: işletmenin boyutlarının ölçülmesi, duvarların yansıtıcılık değerlerinin belirlenmesi, aydınlatma cihazlarının yakın çevresinin hava sıcaklığının ölçülmesi
- Genel aydınlatma sisteminin tanımlanması: İşletmede hangi tip aydınlatma cihazlarının kullandığı, bu cihazların yerleşimi ve sayısı belirlenmesi
- Kullanılan cihazların tanımlanması: İşletme işle ilgili genel bilgiler ve daha önce yapılmış ışık ölçümlerine ilişkin bilgilerin ortaya koyulması
- Aydınlatmanın ölçülmesi: İşletmedeki aydınlık seviyelerin uygun ölçüm cihazları ile ölçülmesi
- Ölçümlerin değerlendirilmesi: İşletmedeki aydınlık düzeylerinin çalışanlar ve yöneticiler tarafından değerlendirilmesi

Aydınlatma seviyesi sadece çalışanın hata yapmasını önlemek açısından değil, çalışanın göz sağlığının korunması açısından da oldukça önemlidir. Yapılan işin detay ve dikkat gerektirme seviyesi arttıkça gerekli aydınlatma seviyesi de artmaktadır. En iyi aydınlatma en yüksek lükse sahip aydınlatma değildir. Yapılan işin niteliğine göre gereken aydınlatma seviyesi değişkenlik göstermektedir (Sümer ve Sabancı, 2015).

Çok yüksek aydınlatma seviyelerine sahip makinelerde çalışan kişilerin alternatif akıma sahip aydınlatma cihazlarının kullanılmasıyla göz yanılması –stroboskopik etki ile bıçakların dönme yönünün ters gibi görünebileceği için olası iş kazalarının sonuçları oldukça tehlikelidir.

3.4.2. Yanlış aydınlatmanın zararlı etkileri

Aydınlatma koşulları işletmelerde genellikle diğer fiziksel risk faktörlerinden (ör: gürültü, titreşim vb.) daha az önemli görülmüştür. Ancak, işletmelerde yapılan hataların ve iş kazalarının yaklaşık %20'sinin aydınlatma koşullarından kaynakladığı bilinmektedir (Bayrakdar, 2016; Logan, 1943).

İyi Bir Aydınlatma;

- İş veriminin artmasını sağlar.
- Yapılan işte ortaya çıkan hatalar azalarak işin kalitesi artar.
- Yanlış veya yetersiz aydınlatmadan kaynaklanan iş kazaları azalır.
- Aydınlatmanın yeterli olması çalışan psikolojisini olumlu etkiler.
- Çalışanların göz sağlığı korunmuş olur.

İşin yapısına uygun aydınlatma koşulları sağlandığında, çalışanın görsel performansı üzerinde olumlu etki oluşturmakta ve çalışanların hata yapmasının engellenmesine olanak sağlamaktadır (Atmodipoero ve Pardede, 2004). Uygunsuz aydınlatmanın çalışanların hata yapmasına neden olduğuna ilişkin araştırmalar yapılan ilk çalışmalardan biri 1943'te yapılmıştır. Çelik endüstrisinde gerçekleşen iş kazalarının yaklaşık %29'unun aydınlatma sorunları neticesinde olduğuna ilişkin çıkarımlar yapılan bu çalışma Logan tarafından gerçekleştirilmiştir. İnsan gözüne en uygun aydınlatma aslında doğal aydınlatma olan gün ışığıdır. Ancak çoğu zaman işletmelerde gün ışığı yeterli gelmediği için yapay aydınlatma kaynaklarından da faydalanılmaktadır. Yapay aydınlatma kaynaklarının da kullanılmaya başlaması ile çalışanların aydınlatma şartlarından kaynaklanan şikâyetleri de artmıştır. (Wilkins, Nimmo-Smith, Slater ve Bedocs, 1989). Wilkins ve diğerleri (1989) çalışmalarında floresan lambalarla aydınlatılan bir ofis ortamında çalışanların yaşadıkları baş ağrılarının aydınlatma kaynaklarından mı ileri geldiğine yönelik bir takım araştırmalar yapmıştır. Araştırmacılar, aydınlatma kaynaklarında yaptıkları bir takım düzenlemeler ile çalışanların yaşadıkları baş ağrılarını azalttıklarını ifade etmişlerdir. İş ortamında aydınlatma faktörü çalışanların göz sağlığının korunması ve yapılan iş kazalarının azaltılması anlamında önemli faktörler arasındadır. Çünkü yapılacak işin niteliğine göre tasarlanmış iyi bir aydınlatma, çalışanların görme yetenekleri ile de birleşince üretim ortamındaki risklerin daha kolay fark edilmesine olanak sağlar. Bir iş ortamında

aydınlatma ve onunla ilgili faktörlerin yeterince önem görmemesi iş kazalarının önlenmesini zorlaştıracaktır.

Aydınlatma faktörü iş sağlığı ve güvenliği açısından ele alındığında aydınlatma şiddetinin yüksek olmasının çalışanlar üzerindeki olumsuz etkisini parıltı ve kamaşma, düşük olmasının etkisini de iş kazalarının artışı şeklinde özetlemek mümkündür. Özellikle parlak yüzeylerdeki parıldama, kamaşma gibi aydınlatma ile ilgili faktörlerin çalışanların iş yerindeki konforunu en az titreşim, gürültü ve termal konfor parametreleri kadar etkilediği söylenebilir.

Gün ışığı en doğal ve kişinin kendisini en rahat hissettiği aydınlatma kaynağı olup, üretim ortamlarında da kullanılması en çok önerilen kaynaktır. Ancak çoğu zaman üretim ortamlarının yapısı gereği sadece gün ışığı yetersiz kalmaktadır. Bu durumda bir takım yapay aydınlatma kaynaklarına başvurulması kaçınılmazdır. Yapay aydınlatma kaynaklarının yerleştirilmesi, yapılan işin özellikleri gereği aydınlatma şiddetinin yükseltilmesi çalışanlarda bir takım göz sağlığı problemlerini tetikleyebilir.

Yetersiz ya da yanlış aydınlatma koşullarının neden olduğu göz sağlığına ilişkin sorunları izleyen şekilde listelemek mümkündür:

- Baş ağrısı
- Bulanık görme
- Göz kuruluğu
- Gözlerin sulanması
- Göz kaşıntısı
- Göz tahrişi

Özellikle yapay aydınlatma kaynaklarının sıklıkla tercih edilmesinin çalışanlarda yukarıda sayılan problemlere neden olduğu birçok kaynak tarafından da belirtilmektedir (Bayrakdar, 2016; Sabancı ve Sümer, 2015; Babalık, 2016).

TS-EN 1264-1'de kapalı çalışma alanlarında yapılan işlerin özelliklerine göre sağlanması gereken aydınlatma seviyeleri verilmiştir. Yapılacak işin gerektirdiği dikkat seviyesi,

görülmesi gereken ayrıntı sayısı arttıkça, üzerinde çalışılan nesnenin boyutları küçüldükçe, gereken aydınlık düzeyinin de arttığı bilinmektedir. Yapay ışık ve gün ışığına bağlı olarak işletmede yapılan aydınlatmada, aydınlık çevrenin çalışan üzerindeki en etkili parametrelerinden biri de ışık kaynaklarının yaydığı stroboskopik etkisidir.

Alternatif akım kullanan aydınlatma cihazları, 50 hz'lik frekansta değişken yoğunlukta ışık üretirler ve bu cihazlar yaydıkları ışığın şiddeti oranında bir titreşime neden olmaktadır. Buradaki değişim hızı insan gözünün algılayabileceği değerden fazladır. Bu durum hareketli makine parçalarında ve aletlerde iş sağlığı ve güvenliği açısından bir takım sorunlar oluşturmaktadır. Aynı hızda dönen parçalar duruyormuş gibi algılanabilir. Bu olay stroboskopik etki olarak adlandırılır. Bu etki döner makinelerin dönme yönünün ters yönde algılanmasına, ya da çalışan makinelerin duruyormuş gibi algılanmasına neden olarak iş kazalarına sebebiyet verebilir (Bayrakdar, 2016). Bu etki gün ışığı veren lambalarda, beyaz veya sıcak tonlu ışık veren lambalardan daha fazladır.

Tek aydınlatma kaynağı ile aydınlatılan bir ortamda birkaç dakika çalışılınca bu etki ortaya çıkmaya başlamaktadır (İncir, 2008). Bu nedenle, özellikle torna, freze ve matkap gibi kesici parçaların kullanıldığı makinelerde özellikle göz yanılmasına neden olan bu titreşimlere dikkat edilmesi gerekmektedir. Bu etki çalışanın çalışan makineyi sanki duruyormuş gibi görmesine, makinedeki dönen aksamların (özellikle bıçakların) dönme yönünün ters yönde algılanmasına neden olmaktadır. Bu nedenle aydınlatma faktörlerinin de en az diğer fiziksel risk faktörleri kadar dikkate alınması gerekmektedir. Her işletmede mutlaka olan, kalite kontrol gibi özel aydınlatma koşulları gerektiren görevler bulunmaktadır. Bu tip özel işler yüksek aydınlatma koşulları gerektirdiği için bu tip işlerde stroboskopik etki daha yoğun olacaktır.

Yetersiz aydınlatma koşullarının iyileştirilmesinin ekonomik olarak diğer fiziki faktörlere göre daha uygun olduğu durumu göz önüne alınırsa, yetersiz aydınlatma koşullarını iyileştirme sürecinin yönetilmesi daha kolaydır. Ancak yapılan işin özelliği gereği çok yüksek şiddette aydınlatmaya gerek duyuluyor ise bu durumu insan gözünü rahatsız etmeyecek seviyeye çekmek doğru bir yaklaşım olmayacaktır. Böyle bir durumda izlenecek etkin ve ekonomik bir yol olarak iş değişim çizelgeleri önerilebilir. Bir gün içerisinde eğer çalışanlar farklı aydınlatma özelliğine sahip iş istasyonlarında çalışıyorsa, çok yüksek aydınlık seviyesindeki iş istasyonlarında çalışmalarına bir sınır koyularak (ör:

1200 lüks gibi) yüksek aydınlatma şiddetine sahip iş istasyonları, çalışanların göz sağlığının korunması için bir düzenleme getirilebilir.

4. YÖNTEMLER

Tez kapsamında geliştirilen tek amaçlı matematiksel modeller, karışık tam sayılı matematiksel modelleme mantığı kullanılarak geliştirilmiştir. Çok amaçlı modeller ise yine karışık tam sayılı matematiksel modelleme ve HP yapısı ile geliştirilmiştir. HP modellerinin amaç ağırlıklarının belirlenmesi noktasında ise KBDT setlerine dayalı karar modelinden faydalanılmıştır. Çalışmanın bu bölümünde, geliştirilen matematiksel modellerde kullanılan teknikler hakkında bilgi verilmesi amaçlanmıştır. Tez çalışmasında modellere eklenen fiziksel risk etmenlerinin matematiksel temelleri ve hesaplamalarına ilişkin detaylı bilgiler 3.bölümde verilmiştir.

4.1. Kararsız Bulanık Dilsel Terimler Setine Dayalı Karar Modeli

Karar kelimesi Türk Dil Kurumunca ‘Bir iş veya sorun hakkında düşünülerek verilen kesin yargı’ olarak tanımlandığı göz önüne alınırsa,bu tanımdan yola çıkılarak karar verme süreci çeşitli ölçütler temelinde, alternatifler arasından en uygun olanın belirlenmesi olarak da tanımlanabilir (Dağdeviren, 2007). Karar verme sürecine birden fazla kriterin dâhil olması; süreci, ÇKKV olarak da adlandırabileceğimiz, ÇAKV ve Çok Ölçütlü Karar Verme (ÇÖKV) olarak 2 ana başlıkta ifade edilebilen bir sürece dönüştürmektedir. Her iki durumda da karar vericinin sonlu ya da sonsuz alternatif arasından, problemini etkileyen faktörler neticesinde en uygun alternatifi seçmesi durumu söz konusudur. ÇAKV teknikleri, sonsuz sayıda alternatifin matematiksel programlama yapısı içinde detaylı olarak tanımlandığı durumlardaki karar vermeye dayanır ve doğrusal programlama, hedef programlama, dinamik programlama gibi çeşitli teknikleri içerir. ÇÖKV ise, sonlu sayıda alternatifin seçilmesi, sıralanması, sınıflandırılması ya da önceliklendirilmesi amacı ile yapılan değerlendirmeleri kapsar. Bu amaçları gerçekleştirmek için Analitik Hiyerarşi Prosesi, Analitik Ağ Prosesi, Electre, Topsis Promethee gibi çeşitli teknikler kullanılmaktadır. (Dağdeviren, 2018). Tez çalışması kapsamında ÇAKV tekniklerinden HP, ÇÖKV tekniklerinden ise literatürdeki diğer yöntemlere göre görece yeni geliştirilen Kararsız Bulanık Dilsel Terimler (KBDT) setine dayalı bir karar modeli kullanılmıştır.

KBDT setleri karar vericilerin düşüncelerini karar verme sürecine daha kolay aktarmalarına olanak sağlayan karar vericilerin kararsızlık/tereddüt durumlarını da dikkate

alacak şekilde geliştirilmiş ve literatürde görece yeni olmasına rağmen birçok uygulamada yer edinmiş bir dilsel terimler setidir (Yavuz ve diğerleri, 2015; Gou, Liao, Xu ve Herrera 2017). Bu tez çalışması kapsamında hedef ağırlıklarının belirlenmesi sırasında, Yavuz ve diğerleri (2015) önerdikleri KBDT setlerine dayalı çok kriterli dilsel karar modeli sadece uygulamanın bir parçası olarak kullanıldığı için bu terimler setine ilişkin teorik bilgiden ziyade pratik uygulama adımları sunulmuştur. Bu konu hakkında ayrıntılı teorik bilgi edinmek isteyen okurlar, Rodriguez, Martinez ve Herrera (2012) ile Herrera ve Martinez (2000) çalışmalarından faydalanabilirler.

Rodriguez, Martinez ve Herrera (2013) bu setleri karar verme amacı ile kullanan ilk araştırmacılardandır. Kararsız Bulanık Dilsel Terimler seti geliştirildiği tarihten itibaren, çok farklı ÇKKV yöntemlerine entegre edilmiştir. Bu çeşitliliği örneklendirmek açısından izleyen çalışmalar ile literatürden seçilmiş örnekler sunulmuştur: Multimoora (Gou ve diğerleri, 2017), Todim (Yu, Zhang, Zhong ve Sun, 2017; Zhou, Wang ve Zhang, 2018; Zhang ve Xu 2019), Electre (Rashid, Faizi, Xu ve Zafar, 2018; Liao, Wu, Mi ve Herrera 2020), Vikor (Foroozesh, Gitinavard, Meysam Mousavi ve Vahdani, 2017; Dong, Yuan ve Wan, 2017; Yang, Pang, Shi ve Wang, 2018; Narayanamoorthy, Geetha, Rakkiyappan ve Joo, 2019), Topsis (Gitinavard, Pishvaee ve Jalalvand, 2017; Ren, Kong ve Pei, 2017; Sun, Guan, Yi ve Zhou, 2018; Zeng ve Xiao, 2018; Xian ve Guo 2020); AHP (Acar, Beskese ve Temur 2018; Kahraman, Onar ve Öztayşi, 2018; Camci, Temur ve Beskese, 2018; Beskese, Camci, Temur ve Erturk 2020); Promethee (Wu, Wang, Chen, Xu ve Li, 2017; Liang, Wang ve Zhang, 2018); DEMATEL (Asan, Kadaifci, Bozdag, Soyer ve Serdarasan, 2018; Dinçer, Yüksel ve Şenel, 2018; Wu ve Zhou 2019; Liu, Ming ve Song, 2019); Copras (Zheng, Xu, He ve Liao, 2018; Darko ve Liang 2020); Oreste (Wang, Gou ve Xu, 2020; Li, Chen, Niu, Wang, 2020) .

Bu çalışmada hedef ağırlıklarının belirlenmesi noktasında Yavuz ve diğerleri (2015)'nin önerdikleri karar vericilerin kararsızlıklarını da kapsayan ikili karşılaştırmaya dayalı karar verme modelinin adımları izleyen şekilde verilmiştir:

Adım 1. Değerlendirme aşamasında kullanılacak dilsel terimler setindeki söz dizilimlerinin tanımlanması

Bu adımda dilsel terimler setinde karar vericilerin karar verme sürecinde kullanacakları söz dizilimleri belirlenir. S dilsel terimler seti için Yavuz ve diğerleri (2015) aşağıdaki tanımlamayı yapmışlardır:

"Önemi yok (ö), çok az önemli (çaö), az önemli (aö), orta derecede önemli (odö), yüksek derecede önemli (ydö),çok yüksek derecede önemli (çydö), mutlak derecede önemli (mdö)"

Çizelge 4.1. Dilsel ifadeler için tanımlanan sayısal ölçek

ö	çaö	aö	odö	ydö	çydö	mdö
0	1	2	3	4	5	6

Çizelge 4.1'de ise, *S* (S_o,S_1,….S_g) setindeki terimler seti için tanımlanan sayısal ölçek gösterilmiştir.

Adım 2. İçerikten bağımsız gramer kurallarının belirlenmesi

Bu adımda, bir önceki adımda verilen dilsel terimler setinden anlamlı söz öbeklerinin üretilebilmesi için gereken işlemler yapılır. İçerikten bağımsız gramer *G* ile ifade edilir (Zadeh,1975; Maiers ve Sherif, 1985).

G = {VN, VT, I, P} şeklinde tanımlanır.

VN, söz dizimsel değişkenler olup, *{ tek terim, bileşik terim, tek ilişki, ikili ilişki, bağlaç}* olarak ifade edilebilir.

VT ise söz öbekleri üretilirken kullanılacak bağlaçları, ifadeleri ve adım 1'de tanımlanan *S* setini içerir.

VT = {daha az, daha fazla, en az, en çok, …. ile ….. arasında, S seti}

$I \epsilon VN$

Tanımlanan bağlaçlar, ifadeler, S setindeki elemanlar ve aşağıda ilişkisi verilen üretim kuralları kullanılarak, anlamlı-mantıklı söz dizilimleri elde edilir. Bu söz dizilimleri 2 alternatif ya da 2 kriter değerlendirilirken kullanılacaktır.

$$P = \begin{pmatrix} \mathrm{I} = \langle tek\ terim\ \rangle \,|\, \langle bileşik\ terim \rangle, \\ \langle bileşik\ terim \rangle ::= \\ \langle tekli\ ilişki \rangle \langle tek\ terim \rangle \,|\, \langle ikili\ ilişki \rangle \\ \langle tek\ ilişki \rangle \langle bağlaç \rangle\ \langle tek\ terim \rangle, \\ tek\ terim ::= S_0 \,|\, S_1 \,|\, ... \,|\, \mathrm{S}_g, \langle tekli\ \text{ilişki} \rangle ::= \\ daha\ az\ \mid\ daha\ çok\ \mid\ en\ az\ \mid\ en\ çok, \\ \langle ikili\ ilişki \rangle ::=\ arasında, \langle bağlaç \rangle ::= ve \end{pmatrix}$$

Şekil 4.1. Üretim Kuralları

Şekil 4.1'de gösterilen köşeli ayraçlar (< , >) tercih edilebilecek her bir seçeneği ayırırken ; "|" işareti ise "veya" anlamında kullanılmaktadır (Rodriguez ve diğerleri, 2012). İçerikten bağımsız gramer bilgisayar programlama dilleri sayesinde çok gelişmiş olan ve genel manada, tanımlanan dilsel terimler arasındaki işlemleri düzenleyen bir yapı olarak ifade edilebilir.

Adım 3. Uzmanlardan bir önceki adımda üretilen ifadeleri kullanarak, kriter ve alternatifleri değerlendirmelerinin istenmesi

Bu adımda, uzmanlardan/ karar vericilerden, karar modelinde tanımlanan alternatifler ve kriterler için ikili karşılaştırma mantığına dayalı değerlendirmeleri yapmaları istenir. Karar verme sürecine dâhil edilecek uzman sayısı 1 adet olabileceği gibi daha fazla da olabilir.

Adım 4. Uzman değerlendirmelerinin E_{GH} fonksiyonu yardımı ile KBDT setine dönüştürülmesi

Uzmanlardan alınan ikili karşılaştırmaları matematiksel olarak işlemek için sözlü ifadeleri bir aralık olarak ifade etmek gerekir. Bu dönüştürme işlemi E_{GH} fonksiyonu yardımı ile gerçekleştirilir (Rodriguez ve diğerleri, 2012). E_{GH} fonksiyonun çalışma biçimi aşağıdaki örneklerle açıklanmıştır:

E_{GH} (orta derece önemli) = [orta derece önemli]

E_{GH} (en azından orta derece önemli) = [orta derecede önemli, yüksek derecede önemli, çok yüksek derecede önemli, mutlak derecede önemli]

Adım 5. Her bir KBDT seti için alt ve üst sınırların belirlenmesi

Bu adımda, bir önceki adımda, dönüştürülen setlerin alt ve üst sınırlarının belirlenmesi, yani her bir KBDT seti için bir aralık tanımlanması işlemi yapılır. Alt sınır kötümser tercihleri temsil ederken, üst sınır ise iyimser tercihleri temsil etmektedir.

Step 6: Dilsel birleştirme operatörünün (φ) seçimi

Birden fazla uzmanın görüşünün alındığı karar modellerinde, bu görüşlerin birleştirilmesi gerekmektedir. Belirlenen dilsel birleştirme operatörü ile uzman görüşleri iyimser ve kötümser toplamlı tercihler olarak ifade edilir. Bu çalışmada, veriyi işlerken bilgi kaybına fırsat vermeyen aritmetik ortalama metodu, dilsel birleştirme operatörü olarak belirlenmiştir (Herrera ve Martinez, 2000).

Eğer x={(s_1,α_1),…,(s_n,α_n)} bir dilsel set olursa bu setin aritmetik ortalaması Eş. 4.1 izleyen şekilde gösterilir:

$$\tilde{x} = \Delta(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\Delta^{-1}(s_i,\alpha_i)) = \Delta(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\beta_i) \quad (4.1)$$

Kelimelerle işlem yapmada aritmetik ortalama yönteminin kendine özgü bir gösterim biçimi vardır. Bu biçim hakkında temel bilgiler Herrera ve Martinez (2000)'in çalışmasından edinilebilir.

Adım 7. Her bir kriter/alternatif için iyimser ve kötümser toplamlı tercihler, dilsel birleştirme operatörünün kullanılarak hesaplanması

Adım 8. Her bir kriter/ alternatif için dilsel aralıkların ve aralıkların orta noktalarının belirlenmesi

Adım 9. Orta noktalarının normalize edilerek kriterlere ya da alternatiflere ilişkin ağırlıkların belirlenmesi

4.2. Matematiksel Modelleme

Matematiksel modellemenin çözümüne yani gerçek dünya problemlerini bir takım matematiksel denklemler ile ifade ederek, istenilen amacı en iyi şekilde sağlamaya yönelik ilk çalışmalar Danztig tarafından 1947 yılında gerçekleştirilmiştir. Matematiksel

modelleme yaklaşımları ile eldeki sınırlı kaynakların alternatif faaliyetler arasında en iyi dağılımının belirlenmesi amaçlanmaktadır. Bir matematiksel modelin amaç fonksiyonu, kısıt seti ve karar değişkeni olarak barındırması gereken bir takım kavramlar bulunmaktadır (Karaöz, 2014). Matematiksel modelleme ile belirlenen kısıt setleri altında tanımlanan amaç fonksiyonunun en iyi değerini verecek karar değişkeni değerlerinin belirlenmesi işlemi gerçekleştirilir (Winston ve Goldberg, 1994). Tipik bir matematiksel modelin kapalı formu izleyen şekilde gösterilebilir (Yücesan, 2012):

$$\text{minz} = \sum_i \text{c}_{ij} * x_{ij} \tag{4.2}$$

$$\sum_i a_{ij} x_{ij} \geq b \tag{4.3}$$

$$x_{ijt} \geq 0 \tag{4.4}$$

Burada sunulan matematiksel model, en küçükleme tipinde bir amaç fonksiyonuna sahiptir. c_{ij} amaç fonksiyonundaki karar değişkeni katsayılarını göstermekte, a_{ij}, x_{ij}, b sırası ile, kısıtların teknolojik katsayılarını, karar değişkenini ve sağ taraf sabitini göstermektedir.

Eş. 4.2 modelin amaç fonksiyonunu göstermektedir. Bir matematiksel modelin amaç fonksiyonu en büyükleme ya da en küçükleme biçiminde olabilir.

Eş. 4.3 modelin kısıt setini göstermektedir. Bir modeldeki kısıt setleri eşitlik, büyük eşit ya da küçük eşit şeklinde olabilir. Modelin amaç fonksiyonu göz önüne alındığında buradaki kısıtın modelin kanonik formunu korumak için büyük eşit şeklinde verildiği görülmektedir.

Eş. 4.4 modelin karar değişkenlerinin tipini gösteren işaret kısıtlarıdır.

Matematiksel modellerin bir sınıflandırması da karar değişkeninin alabileceği değerlere göre yapılır. Burada gösterilen karar değişkeni sürekli değerler alabilir. Eğer karar değişkeninin sadece tamsayı değerleri almasına izin verilirse, model tam sayılı modelleme, eğer karar değişkeninin sadece 0 ya da 1 değerlerini almasına izin verilirse model 0-1 tam sayılı model, eğer karar değişkenlerinin bazılarının tam sayı değer, bazılarının da sürekli

değer almasına izin verilirse model karışık tam sayılı matematiksel model olarak adlandırılır (Karaöz, 2014).

4.3. Hedef Programlama

Klasik bir optimizasyon modelinde doğrudan amaç fonksiyonunun en iyilemesi söz konusudur. Ancak bazı durumlarda ele alınan problemlerde birbiri ile çelişen amaçlar bulunabilir. Bu durumda tek amaçlı optimizasyon yaklaşımları ile çelişen hedefleri modellemek uygun olmayacaktır. Bu problemi çözmek için geliştirilen HP günümüzde kullandığımız şekli ile ilk defa Charnes ve Cooper'ın 1977 yılındaki çalışmaları ile ifade edilmiştir. HP modellerinde hedef değerleri ile gerçekleşen amaçlar arasındaki sapmaların en küçüklenmesi amaçlanır. Dolayısı ile HP modelleri en küçükleme modelleridir (Güngör, Umarusman ve Güneş, 2011). HP modellerini kendi içinde 3 grupta ifade etmek mümkündür: Ağırlıklı HP, Öncelikli HP, En büyük sapmanın en küçüklenmesini amaçlayan (Chebyshev) HP.

Bu türlerin geliştirilmesi ile doğrusal olmayan HP, Kuadratik HP, Kesirli HP, Tam sayılı HP, 0-1 HP, Stokastik HP, Bulanık HP, İnteraktif HP gibi çeşitli HP modelleri literatürde uygulanmıştır (Tamiz, Jones ve El-Darzi, 1995; Jones ve Tamiz, 2003). Tez çalışmasında ağırlıklı HP kullanılmıştır. En genel gösterimi ile ağırlıklı HP modeli aşağıdaki gibi ifade edilebilir (Omrani, Valipour ve Emrouznejad, 2019):

$$\min z = \sum_i (w_i * d_i^+ + w_i * d_i^-) \tag{4.5}$$

$$\sum_{j=1} a_{ij} * x_j - d_i^+ + d_i^- = b \tag{4.6}$$

$$x_j, d_i^-, d_i^+ \geq 0 \tag{4.7}$$

Eş. 4.5 HP modelinin amaç fonksiyonunu göstermektedir. w_i i. hedefin ağırlığını göstermektedir. Amaç fonksiyonuna göre hem pozitif hem de negatif sapmalar en küçüklenmektedir. d_i^-, d_i^+ sırası ile hedeften negatif ve pozitif yöndeki sapma değişkenlerini göstermektedir. Eş. 4.6 hedefe ilişkin kısıtı göstermektedir. a_{ij}, x, b sırası ile

teknolojik katsayıları, karar değişkenini ve sağ taraf sabitini göstermektedir. Bir HP modelinde kısıt setleri içinde her zaman sadece hedefler olmak zorunda değildir. Hedef kısıtları yumuşak kısıtlar olarak ifade edilir. Model içinde aynı zamanda illa ki sağlanması gereken sert kısıtlar da olabilir. Eş. 4.7 ise model içindeki değişkenlerin yönünü gösteren kısıt setlerini ifade etmektedir.

Amaç fonksiyonunda cezalandırılmak ya da en küçüklenmek istenen sapma değişkeni, ilgili hedefin eşitsizlik yönü ile belirlenir. Çizelge 4.2'de eşitsizliğin yönüne göre amaç fonksiyonunda en küçüklenecek sapma değişkenin nasıl belirleneceğinin bilgisi verilmektedir (Ignizio, 1978):

Çizelge 4.2. En küçüklenecek sapma değişkeninin tipine karar verilmesi

Hedefin Yönü	Hedef Programlama kısıtı	En küçüklenecek sapma değişkeni
$f(x) \leq b$	$f(x) + d_i^- - d_i^+ = b$	d_i^+
$f(x) \geq b$	$f(x) + d_i^- - d_i^+ = b$	d_i^-
$f(x) = b$	$f(x) + d_i^- - d_i^+ = b$	$d_i^- + d_i^+$

HP modelleri geliştirildiği tarihten günümüze kadar çok çeşitli alanlardaki problemlerde uygulanmıştır (sağlık ve askeri alanlardaki problemler, üretim planlama, iş gücü çizelgeleme, finans alanındaki problemler, vb.) (Girginer ve Kaygısız, 2009). Çizelge 4.3'de HP literatürüne ait seçkin örnekler sunularak, HP yaklaşımının uygulama alanının genişliğinin ifade edilmesi amaçlanmıştır. İzleyen çizelgenin bir diğer amacı da araştırmacıların ağırlıklı HP modellerinde, hedef ağırlıklarını belirlerken bir ÇKKV tekniğinden de faydalandıklarını ifade etmektir.

Çizelge 4.3'de * ile işaretlenen çalışma olan Tamiz ve Azmi, (2019) çalışmalarında normalizasyon işlemini kullanan araştırmacılardır. HP'de hedefler arasındaki birim farklılıklarından dolayı hedefler arasındaki kıyaslanamama durumu için çeşitli normalizasyon önerileri vardır (Tamiz ve Jones, 1997): Öklid modeli, yüzdelik modeli, toplama modeli, 0-1 modeli vb.

Çizelge 4.3. Hedef programlamaya ilişkin literatür araştırması özet tablo

Yazar, Yıl	HP tipi	Uygulama Alanı
Schniederjans ve Garvin (1997)	0-1 HP-AHP entegrasyonu	Faaliyet tabanlı maliyetleme unsurlarını seçme
Badri (1999)	0-1 HP-AHP entegrasyonu	Tesis yer seçimi-tahsis problemi
Lee ve Kim (2000)	0-1 HP-ANP entegrasyonu	Bilgi sistemleri için proje seçimi
Parra, Terol ve Urıa (2001)	Bulanık HP	Portfolyo seçimi
Karsak, Sozer ve Alptekin (2003)	HP-ANP entegrasyonu	Üretim planlama problemi
Azaiez ve Al Sharif (2005)	0-1 HP	Hemşire çizelgeleme problemi
Topaloğlu (2006)	HP-ANP entegrasyonu	Acil tıp teknikerleri çizelgeleme problemi
Bertolini ve Bevilavqua (2006)	HP-AHP entegrasyonu	Bakım politikası seçim problemi
Badri, (2001)	HP-AHP entegrasyonu	Kalite kontrol problemleri
Choi (2009)	0-1 HP	Montaj hattı dengeleme problemi
Karsak ve Özoğul, (2009)	HP-AHP entegrasyonu	Kurumsal kaynak planlama sistemi seçimi
Shahnazari, Tavakkoli ve Kazemipoor, (2013)	Bulanık HP	Heterojen iş gücü çizelgeleme problemi
Ighravwe, Oke ve Adebiyi, (2017)	Ağırlıklı HP	Bakım işlerindeki işgücü optimizasyonu
Li ve Liu (2017)	Bulanık HP	Makine çizelgeleme problemi
Petridis, Grigoroudis ve Arabatzis, (2018)	Ağırlıklı 0-1 HP	Sürdürülebilir Biyokütle tedarik zinciri
Gupta, Fügenschuh ve Ali, (2018)	Ağırlıklı Bulanık HP	Ulusal çapta sürdürülebilir gelişim hedefleri
Sridevi ve diğerleri (2018)	Öncelikli HP	Termal güç üretiminin en büyüklenmesi
Kumar (2019)	Öncelikli HP	Günlük üretim planlama problemi
Etemad ve diğerleri (2019)	Bulanık AHP-HP	Ormancılık faaliyetlerine yönelik planlama
Tamiz ve Azmi, (2019)	Ağırlıklı HP*	Portfolyo seçimi problemi
Broz, ve diğerleri (2019)	Ağırlıklı HP	Günlük üretim planlama problemi
Shuib ve Kamarudin, (2019)	0-1 HP	Vardiya çizelgeleme problemi
Özder, Özcan ve Eren, (2019)	HP-ANP entegrasyonu	Vardiya çizelgeleme problemi
Omrani ve diğerleri (2019)	Ağırlıklı HP	İşgücü tahsis problemi
Dutta ve diğerleri (2020)	Ağırlıklı HP	e-ticaret pazarı için sürdürülebilir tersine lojistik
Al-Husain ve Khorrasmshahgol (2020)	HP-AHP entegrasyonu	Tedarik zinciri tasarımına ilişkin problemleri
Hirose Scarpin ve Junior,2020	0-1 HP	Seçim kayıt bürolarının yerlerinin belirlenmesi
İç, (2020)	MOORA-HP entegrasyonu	Kredi vermek için uygun iş yerinin belirlenmesi
Mohammadian,ve diğerleri(2020)	0-1 HP	Acil departmanı hemşire çizelgeleme problemi

Ancak, bu tez çalışması kapsamında hedeflerin aynı düzlemde değerlendirmesini amaçlayan normalizasyon işlemi, sayılan bu tekniklerden biri değildir. Çünkü hedef değerler ergonomik açıdan değerlendirildiğinde, modelin hedef değerleri yasalarla ya da ergonomik çevrelerce daha önceden insan sağlığına zararlı oldukları seviyeler olarak belirlenmiştir. Aynı zamanda, yumuşak kısıtlardan birinin (termal konfor) sağ taraf değeri (yani hedef değeri) modelin içinde hesaplanan bir değişkenin 3 farklı değerinden birini alabilecek şekilde düzenlenmiştir.

Bu durumda her gün ve her çalışan için değişebilecek olan hedef değerlerine sahip bir HP modelinde klasik yöntemler ile normalizasyon işlemi yapmak mümkün olmamıştır. Ancak, konuya farklı bir çerçeveden yaklaşıldığında, normalizasyon işlemlerinde amaç, hedeflerden aynı oranda sapmaların amaç fonksiyonuna aynı oranda yansımasını sağlamak ise, bu durum amaç fonksiyonunda yazılacak sapma değerlerinin hedef değerlere bölünmesi ile de elde edilebilir. Böylece hedeflerden sapma oranları temelinde, amaç fonksiyonunun her hedefe eşit yaklaşması durumu sağlanabilir. Bu düzenlemeye ilişkin ayrıntılı bilgi tez çalışmasının *6-Uygulama* bölümünde verilmiştir.

5. ÖNERİLEN YÖNTEM VE LİTERATÜRE KATKI

Bu tez çalışması kapsamında, bir üretim ortamı için yapılan personel çizelgeleme çalışmalarına fiziksel ergonomik risk faktörlerinin eklenebilirliği üzerinde bir araştırma yapılmıştır. Temel bir iş rotasyon modeline fiziksel ergonomik risk parametrelerinden endüstriyel gürültü, titreşim, termal konfor ve aydınlatma faktörleri ile klasik çizelgeleme özelliklerinden iş atama maliyetleri, çalışanların yetenek seviyesi (heterojen çalışanlar), çalışanların izin günü isteği, her bir iş istasyonunun farklı sayıda çalışan gerektirmesi gibi durumların eklenerek yeni bir model önerisi yapılmıştır. Termal konfor parametresinin ek özelliği olarak, çalışanların günlük olarak gerçekleştirdikleri işlerin metabolik oran eşiti değerleri geliştirilen modellerde dikkate alınan kritik unsurlardan bir diğeridir. Çalışanların termal konforunu sağlayabilmek için çalıştıkları işlerin enerji gereksinimi açısından hafif, orta ya da ağır işler bakımından hangi seviyede olduğunun da bilinmesi ve bu bilginin de modele dâhil edilmesi gerekmektedir.

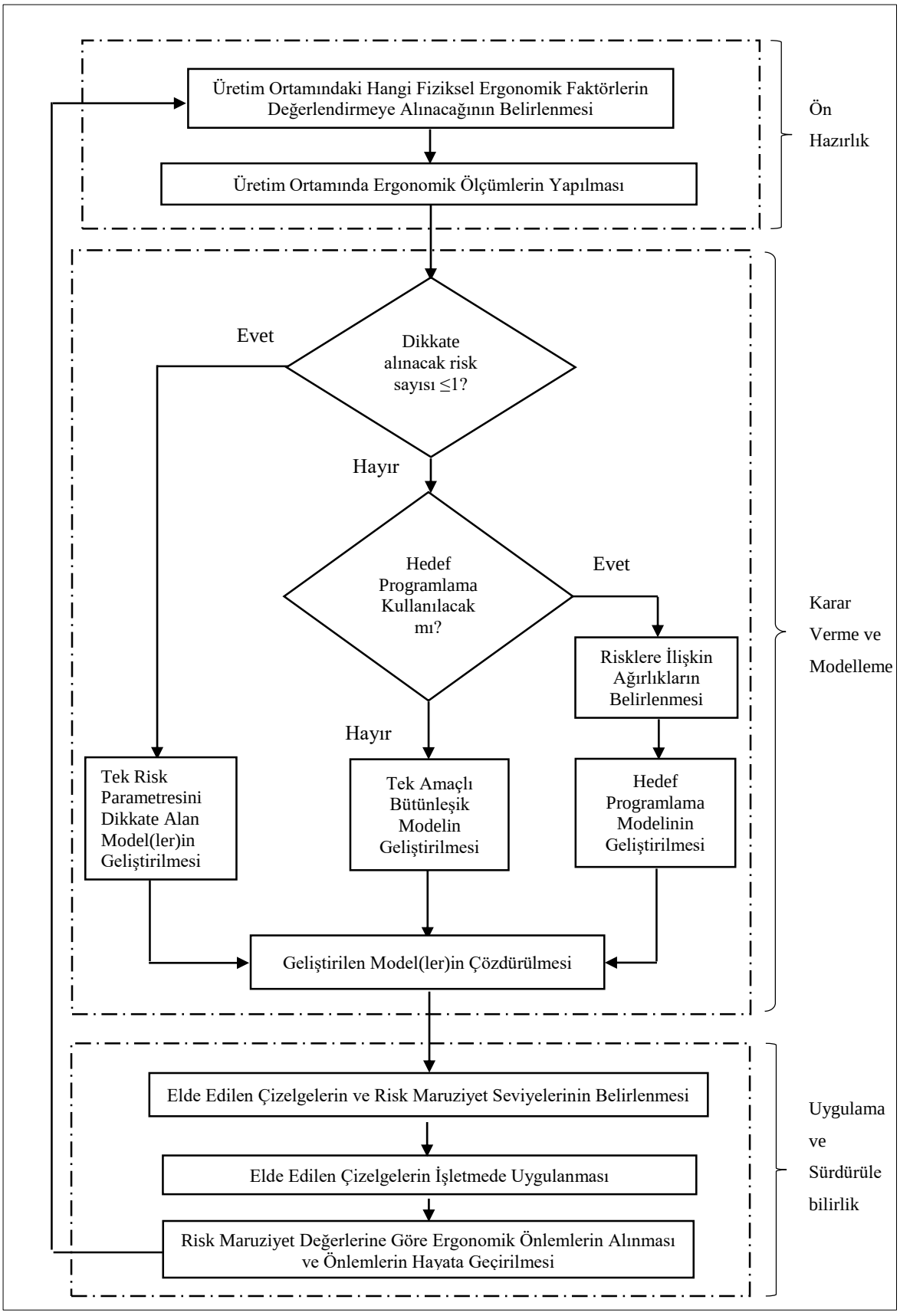
Uluslararası literatürde gürültü maruziyeti açısından birkaç çalışma olsa da, bahsedilen diğer fiziksel risk etmenlerinin ele alındığı, tek ya da bütünleşik bir biçimde modele dâhil edildiği herhangi bir çalışma literatürde bulunmamaktadır. Bu tez çalışmasında geliştirilen model alternatifleri ile literatürdeki bu eksikliğin giderilmesi amaçlanmıştır.

Tez çalışmasının önerilen matematiksel modeller başlığı altında da gösterildiği gibi, tüm fiziksel risk etmenlerinin tek tek ve bütünleşik olarak dâhil edildiği birden çok matematiksel model önerisi getirilmiştir. Tüm fiziksel risk etmenlerinin birlikte değerlendirildiği bütünleşik model önerisinin de HP yaklaşımı ile bir varyasyonu geliştirilmiştir. Bu varyasyonda hedef ağırlıkları KBDT setlerine dayalı olarak geliştirilmiş dilsel karar modeli kullanılarak belirlenmiştir. Titreşim ve gürültü hesaplama formüllerinin üstel, köklü işlemler ve bu işlemlerinin karar değişkenleri ile yapılıyor olması bu iki fiziksel ergonomik risk parametresinin olduğu modelleri doğrusal olmayan matematiksel modeller kategorisine dâhil etmektedir. Aynı zamanda metabolik oran eşiti parametreleri ve termal konfor üst sınırları da birbirlerine göre değer alabilen parçalı fonksiyon yapısındaki kısıtlardır. Aynı zamanda geliştirilen HP modellerinde kısıtlarda yer alan doğrusal olmayan ifadelerin yanı sıra, amaç fonksiyonunda yapılan normalizasyon işleminde iki değişkenin birbirine bölünmesi durumu söz konusu olduğu için bütünleşik

modellerin amaç fonksiyonlarında da doğrusal olmayan ifadeler yer almaktadır. Bu durum modeldeki parametrelere de bağlı olmak üzere matematiksel modelin karmaşıklığını ve çözüm süresini artırıcı etki gösterebilmektedir. Geliştirilen modellerde, modelleme aracı olarak karışık tam sayılı matematiksel modelleme yaklaşımından faydalanılmıştır. Tez çalışmasında geliştirilen modellerin literatüre sağladığı katkıları aşağıdaki gibi özetleyerek listelemek mümkündür:

- Üretim ortamlarında iş kazalarına ve meslek hastalıklarına en fazla neden olan risk parametreleri geliştirilen modellere dâhil edilerek, çalışan sağlığı ve güvenliğinin daha kolay bir biçimde kontrol altına alınmasına olanak sağlanmıştır.
- Önerilen matematiksel modeller işletmelerde ya doğrudan ya da küçük değişikliklerle kullanılabilecek kadar geniş kapsamda tutulmuştur.
- Gürültü, titreşim ya da termal konfor gibi ölçülmesi, incelenmesi ve değerlendirilmesi teorik ve pratik bilgiler gerektiren fiziksel ergonomik risk faktörlerine ilişkin bu bilgiler özet bir biçimde sunulmuştur.
- Fiziksel ergonomik risk faktörlerinin yasalarla ve bir takım ergonomi çevrelerinin çalışmalarıyla belirlenen tüm limit değerleri sunulmuştur.
- Ergonomik ve ekonomik amaçlar bir arada değerlendirilerek, elde edilecek iş rotasyon çizelgelerinin sürdürülebilir ve uygulanabilir olması sağlanmıştır.
- Çalışanlar arasında risk dağıtımı amaçlanarak her çalışana eşit mesafede duran bir model önerisi ile çalışanlar arasındaki sosyal barış desteklenmiştir.
- Çalışanların motivasyonların olumlu yönde etkileyecek, izinli olmak istenilen günde izinli sayılma ve yetenek seviyesine uygun atamalar yapılmasına imkân sağlayan faktörler dikkate alınmıştır
- Zamana bağlı atama yapan diğer modellerin aksine, bir çalışanın işe getirilmesi durumunda, tüm gün görevlendirilmesine olanak sağlayan bir kısıt ile atama maliyeti parametresinin yanı sıra ikinci bir ekonomik özellik daha dikkate alınmıştır.
- Literatürede ağırlıklı HP'de hedef ağırlıklarının belirlenmesinde KBDT setlerinin kullanımına yönelik bir örneğin olmayışı da çalışmayı daha önce sayılan diğer özellikler gibi farklı kılmaktadır.

Tez çalışması boyunca izlenen yol ve önerilen yöntemin kapsamı Şekil 5.1 ile ifade edilmiştir.



Şekil 5.1. Önerilen yaklaşımın akış şeması

Tez kapsamında önerilen yaklaşımı 3 aşamada incelemek mümkündür.

Birinci aşama, ön hazırlık aşaması olarak ifade edilebilir. Bu aşamada üretim ortamından ergonomik ölçümler alınarak, hangi fiziksel ergonomik risk parametrelerinin matematiksel modele dâhil edileceği belirlenir.

İkinci aşama karar verme ve matematiksel modelleme aşamasıdır. Eğer dikkate alınacak risk parametresinin sayısı 1 ise tek risk parametresini dikkate alan matematiksel modelin geliştirilmesi söz konusu olacaktır. Eğer dikkate alınan risk parametresinin sayısı 2 ve daha fazla ise, yeniden bir karar mekanizması devreye girecektir. Burada HP yaklaşımının kullanılıp kullanılmayacağına karar verilmesi gerekmektedir. HP ile ilgili risklere ait kısıtlamaların yumuşak kısıtlarla ifade edileceği göz önüne alınırsa, tek amaçlı bütünleşik modelin kullanımına göre daha esnek bir ergonomik tavır sergileneceğine dikkat edilmelidir. Eğer ağırlıklı HP yaklaşımı kullanılacak ise modele dâhil edilecek risk parametrelerinin ağırlıklarının belirlenmesi gerekmektedir.

Bu aşama aynı zamanda bulanık ortamda grup karar verme tekniğinin de kullanıldığı aşamadır. Literatürde oldukça yeni ve kullanışlı olduğu ifade edilen, uzmanların düşüncelerini karar verme sürecine daha kolay aktarmalarına olanak sağlayan, karşılaştırılan 2 parametre arasında kesin bir üstünlük yargısına varılamadığında, karar vericilere dilsel terimler aracılığı ile yardımcı olan KBDT seti kullanılmıştır. Kriter ağırlıklarının hesaplanmasında dilsel terimler setine dayalı ile risklere ilişkin ağırlıklar tespit edilince, bu ağırlıklar HP modelinde amaç ağırlıkları olarak kullanılacaktır. Ağırlıklı HP modeli geliştirildikten sonra, bu model uygun bir program kullanılarak çözdürülecektir. Eğer dikkate alınan risk parametreleri içinde gürültü ya da titreşim parametreleri var ise, geliştirilen modeller doğrusal olmayan matematiksel modeller kategorisinde olacaktır. Tez kapsamında geliştirilen tüm modellerin çözümünde GAMS 24.9.2 paket programının Baron sürücüsünden faydalanılmıştır.

Üçüncü aşamada modellerin çözdürülmesi ile elde edilen çizelgeler ve risk parametrelerine olan maruziyetlerin incelenmesi öngörülmüştür. Modellerin çözümü sonucunda risk maruziyet değerleri hedef olarak gösterilen yasal sınırların üzerinde ise (HP yaklaşımı kullanıldığı için böyle bir durum oluşabilir) bu aşamada bu risk parametreleri ile ilgili bir takım önlemlerin alınması gerekmektedir. Önlemlerin hayata geçirilmesinden sonra

ölçümler yeniden alınarak süreç yeniden başlatılır. Geliştirilen matematiksel modellerde amaç tüm çalışanları yasal sınırların altındaki risklere maruz bırakacak iş atama modellerinin elde edilmesidir. Ancak bir üretim ortamında tüm iş istasyonlarındaki gürültü ya da titreşim parametreleri zaten yasal sınırın üzerinde ise her şekilde modelden elde edilecek risk maruziyet değerlerinin yasal sınırların üzerinde olacağı açıktır. Bu bilgi göz önünde bulundurulursa, çok yüksek ölçümlerin alındığı iş istasyonlarında bir takım ergonomik önlemler alınarak risklerin en azından belli bir seviyeye düşürülmesi amaçlanabilir. Birçok üretim ortamında ne türlü önlem alınırsa alınsın, fiziksel risklerin sıfıra indirilmesi gibi bir durum söz konusu olmayacağı da bir gerçektir.

Bazı durumlarda ise alınacak önlemlerin ekonomik gerekçeler ile uygulanamayacağı durumlar söz konusu olabilir. Bu ve benzeri durumlarda işletmelerin çalışanların sağlığını korumak ve güvenliğini sağlamak ile ilgili yükümlülükleri devam etmektedir. Böyle bir durumda üretim ortamını tüm iyi ve kötü yönleri ile kabul etmek gerekir. Aslında bir nevi yönetimsel açıdan ergonomik önlem olarak sayılabilecek bu çalışmada önerilen iş rotasyon modellerinin kullanımı ile ekonomik olarak da herhangi bir ek maliyet kalemine maruz kalınmadan çalışanların iş ortamındaki ergonomik risklerden korunması mümkün olabilir.

6. UYGULAMA

Tez çalışmasının bu bölümünde, çalışma kapsamında ele alınan problemin genel tanımı ve kapsamı verilmiştir. Ek olarak, geliştirilen matematiksel modeller ve modellerin çözümleri için deneysel örnekler ile modellerin çözüm performanslarına ilişkin bilgiler verilmiştir.

6.1. Problem Tanımı

Problemin çizilen sınırı çok iş istasyonlu, bir haftalık çizelgeleme periyoduna sahip ve farklı fiziksel ergonomik risklerin olduğu bir iş ortamında yapılması gereken işlere çalışanları atama problemi olarak ifade edilebilir. Bu iş ortamında fiziksel ergonomik risklerden mekanik titreşim, endüstriyel gürültü, termal konfor ve aydınlatma faktörleri dikkate alınmıştır. Üretim ortamında birbirinden farklı iş istasyonları bulunmaktadır. Bu iş istasyonları arasında risk etmenlerinin birbiri üzerinde etki oluşturmayacağı şekilde tasarlandığı varsayılmıştır. Fiziksel ergonomik risk faktörlerinin olduğu üretim ortamlarında çalışanların sağlığının ve işletmenin bir takım temel hedeflerinin korunmasını sağlayacak iş rotasyon modellerinin önerilmesi amaçlanmıştır. Bu amacı sağlamak üzere geliştirilen modellerin sahip olacağı varsayımlar aşağıda listelenmiştir:

- İşçilik maliyetlerinin her çalışan için farklı olduğu kabul edilmiştir.
- Çalışanların yetenek seviyelerinin farklı olduğu yani yetenek seviyelerinin heterojen olduğu varsayılmıştır.
- Her iş istasyonunun gürültü seviyesi makinelerin teknolojik özelliklerinin farklı olmasında dolayı değişkenlik göstermektedir.
- Her iş istasyonunun yaydığı titreşim seviyesi makinelerin teknolojik özelliklerinin farklı olmasında dolayı değişkenlik göstermektedir.
- Her iş istasyonu için hesaplanan WBGT indeks değeri ve bu istasyonda çalışıldığında maruz kalınan metabolik yük birbirinden farklılık göstermektedir.
- Bir iş günü periyotlara ayrılmıştır (Bkz: Şekil 6.1). Her bir çalışma periyodu sonunda çalışanların rotasyonuna izin verilmektedir.
- Her makinenin birer periyotluk zamanlarda ihtiyacı olan çalışan sayısı aynı değildir. Makineler arasında çalışan sayısı ihtiyacı değişkenlik göstermektedir.

- Çalışanların haftada bir gün izin yapabildiği durum dikkate alınmıştır. Dahası çalışanlar izin istedikleri günleri kendileri seçebilmektedir.
- Bir çalışan ilgili planlama sürecinin herhangi bir gününde iş yerine geldiyse, o çalışan o günün tüm periyotlarında görevlendirilecektir.

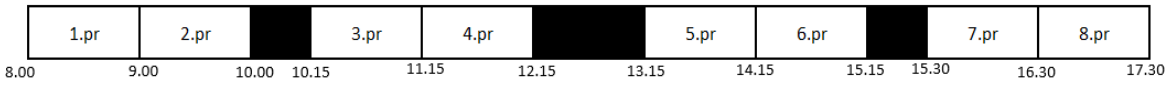
Çalışma kapsamında aslında varsayım olarak yukarda sayılan ifadelerin neredeyse tamamı, çalışmanın gerçek bir işyerini betimlemesine yardımcı olmaktadır. Aslında bir iş yerindeki tüm çalışanların, tüm iş istasyonlarda görev yapacak yetenek seviyesine sahip olmaması, iş istasyonları ya da makinelerin yaydıkları gürültü, titreşim, termal konfor gibi fiziksel ergonomik risk parametrelerine ilişkin değerlerin birbirinden farklı olması, her bir iş istasyonunda yapılan işlemlerin farklı olması nedeni ile aydınlatma gereksinimlerinin ve burada çalışırken harcanacak metabolik değerlerin farklı olarak ele alınması çalışmayı gerçek dünya uygulamalarına bir adım daha yaklaştırmaktadır.

Özel sektör temelinde faaliyet gösteren KOBİ tipindeki neredeyse tüm işletmelerde olduğu gibi, burada da çalışanların birbirinden farklı iş atama maliyetine sahip olduğu ve bir haftalık çalışma süresinde bir gün izinli olduğu durumları dikkate alınmıştır. Çalışma kapsamında çalışanların moral ve motivasyonlarının sağlanabilmesi, elde edilen çizelgelerin sürdürülebilir ve başarılı çizelgeler olmasına imkân tanınması açılarından çalışanların izin istedikleri günlerde izinli olmasına olanak sağlayan kısıt seti matematiksel modellere eklenmiştir. Aynı zamanda, çalışanların yetenek seviyelerine uygun görevlerde çalışmaları iş ortamında olası psikolojik problemlerin önlenmesine ve üretilen ürünlerin istenilen kalite özelliklerinde olmasına doğrudan katkı sağlayacaktır.

Tez çalışmasının *3- Fiziksel Risk Etmenleri ve Matematiksel Hesaplamaları* bölümünde de ifade edildiği üzere, her bir risk faktörünün çalışanların sağlığı üzerinde ciddi olumsuz etkileri bulunmakla birlikte, ilgili risk faktörlerine olan birikimli maruziyetlerin meslek hastalıklarına da yol açacağı bilinmektedir. Aynı zamanda, yüksek sıcaklık ya da yoğun aydınlatma gibi faktörlerden doğacak artan iş kazası olasılıkları nedeni ile üretim operasyonlarının düzenlenmesinde ya da iş ortamında yapılacak stratejik seviyede çalışanların işlere atanması gibi faaliyetlerde bu faktörlerin dikkate alınması bir gerekliliktir.

Çalışanların bütüncül korunmaları durumu aynı zamanda ele alınan iş yerinin de bazı açılardan korunması ile anlamlı bir çıktıya dönüşecektir. Daha açık ifade etmek gerekirse, işyerlerinde yapılacak herhangi bir düzenlemede, iktisadi bir çıktı üretmeye çalışan işletmelerin faaliyetlerine devam edebilmeleri için ekonomik anlamda işletme çıkarlarının da gözetilmesi gerekmektedir. Bu açıdan, atama maliyetleri, yetenek seviyelerine uygun atamaların yapılması durumları dikkate alındığı gibi, çalışanların bir iş gününün herhangi bir periyodunda görevlendirildiğinde, ilgili günün tüm periyotlarında çalıştırılması durumu da dikkate alınmıştır. Bu durumun sağlanmaması yani çalışanların günün bazı periyotlarında görev alıp, bazı periyotlarda hiç görev almaması ergonomik açıdan modele esneklik sağlayan bir durum olmasına karşın gözetilmesi gereken işletme amaçları kapsamında çalışanların ilgili günlerin 8 periyodunda da çalışması gerektiği varsayılmış ve bu durum bir kısıt seti ile matematiksel modellerde temsil edilmiştir.

Bir iş gününde 8 periyot olduğu belirlenmiştir. Şekil 6.1 ile bu durum açıklanmıştır. Çalışanlar sabah 8.00'da göreve başlamakta, 10.00-10.15 ve 15.15-15.30' da olmak üzere günde iki kez 15'şer dakikalık dinlenme molası ve 12.15-13.15 arasında da 1 saat öğle molası verdikleri varsayılmıştır. Şekil 6.1 ile ifade edilen durum günümüzde birçok KOBİ için geçerlidir.



Şekil 6.1. Periyotlara ayrılmış bir iş günü

Çalışmada çalışanların ergonomik risklere olan maruziyetleri günlük olarak hesaplanmış ve farklı günler arasında etkileşim olmadığı varsayılarak günlük maruziyetler arasında ilişki kurulmamıştır. Bu varsayımın temel dayanağı Otto ve Scholl (2013)'ün yaptıkları çalışmada da belirttikleri üzere, çalışanların vardiyalarından sonra ya da çalışma sürelerinin sonunda ilgili risk faktörüne olan maruziyetin bitmesi ve tekrar işe başlayana kadar dinlenmek için yeterli sürenin olmasıdır.

Ergonomik risklerin matematiksel modellere eklenmesi sırasındaki bir diğer kritik konu ise günlük maruziyetlerin hesaplanma biçimidir. Bu noktada, literatürde genel kabul görmüş yaklaşımlardan biri de Zaman Ağırlıklı Ortalama alma yöntemidir (Otto ve Scholl, 2013).

Bu yöntemde çalışanın maruz kaldığı risk faktörü değerinin maruz kalınan süre ile çarpılarak, zamana bağlı ortalama alınarak gün sonu değeri elde edilir. Bu yöntemde maruziyet süresi ve maruziyetten zarar görme arasında doğrusal bir ilişki olduğu varsayılır. Ancak gürültü ya da titreşim gibi fiziksel risk etmenlerine olan maruziyetlerde bu doğrusal ilişki kurulamadığı için zaman ağırlıklı ortalama kullanılması ergonomik açıdan uygun bir çıktı veremeyecektir. Termal konfor ve metabolik oran eşiti değerlerine ilişkin maruziyetlerin hesaplanmasında ise zamana bağlı ağırlık alarak hesaplamalar gerçekleştirilebilir. Bu düşünce temelini, bu iki parametre için Tayyari ve Smith (1997)'in zaman bağlı ağırlık hesaplama formüllerinin kullanılabileceğini belirtmeleri ve bu iki parametre için formülleri vermelerinden almaktadır.

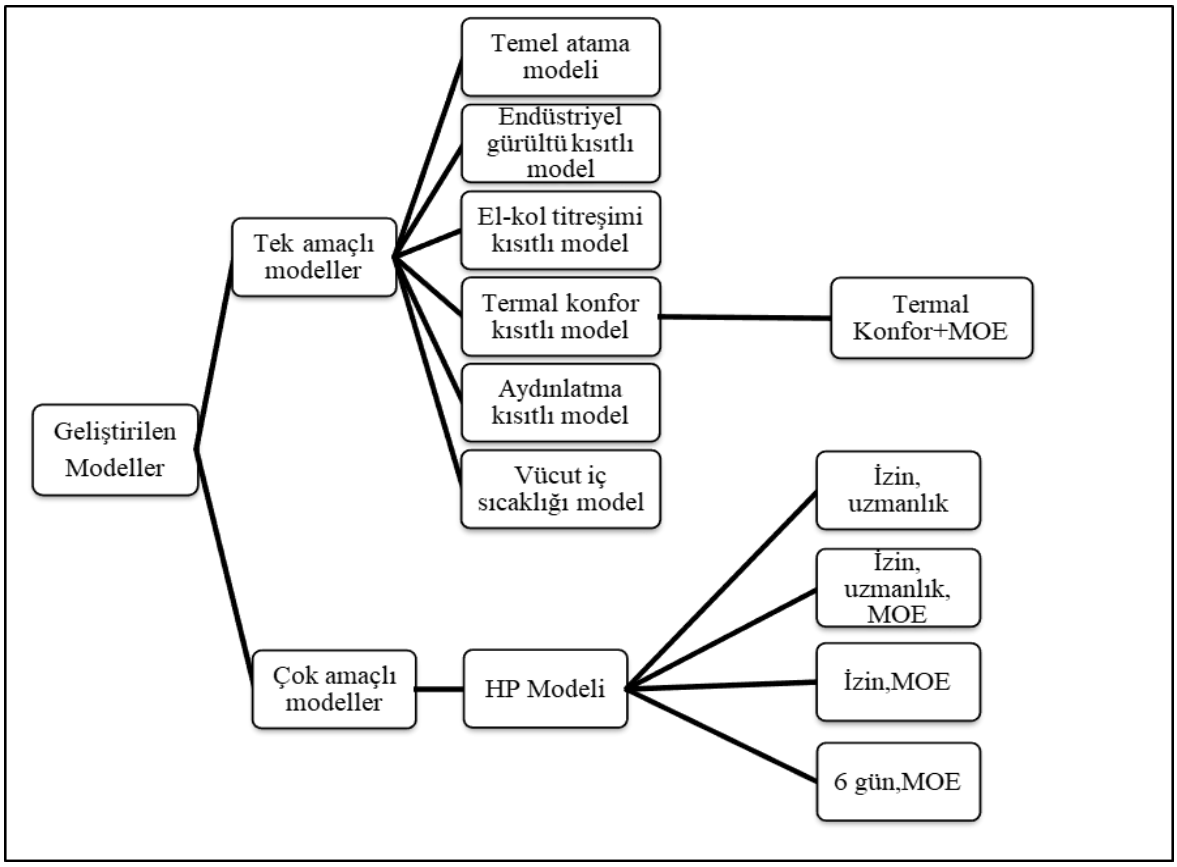
Yine termal konfor parametresi özelinde literatürdeki verilen işlerin metabolik oranlarına göre üst limit tablolarındaki değerlerin çalışanların çalış-dinlen periyotlarına uyması ya da sürekli olarak çalışılmasına göre değişkenlik gösterdiği bilinmektedir. Rowlinson ve diğerleri (2014) yüksek sıcaklıklarda çalışan işçilerin çalış-dinlen periyotlarına zorlanmasının verimin azalmasına yol açabileceğini ancak çalışanın yüksek sıcaklıklarda sürekli çalıştırmanın sağlık açısından sorunlar oluşturabileceği de bilindiği için ilgili iki faktör arasında bir ödünleşme olacağını belirtmişlerdir.

Tez çalışması kapsamında, verim kayıplarının en aza indirilmesi için çalışanların bir saatlik periyotlarda sürekli aynı iş istasyonunda çalıştığı varsayılmıştır. Termal konforun sağlık açısından olumsuz etkilerinin ortadan kaldırılması için zaten, çalışanların gün sonu maruziyetlerinde, metabolik yüklerine göre sıcaklıklara maruz kalmaları durumu sağlandığı için, bahsedilen ödünleşme etkisi ortadan kaldırılmıştır.

6.2. Önerilen Matematiksel Modeller

Çalışmanın bu kısmında önerilen matematiksel modellere ilişkin detaylı bilgi verilmesi amaçlanmıştır. Önerilen modellerin hedef kitlesi küçük ve orta büyüklükteki işletmelerdir. 10'dan daha az çalışana sahip işletmeler mikro işletmeler, 50'den az çalışanı olan işletmeler küçük işletmeler ve 250'den az çalışana sahip işletmeler ise gelir grubu ile de alakalı olmak üzere orta büyüklükteki işletmeler olarak adlandırılmaktadır (İnternet -3).

Özellikle çalışan sayısı ve bütçe arttıkça, ergonomi ve İSG konusunda işletmelerdeki ve çalışanlardaki bilinç artmaktadır. Özellikle orta ve büyük boyutlu işletmelerde; genellikle, iş kazası ve meslek hastalıklarının yasal boyutu ve firma prestiji daha belirgin bir şekilde dikkate alındığı için, ilgili işletmelerde ergonomi hususunda daha ciddi önlemler ve uygulamalar yapıldığı bilinmektedir. Bu nedenle orta ve büyük boyutlu işletmelerde çoğu zaman sadece bir ergonomik risk parametresi etkin olmaktadır. Tek ergonomik risk parametresinin etkin olduğu modellerde, çalışan sağlığı ve ekonomik amaçlara eşit mesafede durulabileceği için, tek ergonomik parametreyi dikkate alan modellerde, maliyete ilişkin parametreler de dikkate alınmıştır. Birkaç risk parametresinin birlikte etkin olduğu üretim ortamları ise daha çok küçük ve orta büyüklükteki işletmelerdeki üretim ortamları olmaktadır. Birden fazla ergonomik risk parametresinin etkin olduğu üretim ortamlarında çalışanların sağlığı ve güvenliği ekonomik amaçların önüne geçtiği için, geliştirilen bütünleşik modellerde doğrudan atama maliyeti dikkate alınmamıştır. Bu kısımdan sonra, önce tek amaçlı modeller, daha sonra da çok amaçlı modellere ilişkin bilgi verilmiştir.



Şekil 6.2. Önerilen model alternatiflerinin hiyerarşik gösterimi

Şekil 6.2 ile önerilen model alternatiflerine ilişkin hiyerarşik bir gösterim yapılması amaçlanmıştır. Önce tek amaçlı model alternatifleri, sonra da çok amaçlı model alternatifleri geliştirilmiştir. Tek amaçlı model önerileri sırası ile temel atama modeli, endüstriyel gürültü kısıtlı model, el-kol titreşim faktörünü dikkate alan model, termal konfor parametreli model ve bu modelin ikincil parametresi olan MOE kısıtı içeren model, aydınlatma kısıtlı model ve son olarak da vücut iç sıcaklığını dikkate alan model şeklindedir. Tek amaçlı modellerin tamamında izin günü isteği, uzmanlık kriteri ve atama maliyetleri dikkate alınmıştır. Çok amaçlı model önerileri ise, HP yaklaşımı ile modellenmiştir. Çok amaçlı modellerde gürültü, termal konfor, titreşim ve aydınlatma parametreleri amaç fonksiyonunda yer almaktadır. Bu modellerin, işletme amaçlarına ve ergonomik amaçlara işaret eden bazı kriterleri içerip içermemesi ile varyasyonları geliştirilmiştir.

Temel Atama Modeli (TA-MODEL-1):

Tüm modeller için geçerli olan bilgileri içeren temel atama modelinin sahip olduğu setler, karar değişkenleri, parametreler ve kısıtlar izleyen şekilde verilmiştir.

Setler:

$i = 1,\ldots\ldots, m$ *çalışan seti*
$j = 1,\ldots\ldots, n$ *makinelerin seti*
$k = 1,\ldots\ldots, K$ *planlama ufku* (*gün*)
$l = 1,\ldots\ldots, L$ *çalışma periyodu*

Karar Değişkenleri:

$$x_{ijkl} = \begin{Bmatrix} 1,\ i.\text{çalışan},\ j.\text{makinede},\ k.\text{gün},\ l.\text{periyotta çalışıyor ise} \\ 0,\ \text{diğer durumda} \end{Bmatrix}$$

$$D\_off_{ik} = \begin{Bmatrix} 1,\ i.\text{çalışan}\ k.\ \text{gün izinli ise} \\ 0,\ \text{diğer durumda} \end{Bmatrix}$$

Parametreler:

$c_{ij} =$ *i. Çalışanın j. Makinede çalışması durumunda ortaya çıkacak atama maliyeti* (*Pbr*)

$w_j =$ *j. makinenin her periyotta ihtiyaç duyduğu çalışan sayısı*

$$e_{ij} = \begin{Bmatrix} 1, \text{ eğer } i. \text{ çalışan } j. \text{ makinede uzman ise} \\ 0, \text{ diğer durumda} \end{Bmatrix}$$

$$İz_{ik} = \begin{Bmatrix} 1, \ i. \text{ çalışan } k. \text{ gün izin istediyse} \\ 0, \text{ diğer durumda} \end{Bmatrix}$$

$$\min z = \sum_i \sum_j \sum_k \sum_l x_{ijkl} * c_{ij} \tag{6.1}$$

$$x_{ijkl} \le e_{ij} \qquad \forall\ i, j, k, l \tag{6.2}$$

$$D\_off_{ik} \le İz_{ik} \qquad \forall i, k \tag{6.3}$$

$$\sum_k D\_off_{ik} = 1 \qquad \forall\ i \tag{6.4}$$

$$D\_off_{ik} \le 1 - x_{ijkl} \qquad \forall\ i, \mathrm{j}, k, l \tag{6.5}$$

$$\sum_j x_{ijkl} \le 1 \qquad \forall\ \ i, k, l \tag{6.6}$$

$$\sum_i x_{ijkl} \ge w_j \quad \forall\ j, k, l \tag{6.7}$$

$$\sum_j x_{ijkl} = \sum_j x_{ijk(\mathrm{l}+1)} \qquad \forall\ \ i, k, l^{-} \tag{6.8}$$

$$x_{ijkl} = 0,1 \qquad \forall i,\ j, k, l \tag{6.9}$$

$$D\_off_{ik} = 0,1 \quad \forall i, k \tag{6.10}$$

Eş. 6.1 modelin amaç fonksiyonunu göstermektedir. Modelin amaç fonksiyonu toplam atama maliyetlerini en küçüklemeyi amaçlamaktadır. Amaç fonksiyonu, atama maliyeti parametresi ile temel karar değişkenin çarpılarak toplanması ile elde edilmektedir.

Eş. 6.2 çalışanlardan daha önceden alınan uzmanlık bilgisine göre atama yapılmasını sağlamak amacı ile yazılan kısıttır. Bu kısıt 0-1 ikili değişkeni olan e_{ij} ve temel karar değişkeni x_{ijkl} ile ilişkilendirilmiştir. Bu kısıt bir çalışan ilgili iş istasyonunda uzman değilse o çalışanı o iş istasyonuna atamamaktadır. Ancak, çalışan ilgili iş istasyonunda uzman ise, çalışanın o istasyona atanıp atanmaması kısıtlanmamaktadır. Bu durum modeldeki diğer parametrelere göre şekillenmektedir.

Eş. 6.3 çalışanlardan daha önceden alınan izin günü isteklerine uygun atamalar yapılmasını sağlamak amacı ile yazılmış olan kısıttır. Bu kısıt ikili değişken D_off_{ik} ile ikili değerlerle tanımlanan $İz_{ik}$ parametresi arasında ilişki kurularak yazılmıştır. Çalışanın izin istediği günlerden birinde mutlaka izinli olması benzer şekilde izin istemediği günlerde de mutlaka çalıştırılması durumu bu kısıt ile sağlanmaktadır.

Eş. 6.4 her çalışanın bir haftalık çalışma periyodunda bir gün izinli olmasını sağlamaktadır.

Eş. 6.5 çalışan izinli iken atama yapılmasını engellemek amacı ile yazılmış olan eşitliktir.

Eş. 6.6, temel atama kısıtlarından olup, çalışanın aynı iş periyodunda birden fazla iş istasyonuna atanmasını engellemek amacı ile yazılan kısıttır.

Eş. 6.7 her makinenin ilgili günler ve periyotlar için her makineye ihtiyacı kadar çalışan atanmasını sağlamak amacı ile yazılmıştır. Kısıt içinde büyük eşit ifadesi kullanılmasının nedeni, modelin çözüm performansının iyileştirilmesini sağlamak içindir. Modelin amaç fonksiyonu en küçükleme olduğu için, iş istasyonlarının ihtiyacı kadar atama yapılacaktır. Ancak büyük eşit işleci, çözüm için kullanılan paket programda, modelin daha az zorlanmasının sağlanması açısından önemlidir. Çünkü bir optimizasyon probleminde, eşitlik şeklinde yazılan ne kadar çok kısıt var ise, model aynı oranda çözüme ulaşmak için zorlanacağı bilinmektedir.

Eş. 6.8 eğer bir çalışan bir günün herhangi bir periyoduna atandı ise geri kalan periyotlara da atanmasını sağlamak amacı ile yazılmış olan kısıttır. Bu kısıt işletme amaçları açısından önem göstermektedir. Çünkü bu kısıt dâhil edilmeden model çözüldüğünde, çalışanların planlama periyodunda bazı günlerde birkaç periyoda atanıp, birkaç periyoda atanmaması durumu söz konusu olabilir. Bu durum aslında ergonomik açıdan çalışanı korumaya yönelik bir duruma işaret etmesine rağmen, klasik çizelgeleme amaçları ile çelişmektedir. Bu nedenle, bu kısıtın modellere dâhil edilmesine karar verilmiştir.

Eş. 6.9 ve Eş. 6.10, modelde kullanılan karar değişkenlerinin tipini gösteren işaret kısıtlarıdır. Temel atama modelinde yer alan kısıt setleri, iş rotasyonu çizelgeleme modellerinde yer alan temel atama kısıtları olduğu için kısıtlara ilişkin herhangi bir kaynak gösterimi yapılmamıştır. Eş. 6.8, aslında temel atama kısıtı gibi görünse de bu kısıtın uyarlaması Moussavi ve diğerleri (2018)'den gerçekleşmiştir.

Aydınlatma Faktörünü Dikkate Alan Model (TA-MODEL-2):

Temel atama modelinde tanıtılan tüm, indis, parametre, karar değişkenleri ve kısıt kümeleri (Eş. 6.1-Eş. 6.10) aydınlatma faktörünü dikkate alan model için de geçerlidir. Ancak bir takım yeni parametre ve kısıtların tanımlanması gerekmektedir.

P aydınlatma kaynaklarının günlük ne kadar süreden sonra çalışanlarda stroboskopik etkisi ile rahatsızlık oluşturacağının üst sınırıdır. P değerinin çok dikkatli bir biçimde, işletmelerde bir takım çok ciddi araştırmalar yapılarak belirlenmesi gerekmektedir. Literatürde bu değerin belirlenmesi konusunda yapılmış herhangi bir çalışma bulunmamaktadır.

$$\sum_{l} x_{\mathrm{i'j'kl}} \leq P \qquad \forall\ i, \mathrm{k} \tag{6.11}$$

Eş. 6.11 ile belirlenen iş istasyonu için her çalışanın ilgili istasyonlarda çalışmalarına sınır getirilmektedir.

Termal Konfor ve Metabolik Oran Eşiti Parametrelerini Dikkate Alan Model (TA-MODEL-3):

Temel atama modelinde tanıtılan tüm, indis, parametre, karar değişkenleri ve kısıt kümeleri (Eş. 6.1-Eş. 6.10) termal konfor ve metabolik oran eşiti parametrelerini dikkate alan model için de geçerlidir. Ancak bir takım yeni parametre, değişken ve kısıtların tanımlanması gerekmektedir.

Ek parametreler:

$WM_{ij} = i.$*çalışanın* $j.$ *iş istasyonunda çalışmasının bir saatlik metabolik oran eşiti* (*kcal*)

$WBGT_j = j.$ *iş istasyonunda hesaplanan WBGT indeks değeri* (^oC)

Ek değişkenler:

$MOE_{ik} = i.$*çalışanın* $k.$ *günki metabolik oran eşiti*

$TLV_{ik} = i.$*çalışanın* $k.$ *günki metabolik oran eşitine göre sınırlandırılması gereken sıcaklık değeri*

$CTWA_{ik} = i.$*çalışanın* $k.$ *günki sıcaklık maruziyet değeri*

Ek kısıtlar:

$$\frac{\sum_j \sum_l x_{ijkl} * WM_{ij}}{8} = MOE_{ik} \quad \forall \; i,k \tag{6.12}$$

Eş. 6.12 çalışanların gün boyunca farklı metabolik oran değerlerine sahip işlerde çalışmaları ile oluşacak metabolik yükü, zaman ağırlıklı ortalama yöntemini kullanarak her gün ve her çalışan için hesaplatmaktadır.

$$\frac{\sum_j \sum_l x_{ijkl} * WBGT_j}{8} = CTWA_{ik} \quad \forall \; i,k \tag{6.13}$$

Eş. 6.13 her gün ve her çalışan için gün boyunca çalıştıkları iş istasyonları için ortalama ortam sıcaklığını zamana bağlı ortalama yöntemini kullanarak hesaplatmaktadır.

$$TLV_{ik} = 30,8 \; eğer \quad 0 < MOE_{ik} \leq 200 \quad \forall \; i,k \tag{6.14}$$

$$TLV_{ik} = 28,2 \; eğer \quad 200 < MOE_{ik} \leq 350 \quad \forall \; i,k \tag{6.15}$$

$$TLV_{ik} = 26,6 \; eğer \quad 350 < MOE_{ik} \leq 500 \quad \forall \; i,k \tag{6.16}$$

Eş. 6.14, Eş. 6.15 ve Eş. 6.16 çalışanın gün boyu çalıştığı işlerdeki metabolik oran eşitinin alacağı değere göre çalışanın maruz kalacağı sıcaklık sınır değerinin doğru belirlenmesini sağlamak amacı ile yazılan kısıtlardır. Termal konforun geçtiği modellerde kullanılan üst limit değerleri Çizelge 3.4'te verilmiştir.

$$CTWA_{ik} \leq TLV_{ik} \quad \forall \; i,k \tag{6.17}$$

Eş. 6.17 her gün ve her kişi için, ilgili kişilerin termal konforunu sağlamak için yazılmış olan kısıttır.

$$MOE_{ik} \geq 0 \tag{6.18}$$

$$CTWA_{ik} \geq 0 \tag{6.19}$$

Eş. 6.18 ve Eş. 6.19 ilgili karar değişkenlerinin tipini de gösteren işaret kısıtlarıdır.

<u>El-Kol Titreşim Maruziyetini Dikkate Alan Model (TA-MODEL-4):</u>

Temel atama modelinde tanıtılan tüm, indis, parametre, karar değişkenleri ve kısıt kümeleri (Eş. 6.1-Eş. 6.10) el-kol titreşim maruziyetini dikkate alan model için de geçerlidir. Ancak bir takım yeni parametre, değişken ve kısıtların tanımlanması gerekmektedir.

Ek parametre: $v_j = j.\, Makinenin\ titreşim\ seviyesi\ m/s^2$

Ek Değişken: $V_{ik} = i.\, çalışanın\ k.\, gün\ kaldığı\ toplam\ titreşim\ maruziyet\ değeri\ (m/s^2)$

Ek kısıt:

$$V_{ik} = \sqrt{\sum_{j}\sum_{l} v_j^{\,2} * x_{ijkl} \Big/ 8} \quad \forall\, i,k \tag{6.20}$$

$$V_{ik} \leq 4 \quad \forall\, i,k \tag{6.21}$$

$$V_{ik} \geq 0 \quad \forall\, i,k \tag{6.22}$$

Eş. 6.20 her çalışan için günlük el-kol titreşim maruziyetini hesaplatmaktadır. Titreşim maruziyet hesaplanmasında karekök ortalama yöntemi kullanılmıştır. Bu değerin 4 -8 saat arası olan maruziyetlerde 4 m/s^2 olan üst limit değerinden küçük veya bu değere eşit olması durumu ise Eş. 6.21 ile sağlanmaktadır.

Eş. 6.22 çalışanların günlük el-kol titreşim maruziyetini hesaplatan değişkenin işaret kısıtıdır.

Endüstriyel Gürültü Maruziyetini Dikkate Alan Model (TA-MODEL-5):

Temel atama modelinde tanıtılan tüm, indis, parametre, karar değişkenleri ve kısıt kümeleri (Eş. 6.1-Eş. 6.10) endüstriyel gürültü maruziyetini dikkate alan model için de geçerlidir. Ancak bir takım yeni parametre, değişken ve kısıtların tanımlanması gerekmektedir.

Burada kullanılan günlük gürültü dozajı formülleri Nanthavanij ve diğerlerinin (2010) kullandığı formüller ile paralellik göstermektedir. Bu tez çalışmasında kullanılan formüller Tayyari ve Smith (1997)'den uyarlanmıştır.

Ek parametre:

$n_j = j.\ Makinenin\ gürültü\ seviyesi\ \left(dBA\right)$

Ek Değişken:

$Noi_{ik} = i.\ çalışanın\ k.\ gün\ maruz\ kaldığı\ toplam\ gürültü\ dosajı\ (\%)$

Ek kısıt:

$$Noi_{ik} = 100 * (\sum_{j}\sum_{l} \frac{2^{n_j - 85/3}}{8} * x_{ijkl}) \quad \forall\ i,k \tag{6.23}$$

$$Noi_{ik} \leq 100 \qquad \forall i,k \tag{6.24}$$

$$Noi_{ik} \geq 0 \quad \forall i,k \tag{6.25}$$

Eş. 6.23 çalışan için 8 saatlik gürültü sınırlamasını 85 dB ile sınırlandıran gürültü dozajını hesaplamaktadır. Eş. 6.24 ise Eş. 6.23 ile hesaplatılan günlük gürültü dozajının her gün ve her çalışan için %100'ü geçmesini engellemek için yazılmıştır. Eş. 6.25 işaret kısıtıdır.

Ağırlıklı Hedef Programlama Modeli

Çalışma kapsamında önerilen bir diğer bütünleşik model alternatifi ağırlıklı hedef programlama modeli idi. Temel atama modelindeki, Eş. 6.2 - Eş. 6.10 arasındaki tüm kısıtlar ağırlıklı HP modeli için de geçerlidir. Ayrıca, termal konfor modelinden Eş. 6.12, Eş. 6.13, Eş. 6.14, Eş. 6.15, Eş. 6.16, Eş. 6.18 ve Eş. 6.19, el-kol titreşimi modelinden Eş. 6.20 ve Eş. 6.22, endüstriyel gürültü modelinden Eş. 6.23 ve Eş. 6.25'de yine ağırlıklı HP modeli için geçerlidir. Ancak modeli HP modeline dönüştürmek için bir takım ek tanımlamaların yapılması gerekmektedir. Yeni tanımlanan değişken ile eklenen amaç fonksiyonu ve kısıtlar izleyen şekilde verilmiştir:

Ek parametreler:

$W_s = s.\ hedef\ \ için\ belirlenen\ ağırlık$

Ek Değişkenler:

$d_{1ik}^{s+}, d_{1ik}^{s-} = s.amaç\ için\ belirlenen\ hedeften\ \ ile\ pozitif\ \ ve\ negatif\ \ sapma\ değişkenleri$

Amaç fonksiyonu ve Kısıtlar

$$\min z = W_1 * \sum_{i}\sum_{k} d_{1ik}^{+} + W_2 * \sum_{i}\sum_{k} d_{2ik}^{+} + W_3 * \sum_{i}\sum_{k} d_{3ik}^{+} + W_4 * \sum_{i}\sum_{k} d_{4ik}^{+} \tag{6.26}$$

Eş. 6.26 ağırlıklı HP modelinin amacını göstermektedir. Hedeflerden pozitif sapma toplamlarının ağırlıklar ile çarpılması ve bu değerlerin toplamının en küçüklenmesini amaçlamaktadır.

$$V_{ik} - d_{1ik}^{+} + d_{1ik}^{-} = 4 \quad \forall\, i,k \tag{6.27}$$

Eş. 6.27, Eş. 6.20 ile hesaplatılan, çalışanların günlük el-kol titreşim maruziyetleri seviyelerinin HP yapısı ile yazılmış halidir. Birinci amaç olarak adlandırılmaktadır. Amaç fonksiyonunda birinci amaçtan pozitif sapmaların en küçüklendiği görülmektedir. Çalışanların 8 saatlik titreşim maruziyeti sonrasında maruz kalabilecekleri limit değer 4.00 m/s^2 değerinin üzerindeki maruziyetler çalışanlarda sağlık sorunlarına yol açacaktır. Bu nedenle pozitif sapmalar en küçüklenmiştir. Titreşim maruziyeti açısından negatif sapmaların, çalışan sağlığı üzerinde herhangi bir olumsuz etkisi yoktur.

$$Noi_{ik} - d_{2ik}^{+} + d_{2ik}^{-} = 100 \quad \forall\, i,k \tag{6.28}$$

Eş. 6.28, Eş. 6.23 ile hesaplatılan çalışanların günlük gürültü dozajı değerleri için yazılan ikinci amaçtır. Amaç fonksiyonunda hedeften pozitif sapmaların en küçüklendiği görülmektedir. Çalışanların günlük gürültü dozaj değeri %100'ün üzerine çıkınca çalışan sağlığı açısından olumsuz durumlar ortaya çıkacağı için pozitif sapmalar en küçüklenmiştir. Negatif sapmaların çalışan sağlığı açısından herhangi bir önemi yoktur.

$$\sum_{l} x_{\mathrm{i'j'kl}} - d_{3ik}^{+} + d_{3ik}^{-} = P \quad \forall\, i,\mathrm{k} \tag{6.29}$$

Eş. 6.29 çalışanların belirli iş istasyonlarında çalışma sürelerine getirilen üst limitin HP mantığı ile yazılmış halidir. Burada P ile belirlenen üst limitten fazla çalışılması durumunda değer alacak pozitif sapmaların en küçüklenmesi, amaç fonksiyonunda yer alan üçüncü amaçtır. Negatif sapmaların bu amaç için de çalışan sağlığı açısından herhangi bir olumsuz etkisi yoktur.

$$CTWA_{ik} - d_{4ik}^{+} + d_{4ik}^{-} = TLV_{ik} \quad \forall\ i,k \tag{6.30}$$

Eş. 6.30, Eş. 6.17'nin HP mantığı ile yazılmış halidir. Yapılan işin ağırlığına uygun olarak belirlenen sıcaklık seviyelerinden pozitif yönlü sapmaların en küçüklendiği, dördüncü amaçtır. Negatif sapmaların bu amaç için de çalışan sağlığı açısından herhangi bir olumsuz etkisi yoktur.

$$d_{ik}^{s+}, d_{ik}^{s-} \geq 0 \tag{6.31}$$

Eş. 6.31 modeldeki sapma değişkenlerinin negatif olmamasını sağlayan işaret kısıtlarıdır.

6.3. Önerilen Matematiksel Modellerin Çözümleri

Tez çalışmasının bu bölümünde önerilen modellerin uygulanabilirliğini ve esnekliğini göstermek için rassal olarak üretilen veriler yardımı ile bir takım denemeler gerçekleştirilmiştir. Bu denemelerin bir diğer amacı ise özellikleri verilen temel atama modelinin, ergonomik risk parametreleri eklendiğinde amaç fonksiyonu ve çalışanların ergonomik risk faktörlerine olan maruziyetleri açısından nasıl tepki verdiğinin gösterilmesidir.

Çözümlerin ilk aşamasında tek amaçlı modellere ilişkin sonuçlar verilerek, verilen sonuçlar analiz edilmiştir. Çözümlerin ikinci aşamasında çok amaçlı modellerin varyasyonlarına ve bu varyasyonların karşılaştırmalı çözüm analizlerine yer verilmiştir. Çözümlerin son aşamasında ise modellerin çözüm zamanına ilişkin performanslarına yönelik analizleri yapılmıştır. Literatürde çalışılan ergonomik özellikler özelinde, denemiş modeller ve veri setleri olmadığı için, denemeler Ms-Excel programı yardımı ile üretilen rassal veriler aracılığı ile gerçekleştirilmiştir. Burada örnekleri verilen çözümler, model sonuçlarının karşılaştırmalarının daha kolay yapılabilmesi için 21 çalışan, 4 iş istasyonuna sahip orta büyüklükteki bir problemin çözümleridir.

Modellerin Validasyonu

Modellere ilişkin çözümlerin verilmesine geçilmeden önce, modellerin gerçekten yazılan kısıtlara uygun atamalar yapıp yapmadığının kontrol edilmesi için 14 çalışanlı, 3 iş istasyonlu küçük boyutlu bir veri setinde modelin validasyonu yapılmıştır. Modelin GAMS

24.9.2 sonucunda elde edilen amaç fonksiyonu değeri, elle hesaplanan amaç fonksiyonu ile aynı bulunmuştur. Modelin tüm iş istasyonlarına ihtiyacı kadar çalışan atadığı, her çalışan haftanın bir günü izin yaptığı ve çalışan izinli iken ona atama yapılmadığı belirlenmiştir. Tüm çalışanlar işe getirildikleri günlerde 8 periyoda da atandıkları, tüm çalışanların izin günü isteklerine ve uzmanlık durumlarına uygun iş istasyonlarına atandıkları gözlenmiştir. Bu küçük boyutlu temel atama modelinde istenilen özelliklerin sağlandığı görüldükten sonra, ergonomik özelliklerin eklendiği modellerin validasyonları, doğrudan tüm sonuçları ile verildiği çözüm aşamasında kontrol edilmiştir. Örneğin gürültü kısıtlı modelde çalışanların gürültü dozajlarının %100'ü geçmesi istenmez ve bu durumu sağlayacak kısıtlar yazılır. Gürültü kısıtlı modelin verilen sonuçlarına göre, çalışanların hiç birinin %100 üzerinde gürültüye maruz kalmaması modelin geçerliliğini göstermektedir. Diğer yandan, modelin hesapladığı gürültü değerleri ile elle hesaplanan gürültü değerlerinin aynı olması da modele yazılan gürültü formülünün doğru hesaplama yaptığının kontrolünü sağlamaktadır. Diğer risk parametrelerinin eklendiği, diğer modeller için de gürültü modelindeki örnek durum tekrar edilerek modellerin geçerliliği test edilmiş ve yazılan kısıtların doğru çalıştığı, istenilen özellikteki çizelgelerin elde edildiği durumu kontrol altına alınmıştır.

6.3.1. Tek amaçlı modellerin çözümleri

İlk olarak her bir risk parametresinin tek başına etkin olduğu tek amaçlı modellerin çözümü verilmiştir. Etkin olan risk parametresinin maruziyet değerlerinin yanı sıra elde edilen çözümdeki diğer risk parametrelerindeki maruziyet seviyeleri de hesaplatılarak sunulmuştur. Tüm modellerin maliyet ve ergonomik değerlere ilişkin performansları özet tablolar halinde ifade edilmiştir. Modellerin denenmesi sırasında kullanılan veriler izleyen tablolarda (Tablo 1-Tablo 4) açıklanmıştır.

Çizelge 6.1. İş istasyonlarındaki çalışan ihtiyacı

İş İstasyonu	Çalışan İhtiyacı
İS-1	5
İS-2	5
İS-3	4
İS-4	4

Çizelge 6.1'de her bir iş istasyonunun etkin bir biçimde çalışması için ne kadar çalışana ihtiyaç duyduğu gösterilmektedir. Birinci iş istasyonu için bu değer 5 iken, dördüncü iş istasyonu için 4 olarak belirlenmiştir.

Çizelge 6.2. Çalışanların iş istasyonlarındaki uzmanlık durumları (e_{ij})

	İS-1	İS-2	İS-3	İS-4
Ç-1	0	1	1	0
Ç-2	1	1	1	1
Ç-3	0	1	0	1
Ç-4	1	0	1	1
Ç-5	1	1	1	1
Ç-6	1	0	1	1
Ç-7	0	1	0	1
Ç-8	1	0	1	1
Ç-9	1	0	1	1
Ç-10	0	1	1	0
Ç-11	1	1	0	1
Ç-12	0	1	1	0
Ç-13	1	0	1	1
Ç-14	1	1	1	1
Ç-15	0	1	1	1
Ç-16	1	1	1	1
Ç-17	1	0	1	1
Ç-18	0	1	1	1
Ç-19	1	1	1	0
Ç-20	0	1	0	1
Ç-21	1	0	1	0

Çizelge 6.2 çalışanların iş istasyonlarındaki uzmanlık durumlarını göstermektedir. Çizelgedeki '1' değeri çalışanın ilgili istasyonda uzman olduğunu, '0' değeri ise ilgili istasyonda çalışmak için uzman olmadığını göstermektedir. Çalışanların yetenek seviyesini dikkate alan tüm modeller, çalışan uzman değilse, ilgili iş istasyonuna kesinlikle atanmamasına yönelik olarak çalışmasını sağlayacak şekilde tasarlanmıştır.

Çalışanların yetenek seviyelerini dikkate alan modellerde çalışanların heterojen yetenek seviyesine sahip olduğu varsayılmıştır. Bu varsayım aslında modelleri, gerçek dünya uygulamalarına yaklaştırmayı amaçlamaktadır. Çünkü üretim işletmelerinde de, bütün

çalışanların bir iş yerindeki tüm görevleri yerine getirecek uzmanlıkta olmadıkları bilinen bir gerçektir. Ancak üretim süreçlerinin bir özelliği olarak bazı durumlarda, bazı işletmelerdeki tüm çalışanlar, ilgili iş yerindeki tüm görevleri yerine getirecek seviyede uzman olabilir. Böyle bir durumda çalışanların homojen yetenek seviyesine sahip oldukları varsayılır.

Çizelge 6.3. Çalışanların bir haftalık çizelgeleme periyodunda izinli olmak istedikleri gün bilgisi ($Doff_{ik}$)

	G-1	G-2	G-3	G-4	G-5	G-6	G-7
Ç-1	1	0	0	1	0	0	1
Ç-2	0	1	1	0	1	0	1
Ç-3	1	0	0	1	0	1	0
Ç-4	0	1	1	0	0	0	1
Ç-5	1	1	0	0	0	1	1
Ç-6	1	0	1	0	1	1	0
Ç-7	0	1	0	1	0	0	1
Ç-8	0	1	0	0	1	1	0
Ç-9	1	0	0	1	0	1	1
Ç-10	0	0	1	0	1	1	0
Ç-11	1	0	1	0	1	0	1
Ç-12	1	1	0	1	0	1	1
Ç-13	0	1	0	1	0	0	1
Ç-14	1	0	1	0	1	1	0
Ç-15	0	1	0	1	0	1	1
Ç-16	1	0	0	0	1	0	1
Ç-17	1	0	1	0	0	0	1
Ç-18	1	0	0	1	0	1	1
Ç-19	0	1	0	1	1	0	1
Ç-20	0	1	1	0	0	1	0
Ç-21	0	1	0	1	0	0	0

Çizelge 6.3 çalışanların bir haftalık çizelgeleme periyodunda izinli olmak istedikleri günlere ilişkin bilgi vermektedir. İlgili çizelgedeki ‘1’ değeri çalışanın ilgili gün için izinli olabileceğini, ‘0’ değeri ise çalışanın ilgili günde izinli olmak istemediğini göstermektedir. Çalışanların izin günü isteklerini dikkate alan tüm modeller, çalışanın izin istemediği günlerde mutlaka çalıştırılarak, izin istediği günlerden birinde de izinli sayılacağı şekilde atama yapılmasını sağlayacak şekilde çalışmaktadır.

Bu çalışmada yer alan izin kısıtları, bir haftalık dönemde her gün mutlaka aktif olan yani haftanın yedi günü üretim yapan ve çalışanlarına haftada bir gün izin veren işletmeler temel alınarak yazılmıştır. Çalışanlardan izin günü istekleri alınırken, bir haftalık planlama periyodunda izinli olmak istedikleri birden fazla gün alternatifi belirtmeleri modelin uygun çözümler verme kabiliyeti açısından önemlidir. Bu modellerde, çalışanların istedikleri günlerde izinli olmaları sağlanarak çalışanlar arasındaki sosyal barış ve eşitlik duygusunun sağlanması, aynı zamanda da motivasyonlarının artırılması amaçlanmıştır. Önerilen kısıt seti ile çalışanların en azından istedikleri günlerden birinde izinli olmaları amaçlanmıştır.

Çizelge 6.4. Çalışanların iş istasyonlarına atanma maliyetleri(c_{ij})

	İS-1	İS-2	İS-3	İS-4
Ç-1	10	20	15	15
Ç-2	15	10	10	10
Ç-3	15	10	15	10
Ç-4	15	20	15	15
Ç-5	20	10	15	15
Ç-6	15	10	15	10
Ç-7	15	20	10	15
Ç-8	10	10	20	15
Ç-9	15	20	10	10
Ç-10	10	15	10	10
Ç-11	10	15	15	10
Ç-12	15	10	20	15
Ç-13	15	20	10	15
Ç-14	10	15	15	15
Ç-15	15	10	20	10
Ç-16	10	15	15	10
Ç-17	15	15	20	10
Ç-18	10	15	20	10
Ç-19	10	15	10	10
Ç-20	10	20	10	15
Ç-21	20	15	10	15

Çizelge 6.4 çalışanların iş istasyonlarında atanmaları durumunda ortaya çıkacak maliyetleri göstermektedir. Her çalışan ve her istasyon için atama maliyetlerinin değişkenlik göstermesi, modellerin gerçek dünya uygulamalarına yaklaştırmaktadır.

Temel Atama Modelinin Çözümü (TA-MODEL-1)

Çizelge 6.1 ve Çizelge 6.4 arasındaki veriler ile GAMS 24.9.2 paket programında BARON sürücüsü kullanılarak çözdürülen temel atama modelinin optimum amaç fonksiyonunun değeri 11240 olarak belirlenmiştir. Temel atama modeline göre elde edilen çizelgenin örnek olması açısından birinci günü ve hesaplatılan ergonomik risk faktörlerine olan maruziyet değerleri izleyen çizelgelerde verilmiştir.

Çizelge 6.5. TA-MODEL-1 ile elde edilen çizelgenin birinci günü

	1.Gün	1.Pr.	2.Pr.	3.Pr.	4.Pr.	5.Pr.	6.Pr.	7.Pr.	8.Pr.	Toplam
Ç-1	İS-2	1	1		1	1	1	1		6
	İS-3			1					1	2
Ç-2	İS-2	1	1	1	1	1	1	1	1	8
Ç-3	İS-2	1	1	1	1	1	1	1	1	8
Ç-4	İS-1	1	1	1	1	1	1	1	1	8
Ç-6	İS-4	1	1	1	1	1	1	1	1	8
Ç-7	İS-2		1	1	1		1	1	1	6
	İS-4	1				1				2
Ç-8	İS-1	1	1	1	1	1	1	1	1	8
Ç-9	İS-3	1	1		1	1	1	1		6
	İS-4			1					1	2
Ç-10	İS-3	1	1	1	1	1	1	1	1	8
Ç-11	İS-1	1	1	1	1	1	1	1	1	8
Ç-13	İS-3	1	1	1	1	1	1	1	1	8
Ç-14	İS-1	1	1	1	1	1	1	1	1	8
Ç-15	İS-2	1	1	1	1	1	1	1	1	8
Ç-17	İS-4	1	1	1	1	1	1	1	1	8
Ç-18	İS-4	1	1	1	1	1	1	1	1	8
Ç-19	İS-1	1	1	1	1	1	1	1	1	8
Ç-20	İS-2	1		1		1			1	4
	İS-4		1		1		1	1		4
Ç-21	İS-3	1	1	1	1	1	1	1	1	8

Çizelge 6.5 temel atama modeline göre elde edilen çizelgenin birinci günü göstermektedir. Bu çizelgeden hangi çalışanın hangi iş istasyonunda, günün hangi periyodu çalıştırılacağının bilgisi alınmaktadır. Çizelge 6.5 ve bundan sonra verilecek olan farklı modellere ait birinci gün çizelgelerinde, çizelgelerin okuması izleyen şekilde yapılmalıdır. Çizelgenin en üst satırı ilgili iş günündeki periyotları **(1.Pr., 2.Pr..,8.Pr.)** göstermektedir.

Çizelgenin en sol sütunundaki koyu harfler ile yazılmış **Ç-1, Ç-2,…..Ç-21** gibi simgeler çalışanları ve numaralarını göstermektedir. Yine çizelgenin en sol sütunundaki **İS-1, İS-2, İS-3, İS-4** ise, iş istasyonlarını simgelemektedir. Çizelge 6.5'e göre Ç-1 (Çalışan-1) , İS-2 ve İS-3 (2. ve 3. İş istasyonları) arasında rotasyon yapmaktadır. Yine Çizelge 6.5'e göre ilgili çalışan günün toplam 6 adet periyodunda İS-2'de, geri kalan toplam 2 periyotta ise İS-3'te görev almaktadır.

Çizelge 6.5'e göre haftanın birinci gününde, Ç-5, Ç-12 ve Ç-16'nın izinli olduğu görülmektedir. Bu bilgi Çizelge 6.3'ten kontrol edilirse, bu izinlerin çalışanların izin günü isteklerine uygun olduğu teyit edilebilir. Aynı zamanda tüm çalışanların, uzmanlık durumuna uygun olarak görevlendirildiği görülmüştür. Çalışmanın bu bölümünde diğer risk faktörlerinin temel atama modeli üzerindeki etkilerinin de araştırılması hedeflendiği için iş istasyonlarına ilişkin, el-kol titreşimi, gürültü, termal konfor ve metabolik oran eşiti değerleri (MOE) de tanımlanarak, izleyen çizelgelerde verilmiştir.

Çizelge 6.6. İş istasyonlarının ergonomik özellikleri

İstasyon	Titreşim (m/s^2)	Gürültü (dB)	WBGT değeri(^oC)
İS-1	4,15	85	26,50
İS-2	3,50	80	24,80
İS-3	4,00	68	29,10
İS-4	3,45	87	32,10

Çizelge 6.6. iş istasyonlarının ölçülen/hesaplanan ergonomik özelliklerini göstermektedir. Çizelge 6.6'ya göre, birinci iş istasyonun (İS-1) gürültü seviyesinin 85 dB, çalışan üzerinde oluşturacağı WBGT indeks değerinin 26,50 ^oC, titreşim seviyesinin ise 4,15 m/s^2 olduğu görülmektedir.

Çizelge 6.7. Çalışanların iş istasyonlarında harcayacakları MOE değerleri (kcal/sa)

	İS-1	İS-2	İS-3	İS-4
Ç-1	260	360	165	110
Ç-2	265	340	168	115
Ç-3	262	362	170	110
Ç-4	258	352	162	111
Ç-5	250	342	165	112
Ç-6	250	345	168	115
Ç-7	248	350	165	110
Ç-8	260	352	170	113
Ç-9	255	355	165	114
Ç-10	259	360	165	108
Ç-11	258	360	160	108
Ç-12	263	356	160	109
Ç-13	262	365	162	110
Ç-14	258	356	165	110
Ç-15	250	348	165	112
Ç-16	253	346	168	115
Ç-17	255	350	160	114
Ç-18	256	362	162	110
Ç-19	260	355	160	105
Ç-20	260	350	157	108
Ç-21	261	347	159	106

Çizelge 6.7’de çalışanların iş istasyonlarında çalışmaları durumunda ortaya çıkan MOE değerleri görülmektedir. Her çalışan için iş istasyonlardaki ilgili değerlerin farklı olduğu görülmektedir. Bu farklılıkların nedeni her çalışanın fiziki farklılıklarından kaynaklanabilecek enerji harcama değişikliklerinin kapsanmasını sağlamaktır. Bu varsayım ile önerilen modellerin gerçek dünya uygulamalarına yaklaştırılmasına olanak sağlanmıştır. Çünkü her çalışanın her iş karşısında harcayacağı enerjiyi birebir oranında

aynı kabul etmek gerçeğe uygun olmayacaktır. Literatürde MOE değeri 200 (kcal/sa)'ün altında ise işler hafif işler, 200 kcal/sa ile 350 kcal/sa arasında ise orta seviye işler, 350 kcal/sa'nın üzerinde ise ağır işler olarak bir sınıflandırma mevcuttur (Tayyari ve Smith, 1997). Bu deneme veri setinde 2 hafif, 1 orta, 1 ağır iş olduğu varsayılmıştır.

Çizelge 6.8. TA-MODEL-1'e göre çalışanların el-kol titreşim maruziyetleri (m/s^2)

	G-1	G-2	G-3	G-4	G-5	G-6	G-7
Ç-1	3,631	4,000	4,000	4,000	3,881	4,000	
Ç-2	3,500	3,500	3,500	3,500		3,500	3,500
Ç-3	3,500	3,500	3,500		3,500	3,500	3,500
Ç-4	4,150	3,902	4,150	4,150	4,150	4,150	
Ç-5		3,500	3,500	3,500	3,500	3,500	3,500
Ç-6	3,450	3,450	3,450	3,450		3,450	3,450
Ç-7	3,488		3,450	3,475	3,469	3,475	3,450
Ç-8	4,150	4,150	4,150	4,150	4,150		4,150
Ç-9	3,870	4,000	4,000	4,000	3,666		4,000
Ç-10	4,000	4,000		4,000	3,941	4,000	4,000
Ç-11	4,150	3,902	4,150	4,150		4,150	4,150
Ç-12		3,500	3,500	3,500	3,500	3,500	3,500
Ç-13	4,000		4,000	4,000	4,000	4,000	4,000
Ç-14	4,150	4,150		4,150	4,150	4,150	4,150
Ç-15	3,500	3,500	3,500	3,500	3,500		3,500
Ç-16		3,987	4,150	4,150	4,150	4,150	4,150
Ç-17	3,450	3,450		3,450	3,450	3,450	3,450
Ç-18	3,450	3,450	3,450	3,456	3,456	3,456	
Ç-19	4,150	4,150	4,150		4,150	4,150	4,150
Ç-20	3,475		3,450	3,469	3,456	3,469	3,450
Ç-21	4,000	4,000	4,000		4,000	4,000	4,000

Çizelge 6.8. temel atama modeline göre çalışanların bir haftalık çizelgeleme periyodunda maruz kaldıkları el-kol titreşimi seviyelerini göstermektedir.

Bu çizelge ve bundan sonra verilecek olan maruziyetlere ilişkin tüm çizelgelerin okuması izleyen şekilde yapılmalıdır. Çizelgelerin en üst satırı, haftalık planlama periyodundaki günleri (G-1, G-1,…..G-7) simgelemektedir. Çizelgenin en sol sütunu ise çalışanları ifade etmektedir. Çizelgedeki boş hücreler ise, çalışanların izinli olduğu günleri göstermektedir.

TA-MODEL-1'de sadece maliyet en küçüklenmesi amacı ile çalışanların izin günü istekleri ve yetenek seviyeleri dikkate alındığı için gürültü, termal konfor, titreşim ve aydınlatma parametreleri açısından yasalarca ya da ergonomi çevrelerince belirlenen limit değerlerin aşılması durumları ile karşılaşılması olasıdır. Tek amaçlı olarak geliştirilen ve çözümleri sunulan diğer model önerilerinde de, her bir model için o modelin kısıtlarında yer alan risk parametresine ilişkin maruziyetlerin eşik değerlerden daha düşük olması garantidir. Ancak dikkate alınmayan risk parametreleri için hesaplatılan maruziyet değerleri limit değerlerin üzerinde olabilir. Bu durum ilgili model, ilgili risk parametrelerini dikkate almadığı için olası bir sonuçtur.

Tez çalışmasının "*3-Fiziksel Risk Etmenleri ve Matematiksel Hesaplamaları"* bölümünde de ifade edildiği üzere, 4 ile 8 saat arasındaki çalışma süreleri için çalışanların maruz kalabilecekleri en yüksek titreşim seviyesinin en fazla 4,00 m/s^2 olması beklenmektedir.

Çizelge 6.8'de çalışanların el-kol titreşimi için ergonomi çevrelerince belirlenen sınır değeri üzerinde birçok defa el-kol titreşimine maruz kaldıkları görülmektedir. Eğer bu durum rakamlar ile ifade edilirse, çizelgedeki değerlerin yaklaşık %26'sı 4,00 değerinin üzerinde, %46'sı ise 4,00 ve üzerindedir.

Çizelge 6.9 çalışanların bir haftalık çizelgeleme periyodunda maruz kaldıkları günlük gürültü dozajına ilişkin seviyeleri göstermektedir. Tez çalışmasının *3-Fiziksel Risk Etmenleri* bölümünde de ifade edildiği üzere günlük gürültü dozajının %100'ün üzerinde olması çalışanların geçici ya da kalıcı sağırlık sorunu ile karşılaşmalarına neden olacak kadar ciddi bir durumdur.

Temel atama modeline göre, çalışanların bazıları çok yüksek gürültüye maruz kalırken, bazıları da oldukça düşük gürültüye maruz kalmaktadır. Çizelgedeki değerlerin %22'si 100% dozajı geçerken, %48'i %100 ve üzerinde dozaj seviyesini geçmektedir.

Çizelge 6.9. TA-MODEL-1'e göre çalışanların gürültü maruziyetleri (%)

	G-1	G-2	G-3	G-4	G-5	G-6	G-7
Ç-1	24,116	1,969	1,969	1,969	9,351	1,969	
Ç-2	31,498	31,498	31,498	31,498		31,498	31,498
Ç-3	31,498	31,498	31,498		31,498	31,498	31,498
Ç-4	100,000	122,013	100,000	100,000	100,000	100,000	
Ç-5		31,498	31,498	31,498	31,498	31,498	31,498
Ç-6	158,700	158,700	158,700	158,700		158,700	158,700
Ç-7	63,298		158,700	95,099	110,999	95,099	158,700
Ç-8	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000		100,000
Ç-9	41,151	1,969	1,969	1,969	99,926		1,969
Ç-10	1,969	1,969		1,969	5,660	1,969	1,969
Ç-11	100,000	122,013	100,000	100,000		100,000	100,000
Ç-12		31,498	31,498	31,498	31,498	31,498	31,498
Ç-13	1,969		1,969	1,969	1,969	1,969	1,969
Ç-14	100,000	100,000		100,000	100,000	100,000	100,000
Ç-15	31,498	31,498	31,498	31,498	31,498		31,498
Ç-16		114,675	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000
Ç-17	158,700	158,700		158,700	158,700	158,700	158,700
Ç-18	158,700	158,700	158,700	142,800	142,800	142,800	
Ç-19	100,000	100,000	100,000		100,000	100,000	100,000
Ç-20	95,099		158,700	110,999	142,800	110,999	158,700
Ç-21	1,969	1,969	1,969		1,969	1,969	1,969

Çizelge 6.9 dikkatle incelenirse, çalışanlar arasındaki gürültü maruziyeti farklılıklarının çok fazla olduğu sanılabilir. Ancak buradaki değerlerin dB cinsinden değil, % cinsinden ifade edilmiş maruziyet değerleri olduğuna dikkat edilmelidir. 85 dB gürültülü bir iş istasyonunda 8 saat çalışmak %100 değerine işaret ederken, 86 dB gürültülü iş istasyonunda 8 saat çalışmak %126 değerine, 84 dB gürültülü iş istasyonunda 8 saat çalışmak %79 değerine işaret etmektedir. 1 dB değeri bile hesaplamalarda ciddi

farklılıklara neden olabilmektedir. Bu nedenle günlük gürültü maruziyetini gösteren tüm çizelgelerde asıl dikkat edilmesi gereken nokta, çalışanların maruziyet yüzde değerleri arasındaki farklılıktan ziyade tüm değerlerin %100'ün altında olup-olmadığıdır.

Çizelge 6.10. TA-MODEL-1'e göre çalışanların sıcaklık maruziyetleri (^{o}C)

	G-1	G-2	G-3	G-4	G-5	G-6	G-7
Ç-1	25,875	29,100	29,100	29,100	28,025	29,100	
Ç-2	24,800	24,800	24,800	24,800		24,800	24,800
Ç-3	24,800	24,800	24,800		24,800	24,800	24,800
Ç-4	26,500	28,600	26,500	26,500	26,500	26,500	
Ç-5		24,800	24,800	24,800	24,800	24,800	24,800
Ç-6	32,100	32,100	32,100	32,100		32,100	32,100
Ç-7	26,625		32,100	28,450	29,362	28,450	32,100
Ç-8	26,500	26,500	26,500	26,500	26,500		26,500
Ç-9	29,850	29,100	29,100	29,100	30,975		29,100
Ç-10	29,100	29,100		29,100	28,562	29,100	29,100
Ç-11	26,500	28,600	26,500	26,500		26,500	26,500
Ç-12		24,800	24,800	24,800	24,800	24,800	24,800
Ç-13	29,100		29,100	29,100	29,100	29,100	29,100
Ç-14	26,500	26,500		26,500	26,500	26,500	26,500
Ç-15	24,800	24,800	24,800	24,800	24,800		24,800
Ç-16		27,900	26,500	26,500	26,500	26,500	26,500
Ç-17	32,100	32,100		32,100	32,100	32,100	32,100
Ç-18	32,100	32,100	32,100	31,187	31,187	31,187	
Ç-19	26,500	26,500	26,500		26,500	26,500	26,500
Ç-20	28,450		32,100	29,362	31,187	29,362	32,100
Ç-21	29,100	29,100	29,100		29,100	29,100	29,100

Çizelge 6.10 temel atama modeline göre çalışanların maruz kalacakları sıcaklık seviyelerine ilişkin değerleri göstermektedir. Çalışanların maruz kaldıkları MOE değerine

göre maruz kalacakları sıcaklık değerlerinin birlikte değerlendirilmesi gerektiği için Çizelge 6.10'nun tek başına değerlendirilmesi çok anlamlı olmayabilir. Çizelge 6.11 ise çalışanların bir haftalık çizelgeleme periyodunda temel atama modeline göre maruz kalacakları MOE değerlerini göstermektedir.

Çizelge 6.11. TA-MODEL-1'e göre çalışanların MOE değerleri (kcal/sa)

	G-1	G-2	G-3	G-4	G-5	G-6	G-7
Ç-1	311,250	165,000	165,000	165,000	213,750	165,000	
Ç-2	340,000	340,000	340,000	340,000		340,000	340,000
Ç-3	362,000	362,000	362,000		362,000	362,000	362,000
Ç-4	258,000	202,875	258,000	258,000	258,000	258,000	
Ç-5		342,000	342,000	342,000	342,000	342,000	342,000
Ç-6	115,000	115,000	115,000	115,000		115,000	115,000
Ç-7	290,000		110,000	230,000	200,000	230,000	110,000
Ç-8	260,000	260,000	260,000	260,000	260,000		260,000
Ç-9	152,250	165,000	165,000	165,000	133,125		165,000
Ç-10	165,000	165,000		165,000	189,375	165,000	165,000
Ç-11	258,000	201,750	258,000	258,000		258,000	258,000
Ç-12		356,000	356,000	356,000	356,000	356,000	356,000
Ç-13	162,000		162,000	162,000	162,000	162,000	162,000
Ç-14	258,000	258,000		258,000	258,000	258,000	258,000
Ç-15	348,000	348,000	348,000	348,000	348,000		348,000
Ç-16		218,500	253,000	253,000	253,000	253,000	253,000
Ç-17	114,000	114,000		114,000	114,000	114,000	114,000
Ç-18	110,000	110,000	110,000	141,500	141,500	141,500	
Ç-19	260,000	260,000	260,000		260,000	260,000	260,000
Ç-20	229,000		108,000	198,750	138,250	198,750	108,000
Ç-21	159,000	159,000	159,000		159,000	159,000	159,000

Çizelge 6.10 ve Çizelge 6.11 birlikte değerlendirildiğinde değerlerin %22'sinde çalışanların metabolik oran eşiti değerlerine uygun olmayan sıcaklık seviyelerinde çalıştıkları tespit edilmiştir. Örnek olarak Ç-6 satırı verilebilir. Ç-6, Çizelge 6.11'e göre hafif bir görevde çalıştırılmıştır. Buna göre maruz kalabileceği en yüksek sıcaklık 30.8 ^{o}C iken, Çizelge 6.10'a göre 32.10 ^{o}C sıcaklığa maruz kaldığı görülmektedir. Bu durum ergonomik açıdan uygun değildir. Çizelge 6.11 incelendiğinde, maruz kalınan MOE değerlerinin (maruz kalınan iş yükleri olarak da ifade edilebilir) arasındaki farkın oldukça fazla olduğu görülmektedir. Bu durumun ergonomik açıdan arzu edilen bir durum olmaması sebebi ile çalışmanın ilerleyen aşamalarında matematiksel modellere, çalışanların günlük MOE değerlerini sınırlayan bir kısıt seti daha eklenmiştir.

Çizelge 6.12. TA-MODEL-1'e göre çalışanların 2. iş istasyonuna atanma sayıları

	G-1	G-2	G-3	G-4	G-5	G-6	G-7
Ç-1	6				2		
Ç-2	8	8	8	8		8	8
Ç-3	8	8	8		8	8	8
Ç-5		8	8	8	8	8	8
Ç-7	6			4	3	4	
Ç-10					1		
Ç-12		8	8	8	8	8	8
Ç-15	8	8	8	8	8		8
Ç-18				1	1	1	
Ç-20	4			3	1	3	

Çizelge 6.12 tez çalışması kapsamına dâhil edilen aydınlatma kısıtı çerçevesinde, çalışanların ikinci iş istasyonunda çalışma sayıları gösterilmektedir. Çizelge 6.12'ye göre, çalışanların ikinci iş istasyonunda günlük 5 periyottan fazla çalışmaması istenmişti. Çizelgede yer alan değerlerin %73'ü bu değerin üzerindedir. Temel atama modeli sadece maliyet en küçüklemesi amacı altında çalışanları yetenekleri ve izin günü isteklerine uygun bir şekilde haftalık çizelgeleri elde etmeye çalıştığı için, ergonomik risk faktörlerine olan maruziyetlerin limit değerlerin üzerinde olması beklenen bir sonuçtur.

Aydınlatma parametresini dikkate alan modelin çözümü

Temel atama modeline sadece aydınlatma parametresi dâhil edilince optimal amaç fonksiyonu değeri 11960 olarak değişmiştir. Çizelge 6.13, aydınlatma kısıtlı atama modelinden elde edilen çizelgenin birinci gününü göstermektedir. Çizelge 6.13'te temel atama modeline göre çalışanların iş istasyonları arasında çok daha fazla rotasyon yaptıkları görülmektedir. Bu durumun sebebi, çalışanların ikinci iş istasyonundaki çalışma periyodu değerlerine doğrudan müdahale edilmesidir.

Çizelge 6.13. TA-MODEL-2 ile elde edilen çizelgenin birinci günü

	1.Gün	1.Pr.	2.Pr.	3.Pr.	4.Pr.	5.Pr.	6.Pr.	7.Pr.	8.Pr.	Toplam
	İS-2	1	1		1	1	1			5
Ç-2	İS-3			1					1	2
	İS-4							1		1
Ç-3	İS-2		1	1	1		1	1		5
	İS-4	1				1			1	3
Ç-4	İS-1	1	1	1	1	1	1	1	1	8
Ç-5	İS-2	1	1			1	1	1		5
	İS-3				1					1
	İS-4			1					1	2
Ç-6	İS-4	1	1	1	1	1	1	1	1	8
Ç-7	İS-2	1		1		1		1	1	5
	İS-4		1		1		1			3
Ç-8	İS-1	1	1	1	1	1	1	1	1	8
Ç-9	İS-3		1	1	1	1	1	1		6
	İS-4	1							1	2
Ç-10	İS-2		1	1	1				1	4
	İS-3	1				1	1	1		4
Ç-11	İS-1	1	1	1	1	1	1	1	1	8
Ç-12	İS-2			1	1	1	1	1		5
	İS-3	1	1						1	3
Ç-13	İS-3	1	1	1	1	1	1	1	1	8
Ç-15	İS-2			1	1		1	1	1	5
	İS-4	1	1			1				3
Ç-16	İS-1	1	1	1	1	1	1	1	1	8
Ç-18	İS-2	1				1			1	3
	İS-4		1	1	1		1	1		5
Ç-19	İS-1	1	1	1	1	1	1	1	1	8
Ç-20	İS-2	1	1						1	3
	İS-4			1	1	1	1	1		5
Ç-21	İS-3	1	1	1	1	1	1	1	1	8

Model ikinci iş istasyonunda çalışanların 5 periyottan fazla çalışmasını engelleme durumunu çalışanları fazladan rotasyona tabii tutarak sağlamıştır. Ç-1, Ç-14 ve Ç-17'nin haftanın birinci günü izinli olduğu ve bu durumun çalışanların izin günü istekleri ile uyumlu olduğu görülmektedir.

Çizelge 6.14. TA-MODEL-2'ye göre çalışanların el-kol titreşim maruziyetleri (m/s^2)

	G-1	G-2	G-3	G-4	G-5	G-6	G-7
Ç-1		3,758	3,695	3,881	3,758	3,695	3,881
Ç-2	3,625	3,625		3,695	3,695	3,554	3,695
Ç-3	3,481	3,481	3,481	3,481	3,481		3,481
Ç-4	4,150	4,094		4,150	4,150	4,150	4,150
Ç-5	3,554	3,481	3,625	3,625	3,625	3,625	
Ç-6	3,450	3,450	3,450	3,450		3,450	3,450
Ç-7	3,481		3,481	3,481	3,475	3,481	3,475
Ç-8	4,150	4,150	4,150	4,150	4,150		4,150
Ç-9	3,870	3,803	3,803		3,735	3,735	4,000
Ç-10	3,758	3,941	3,695	3,820		3,695	3,758
Ç-11	4,150	4,074	4,150	4,150		4,150	4,150
Ç-12	3,695	3,695	3,695		3,695	3,695	3,695
Ç-13	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	
Ç-14		3,997	4,150	4,150	4,150	4,150	4,150
Ç-15	3,481		3,481	3,481	3,481	3,481	3,481
Ç-16	4,150	3,997	4,150	4,150	4,150	4,150	
Ç-17		3,450	3,450	3,450	3,450	3,450	3,450
Ç-18	3,469	3,481	3,481	3,481	3,475		3,481
Ç-19	4,150	4,150	4,150		4,150	4,150	4,150
Ç-20	3,469	3,481		3,481	3,469	3,481	3,481
Ç-21	4,000		4,000	4,000	4,000	4,000	4,000

Çizelge 6.14'te çalışanların aydınlatma kısıtlı atama modelinde maruz kaldıkları titreşim seviyeleri görülmektedir. İlgili çizelgeye göre çalışanların %26'sı 4,00'ın üzerinde titreşime maruz kalırken, bu değer 4,00 ve üzeri şeklinde güncellenirse %36 olarak belirlenmektedir.

Çizelge 6.15. TA-MODEL-2'ye göre çalışanların gürültü maruziyetleri (%)

	G-1	G-2	G-3	G-4	G-5	G-6	G-7
Ç-1		16,733	20,424	9,351	16,733	20,424	9,351
Ç-2	40,016	40,016		20,424	20,424	59,607	20,424
Ç-3	79,199	79,199	79,199	79,199	79,199		79,199
Ç-4	100,000	63,238		100,000	100,000	100,000	100,000
Ç-5	59,607	79,199	40,016	40,016	40,016	40,016	
Ç-6	158,700	158,700	158,700	158,700		158,700	158,700
Ç-7	79,199		79,199	79,199	95,099	79,199	95,099
Ç-8	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000		100,000
Ç-9	41,151	60,743	60,743		80,334	80,334	1,969
Ç-10	16,733	5,660	20,424	13,042		20,424	16,733
Ç-11	100,000	91,437	100,000	100,000		100,000	100,000
Ç-12	20,424	20,424	20,424		20,424	20,424	20,424
Ç-13	1,969	1,969	1,969	1,969	1,969	1,969	
Ç-14		82,875	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000
Ç-15	79,199		79,199	79,199	79,199	79,199	79,199
Ç-16	100,000	82,875	100,000	100,000	100,000	100,000	
Ç-17		158,700	158,700	158,700	158,700	158,700	158,700
Ç-18	110,999	79,199	79,199	79,199	95,099		79,199
Ç-19	100,000	100,000	100,000		100,000	100,000	100,000
Ç-20	110,999	79,199		79,199	110,999	79,199	79,199
Ç-21	1,969		1,969	1,969	1,969	1,969	1,969

Çizelge 6.15 aydınlatma kısıtlı modelde çalışanların maruz kaldıkları gürültü seviyelerini göstermektedir. Çizelgedeki değerlerin %11'i, gürültü dozajında istenilen sınırı geçerken, bu değer, 100 ve üzeri şeklinde sınırlandırılınca %37'ye çıkmaktadır.

Çizelge 6.16. TA-MODEL-2'ye göre çalışanların sıcaklık maruziyetleri (^{o}C)

	G-1	G-2	G-3	G-4	G-5	G-6	G-7
Ç-1		26,950	26,412	28,025	26,950	26,412	28,025
Ç-2	26,787	26,788		26,412	26,412	27,162	26,412
Ç-3	27,537	27,537	27,537	27,537	27,537		27,537
Ç-4	26,500	27,475		26,500	26,500	26,500	26,500
Ç-5	27,162	27,537	26,787	26,787	26,787	26,787	
Ç-6	32,100	32,100	32,100	32,100		32,10	32,100
Ç-7	27,537		27,537	27,537	28,450	27,537	28,450
Ç-8	26,500	26,500	26,500	26,500	26,500		26,500
Ç-9	29,850	30,225	30,225		30,600	30,600	29,100
Ç-10	26,950	28,562	26,412	27,487		26,412	26,950
Ç-11	26,500	26,287	26,500	26,500		26,500	26,500
Ç-12	26,412	26,413	26,412		26,412	26,412	26,412
Ç-13	29,100	29,100	29,100	29,100	29,100	29,100	
Ç-14		26,075	26,500	26,500	26,500	26,500	26,500
Ç-15	27,537		27,537	27,538	27,537	27,537	27,537
Ç-16	26,500	26,075	26,500	26,500	26,500	26,500	
Ç-17		32,100	32,100	32,100	32,100	32,100	32,100
Ç-18	29,362	27,537	27,537	27,537	28,450		27,537
Ç-19	26,500	26,500	26,500		26,500	26,500	26,500
Ç-20	29,362	27,537		27,537	29,362	27,537	27,537
Ç-21	29,100		29,100	29,100	29,100	29,100	29,100

Çizelge 6.16 ve Çizelge 6.17 sırası ile aydınlatma kısıtlı modelin sonuçlarına göre çalışanların maruz kalacakları sıcaklık ve MOE değerlerini göstermektedir. Bu iki çizelge

birlikte değerlendirildiğinde eğer bu çizelge uygulanırsa çalışanların %13'ünün MOE değerine uygun olmayan sıcaklıklarda çalıştırılacağı görülmektedir.

Çizelge 6.17. TA-MODEL-2'ye göre çalışanların MOE değerleri (kcal/sa)

	G-1	G-2	G-3	G-4	G-5	G-6	G-7
Ç-1		262,500	286,875	213,750	262,500	286,875	213,750
Ç-2	268,875	268,875		275,500	275,500	262,250	275,500
Ç-3	267,500	267,500	267,500	267,500	267,500		267,500
Ç-4	258,000	222,000		258,000	258,000	258,000	258,000
Ç-5	262,375	255,750	269,000	269,000	269,000	269,000	
Ç-6	115,000	115,000	115,000	115,000		115,000	115,000
Ç-7	260,000		260,000	260,000	230,000	260,000	230,000
Ç-8	260,000	260,000	260,000	260,000	260,000		260,000
Ç-9	152,250	145,875	145,875		139,500	139,500	165,000
Ç-10	262,500	189,375	286,875	238,125		286,875	262,500
Ç-11	258,000	270,750	258,000	258,000		258,000	258,000
Ç-12	282,500	282,500	282,500		282,500	282,500	282,500
Ç-13	162,000	162,000	162,000	162,000	162,000	162,000	
Ç-14		282,500	258,000	258,000	258,000	258,000	258,000
Ç-15	259,500		259,500	259,500	259,500	259,500	259,500
Ç-16	253,000	276,250	253,000	253,000	253,000	253,000	
Ç-17		114,000	114,000	114,000	114,000	114,000	114,000
Ç-18	204,500	267,500	267,500	267,500	236,000		267,500
Ç-19	260,000	260,000	260,000		260,000	260,000	260,000
Ç-20	198,750	259,250		259,250	198,750	259,250	259,250
Ç-21	159,000		159,000	159,000	159,000	159,000	159,000

Çizelge 6.17 ile ilgili dikkat çekici bir diğer durum ise, çalışanların işler arasındaki rotasyonu artırıldıkça, bu durumun çalışanlar arasındaki MOE değerleri farklılıklarına olumlu yansımasıdır.

Çizelge 6.18. TA-MODEL-2'ye göre çalışanların 2. iş istasyonuna atanma sayıları

	G-1	G-2	G-3	G-4	G-5	G-6	G-7
Ç-1		4	5	2	4	5	2
Ç-2	5	5		5	5	5	5
Ç-3	5	5	5	5	5		5
Ç-5	5	5	5	5	5	5	
Ç-7	5		5	5	4	5	4
Ç-10	4	1	5	3		5	4
Ç-11		1					
Ç-12	5	5	5		5	5	5
Ç-14		2					
Ç-15	5		5	5	5	5	5
Ç-16		2					
Ç-18	3	5	5	5	4		5
Ç-20	3	5		5	3	5	5

Çizelge 6.18, aydınlatma kısıtlı modelin sonuçlarına göre çalışanların ikinci iş istasyonunda günlük toplam çalışma periyodunun sayısını göstermektedir. Aydınlatma kısıtlı model ikinci iş istasyonuna en fazla 5 periyot atamaya izin verdiği için çizelgede 5'in üzerinde değere rastlanmamaktadır.

Termal konfor kısıtlı modelin çözümü (TA-MODEL-3)

Temel atama modeline termal konfor parametresi dâhil edilince optimal amaç fonksiyonu değeri 11400 olarak değişmektedir. Çizelge 6.19 termal konfor kısıtlı model ile elde edilen çizelgenin birinci gününü göstermektedir.

Çizelge 6.19. TA-MODEL-3 ile elde edilen çizelgenin birinci günü

	1.Gün	1.Pr.	2.Pr.	3.Pr.	4.Pr.	5.Pr.	6.Pr.	7.Pr.	8.Pr.	Toplam
Ç-2	İS-2	1	1	1	1	1	1	1	1	8
Ç-4	İS-1	1		1	1		1	1	1	6
	İS-4		1			1				2
Ç-5	İS-2	1	1	1	1	1	1	1	1	8
Ç-6	İS-1		1			1				2
	İS-4	1		1	1		1	1	1	6
Ç-7	İS-2		1				1	1		3
	İS-4	1		1	1	1			1	5
Ç-8	İS-1	1	1	1	1	1	1	1	1	8
Ç-9	İS-3		1	1	1	1	1	1	1	7
	İS-4	1								1
Ç-10	İS-3	1	1	1	1	1	1	1	1	8
Ç-11	İS-1	1	1	1	1		1	1	1	7
	İS-2					1				1
Ç-12	İS-2	1	1	1	1	1	1	1	1	8
Ç-13	İS-3	1	1	1	1	1	1	1	1	8
Ç-14	İS-1	1	1	1	1	1	1	1	1	8
Ç-15	İS-2	1	1	1	1	1	1	1	1	8
Ç-17	İS-1	1				1				2
	İS-4		1	1	1		1	1	1	6
Ç-18	İS-2	1		1						2
	İS-4		1		1	1	1	1	1	6
Ç-19	İS-1		1	1	1	1	1	1	1	7
	İS-3	1								1
Ç-20	İS-2				1				1	2
	İS-4	1	1	1		1	1	1		6
Ç-21	İS-3	1	1	1	1	1	1	1	1	8

Çizelge 6.20. TA-MODEL-3'e göre çalışanların el-kol titreşim maruziyetleri (m/s^2)

	G-1	G-2	G-3	G-4	G-5	G-6	G-7
Ç-1		4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	3,941
Ç-2	3,500	3,500	3,481	3,566		3,500	3,500
Ç-3		3,500	3,500	3,494	3,500	3,500	3,500
Ç-4	3,987	4,094	3,987	3,987	3,987	3,987	
Ç-5	3,500	3,500	3,500	3,500	3,500		3,500
Ç-6	3,638	3,638	3,638	3,638		3,638	3,638
Ç-7	3,469	3,469	3,463		3,463	3,469	3,463
Ç-8	4,150	4,150	4,150	4,150		4,150	4,150
Ç-9	3,935	3,803	3,935	3,803	3,687		3,687
Ç-10	4,000	4,000		4,000	3,881	4,000	3,941
Ç-11	4,074	4,150		3,816	4,069	4,069	4,069
Ç-12	3,500	3,500	3,500	3,500	3,500	3,500	
Ç-13	4,000		4,000	4,000	4,000	4,000	4,000
Ç-14	4,150	4,150	4,150	4,150	4,150		4,150
Ç-15	3,500		3,494	3,500	3,500	3,500	3,500
Ç-16		4,069	4,069	3,816	4,150	4,074	3,987
Ç-17	3,638	3,638	3,638	3,638	3,638	3,638	
Ç-18	3,463	3,463	3,463		3,463	3,463	3,463
Ç-19	4,132		4,132	4,113	4,150	4,150	4,150
Ç-20	3,463	3,469		3,463	3,463	3,463	3,463
Ç-21	4,000	4,000	4,000		4,000	4,000	4,000

Çizelge 6.20'te termal konfor parametresini dikkate alan modele göre çalışanların maruz kaldıkları el-kol titreşim seviyeleri görülmektedir. Çizelge 6.20'deki değerlerin yaklaşık %22'si 4,00 m/s^2'nin üzerindedir. Bu oran, 4,00 ve üzeri şeklinde değiştirildiğinde %38'e yükselmektedir.

Çizelge 6.21. TA-MODEL-3'e göre çalışanların gürültü maruziyetleri (%)

	G-1	G-2	G-3	G-4	G-5	G-6	G-7
Ç-1		1,969	1,969	1,969	1,969	1,969	5,660
Ç-2	31,498	31,498	79,199	27,807		31,498	31,498
Ç-3		31,498	31,498	47,398	31,498	31,498	31,498
Ç-4	114,675	63,238	114,675	114,675	114,675	114,675	
Ç-5	31,498	31,498	31,498	31,498	31,498		31,498
Ç-6	144,025	144,025	144,025	144,025		144,025	144,025
Ç-7	110,999	110,999	126,899		126,900	110,999	126,900
Ç-8	100,000	100,000	100,000	100,000		100,000	100,000
Ç-9	21,560	60,743	21,560	60,743	112,180		112,180
Ç-10	1,969	1,969		1,969	9,351	1,969	5,660
Ç-11	91,437	100,000		129,350	107,338	107,338	107,337
Ç-12	31,498	31,498	31,498	31,498	31,498	31,498	
Ç-13	1,969		1,969	1,969	1,969	1,969	1,969
Ç-14	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000		100,000
Ç-15	31,498		47,398	31,498	31,498	31,498	31,498
Ç-16		107,338	107,338	129,350	100,000	91,437	114,675
Ç-17	144,025	144,025	144,025	144,025	144,025	144,025	
Ç-18	126,900	126,900	126,900		126,900	126,900	126,900
Ç-19	87,746		87,746	75,492	100,000	100,000	100,000
Ç-20	126,900	110,999		126,900	126,900	126,900	126,900
Ç-21	1,969	1,969	1,969		1,969	1,969	1,969

Çizelge 6.21 çalışanların termal konfor parametresini dikkate alan modele göre maruz kaldıkları gürültü seviyelerini göstermektedir. Çizelgedeki değerlerin %36'sı %100 gürültü dozajını geçerken bu değer %100 ve üzeri olarak güncellendiğinde %48 olarak değişmektedir.

Çizelge 6.22. TA-MODEL-3'e göre çalışanların sıcaklık maruziyetleri (^{o}C)

	G-1	G-2	G-3	G-4	G-5	G-6	G-7
Ç-1		29,100	29,100	29,100	29,100	29,100	28,563
Ç-2	24,800	24,800	27,538	25,338		24,800	24,800
Ç-3		24,800	24,800	25,713	24,800	24,800	24,800
Ç-4	27,900	27,475	27,900	27,900	27,900	27,900	
Ç-5	24,800	24,800	24,800	24,800	24,800		24,800
Ç-6	30,700	30,700	30,700	30,700		30,700	30,700
Ç-7	29,362	29,362	30,275		30,275	29,363	30,275
Ç-8	26,500	26,500	26,500	26,500		26,500	26,500
Ç-9	29,475	30,225	29,475	30,225	30,650		30,650
Ç-10	29,100	29,100		29,100	28,025	29,100	28,563
Ç-11	26,288	26,500		29,300	27,200	27,200	27,200
Ç-12	24,800	24,800	24,800	24,800	24,800	24,800	
Ç-13	29,100		29,100	29,100	29,100	29,100	29,100
Ç-14	26,500	26,500	26,500	26,500	26,500		26,500
Ç-15	24,800		25,713	24,800	24,800	24,800	24,800
Ç-16		27,200	27,200	29,300	26,500	26,288	27,900
Ç-17	30,700	30,700	30,700	30,700	30,700	30,700	
Ç-18	30,275	30,275	30,275		30,275	30,275	30,275
Ç-19	26,825		26,825	27,150	26,500	26,500	26,500
Ç-20	30,275	29,362		30,275	30,275	30,275	30,275
Ç-21	29,100	29,100	29,100		29,100	29,100	29,100

Çizelge 6.22 ve 6.23 sırası ile termal konfor parametresinin dâhil edildiği modelin sonuçlarına göre çalışanların maruz kaldıkları sıcaklık seviyeleri ile MOE değerlerini göstermektedir.

Çizelge 6.23. TA-MODEL-3'e göre çalışanların MOE değerleri (kcal/sa)

	G-1	G-2	G-3	G-4	G-5	G-6	G-7
Ç-1		165,000	165,000	165,000	165,000	165,000	189,375
Ç-2	340,000	340,000	255,625	318,500		340,000	340,000
Ç-3		362,000	362,000	330,500	362,000	362,000	362,000
Ç-4	221,250	222,000	221,250	221,250	221,250	221,250	
Ç-5	342,000	342,000	342,000	342,000	342,000		342,000
Ç-6	148,750	148,750	148,750	148,750		148,750	148,750
Ç-7	200,000	200,000	170,000		170,000	200,000	170,000
Ç-8	260,000	260,000	260,000	260,000		260,000	260,000
Ç-9	158,625	145,875	158,625	145,875	144,375		144,375
Ç-10	165,000	165,000		165,000	213,750	165,000	189,375
Ç-11	270,750	258,000		183,000	239,250	239,250	239,250
Ç-12	356,000	356,000	356,000	356,000	356,000	356,000	
Ç-13	162,000		162,000	162,000	162,000	162,000	162,000
Ç-14	258,000	258,000	258,000	258,000	258,000		258,000
Ç-15	348,000		318,500	348,000	348,000	348,000	348,000
Ç-16		235,750	235,750	184,000	253,000	264,625	218,500
Ç-17	149,250	149,250	149,250	149,250	149,250	149,250	
Ç-18	173,000	173,000	173,000		173,000	173,000	173,000
Ç-19	247,500		247,500	235,000	260,000	260,000	260,000
Ç-20	168,500	198,750		168,500	168,500	168,500	168,500
Ç-21	159,000	159,000	159,000		159,000	159,000	159,000

Çizelge 6.22 ve Çizelge 6.23 birlikte değerlendirildiğinde, modelin ergonomik kısıtı MOE değerlerine göre sıcaklık maruziyetinin sınırlandırılması olduğu için, tüm çalışanların MOE uygun sıcaklıklara maruz kaldığı görülmektedir.

Ancak Çizelge 6.23 tek başına değerlendirildiğinde çalışanların maruz kaldıkları MOE değerleri arasında, ergonomik anlamda kabul edilebilir seviyenin çok üstündedir (En düşük

ve en yüksek metabolik oran arasında yaklaşık 213 fark bulunmakta). Bu nedenle bu modelin yanı sıra, MOE değerine getirilen kısıtlamalarla çalışanlar arasındaki bu farkın azaltılması amaçlanmıştır (TA-MODEL-3a). Aynı zamanda, MOE değerine getirilen kısıtlamaların modelin amaç fonksiyonu açısından verdiği tepki özet bir tablo halinde sunulmuştur.

Çizelge 6.24. TA-MODEL-3'e göre çalışanların 2.iş istasyonuna atanma sayıları

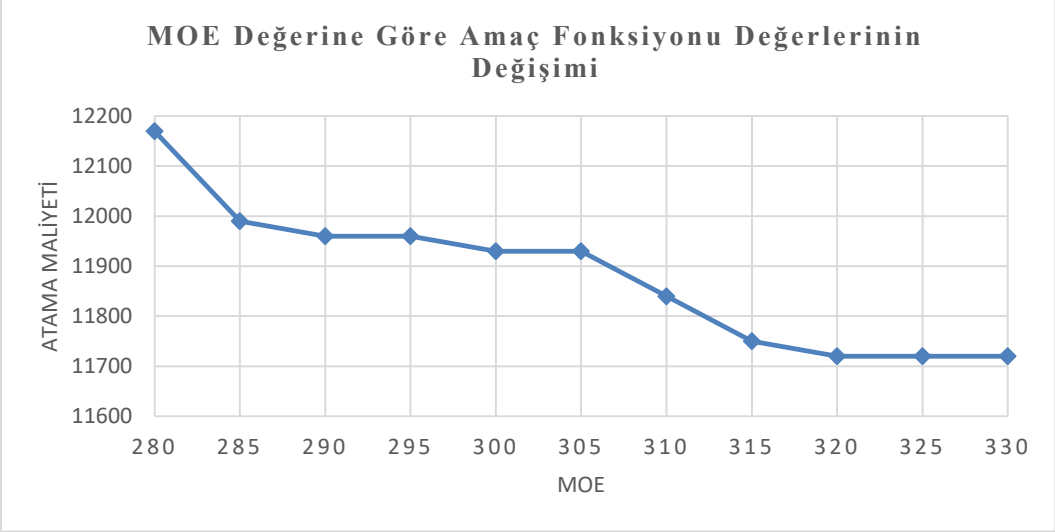
	G-1	G-2	G-3	G-4	G-5	G-6	G-7
Ç-1							1
Ç-2	8	8	5	7		8	8
Ç-3		8	8	7	8	8	8
Ç-5	8	8	8	8	8		8
Ç-7	3	3	2		2	3	2
Ç-10					2		1
Ç-11	1						
Ç-12	8	8	8	8	8	8	
Ç-15	8		7	8	8	8	8
Ç-16						1	
Ç-18	2	2	2		2	2	2
Ç-20	2	3		2	2	2	2

Çizelge 6.24 termal konfor kısıtlı modele göre ikinci iş istasyonlarına atanma sayılarını göstermektedir. Çizelgedeki değerlerin %55'i ikinci iş istasyonu için getirilen sınırlamaların üzerindedir. Çizelge 6.25'te termal konfor parametresini dikkate alan modelin MOE değerine koyulan sınırlamalara göre amaç fonksiyonu değeri değişimi gösterilmiştir. Çizelge 6.25'e göre çalışanların maruz kalacakları MOE değerlerine üst sınır koyulduğunda, üst sınır azaldıkça, amaç fonksiyonu değerlerinin arttığı görülmektedir.

Çizelge 6.25. TA-MODEL-3'ün MOE sınırlamalarına göre amaç fonksiyonu değeri değişimi

MOE	Amaç Fonksiyonu
330	11720
325	11720
320	11720
315	11750
310	11840
305	11930
300	11930
295	11960
290	11960
285	11990
280	12170

Amaç fonksiyonu atama maliyetine işaret ettiği için, çalışanların maruz kalacakları MOE değerinin azalması istendikçe, atama maliyetlerinin artması durumu; ergonomik ve ekonomik amaçlar arasında bir ödünleşme olduğu şeklinde yorumlanabilir. Şekil 6.3 ile bu durum daha da kolay anlaşılır hale gelmiştir.



Şekil 6.3. MOE değerine göre amaç fonksiyonu değerlerinin değişimi

Çizelge 6.26. TA-MODEL-3a ile elde edilen çizelgenin birinci günü

	1.Gün	1.Pr.	2.Pr.	3.Pr.	4.Pr.	5.Pr.	6.Pr.	7.Pr.	8.Pr.	Toplam
Ç-2	İS-2	1	1		1	1		1	1	6
	İS-4			1			1			2
Ç-3	İS-2	1	1	1		1		1		5
	İS-4				1		1		1	3
Ç-4	İS-1	1	1		1	1	1	1	1	7
	İS-4			1						1
	İS-2		1	1	1	1	1	1		6
Ç-5	İS-4	1							1	2
Ç-6	İS-1							1	1	2
	İS-4	1	1	1	1	1	1			6
Ç-7	İS-2		1	1	1		1		1	5
	İS-4	1				1		1		3
Ç-8	İS-1	1	1	1	1	1	1	1	1	8
Ç-9	İS-3	1		1	1	1	1		1	6
	İS-4		1					1		2
	İS-2				1					1
Ç-10	İS-3	1	1	1		1	1	1	1	7
	İS-1	1	1	1	1	1				5
Ç-11	İS-2							1	1	2
	İS-4						1			1
Ç-12	İS-2	1		1		1	1		1	5
	İS-3		1		1			1		3
Ç-13	İS-3	1	1	1	1	1	1	1	1	8
Ç-14	İS-1	1	1	1	1	1	1	1	1	8
Ç-15	İS-2	1		1		1	1	1		5
	İS-4		1		1				1	3
Ç-17	İS-1			1			1			2
	İS-4	1	1		1	1		1	1	6
Ç-19	İS-1	1	1	1	1	1	1	1	1	8
Ç-20	İS-2	1	1		1		1		1	5
	İS-4			1		1		1		3
Ç-21	İS-3	1	1	1	1	1	1	1	1	8

Çizelge 6.26 MOE değerine 285 kısıtı getirilen termal konfor modelinde elde edilen çizelgenin birinci gününü göstermektedir. Sadece termal konfor parametresini dikkate alan modelden elde edilen çizelgenin birinci gününe göre (Çizelge 6.19), çalışanların daha fazla rotasyon yaptıkları görülmektedir. Bu iki çizelge birlikte değerlendirildiğinde çalışanların günlük MOE değerine getirilen sınırlamaların, çalışanların iş istasyonları arasında daha fazla rotasyon yapmalarına neden olduğu çıkarımı yapılabilir.

Çizelge 6.27. TA-MODEL-3a' ya göre çalışanların el-kol titreşim maruziyetleri (m/s^2)

	G-1	G-2	G-3	G-4	G-5	G-6	G-7
Ç-1		3,881	3,820	3,881	3,758	3,820	3,758
Ç-2	3,488	3,488	3,488	3,488		3,488	3,488
Ç-3	3,481	3,481	3,481	3,481	3,481		3,481
Ç-4	4,069	4,132		4,094	4,132	3,883	4,150
Ç-5	3,488		3,488	3,488	3,488	3,488	3,488
Ç-6	3,638	3,638	3,638	3,638	3,638		3,638
Ç-7	3,481	3,469	3,469	3,481	3,481	3,469	
Ç-8	4,150		4,150	4,150	4,150	4,150	4,150
Ç-9	3,870	3,935	3,735	4,000	4,000		3,803
Ç-10	3,941	3,941	3,758	3,941		3,941	3,758
Ç-11	3,913	4,074	4,069	4,150	4,069	3,913	
Ç-12	3,695	3,695	3,695		3,695	3,695	3,695
Ç-13	4,000		4,000	4,000	4,000	4,000	4,000
Ç-14	4,150	4,074	4,074	4,150		3,997	4,150
Ç-15	3,481	3,481	3,481	3,481	3,481	3,481	
Ç-16		4,150	4,150	4,069	4,150	4,069	3,908
Ç-17	3,638	3,638		3,638	3,638	3,638	3,638
Ç-18		3,481	3,463	3,481	3,481	3,481	3,481
Ç-19	4,150	4,074	4,150		3,997	4,150	4,074
Ç-20	3,481	3,481		3,481	3,469	3,463	3,469
Ç-21	4,000	4,000	4,000		4,000	4,000	4,000

Çizelge 6.27, çalışanların MOE değerlerine üst sınır koyulan termal konfor modeline göre çalışanların bir haftalık çizelgeleme periyodunda maruz kalacakları el-kol titreşimini göstermektedir. Çizelge 6.27'deki değerlerin %22'si 4,00 m/s^2 değerinin üzerindedir.

Çizelge 6.28, MOE değerine 285 kısıtı getirilen termal konfor modeline göre çalışanların gürültü dozajını göstermektedir. Çizelge 6.28'deki değerlerin %19'u, %100 gürültü dozajını aşmaktadır.

Çizelge 6.28. TA-MODEL-3a' ya göre çalışanların gürültü maruziyetleri(%)

	G-1	G-2	G-3	G-4	G-5	G-6	G-7
Ç-1		9,351	13,042	9,351	16,733	13,042	16,733
Ç-2	63,298	63,298	63,298	63,298		63,298	63,298
Ç-3	79,199	79,199	79,199	79,199	79,199		79,199
Ç-4	107,338	87,746		63,238	87,746	109,759	100,000
Ç-5	63,298		63,298	63,298	63,298	63,298	63,298
Ç-6	144,025	144,025	144,025	144,025	144,025		144,025
Ç-7	79,199	110,999	110,999	79,199	79,199	110,999	
Ç-8	100,000		100,000	100,000	100,000	100,000	100,000
Ç-9	41,151	21,560	80,334	1,969	1,969		60,743
Ç-10	5,660	5,660	16,733	5,660		5,660	16,733
Ç-11	90,212	91,437	107,338	100,000	107,338	90,212	
Ç-12	20,424	20,424	20,424		20,424	20,424	20,424
Ç-13	1,969		1,969	1,969	1,969	1,969	1,969
Ç-14	100,000	91,437	91,437	100,000		82,875	100,000
Ç-15	79,199	79,199	79,199	79,199	79,199	79,199	
Ç-16		100,000	100,000	107,338	100,000	107,338	106,112
Ç-17	144,025	144,025		144,025	144,025	144,025	144,025
Ç-18		79,199	126,900	79,199	79,199	79,199	79,199
Ç-19	100,000	91,437	100,000		82,875	100,000	91,437
Ç-20	79,199	79,199		79,199	110,999	126,900	110,999
Ç-21	1,969	1,969	1,969		1,969	1,969	1,969

Çizelge 6.29 ve Çizelge 6.30 sırası ile çalışanların metabolik oran eşiti değerlerine üst sınır koyulan termal konfor modeline göre çalışanların bir haftalık çizelgeleme periyodunda maruz kalacakları sıcaklıkları ve MOE değerlerini göstermektedir.

Çizelge 6.29. TA-MODEL-3a' ya göre çalışanların sıcaklık maruziyetleri (^{o}C)

	G-1	G-2	G-3	G-4	G-5	G-6	G-7
Ç-1		28,025	27,487	28,025	26,950	27,487	26,950
Ç-2	26,625	26,625	26,625	26,625		26,625	26,625
Ç-3	27,537	27,537	27,537	27,537	27,537		27,537
Ç-4	27,200	26,825		27,475	26,825	28,925	26,500
Ç-5	26,625		26,625	26,625	26,625	26,625	26,625
Ç-6	30,700	30,700	30,700	30,700	30,700		30,700
Ç-7	27,537	29,362	29,362	27,537	27,537	29,362	
Ç-8	26,500		26,500	26,500	26,500	26,500	26,500
Ç-9	29,850	29,475	30,600	29,100	29,100		30,225
Ç-10	28,562	28,562	26,950	28,562		28,562	26,950
Ç-11	26,775	26,288	27,200	26,500	27,200	26,775	
Ç-12	26,412	26,412	26,412		26,412	26,412	26,412
Ç-13	29,100		29,100	29,100	29,100	29,100	29,100
Ç-14	26,500	26,288	26,288	26,500		26,075	26,500
Ç-15	27,537	27,537	27,537	27,537	27,537	27,537	
Ç-16		26,500	26,500	27,200	26,500	27,200	27,687
Ç-17	30,700	30,700		30,700	30,700	30,700	30,700
Ç-18		27,537	30,275	27,537	27,537	27,537	27,537
Ç-19	26,500	26,288	26,500		26,075	26,500	26,288
Ç-20	27,537	27,537		27,537	29,362	30,275	29,362
Ç-21	29,100	29,100	29,100		29,100	29,100	29,100

Çalışanların MOE değerine yapılan müdahale, hem modelin amaç fonksiyonu değeri üzerinde hem de çalışanların maruz kalacakları sıcaklıklar üzerinde etkili olmuştur. Bu müdahale, çalışanların harcadıkları MOE değerlerini birbirlerine yaklaştırırken, maruz kalınacak sıcaklıkları yine limit değerler içinde ancak üst limite yaklaştıracak şekilde bir artışa neden olmuştur. Aslında, ekonomik ve ergonomik amaçlar arasında net bir şekilde görülen ödünleşme (Bknz. Çizelge 6.25), iki ergonomik amaç için de geçerlidir.

Çalışanların harcadıkları metabolik değerler üzerinde bir düzenleme yapılması, çalışanların maruz kalacakları sıcaklık ortalamalarını artırmaktadır.

Çizelge 6.30. TA-MODEL-3a' ya göre çalışanların MOE değerleri (kcal/sa)

	G-1	G-2	G-3	G-4	G-5	G-6	G-7
Ç-1		213,750	238,125	213,750	262,500	238,125	262,500
Ç-2	283,750	283,750	283,750	283,750		283,750	283,750
Ç-3	267,500	267,500	267,500	267,500	267,500		267,500
Ç-4	239,625	246,000		222,000	246,000	190,875	258,000
Ç-5	284,500		284,500	284,500	284,500	284,500	284,500
Ç-6	148,750	148,750	148,750	148,750	148,750		148,750
Ç-7	260,000	200,000	200,000	260,000	260,000	200,000	
Ç-8	260,000		260,000	260,000	260,000	260,000	260,000
Ç-9	152,250	158,625	139,500	165,000	165,000		145,875
Ç-10	189,375	189,375	262,500	189,375		189,375	262,500
Ç-11	264,750	270,750	239,250	258,000	239,250	264,750	
Ç-12	282,500	282,500	282,500		282,500	282,500	282,500
Ç-13	162,000		162,000	162,000	162,000	162,000	162,000
Ç-14	258,000	270,250	270,250	258,000		282,500	258,000
Ç-15	259,500	259,500	259,500	259,500	259,500	259,500	
Ç-16		253,000	253,000	235,750	253,000	235,750	230,125
Ç-17	149,250	149,250		149,250	149,250	149,250	149,250
Ç-18		267,500	173,000	267,500	267,500	267,500	267,500
Ç-19	260,000	271,875	260,000		283,750	260,000	271,875
Ç-20	259,250	259,250		259,250	198,750	168,500	198,750
Ç-21	159,000	159,000	159,000		159,000	159,000	159,000

Çizelge 6.31 MOE değerine 285 kısıtı getirilen termal konfor modeline göre çalışanların bir haftalık planlama periyodunda ikinci iş istasyonuna atanma sayılarını göstermektedir. Çizelge 6.31'deki değerlerin yaklaşık %16'sı belirlenen limit değerin üzerindedir.

Aslında, çalışanların iş yerindeki termal konforunu yakından etkileyen 2 parametreden birinde yapılan değişiklik, termal konfor ile ilgili diğer parametrenin değerini kötüleştirirken, farklı bir ergonomik parametre üzerinde olumlu etki göstermiştir. %16 değeri diğer modeller içinde aydınlatma parametresi açısından en iyi değerdir.

Çizelge 6.31. TA-MODEL-3a' ya göre çalışanların 2. iş istasyonuna atanma sayıları

	G-1	G-2	G-3	G-4	G-5	G-6	G-7
Ç-1		2	3	2	4	3	4
Ç-2	6	6	6	6		6	6
Ç-3	5	5	5	5	5		5
Ç-5	6		6	6	6	6	6
Ç-7	5	3	3	5	5	3	
Ç-10	1	1	4	1		1	4
Ç-11	2	1				2	
Ç-12	5	5	5		5	5	5
Ç-14		1	1			2	
Ç-15	5	5	5	5	5	5	
Ç-16							1
Ç-18		5	2	5	5	5	5
Ç-19		1			2		1
Ç-20	5	5		5	3	2	3

Titreşim kısıtlı modelin çözümü (TA-MODEL-4)

Temel atama modeline titreşim kısıtı eklendiğinde modelin amaç fonksiyonun optimal değeri 11640 olarak elde edilmektedir.

Çizelge 6.32. TA-MODEL-4 ile elde edilen çizelgenin birinci günü

	1.Gün	1.Pr.	2.Pr.	3.Pr.	4.Pr.	5.Pr.	6.Pr	7.Pr.	8.Pr.	Toplam
Ç-2	İS-2	1	1	1	1	1	1	1	1	8
Ç-4	İS-1	1	1	1			1	1	1	6
	İS-4				1	1				2
Ç-5	İS-2	1	1	1	1	1	1	1	1	8
Ç-6	İS-1	1	1		1					3
	İS-4			1		1	1	1	1	5
Ç-7	İS-2							1	1	2
	İS-4	1	1	1	1	1	1			6
Ç-8	İS-1		1	1	1	1	1		1	6
	İS-4	1						1		2
Ç-9	İS-3	1	1	1	1	1	1	1	1	8
Ç-10	İS-3	1	1	1	1	1	1	1	1	8
Ç-11	İS-1	1	1		1	1		1	1	6
	İS-4			1			1			2
Ç-12	İS-2	1	1	1	1	1	1	1	1	8
Ç-13	İS-3	1	1	1	1	1	1	1	1	8
Ç-14	İS-1			1	1	1	1	1	1	6
	İS-2	1	1							2
Ç-15	İS-2	1	1	1	1	1	1	1	1	8
Ç-16	İS-1	1		1	1	1	1	1		6
	İS-4		1						1	2
Ç-17	İS-1					1				1
	İS-4	1	1	1	1		1	1	1	7
Ç-19	İS-1	1	1	1			1	1	1	6
	İS-2				1	1				2
Ç-20	İS-2			1			1			2
	İS-4	1	1		1	1		1	1	6
Ç-21	İS-3	1	1	1	1	1	1	1	1	8

Çizelge 6.32 titreşim kısıtlı modelden elde edilen çizelgenin birinci gününü göstermektedir.

Çizelge 6.33. TA-MODEL-4'e göre çalışanların el-kol titreşim maruziyetleri (m/s^2)

	G-1	G-2	G-3	G-4	G-5	G-6	G-7
Ç-1		3,881	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000
Ç-2	3,500	3,500	3,588	3,488		3,500	3,500
Ç-3		3,500	3,494	3,500	3,500	3,500	3,500
Ç-4	3,987		3,987	3,987	3,987	3,987	3,987
Ç-5	3,500	3,500	3,500	3,500	3,500	3,500	
Ç-6	3,728	3,987	3,816	3,902	3,816		3,987
Ç-7	3,463	3,456	3,450		3,463	3,450	3,469
Ç-8	3,987		3,987	3,987	3,987	3,987	3,987
Ç-9	4,000	3,948	3,902	4,000	4,000		4,000
Ç-10	4,000	4,000	4,000	4,000		4,000	4,000
Ç-11	3,987	3,987	3,987	3,987		3,992	3,987
Ç-12	3,500	3,500	3,500	3,500	3,500		3,500
Ç-13	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000	
Ç-14	3,997	3,997		3,997	3,997	3,997	3,997
Ç-15	3,500		3,500	3,500	3,500	3,500	3,500
Ç-16	3,987	3,987	3,987	3,987	3,987	3,997	
Ç-17	3,545	3,987		3,902	3,987	3,816	3,816
Ç-18		3,450	3,450	3,450	3,463	3,450	3,450
Ç-19	3,997	3,997	3,997		3,997	3,997	3,997
Ç-20	3,463	3,456		3,450	3,450	3,456	3,456
Ç-21	4,000	4,000	4,000		4,000	4,000	4,000

Çizelge 6.33 titreşim kısıtlı modele göre, çalışanların maruz kaldıkları el-kol titreşimi değerlerini göstermektedir. Çizelge 6.33'de, modelin ergonomik kısıtı çalışanların titreşim maruziyetleri olduğu için 4,00 değerinin üzerinde herhangi bir değer yoktur.

Çizelge 6.34. TA-MODEL-4'e göre çalışanların gürültü maruziyetleri (%)

	G-1	G-2	G-3	G-4	G-5	G-6	G-7
Ç-1		9,351	1,969	1,969	1,969	1,969	1,969
Ç-2	31,498	31,498	40,061	63,298		31,498	31,498
Ç-3		31,498	47,398	31,498	31,498	31,498	31,498
Ç-4	114,675		114,675	114,675	114,675	114,675	114,675
Ç-5	31,498	31,498	31,498	31,498	31,498	31,498	
Ç-6	136,687	114,675	129,350	122,013	129,350		114,675
Ç-7	126,900	142,800	158,700		126,900	158,700	110,999
Ç-8	114,675		114,675	114,675	114,675	114,675	114,675
Ç-9	1,969	90,167	122,013	1,969	1,969		1,969
Ç-10	1,969	1,969	1,969	1,969		1,969	1,969
Ç-11	114,675	114,675	114,675	114,675		98,775	114,675
Ç-12	31,498	31,498	31,498	31,498	31,498		31,498
Ç-13	1,969	1,969	1,969	1,969	1,969	1,969	
Ç-14	82,875	82,875		82,875	82,875	82,875	82,875
Ç-15	31,498		31,498	31,498	31,498	31,498	31,498
Ç-16	114,675	114,675	114,675	114,675	114,675	82,875	
Ç-17	151,362	114,675		122,013	114,675	129,350	129,350
Ç-18		158,700	158,700	158,700	126,900	158,700	158,700
Ç-19	82,875	82,875	82,875		82,875	82,875	82,875
Ç-20	126,900	142,800		158,700	158,700	142,800	142,800
Ç-21	1,969	1,969	1,969		1,969	1,969	1,969

Çizelge 6.34 titreşim kısıtlı modele göre çalışanların maruz kaldıkları gürültü dozajını göstermektedir. Çizelge 6.34'teki değerlerin yaklaşık %42'si izin verilen sınırın üzerindedir.

Çizelge 6. 35. TA-MODEL-4'e göre çalışanların sıcaklık maruziyetleri(ºC)

	G-1	G-2	G-3	G-4	G-5	G-6	G-7
Ç-1		28,025	29,100	29,100	29,100	29,100	29,100
Ç-2	24,800	24,800	25,013	26,625		24,800	24,800
Ç-3		24,800	25,713	24,800	24,800	24,800	24,800
Ç-4	27,900		27,900	27,900	27,900	27,900	27,900
Ç-5	24,800	24,800	24,800	24,800	24,800	24,800	
Ç-6	30,000	27,900	29,300	28,600	29,300		27,900
Ç-7	30,275	31,187	32,100		30,275	32,100	29,362
Ç-8	27,900		27,900	27,900	27,900	27,900	27,900
Ç-9	29,100	28,550	28,600	29,100	29,100		29,100
Ç-10	29,100	29,100	29,100	29,100		29,100	29,100
Ç-11	27,900	27,900	27,900	27,900		26,987	27,900
Ç-12	24,800	24,800	24,800	24,800	24,800		24,800
Ç-13	29,100	29,100	29,100	29,100	29,100	29,100	
Ç-14	26,075	26,075		26,075	26,075	26,075	26,075
Ç-15	24,800		24,800	24,800	24,800	24,800	24,800
Ç-16	27,900	27,900	27,900	27,900	27,900	26,075	
Ç-17	31,400	27,900		28,600	27,900	29,300	29,300
Ç-18		32,100	32,100	32,100	30,275	32,100	32,100
Ç-19	26,075	26,075	26,075		26,075	26,075	26,075
Ç-20	30,275	31,187		32,100	32,100	31,187	31,187
Ç-21	29,100	29,100	29,100		29,100	29,100	29,100

Çizelge 6.35 titreşim kısıtlı modele göre elde edilen çizelgelerde çalışanların maruz kaldıkları sıcaklıkları göstermektedir.

Çizelge 6.36. TA-MODEL-4'e göre çalışanların MOE değerleri (kcal/sa)

	G-1	G-2	G-3	G-4	G-5	G-6	G-7
Ç-1		213,750	165,000	165,000	165,000	165,000	165,000
Ç-2	340,000	340,000	330,625	283,750		340,000	340,000
Ç-3		362,000	330,500	362,000	362,000	362,000	362,000
Ç-4	221,250		221,250	221,250	221,250	221,250	221,250
Ç-5	342,000	342,000	342,000	342,000	342,000	342,000	
Ç-6	165,625	216,250	182,500	199,375	182,500		216,250
Ç-7	170,000	140,000	110,000		170,000	110,000	200,000
Ç-8	223,250		223,250	223,250	223,250	223,250	223,250
Ç-9	165,000	197,250	202,125	165,000	165,000		165,000
Ç-10	165,000	165,000	165,000	165,000		165,000	165,000
Ç-11	220,500	220,500	220,500	220,500		252,000	220,500
Ç-12	356,000	356,000	356,000	356,000	356,000		356,000
Ç-13	162,000	162,000	162,000	162,000	162,000	162,000	
Ç-14	282,500	282,500		282,500	282,500	282,500	282,500
Ç-15	348,000		348,000	348,000	348,000	348,000	348,000
Ç-16	218,500	218,500	218,500	218,500	218,500	276,250	
Ç-17	131,625	219,750		202,125	219,750	184,500	184,500
Ç-18		110,000	110,000	110,000	173,000	110,000	110,000
Ç-19	283,750	283,750	283,750		283,750	283,750	283,750
Ç-20	168,500	138,250		108,000	108,000	138,250	138,250
Ç-21	159,000	159,000	159,000		159,000	159,000	159,000

Çizelge 6.36 ise titreşim kısıtlı modele göre çalışanların maruz kaldıkları MOE değerlerini göstermektedir. Çizelge 6.35 ve Çizelge 6.36 birlikte değerlendirildiğinde, değerlerin %16'sında çalışanların MOE değerine uygun olmayan sıcaklıklarda çalıştırılacağı bilgisi elde edilmektedir.

Çizelge 6.37. TA-MODEL-4'e göre çalışanların 2. iş istasyonuna atanma sayıları

	G-1	G-2	G-3	G-4	G-5	G-6	G-7
Ç-1		2					
Ç-2	8	8	7	6		8	
Ç-3		8	7	8	8	8	8
Ç-5	8	8	8	8	8	8	8
Ç-7	2	1			2		3
Ç-11						1	
Ç-12	8	8	8	8	8		8
Ç-14	2	2		2	2	2	2
Ç-15	8		8	8	8	8	8
Ç-16						2	
Ç-18					2		
Ç-19	2	2	2		2	2	2
Ç-20	2	1				1	1

Çizelge 6.37 titreşim kısıtlı modele göre çalışanların ikinci iş istasyonuna atanma sayılarını göstermektedir. Çizelge 6.37'deki değerlerin %56'sı olması istenen değerin üzerindedir.

Günlük Gürültü Dozajı Kısıtlı Modelin Çözümü (TA-MODEL-5)

Temel atama modeline, günlük gürültü dozajı bir kısıt olarak eklenince modelin optimal amaç fonksiyonu değeri 11795 olarak belirlenmektedir.

Çizelge 6.38. TA-MODEL-5 ile elde edilen çizelgenin birinci günü

	1.Gün	1.Pr.	2.Pr.	3.Pr.	4.Pr.	5.Pr.	6.Pr.	7.Pr.	8.Pr.	Toplam
Ç-2	İS-2	1	1	1			1	1	1	6
	İS-4				1	1				2
Ç-3	İS-2	1	1	1	1	1			1	6
	İS-4						1	1		2
Ç-4	İS-1	1	1	1	1	1	1	1	1	8
Ç-5	İS-2	1	1	1	1	1	1	1	1	8
Ç-6	İS-3	1				1			1	3
	İS-4		1	1	1		1	1		5
Ç-7	İS-2		1			1		1	1	4
	İS-4	1		1	1		1			4
Ç-8	İS-1	1	1	1	1	1	1	1	1	8
	İS-3			1	1			1		3
Ç-9	İS-4	1	1			1	1		1	5
Ç-10	İS-2				1					1
	İS-3	1	1	1		1	1	1	1	7
Ç-13	İS-3	1	1	1	1	1	1	1	1	8
Ç-14	İS-1	1	1	1	1	1	1	1	1	8
Ç-15	İS-2	1	1	1	1	1	1	1		7
	İS-4								1	1
Ç-16	İS-1	1	1	1	1	1	1	1	1	8
Ç-17	İS-3		1		1		1			3
	İS-4	1		1		1		1	1	5
Ç-18	İS-2	1		1		1	1			4
	İS-4		1		1			1	1	4
Ç-19	İS-1	1	1	1	1	1	1	1	1	8
Ç-20	İS-2				1		1	1	1	4
	İS-4	1	1	1		1				4
Ç-21	İS-3	1	1	1	1	1	1	1	1	8

Çizelge 6.38. Günlük gürültü dozajı kısıtlı modelden elde edilen çizelgenin birinci gününü göstermektedir.

Çizelge 6.39. TA-MODEL-5'e göre çalışanların el-kol titreşim maruziyetleri (m/s^2)

	G-1	G-2	G-3	G-4	G-5	G-6	G-7
Ç-1		3,566	3,820	3,941	3,881	3,941	3,941
Ç-2	3,488	3,488	3,475	3,481		3,488	3,475
Ç-3	3,488	3,488	3,475	3,475	3,475		3,475
Ç-4	4,150	4,150	4,150	3,666	4,150	4,150	
Ç-5	3,500		3,500	3,500	3,500	3,500	3,500
Ç-6	3,666	3,666	3,666	3,666		3,666	3,666
Ç-7	3,475	3,475	3,475		3,475	3,475	3,475
Ç-8	4,150	4,150	4,150	4,150	4,150		4,150
Ç-9	3,666	3,666	3,666		3,666	3,666	3,666
Ç-10	3,941	3,941	4,000	4,000	3,881		4,000
Ç-11		4,150	4,150	4,150	4,150	4,150	4,150
Ç-12		3,500	3,500	3,500	3,500	3,500	3,500
Ç-13	4,000	3,935	3,803	4,000	3,870	4,000	
Ç-14	4,150	4,150		4,150	4,150	4,150	4,150
Ç-15	3,494		3,481	3,488	3,475	3,481	3,494
Ç-16	4,150	4,150	4,150	4,150		4,150	4,150
Ç-17	3,666	3,666		3,666	3,666	3,666	3,666
Ç-18	3,475	3,475	3,475	3,475	3,475	3,475	
Ç-19	4,150		4,150	4,150	4,150	4,150	4,150
Ç-20	3,475	3,475		3,475	3,475	3,475	3,475
Ç-21	4,000	4,000	4,000		4,000	4,000	4,000

Çizelge 6.39. Günlük gürültü dozajı kısıtını içeren matematiksel modele göre çalışanların maruz kalacakları el-kol titreşim maruziyetini göstermektedir. Çizelge 6.39'daki değerlerin yaklaşık %28'i belirlenen değerden daha yüksektir.

Çizelge 6.40. TA-MODEL-5'e göre çalışanların gürültü maruziyetleri (%)

	G-1	G-2	G-3	G-4	G-5	G-6	G-7
Ç-1		27,807	13,042	5,660	9,351	5,660	5,660
Ç-2	63,298	63,298	95,099	79,199		63,298	95,099
Ç-3	63,298	63,298	95,099	95,099	95,099		95,099
Ç-4	100,000	100,000	100,000	99,926	100,000	100,000	
Ç-5	31,498		31,498	31,498	31,498	31,498	31,498
Ç-6	99,926	99,926	99,926	99,926		99,926	99,926
Ç-7	95,099	95,099	95,099		95,099	95,099	95,099
Ç-8	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000		100,000
Ç-9	99,926	99,926	99,926		99,926	99,926	99,926
Ç-10	5,660	5,660	1,969	1,969	9,351		1,969
Ç-11		100,000	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000
Ç-12		31,498	31,498	31,498	31,498	31,498	31,498
Ç-13	1,969	21,560	60,743	1,969	41,151	1,969	
Ç-14	100,000	100,000		100,000	100,000	100,000	100,000
Ç-15	47,398		79,199	63,298	95,099	79,199	47,398
Ç-16	100,000	100,000	100,000	100,000		100,000	100,000
Ç-17	99,926	99,926		99,926	99,926	99,926	99,926
Ç-18	95,099	95,099	95,099	95,099	95,099	95,099	
Ç-19	100,000		100,000	100,000	100,000	100,000	100,000
Ç-20	95,099	95,099		95,099	95,099	95,099	95,099
Ç-21	1,969	1,969	1,969		1,969	1,969	1,969

Çizelge 6.40 Günlük gürültü dozajı kısıtını içeren modeldeki gürültü maruziyetlerini göstermektedir. Modelin ergonomik kısıtı gürültü dozajı olduğu için, çizelgede çalışanların hepsinin izin verilen değerin altında gürültüye maruz kaldıkları görülmektedir.

Çizelge 6.41. TA-MODEL-5'e göre çalışanların sıcaklık maruziyetleri (°C)

	G-1	G-2	G-3	G-4	G-5	G-6	G-7
Ç-1		25,338	27,487	28,562	28,025	28,562	28,562
Ç-2	26,625	26,625	28,450	27,537		26,625	28,450
Ç-3	26,625	26,625	28,450	28,450	28,450		28,450
Ç-4	26,500	26,500	26,500	30,975	26,500	26,500	
Ç-5	24,800		24,800	24,800	24,800	24,800	24,800
Ç-6	30,975	30,975	30,975	30,975		30,975	30,975
Ç-7	28,450	28,450	28,450		28,450	28,450	28,450
Ç-8	26,500	26,500	26,500	26,500	26,500		26,500
Ç-9	30,975	30,975	30,975		30,975	30,975	30,975
Ç-10	28,562	28,562	29,100	29,100	28,025		29,100
Ç-11		26,500	26,500	26,500	26,500	26,500	26,500
Ç-12		24,800	24,800	24,800	24,800	24,800	24,800
Ç-13	29,100	29,475	30,225	29,100	29,850	29,100	
Ç-14	26,500	26,500		26,500	26,500	26,500	26,500
Ç-15	25,713		27,537	26,625	28,450	27,537	25,713
Ç-16	26,500	26,500	26,500	26,500		26,500	26,500
Ç-17	30,975	30,975		30,975	30,975	30,975	30,975
Ç-18	28,450	28,450	28,450	28,450	28,450	28,450	
Ç-19	26,500		26,500	26,500	26,500	26,500	26,500
Ç-20	28,450	28,450		28,450	28,450	28,450	28,450
Ç-21	29,100	29,100	29,100		29,100	29,100	29,100

Çizelge 6.41 ve Çizelge 6.42 sırası ile sadece gürültü içeren modele göre çalışanların bir haftalık planlama periyodunda maruz kaldıkları sıcaklık seviyeleri ve MOE değerlerini göstermektedir.

Çizelge 6.42. TA-MODEL-5'e göre çalışanların MOE değerleri (kcal/sa)

	G-1	G-2	G-3	G-4	G-5	G-6	G-7
Ç-1		335,625	238,125	189,375	213,750	189,375	189,375
Ç-2	283,750	283,750	227,500	255,625		283,750	227,500
Ç-3	299,000	299,000	236,000	236,000	236,000		236,000
Ç-4	258,000	258,000	258,000	130,125	258,000	258,000	
Ç-5	342,000		342,000	342,000	342,000	342,000	342,000
Ç-6	134,875	134,875	134,875	134,875		134,875	134,875
Ç-7	230,000	230,000	230,000		230,000	230,000	230,000
Ç-8	260,000	260,000	260,000	260,000	260,000		260,000
Ç-9	133,125	133,125	133,125		133,125	133,125	133,125
Ç-10	189,375	189,375	165,000	165,000	213,750		165,000
Ç-11		258,000	258,000	258,000	258,000	258,000	258,000
Ç-12		356,000	356,000	356,000	356,000	356,000	356,000
Ç-13	162,000	155,500	142,500	162,000	149,000	162,000	
Ç-14	258,000	258,000		258,000	258,000	258,000	258,000
Ç-15	318,500		259,500	289,000	230,000	259,500	318,500
Ç-16	253,000	253,000	253,000	253,000		253,000	253,000
Ç-17	131,250	131,250		131,250	131,250	131,250	131,250
Ç-18	236,000	236,000	236,000	236,000	236,000	236,000	
Ç-19	260,000		260,000	260,000	260,000	260,000	260,000
Ç-20	229,000	229,000		229,000	229,000	229,000	229,000
Ç-21	159,000	159,000	159,000		159,000	159,000	159,000

Çizelge 6.41 ve Çizelge 6.42 birlikte değerlendirildiğinde, çalışanların %36'sı MOE değerine uygun olmayan sıcaklıklarda çalışmaktadır.

Çizelge 6.43. TA-MODEL-5'e göre çalışanların 2. iş istasyonuna atanma sayıları

	G-1	G-2	G-3	G-4	G-5	G-6	G-7
Ç-1		7	3	1	2	1	1
Ç-2	6	6	4	5		6	4
Ç-3	6	6	4	4	4		4
Ç-5	8		8	8	8	8	8
Ç-7	4	4	4		4	4	4
Ç-10	1	1			2		
Ç-12		8	8	8	8	8	8
Ç-15	7		5	6	4	5	7
Ç-18	4	4	4	4	4	4	
Ç-20	4	4		4	4	4	4

Çizelge 6.43 günlük gürültü dozajı içeren modelde ikinci istasyona atanma sayılarını göstermektedir. Çizelgedeki değerlerin %37'si istenilen değerin üzerindedir.

Çizelge 6.44. Maliyet amaçlı modellerin ergonomi performansları açısından karşılaştırmaları

	Ergonomik Kriter			
Model	Endüstriyel Gürültü	El-kol Titreşimi	Termal Konfor	Aydınlatma
Temel atama modeli	%22	%26	%22	%73
Aydınlatma modeli	%11	%26	%13	%0
Termal konfor kısıtlı model	%36	%22	%0	%55
Titreşim kısıtlı model	%42	%0	%16	%56
Gürültü kısıtlı model	%0	%28	%36	%37

Çizelge 6.44'te, şu ana kadar çözümleri verilen tek amaçlı modellerin sonuçlarına göre, ergonomik parametreler özelinde maruziyetlerin limit değerleri geçmesine ilişkin bilgiler verilmiştir. % değerler, ilgili model için ergonomik değerlerin, olması gereken yasal sınırın üstünde olma sıklığını göstermektedir (bir haftalık sürede tüm çalışanlar için). Her bir modelin kendi ergonomik risk faktörünü istenilen sınırlarda sağlamaya çalışması diğer faktörler üzerinde ne yazık ki aynı etkiyi oluşturamamaktadır. En kritik kötüleşme, titreşim

kısıtlı modeldeki gürültü parametresine ilişkin değerlerdedir. Bu durum veri setinin yapısı ile açıklanabilir. Titreşim seviyesi düşük iş istasyonlarının gürültü seviyeleri yüksek olduğu için, titreşim kısıtlı model titreşim parametresi yüksek iş istasyonlarına olan rotasyonları artırıp, düşük titreşimli istasyonlarda ise daha az rotasyon yaptırdığı için daha fazla çalışan %100 dozajın üstünde gürültüye maruz kaldığı yorumu yapılabilir. Burada sunulan modeller, maliyet en iyilemesi amacı altında, çalışanların yetenek seviyesinin ve izin günü isteklerinin dikkate alındığı modellerdir. Benzer şekilde modellerin optimum amaç fonksiyonu üzerinden yapılan karşılaştırma ise Çizelge 6.45'te verilmiştir.

Çizelge 6.45. Model alternatiflerinin amaç fonksiyonu değerleri

Model	Amaç Fonksiyonu Değeri
Temel Atama Modeli	11240
Aydınlatma Kısıtlı Model	11960
Termal Konfor Parametreli Model	11400
El-kol Titreşimi Kısıtlı Model	11640
Günlük Gürültü Dozajı Kısıtlı Model	11795

Çizelge 6.45 incelendiğinde, en düşük amaç fonksiyonu değerinin temel atama modelinde, en yüksek amaç fonksiyonu değerinin ise aydınlatma kısıtlı modelde olduğu görülmektedir. İkinci en yüksek amaç fonksiyonuna sahip model ise gürültü parametreli modeldir. Bu çizelge net bir şekilde, ekonomik amaçlar ile ergonomik gereksinimler arasında bir ödünleşme olduğunu göstermektedir.

Termal konforun sağlanması için geliştirilen alternatif tek amaçlı model ve sonuçları

Bazı durumlarda, (özellikle demir çelik endüstrisi ya da yüksek sıcaklık yayn fırınların olduğu üretim ortamları) üretim ortamlarındaki sıcaklıklar, ACGIH'in limit değerlerinin oldukça üzerindedir (ilgili değerler Çizelge 3.4'te sunulmuştur). Üretim ortamları özellikle yaz aylarında 35-40 ^{o}C veya daha yüksek sıcaklıklara sahip olabilir ve bu sıcaklıklar ürünlerin kalite özellikleri ya da ekonomik gerekçeler gibi kritik nedenlerle düşürülemezse, çalışanların termal konforunun sağlanması için vücut iç sıcaklığını kontrol ederek bazı

düzenlemeler yapılabilir. Üretim ortamında, sıcaklık değerleri ACGIH tarafından önerilen üst sınırların üzerinde olsa bile, işletmelerin çalışanların sağlığını korumaya yönelik yükümlülükleri devam etmektedir. Vücut iç sıcaklığı, vücudun geliştirdiği bir takım mekanizmalar ile kontrol edilse bile, dış ortam sıcaklığı çok yüksekse, vücut iç sıcaklığı belirli bir seviyeye kadar yükselme eğilimi gösterecektir. Meshi ve diğerleri (2018) her ^{o}C WBGT artışının vücut iç sıcaklığında 0,174^{o}C artışla sonuçlandığını belirtmişlerdir. Ancak, vücut iç sıcaklığının artışının da bir sınırı olmalıdır. Vücut iç sıcaklığının insan sağlığı için tehlikeli bir sınırı olduğu, yani 38,2 ^{o}C olduğu bilinmektedir (Sund-Levander ve diğerleri, 2002). Bu duruma yönelik olarak geliştirilen atama modeli ve sonuçları izleyen şekilde ifade edilmiştir. Temel atama modelinde tanıtılan tüm, indis, parametre, karar değişkenleri ve kısıt kümeleri (Eş.6.1- Eş.6.10) vücut iç sıcaklığını dikkate alan model için de geçerlidir. Ancak bir takım yeni parametrelerin tanımlanması gerekmektedir:

Ek parametreler:

$$WBGT_j = j.\ iş\ istasyonunda\ hesaplanan\ WBGT\ indeks\ değeri\ (^{o}C)$$

$$CBT_{ik} = i.\ çalışanın\ k.\ gün\ için\ ölçülen / tah \min\ edilen\ vücut\ iç\ sıcaklığı\ (^{o}C)$$

$$\frac{\sum_{j}\sum_{l} x_{ijkl} * WBGT_j}{8} = CTWA_{ik} \quad \forall\ i,k \tag{6.32}$$

Eş. 6.32, çalışanların gün sonu ortalama ne kadar sıcaklığa maruz kalacakları hesaplatmaktadır. Hesaplama işlemi için termal konfor kısıtlı modelde olduğu gibi zaman ağırlıklı ortalama yöntemi benimsenmiştir.

$$CBT_{ik} + (CTWA_{ik} - CBT_{ik}) * 0.174 \le 38.2 \quad \forall\ i,k \tag{6.33}$$

Eş. 6.33 ile çalışanların gün sonu ortalama sıcaklık değerine göre, çalışanların vucüt iç sıcaklığının belirlenen limit değerden daha düşük olmasını sağlamak için yazılmış olan kısıttır. Bu kısıt yazılırken dış ortam sıcaklığının ortalama değerinin sürekli sabit kabul edilen vücut iç sıcaklığı üzerindeki etkisi literatürde deneysel olarak yapılan Meshi ve diğerlerinin (2018) çalışmasında belirttiği değerler üzerinden hesaplama yapılacağı

şeklinde tasarlanmıştır. Vücudun dış ortam sıcaklığına vereceği tepkilerin farklı deneysel çalışmalarda, üzerinde deneme yapılan grubun sayıca fazlalığı, yaptıkları işlerin ağırlığı gibi deney koşulları değiştiğinde farklı bir değer ile temsil edilebileceği bilgisi göz önünde bulundurulmalıdır. Yine limit değer olarak verilen ağızdan alınan ölçümlerde belirlenen 38.2^{o}C değeri de Sund-Levander ve diğerleri (2002)'de belirttikleri değerleridir. Benzer şekilde yapılan deney koşulları değiştiğinde üst limit olarak alınacak değerin de küçük farklılıklarla değişebileceği bilgisi de göz önünde bulundurulmalıdır.

$$CTWA_{ik} \geq 0 \tag{6.34}$$

Eş. 6.34 vücut iç sıcaklığı modelindeki değişkenin tipini gösteren işaret kıstıdır.

Bu modelin çözümünde de önceki model verileri kullanılmakla birlikte tek değişiklik, çalışanlar için yeni tanımlanan vücut iç sıcaklıkları ve iş istasyonlarının sıcaklıklarıdır. Yeni tanımlanan bu parametrelerin değerleri izleyen tablolarda verilmiştir:

Çizelge 6.46. Çalışanların tahmin edilen vücut iç sıcaklıkları (^{o}C)

	G-1	G-2	G-3	G-4	G-5	G-6	G-7
Ç-1	37,2	37,2	37,2	37,2	37,2	37,2	37,2
Ç-2	37,4	37,4	37,4	37,4	37,4	37,4	37,4
Ç-3	37,0	37,0	37,0	37,0	37,0	37,0	37,0
Ç-4	36,8	36,8	36,8	36,8	36,8	36,8	36,8
Ç-5	36,9	36,9	36,9	36,9	36,9	36,9	36,9
Ç-6	37,3	37,3	37,3	37,3	37,3	37,3	37,3
Ç-7	37,2	37,2	37,2	37,2	37,2	37,2	37,2
Ç-8	37,1	37,1	37,1	37,1	37,1	37,1	37,1
Ç-9	37,3	37,3	37,3	37,3	37,3	37,3	37,3
Ç-10	37,0	37,0	37,0	37,0	37,0	37,0	37,0
Ç-11	37,1	37,1	37,1	37,1	37,1	37,1	37,1
Ç-12	37,0	37,0	37,0	37,0	37,0	37,0	37,0
Ç-13	37,4	37,4	37,4	37,4	37,4	37,4	37,4
Ç-14	37,6	37,6	37,6	37,6	37,6	37,6	37,6
Ç-15	37,2	37,2	37,2	37,2	37,2	37,2	37,2
Ç-16	37,0	37,0	37,0	37,0	37,0	37,0	37,0
Ç-17	37,2	37,2	37,2	37,2	37,2	37,2	37,2
Ç-18	36,9	36,9	36,9	36,9	36,9	36,9	36,9
Ç-19	36,8	36,8	36,8	36,8	36,8	36,8	36,8
Ç-20	37,1	37,1	37,1	37,1	37,1	37,1	37,1
Ç-21	37,2	37,2	37,2	37,2	37,2	37,2	37,2

Çizelge 6.47. Alternatif termal konfor modelinde istasyonların WBGT değerleri

İş istasyonu	WBGT indeks(ºC)
İS-1	40,60
İS-2	43,70
İS-3	41,40
İS-4	42,10

Alternatif termal konfor modeli çözdürüldüğünde, modelin optimum amaç fonksiyonu değeri 11540 olarak belirlenmiştir. Alternatif termal konfor modelinden elde edilen çizelgenin birinci günü izleyen şekilde verilmiştir.

Çizelge 6.48. Alternatif termal konfor modeli ile elde edilen çizelgenin birinci günü

	1.Gün	1.Pr.	2.Pr.	3.Pr.	4.Pr.	5.Pr.	6.Pr.	7.Pr.	8.Pr	Toplam
Ç-1	İS-2						1		1	2
	İS-3	1	1	1	1	1		1		6
Ç-2	İS-2	1	1							2
	İS-3			1	1	1	1	1	1	6
Ç-3	İS-2	1	1	1	1	1	1	1	1	8
	İS-1	1			1	1		1	1	5
Ç-4	İS-3		1							1
	İS-4			1			1			2
Ç-6	İS-4	1	1	1	1	1	1	1	1	8
Ç-7	İS-2						1		1	2
	İS-4	1	1	1	1	1		1		6
Ç-8	İS-1	1	1	1	1	1	1	1	1	8
Ç-10	İS-2		1	1	1	1		1		5
	İS-3	1					1		1	3
	İS-1	1	1	1		1	1		1	6
Ç-11	İS-2				1					1
	İS-4							1		1
Ç-12	İS-2	1	1	1	1	1	1	1	1	8
Ç-13	İS-3	1	1	1	1	1	1	1	1	8
Ç-14	İS-1	1	1	1	1	1	1	1		7
	İS-2								1	1
Ç-15	İS-2	1		1		1		1		4
	İS-4		1		1		1		1	4
Ç-16	İS-1		1	1	1		1	1	1	6
	İS-4	1				1				2
Ç-18	İS-2	1		1	1		1	1		5
	İS-4		1			1			1	3
Ç-19	İS-1	1	1	1	1	1	1	1	1	8
Ç-20	İS-2		1			1				2
	İS-4	1		1	1		1	1	1	6
Ç-21	İS-3	1	1	1	1	1	1	1	1	8

Çizelge 6.48 alternatif termal konfor modeli olan vücut iç sıcaklığı modelinden elde edilen çizelgenin birinci gününü göstermektedir. İlgili çizelgeye göre, Çalışan 5, Çalışan 9 ve Çalışan 17'ün birinci gün izinli olduğu ve bu durumun çalışanların izin almak istedikleri günler ile uyumlu olduğu görülmektedir.

Çizelge 6.49. Alternatif termal konfor modeline göre çalışanların vücut iç sıcaklığı

	G-1	G-2	G-3	G-4	G-5	G-6	G-7
Ç-1	38,031	37,931	37,931	37,981	38,081	37,981	
Ç-2	38,196	38,196		38,196	38,196	38,196	38,196
Ç-3	38,166	38,166	38,166		38,166	38,166	38,166
Ç-4	37,544		37,461	37,461	37,461	37,461	37,461
Ç-5		38,083	38,083	38,083	38,083	38,083	38,083
Ç-6	38,135	38,135	38,135	38,135		38,135	38,135
Ç-7	38,122		38,157	38,192	38,122	38,157	38,192
Ç-8	37,709	37,709	37,709	37,709		37,709	37,709
Ç-9		38,074	38,074	38,013	38,059	38,135	38,059
Ç-10	38,016	37,866	37,966	38,016		38,016	37,916
Ç-11	37,809	37,709		37,709	37,709	37,709	37,709
Ç-12	38,166	38,166	38,166	38,166	38,166	38,166	
Ç-13	38,096	38,096	38,096		38,096	38,096	38,096
Ç-14	38,189	38,122	38,122	38,122	38,122		38,122
Ç-15	38,192	38,192	38,192	38,192	38,192		38,192
Ç-16	37,692	37,626	37,626	37,626	37,626	37,626	
Ç-17		38,053	38,053	38,053	38,053	38,053	38,053
Ç-18	37,979	37,909	37,979	38,014	37,944		38,048
Ç-19	37,461	37,461	37,461		37,461	37,461	37,461
Ç-20	38,040	38,144		38,040	38,005	38,144	38,109
Ç-21	37,931		37,931	37,931	37,931	37,931	37,931

Çizelge 6.49 alternatif termal konfor modeline göre çalışanların bir haftalık planlama periyodunda, çalıştıkları iş istasyonlarındaki sıcaklık ortalamalarına göre, vücut iç sıcaklıklarının değerini göstermektedir. Vücut iç sıcaklığı için ağızdan alınan ölçüm ile en yüksek değerin 38,2 ^{o}C olabileceği belirtilmişti. Çizelge 6.49'da da görüldüğü üzere, atama değerleri belirtilen limit değerin altındadır.

6.3.2. Çok amaçlı bütünleşik modellerin çözümleri

Maliyet amacı ve bir ergonomik risk parametresini dikkate alan model çözümlerinden sonra, çok amaçlı bütünleşik modellerin çözümlerine geçilmiştir. Çok amaçlı, tüm ergonomik risklerin bir arada olduğu bütünleşik modellerin oluşturulmasında ağırlıklı HP yaklaşımı ve amaç ağırlıklarının KBDT setine dayalı, Yavuz ve diğerleri (2015)'te önerdikleri dilsel değerlendirme modeli kullanılmıştır. Ergonomik risk parametrelerinin tamamının etkin olduğu bütünleşik model için grup karar verme tekniğine dayalı amaç ağırlıklarının belirlemesi süreci izleyen şekilde işletilmiştir. İlk olarak, uzmanlardan risklerin ikili karşılaştırmalarına ilişkin dilsel değerlendirmelerini yapmaları istenmiştir.

Çizelge 6.50. Uzmanların amaçlara ilişkin dilsel değerlendirmeleri

Uzman-1	Titreşim	Termal	Gürültü	Aydınlatma
Titreşim	-	odö ve ydö arası	en fazla aö	en az ydö
Termal		-	odö	en az çydö
Gürültü			-	odö
Aydınlatma				-
Uzman-2	Titreşim	Termal	Gürültü	Aydınlatma
Titreşim	-	ydö	odö	en az odö
Termal		-	aö ve odö arası	ydö ve çydö arası
Gürültü			-	mdö
Aydınlatma				-
Uzman-3	Titreşim	Termal	Gürültü	Aydınlatma
Titreşim	-	aö ve ydö arası	en çok odö	en az ydö
Termal		-	aö ve odö arası	en az odö
Gürültü			-	ydö ve çydö arası
Aydınlatma				-

Çizelge 6.50, amaç ağırlıklarının belirlenmesi için ilk adım olan, uzmanlardan alınan hedeflere ait dilsel değerlendirmeleri göstermektedir. Hesaplamalara devam edilebilmesi için 3 farklı uzmanının görüşü tek bir görüş olarak ifade edilmelidir. Bu tez çalışması kapsamında uzmanların hepsinin görüşüne eşit mesafede durulmuştur. Uzmanların, hedeflere ait değerlendirmeleri iyimser ve kötümser toplamlı tercihler olarak ifade edilerek birleştirilmiştir. Bu işlem için, bilgi kaybına fırsat vermeyen basit aritmetik ortalama tekniği kullanılmıştır. İyimser ve kötümser toplamlı tercihlerin hesaplanabilmesi için uzmanlardan alınan dilsel değerlendirmelerin aralık biçiminde ifade edilmesi gerekmektedir. Çizelge 6.51 uzmanlardan alınan dilsel değerlendirmelerin aralık biçiminde ifade edilmiş hallerini göstermektedir.

Çizelge 6.51. Uzmanlardan alınan dilsel değerlendirmelerin aralık biçiminde ifadesi

Uzman-1	Titreşim	Termal	Gürültü	Aydınlatma
Titreşim	-	[odö, ydö]	[ö,aö]	[ydö, mdö]
Termal	[aö, odö]	-	[odö, odö]	[çydö, mdö]
Gürültü	[ydö, mdö]	[odö, odö]	-	[odö, odö]
Aydınlatma	[ö,aö]	[ö,çaö]	[odö, odö]	-
Uzman-2	Titreşim	Termal	Gürültü	Aydınlatma
Titreşim	-	[ydö, ydö]	[odö, odö]	[odö, mdö]
Termal	[aö, aö]	-	[aö, odö]	[ydö, çydö]
Gürültü	[odö, odö]	[odö, ydö]	-	[mdö, mdö]
Aydınlatma	[ö,odö]	[çaö, aö]	[ö,ö]	-
Uzman-3	Titreşim	Termal	Gürültü	Aydınlatma
Titreşim	-	[aö, ydö]	[ö,odö]	[ydö, mdö]
Termal	[aö, ydö]	-	[aö, odö]	[odö, mdö]
Gürültü	[odö, mdö]	[odö, ydö]	-	[ydö, çydö]
Aydınlatma	[ö,aö]	[ö,odö]	[çaö, aö]	-

Her bir hedef için iyimser ve kötümser toplamlı tercihler hesaplanmasına yönelik bir örnek verilmiştir. Aşağıda verilen örnek hesaplama P_{14} yani titreşim hedefine göre aydınlatma hedefine ait kötümser ve iyimser toplamlı tercihe ait hesaplamadır:

$$P^{-}_{14} = \Delta(\frac{1}{3}(\Delta^{-1}(ydö,4) + \Delta^{-1}(odö,3) + \Delta^{-1}(ydö,4) = \Delta(\frac{1}{3}(4+3+4)) = \Delta(3.67) = (ydö,-0.33)$$

$$P^{+}_{14} = \Delta(\frac{1}{3}(\Delta^{-1}(mdö,6) + \Delta^{-1}(mdö,6) + \Delta^{-1}(mdö,6) = \Delta(\frac{1}{3}(6+6+6)) = \Delta(6) = (mdö,+0.00)$$

Üç uzmanın görüşleri, diğer hedefler için de benzer mantık işletilerek hesaplanmış ve Çizelge 6.52'de verilmiştir.

Çizelge 6.52. Hedeflere ilişkin kötümser ve iyimser toplamlı tercihler

Kötümser	Titreşim	Termal	Gürültü	Aydınlatma
Titreşim	-	[odö,+0.00]	[çaö,+0.00]	[ydö,-0.33]
Termal	[aö,+0.00]	-	[aö,+0.33]	[ydö,+0.00]
Gürültü	[odö,+0.33]	[odö,+0.00]	-	[ydö,+0.33]
Aydınlatma	[ö,+0.00]	[ö,+0.33]	[çaö+0.33]	-
İyimser	**Titreşim**	**Termal**	**Gürültü**	**Aydınlatma**
Titreşim	-	[ydö,+0.00]	[odö, -0.33]	[mdö+.00]
Termal	[odö,+0.00]	-	[odö,+0.00]	[mdö,-0.33]
Gürültü	[çyö,+0.00]	[ydö,-0.33]	-	[çydö,-0.33]
Aydınlatma	[aö,+0.33]	[aö,+0.00]	[aö,-0.33]	-

Kriterlere ait ağırlıkların belirlenebilmesi için, dilsel aralıkların belirlenmesi gerekmektedir. Titreşim için bu hesaplamanın alt sınırı,

$$\Delta\ (\frac{1}{3}(\Delta^{-1}(odö,3) + \Delta^{-1}(çaö,1) + \Delta^{-1}(ydö - 0.33))) = \Delta\ (\frac{1}{3}(3+1+3.67)) = \Delta(2.556) = (odö,-0.443)$$

şeklinde, üst sınırı ise $\Delta(\frac{1}{3}(\Delta^{-1}(ydö)+\Delta^{-1}(odö-0.33)+\Delta^{-1}(mdö)))=\Delta(\frac{1}{3}(4+2.67+6))=\Delta(4.223)=(ydö,+0.223)$ şeklinde hesaplanarak, Çizelge 6.53'te ifade edilmiştir.

Çizelge 6.53. Kullanılan aralıklar, aralıkların orta noktası ve hedef ağırlıkları

	Dilsel Aralıklar	Kullanılan Aralıklar	Orta Nokta	Ağırlık
Titreşim	[odö,-0.443];[ydö,+0.223]	[2,55;4.223]	3,3865	0,282
Termal	[odö,-0.224];[ydö,-0.110]	[2,776;3,890]	3,3330	0,277
Gürültü	[ydö,-0.447];[ydö,+0.446]	[3,553;4,446]	3,9995	0,333
Aydınlatma	[ö,+0.553];[aö,+0.000]	[0,553;2,000]	1,2765	0,106

Çizelge 6.53, kullanılan aralıkları, aralıkların orta noktasını ve orta nokta değerlerini normalize ederek elde edilen hedeflere ilişkin ağırlıkları göstermektedir. Çizelge 6.53'e göre, en yüksek ağırlık endüstriyel gürültü amacında, en düşük ağırlık ise aydınlatma amacındadır.

Hedef ağırlıklarının kullanılarak çözdürüldüğü HP modellerine ilişkin çözüm ayrıntıları izleyen şekilde verilmiştir. HP modelinin denenmesinde maliyet açısından farklılıkların daha kolay ifade edilebilmesi için, tek amaçlı modellerin denenmesinde kullanılan veriler kullanıldığı için çalışmanın bu kısmında doğrudan elde edilen sonuçlar verilecektir.

HP'de hedefe ilişkin yumuşak kısıtların sağ taraf değerleri yani hedef değerleri tüm hedefler için aynı birimde değilse ve matematiksel olarak modelin hedeflere eşit yaklaşması isteniyorsa, bir takım ek düzenlemelerin yapılması gerekmektedir.

Hedef değerler ergonomik açıdan değerlendirildiğinde, modelin hedef değerleri yasalarla ya da ergonomi çevrelerince zaten bellidir. Aynı zamanda, yumuşak kısıtlardan birinin (termal konfor) sağ taraf değeri (yani hedef değeri) modelin içinde 3 farklı değerden birini alabilecek şekilde düzenlenmiştir.

Bu durumda her gün ve her çalışan için değişebilecek olan hedef değerlerine sahip bir HP modelinde klasik yöntemler ile normalizasyon işlemi yapmak mümkün olmamıştır. Ancak, normalizasyon işlemlerinde amaç, hedeflerden aynı oranda sapmaların amaç fonksiyonuna aynı oranda yansımasını sağlamak ise, bu durum amaç fonksiyonunda yazılacak sapma değerlerinin hedef değerlere bölünmesi ile de elde edilebilir.

Böylece hedeflerden sapma oranları temelinde, amaç fonksiyonunun her hedefe eşit yaklaşması durumu sağlanabilir (Amaç ağırlıklarının model tarafından anlam kazanması için böyle bir düzenleme gereklidir).

$\min z = W_1 * \sum_i \sum_k d_{1ik}^+ + W_2 * \sum_i \sum_k d_{2ik}^+ + W_3 * \sum_i \sum_k d_{3ik}^+ + W_4 * \sum_i \sum_k d_{4ik}^+$ şeklinde yazılan amaç fonksiyonu izleyen şekilde güncellenirse;

$$\min z = W_1 * \sum_i \sum_k (d_{1ik}^+ / Hedef\,1) + W_2 * \sum_i \sum_k (d_{2ik}^+ / Hedef\,2)$$
$$+ W_3 * \sum_i \sum_k (d_{3ik}^+ / Hedef\,3) + W_4 * \sum_i \sum_k (d_{4ik}^+ / Hedef\,4)$$

Her bir hedeften aynı oranda olan sapmalar amaç fonksiyonunca aynı düzeyde algılanacaktır. Bu durum izleyen şekilde ifade edilebilir.

Çizelge 6.54. Hedef normalizasyonu örnek tablo-1

Kriter	Hedef	Gerçekleşen Değer	Sapma	Amaç fonksiyonuna yansıyan değer
Gürültü	100	120	20	20
Titreşim	4	4.8	0,8	0,8

Her iki hedeften de %20 oranında sapma gerçekleşirken, amaç fonksiyonunda aynı oranda cezalandırılmadıkları çizelge 6.54'te gösterilmiştir.

Çizelge 6.55. Hedef normalizasyonu örnek tablo-2

Kriter	Hedef	Gerçekleşen Değer	Sapma	Amaç fonksiyonundaki düzeltme	Amaç fonksiyonuna yansıyan değer
Gürültü	100	120	20	20/100=0,2	0,2
Titreşim	4	4,8	0,8	0,8/4=0,2	0,2

Amaç fonksiyonunda yapılan düzeltme ile hedeflerden aynı derecede olan sapmaların amaç fonksiyonunda da aynı derecede karşılık bulacağı Çizelge 6.55'de gösterilmiştir. Çizelge 6.54 ve Çizelge 6.55'te örnek olması açısından gürültü ve titreşim hedeflerine ilişkin örnekler verilmiştir. Diğer hedefler de benzer şekilde işlem görmüştür. Termal konfor hedefi, model içinde her gün ve çalışan için değişebilen MOE değerine göre değişkenlik gösterebilen bir hedeftir.

Amaç fonksiyonunda sapma değişkenin, değişken hedef değerine bölünmesi modelin amaç fonksiyonun da doğrusal olmayan bir ifade olmasına neden olacaktır. Karar değişkeninin köklü ifade içinde bulunduğu kısıtların yanı sıra, amaç fonksiyonunda da iki değişkenin birbirine bölünmesi, modelin karmaşıklığını artırmaktadır.

Hedef ağırlıklarının kullanılarak çözdürüldüğü bütünleşik modellerin çözüm ayrıntıları izleyen şekilde verilmiştir.

İzin günü istekleri ve çalışanların uzmanlık seviyelerinin dikkate alındığı HP modelinin (*HP-MODEL-1*) amaç fonksiyonu değeri 0.0455 olarak belirlenmiştir. Çizelge 6.56, izin günü istekleri ve çalışanların uzmanlık seviyelerinin dikkate alındığı HP modelinden elde edilen çizelgenin birinci gününü göstermektedir.

Çizelge 6.56 şu ana kadar gösterilen çizelgeler içinde çalışanların işler arasında en fazla rotasyona tabi tutulduğu çizelgedir. Modelin bu davranışının sebebi aynı anda etkin olan ergonomik risklerden çalışanları koruyabilmek içini yüksek risk değerlerine sahip iş istasyonlarında tüm çalışanlara yer vermeye çalışması ve riski eşit paylaştırmayı sağlamaya çalışması ile açıklanabilir.

Çizelge 6.56. HP-MODEL-1 ile elde edilen çizelgenin birinci günü

	1.Gün	1.Pr.	2.Pr.	3.Pr.	4.Pr.	5.Pr.	6.Pr.	7.Pr.	8.Pr.	Toplam
Ç-1	İS-2	1	1			1	1		1	5
	İS-3			1	1			1		3
	İS-1	1	1			1			1	4
	İS-2						1			1
Ç-2	İS-3				1					1
	İS-4			1				1		2
Ç-3	İS-2		1		1	1	1	1		5
	İS-4	1		1					1	3
	İS-1			1	1		1	1		4
Ç-4	İS-3	1				1				2
	İS-4		1						1	2
Ç-7	İS-2		1	1	1		1	1		5
	İS-4	1				1			1	3
	İS-1		1	1	1					3
Ç-8	İS-3	1							1	2
	İS-4					1	1	1		3
	İS-1				1		1	1		3
Ç-9	İS-3	1							1	2
	İS-4		1	1		1				3
Ç-10	İS-2	1		1	1	1			1	5
	İS-3		1				1	1		3
	İS-1	1	1			1		1		4
Ç-11	İS-2			1					1	2
	İS-4				1		1			2
Ç-12	İS-2	1	1					1	1	4
	İS-3			1	1	1	1			4
	İS-1	1	1	1		1				4
Ç-13	İS-3						1		1	2
	İS-4				1			1		2
	İS-1			1		1	1	1	1	5
Ç-14	İS-2		1		1					2
	İS-4	1								1
	İS-2	1				1		1	1	4
Ç-15	İS-3		1							1
	İS-4			1	1		1			3
	İS-1				1		1		1	3
Ç-16	İS-3		1	1						2
	İS-4	1				1		1		3
	İS-1	1		1	1				1	4
Ç-17	İS-3					1		1		2
	İS-4		1				1			2
Ç-19	İS-1	1	1			1	1	1	1	6
	İS-2			1	1					2
Ç-20	İS-2	1		1		1	1	1		5
	İS-4		1		1				1	3
Ç-21	İS-3	1	1	1	1	1	1	1	1	8

Çizelge 6.57. HP-MODEL-1'e göre çalışanların el-kol titreşim maruziyetleri (m/s^2)

	G-1	G-2	G-3	G-4	G-5	G-6	G-7
Ç-1	3,695	3,881	3,695	3,695	3,758	3,695	
Ç-2	3,888		3,913	3,894	3,913	3,997	3,888
Ç-3	3,481	3,481	3,481	3,481	3,481		3,481
Ç-4	3,948	4,012	3,948	3,863	3,929	3,948	
Ç-5		3,948	3,973	3,725	3,827	3,629	3,948
Ç-6		3,948	3,948	3,948	3,948	3,863	3,948
Ç-7	3,481	3,481	3,481		3,469	3,481	3,481
Ç-8	3,863	3,863	3,863	3,929		3,863	3,863
Ç-9	3,863	3,948	3,948		3,948	3,843	3,948
Ç-10	3,695	3,758		3,758	3,758	3,758	3,695
Ç-11	3,827	3,827		3,992	3,992	3,827	3,913
Ç-12	3,758	3,820	3,695	3,758	3,695		3,695
Ç-13	3,948		3,948	3,756	3,948	3,948	3,948
Ç-14	3,913	3,888		3,656	3,992	3,751	3,725
Ç-15	3,548	3,481	3,625		3,548	3,548	3,548
Ç-16	3,863	3,827	3,656	3,807		3,667	3,874
Ç-17	3,948	3,948	3,929	3,863	3,948	3,948	
Ç-18		3,619	3,607	3,548	3,548	3,678	3,741
Ç-19	3,997	3,978	3,997	3,978		3,757	3,997
Ç-20	3,481	3,481	3,481	3,481	3,481		3,481
Ç-21	4,000		4,000	4,076	4,000	4,019	4,019

Çizelge 6.57 ile çalışanların temel HP modeline göre maruz kaldıkları el-kol titreşim seviyeleri gösterilmiştir. HP-MODEL-1'in amaç fonksiyonu değer almıştı, titreşim ve gürültü maruziyetine ilişkin sapma değişkenlerinden bazılarının değer alması amaç fonksiyonuna etki etmiştir. Çizelge 6.57 üzerinde titreşim maruziyetinin limit değeri aştığı hücreler belirtilmiştir.

El-kol titreşimi için 8 saatlik maruziyet limit değeri 4.00 m/s^2 idi. Çizelge de gösterilen değerlere göre en yüksek sapmanın miktarı 0.076 m/s^2 olarak belirlenmiştir. Bu değer birçok kişi için hissedilecek şiddette değildir. Ancak, risk parametresine ilişkin birikimli etki göz önüne alınırsa, aylarca aynı çizelgeye göre çalışmak çalışan açısından sakıncalı olabilir.

Çizelge 6.58. HP-MODEL-1'e göre çalışanların gürültü maruziyetleri (%)

	G-1	G-2	G-3	G-4	G-5	G-6	G-7
Ç-1	20,40	9,40	20,40	20,40	16,70	20,40	
Ç-2	93,90		90,20	78,00	90,20	82,90	93,90
Ç-3	79,20	79,20	79,20	79,20	79,20		79,20
Ç-4	90,20	70,60	90,20	97,50	77,90	90,20	
Ç-5		90,20	86,50	76,70	97,50	100,00	90,20
Ç-6		90,20	90,20	90,20	90,20	97,50	90,20
Ç-7	79,20	79,20	79,20		111,00	79,20	79,20
Ç-8	97,50	97,50	97,50	77,90		97,50	97,50
Ç-9	97,50	90,20	90,20	0,00	90,20	85,30	90,20
Ç-10	20,40	16,70		16,70	16,70	16,70	20,40
Ç-11	97,50	97,50		98,80	98,80	97,50	90,20
Ç-12	16,70	13,00	20,40	16,70	20,40		20,40
Ç-13	90,20		90,20	92,60	90,20	90,20	90,20
Ç-14	90,20	93,90		96,30	98,80	73,10	76,70
Ç-15	75,50	79,20	40,00		75,50	75,50	75,50
Ç-16	97,50	97,50	96,30	85,30		64,50	65,70
Ç-17	90,20	90,20	77,90	97,50	90,20	90,20	
Ç-18		55,90	87,70	75,50	75,50	68,10	64,40
Ç-19	82,90	70,60	82,90	70,60		57,20	82,90
Ç-20	79,20	79,20	79,20	79,20	79,20		79,20
Ç-21	2,00		2,00	51,00	2,00	14,20	14,20

Çizelge 6.58 çalışanların günlük gürültü maruziyetini göstermektedir. Modelin bir çalışanın bir günlük maruziyeti hariç gürültü açısından herhangi bir limit değer aşımına müsaade etmeyecek şekilde atama yaptığı görülmektedir.

Çizelge 6.59. HP-MODEL-1'e göre çalışanların sıcaklık maruziyetleri (°C)

	G-1	G-2	G-3	G-4	G-5	G-6	G-7
Ç-1	26,413	28,025	26,413	26,413	26,950	26,413	
Ç-2	28,013		26,775	27,100	26,775	26,075	28,012
Ç-3	27,538	27,537	27,538	27,537	27,538		27,538
Ç-4	28,550	28,175	28,550	29,250	28,875	28,550	
Ç-5		28,550	27,312	27,588	27,475	29,200	28,550
Ç-6		28,550	28,550	28,550	28,550	29,250	28,550
Ç-7	27,537	27,537	27,538		29,362	27,537	27,537
Ç-8	29,250	29,250	29,250	28,875		29,250	29,250
Ç-9	29,250	28,550	28,550		28,550	29,575	28,550
Ç-10	26,413	26,950		26,950	26,950	26,950	26,413
Ç-11	27,475	27,475		26,988	26,987	27,475	26,775
Ç-12	26,950	27,488	26,413	26,950	26,413		26,413
Ç-13	28,550		28,550	30,275	28,550	28,550	28,550
Ç-14	26,775	28,013		27,963	26,987	26,350	27,588
Ç-15	28,075	27,537	26,787		28,075	28,075	28,075
Ç-16	29,250	27,475	27,962	27,800		26,137	27,425
Ç-17	28,550	28,550	28,875	29,250	28,550	28,550	
Ç-18		27,700	29,525	28,075	28,075	29,150	29,687
Ç-19	26,075	26,400	26,075	26,400		25,437	26,075
Ç-20	27,537	27,537	27,537	27,537	27,537		27,537
Ç-21	29,100		29,100	27,800	29,100	28,775	28,775

Çizelge 6.59 ve Çizelge 6.60 sırası ile izin günü istekleri ve çalışanların uzmanlık seviyelerinin dikkate alındığı HP modelinden elde edilen çizelgeye göre çalışanların bir haftalık çizelgeleme periyodunda maruz kalacakları sıcaklıklar ve MOE değerlerini göstermektedir. Her iki çizelge birlikte değerlendirildiğinde, çalışanların tamamının çalıştıkları işlerin ağırlığına uygun sıcaklıklarda görev aldıkları görülmektedir.

Çizelge 6.60. HP-MODEL-1'e göre çalışanların MOE değerleri (kcal/sa)

	G-1	G-2	G-3	G-4	G-5	G-6	G-7
Ç-1	286,875	213,750	286,875	286,875	262,500	286,875	
Ç-2	224,750		265,000	252,875	265,000	283,750	224,750
Ç-3	267,500	267,500	267,500	267,500	267,500		267,500
Ç-4	197,250	203,625	197,250	178,875	185,250	197,250	
Ç-5		194,250	233,625	239,375	238,500	193,375	194,250
Ç-6		195,750	195,750	195,750	195,750	178,875	195,750
Ç-7	260,000	260,000	260,000		200,000	260,000	260,000
Ç-8	182,375	182,375	182,375	189,500		182,375	182,375
Ç-9	179,625	197,250	197,250		197,250	168,375	197,250
Ç-10	286,875	262,500		262,500	262,500	262,500	286,875
Ç-11	246,000	246,000		252,000	252,000	246,000	264,750
Ç-12	258,000	233,500	282,500	258,000	282,500		282,500
Ç-13	199,000		199,000	148,500	199,000	199,000	199,000
Ç-14	264,000	221,625		239,250	251,750	288,500	246,125
Ç-15	236,625	259,500	272,750		236,625	236,625	236,625
Ç-16	180,000	241,750	236,125	231,125		293,875	237,750
Ç-17	196,000	196,000	184,125	178,375	196,000	196,000	
Ç-18		249,000	186,000	242,500	242,500	192,500	167,500
Ç-19	283,750	271,250	283,750	271,250		319,375	283,750
Ç-20	259,250	259,250	259,250	259,250	259,250		259,250
Ç-21	159,000		159,000	210,000	159,000	171,750	171,750

Çizelge 6.61, çalışanların HP-MODEL-1'e göre bir haftalık çizelgeleme periyodunda, ikinci makineye atanma sayılarını göstermektedir. Çizelge 6.61'de aydınlatma hedefinde herhagi bir limit değer aşımı olmadığı, çalışanların tamamının, ikinci makineye günlük olarak belirlenen limit değerden daha az sayıda atandıkları görülmektedir.

Çizelge 6.61. HP-MODEL-1'e göre çalışanların 2.iş istasyonuna atanma sayıları

	G-1	G-2	G-3	G-4	G-5	G-6	G-7
Ç-1	5	2	5	5	4	5	
Ç-2	1		2	2	2	2	1
Ç-3	5	5	5	5	5		5
Ç-5			1	3	2	2	
Ç-7	5	5	5		3	5	5
Ç-10	5	4		4	4	4	5
Ç-11	2	2		1	1	2	2
Ç-12	4	3	5	4	5		5
Ç-14	2	1		3	1	4	3
Ç-15	4	5	5		4	4	4
Ç-16		2	3	2		5	2
Ç-18		4	2	4	4	2	1
Ç-19	2	2	2	2		5	2
Ç-20	5	5	5	5	5		5

İzin günü istekleri ve çalışanların uzmanlık seviyelerinin dikkate alındığı HP modelinin sonuçları yorumlandığında, modelin çalışanların risk faktörlerine belirlenen sınırların altında maruz kalmalarına olanak sağlayacak şekilde çalıştırılabilmeleri için, önceki modellere göre, iş istasyonları arasında daha fazla rotasyona tabii tuttuğu görülmektedir.

Bu durum çalışanların risk maruziyetleri açısından olumlu bir sonuç verdiği gibi, daha fazla iş arasında rotasyon yapan çalışanların, monotonluktan kurtulması, işletmedeki daha fazla sürecine hâkim olması gibi bir takım ek katkıları da olacaktır.

Model sonuçlarına göre çalışanların MOE değerleri arasında, belirgin bir farklılık olduğu görülmektedir. Bu farklılık, çizelgeyi uygulanmasına engel bir durum olarak algılanmamalıdır, zira 300 değerinin üzerindeki MOE değerine sahip 1 çalışan bulunmakta ve haftada bir gün bu değere maruz kalmaktadır ve diğer çalışanların MOE değerleri birbirine yakındır. Ancak yine de diğer model önerilerinde olduğu gibi burada da çalışanların bütüncül korunmaları amaçlandığı için MOE değerine üst sınır getirilerek model (HP-MODEL-2) yeniden çözdürülmüş ve elde edilen sonuçlar izleyen çizelgelerde özet bir şekilde sunulmuştur.

Çizelge 6.62. HP-MODEL-2 ile elde edilen çizelgenin birinci günü

	1.Gün	1.Pr.	2.Pr.	3.Pr.	4.Pr.	5.Pr.	6.Pr.	7.Pr.	8.Pr.	Toplam
	İS-2	1	1	1		1			1	5
Ç-1	İS-3				1		1	1		3
	İS-1			1	1		1	1		4
Ç-2	İS-2	1								1
	İS-3		1							1
	İS-4					1			1	2
Ç-3	İS-2				1	1	1	1	1	5
	İS-4	1	1	1						3
	İS-1	1	1			1		1		4
Ç-4	İS-3				1				1	2
	İS-4			1			1			2
	İS-1	1				1			1	3
Ç-6	İS-3			1			1			2
	İS-4		1		1			1		3
Ç-7	İS-2		1		1		1	1	1	5
	İS-4	1		1		1				3
	İS-1						1	1	1	3
Ç-8	İS-3	1		1						2
	İS-4		1		1	1				3
Ç-10	İS-2	1	1	1			1	1		5
	İS-3				1	1			1	3
	İS-1		1	1	1	1				4
Ç-11	İS-2	1						1		2
	İS-4						1		1	2
Ç-12	İS-2			1	1			1	1	4
	İS-3	1	1			1	1			4
	İS-1				1		1	1	1	4
Ç-13	İS-3			1		1				2
	İS-4	1	1							2
	İS-1	1	1	1		1	1		1	6
Ç-14	İS-2				1					1
	İS-4							1		1
	İS-2		1	1	1				1	4
Ç-15	İS-3							1		1
	İS-4	1				1	1			3
	İS-1	1	1	1	1					4
Ç-16	İS-2					1				1
	İS-3								1	1
	İS-4						1	1		2
	İS-1					1	1			2
Ç-17	İS-3	1	1					1		3
	İS-4			1	1				1	3
Ç-19	İS-1	1	1	1	1			1	1	6
	İS-2					1	1			2
Ç-20	İS-2	1	1	1		1	1			5
	İS-4				1			1	1	3
Ç-21	İS-3	1	1	1	1	1	1	1	1	8

HP-MODEL-2'de de yine çalışanların izin günü istekleri, uzmanlık durumları ve tüm risk maruziyetlerinin etkin olduğu durumlar göz önüne alınmıştır. Aynı zamanda MOE değerine de sınır getirilmiştir. Çizelge 6.62 bu modele göre elde edilen çizelgenin birinci

gününü göstermektedir. Çalışanların MOE değerine sınırlama koymak model üzerinde çalışanların işler arasında daha fazla rotasyon yapması şeklinde bir etki göstermiştir.

Çizelge 6.63. HP-MODEL-2'ye göre çalışanların el-kol titreşim maruziyetleri (m/s^2)

	G-1	G-2	G-3	G-4	G-5	G-6	G-7
Ç-1	3,695	3,695	3,881	3,758	3,758	3,695	
Ç-2	3,888	3,874	3,992	3,973	3,807	3,799	
Ç-3	3,481	3,481	3,481		3,481	3,481	3,481
Ç-4	3,948	3,843	3,948	3,948	3,948	3,948	
Ç-5		3,569	3,992	3,827	3,913	3,934	3,954
Ç-6	3,863	3,948		3,948	3,948	3,863	3,948
Ç-7	3,481		3,481	3,469	3,481	3,481	3,481
Ç-8	3,863	3,863	3,863	3,863	3,909		3,863
Ç-9		3,863	3,863	3,948	3,948	3,863	3,863
Ç-10	3,695	3,695	3,695	3,695		3,695	3,695
Ç-11	3,827	3,992	3,661	3,827		3,827	3,827
Ç-12	3,758	3,758	3,695	3,695	3,695		3,758
Ç-13	3,948	3,948	3,948		3,948	3,948	3,948
Ç-14	3,992	3,833		3,827	3,899	3,894	3,751
Ç-15	3,548	3,672	3,607	3,619	3,481		3,548
Ç-16	3,888	3,745	3,992	3,894		3,827	3,913
Ç-17	3,843	3,993		3,948	3,863	3,863	3,948
Ç-18		3,548	3,607	3,481	3,607	3,607	3,741
Ç-19	3,997	3,899	3,997		3,997	3,959	3,997
Ç-20	3,481		3,481	3,481	3,481	3,481	3,481
Ç-21	4,000		4,000	4,000	4,019	4,038	4,000

Çizelge 6.63 HP-MODEL-2'ye göre çalışanların bir haftalık çizelgeme periyodunda maruz kalacakları günlük titreşim miktarını göstermektedir. Modelin amaç fonksiyonu değer almıştı. Ancak, modelin amaç fonksiyon değeri, HP-MODEL-1'in amaç fonksiyonu değerinden daha düşüktür.

Çalışanların MOE değerine yapılan müdahale, çalışanların işler arasında daha fazla rotasyon yapmasına ve bu rotasyonun da etkisi ile HP-MODEL-1'e nazaran daha az çalışanın titreşim limit değerinin üzerindeki seviyelerde çalıştırılmasına neden olmuştur.

Çizelge 6.64. HP-MODEL-2'ye göre çalışanların gürültü maruziyetleri (%)

	G-1	G-2	G-3	G-4	G-5	G-6	G-7
Ç-1	20,4	20,4	9,4	16,7	16,7	20,4	
Ç-2	93,9	65,7	98,8	86,5	85,3	41,2	
Ç-3	79,2	79,2	79,2		79,2	79,2	79,2
Ç-4	90,2	85,3	90,2	90,2	90,2	90,2	
Ç-5		87,8	98,8	97,5	90,2	62,0	74,3
Ç-6	97,5	90,2		90,2	90,2	97,5	90,2
Ç-7	79,2		79,2	111,0	79,2	79,2	79,2
Ç-8	97,5	97,5	97,5	97,5	65,7		97,5
Ç-9		97,5	97,5	90,2	90,2	97,5	97,5
Ç-10	20,4	20,4	20,4	20,4		20,4	20,4
Ç-11	97,5	98,8	80,4	97,5		97,5	97,5
Ç-12	16,7	16,7	20,4	20,4	20,4		16,7
Ç-13	90,2	90,2	90,2		90,2	90,2	90,2
Ç-14	98,8	81,6		97,5	62,1	78,0	73,1
Ç-15	75,5	84,0	87,7	55,9	79,2		75,5
Ç-16	93,9	89,0	98,8	78,0		97,5	90,2
Ç-17	85,3	58,3		90,2	97,5	97,5	90,2
Ç-18		75,5	87,7	79,2	87,7	87,7	64,4
Ç-19	82,9	62,1	82,9		82,9	58,4	82,9
Ç-20	79,2		79,2	79,2	79,2	79,2	79,2
Ç-21	2,00		2,00	2,00	14,20	26,50	2,00

Çizelge 6.64 çalışanların, HP-MODEL-2'ye göre çalışanların gürültü maruziyetini göstermektedir. Çizelgede %100'ün üzerinde gürültü dozajına maruz kalan sadece bir çalışan bulunmaktadır.

Çizelge 6.65. HP-MODEL-2'ye göre çalışanların sıcaklık maruziyetleri (°C)

	G-1	G-2	G-3	G-4	G-5	G-6	G-7
Ç-1	26,413	26,413	28,025	26,950	26,950	26,413	
Ç-2	28,013	27,425	26,987	27,313	27,800	26,300	
Ç-3	27,538	27,538	27,538		27,538	27,538	27,538
Ç-4	28,550	29,575	28,550	28,550	28,550	28,550	
Ç-5		27,750	26,987	27,475	26,775	27,963	27,638
Ç-6	29,250	28,550		28,550	28,550	29,250	28,550
Ç-7	27,538		27,538	29,363	27,538	27,537	27,538
Ç-8	29,250	29,250	29,250	29,250	29,200		29,250
Ç-9		29,250	29,250	28,550	28,550	29,250	29,250
Ç-10	26,413	26,413	26,413	26,413		26,413	26,413
Ç-11	27,475	26,988	27,050	27,475		27,475	27,475
Ç-12	26,950	26,950	26,413	26,413	26,413		26,950
Ç-13	28,550	28,550	28,550		28,550	28,550	28,550
Ç-14	26,987	26,562		27,475	26,187	27,100	26,350
Ç-15	28,075	30,063	29,525	27,700	27,538		28,075
Ç-16	28,013	27,263	26,987	27,100		27,475	26,775
Ç-17	29,575	28,500		28,550	29,250	29,250	28,550
Ç-18		28,075	29,525	27,538	29,525	29,525	29,688
Ç-19	26,075	26,187	26,075		26,075	26,725	26,075
Ç-20	27,538		27,538	27,538	27,538	27,538	27,538
Ç-21	29,100		29,100	29,100	28,775	28,450	29,100

Çizelge 6.65 ve Çizelge 6.66 sırası ile HP-MODEL-2'ye göre sırası ile bir haftalık çizelgeleme periyodunda çalışanların maruz kalacakları sıcaklık seviyelerini ve MOE değerini göstermektedir. Her iki çizelge birlikte değerlendirildiğinde, çalışanların çalıştıkları iş istasyonlarındaki görevlerin ağırlığına uygun sıcaklıklarda görev aldıkları görülmektedir.

Ancak, MOE değerine üst sınır koymak, çalışanların HP-MODEL-1'deki sıcaklık maruziyetlerinden daha yüksek sıcaklıklara maruz kalmalarına neden olmuştur. Ancak bu durum, çalışanların çalıştıkları iş istasyonlardaki görevlerin ağırlığına uygun olmayan sıcaklıklarda çalıştırıldığı anlamına gelmez.

Çizelge 6.66. HP-MODEL-2'ye göre çalışanların MOE değerleri (kcal/sa)

	G-1	G-2	G-3	G-4	G-5	G-6	G-7
Ç-1	286,875	286,875	213,750	262,500	262,500	286,875	
Ç-2	224,750	240,750	255,625	243,500	234,125	278,250	
Ç-3	267,500	267,500	267,500		267,500	267,500	267,500
Ç-4	197,250	166,875	197,250	197,250	197,250	197,250	
Ç-5		244,250	244,250	238,500	255,750	212,375	223,000
Ç-6	178,875	195,750		195,750	195,750	178,875	195,750
Ç-7	260,000		260,000	200,000	260,000	260,000	260,000
Ç-8	182,375	182,375	182,375	182,375	178,250		182,375
Ç-9		179,625	179,625	197,250	197,250	179,625	179,625
Ç-10	286,875	286,875	286,875	286,875		286,875	286,875
Ç-11	246,000	252,000	271,500	246,000		246,000	246,000
Ç-12	258,000	258,000	282,500	282,500	282,500		258,000
Ç-13	199,000	199,000	199,000		199,000	199,000	199,000
Ç-14	251,750	276,250		245,500	283,125	252,375	288,500
Ç-15	236,625	161,375	184,250	243,250	259,500		236,625
Ç-16	219,500	253,375	247,375	248,375		241,750	259,000
Ç-17	166,500	189,875		196,000	178,375	178,375	196,000
Ç-18		242,500	186,000	267,500	186,000	186,000	167,500
Ç-19	283,750	283,125	283,750		283,750	258,750	283,750
Ç-20	259,250		259,250	259,250	259,250	259,250	259,250
Ç-21	159,000		159,000	159,000	171,750	184,500	159,000

Çizelge 6.67, çalışanların HP-MODEL-2'ye göre bir haftalık çizelgeleme periyodunda ikinci iş istasyonuna atanma sayılarını göstermektedir. Çizelge 6.67 incelendiğinde, çalışanların hiç birinin ikinci iş istasyonu için tanıtılan hedef değerinden daha fazla bir atama değerine sahip olmadığı görülmektedir.

Çizelge 6.67. HP-MODEL-2'ye göre çalışanların 2.iş istasyonuna atanma sayıları

	G-1	G-2	G-3	G-4	G-5	G-6	G-7
Ç-1	5	5	2	4	4	5	
Ç-2	1	2	1	1	2	4	
Ç-3	5	5	5		5	5	5
Ç-5		4	1	2	2	1	1
Ç-7	5		5	3	5	5	5
Ç-10	5	5	5	5		5	5
Ç-11	2	1	4	2		2	2
Ç-12	4	4	5	5	5		4
Ç-14	1	3		2	3	2	4
Ç-15	4	1	2	4	5		4
Ç-16	1	3	1	2		2	2
Ç-18		4	2	5	2	2	1
Ç-19	2	3	2		2	2	2
Ç-20	5		5	5	5	5	5

Frazer ve diğerleri (2003)'nin de belirttiği üzere, iş rotasyon çizelgelerinin çalışanların üzerindeki belki de en kritik işlevi, çalışanların üretim ortamındaki birden fazla işi gerçekleştirmeleri ve işler karşısında uzmanlık durumlarının olumlu etkilenmeleridir. Bu bilgi göz önüne alınarak, çalışanların işler karşısındaki uzmanlık durumları parametresi model kapsamından çıkarılarak, (*HP-MODEL-3)* MOE değerine 295 üst sınırı getirilerek model yeniden çözdürülmüş ve elde edilen sonuçlar özetlenerek sunulmuştur.

Çizelge 6.68. HP-MODEL-3 ile elde edilen çizelgenin birinci günü

	1.Gün	1.Pr.	2.Pr.	3.Pr.	4.Pr.	5.Pr.	6.Pr.	7.Pr.	8.Pr.	Toplam
	İS-1							1		1
Ç-1	İS-2	1	1						1	3
	İS-3			1	1					2
	İS-4					1	1			2
	İS-1		1						1	2
Ç-2	İS-2			1	1			1		3
	İS-3					1				1
	İS-4	1					1			2
	İS-1					1	1			2
	İS-2				1					1
Ç-3	İS-3		1	1						2
	İS-4	1						1	1	3
	İS-2		1			1	1	1		4
Ç-4	İS-3	1								1
	İS-4			1	1				1	3
	İS-1							1	1	2
Ç-5	İS-3	1	1				1			3
	İS-4			1	1	1				3
	İS-1					1				1
	İS-2		1	1						2
Ç-6	İS-3								1	1
	İS-4	1			1		1	1		4
	İS-1	1					1			2
Ç-7	İS-2		1	1						2
	İS-3				1	1		1		3
	İS-4								1	1
	İS-1			1						1
Ç-8	İS-2								1	1
	İS-3	1				1	1	1		4
	İS-4		1		1					2
	İS-2			1	1		1	1		4
Ç-10	İS-3		1						1	2
	İS-4	1				1				2
	İS-1			1	1		1		1	4
Ç-11	İS-2	1				1				2
	İS-4		1					1		2
	İS-1		1	1		1	1			4
Ç-12	İS-2	1						1	1	3
	İS-3				1					1
	İS-1	1	1	1						3
Ç-13	İS-2				1	1				2
	İS-3						1		1	2
	İS-4							1		1
Ç-14	İS-1	1	1		1			1	1	5
	İS-2			1		1	1			3

Çizelge 6.68. (devam) HP-MODEL-3 ile elde edilen çizelgenin birinci günü

	İS-1	1	1		1		1			4
Ç-15	İS-2					1		1	1	3
	İS-4			1						1
	İS-1			1	1				1	3
Ç-18	İS-2	1								1
	İS-3		1			1		1		3
	İS-4						1			1
	İS-1					1		1		2
Ç-19	İS-2	1			1		1			3
	İS-4		1	1					1	3
	İS-1					1		1		2
Ç-20	İS-2		1				1			2
	İS-3	1		1	1				1	4
	İS-1	1			1					2
	İS-2								1	1
Ç-21	İS-3			1			1	1		3
	İS-4		1			1				2

Çizelge 6.68. HP-MODEL-3 ile elde edilen çizelgenin birinci gününü göstermektedir. Çizelge 6.68 ile de gösterildiği üzere çalışanların şu ana kadar önerilen tüm model alternatifleri arasında en fazla rotasyon yaptıkları model HP-MODEL-3'tür.

HP-MODEL-3'ün amaç fonksiyonu değeri 0 idi. Yani tüm ergonomik hedeflerin tam olarak sağlandığı görülmektedir. Modelin tüm ergonomik hedefleri sağlamak için çalışanları iş istasyonları arasında fazladan rotasyon yaptırdığı görülmektedir.

Aynı zamanda çalışanların iş rotasyon çizelgeleri öğrenme etkisi ile tüm işleri yapabildiği varsayıldığı için model çalışanları işlere atarken oldukça esneklik kazanmıştır. Bu çizelgeye göre çalışanların risk etmenlerine olan maruziyetleri de izleyen çizelgelerde verilmiştir.

Çizelge 6.69. HP-MODEL-3'e göre çalışanların el-kol titreşim maruziyetleri (m/s^2)

	G-1	G-2	G-3	G-4	G-5	G-6	G-7
Ç-1	3,704	3,656	3,725		3,704	3,569	3,934
Ç-2	3,725	3,895		3,678	3,693	3,761	3,863
Ç-3	3,782	3,974	3,753	3,678	3,854		3,807
Ç-4	3,548		3,753	3,761	3,745	3,940	3,725
Ç-5	3,843	3,607	3,661	3,704	3,920	3,693	
Ç-6	3,629	3,704		3,629	3,725	3,863	3,823
Ç-7	3,854	3,672	3,725		3,607	3,954	3,753
Ç-8	3,829	3,978	3,843	3,834		3,693	3,693
Ç-9		3,849	3,569	3,725	3,787	3,793	3,849
Ç-10	3,619	3,787	3,854	3,807		3,619	3,874
Ç-11	3,827	3,954	3,731	3,854	3,913	3,997	
Ç-12	3,899	3,997	3,992	3,833	3,899		3,751
Ç-13	3,874	3,725	3,678	3,978	3,773	3,773	
Ç-14	3,919	3,919	3,992	3,919		3,913	3,997
Ç-15	3,833		3,992	3,751	3,919	3,576	3,661
Ç-16		3,751	3,978	3,997	3,833	3,751	3,661
Ç-17		3,554	3,782	3,704	3,731	3,834	3,787
Ç-18	3,934	3,807	3,747	3,849	3,890		3,656
Ç-19	3,656		3,834	3,843	3,693	3,793	3,779
Ç-20	3,920	3,629		3,704	3,843	3,782	3,834
Ç-21	3,849	3,773	3,629		3,725	3,934	3,807

Çizelge 6.69, HP-MODEL-3'e göre çalışanların bir haftalık çizelgeleme periyodunda maruz kaldıkları titreşim seviyeleri gösterilmektedir. Çizelge 6.69'a göre çalışanların tamamı, titreşim maruziyeti açısından limit değerlerin altında çalışmaktadır.

Çizelge 6.70. HP-MODEL-3'e göre çalışanların gürültü maruziyetleri (%)

	G-1	G-2	G-3	G-4	G-5	G-6	G-7
Ç-1	64,5	96,3	76,7		64,5	87,8	62
Ç-2	76,7	37,5		68,1	96,3	76,7	97,5
Ç-3	88,9	46,1	32,6	68,1	53,5		85,3
Ç-4	75,5		32,6	76,7	89,0	46,1	76,7
Ç-5	85,3	87,7	80,4	64,5	33,9	96,3	
Ç-6	100	64,5		100	76,7	97,5	73,0
Ç-7	53,5	84,0	76,7		87,7	74,3	32,6
Ç-8	57,1	70,6	85,3	41,2		96,3	96,3
Ç-9		69,4	87,8	76,7	73,0	57,1	69,4
Ç-10	55,9	73	53,5	85,3		55,9	65,7
Ç-11	97,5	74,3	60,8	53,5	90,2	82,9	
Ç-12	62,1	82,9	98,8	81,6	62,1		73,1
Ç-13	65,7	76,7	68,1	70,6	44,9	44,9	
Ç-14	74,3	74,3	98,8	74,3		90,2	82,9
Ç-15	81,6		98,8	73,1	74,3	71,9	80,4
Ç-16		73,1	70,6	82,9	81,6	73,1	80,4
Ç-17		59,6	88,9	64,5	60,8	41,2	73
Ç-18	62,0	85,3	48,5	69,4	53,4		96,3
Ç-19	96,3		41,2	85,3	96,3	57,1	29
Ç-20	33,9	100		64,5	85,3	88,9	41,2
Ç-21	69,4	44,9	100		76,7	62	85,3

Çizelge 6.70 HP-MODEL-3'e göre çalışanların bir haftalık planlama periyodunda maruz kaldıkları gürültü seviyelerini göstermektedir. Çizelge 6.70'e göre çalışanların tamamının günlük gürültü maruziyetleri açısından uygun seviyelerde gürültüye maruz kaldıkları görülmektedir.

Çizelge 6.71. HP-MODEL-3'e göre çalışanların sıcaklık maruziyetleri (°C)

	G-1	G-2	G-3	G-4	G-5	G-6	G-7
Ç-1	27,913	27,963	27,588		27,913	27,750	27,963
Ç-2	27,588	28,613		29,150	29,737	29,362	29,250
Ç-3	29,037	28,825	27,862	29,150	27,750		27,800
Ç-4	28,075		27,863	29,362	27,263	27,050	27,588
Ç-5	29,575	29,525	27,050	27,913	27,375	29,737	
Ç-6	29,200	27,913		29,200	27,588	29,250	29,900
Ç-7	27,750	30,062	27,588		29,525	27,638	27,863
Ç-8	28,987	26,400	29,575	28,075		29,737	29,737
Ç-9		28,662	27,750	27,588	28,125	27,213	28,662
Ç-10	27,700	28,125	27,750	27,800		27,700	27,425
Ç-11	27,475	27,638	26,675	27,750	26,775	26,075	
Ç-12	26,187	26,075	26,987	26,562	26,187		26,350
Ç-13	27,425	27,588	29,150	26,400	27,538	27,538	
Ç-14	25,862	25,862	26,987	25,862		26,775	26,075
Ç-15	26,562		26,987	26,350	25,862	26,838	27,050
Ç-16		26,350	26,400	26,075	26,562	26,350	27,050
Ç-17		27,163	29,037	27,913	26,675	28,075	28,125
Ç-18	27,963	27,800	28,775	28,662	29,525		27,963
Ç-19	27,963		28,075	29,575	29,737	27,213	26,625
Ç-20	27,375	29,200		27,913	29,575	29,037	28,075
Ç-21	28,662	27,538	29,200		27,588	27,963	27,800

Çizelge 6.71 ve Çizelge 6.72 sırası ile HP-MODEL-3'e göre sırası ile günlük olarak katlanacağı sıcaklık ve MOE değerlerini göstermektedir. Bu iki çizelge eş zamanlı değerlendirildiğinde çalışanların tamamının çalıştıkları işlerin ağırlığına uygun sıcaklıklarda çalıştıkları ve 295 değerinin üzerinde herhangi bir MOE maruziyeti olmadığı görülmektedir.

Çizelge 6.72. HP-MODEL-3'e göre çalışanların MOE değerleri (kcal/sa)

	G-1	G-2	G-3	G-4	G-5	G-6	G-7
Ç-1	236,250	241,250	248,125		236,250	253,750	218,125
Ç-2	243,500	195,000		191,125	175,125	181,750	184,500
Ç-3	194,500	185,500	234,500	195,500	233,500		237,500
Ç-4	237,875		226,875	178,625	256,500	245,500	244,500
Ç-5	166,375	182,750	261,500	228,750	230,500	171,250	
Ç-6	196,000	231,375		196,000	241,625	178,875	158,375
Ç-7	225,125	160,625	241,375		183,750	222,750	227,500
Ç-8	189,750	271,750	171,125	219,625		175,500	175,500
Ç-9		198,500	252,125	246,000	222,250	252,375	198,500
Ç-10	248,250	223,000	230,125	234,750		248,250	241,875
Ç-11	246,000	227,500	278,000	228,000	264,750	283,500	
Ç-12	285,000	286,250	255,375	278,625	285,000		290,250
Ç-13	243,750	250,125	193,250	275,250	244,125	244,125	
Ç-14	294,750	294,750	251,750	294,750		264,000	282,500
Ç-15	269,500		245,000	281,750	286,750	276,750	264,500
Ç-16		282,250	265,625	276,250	270,625	282,250	265,000
Ç-17		267,250	190,250	231,625	273,000	213,625	219,750
Ç-18	215,750	234,250	199,000	197,500	160,750		241,000
Ç-19	237,500		214,375	164,375	169,375	251,250	270,000
Ç-20	231,000	193,625		230,000	164,375	188,500	212,000
Ç-21	194,750	235,625	192,250		241,750	214,125	231,000

Çizelge 6.73 HP-MODEL-3 ile elde edilen çizelgeye göre bir haftalık planlama periyodunda çalışanların ikinci iş istasyonuna atanma sayılarını göstermektedir. HP-MODEL-3 kapsamında çalışanların uzmanlık durumları dikkate alınmadığı için, önceki modellerin aksine, çalışanların tamamı planlama periyodunun farklı günlerinde ikinci makinede görevlendirilmiştir.

Çizelge 6.73. HP-MODEL-3'e göre çalışanların 2.iş istasyonuna atanma sayıları

	G-1	G-2	G-3	G-4	G-5	G-6	G-7
Ç-1	3	3	3		3	4	1
Ç-2	3	1		2	1	1	
Ç-3	1		3	2	2		2
Ç-4	4		3	1	3	2	3
Ç-5		2	4	3	2	1	
Ç-6	2	3		2	3		
Ç-7	2	1	3		2	1	3
Ç-8	1	2		2		1	1
Ç-9		1	4	3	2	3	1
Ç-10	4	2	2	2		4	2
Ç-11	2	1	4	2	2	2	
Ç-12	3	2	1	3	3		4
Ç-13	2	3	2	2	3	3	
Ç-14	3	3	1	3		2	2
Ç-15	3		1	4	3	5	4
Ç-16		4	2	2	3	4	4
Ç-17		5	1	3	4	2	2
Ç-18	1	2	2	1			3
Ç-19	3		2		1	3	4
Ç-20	2	2		3		1	2
Ç-21	1	3	2		3	1	2

Geliştirilen modellere ek olarak, aynı zamana tez çalışmasında bazı işletmeler özelinde çalışanlar için standart bir izin uygulaması yürütülebileceği durumuna istinaden 6 günlük çizelgeleme yapan bir model önerisi de yapılmıştır. Özel sektör için bu durum genellikle, Pazar günü tüm çalışanların izinli olması şeklindedir. Pazar günü tüm çalışanlara izin verilerek, işletmenin faaliyetlerine pazartesi günü devam etmesi yönünde bir uygulama yapılır. Ancak bazı ekonomik ve ürün üretiminin gerektirdiği gerekçeler nedeni ile bazı üretim işletmelerinin kesintisiz olarak haftanın 7 günü çalışması gerekebilir. Böyle bir durumda tüm çalışanların aynı gün izine çıkarılması mümkün değildir. Bu durumu kapsayan bir model alternatifinin çözümü de, yine çok amaçlı modellerin atama maliyeti ve amaç fonksiyonu açısından karşılaştırıldığı çizelgede verilmiştir.

Şu ana kadar önerilen tüm modeller, karşılaştırmaları sağlıklı bir zeminde yapabilmek için aynı veri seti ile çalıştırılmıştır. 6 günlük modelde, diğer modellerden farklı olarak, çalışan sayısı, iş istasyonlarının toplam çalışan ihtiyacı ile aynı olacak şekilde düzenlenmiştir. Bu düzenlemenin yapılması zorunludur. Çünkü izin günü parametresi ortadan kalktığı için, iş istasyonlarının ihtiyacından fazla çalışanın tanımlanmasına gerek yoktur. 6 günü çizelgeleyen modelde bir diğer husus ise yine çalışanların yetenek seviyesinin dikkate alınmadığıdır. Bu modele ilişkin elde edilen çizelgenin birinci günü ve ergonomik risk parametrelerine olan maruziyetler izleyen tablolar ile ifade edilmiştir. 6 günlük atama yapan model HP-MODEL-4 olarak anılmıştır.

Çizelge 6.74. HP-MODEL-4 ile elde edilen çizelgenin birinci günü

	1.Gün	1.Pr.	2.Pr.	3.Pr.	4.Pr.	5.Pr.	6.Pr.	7.Pr.	8.Pr.	Toplam
	İS-1	1	1		1		1			4
Ç-1	İS-2			1						1
	İS-3							1		1
	İS-4					1			1	2
	İS-1		1			1	1			3
Ç-2	İS-3			1					1	2
	İS-4	1			1			1		3
	İS-1		1					1	1	3
	İS-2	1				1				2
Ç-3	İS-3				1					1
	İS-4			1			1			2
	İS-1	1		1	1		1			4
Ç-4	İS-2							1		1
	İS-3		1						1	2
	İS-4					1				1
	İS-1			1						1
Ç-5	İS-2		1				1	1		3
	İS-3	1				1				2
	İS-4				1				1	2
	İS-1							1		1
Ç-6	İS-2		1							1
	İS-3			1	1					2
	İS-4	1				1	1		1	4
	İS-1	1				1				2
Ç-7	İS-2		1		1		1			3
	İS-4			1				1	1	3
	İS-1						1			1
Ç-8	İS-2		1		1					2
	İS-3					1				1
	İS-4	1		1				1	1	4
Ç-9	İS-1				1			1	1	3
	İS-3	1	1							2
	İS-4			1		1	1			3
	İS-1					1				1
Ç-10	İS-2							1		1
	İS-3				1				1	2
	İS-4	1	1	1			1			4

Çizelge 6.74.(devam) HP-MODEL-4'e ile elde edilen çizelgenin birinci günü

Ç-11	İS-1						1				1
	İS-2	1		1		1		1	1		5
	İS-4		1		1						2
	İS-1		1								1
Ç-12	İS-2				1		1	1	1		4
	İS-3	1		1		1					3
	İS-1			1							1
Ç-13	İS-2					1				1	2
	İS-3		1								1
	İS-4	1			1		1	1			4
	İS-2	1		1		1	1		1		5
Ç-14	İS-3							1			1
	İS-4		1		1						2
	İS-1									1	1
	İS-2	1			1	1					3
Ç-15	İS-3			1				1			2
	İS-4		1				1				2
	İS-1					1					1
Ç-16	İS-2		1				1				2
	İS-3	1		1	1			1			4
	İS-4									1	1
	İS-1		1		1			1			3
Ç-17	İS-2			1						1	2
	İS-3	1				1	1				3
	İS-1	1		1	1					1	4
Ç-18	İS-3					1	1				2
	İS-4		1					1			2
	İS-2				1						1
Ç-19	İS-3		1				1	1	1		4
	İS-4	1		1		1					3
	İS-1	1		1				1			3
Ç-20	İS-3				1		1		1		3
	İS-4		1			1					2
	İS-1					1			1		2
	İS-2	1		1							2
Ç-21	İS-3		1				1				2
	İS-4				1			1			2

Çizelge 6.74 altı günlük atama yapan, yani çizelgeleme periyodunu altı gün olarak alan model ile elde edilen çizelgenin birinci gününü göstermektedir. Bu modelde diğer modeller gibi çalışanları bütüncül korumak için çalışanların işler arasındaki rotasyonu mantığına sıkça başvurmuştur.

Altı günlük atama yapan modelin sonuçlarına göre, tüm ergonomik hedefler karşılanmıştır. Tüm çalışanlar ergonomik açıdan korunmuştur. Ergonomik maruziyetlerin gösterildiği tabloların hiçbirinde yasal/ergonomik limit değerlerinin aşılması gibi bir durum söz konusu değildir.

Çizelge 6.75. HP-MODEL-4'e göre çalışanların el-kol titreşim maruziyetleri (m/s^2)

	G-1	G-2	G-3	G-4	G-5	G-6
Ç-1	3,888	3,725	3,863	3,656	3,813	3,807
Ç-2	3,863	3,954	3,787	3,929	3,888	3,787
Ç-3	3,807	3,782	3,629	3,782	3,704	3,993
Ç-4	3,954	3,863	3,863	3,954	3,782	3,909
Ç-5	3,704	3,782	3,929	3,843	3,888	3,725
Ç-6	3,693	3,934	3,888	3,787	3,693	3,849
Ç-7	3,656	3,863	3,948	3,863	3,807	3,704
Ç-8	3,629	3,782	3,843	3,629	3,843	3,854
Ç-9	3,863	3,787	3,678	3,973	3,934	3,888
Ç-10	3,693	3,761	3,973	3,934	3,629	3,787
Ç-11	3,576	3,656	3,646	3,554	3,554	3,863
Ç-12	3,779	3,619	3,625	3,695	3,690	3,646
Ç-13	3,629	3,843	3,756	3,693	3,863	3,863
Ç-14	3,554	3,695	3,619	3,625	3,625	3,656
Ç-15	3,704	3,554	3,695	3,710	3,834	3,548
Ç-16	3,834	3,773	3,690	3,548	3,569	3,693
Ç-17	3,940	3,954	3,888	3,693	3,849	3,782
Ç-18	3,948	3,807	3,656	3,704	3,782	3,787
Ç-19	3,741	3,807	3,782	3,843	3,863	3,704
Ç-20	3,929	3,607	3,787	3,863	3,725	3,629
Ç-21	3,787	3,629	3,629	3,888	3,843	3,704

Çizelge 6.75, HP-MODEL-4 ile elde edilen çizelgeye göre çalışanların maruz kaldıkları günlük titreşim seviyelerini göstermektedir. Çizelge 6.75'e göre hiçbir çalışanın günlük el-kol titreşim maruziyet değeri limit değerin üzerinde değildir.

Çizelge 6.76. HP-MODEL-4'e göre çalışanların gürültü maruziyetleri (%)

	G-1	G-2	G-3	G-4	G-5	G-6
Ç-1	93,90	76,70	97,50	96,30	69,40	85,30
Ç-2	97,50	74,30	73,00	77,90	93,90	73,00
Ç-3	85,30	88,90	100,00	88,90	64,50	58,30
Ç-4	74,30	97,50	97,50	74,30	88,90	65,70
Ç-5	64,50	88,90	77,90	85,30	93,90	76,70
Ç-6	96,30	62,00	93,90	73,00	96,30	69,40
Ç-7	96,30	97,50	90,20	97,50	85,30	64,50
Ç-8	100,00	88,90	85,30	100,00	85,30	53,50
Ç-9	97,50	73,00	68,10	86,50	62,00	93,90
Ç-10	96,30	76,70	86,50	62,00	100,00	73,00
Ç-11	71,90	96,30	52,30	59,60	59,60	97,50
Ç-12	29,00	55,90	40,00	20,40	36,30	52,30
Ç-13	100,00	85,30	92,60	96,30	97,50	97,50
Ç-14	59,60	20,40	55,90	40,00	40,00	96,30
Ç-15	64,50	59,60	20,40	48,60	41,20	75,50
Ç-16	41,20	44,90	36,30	75,50	87,80	96,30
Ç-17	46,10	74,30	93,90	96,30	69,40	88,90
Ç-18	90,20	85,30	96,30	64,50	88,90	73,00
Ç-19	64,40	85,30	88,90	85,30	97,50	64,50
Ç-20	77,90	87,70	73,00	97,50	76,70	100,00
Ç-21	73,00	100,00	100,00	93,90	85,30	64,50

Çizelge 6.76, HP-MODEL-4'e göre planlama periyodundaki günlük gürültü dozajı bilgisini vermektedir. Çizelge 6.76 incelendiğinde çalışanların hiçbirinin günlük gürültü dozaj seviyesi %100'ün üzerinde değildir. Yani çalışanların tamamı, tüm planlama periyodu boyunca gürültüye maruz kalma riskinden korunmuşlardır.

Çizelge 6.77. HP-MODEL-4'e göre çalışanların sıcaklık maruziyetleri (^{o}C)

	G-1	G-2	G-3	G-4	G-5	G-6
Ç-1	28,012	27,587	29,250	27,962	26,887	27,800
Ç-2	29,250	27,637	28,125	28,875	28,012	28,125
Ç-3	27,800	29,037	29,200	29,037	27,912	28,500
Ç-4	27,637	29,250	29,250	27,637	29,037	29,200
Ç-5	27,912	29,037	28,875	29,575	28,012	27,587
Ç-6	29,737	27,962	28,012	28,125	29,737	28,662
Ç-7	27,962	29,250	28,550	29,250	27,800	27,912
Ç-8	29,200	29,037	29,575	29,200	29,575	27,750
Ç-9	29,250	28,125	29,150	27,312	27,962	28,012
Ç-10	29,737	29,362	27,312	27,962	29,200	28,125
Ç-11	26,837	27,962	26,462	27,162	27,162	29,250
Ç-12	26,625	27,700	26,787	26,412	27,325	26,462
Ç-13	29,200	29,575	30,275	29,737	29,250	29,250
Ç-14	27,162	26,412	27,700	26,787	26,787	27,962
Ç-15	27,912	27,162	26,412	27,000	28,075	28,075
Ç-16	28,075	27,537	27,325	28,075	27,750	29,737
Ç-17	27,050	27,637	28,012	29,737	28,662	29,037
Ç-18	28,550	27,800	27,962	27,912	29,037	28,125
Ç-19	29,687	27,800	29,037	29,575	29,250	27,912
Ç-20	28,875	29,525	28,125	29,250	27,587	29,200
Ç-21	28,125	29,200	29,200	28,012	29,575	27,912

Çizelge 6.77, HP-MODEL-4'e ile elde edilen çizelgeye göre çalışanların maruz kalacakları ortalama sıcaklık değerlerini göstermektedir.

Çizelge 6.78. HP-MODEL-4'e göre çalışanların MOE değerleri (kcal/sa)

	G-1	G-2	G-3	G-4	G-5	G-6
Ç-1	223,125	248,125	180,000	241,250	266,875	235,625
Ç-2	184,500	231,375	222,000	191,125	224,750	222,000
Ç-3	237,500	194,500	199,500	194,500	238,500	197,000
Ç-4	227,375	178,875	178,875	227,375	190,625	173,250
Ç-5	228,750	188,500	183,625	166,375	216,375	239,375
Ç-6	173,875	214,250	217,875	219,500	173,875	197,375
Ç-7	234,500	175,500	192,750	175,500	228,625	231,000
Ç-8	198,250	193,875	171,125	198,250	171,125	230,875
Ç-9	179,625	222,250	193,375	238,625	216,125	221,000
Ç-10	172,625	179,750	241,000	217,500	197,000	223,000
Ç-11	284,250	240,000	290,750	272,000	272,000	177,250
Ç-12	270,875	245,250	276,125	282,500	251,625	289,000
Ç-13	199,250	167,500	148,500	173,875	180,000	180,000
Ç-14	270,625	284,375	246,750	277,500	277,500	239,250
Ç-15	231,000	266,125	279,375	260,500	214,750	236,625
Ç-16	216,500	238,750	250,375	237,125	247,750	174,375
Ç-17	243,125	225,500	219,750	172,625	196,000	190,250
Ç-18	196,000	234,250	241,000	235,750	191,000	222,500
Ç-19	163,750	232,500	188,750	164,375	176,875	231,875
Ç-20	183,375	180,750	218,750	177,250	242,875	193,625
Ç-21	218,250	192,250	192,250	220,250	164,625	229,000

Çizelge 6.78 ise, HP-MODEL-4'e ile elde edilen çizelgeye göre çalışanların maruz kalacakları MOE değerlerini göstermektedir. Çizelge 6.77 ve Çizelge 6.78 birlikte değerlendirildiğinde, çalışanların tamamının çalıştıkları işlerin ağırlığına uygun sıcaklıklarda görevlendirildikleri görülmektedir.

Çizelge 6.79. HP-MODEL-4'e göre çalşanların 2. iş istasyonuna atanma sayıları

	G-1	G-2	G-3	G-4	G-5	6.00
Ç-1	1	3		3	3	2
Ç-2		1	2		1	2
Ç-3	2	1	2	1	3	
Ç-4	1			1	1	
Ç-5	3	1			1	3
Ç-6	1	1	1	2	1	1
Ç-7	3				2	3
Ç-8	2	1		2		2
Ç-9		2	2	1	1	1
Ç-10	1	1	1	1	2	2
Ç-11	5	3	5	5	5	
Ç-12	4	4	5	5	4	5
Ç-13	2			1		
Ç-14	5	5	4	5	5	3
Ç-15	3	5	5	4	2	4
Ç-16	2	3	4	4	4	1
Ç-17	2	1	1	1	1	1
Ç-18		2	3	3	1	2
Ç-19	1	2	1			3
Ç-20		2	2		3	2
Ç-21	2	2	2	1		3

Çizelge 6.79, HP-MODEL-4'e göre çalışanların planlama periyodu boyunca ikinci iş istasyonuna atanma sayılarını göstermektedir. Çizelge 6.79 incelendiğinde çalışanların tamamı için ikinci iş istasyonuna atanma sayısı için verilen limit değerinin altında atamalar yapıldığı görülmektedir.

Çizelge 6.80 ile geliştirilen çok amaçlı bütünleşik modellerin, amaç fonksiyonu değerleri ve toplam atama maliyetleri verilmiştir. Bu çizelge verilerek, çizelgeler arasındaki farklılıklar ve bu farklılıkların atama maliyeti açısından verdiği tepki ile modelde yapılan değişikliklerin ergonomik risk parametrelerine olan maruziyetler üzerinde oluşturduğu tepkinin ölçülmesi ve izlenmesi amaçlanmıştır.

Çizelge 6.80. Çok amaçlı modellerin karşılaştırması

Model	Amaç fonksiyonu değeri	Toplam atama maliyeti
HP-MODEL-1	0,0455	13845
HP-MODEL-2	0,0406	13770
HP-MODEL-3	0,00	13620
HP-MODEL-4	0,00	13690

Tez çalışmasının, tek amaçlı modellerin çözümünden, çok amaçlı modellerin çözümüne kadar, tüm model sonuçlarında net bir şekilde gösterilmek istenen durum, bir üretim ortamında tüm ergonomik riskler bir arada bulunuyorsa ve model verilerinde özellikle seçildiği gibi, iş istasyonlarının birisinde bir ergonomik değer iyi, bir diğer ergonomik değer çok kötü ise, çalışanları tüm ergonomik risklerden koruyabilmek için işletme amaçları arasından bazı özelliklerden vazgeçilmesinin gerekli olabileceğidir.

Çizelge 6.80 ile bu durum net bir biçimde gösterilmektedir. Tüm parametrelerin etkin olduğu, izin günü istekleri ve yetenek seviyelerinin dikkate alındığı *HP-MODEL-1*'de hem tüm ergonomik istekler karşılanamamış (çalışanlardan bazıları bazı günler titreşim ve gürültü açısından limit değerlerin üstünde titreşime ve gürültüye maruz kalmış), hem de atama maliyetleri diğer tüm modellerden daha yüksek olarak belirlenmiştir. Aynı zamanda MOE değerlerinden birinin 300'den fazla olması da dikkat çekicidir.

Diğer taraftan; *HP-MODEL-2* ile, *HP-MODEL-1*'de serbest bırakılan MOE değerine üst sınır getirilerek yeniden çözüm elde edilmiştir. Modelin MOE sınırına koyulan üst sınırı sağlamak için çalışanları işler arasında daha fazla rotasyona tabi tutması, hem MOE üst sınırının sağlanmasına hem de *HP-MODEL-1'e* göre daha az sayıda gün ve çalışanda limit değerler üzerinde titreşim maruziyetine rastlanmasına neden olmuştur. Ancak modelin bu hali de yine tüm çalışanları tüm açılardan koruyacak yetkinlikte değildir.

Bir sonraki adımda, iş rotasyonun çalışanlar üzerindeki olumlu etkileri de göz önünde bulundurulmuş ve çalışanların yetenek seviyesi parametresi model kapsamından çıkarılarak ve MOE üst sınırlaması ve izin günü istekleri de yine dâhil edilerek, yeniden

çözdürülmüştür. Bu deneme *HP-MODEL-3* olarak anılmıştır. Bu model ile hem çalışanlar tüm ergonomik risklerden eş zamanlı korunabilmiş hem de ilk üç model içinde en düşük atama maliyeti elde edilmiştir. *HP-MODEL-3* çalışanları ve işletmeyi bütüncül olarak koruyan model alternatifi olarak belirlenmiştir.

Çalışanları ve işletmeyi bütüncül korumanın HP modellerinin kullanımının dışındaki bir diğer yolu ise, atama maliyetini en küçüklemeyi amaçlayan, tüm fiziksel ergonomik risk faktörlerinin kısıtlarda yer aldığı tek amaçlı bütünleşik matematiksel modelin kullanılmasıdır. Ancak, atama maliyetini en küçüklemeye çalışarak, izin günü istekleri, çalışanların yetenek seviyesi gibi kısıtlar ve tüm risk parametrelerinin özellikle termal konfor ve titreşim gibi modeli lineerlikten çıkaran yapıların sıkı kısıtlar altına ifade edilmesi tek amaçlı bütünleşik modelleri çözümsüzlüğe, ya da makul zamanda uygun bir çözüm bulamama gibi durumlara sevk edebilir.

Zira aynı veriler kullanılarak tek amaçlı bütünleşik modelde 15000 sn'ye de MOE sınırı ve çalışanların yetenek seviyelerine ilişkin parametreler dikkate alınmadan optimum sonuca %2 yaklaşabilen, MOE sınırı var ve çalışanların yetenek seviyelerinin dikkate alınmadığı modelde, 15000 sn'ye de optimum değere %1.5 yaklaşabilen sonuçlar elde edilmiştir. Ancak modelin HP hali, yaklaşık 3800 sn'ye de en uygun çözümü vermektedir. Bu nedenle, HP modellerinin kullanımı daha pratik bir seçenek olarak belirlenmiştir.

İlk iki modelde atama maliyetlerinin, üçüncü modele göre daha yüksek çıkması, çalışanların uzmanlık seviyelerinin üçüncü modelde devre dışı bırakılması durumu ile açıklanabilir. Çünkü bu parametre eğer çalışan görevde uzman değilse kesinlikle atama yapmayarak, modeli kısıtlı çözüm alanına sürükleyen bir parametredir. Bu parametrenin devre dışı bırakılması modele esneklik sağlayarak, hem bütüncül koruma sağlanmasını hem de en düşük atama maliyetinin bulunmasına olanak tanımıştır.

Elbette ki tek ergonomik risk parametresini dikkate alan modeller ile çalışanları bütüncül koruyan modellerdeki atama maliyetleri karşılaştırıldığında, bütüncül korumayı amaçlayan modellerin atama maliyetleri diğer çizelgelere göre daha yüksek olarak tespit edilmesi de beklenen bir sonuçtur. Bu beklenti tez çalışması boyunca sonuçları paylaşılan modeller ile de destek bularak, gerçeğe dönüşmüştür.

Tez çalışmasında ergonomik ve ekonomik amaçlar arasında olduğu kadar, iki ergonomik amaç arasında da bir ödünleşme olabileceği savı üzerinde durulmuştur. Özellikle, termal konfora ait iki parametre arasında bu ödünleşmenin olduğu, bu parametrelerin geçtiği tüm model örneklerinde kendini göstermiştir.

6.3.3. Önerilen modellerin çözüm performansları

Geliştirilen tüm modeller GAMS 24.9.2 paket programı ve i-5 6500 CPU, 64 bit, 2.50 Ghz özelliklerine sahip bir bilgisayar kullanılarak çözdürülmüştür. Modellerin denenmesi için 3 farklı boyutta problem tanımlaması yapılmıştır. 15 çalışana kadar ve 0-3 iş istasyonlu veri setleri küçük boyutlu problemler, 15 ile 45 çalışan arasında çalışana sahip ve 0-5 iş istasyonlu veri setleri orta boyutlu problemler, 45 ve üzerinde çalışana sahip 0-7 iş istasyonlu veri setleri ise büyük boyutlu problemler olarak anılmıştır.

Büyük boyutlu problemlerde çözüm zamanı açısından etkin olan modellerin, küçük ve orta büyüklükteki problemlerde de etkin olacağı varsayılarak, büyük boyutlu problem denemelerinde etkin çözüm veren modellere ilişkin küçük ve orta boyutlu problem denemeleri yapılmamıştır. Ergonomi kısıtlı iş değişim çizelgelerinin Carnahan ve diğerleri (2000) tarafından NP-Zor problemler sınıfında olduğu ispatlanmıştır.

Carnahan ve diğerleri (2000) önerdiği basit modele özellikle titreşim parametresi gibi modele nonlineerlik katan, ya da termal konfor parametresi gibi parçalı fonksiyon özelliğinde kısıtların eklenmesi, modelin karmaşıklığını ve çözüm süresini doğrudan artıracak etki yapacaktır. Bu nedenle büyük boyutlu olarak anılan ve 50 çalışandan sonrası için bütünleşik modellerin çözüm performansları veri setine de bağlı olarak istenilen düzeyde olmayabilir. Ancak küçük ve orta büyüklükteki veri setlerinde bütünleşik modellerde dâhil olmak üzere önerilen modellerin makul zamanlarda çözümler verdiği görülmektedir.

GAMS paket programı, aksi belirtilmedikçe belli bir sürede %5'in altında bir GAP'a sahip çözüm bulduğunda çalışmayı durdurur ve bulduğu sonucu raporlar. Optimal sonucun belirlenmesi için "option optcr =0;" komutu kullanılarak, %0 GAP'e sahip sonuçlara ulaşılması hedeflenmiştir. Aynı zamanda uzun çözümlerde zaman sınırına yakalanmamak için " Modeladı.reslim= BelirlenenSüre;" şeklinde kısıtlama komutu da getirilmiştir.

Tek amaçlı modeller için

Temel atama modeli ve aydınlatma kısıtlı modellerde yapılan küçük, orta ve büyük boyutlu problem denemelerinin tamamında 100 saniyenin altında optimum çözümler elde edilmiştir. Bu iki model seti için çözümlere ulaşmada çözüm zamanı açısından herhangi bir problem yaşanmamaktadır. Temel atama modeli ve aydınlatma kısıtlı modellerin çözüm performansına örnek olması açısından Çizelge 6.81 verilmiştir.

Karar değişkenleri için tüm modellerde ($x_{ijkl,}$ *ve* D_off_{ik}) iki ana karar değişkenin toplam sayısını ifade etmektedir(Örneğin 70 çalışan 4 iş istasyonlu problem verisinde, 7 gün ve 8 periyot olduğu için, x_{ijkl}*'lerin sayısı 70**4*7*8=15680 *ve,* D_off_{ik} 'ların sayısı da 70*7=490, toplam karar değişkeni sayısı 16170 olarak belirlenmiştir.). Gürültü, aydınlatma, termal konfor ve titreşim parametrelerine ait, model içinde hesaplatılan değişkenler modellerin karar değişkeni sayılarının hesaplanması sırasında kapsam dışında tutulmuştur. Ana karar değişkenlerinin, modellerin çözüm sürelerine olan etkisi gösterilmek istendiği için böyle bir yaklaşım esas alınmıştır.

Çizelge 6.81. Temel atama ve aydınlatma kısıtlı modellerin çözüm performansları

Temel atama modellerin çözüm performansına ilişkin göstergeler			
Problem Kategorisi	Karar Değişkeni Sayısı	Çözüm Zamanı(sn.)	Optimalite-GAP
Büyük boyutlu 70 çalışan*4 iş istasyonu	16170	1,91	Optimal
Büyük boyutlu 77 çalışan*4 iş istasyonu	17787	2,22	Optimal
Aydınlatma kısıtlı modelin çözüm performansları			
Problem Kategorisi	Karar Değişkeni Sayısı	Çözüm Zamanı(sn.)	Optimalite-GAP
Büyük boyutlu 70 çalışan*4 iş istasyonu	16170	11,50	Optimal
Büyük boyutlu 77 çalışan*4 iş istasyonu	17787	16,34	Optimal

Çizelge 6.81'e göre temel atama ve aydınlatma kısıtlı modellerin çözüm performansları tatmin edici düzeydedir. Her iki model de büyük boyutlu problem tiplerinde zamansal açıdan uygun çözüm performansı gösterdiği için, küçük ve orta büyüklükteki problemlerde denemeler yapılmamıştır.

Çizelge 6.82. Termal konfor parametreli modellerin çözüm performansı

Termal konfor parametreli modelin çözüm performansı			
Problem Kategorisi	Karar Değişkeni Sayısı	Çözüm Zamanı(sn.)	Optimalite-GAP
Orta Boyutlu 42 çalışan*4 iş istasyonu	9702	36,58	Optimal
Büyük boyutlu 63 çalışan*4 iş istasyonu	14553	59,48	Optimal
Büyük boyutlu 105 çalışan*4 istasyonu	24255	86,30	Optimal
MOE<285 sınırlı termal konfor modelinin çözüm performansı			
Problem Kategorisi	Karar Değişkeni Sayısı	Çözüm Zamanı(sn.)	Optimalite-GAP
Orta Boyutlu 42 çalışan*4 iş istasyonu	9702	74,42	Optimal
Büyük boyutlu 63 çalışan*4 iş istasyonu	14553	5000	%0.26
Büyük boyutlu 105 çalışan*4 istasyonu	24255	5000	%0.32

Çizelge 6.82, termal konfor parametreli modellerin çözüm performansına ilişkin göstergeleri sunmaktadır. Termal konfor parametreli model için de yine büyük boyutlu problemler üzerinden denemeler yapılmıştır. Problem boyutu arttıkça, çözüm zamanının dramatik olarak arttığı görülmektedir. Çizelge 6.82'in ikinci basamağında ise MOE değerine sınır koyulan termal konfor modelinin çözüm performansı gösterilmektedir. Termal konfor parametreli ve MOE değerine üst sınır koyulan modellerde çözüm zamanı artış göstermiştir. Yine büyük boyutlu modellerde çözüm yapılmış ve optimum çözüme ilk 600 sn'de ulaşılamadığı gözlenmiştir. Çözüm için programa tanınan süre 5000 sn. olarak belirlenmiştir. Modelin optimum çözüme ulaşabildiğinin de gösterilmesi için orta büyüklükteki problemlere ait bir veri setinin çözüm performansı da verilmiştir.

Çizelge 6.83. Gürültü kısıtlı modelin çözüm performansı

Problem Kategorisi	Karar Değişkeni Sayısı	Çözüm Zaman(sn.)	Optimalite-GAP
Büyük boyutlu 63çalışan*4 iş istasyonu	14553	52,78	Optimal
Büyük boyutlu 77 çalışan*4 iş istasyonu	17787	68,15	Optimal
Büyük boyutlu 105çalışan*4 iş istasyonu	24255	5000	%0,06

Çizelge 6.83, gürültü kısıtlı modelin çözüm performansına ait örnekleri göstermektedir. Büyük boyutlu problem tipleri arasından seçilen 3 örneğin ikisinde 100 saniyenin altında optimal çözüme ulaşılmıştır. Ancak modelin 24255 karar değişkenine sahip örnekte ilk 600 saniyede optimal çözüme ulaşamadığı hatta 5000 sn süresince çözdürüldüğü versiyonda da en iyi çözümden %0,06 farkla çözüm verdiği görülmektedir.

Çizelge 6.84. Titreşim kısıtlı modelin çözüm performansı

Problem Kategorisi	Karar Değişkeni Sayısı	Çözüm Zamanı(sn.)	Optimalite-GAP
Orta Boyutlu 28 çalışan*3 iş istasyon	4900	224,83	Optimal
Orta boyutlu 35 çalışan*4 iş istasyonu	8085	820,09	Optimal
Büyük boyutlu 63 çalışan*4 iş istasyonu	14553	10000	%0,03
Büyük boyutlu 77 çalışan*4 iş istasyon	17787	10000	%0,06

Çizelge 6.84 titreşim kısıtlı modelin çözüm performansına ilişkin bilgileri göstermektedir. Küçük ve orta büyüklükteki problem tiplerinde optimal çözüme ulaşma süreleri, şu ana kadar verilen çözüm zamanlarına göre daha yüksektir. Bu durumun sebebi, titreşim kısıtlı modellerde, karar değişkenin kök içinde yer aldığı eşitliklerin bulunması durumu ile açıklanabilir. Büyük boyutlu problemlerde ise bu etki kendisini daha şiddetli göstermiş, ve optimal çözüme ulaşılamamıştır. Çözüm zamanı 10000 sn ile kısıtlandırılan büyük boyutlu problem tiplerinde %1'in altında GAP'e sahip çözümler bulunmuştur. Ancak %5 değerinin altında olduğu için bu çözümler de kabul edilebilir çözümlerdir.

Çizelge 6.85 çok amaçlı bütünleşik modelin ((HP-MODEL-3) çözüm performansına ilişkin göstergeleri vermektedir. Küçük ve orta boyutlu tüm problem tiplerinde optimal çözüme makul zamanlarda ulaşılabilmiş ancak, büyük boyutlu problem setlerinde ilk 15000 sn'de olurlu/mümkün çözüme ulaşılamamıştır.

Çizelge 6.85. Çok amaçlı modelin çözüm performansı

Problem Kategorisi	Karar Değişkeni Sayısı	Çözüm Zamanı (sn.)	Optimalite- GAP
Küçük boyutlu 7 çalışan*3 iş istasyonu	1225	596,38	Optimal
Küçük boyutlu 7 çalışan*4 iş istasyonu	1617	622,66	Optimal
Orta boyutlu 21 çalışan*4 iş istasyonu	4851	3940,4	Optimal
Orta boyutlu 28 çalışan*3 iş istasyonu	4900	8165,06	Optimal
Orta boyutlu 35 çalışan*4 iş istasyonu	8085	9345,20	Optimal
Büyük boyutlu 63 çalışan*4 iş istasyonu	14553	15000	Olurlu çözüme ulaşılamadı
Büyük boyutlu 77 çalışan*4 iş istasyonu	17787	15000	Olurlu çözüme ulaşılamadı

Birçok işletme için fiziksel ergonomik risk parametrelerinden bir ya da iki tanesi diğerlerinden çok daha baskın olarak yer almaktadır. Ancak tez çalışması kapsamında sunulan örnek veri setinde tüm ergonomik risk parametrelerinin etkin olduğu varsayılmıştır. Bu durum modellerin karmaşıklığını artırarak çözüm sürelerinin uzamasına neden olsa bile, az sayıda bulunan tüm ergonomik risklerin etkin olduğu işletmelerdeki çalışanların sağlığının korunabilmesi açısından bu süre kabul edilebilir bir süredir. Zira özellikle KOBİ tipindeki işletmelerde çizelgeleme yaklaşımlarının bir çalışan vasıtası ile elle ve birçok faktöre dikkat etmeden düzenlendiği bilgisi dikkate alınınca, 3 saatlik (10800 sn.) bir çözümün bile zaman ve ekonomi açısından işletmeye sayılamayacak kadar çok kadar çok fayda sağlayacağı söylenebilir. Dahası, sadece tek risk faktörünün etkin olduğu durumlar için önerilen modellerin optimum çözüme ulaşma zamanları oldukça başarılı olup, çok büyük boyutlu işletmelerde bile rahatlıkla kullanılabilecek yapıda olduğu görülmektedir.

7. SONUÇ ve ÖNERİLER

Ürün ya da hizmet üreten tüm işletmelerde, işletmenin büyük ya da küçük olması durumundan bağımsız olarak çalışanların maruz kaldıkları bir takım fiziksel ergonomik risk etmenleri bulunmaktadır. Ergonomik anlamda, bu faktörlere yaklaşımdaki ilk adım, aslında fiziksel risk faktörlerinin tamamen ortadan kaldırılmasıdır. Ancak çoğu zaman üretim ortamlarının doğal özellikleri, kalite gerekçeleri veya ekonomik sebeplerle bu durum sağlanamaz. Fakat işverenlerin çalışanların işyerindeki sağlığını korumaya ve güvenliğini sağlamaya yönelik yükümlülükleri üretim ortamının özellikleri ne olursa olsun devam etmektedir.

Rotasyon çizelgeleri özellikle kas ve iskelet hastalıklarının önlenmesine yönelik bir risk azaltma metodu olarak kullanılagelmiştir. Bu tez çalışması kapsamında ise iş rotasyon çizelgelerine fiziksel ergonomik risk parametreleri açısından bir bakış getirilmiştir. Özellikle klasik çizelgeleme amaçları ile birlikte ergonomik istekler arasındaki etkileşimin ortaya koyulduğu bu çalışmada çeşitli amaçlara (sadece endüstriyel gürültü etkin, sadece el-kol titreşimi etkin, sadece ortam sıcaklığı ve MOE faktörleri etkin, sadece vücut iç sıcaklığı etkin, sadece aydınlatma faktörü etkin) hizmet eden tek ve çok amaçlı iş rotasyon çizelgeme modellerine dair öneriler yapılmıştır. Temel atama modeline her bir risk parametresinin ayrı ayrı eklenmesi durumunda modelin verdiği tepkiler araştırılarak, risk faktörleri ve klasik amaçlar arasındaki ödünleşme gösterilmiştir. Ergonomik özelliklerin eklenmesi ile artış gösteren atama maliyetleri, çalışanların ergonomik risklere olan maruziyetleri neticesinde ortaya çıkacak sağlık maliyetleri ya da çalışanların göreceği psikolojik ve fizyolojik zararlar karşısında katlanılabilir maliyetler kapsamında değerlendirilebilir.

Aynı zamanda risk faktörlerinin tamamının etkin olduğu bütünleşik model önerileri ile özellikle KOBİ tipindeki işletmelere hem işletme amaçlarını hem de ergonomi gereklerini yerine getirme amacı ile kullanabilecekleri esnek matematiksel model önerileri sunulmuştur.

Tez kapsamında üzerinde durulan bir diğer kritik konu ise, fiziksel risk etmenlerine yönelik çalışanların bu risk etmenlerine olan maruziyetlerinin hesaplanması ve elde edilen

değerlerin karşılaştırılacağı limit değerlerin belirlenmesi konusundaki hassasiyettir. Gürültü, termal konfor, titreşim gibi maruziyet hesaplamaları birbirinden oldukça farklılık gösteren risk faktörleri çalışma kapsamına alınarak, okuyucuya bahsedilen risk faktörlerine ilişkin hesaplama ve limit değerlerine tek bir kaynaktan erişmeleri imkânı sağlanmıştır.

Ergonomik iş rotasyon çizelgeleme literatüründe endüstriyel gürültü maruziyeti temelinde geliştirilen model önerileri bulunmaktadır. Ancak, termal konfor, el-kol titreşimi ya da aydınlatma parametrelerinin iş rotasyon çizelgesinde kullanımına yönelik modellere ilgili literatürde rastlanmamıştır. Dahası ilgili literatürde fiziksel risk etmenlerinin bütünleşik değerlendirilmesine yönelik bir çalışmaya da rastlanmamıştır. Bu açıdan, çalışma kapsamında önerilen modeller, gerek literatürde daha önce ele alınmayan risk parametrelerini göz önünde bulundurması, gerekse de bahsi geçen fiziksel ergonomik risk parametrelerini bütünleşik değerlendirmesi yönleri ile literatürdeki rotasyon çizelgeleme çalışmalarından ayrılmaktadır. İlgili literatürdeki bu eksikliğin geliştirilen model önerileri ile doldurulması amaçlanmaktadır. Aynı zamanda, aşırı sıcak üretim ortamlarına ilişkin olarak geliştirilen alternatif termal konfor modeli önerisi ve bir haftalık sürede altı gün üretim yapan işletmeler için de çözümlerin elde edilmesi, çalışma kapsamında önerilen modellerin kapsamını genişletmektedir.

Fiziksel risk parametrelerini bütünleşik olarak değerlendiren HP modellerindeki hedef ağırlıkların elde edilmesi için kullanılan yöntem ve hedeflerin normalize edilmesinde sergilenen yaklaşım da geliştirilen modellere farklılık kazandırmaktadır.

Çalışmada önerilen modeller çözüm performansı açısından da tatmin edici düzeydedir. Ancak, bütünleşik modellerde karar değişkeni sayısına bağlı olarak modelin çözüm verme zamanlarının arttığı, bazı veri setlerinde ise 15000 sn. çözüm süresinde olurlu bir çözüm ile karşılaşılmadığı gözlenmiştir. Ancak bilindiği üzere, modellerin zamana bağlı çözüm performansları, çözümlerin yapıldığı bilgisayarların özelliği ile yakından ilgilidir. Daha yüksek kapasiteli ve yeni teknolojiye sahip bilgisayarlar ile tez kapsamında verilen zamanlar düşürülebilir. Çok büyük boyutlu işletmelerde önerilen bütünleşik modeller kullanılmak istenirse, probleme özgü bir takım sezgisel çözüm yaklaşımlarından faydalanılması gereksinimi doğabilir. Önerilen modellerin uygulama alanları ve hangi sektördeki iş kolları için daha uygun olduğu noktasında net bir ayrım yapılmasından ziyade, ne tür bir iş kolu olursa olsun hangi fiziksel ergonomik risk parametresinin üretim

ortamında etkin bir biçimde yer aldığının belirlenmesi ve bu parametre ya da parametelerin geçtiği modellerin kullanılabileceğine yönelik bir değerlendirme yapılması daha uygun bir yaklaşım olacaktır. Bu konuda genel bir değerlendirme yapmak gerekirse bütünleşik modellerin KOBİ tipindeki tüm işletmeler için, tek amaçlı modellerin ise ilgili risk parametresinin etkin olduğu gerek KOBİ gerekse de büyük çaplı işletmeler için uygun olacağı ifade edilebilir.

Tez çalışması kapsamında çok amaçlı bütünleşik modellerde, ağırlıklı HP mantığı kullanılmıştır. Hedef ağırlıklarının belirlenmesi sırasında ise KBDT setine dayalı dilsel bir karar modelinden faydalanılmıştır. Bu karar modelinin kullanılma sebebi, KBDT setlerinin uzmanların dilsel değerlendirmeleri yaparken düşüncelerini karar verme sürecine daha kolay aktarmalarına olanak tanıması ve değerlendirmelerini yaparken kararsız kaldıkları durumları da kapsayabilecek dilsel ifadeleri içermesidir. Ancak daha sonraki çalışmalarda ağırlıklı HP yerine, amaçlardan sapmaların, hedef değerini geçtiği oranda cezalandırıldığı yaklaşımlar da kullanılabilir. Dahası, eğer yine ağırlıklı HP yaklaşımı kullanılacaksa, literatürde yer alan diğer ölçeklerden ve ÇKKV yöntemlerinden faydalanılabilir.

Ek olarak, endüstriyel gürültü modelinde, literatürdeki kısıtlı sayıda yer alan modellerdeki gibi hesaplama açısından pratik olması ve modellerin çözüm performansını iyileştirmesi sebebi ile dozaj hesaplama formülleri kullanılmıştır. Ancak logaritmik toplam yapan ve maruziyetleri yüzde cinsinden değil de, dB cinsinden veren Babalık (2016) tarafından önerilen formüller de kullanılabilir.

Fiziksel risk etmenlerinin bütünleşik ve ayrı ayrı değerlendirildiği modellerin önerildiği tez çalışmasında, zihinsel iş yüklerine yönelik değerlendirmeler kapsam dışında tutulmuştur. Daha sonraki çalışmalarda çalışanların zihinsel iş yükü / mental zorlanması, sağlık maliyetleri gibi faktörler de geliştirilen modellere eklenebilir. Aynı zamanda çalışanların çalışma arkadaşı seçimi ya da yaşlanma durumları da dikkate alınarak, önerilen modeller geliştirilebilir. Benzer şekilde, bu çalışmada çalışanların işler karşısındaki uzmanlık durumları, uzman ya da uzman değil şeklinde ele alınmıştır. İlerleyen çalışmalarda çalışanların uzmanlık durumları yetkinlik ya da yetenek bazlı atamaların yapılacağı şekilde daha ayrıntılı bir şekilde ele alınarak, önerilen modellerin geliştirilmesi söz konusu olabilir.

Bu çalışma kapsamında geliştirilen modellerde, işletmelerin tek vardiya çalıştıkları durum dikkate alınmıştır. Daha sonraki çalışmalar için fiziksel ergonomik risk faktörlerine olan maruziyetlerin vardiyalar arasında herhangi bir farklılık oluşturup oluşturmayacağı, ya da vardiyanın zamanına bağlı olarak iş istasyonlarının fiziksel risk parametresi özelliklerinin değişkenlik gösterip göstermeyeceği gibi faktörler araştırılabilir.

KAYNAKLAR

Acar, C., Beskese, A., and Temur, G.T. (2018). Sustainability analysis of different hydrogen production options using hesitant fuzzy AHP, *International Journal of Hydrogen Energy,* 43(39), 18059-18076

Adem, A., ve Dağdeviren, M. (2015). İş Sağlığı Ve Güvenliğinin Verimlilik Üzerindeki Etkisi: Bir Literatür Araştırması, 5. *Ulusal Verimlilik Kongresi Bildiriler Kitabı*, 60-71, ISBN: 978-605-4889-17-4.

Adem, A. (2016). *Ergonomik Kısıt İçeren İşgücü Çizelgeleme Problemi İçin Çok Amaçlı Matematiksel Modeller ve Çözüm Önerileri*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Akbari, M. (2015). Tour scheduling for part-time employee with variable productivity, Proceedings of the 2015 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management Dubai, United Arab Emirates (UAE), March 3 – 5, 2015.

Al-Bouwarthan, M., Quinn, M. M., Kriebel, D., and Wegman, D. H. (2019). Assessment of Heat Stress Exposure among Construction Workers in the Hot Desert Climate of Saudi Arabia. *Annals of work exposures and health*, 63(5), 505-520.

Al-Husain, R., and Khorramshahgol, R. (2020). Incorporating Analytical Hierarchy Process and Goal Programming to Design Responsive and Efficient Supply Chains. *Operations Research Perspectives*, 100149.

Asan, U., Kadaifci, C., Bozdag, E., Soyer, A., and Serdarasan, S. (2018). A new approach to DEMATEL based on interval-valued hesitant fuzzy sets, *Applied Soft Computing Journal*, 66, 34-49.

Atmodipoero, R. T., and Pardede, L. (2004). Research on minimum illumination as a function of visual performance. *Energy and buildings*, 36(7), 644-649.

Aryanezhad, M. B., Kheirkhah, A. S., Deljoo, V., and Mirzapour Al-e-hashem, S. M. J. (2009). Designing safe job rotation schedules based upon workers' skills. The *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 41(1-2), 193-199.

Asawarungsaengkul, K., and Nanthavanij, S. (2006). Design of optimal noise hazard control strategy with budget constraint. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 12(4), 355-367.

Asensio-Cuesta, S., Diego-Mas, J. A., Canós-Darós, L. and Andrés-Romano, C. (2011). A genetic algorithm for the design of job rotation schedules considering ergonomic and competence criteria. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 60(9-12), 1161-1174.

Azadeh, A., Ravanbaskhsh, M., Rezaei-Malek, Ö., Sheikhalishahi, M., and Moghaddam, A. (2017). Unique NSGA-II and MOPSO algorithms for improved dynamic cellular manufacturing systems considering human factors, *Applied Mathematical Modelling* 48, 655–672.

Azaiez, M. N., and Al Sharif, S. S. (2005). A 0-1 goal programming model for nurse scheduling. *Computers & Operations Research*, 32(3), 491-507.

Babalık, F. C. (2016). Mühendisler için ergonomi–işbilim. *Dora Yayıncılık, Bursa*.

Badri, M. A. (1999). Combining the analytic hierarchy process and goal programming for global facility location-allocation problem. *International journal of production economics*, 62(3), 237-248.

Badri, M. A. (2001). A combined AHP–GP model for quality control systems. *International Journal of Production Economics*, 72(1), 27-40.

Battini, D., Glock, C., Grosse, E., Persona, A., and Sgarbossa, F. (2017), Ergo-lot-sizing: An approach to integrate ergonomic and economic objectives in manual materials handling, *International Journal of Production Economics*, 185, 230–239.

Bautista, J., Garcia, C., and Pozo, R. (2016), Models for assembly line balancing bytemporal, spatial and ergonomic risk attributes, *European Journal of Operational Research*, 251, 814–829.

Bayrakdar, G. (2016). *İşyerlerinde Aydınlatma Koşullarının İş Sağlığı Ve Güvenliği Yönünden Değerlendirilmesi*, İş Sağlığı ve Güvenliği Uzmanlık Tezi, Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı, Ankara.

Bernard, T. E., and Ashley, C. D. (2009). Short-term heat stress exposure limits based on wet bulb globe temperature adjusted for clothing and metabolic rate. *Journal of occupational and environmental hygiene*, 6(10), 632-638.

Bernard, T. E., and Kenney, W. L. (1994). Rationale for a personal monitor for heat strain. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 55(6), 505-514.

Bertolini, M., and Bevilacqua, M. (2006). A combined goal programming—AHP approach to maintenance selection problem. *Reliability Engineering & System Safety*, 91(7), 839-848.

Beskese, A., Camci, A., Temur, G.T., and Erturk, E. (2020). Wind turbine evaluation using the hesitant fuzzy AHP-TOPSIS method with a case in Turkey, *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, 38(1), 997-1011.

Boenzi, F., Mossa, G., Mummolo, G., and Romano, V. A. (2015). Workforce aging in production systems: Modeling and performance evaluation. *Procedia Engineering*, 100, 1108-1115.

Botti, L., Mora, C., and Regattieri, A., (2017), Integrating ergonomics and lean manufacturing principles in a hybrid assembly line, *Computers & Industrial Engineering,* 111, 481–491.

Broz, D., Vanzetti, N., Corsano, G., and Montagna, J. M. (2019). Goal programming application for the decision support in the daily production planning of sawmills. *Forest policy and economics*, 102, 29-40.

Camcı A., Temur, G.T., and Beskese, A. (2018). CNC router selection for SMEs in woodwork manufacturing using hesitant fuzzy AHP method, *Journal of Enterprise Information Management,* 31(4). 529-549.

Carnahan, B. J., Redfern, M. S., and Norman, B., (2000). Designing safe job rotation schedules using optimization and heuristic search. *Ergonomics*, 43(4), 543-560.

Charnes, A., and Cooper, W. W. (1977). Goal programming and multiple objective optimizations: Part 1. *European journal of operational research*, 1(1), 39-54.

Cheshmehgaz, H.R., Haron, H., Kazemipour, F., and Desa, M. I., (2012). Accumulated risk of body postures in assembly line balancing problem and modeling through a multi-criteria fuzzy-genetic algorithm, *Computers & Industrial Engineering,* 63, 503–512.

Choi, G. (2009). A goal programming mixed-model line balancing for processing time and physical workload. *Computers & Industrial Engineering*, 57(1), 395-400.

Çakmak, B., Saraçoğlu, T., Alayunt, F. N., and Özarslan, C. (2011). Vibration and noise characteristics of flap type olive harvesters. *Applied Ergonomics,* 42(3), 397-402

Dağdeviren, M. (2018), Çok Ölçütlü Karar Verme, Yayınlanmamış Ders Notları, Gazi Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği.

Dağdeviren, M. (2007). Bulanık Analitik Hiyerarşi Prosesi İle Personel Seçimi ve Bir Uygulama. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 22, 791-799.

Dang, B. N., and Dowell, C. H. (2014). Factors associated with heat strain among workers at an aluminum smelter in Texas. *Journal of occupational and environmental medicine/American College of Occupational and Environmental Medicine*, *56* (3), 313.

Dantzig, G. B. (1948). Programming in a linear structure. *In Bulletin of the American Mathematical Society* 54 (11),1074-1074.

Darko, A.P., and Liang, D. (2020). An extended COPRAS method for multiattribute group decision making based on dual hesitant fuzzy Maclaurin symmetric mean, *International Journal of Intelligent Systems*, 35(6),1021-1068.

Dewi, D.S., and Septiana, T., (2015). Workforce scheduling considering physical and mental workload: A case study of domestic freight forwarding, *Procedia Manufacturing*, 4, 445 – 453

Digiesi, S., Facchini, F., Mossa, G., and Mummolo, G. (2018). Minimizing and balancing ergonomic risk of workers of an assembly line by job rotation: A MINLP model. *International Journal of Industrial Engineering and Management*, 9(3), 129-138.

Dinçer, H., Yüksel, S., and Şenel, S. (2018), Analyzing the global risks for the financial crisis after the great depression using comparative hybrid hesitant fuzzy decision-making models: Policy recommendations for sustainable economic growth, *Sustainability (Switzerland)*,10(9),3126.

Dutta, P., Mishra, A., Khandelwal, S., and Katthawala, I. (2020). A multiobjective optimization model for sustainable reverse logistics in Indian E-commerce market. *Journal of Cleaner Production*, 249, 119348.

Dong, J.-Y., Yuan, F.-F., and Wan, S.-P. (2017). Extended VIKOR method for multiple criteria decision-making with linguistic hesitant fuzzy information, *Computers and Industrial Engineering*, 112, 305-319.

Etemad, S. S., Mohammadi Limaei, S., Olsson, L., and Yousefpour, R. (2019). Forest management decision-making using goal programming and fuzzy analytic hierarchy process approaches (case study: Hyrcanian forests of Iran): Forest management decision-making. *Journal of Forest Science,* (9).

Foroozesh, N., Gitinavard, H., Meysam Mousavi, S., and Vahdani, B. (2017). A hesitant fuzzy extension of VIKOR method for evaluation and selection problems under uncertainty, *International Journal of Applied Management Science* 9(2),95-113.

Frazer, M., Norman, R., Wells, R., and Neumann, P. (2003). The effects of job rotation on the risk of reporting low back pain. *Ergonomics,* 46(9), 904-919.

Gitinavard, H., Pishvaee, M.S., and Jalalvand, F. (2017). A hierarchical multi-criteria group decision-making method based on TOPSIS and hesitant fuzzy information, *International Journal of Applied Decision Sciences*, 10(3), 213-232

Girginer, N ve Kaygısız, Z. (2009). İstatistiksel Yazılım Seçiminde Analitik Hiyerarşi Süreci Ve 0-1 Hedef Programlama Yöntemlerinin Birlikte Kullanımı. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi,* 10 (1), 211-233.

Güngör, M., Umarusman, N., ve Güneş, M. (2011). Sermaye Kısıtları Altında Hedef Programlama Ve Bulanık Hedef Programlamanın En İyi Fiyat Belirleme Süreçlerinde Kullanılması Ve Bir Uygulama. Conference: 31. Ulusal Yöneylem Araştırması ve Endüsstri Mühendisliği Kongresi-Sakarya.

Gou, X., Liao, H., Xu, Z., and Herrera, F. (2017). Double hierarchy hesitant fuzzy linguistic term set and MULTIMOORA method: A case of study to evaluate the implementation status of haze controlling measures *Information Fusion*, 38, 22-34.

Gupta, S., Fügenschuh, A., and Ali, I. (2018). A multi-criteria goal programming model to analyze the sustainable goals of India. *Sustainability,* 10(3), 778.

Herrera, F., and Martínez, L. (2000). A 2-tuple fuzzy linguistic representation model for computing with words. *IEEE Transactions on fuzzy systems*, 8(6), 746-752.

Hirose, A. K., Scarpin, C. T., and Junior, J. E. P. (2020). Goal programming approach for political districting in Santa Catarina State: Brazil. *Annals of Operations Research*, 287(1), 209-232.

Hochdörffer, J., Hedler, M., and Lanza, G. (2018). Staff scheduling in job rotation environments considering ergonomic aspects and preservation of qualifications. *Journal of manufacturing systems*, 46, 103-114.

Holmer, I. (2010). Climate change and occupational heat stress: methods for assessment. *Global Health Action*, 3(1), 5719.

Ighravwe, D. E., Oke, S. A., and Adebiyi, K. A. (2017). A weighted goal programming model for maintenance workforce optimisation for a process industry. *Asia-Pacific Journal of Science and Technology*, 22(4).

Ignizio, J. P. (1978). A Review of Goal Programming: A Tool for Multiobjective Analysis, *Journal of the Operational Research Society*, 29 (11), 1109–1119.

İç, Y. T. (2020). A multi-objective credit evaluation model using MOORA method and goal programming. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 45 (3), 2035-2048.

İncir, G. (2008). Ergonomi- çalışma ortamı ve fiziksel çevre, Milli Prodüktivite merkezi yayınları, 701.

İnternet-1: Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığının Çalışanların Titreşimle İlgili Risklerden Korunmalarına Dair Yönetmeliği, URL: https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2013/08/20130822.pdf, Son Erişim Tarihi: 23.05.2020

İnternet-2: Actigraph ürünleri internet sitesi, URL: https://www.actigraphcorp.com/, Son Erişim Tarihi: 23.05.2020

İnternet-3: Kobi tanımlarına ilişkin KOSGEB'in mevuzat sayfası, URL: https://www.kosgeb.gov.tr/Content/Upload/Dosya/Mevzuat/KOB%C4%B0'lerin_Tanimi,_Yonetmelik.pdf , Son Erişim Tarihi: 23.05.2020.

Jaber, M.Y., and Neumann, W.P. (2010). Modelling worker fatigue and recovery in dual-resource constrained systems, *Computers & Industrial Engineering*, 59, 75–84

Jones, D. F., and Tamiz, M. (2003). Goal programming in the period 1990–2000. In Multiple Criteria Optimization: State of the art annotated bibliographic surveys, (129-170). Springer, Boston, MA.

Karaöz, B. (2014). *Maden üretim planlaması ve çizelgelemesi üzerine bir tam sayılı programlama önerisi: kar maden örneği*, Yüksek Lisans Tezi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Hacettepe Üniversitesi, Ankara.

Kahraman, C., Onar, S.Ç., and Öztayşi, B. (2018). B2C Marketplace Prioritization Using Hesitant Fuzzy Linguistic AHP, *International Journal of Fuzzy Systems,* 20(7), 2202-2215.

Karsak, E. E., and Özogul, C. O. (2009). An integrated decision making approach for ERP system selection. *Expert systems with Applications*, 36(1), 660-667.

Karsak, E. E., Sozer, S., and Alptekin, S. E. (2003). Product planning in quality function deployment using a combined analytic network process and goal programming approach. *Computers & industrial engineering*, 44(1), 171-190.

Kumar, P. P. (2019). Goal Programming Through Bakery Production. *Internatıonal Journal of Scıentıfıc & Technology Research*, 8(10), 3722-3725.

Kia, K., Fitch, S. M., Newsom, S. A., and Kim, J. H. (2020). Effect of whole-body vibration exposures on physiological stresses: Mining heavy equipment applications. *Applied Ergonomics*, 85, 103065.

Lee, J. W., and Kim, S. H. (2000). Using analytic network process and goal programming for interdependent information system project selection. *Computers & Operations Research*, 27(4), 367-382.

Li, R., and Liu, G. (2017). An uncertain goal programming model for machine scheduling problem. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 28(3), 689-694.

Li, J., Chen, Q., Niu, L.-L., and Wang, Z.-X. (2020). An ORESTE approach for multi-criteria decision-making with probabilistic hesitant fuzzy information, *International Journal of Machine Learning and Cybernetics.*

Liang, R.-X., Wang, J.-Q., and Zhang, H.-Y. (2018). Projection-Based PROMETHEE Methods Based on Hesitant Fuzzy Linguistic Term Sets, *International Journal of Fuzzy Systems*, 20(7), 2161-2174

Liao, H., Wu, X., Mi, X., and Herrera, F. (2020). An integrated method for cognitive complex multiple experts multiple criteria decision making based on ELECTRE III with weighted Borda rule, *Omega (United Kingdom*), 93,102052

Liu, Z., Ming, X., and Song, W. (2019), A framework integrating interval-valued hesitant fuzzy DEMATEL method to capture and evaluate co-creative value propositions for smart PSS, *Journal of Cleaner Production*, 215, 611-625.

Logan, H. L. (1943). The role of lighting in accident prevention. *Electrical Engineering*, 62(4), 143-147.

Maiers, J., and Sherif, Y. S. (1985). Applications of fuzzy set theory. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, (1), 175-189.

Meshi, E. B., Kishinhi, S. S., Mamuya, S. H., and Rusibamayila, M. G. (2018). Thermal exposure and heat illness symptoms among workers in Mara Gold Mine, Tanzania. *Annals of global health*, 84(3), 360.

Methner, M., and Eisenberg J. (2018). Evaluation of heat stress and heat strain among employees working outdoors in an extremely hot environment, *Journal of Occupatıonal and Envıronmental Hygıene,* 15(6), 474-480.

Mohammadian, M., Babaei, M., Amin Jarrahi, M., and Anjomrouz, E. (2019). Scheduling nurse shifts using goal programming based on nurse preferences: a case study in an emergency department. *International Journal of Engineering*, 32(7), 954-963.

Morris, C. E., Gonzales, R. G., Hodgson, M. J., and Tustin, A. W. (2019). Actual and simulated weather data to evaluate wet bulb globe temperature and heat index as alerts for occupational heat-related illness. *Journal of occupational and environmental hygiene*, 16(1), 54-65.

Mossa, G., Boenzi F., Digiesi, S., Mummolo, G., and Romao, V.A. (2016). Productivity and ergonomic risk in human based production systems: A job-rotation scheduling model. *International Journal of Production Economics*,171, 471–477.

Moussavi, S.E., Mahdjoub, M., and Grunder, O., (2016). Reducing production cycle time by ergonomic workforce scheduling, *IFAC-PapersOnLine*, 419–424.

Moussavi, S. E., Mahdjoub, M., and Grunder, O., (2018). A multi-objective programming approach to develop an ergonomic job rotation in a manufacturing system. *IFAC-PapersOnLine*, 51(11), 850-855.

Moussavi, S. E., Zare, M., Mahdjoub, M., and Grunder, O. (2019). Balancing high operator's workload through a new job rotation approach: Application to an automotive assembly line. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 71, 136-144.

Nanthavanij S, Yaoyuenyong S, and Jeenanunta C. (2010). Heurıstıc Approach to Workforce Schedulıng Wıth Combıned Safety and Productıvıty Objectıve *International Journal of Industrial Engineering: Theory, Applications and Practice*,17(4),319-333.

Narayanamoorthy, S., Geetha, S., Rakkiyappan, R., and Joo, Y.H. (2019). Interval-valued intuitionistic hesitant fuzzy entropy based VIKOR method for industrial robots selection, *Expert Systems with Applications*, 121, 28-37.

Omrani, H., Valipour, M., and Emrouznejad, A. (2019). Using weighted goal programming model for planning regional sustainable development to optimal workforce allocation: an application for provinces of Iran. *Social Indicators Research*, 141(3), 1007-1035.

Otto, A., and Scholl, A. (2011). Incorporating ergonomic risks into assembly line balancing, *European Journal of Operational Research*, 212, 277–286.

Otto, A., and Scholl, A. (2013). Reducing ergonomic risks by job rotation scheduling. *OR spectrum*, 35(3), 711-733.

Özder, E. H., Özcan, E., and Eren, T. (2019). Staff Task-Based Shift Scheduling Solution with an ANP and Goal Programming Method in a Natural Gas Combined Cycle Power Plant. *Mathematics*, 7(2), 192.

Padula, R. S., Comper, M. L. C., Sparer, E. H., and Dennerlein, J. T. (2017). Job rotation designed to prevent musculoskeletal disorders and control risk in manufacturing industries: A systematic review. Applied ergonomics, 58, 386-397.

Parra, M. A., Terol, A. B., and Urıa, M. R. (2001). A fuzzy goal programming approach to portfolio selection. *European Journal of Operational Research*, 133(2), 287-297.

Petridis, K., Grigoroudis, E., and Arabatzis, G. (2018). A goal programming model for a sustainable biomass supply chain network. *International Journal of Energy Sector Management.*

Rashid, T., Faizi, S., Xu, Z., and Zafar, S. (2018). ELECTRE-Based Outranking Method for Multi-Criteria Decision Making Using Hesitant Intuitionistic Fuzzy Linguistic Term Sets, *International Journal of Fuzzy Systems*, 20(1), 78-92.

Rattanamanee, T. and Nanthavanij, S. (2013). Multi-Workday Ergonomic Workforce Scheduling with Days Off. *Proceedings of the 4th International Conference on Engineering, Project, and Production Management*, 1117-1125.

Ren, F., Kong, M., and Pei, Z. (2017). A new hesitant fuzzy linguistic TOPSIS method for group multi-criteria linguistic decision making, *Symmetry*, 9(12),289.

Rodriguez, R.M., Martinez, L., and Herrera, F. (2012). Hesitant fuzzy linguistic term sets for decision making. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 20 (1), 109-119.

Rodriguez, R. M., Martınez, L., and Herrera, F. (2013). A group decision making model dealing with comparative linguistic expressions based on hesitant fuzzy linguistic term sets. *Information Sciences*, 241, 28–42.

Rowlinson, S., YunyanJia, A., Li, B., and ChuanjingJu, C. (2014). Management of climatic heat stress risk in construction: a review of practices, methodologies, and future research. *Accident Analysis & Prevention*, 66, 187-198.

Sabancı, A., and Sümer, K. S., (2015). *Ergonomi.* Nobel Akademik Yayıncılık Ankara.

Sana, S. S., Ospina-Mateus, H., Arrieta, F. G., and Chedid, J. A. (2019). Application of genetic algorithm to job scheduling under ergonomic constraints in manufacturing industry. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 10(5), 2063-2090.

Sanders, M. S. McCormick. Ernest. J. (1993). Human Factor in Engineering and Design. New York, McGraw-Hill.

Savino, M.M., Battini, D., and Riccio, C. (2017). Visual management and artificial intelligence integrated in a new fuzzy-based full body postural assessment, *Computers and Industrial Engineering*, 111, 598-608.

Schniederjans, M. J., and Garvin, T. (1997). Using the analytic hierarchy process and multi-objective programming for the selection of cost drivers in activity-based costing. *European Journal of Operational Research*, 100(1), 72-80.

Seçkiner, S. U. ve Kurt, M. (2005). Bütünleşik Tur-Rotasyon Çizelgeleme Yaklaşimi İle İşyükü Minimizasyonu. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 20(2).

Senyigit, E., and Atici, U. (2018, October). Scheduling with Job Dependent Learning Effect and Ergonomic Risk Deterioration. In *2018 2nd International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT)*, (1-4). IEEE.

Shahnazari-Shahrezaei, P., Tavakkoli-Moghaddam, R., and Kazemipoor, H. (2013). Solving a multi-objective multi-skilled manpower scheduling model by a fuzzy goal programming approach. *Applied Mathematical Modelling*, 37(7), 5424-5443.

Sheffield, P., Herrera, J., Lemke, B., Kjellstrom, T., and Romeor, B. (2013). Current and Future Heat Stress in Nicaraguan Work Places under a Changing Climate, *Industrial Health*, 51, 123-127.

Shuib, A., and Kamarudin, F. I. (2019). Solving shift scheduling problem with days-off preference for power station workers using binary integer goal programming model. *Annals of Operations Research*, 272(1-2), 355-372.

Singh LP, Bhardwaj A, and Deepak K. (2013). Occupational noise-induced hearing loss in Indian steel industry workers: an exploratory study. *Human Factors*, 55(2),411-424.

Sun, G., Guan, X., Yi, X., and Zhou, Z. (2018). An innovative TOPSIS approach based on hesitant fuzzy correlation coefficient and its applications, *Applied Soft Computing Journal*, 68, 249-267.

Sund-Levander M, Forsberg C, Wahren L K. (2002). Normal oral, rectal, tympanic and axillary body temperature in adult men and women: a systematic literature review. *Scandinavian Journal of Caring Sciences*; 16(2), 122-128.

Sridevi, P., Harish Babu G A, and Uday Kumar K N, (2018). A Goal Programming Approach to Large Scale Thermal Power Generation Units, *International Journal of Engineering Research and Technology*. 11(1), 73-89.

Song, J., Lee, C., Lee, W., Bahn, S., Jung, C., and Yun, M. H. (2016). Development of a job rotation scheduling algorithm for minimizing accumulated work load per body parts. *Work*, 53(3), 511-521.

Tamiz, M., Jones, D. F., and El-Darzi, E. (1995). A review of goal programming and its applications. *Annals of Operations research*, 58(1), 39-53.

Tamiz, M., and Jones, D. F. (1997). An example of good modelling practice in goal programming: Means for overcoming incommensurability. In Advances in multiple objective and goal programming (29-37). Springer, Berlin, Heidelberg.

Tamiz, M., and Azmi, R. A. (2019). Goal programming with extended factors for portfolio selection. *International Transactions in Operational Research*, 26(6), 2324-2336.

Tayyari, F and Smith J.L. (1997). *Occupatinoal Ergonomics Principles and applications*, Chapman and Hall, London.

Topaloglu, S. (2006). A multi-objective programming model for scheduling emergency medicine residents. *Computers & Industrial Engineering*, 51(3), 375-388.

TS EN 1264-1, (2013), Turkish Standard, Light and lighting - Lighting of work places - Part 1: Indoor work places.

Varley, F. (2004). A study of heat stress exposures and interventions for mine rescue workers, *Transactions*, 316, 133-142.

Villalba, X.P.G., Wu, Y., Ashley, C., and Bernard, T. (2018). Heat stress risk profiles for three non-woven coveralls, *Journal of Occupatıonal and Envıronmental Hygıene*, 15 (1), 80-85.

von Elmbach, A. F., Scholl, A., and Walter, R. (2019). Minimizing the maximal ergonomic burden in intra-hospital patient transportation. *European Journal of Operational Research*, 276(3), 840-854.

Wang S, Richardson, M., Wu, C., Cholewa, C., Lungu, C., Zaitchik, F., and Gohlke, J.M, (2019). Estimating Occupational Heat Exposure from Personal Sampling of Public Works Employees in Birmingham, Alabama, *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 61(6).

Wang, X., Gou, X., and Xu, Z. (2020). Assessment of traffic congestion with ORESTE method under double hierarchy hesitant fuzzy linguistic environment, *Applied Soft Computing Journal*, 86,105864.

Wang, T.C. and Liu, C.C. (2014). Optimal Work Shift Scheduling with Fatigue Minimization and Day Off Preferences. *Mathematical Problems in Engineering*, 1-8.

Wilkins, A. J., Nimmo-Smith, I., Slater, A. I., and Bedocs, L. (1989). Fluorescent lighting, headaches and eyestrain. *Lighting Research & Technology*, 21(1), 11-18.

Winston, W. L., and Goldberg, J. B. (2004). Operations research: applications and algorithms, Belmont: Thomson Brooks/Cole.

Wu, Y., Wang, Y., Chen, K., Xu, C., and Li, L. (2017). Social sustainability assessment of small hydropower with hesitant PROMETHEE method, *Sustainable Cities and Society*.

Wu, Y., and Zhou, J. (2019). Risk assessment of urban rooftop distributed PV in energy performance contracting (EPC) projects: An extended HFLTS-DEMATEL fuzzy synthetic evaluation analysis *Sustainable Cities and Society*, 47,101524.

Wongwien, T., and Nanthavanij, S. (2012). Ergonomic workforce scheduling under complex worker limitation and task requirements: Mathematical model and approximation procedure. Songklanakarin Journal of Science & Technology, 34(5).

Wongwien, T., and Nanthavanij, S. (2013). Ergonomic Workforce Scheduling with Productivity and Employee Satisfaction Consideration. *Proceedings of the 4th International Conference on Engineering, Project, and Production Management*, 1108-1116.

Wongwien, T., and Nanthavanij S. (2017). Priority-based ergonomic workforce scheduling for industrial workers performing hazardous jobs, *Journal of Industrial and Production Engineering*, 34(1), 52-60.

Xian, S., and Guo, H. (2020). Novel supplier grading approach based on interval probability hesitant fuzzy linguistic TOPSIS, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*,87,103299.

Xu, Z., Ko, J., Cochran, D., and Jung, M., (2012). Design of assembly lines with the concurrent consideration of productivity and upper extremity musculoskeletal disorders using linear models, Computers *& Industrial Engineering*, 62, 431–441.

Yang, W., Pang, Y., Shi, J., and Wang, C. (2018). Linguistic hesitant intuitionistic fuzzy decision-making method based on VIKOR, *Neural Computing and Applications*, 29(7), 613-626.

Yavuz, M., Oztaysi, B., Cevik Onar, S., and Kahraman, C. (2015). Multi-criteria evaluation of alternative-fuel vehicles via a hierarchical hesitant fuzzy linguistic model. *Expert Systems with Applications,* 42 (5), 2835-2848.

Yaoyuenyong, S., and Nanthavanij, S. (2006). Hybrid procedure to determine optimal workforce without noise hazard exposure. *Computers & Industrial Engineering*, 51(4), 743-764.

Yıldız, C.B., Gzara, F, and, Elhedhli, S. (2017). Airline crew pairing with fatigue: Modeling and analysis, *Transportation Research Part C*, 74, 99–112.

Yücesan, M. (2012). *Tam Sayılı Programlama Modelinin Üretim Planlaması Amacıyla Sanal Bir Otomobil Fabrikasına Uygulanlaması*, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Karadeniz Teknik üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Trabzon.

Yu, W., Zhang, Z., Zhong, Q., and Sun, L. (2017). Extended TODIM for multi-criteria group decision making based on unbalanced hesitant fuzzy linguistic term sets, *Computers and Industrial Engineering* 114, 316-328.

Yoon, S., Ko, J., and Jung, M. (2016). A model for developing job rotation schedules that eliminate sequential high workloads and minimize between-worker variability in cumulative daily workloads: Application to automotive assembly lines, *Applied Ergonomics,* 55, 8-15.

Zadeh, L. A. (1975). The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning—I. *Information sciences*, 8(3), 199-249.

Zeng, S., and Xiao, Y. (2018). A method based on topsis and distance measures for hesitant fuzzy multiple attribute decision making, *Technological and Economic Development of Economy*, 24(3), 969-983.

Zhang, Y., and Xu, Z.(2019). Efficiency evaluation of sustainable water management using the HF-TODIM method, *International Transactions in Operational Research* 26(2), 747-764.

Zheng, Y., Xu, Z., He, Y., and Liao, H. (2018). Severity assessment of chronic obstructive pulmonary disease based on hesitant fuzzy linguistic COPRAS method, *Applied Soft Computing Journal*, 69, 60-71.

Zhou, H., Wang, J.Q., and Zhang, H.Y. (2018). Multi-criteria decision-making approaches based on distance measures for linguistic hesitant fuzzy sets, *Journal of the Operational Research Society*, 69(5), 661-675.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler



Soyadı, adı : ADEM, Aylin

Uyruğu : T.C.

Doğum tarihi ve yeri : 25.06.1989, Ankara

Medeni hali : Bekar

Telefon : 0 (312) 582 38 22

e-mail : aylinadem@gazi.edu.tr

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Doktora	Gazi Üni. / Endüstri Mühendisliği	Devam ediyor
Yüksek lisans	Gazi Üni. / Endüstri Mühendisliği	2016
Lisans	Çukurova Üni./ Endüstri Mühendisliği	2011
Lise	Mersin Gazi Lisesi	2006

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2018- Devam	Gazi Üniversitesi	Öğretim Görevlisi
2014-2018	Gazi Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

Adem, A., and Dağdeviren, M. (2016). A life insurance policy selection via hesitant fuzzy linguistic decision making model. *Procedia Computer Science, 102,* 398-405.

Adem, A., Dağdeviren, M., Çolak, A., and Kabak, M. (2016). Fuzzy prioritization approach for risks of wind turbine life cycle. *Procedia Computer Science, 102,* 406-413.

Topraklı, A. Y., Adem, A., and Dağdeviren, M. (2016). A Courthouse site selection method using hesitant fuzzy linguistic term set: a case study for Turkey. *Procedia Computer Science, 102*, 603-610.

Adem, A., Çolak, A., and Dağdeviren, M. (2018). An integrated model using SWOT analysis and hesitant fuzzy linguistic term set for evaluation occupational safety risks in life cycle of wind turbine, *Safety Science*, 106, 184–190.

Dagdeviren, M., and Adem, A. (2018). An Integrated MCDM Approach to the Problem of New Graduate Job Selection Under Fuzzy Environment. In *International Conference on Theory and Applications of Fuzzy Systems and Soft Computing* (951-957). Springer, Cham.

Adem, A., Yılmaz Kaya, B., and Dağdeviren, M. (2019). An Ergonomic Investigation of Working Environment with Kano Model and Universal Design Principles, *Gazi University Journal of Science,*32 (2).

Şenol, B., Adem, A., and Dağdeviren, M. (2019). A Fuzzy MCDM Approach to Determine the Most Influential Logistic Factors, *Journal of Polytechinc*, 22(3), 793-800.

Adem A., Çakıt E., and Dağdeviren, M. (2019). Nöroergonomi Çalışmalarına Yönelik Bir Literatür Araştırması, *Ergonomi*, 2(2), 131-136.

Alıcıoğlu, G., Adem A., and Dağdeviren M. (2019). Two-stage MCDM approach in the selection of manager training techniques, *Journal of Turkish Operations Management,* 3(1), 260-268.

Çolak, A., Adem, A., and Dağdeviren, M. (2019). *Fuzzy Prioritization of Factors Affecting Employer Branding for Employees*. In International Conference on Intelligent and Fuzzy Systems (852-858). Springer, Cham.

Kaya, B. Y., Adem, A., and Dağdeviren, M. (2020). A DSS-Based Novel Approach Proposition Employing Decision Techniques for System Design. *International Journal of Information Technology & Decision* Making, 19(02), 413-445.

Adem A., Çakıt E.,and Dağdeviren M. (2020). M, Occupational health and safety risk assessment in the domain of Industry 4.0, *SN Applied Sciences*, 2 (977).

Çakıt E, Adem A, Dağdeviren M (2020), "Endüstri 4.0 Ergonomi İçin Tehdit Mi, Fırsat Mı?" *Verimlilik Dergisi*, (3), 43-57.

Uluslararası Kitap Bölümleri

Dağdeviren, M., and Adem A. (2020). *The PROMETHEE Method for a Machine Selection Problem,* MCDM methods for Business and Management, Edited by José António Filipe and Tolga Genç.

Ulusal ve Uluslararası bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitaplarında basılan bildiriler:

Adem, A. ve Dağdeviren, M. (2015). *İş Sağlığı Ve Güvenliğinin Verimlilik Üzerindeki Etkisi: Bir Literatür Araştırması*. 5.Ulusal Verimlilik Kongresinde Sunuldu, Ankara, Türkiye, 60-73.

Adem, A., Temiz, İ., ve Dağdeviren, M. (2015). *İş Kazalarına Yönelik Bir Tahmin Çalışması,* Yöneylem Araştırması ve Endüstri Mühendisliği 35. Ulusal Kongresinde Sunuldu, Ankara, Türkiye, 66.

Kaya, B. Y., Adem, A., ve Dağdeviren, M. (2015). *Alternatif Makine Çizelgelerinin Ergonomik Değerlendirilmesi İçin Bir Model Önerisi*, 21. Ulusal Ergonomi Kongresinde Sunuldu, Isparta, Türkiye, 43.

Adem, A., Yılmaz Kaya, B., ve Dağdeviren, M. (2015), *Çalışma Ortamı Kalitesinin Ergonomik Faktörler Temelinde Kano Model ile İncelenmesi*, 21. Ulusal Ergonomi Kongresinde Sunuldu, Isparta, Türkiye, 21.

Adem, A., and Dağdeviren, M. (2016). *A Mathematical Model for the Staff Scheduling Problem with Ergonomic Constraints*, 25th International Conference on Engineering and Natural Science, İstanbul, Turkey, 34-38.

Adem, A., and Dağdeviren, M. (2016). *Ergonomi Kısıtlı Personel Çizelgeleme Problemi İçin Çok Amaçlı Matematiksel Bir Model Önerisi,* 17th International Symposium on Econometrics, Operations Research and Statistics, Sivas, Turkey, 571-572.

Adem, A., and Dağdeviren, M. (2016). *Ergonomik Personel Çizelgeme Konusu Üzerinde Bir Literatür Araştırması*. Uluslararası Katılımlı 16. Üretim Araştırmaları Sempozyumu, İstanbul, Türkiye, 9-14.

Tan, M., Adem A., and Dağdeviren, M. (2016). *Using the Analytic Hierarchy Process AHP for Supply Chain Risk Management SCRM: A Case Study in Turkey automotive sector.* XIV. Internatıonal Logıstıcs And Supply Chaın Congress, İzmir, Turkey, 191-202.

Adem, A., ve Dağdeviren, M. (2016). *Karbon Salınım Kısıtı İçeren Araç Çizelgeleme Problemi İçin Matematiksel Bir Model,* 5.Ulusal Lojistik ve Tedarik Zinciri Kongresinde Sunuldu, Mersin, Türkiye, 398-407.

Adem, A., ve Dağdeviren, M., (2016). *Eşit İş yükü ve Eşit Risk Temelli Personel Çizelgeleme Modeli*, 22. Ulusal Ergonomi Kongresinde Sunuldu, Denizli, Türkiye, 39.

Topraklı, Y., Adem, A., Yüksel, İ., and Dağdeviren M. (2017). *A framework proposal for assessing architectural projects of dormitories for Turkish construction industry based on environmental sustainability*, Paper presented at the 19th International Conference on Researches in Science & Technology, Barcelona, Spain.

Adem, A., Dağdeviren, M., Kabak, M., and Topraklı, Y. (2017). *Ranking of Transition Stages to Green Supply Chain Management: A Fuzzy AHP Approach,* Paper presented at the 19th International Conference on Researches in Science & Technology, Barcelona, Spain.

Adem, A., Dağdeviren, M., Kabak, M., and Topraklı, Y. (2017). *Factor Analysis Of Architecture Schools' University Entrance Scores By MultiCriteria Decision Making Application: A Case Study In Turkey,* Paper presented at the 6th World Conference on Business, Economics and Management, North Cyprus.

Topraklı, Y., Adem, A., Yüksel, İ., and Dağdeviren, M., (2017). *A Quality Assessment System Based on Buildability Terms for Architectural Projects: A MCDM Application for Turkish Market,* Paper presented at the 6th World Conference on Business, Economics and Management, North Cyprus.

Adem, A., ve Dağdeviren, M. (2017). Gürültü Maruziyetini Dikkate Alan Personel Çizelgeleme Problemi İçin Matematiksel Bir Model Önerisi, 23.Ulusal Ergonomi Kongresinde Sunuldu, Çukurova University Journal of Healthy Science, 50.

Adem, A., Yılmaz Kaya, B, Dağdeviren, M. (2018). *An Integrated Model Proposal for the Selection of Lean Manufacturing Techniques,* Paper presented at the The 12th International Conference on New Challenges in Industrial Engineering and Operations Management, Ankara, Turkey.

Yılmaz Kaya, B., Adem, A., Dağdeviren, M., (2018). *A Human Centered Multi-Criteria Decision Making Approach Proposition for Priorization of Ergonomic Factors in terms of Working Productivity,* Paper presented at the The 12th International Conference on New Challenges in Industrial Engineering and Operations Management, Ankara, Turkey.

Dağdeviren, M., Adem, A., Yüksel, İ., (2018). *İşletmelerde Çokuluslaşmaya Yönelik Stratejiler İçin Bir Önceliklendirme Çalışması*. Paper presented at the 2nd International Symposıum on Economics, Law, and Politics, Kudüs, 365-366.



GAZİ GELECEKTİR..