

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

**ERGONOMİK KISITLAR ALTINDA İŞ YÜKÜ DENGELEMEYE
YÖNELİK BİR MATEMATİKSEL MODEL ÖNERİSİ**

AYNUR GÜRSOY ÖZCAN

KOCAELİ 2022

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

ERGONOMİK KISITLAR ALTINDA İŞ YÜKÜ DENGELEMEYE
YÖNELİK BİR MATEMATİKSEL MODEL ÖNERİSİ

AYNUR GÜRSOY ÖZCAN

Prof. Dr. Nilgün FİĞLALİ
Danışman, Kocaeli Üniv.

.....

Dr.Öğr.Üyesi Hatice ESEN
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.

.....

Dr.Öğr.Üyesi Ahmet CİHAN
Jüri Üyesi, Düzce Üniv.

.....

Doç.Dr. Berrin DENİZHAN
Jüri Üyesi, Sakarya Üniv.

.....

Dr.Öğr.Üyesi Atakan ALKAN
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.

.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 27.06.2022

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ

Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez/proje çalışmada,

- Bu tezin/projenin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu,
- Çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı,
- Bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi,
- Bu çalışmanın Kocaeli Üniversitesi'nin abone olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun olduğunu,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Tezin/Projenin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez/proje çalışması olarak sunmadığımı,

beyan ederim.

☒ Bu tez/proje çalışmasının herhangi bir aşaması hiçbir kurum/kuruluş tarafından maddi/alt yapı desteği ile desteklenmemiştir.

☐ Bu tez/proje çalışması kapsamında üretilen veri ve bilgiler tarafından no'lu proje kapsamında maddi/ alt yapı desteği alınarak gerçekleştirilmiştir.

Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

.....
Aynur GÜRSOY ÖZCAN

YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI

Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/projemin tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda belirtilen koşullarla kullanıma açma izninin Kocaeli Üniversitesi'ne verdiğimi beyan ederim. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin/projemin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanımı bana ait olacaktır.

Tezin/projenin kendi özgün çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin/projenin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

Yükseköğretim kurulu tarafından yayınlanan **“Lisanüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge”** kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricinde YÖK Ulusal Tez Merkezi/ Kocaeli Üniversitesi Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

- ☐ Enstitü yönetim kurulu kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 2 yıl ertelenmiştir.
- ☐ Enstitü yönetim kurulu gerekçeli kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 6 ay ertelenmiştir.
- ☒ Tezim/projem ile ilgili gizlilik kararı verilmemiştir.

.....
Aynur GÜRSOY ÖZCAN

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Özellikle ağır sanayi gibi ergonomik risklerle kolayca karşılaşan imalat firmalarında iş rotasyonu çizelgeleri genellikle ergonomik risk faktörleri dikkate alınmadan yapılır. Bu, kısa vadede herhangi bir iş sağlığı ve güvenliği sorunu yaratmaz; ancak bazı meslek hastalıkları uzun vadede kaçınılmazdır. Bu tez çalışması ile, ergonomik matematiksel model kullanılarak optimal iş rotasyonu çizelgelerinin üretilmesi hedeflenmiştir.

Tez çalışmam boyunca, kıymetli fikirleri ve destekleri ile bana yol gösteren danışman hocam Sayın Prof. Dr. Nilgün Fırlı'ya, tez süreci boyunca beni yönlendiren ve desteklerini esirgemeyen Doktora Tez İzleme Komite üyesi Sayın Dr.Öğr.Üyesi Hatice Esen'e ve Sayın Dr.Öğr.Üyesi Ahmet Cihan'a katkılarından dolayı teşekkür ederim. Tez çalışmalarım esnasında karşılaştığım zorluklara karşı desteğini hiçbir zaman esirgemeyen Sayın Doç. Dr. Kadir Gök'e teşekkür ederim.

Son olarak, hayatımın her anında her zaman yanımda olan sevgili annem Gülümser Gürsoy ve babam Necip Gürsoy'a, gösterdiği büyük sabır için sevgili eşim Koray Özcan'a ve doktora eğitim döneminde dünyaya gelen canım oğlum Kemal Özcan'a sonsuz teşekkürler.

Haziran – 2022

Aynur GÜRSOY ÖZCAN

İÇİNDEKİLER

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ	i
YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI	ii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
TABLOLAR DİZİNİ.....	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	ix
ÖZET	x
ABSTRACT	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. KAS İSKELET SİSTEMİ RAHATSIZLIKLARI.....	3
3. ERGONOMİ VE ERGONOMİK RİSK DEĞERLENDİRME.....	5
3.1. Ergonomi Bilimi.....	5
3.1.1. Ergonomik Risk Faktörleri	5
3.1.1.1. Fiziksel Ergonomi.....	5
3.1.1.2. Bilişsel Ergonomi.....	8
3.1.1.3. Örgütsel Ergonomi.....	8
3.1.1.4. Çevresel Faktörler	8
3.1.1.5. Kişisel Faktörler.....	8
3.1.1.6. Psikososyal Faktörler	8
3.1.2. Ergonomik Risk Değerlendirme	9
3.1.2.1. Fiziksel İş Yükü-Ergonomik Risk Değerlendirme Yöntemleri	9
3.1.2.2. Zihinsel İş Yükü-Ergonomik Risk Değerlendirme Yöntemleri	12
4. YÖNTEMLER	15
4.1. Matematiksel Modelleme	15
4.2. Matematiksel Model Türleri.....	17
4.3. Doğrusal Programlama	18
4.3.1. Doğrusal Programlamanın Dayandığı Varsayımlar.....	19
5. İŞ ROTASYON ÇİZELGELEME	22
5.1. Literatür Araştırması.....	23
6. OTOMOTİV SEKTÖRÜNDE İŞ ROTASYONU PROBLEMİ.....	35
6.1. İşletmenin Tanımı.....	35
6.2. Problemin Tanımı.....	36
6.3. Çalışmaya En Uygun Ergonomik Risk Değerlendirme Yönteminin Seçimi	36
6.3.1. REBA Yöntemi.....	45
6.3.2. BAUA LMM Yöntemi	47
6.3.3. Reba ve BAUA LMM Yöntemi ile Ergonomik Analiz ve Karşılaştırma	57
6.3.3.1. Sabit Spot Kaynak Hattı.....	58
6.3.3.2. Ark kaynak hattı.....	62
6.3.3.3. Pedal Kaynak/Montaj Hattı.....	63
6.3.3.4. Balancer Gun ile Manuel Kaynak Hattı.....	64
6.3.3.5. Ergonomik Risk Değerlendirmesi ve Yöntem Çıktılarının Karşılaştırılması	65

6.4. Çözüm Yöntemlerinin Kararı	67
7. ÖNERİLEN MATEMATİKSEL MODEL	68
7.1. Matematiksel Modelin Uygulaması.....	72
7.1.1. İş İstasyonlarının Ergonomik Kriterlere Göre Gerekliliği	72
7.1.2. İşçilerin Ergonomik Kriterler için İş İstasyonlarının Gerekliliğine Göre Değerlendirilmesi	73
7.1.3. Ergonomik Kriterlerin Önem Ağırlıklarının Belirlenmesi	77
7.1.4. Kaynak İş İstasyonlarının BAUA LMM Yöntemine Göre Ergonomik İş Yüklerinin Belirlenmesi.....	80
7.1.5. 10 İş İstasyonunun Mola Yerine Olan Yürüme Süresinin Belirlenmesi	81
7.1.6. Modele Göre İş Rotasyonu Sırasının Belirlenmesi	82
7.1.7. Sentetik Verilerle Modelin Uygulanması ve Sonuçların Değerlendirilmesi	83
7.1.8. Amaç Fonksiyonunda Katsayıların Değerlendirilmesi.....	86
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	92
KAYNAKLAR.....	95
EKLER	104
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER.....	224
ÖZGEÇMİŞ.....	225

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 6.1. Firmada üretilen parçalar.....	35
Şekil 6.2. REBA A skoru	45
Şekil 6.3. REBA B Skoru	46
Şekil 6.4. REBA skoru	47
Şekil 6.5. Manuel kaynak hattı. (a) Sabit spot makinesinde manuel kaynak, (b) ara proseslerde parça taşıma, (c) karınca arabasını itme.....	58
Şekil 6.6. Sabit spot makinesinde manuel kaynak için REBA skoru	59
Şekil 6.7. Ark kaynak hattı. (a) parçanın palate koyulması, (b) palet itme, (c) ark kaynağı.....	62
Şekil 6.8. Pedal kaynak / montaj hattı. (a) kutu itme, (b) havşa açma	63
Şekil 6.9. Balancer gun ile manuel kaynak hattı. (a) balancer gun ile manuel kaynak, (b) parçanın palete yerleştirilmesi, (c) pnömatik jigde kaynak	64
Şekil 7.1. İşçi yetenek değerlendirme formu örneği.....	76
Şekil 7.2. Kaynak hatları yerleşim planı.....	81
Şekil 7.3. Levene testi sonucu, Minitab çıktısı.....	85
Şekil 7.4. T- testi sonucu, Minitab çıktısı.....	86
Şekil 7.5. Çalışanların boy kriteri değerleri excel giriş ekranı	89
Şekil 7.6. İşlere ait LMM yükleri (a) ve iş istasyonlarının mola yerine olan mesafesi (b) excel giriş ekranı	90
Şekil 7.7. Z amaç fonksiyonu ve rotasyon sonuçları, excel sonuç ekranı	91

TABLolar DİZİNİ

Tablo 3.1. Fiziksel iş yükü-ergonomik risk değerlendirme yöntemlerinin karşılaştırılması	12
Tablo 5.1. Literatür araştırmasına ilişkin özet tablo	29
Tablo 6.1. Gun ile yapılan manuel kaynak işlerinin yapıldığı kaynak hattının incelenmesi	37
Tablo 6.2. Robot kaynak işlerinin yapıldığı kaynak hattının incelenmesi	39
Tablo 6.3. Sabit spot makinası ile yapılan manuel kaynak işlerinin yapıldığı kaynak hattının incelenmesi	41
Tablo 6.4. Ark kaynağı sonrası yapılan tamir işleri	42
Tablo 6.5. Risk karar tablosu.....	47
Tablo 6.6. LMM-1 Zaman ağırlık puanının belirlenmesi.....	48
Tablo 6.7. LMM-1 Yük ağırlık puanının belirlenmesi.....	49
Tablo 6.8. LMM-1 Duruş ve yük pozisyonu ağırlık puanının belirlenmesi.....	49
Tablo 6.9. LMM-1 Uygulama ve ortam ağırlık puanının belirlenmesi	50
Tablo 6.10. LMM-1 Risk değerlendirme tablosu	50
Tablo 6.11. LMM-2 Zaman ağırlık puanının belirlenmesi.....	51
Tablo 6.12. LMM-2 Zaman ağırlık puanının belirlenmesi.....	51
Tablo 6.13. LMM-2 Hareket hızı ağırlık puanının belirlenmesi	52
Tablo 6.14. LMM-2 Beden konumu ağırlık puanının belirlenmesi	52
Tablo 6.15. LMM-2 Uygulama koşulları ağırlık puanının belirlenmesi	53
Tablo 6.16. LMM-2 Risk değerlendirme tablosu	54
Tablo 6.17. LMM-3 Zaman ağırlık puanının belirlenmesi.....	54
Tablo 6.18. LMM-3 Tutma veya taşımaya göre parmak/eldeki kuvvet ağırlık değerinin belirlenmesi	55
Tablo 6.19. LMM-3 El / kol pozisyonu ve hareketi ağırlık puanının belirlenmesi	55
Tablo 6.20. LMM-3 İş organizasyonu ağırlık puanının	56
Tablo 6.21. LMM-3 Uygulama koşulları ağırlık puanının belirlenmesi	56
Tablo 6.22. LMM-3 Vücut postürü ağırlık puanının belirlenmesi	56
Tablo 6.23. LMM-3 Risk değerlendirme tablosu	57
Tablo 6.24. REBA risk değerlendirmesi	59
Tablo 6.25. BAUA LMM-3 risk değerlendirme	60
Tablo 6.26. BAUA LMM-1 risk değerlendirme	60
Tablo 6.27. BAUA LMM-2 risk değerlendirme	61
Tablo 6.28. Dört kaynak hattının REBA ve BAUA yöntemine göre ergonomik risk değerlendirme skorları	65
Tablo 6.29. REBA ve BAUA yöntemlerinin karşılaştırılması	66
Tablo 7.1. 5 yıllık işe bağlı kas iskelet sistemi rahatsızlıklarının kayıtları	72
Tablo 7.2. İş istasyonlarının ergonomik kriterlere göre gerekliliği	73
Tablo 7.3. İşçilerin boy ve yaş durumları	73
Tablo 7.4. Kriterlerin değerlendirme seviyeleri	73
Tablo 7.5. Birinci işin boy kriterine göre değerlendirilmesi	73
Tablo 7.6. İşçilerin boy kriterine göre işlere uygunluk matrisi (M_{ij}^b)	74
Tablo 7.7. Birinci işin yaş kriterine göre değerlendirilmesi	74
Tablo 7.8. İşçilerin yaş kriterine göre işlere uygunluk matrisi (M_{ij}^y)	74
Tablo 7.9. Birinci işin deneyim kriterine göre değerlendirilmesi.....	75
Tablo 7.10. İşçilerin deneyim kriterine göre işlere uygunluk matrisi (M_{ij}^d)	75

Tablo 7.11. Birinci işin yetenek kriterine göre değerlendirilmesi	75
Tablo 7.12. İşçilerin yetenek kriterine göre işlere uygunluk matrisi (M_{ij}^e)	76
Tablo 7.13. Birinci işin sağlık kriterine göre değerlendirilmesi	76
Tablo 7.14. İşçilerin sağlık kriterine göre işlere uygunluk matrisi (M_{ij}^s)	77
Tablo 7.15. İkili karşılaştırma matrisi	78
Tablo 7.16. İkili karşılaştırmalar toplam matrisi	79
Tablo 7.17. Normalize matris	79
Tablo 7.18. (RI) Rassal indeks değerleri	79
Tablo 7.19. İşçilerin işlere uygunluk matrisi (M_{ij})	80
Tablo 7.20. İş istasyonlarına ait LMM iş yükü skorları	81
Tablo 7.21. İş istasyonlarından mola yerlerine kadar olan yürüme süreleri	81
Tablo 7.22. Kümülatif iş yükünü önleyen iş rotasyon programı	82
Tablo 7.23. Mevcut durum ve rotasyon sonrası iş yüklerinin karşılaştırılması	82
Tablo 7.24. Sentetik verilerle modelin uygulama sonuçları	84
Tablo 7.25. Amaç fonksiyonundaki katsayıların değerlendirilmesi (Sentetik-1)	87
Tablo 7.26. Amaç fonksiyonundaki katsayıların değerlendirilmesi	88

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Kısaltmalar

AHP	: Analytic Hierarchy Process (Analitik Hiyerarşi Prosesi)
ANP	: Analytic Network Process (Analitik Ağ Prosesi)
ATCE	: Apparent Tardiness Cost with Ergonomic Factors (Ergonomik Faktörlerle Görünür Gecikme Maliyeti)
BAUA	: Germany Occupational Safety and Occupational Medicine Agency's Evaluation Method (Almanya İş Güvenliği ve İş Hekimliği Kurumunun Değerlendirme Yöntemi)
CI	: Consistency Index (Tutarlılık İndeksi)
ÇKKV	: Çok Kriterli Karar Verme
CR	: Consistency Ratio (Tutarlılık Oranı)
DP	: Doğrusal Programlama
EAWS	: Ergonomic Assessment Work-Sheet (Ergonomik Değerlendirme Çalışma Sayfası)
HMD	: Job Strain Index (Hızlı Maruziyet Değerlendirme)
JSI	: Job Strain Index (İş Zorlanma İndeksi)
JSS	: Job Satisfaction Survey (İş Tatmini Doyumu Ölçeği)
KİSR	: Kas İskelet Sistemi Rahatsızlıkları
LMM	: Leitmerkmalmethoden (Almanya İş Güvenliği ve İş Hekimliği Kurumunun Değerlendirme Yöntemi-Değerlendirme Anahtarları)
MSDs	: Musculoskeletal Disorders (Kas İskelet Sistemi Rahatsızlıkları)
NASA-TLX	: National Aeronautics and Space Administration Task Load Index (Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi Görev Yüğü İndeksi)
NIOSH	: National Institute for Occupational Safety and Health (Ulusal İş Güvenliği ve Sağlık Örgütü Kaldırma Denklemi)
OCRA	: Occupational Repetitive Action (Mesleki Tekrarlı Hareketler İndeksi)
OWAS	: Ovako Working posture Assessment System (Ovako Çalışma Duruşu Analiz Sistemi)
REBA	: Rapid Entire Body Assessment (Hızlı Tüm Vücut Değerlendirme)
RI	: Random Index (Rassal İndeks)
RULA	: Rapid Upper Limb Assessment (Hızlı Üst Vücut Değerlendirme)
SWAT	: Subjective Workload Assessment Technique (Öznel İş Yüğü Değerlendirme Tekniği)
ZAP	: Zaman Ağırlık Puanı

ERGONOMİK KISITLAR ALTINDA İŞ YÜKÜ DENGELEMEYE YÖNELİK BİR MATEMATİKSEL MODEL ÖNERİSİ

ÖZET

Üretimde sürekliliğin sağlanması ve verimliliğin artırılması için kullanılan en önemli kaynak insan faktörüdür. Fiziksel ergonomik risk faktörlerinin, çalışanın iş tatminini ve verimliliğini olumsuz yönde etkilediği ve birikimli maruziyetlerle birlikte iş kazalarına sebep olduğu, hatta uzun vadede meslek hastalıklarına yol açtığı bilinen bir gerçektir. Bu riskler karşısında, çalışanda oluşan maruziyeti azaltmak, yasal sınırları geçmesini engelleyebilmek için iş rotasyon modelleri kullanılabilir.

Çalışmanın amacı, aynı vücut bölgesinin art arda kullanılmasından kaynaklanan kümülatif iş yükünü azaltmak için matematiksel bir model geliştirerek bir iş rotasyonu programı önermektir. Önerilen modelde kullanılan kriterler, BAUA/Almanya İş Güvenliği ve İş Hekimliği Kurumunun Değerlendirme Yöntemi kullanılarak ölçülen iş yükleri, çalışanların işe uygunlukları değerlendirme skorları ve iş istasyonlarının dinlenme yerine uzaklıklarıdır. Rotasyon yapılmayan işlerde; bazı işçiler sürekli yüksek iş yüküne maruz kalırken, bazıları da düşük iş yüküne maruz kalabilmekte ve vücudun aynı bölgesi yüksek maruziyet altında olabilmektedir. Önerilen bu iş rotasyon çizelgeleri, aynı vücut bölgesinde art arda yüksek iş yüklerine maruz kalmayı önler ve kümülatif günlük iş yükünde çalışanlar arası varyansı en aza indirir. Bu model, mühendislik çalışması için ek maliyet olmaksızın işle ilgili kas-iskelet sistemi rahatsızlıkları (KİSR) potansiyelini azaltmaya yardımcı olacaktır. Matematiksel model Cplex Studio paket programı yardımı ile çözülmüştür ve fiziksel ergonomik risk faktörlerini, çalışan uygunluğunu ve dinleme yerine gidiş-geliş esnasında harcanan zamanı dikkate alan kombine bir model olarak literatüre önemli bir katkı sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: BAUA, Doğrusal Programlama, İş Yüğü Dengeleme, Kas İskelet Sistem Rahatsızlıkları, Rotasyon Çizelgeleme.

A MATHEMATICAL MODEL RECOMMENDATION FOR BALANCING THE WORKLOAD UNDER ERGONOMIC RESTRICTIONS

ABSTRACT

The most important resource used to ensure continuity in production and increase efficiency is the human factor. It is a well-known fact that physical ergonomic risk factors affect the job satisfaction and productivity of the employee negatively and cause occupational accidents with cumulative exposures, and even cause occupational diseases in the long term. In the face of these risks, job rotation models can be used to reduce the exposure of the employee and to prevent them from crossing the legal limits.

The aim of the study is to propose a job rotation program by developing a mathematical model to reduce the cumulative workload caused by the successive use of the same body area. The criteria used in the proposed model are the workloads measured using the BAUA/Germany Occupational Safety and Occupational Medicine Agency's Evaluation Method, the evaluation scores of the employees' suitability for work, and the distance of the workstations to the resting place. In works without rotation; While some workers are constantly exposed to high workloads, others may be exposed to low workloads and the same area of the body may be under high exposure. These proposed work rotation schedules avoid exposure to sequentially high workloads in the same body region and minimize inter-worker variance in cumulative daily workload. This model will help reduce the potential for work-related musculoskeletal disorders (MSDs) without additional costs for engineering work. The mathematical model was solved with the help of the Cplex Studio package program and made a significant contribution to the literature as a combined model that takes into account the physical ergonomic risk factors, employee fitness and time spent during commuting instead of listening.

Keywords: BAUA, Linear Programming, Workload Balancing, Musculoskeletal Disorders, Rotation Scheduling.

1. GİRİŞ

İnsan ile makine arasında iş paylaşımı olarak da bilinen otomasyon sistemleri gelişen teknoloji ile birlikte her geçen gün gelişmektedir. Bu sistemler, yapılan çalışmaları kolaylaştırır da manuel emek gücünün yoğun olarak kullanıldığı üretimlerin hala yaygın olduğu görülmektedir. Fiziksel iş gücünün yoğun olarak kullanıldığı işlerde çalışan kişilerde; bel, boyun, sırt, kol vb. bölgelerini etkileyen kas iskelet sistemi rahatsızlıkları sıklıkla görülmektedir. Yapılan işten kaynaklı hareket kısıtlılığı, bel ağrısı gibi yakınmalar ve işe gelmeme, fiziksel iş yükü fazla olan işlerde çalışan kişilerde sıklıkla karşılaşılan durumlardır. İşe bağlı hastalık nedenlerini %50'sini kas iskelet sistemi rahatsızlıkları oluşturmaktadır. İşe bağlı bu tür rahatsızlıkların oluşumunda ise çalışma esnasında tekrarlı hareketler, vücudun uygun olmayan çalışma duruşunda kullanımı ve ergonomik açıdan yetersiz çalışma koşulları etkili olmaktadır.

Ergonomik tasarım, iş gücü verimliliğini etkileyen en önemli etmenlerdendir. Etkin bir insan-makine uyumunu sağlayabilmek için iş istasyonlarının tasarımında ergonomik tasarım ilkelerinin göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Böylece çalışanlar için rahat bir üretim çalışma ortamı sağlanarak üretim sürecine daha etkin bir şekilde katılımı sağlanmış olacaktır.

İş rotasyonu, çalışanda oluşan monotonluğun azalmasına ve daha fazla bilgi edinmesine yardımcı olurken ergonomik ilkelere uygun tasarlanmamış iş istasyonlarında çalışanlarda oluşabilecek zorlanmayı azaltabilecek bir etkiye sahiptir. Ergonomik prensipleri dikkate alarak gerçekleştirilen ergonomik iş rotasyonu, çalışanların hangi işlere hangi periyotta atanacağını yanı sıra periyodik olarak farklı işlere atanma durumunda ergonomik iş yükü seviyelerinin de göz önünde bulundurulmasını sağlamaktadır.

Bu tez çalışmasında, otomotiv sektöründe yoğun emekle çalışan işçilerin, ergonomik iş yüklerini dikkate alarak, kas iskelet sistemi rahatsızlığı problemlerini azaltmak amaçlanmaktadır. Aynı vücut bölgesinin art arda kullanımından kaynaklanan kümülatif iş yükünü azaltmak amacıyla bir iş rotasyonu planı için bir matematiksel model önerisi geliştirilmektedir. Model, klasik iş çizelgeleme amaçlarının yanı sıra işin gerekliliğine göre, işçilerin kişisel özelliklerinin işe uyumu değerlendirilerek, fiziksel iş yükünü ve çalışanlar arasındaki iş dağılımını dengelemeyi amaçlayan iş rotasyonu önerisinde

bulunulmaktadır. İşin gerekliliğine göre değerlendirilen kişisel kriterler; boy, yaş, deneyim, yetenek ve sağlık faktörleridir. Bu kriterler uzman kişiler tarafından değerlendirilecek ve işçilerin işe uygunluk skorları elde edilecektir. Bu beş kişisel kriterle birlikte modele eklenen diğer faktörler; BAUA/Almanya İş Güvenliği ve İş Hekimliği Kurumunun Değerlendirme Yöntemi (LMM) kullanılarak ölçülen iş yükleri, ve iş istasyonlarının dinlenme yerine uzaklıklarıdır.

Bu çalışma ile işletmedeki çalışan kapasitesi arttırılarak birden fazla iş istasyonunda çalışmasına izin verilmesi ve böylece daha verimli kullanılması hedeflenmektedir. Böylece çalışanların hem iş yetenekleri hem de fiziksel iş yükü seviyeleri dikkate alınarak rotasyona uğraması ve kas iskelet sistemi rahatsızlığı şikâyetlerinin azalması sağlanabilecektir.

2. KAS İSKELET SİSTEMİ RAHATSIZLIKLARI

Kas, kıkırdak, sinir, lif, dirsek, bağ ve kan damarlarını etkileyen rahatsızlık ve buna bağlı yaralanmalara Kas İskelet Sistemi Rahatsızlıkları (KİSR) denir (Sakalar, 2018). İş yerindeki tehlikelerin neden olduğu rahatsızlık ve yaralanmalar ise İşle İlgili Kas İskelet Sistemi Rahatsızlıkları olarak adlandırılmaktadır (Felekoğlu ve Taşan, 2017). Tendonları, kasları, damarları ve sinirleri etkileyen işe bağlı KİSR doktora gitme sıklığı bakımından ilk sırada yer almaktadır Çalışma esnasında; tutma, kavrama, eğilme, bükülme gibi hareketlerin tekrarlı şekilde yapılması nedeniyle oluşmaktadır. KİSR'e neden olan risk faktörleri; bireysel, psikososyal ve işe bağlı faktörler olarak sınıflandırılmaktadır (Acar ve diğ., 2019).

İşle ilgili KİSR'lere neden olan ergonomik faktörler arasında fiziksel faktörler (tekrarlı hareketler, kuvvet eforu, sabit ve uygunsuz duruşlar), çevresel faktörler (soğuk veya yüksek sıcaklık, titreşim, zayıf aydınlatma, yüksek gürültü seviyeleri, kimyasallar), organizasyon ve psikososyal faktörlerle ilişkili olan faktörler (fazla çalışma, hızlı ve tekrarlayan monoton çalışma, akranlardan ve amirlerden destek alamama) yer almaktadır (Özcan ve Peker, 2007; Ayanoğlu, 2007; Büker ve diğ., 2006).

Ağırlık kaldırırken uygulanan aşırı kuvvet, kaslar ve tendonlar için risk oluşturabilir. Kaldırma, taşıma, itme, tutma, çekme, tutma, hareketli bir cismi tutma, kaygan cisimleri tutma, titreşimli alet veya ekipman kullanma, kötü giyilmiş veya uygun olmayan eldivenler risk oluşturabilir. İnsan vücudu biyomekanik olarak farklı duruşlara ve aktivitelere uyarlanmıştır. İyi çalışma şekli sıklıkla pozisyon değişikliği ve sabit durmadan hareket etmektir. Aktif olarak kasılacak şekilde tasarlanan kaslar eğer kaslar uzun süre gergin kalırsa pompalama ve kan akışı da bozulacaktır. Uzun süreli eğik bir pozisyonda durulduğu zaman kaslarda yorgunluk başlar ve pompalama eksikliğinden dolayı kan akışında azalmaya neden olabilir. Aynı pozisyonda çalışırken, vücudun pozisyonu nedeniyle bazı bölgeler daha büyük risk altındadır. En riskli bölgeler sırt, bel, boyun, omuz, dirsek, bilek ve parmaklardır (Yörükoğlu, 2007).

İşle ilgili faaliyetlerden kaynaklanan KİSR, sanayileşmiş toplumlarda sıklıkla rastlanan bir sağlık sorunudur ve önde gelen bir sakatlanma nedenidir. Öncelikle, bel, boyun, eller, bilekler, dirsekler ve omuzlarda meydana gelir. Çalışanın iş tatminini, moralini ve çalışma

verimini olumsuz yönde etkileyen KİSR'ler, iş günü kaybı ve zarara karşılık sağlık sigortası ödemeleri nedeniyle topluma yüksek bir maliyete neden olmaktadırlar (Özcan ve Peker, 2007).



3. ERGONOMİ VE ERGONOMİK RİSK DEĞERLENDİRME

3.1. Ergonomi Bilimi

Yunanca’da iş anlamına gelen “Ergon” ve kanun ya da prensip anlamına gelen “nomos” kavramlarının bir araya gelmesiyle ergonomi kavramı oluşmuştur. Ergonomi ise insan-makine sistemlerinde insanların makine ve çevresiyle olan ilişkisini, ruhsal ve bedensel özelliklerini ve çalışma koşullarındaki limitleri araştıran, yaptığı araştırmalar sonucunda elde edilen veriler ile makine, iş ve iş çevresi koşullarının tasarım ve düzenlemesine uygulayan bir mühendislik dalıdır (Neşeli, 2016). Çalışma ortamında, çalışanların fiziksel ve mental yeteneklerini destekleyici düzenlemeler yapmak, kişisel motivasyonu artırır ve buna bağlı olarak çalışan verimliliği artacaktır. Çalışma sırasında kullanılan bir makine, nesne veya her türlü araç gerecin tasarımı ve üretiminde, kullanıcı duruş pozisyonları, güvenlik, sağlık ve tüm sistem ile uyumu dikkate alınması gereken önemli konulardır (Çoker, 2019).

“Ergonomi” kelimesi Avrupa ülkelerinde yaygın bir şekilde kullanılmaktayken Amerika’da bu konu “insan mühendisliği” olarak adlandırılmaktadır (Yüce, 2019).

3.1.1. Ergonomik Risk Faktörleri

Ergonomik risk faktörleri; yapılan işin sürekli tekrar edilmesi, kuvvete dayalı çalışma, kasları yoran şekilde çalışma pozisyonu, mekanik gerilme, olağan dışı sıcaklık ve titreşim sonucu KİSR’e sebep olabilecek risklerdir. Bu tür çalışma ortamlarında ergonomik düzenlemeler yapılmazsa bu rahatsızlıklar artabilir ve bunun sonucunda iş gücü kayıpları yaşanabilir. Çok yaygın olan vücut duruşları hakkındaki şikayetlerin azlatılabilmesi için ergonomi, çalışanlar ve iş yeri arasında iyi bir etkileşim sağlanmalıdır (Aksüt ve diğ., 2020).

3.1.1.1. Fiziksel Ergonomi

Fiziksel ergonomi, insanın anatomik, antropometrik, biyolojik ve fizyolojik özellikleri ve yapılan fiziksel aktivite ile ilgilidir (Adnan ve Ressang 2016; Karwowski, 2006). Fiziksel ergonomik faktörlerin risklerinin derecesi ise fiziksel iş yükünün sıklığına, süresine ve yoğunluğuna bağlıdır (Otto ve Battaia, 2017).

a. Uygun duruş: Vücudun farklı bölümlerindeki pozisyon olarak ifade edilen duruş, en sık belirtilen fiziksel risk faktörüdür. Tekrarlanan veya uzun süreli yapılan uzanma, çömelme, bükülme, sabit pozisyonunda durma, el ve kolların başın üzerindeki yükseklikte çalışması uygun duruş hareketlerini oluşturur (Jaffar ve diğ., 2011).

b. Malzeme kullanımı: Bir iş yaparken kullanılan malzeme ile vücudun teması ve keskin köşe, malzeme kenarına maruziyeti gibi risk faktörüdür (Beno, 2013). Mufti ve diğ. (2019), KOBİ'ler için yapılan araştırmalarda ergonomik faktörlere uygun olmayan çalışma araçlarıyla çalışmadan kaynaklı yaralanma risklerinin göz ardı edildiğinden bahsetmektedirler.

c. Tekrarlayan hareketler (monoton çalışma): Çalışma süresi 30 saniyeden az veya yapılan iş boyunca %50'den fazla aynı temel hareket yapılıyorsa bu çalışma monoton bir çalışma olarak ifade edilir. Bu tür çalışmalarda sürekli aynı kas grubu ile çalışma yapıldığından diğer risk faktörleri (uygun duruş, ağır kuvvet gibi) ortaya çıkmaktadır (Beno, 2013). Tekrarlı hareketler aynı kas grubunun aşırı kullanımına bağlı olarak bu kaslarda yorgunluğa ve KİSR'in ortaya çıkmasına neden olabilmektedir (Jaffar ve diğ., 2011).

d. İş yeri düzeni: Çalışma alanının uygun düzeninden kaynaklı, çalışan üzerinde oluşan rahatsızlık hissi, çalışan sağlığında olumsuz etkiye ve iş kazasına neden olabilir. Örneğin uygun olmayan çalışma alanı, sırt, boyun, kol ve bel ağrısına, göz yorgunluğu vb. rahatsızlıklara neden olabilir (Mufti ve diğ., 2019).

e. Statik duruş: Uzun süreli statik duruş KİSR'e sebep olabilecek durumlar ortaya çıkarabilir. Uzun süreli statik duruş altında büzülen kaslarda enerjinin düşmesiyle kan akışında problem oluşacak ve buna bağlı olarak kaslarda hızlı yorulma ve ağrı ortaya çıkacaktır. Kasılma gücü azalacağından çalışanda iş gücü performansı kaybına neden olacaktır (Mulyati ve diğ., 2019).

f. Kuvvet: Belirli bir hareketi veya eforu gerçekleştirmek için harcanan fiziksel efordur. Kuvvet, itme-çekme, kaldırma, taşıma veya indirme gibi çeşitli hareketleri yapmamızı sağlar. Vücut duruş pozisyonuna, aktivite türüne, çalışılan nesnenin ağırlığına ve çalışma süresine bağlı olarak kuvvet miktarı da değişmektedir. Çalışma esnasında uygulanan

yüksek kuvvet; bel, boyun, omuz, kol, bilek ve ellerde rahatsızlıklara neden olabilir (Jaffar ve diğ., 2011).

h. Sıkışma: Sert ya da keskin bir nesne ile kemik arasına yumuşak dokunun sıkışmasıdır. Dokularda meydana gelen sıkışma nedeniyle, kan akışı ve sinir iletimi azalır ve tendomlar zarar görebilir. Ergonomik iyileştirmeler sayesinde sıkışmalar önlenabilir (Ayanoğlu, 2007).

ı. Aşırı güç: Ağır malzemelerin kaldırılması, itilmesi veya çekilmesi sırt ve omuzlar için rahatsızlık oluşturun birer risktir. Her çalışanın ağır kaldırma kapasitesi farklıdır ve eğer çalışan kapasitesinden daha ağır bir malzeme ile çalışıyorsa bu yüksek derece yaralanmalara neden olabilir (Li ve diğ., 2019).

j. Temas gerilmeleri: Kavrama veya dengeleme esnasında kesici nesneler veya ekipmanlar tarafından oluşan çarpma veya yaralanmalar olarak ifade edilmektedir. Bir kapağı kapatmak için elimizle uyguladığımız kuvvet mekanik gerilmelere neden olabilir (Jaffar ve diğ., 2011).

k. Uzun süre ayakta kalma: Çalışan gücünün yoğun olarak kullanıldığı çalışma alanlarında uzun süreli ayakta durmayı gerektiren işler yapılmaktadır. Bu tür çalışmalar; sırt, bacak ve ayak ağrısına neden olmaktadır. Yarı oturur pozisyonda, çalışanın bir yere dayanarak iş yapmasını sağlamak, yorulma önleyici paspas kullanmak ve özel ayakkabı tabanlılık kullanmak vb. ergonomi çalışmalarıyla bacak ve ayaklardaki gerginlik azaltılabilir (Li ve diğ., 2019).

l. Uzun süre oturarak çalışma: Fizyolojik bakımdan birçok olumsuz etkisi bulunan uzun süreli oturma eylemi doğru yerleştirilmemiş bir düzenek üzerinde gerçekleştiriliyorsa omurga eğriliğinin değişimi gibi tehlikeli rahatsızlıklara neden olabilmektedir (Altıparmakogulları ve Cifter, 2012). Sürekli oturarak yapılan çalışmalarda 1 saatlik çalışma da bir kez kısa bir ara verilmesi önerilmektedir (Beno, 2013).

m. İyileşme süresi: Tek taraflı uzun süreli maruziyet nedeniyle oluşan rahatsızlıkları önleyebilmek için her iş yüklemesinden sonra yeterli dinlenme sağlanmalıdır (Beno, 213).

3.1.1.2. Bilişsel Ergonomi

Bilişsel ergonomi; insan ve sistem etkileşimi arasındaki özellikleri, sınırları ve yetenekleri araştırarak geliştirdiği ilkelerle sistemin düzenlenmesini, tasarlanmasını ve insan-makine etkileşimini uyumlu hale getirilmesini sağlayan bir disiplindir. Zihinsel iş yükü, iş stresi, karar verme, insan-makine etkileşimi, performans, iş stresi faktörlerinin incelenmesi bilişsel ergonominin konuları arasında yer almaktadır (Aksüt ve diğ., 2020).

3.1.1.3. Örgütsel Ergonomi

Politika ve süreçler, örgütsel yapılar gibi sosyoteknik sistemlerin optimum duruma getirilmesiyle ilgilenmektedir. Ekip yönetimi, ekip çalışması, ekip çalışma saatleri, iletişim, toplum ergonomisi gibi örgütsel konular başlıca ilgilendiği konulardır (Adnan ve Ressang 2016; Karwowski 2006).

3.1.1.4. Çevresel Faktörler

İş ortamının çevresel koşulları; gürültü, sıcaklık, nem, havalandırma, aydınlatma, titreşim, kimyasallar, tozlar olarak sınıflandırılan ve iyileştirme sağlandığında çalışan verimliliğini olumlu yönde etkileyen faktörlerdir.

3.1.1.5. Kişisel Faktörler

Kişiden kişiye değişen; yaş, boy, cinsiyet, yetenek, sağlık durumu gibi faktörlerdir. İş yeri faktörlerine bağlı olarak bazı çalışanlar uzun süreli maruziyete bağlı kalırken bazılarında ise maruziyet az olabilir. Uzun süreli maruziyet kişide hasara sebep olabilir (Beno, 2013).

3.1.1.6. Psikososyal Faktörler

Bireysel yaşam koşulları, gelir düzeyi, iş memnuniyetsizliği, iş stresi, mesleki beklenti, yönetim, ücret çalışanın ruh ve sağlığını etkileyen temel etmenlerdir. İş ve yaşam dengesi bu etmenlere bağlı olarak olumsuz etkilenen kişilerde dikkatin azalması, işe yoğunlaşamama vb. sebeplerden dolayı iş kazalarına veya meslek hatalıklarına neden olabilmektedir (Aksüt ve diğ., 2020).

3.1.2. Ergonomik Risk Değerlendirme

Çalışma ortamında işle ilgili KİSR'in azaltılması ve oluşumunun önlenmesi bakımından ergonomik risk faktörlerinin değerlendirilmesi önemli bir unsurdur. Çalışma esnasında kullanılan; yükün ağırlığı, özellikleri, titreşim ve aydınlık gibi çevresel faktörlerin yanı sıra kişiye özel değişebilen yaş, fiziksel durum, boy vb. etmenler de KİSR'e neden olan ergonomik risk faktörleri arasında yer almaktadır. Ergonomik risk değerlendirme çalışmalarında genellikle riskler tek tek değerlendirilmektedir, ancak faktörlerin birbirine etkisi de göz önünde bulundurularak birleşik etkileri de değerlendirilmelidir (Taşan ve Felekoğlu, 2019).

Risk değerlendirme yöntemleri çok çeşitli olmakla beraber şu üç başlığın altında kategorize edilmişlerdir (David, 2005):

- Çalışanlar tarafından yapılan öznel değerlendirme teknikleri,
- Gözleme dayalı teknikler,
- Direkt ölçümler.

Bu üç yöntem sınıfı geçerlilik ve güvenilirlikleri açısından değerlendirildiklerinde direkt ölçümler, gözlemlerden ve kişisel anket yöntemlerinden daha iyidir (Özel ve Çetik, 2010).

3.1.2.1. Fiziksel İş Yükü-Ergonomik Risk Değerlendirme Yöntemleri

Bir çalışma ortamının ergonomik açıdan incelenmesi, ergonomik risklerin belirlenmesi ve risk faktörlerine karşı maruziyet seviyesinin belirlenmesi için ergonomik risk değerlendirme yöntemleri kullanılmaktadır (Sökmen ve Yılmaz, 2019).

Literatürde sıklıkla karşılaşılan risk değerlendirme yöntemlerinden bazıları aşağıda verilmiştir:

a. Ulusal İş Güvenliği ve Sağlık Örgütü (NIOSH) Kaldırma Denklemi: Çekme-itme veya taşıma işlerinden farklı olarak NIOSH denklemi ile değerlendirilebilen bir yöntemdir. Bu yöntemde kişinin kaldırma yeteneği, mekanik veya metabolik etmenlerle sınırlı olduğu kabul edilir. Buna bağlı olarak, vücudun biyomekanik kuvveti veya tekrarlanan kaldırma işi için gerekli enerji harcaması kısıtlayıcı etmen olabilir (Akkale, 2014).

b. İş Zorlanma İndeksi (JSI): Distal üst ekstrem bozukluklarının, gelişme riski olup olmadığını tahmin etmek için kullanılan bir yöntemdir (Stevens ve diğ., 2004). Bu yöntemde el, bilek ve dirsek duruşları göz önünde bulundurularak; duruş şekli, hareketin sıklığı ve uygulanan kuvvet değerlendirilmektedir, ancak yük ve titreşim dikkate alınmamaktadır. Zorlanmanın şiddeti, süresi, işin hızı ve günlük süresi, el-bilek duruşu ve dakika başına çaba ölçülerek hesaplanır (Sökmen ve Yılmaz, 2019). Tekrarlı el hareketlerinin olduğu küçük parçaların montajı, klavye kullanımı ve et paketleme gibi işlerin değerlendirilmesinde kullanılan bir yöntemdir (Moore ve Garg, 1995).

c. Hızlı Üst Vücut Değerlendirme Yöntemi (RULA): Ergonomik değerlendirme yöntemlerinden biri olup; boyun, gövde, üst kol-alt kol ve el bileklerinin işi yaparken gerekli olan biyomekanik ve postural yük gereksinimlerini dikkate almaktadır. Risk analizini yapan kişi; boyun, gövde, kollar, el bileği ve bacaklar için birer puan belirler. Risk değerlendirme puanlarını belirlemek için Rula tabloları kullanılır. Son olarak, uzuvların duruşuna göre puanlar birleştirilerek tablo değer üzerinden nihai Rula risk değeri bulunur (Neşeli, 2016).

d. Hızlı Tüm Vücut Değerlendirme Yöntemi (REBA): Bir çalışma duruşu Reba yöntemine göre değerlendirilirken vücut A (gövde, boyun, bacak) ve B (üst kol, alt kol, bilekler) olarak iki gruba ayrılır ve duruş açılarına göre Reba skoru belirlenir (Sağıroğlu ve diğ., 2015). Belirtilen her bir hareket veya duruş üst ve alt vücut için açılara ayrılmıştır. Toplam skor boyun, gövde ve alt ve üst uzuvların pozisyonlarının kombinasyonu ile hesaplanır. Reba yönteminde değerlendirilen diğer faktörler; kaldırılacak yükü kavrama şekli, yükün kolaylık derecesi, hareket ederken vücudun sabit olması veya dönme-bükülme hareketlerinin yapıp yapılmamasıdır. Reba tabloları ile değerlendirme yapılarak toplam Reba risk değeri bulunmaktadır (Kocabaş, 2009).

e. Mesleki Tekrarlı Hareketler İndeksi (OCRA): Sıklıkla ve tekrarlı taşımaların olduğu işlerin ergonomik risk hesaplamalarında kullanılan bir yöntemdir. Vücudun sağ ve sol bölümleri için ayrı ayrı değerlendirme yapılır. Omuz, dirsek, bilek ve el gibi temel üst vücut uzuvlarının çalışma sırasındaki duruşu ve hareketleri Ocra indeksi ile analiz edilir. Birden fazla iş yapılan istasyonlarda, işlerin birbiri üzerindeki etkisi dikkate alınarak tüm istasyon için kümülatif tek bir Ocra indeksi hesaplanır. Kaldırma ve taşıma işlerinin çok olduğu iş istasyonları için uygun değildir. Otomasyonlu malzeme aktarım sistemlerinin

olduğu, çalışanların hareketli bir konveyör etrafında çalıştığı iş istasyonları da kullanılır (Baykasoğlu ve Akyol, 2014).

f. Hızlı Maruziyet Değerlendirme (HMD): Bu yöntem, gözlemci ve çalışan olmak üzere iki değerlendirme bölümünden oluşur. Değerlendirme için kontrol listeleri kullanılır. Çalışanın sırt, omuz, kol, el, bilek ve boyun duruşları ile ilgili değerlendirme gözlemci tarafından yapılırken; kaldırılan ağırlık, harcanan süre, görsel dikkat, bir elle uygulanan maksimum kuvvet, taşıt ve titreşimli alet kullanma, hız ve stres faktörleri ile ilgili değerlendirme ise çalışan tarafından yapılmaktadır. Kontrol listelerinde yer alan sorulara verilen yanıtlara göre HMD puanı hesaplanır ve risk düzeyi belirlenir (Koç ve Testik, 2016).

g. Ovako Çalışma Duruşu Analiz Sistemi (OWAS): OWAS, sırt (4 duruş), kollar (3 duruş) ve bacaklar (7 duruş) için en yaygın çalışma duruşlarını ve taşınan yükün ağırlığını (3 kategori) tanımlar. Tüm vücut duruşu, bu vücut bölümleri tarafından dört haneli bir kodla tanımlanır. Bu 252 duruş, ergonomik değişiklikler için ihtiyaçları gösteren dört eylem kategorisi ile sınıflandırılmıştır. Değerlendirmeyi yapan uzmanlar; gözlem yolu ile sırt, kol, bacak ve yükün 4 dijit kod yardımı ile kaydını tutar. Her duruşta harcanan süre ve duruşu, görülme sıklığı değerlendirilir. Duruşlar farklı zaman aralıklarında kamera ile kaydedilip incelenerek değerlendirilir (Akay ve diğ., 2003).

h. Avrupa Montaj Analizi (EAWS): 1997 yılında General Motor Europe tarafından geliştirilen Otomotiv Montaj Çalışma listesinin geliştirilmiş halidir. Elle taşınan yüklerin neden olabileceği ergonomik risklerin değerlendirilmesi için kullanılan bir analiz yöntemidir. Vücudun duruşu, aletli-aletsiz taşıma, uygulanan kuvvet ve tekrarlı üst beden hareketleri için detaylı analiz yapılabilmektedir (Sökmen ve Yılmaz, 2019).

ı. LMM (Leitmerkmalmethoden) Almanya İş Güvenliği ve İş Hekimliği Kurumunun Değerlendirme Yöntemi: LMM yöntemi, manuel yapılan taşıma, yerleştirme, yer değiştirme ve yük kaldırma işleri için kullanılmaktadır. Bu yöntemin en ayırt edici değerlendirme süreci ilk adımda zaman ağırlığının belirlenmesidir. Zaman ağırlığının belirlenebilmesi için öncelikle işin; tutma, taşıma, kaldırma ya da yer değiştirme işlerinden hangisi olduğuna karar vermek gerekir. Ayrıca yöntem adımlarında biri olan konum ağırlığının belirlenmesi için de yükün gövdeye göre konumu, bedenden uzaklığı,

yük alırken eğilme veya uzanma olup olmadığı değerlendirilir. Yöntem uygulama adımlarında işin yapıldığı koşullar da değerlendirilmektedir. Aydınlatma, yükün ağırlık merkezinin değişkenliği, zemin yapısı gibi durumlar da değerlendirilen kriterler arasında yer almaktadır (Yavuzkan ve diğ., 2015)

Tablo 3.1’de fiziksel iş yükü ergonomik risk değerlendirme yöntemlerinin karşılaştırması yapılmıştır. Tüm vücut için en kapsamlı kullanılabilecek ergonomik risk değerlendirme yöntemleri HMD, REBA ve LMM yöntemlerdir. 6. bölümde problemde kullanılabilecek ergonomik risk değerlendirme yönteminin kararı detaylı olarak açıklanmıştır.

Tablo 3.1. Fiziksel iş yükü-ergonomik risk değerlendirme yöntemlerinin karşılaştırılması

Değerlendirme Tekniği	Maruziyet Bölgesi	Duruş	Yük/güç	Hareket frekansı	Süre	Titreşim
NIOSH	El ile malzeme elleçleme	√	√	√	√	-
JSI	Üst uzuv	√	√	√	√	-
RULA	Üst uzuv	√	√	√	-	-
OCRA	Üst uzuv	√	√	√	√	√
HMD	Tüm Vücut	√	√	√	√	√
REBA	Tüm Vücut	√	√	√	-	-
OWAS	Tüm Vücut	√	√	-	-	-
EAWS	Tüm Vücut	√	√	√	-	-
LMM	Tüm Vücut	√	√	√	√	-

3.1.2.2. Zihinsel İş Yükü-Ergonomik Risk Değerlendirme Yöntemleri

Belirli bir zamanda ve performansta, belirli bir kalite yapılması gereken “iş yükü” olarak tanımlanan iş miktarı; insanın becerileri, algısı ve alışkanlıklarından, çalışma koşullarından, fiziksel ve zihinsel iş gerekliliklerinden etkilenmektedir. Bireyin yaptığı işe karşı istek ve bağlılığını etkileyen önemli bir faktör olan algılanan zorluk derecesi zihinsel iş yükü olarak tanımlanmaktadır. Zihinsel iş yükü, bireyin sahip olduğu kaynak miktarına ve görevin gerektirdiği kaynak miktarına bağlı olarak değişebilmektedir.

Zihinsel iş yükündeki artış, performansı düşürücü bir etki yaratmaktadır bu da görevi yapma süresini ve hataları arttırmaktadır. Bir kişinin 8 saatlik iş gününde veya yıllarca devam edebilecek zihinsel iş yükü seviyesinin belirlenmesi gerekir. Fiziksel iş yükü belirlenirken, çalışma saatleri, üretim ve satış miktarı gibi ölçülebilir performans kriterleri kullanırken, zihinsel iş yükünün belirlenmesi için kabul görmüş bir metrik olmadığından; zihinsel iş yükünün belirlenmesi, fiziksel iş yükünün belirlenmesine göre daha kompleks ve zordur. Bunun yanı sıra zihinsel iş yükünün belirlenmesi, görev dağılımlarının optimum düzeyde yapılabilmesi, insan-makine sistemlerinin çıktı kalitesini arttırabilmek için çok önemlidir. Literatürde zihinsel iş yükü ölçüm yöntemleri; fizyolojik ve sübjektif ölçüm, görev ölçümü olmak üzere üç grupta toplanmıştır. Bu yöntemler arasında, işin yapılmasını en az etkileyen, en kısa sürede ve az maliyetle yapılabilen ölçüm tekniği sübjektif ölçüm yöntemleridir. Bu yöntemlerde; kişinin hissettiği iş yükünü derecelendirmesi veya ölçeklendirmesiyle zihinsel iş yükü belirlenir (Delice, 2016). Söz konusu sübjektif ölçüm yöntemleri aşağıda sıralanmıştır:

a. NASA İş Yükü İndeksi: Algılanan iş yükü; zihinsel ve fiziksel gereklilikler, çaba ve performans düzeyi, zaman baskısı ve başarısızlık hissi olmak üzere altı boyuta ayrılarak incelenmektedir. Uygulama iki aşamadan oluşur (Hart ve Staveland, 1988). İlk olarak çalışanlar 0-100 arasında puanlama yaparak altı boyut açısından değerlendirme yaparlar. Sonraki aşamada ise, tüm boyutlar ikili ikili karşılaştırılır. İkili karşılaştırmanın amacı, çalışana göre hangi boyutun işinde daha zorlayıcı, daha baskın olduğunu belirlemektir. Altı boyutu içeren 15 adetlik bir ikili karşılaştırma yapılır ve sonuca göre her bir boyutun kaç defa baskın olarak seçildiği belirlenir. Buna göre her boyutun ağırlığı hesaplanmış olur (Ekinci ve Can, 2018).

b. SWAT (özel iş yükü değerlendirme tekniği) ve JSS (iş doyumu ölçeği) Yöntemleri: SWAT tekniğinde; zaman, stres ve çaba baskısı olmak üzere üç faktör dikkate alınır. Analiz edilen işe bağlı olarak, bu üç faktör; düşük (1), orta (2) ve yüksek (3) olacak şekilde puanlandırılır. Zaman baskısı faktörü, çalışanın görevini yaptığı sırada boş zamanının kalıp kalmadığını belirler. Çaba baskısı faktörü; çalışanın görevini yaparken zihinsel fonksiyonlarını ne derece yoğunlukta kullandığını analiz eder. Stres baskısı faktörü; çalışanın görevini yaparken hissettiği risk, başarısızlık ve endişe düzeyini analiz etmektedir.

JSS ise 1994 yılında Paul E. Spector tarafından geliştirilmiştir. JSS, 36 madde ve 9 alt ölçekten oluşan bir analiz yöntemidir. Çalışan, 36 maddenin her biri için “hiç katılmıyorum ve tamamen katılıyorum” arasında değişen altılı bir skalada cevap vererek gerçekleştirir.

c. Cooper-Harper Puanlama Ölçeği (Cooper-Harper Rating Scale): Bu ölçek, uçak kullanma kriterlerini hesaplamak ve pilotun görev için yeterliliğini değerlendirmek için oluşturulmuş bir standarttır. İş yükünün görev performansına etkisini belirlemek için geliştirilmiştir. Connor ve Wierville (1983) tarafından yapılan çalışmada, uçuş sırasında artan rüzgar şiddetine bağlı olarak uçağın kontrolünü sağlama görevinin de zorluk derecesinin arttığı ve bunun ölçeğin skorlarına yansıdığı belirlenmiştir. Karar ağacı biçimine sahip bir değerlendirme yöntemi olan Geleneksel Cooper Harper ölçeği, daha sonra Modifiye Cooper Harper ölçeği olarak iş yükü ölçümü olarak kullanılmaya başlanmıştır. Operatörlerin aktif olarak kontrol etmeleri gerekmeyen ancak daha sık izleme, değerlendirme ve problem çözme işlemlerinin yapıldığı otomatik ve karmaşık sistemlerde kullanılmaya uygun olacak şekilde geliştirilmiştir.

d. SWORD (Subjective Workload Dominance Technique - Öznel İş Yüğü Üstünlük Tekniği): SWORD tekniği, farklı görev koşullarının iş yükünü karşılaştıran bir dizi göreceli yargı kullanır. Sübjektif zihinsel iş yükü değerlendirmelerine ilişkin göreceli yargı yaklaşımları biraz nadirdir. En yaygın teknikler mutlak bir tahmin yaklaşımı kullanır, yani tipik teknik, değerlendiriciden başka bir görevle karşılaştırılmadan soyut bir iş yükü ölçeğinden bir göreve bir değer atamasını ister.

e. Bedford Ölçütü: Roscoe (1984) tarafından Bedford iş yükü ölçeği Cooper- Harper Skalasının geliştirilmiş halidir. Bu ölçekle pilotların iş yükü ölçümleri yapılmış ve iş yükü değerleriyle kalp atım hızları arasında doğrusal bir ilişki olduğu bulunmuştur (Can ve diğ., 2015).

4. YÖNTEMLER

Tez kapsamında geliştirilen matematiksel model, tam sayılı doğrusal programlama matematiksel modelleme mantığı kullanılarak geliştirilmiştir. Modelde kullanılan, işçinin işe uyumluluk fonksiyonu, oluşturan kriterlerin ağırlıklarının belirlenmesi noktasında ise çok kriterli karar verme (ÇKKV) yöntemlerinden olan AHP (Analitik hiyerarşi prosesi) yönteminden faydalanılmıştır. Çalışmanın bu bölümünde, geliştirilen matematiksel modelde kullanılan teknik hakkında bilgi verilmesi amaçlanmıştır. Tez çalışmasında modele eklenen fiziksel iş yükü ölçüm yöntemlerinin matematiksel temelleri ve hesaplamalarına ilişkin detaylı bilgiler 7.bölümde verilmiştir.

4.1. Matematiksel Modelleme

Gerçek vaka problemlerinde istenilen amacı en iyi şekilde sağlayabilmek için matematiksel denklemler ile model çözümünü sağlamaya çalışan ilk çalışmalar 1947 yılında Danztig tarafından geliştirilmiştir. Bir matematiksel modelde amaç fonksiyonu, kısıtlar ve karar değişkenleri olmak üzere üç ana eleman vardır (Babacan, 2015). Bu yaklaşımın amacı, kısıtlı kaynakların alternatif faaliyetler arasında iyi şekilde dağılımının belirlenmesidir (Winston ve Goldberg, 1994). Basit ve genel bir matematiksel modelin eşitlikleri aşağıdaki verilmiştir:

$$\min Z = \sum_i c_{ij} * x_{ij} \quad (4.1)$$

$$\sum_i a_{ij} x_{ij} \geq b \quad (4.2)$$

$$x_{ijt} \geq 0 \quad (4.3)$$

Örnek verilen matematiksel modelin amaç fonksiyonu bir minimizasyon problemidir.

c_{ij} : Amaç fonksiyonundaki karar değişkeni katsayıları

a_{ij} , x_{ij} , b : sırası ile, kısıtların teknolojik katsayılarını, karar değişkenini ve sağ taraf sabitini göstermektedir.

Eşitlik 4.1 modelin amaç fonksiyonudur. Amaç fonksiyonu en büyükleme (maksimizasyon) ya da en küçükleme (minimizasyon) biçiminde olabilir.

Eşitlik 4.2 modelin kısıt setidir. Kısıt setleri, küçük eşit veya büyük eşit şeklinde olabilir.

Eşitlik 4.3 modelin karar değişkenlerine ait işaret kısıtlarıdır (Adem, 2020).

Matematiksel modellemenin amacı; gerçek dünyanın farklı yönlerini tahmin etmek, açıklamak, tanımlamak ve anlamaktır. Matematiksel modelleme en genel anlamda gerçek hayat durumunun matematik diline aktarılma ve matematiksel olarak ifade edilme sürecidir. Bir model; bütünü oluşturan parçaları ve bu parçalar arası etkileşimin nasıl olduğunu gösterir, temsil ettiği sisteme benzer olmasına karşın gerçek sistemden çok daha basittir, gerçek sisteme mümkün olduğunca yakın olmalı ve onun çoğu özelliğini taşımalıdır.

Modelleme yapılırken aşağıdaki dört ilke dikkate alınmalıdır:

Model iyi seçilmeli; doğru modeller en karmaşık problemleri çözmede yardımcı olabileceği gibi, yanlış model seçimi yanıltabilir ve ilgisiz konulara odaklanılmasına neden olabilir.

Farklı detay seviyelerine sahip modeller olmalı, bazen binaya üstten bakarak genel yapısının incelenmesi gerekebilir, bazen de bir odanın yer döşemesi ile ilgilenebilir.

En iyi modeller gerçekle bağlantılı olanlardır; bina için tasarladığınız fiziksel bir model gerçek hayatta olması gerektiği gibi davranmıyorsa, o modelin pek de değeri yoktur.

Yalnız bir model için hiçbir zaman yeterli değildir; örneğin bir bina yapıyorsanız, zemin planlarının yanında elektrik, ısıtma ve su gereksinimleri için de planlar oluşturmalsınız.

Matematiksel model geliştirme aşamaları:

a. Problemin tanımlanması: Karar vericinin ulaşmak istediği bir amacının olması, bu amaca ulaşmada izlenebilecek alternatif stratejilerin bulunması ve alternatifler içinden hangisinin amacı gerçekleştirebileceği konusunda kuşku içinde bulunulması gerekmektedir. Ancak bu koşullarda bir problem varlığından söz edilebilir. Bu aşamada; amaçların ne olduğu ve problemin ele alınış kapsamı değerlendirilir ve sorgulanır.

b. Sistemin gözlenmesi: sistem gözlemlenir ve probleme etki eden parametreler tahmin edilmeye çalışılır. Bu amaçla veri derlemesi, bu adımın en önemli kısmını oluşturur. Tahmin değerleri sabit sayılar olarak işleme tabi tutulurlar ve matematiksel modelin geliştirilmesinde kullanılırlar. Problem elemanlarının duruma en uygun biçimde belirlenebilmesi için sistem yaklaşımı kullanılır. Modelin geliştirilme sürecinin bu aşamasında; hangi verilerin nasıl elde edileceği, sistemin farklı parçalarının birbiriyle nasıl bir etkileşim içinde olduğu vb. sorulara cevap aranır.

c. Modelin geliştirilmesi: Bir sistemin davranışlarıyla ilgili kuralların matematiksel olarak ifade edilmesiyle matematiksel modeller kurulur. Yöneylem araştırmasında karşılaşılabilecek matematiksel model türleri, ilgilenilen karar probleminin yapısına göre şekillenir. Bu aşamada hangi tür matematiksel model kullanılmalı, kurulan model problemi tam olarak ifade edilebiliyor mu ve modelin karmaşıklığı durumları incelenir.

d. Modelin çözülmesi: Kurulan matematiksel model veri girişi ile çözülür.

e. Modelin geçerliliğinin gösterilmesi: Sayısal model, analiz edilen sistem ile tutarlı olmalıdır. Giriş verilerini değiştirerek, kurulan modelin sonuçlarıyla sistemin kendi çıktıları karşılaştırılır, sistemi çok iyi bilen uzmanlar sistemle model arasındaki benzerlik ve farklılıkları bulur, geçmiş veriler model üzerinde denenerek model sonuçları, gerçek sisteme ait sonuçlarla karşılaştırılır. Eğer çözüm sistemin geçmiş dönem sonuçlarını aynen veya daha olumlu bir şekilde sağlıyorsa, modelin geçerli olduğu kabul edilir. Eğer sistemin geçmiş dönem sonuçları yoksa simülasyondan yararlanılır.

4.2. Matematiksel Model Türleri

Eğer karar değişkenleri üzerinde hiçbir sınırlama yoksa kısıtsız modeller ortaya çıkar, en azından bir sınırlama olması kısıtlı modelleri ortaya çıkarır. Gerçek hayatta genellikle kısıtlı problemler ortaya çıkar.

Eğer problem tek bir dönem için çözülecekse statik model, birden fazla dönem göz önüne alınarak çözülecekse dinamik model ortaya çıkar. Dinamik modeller için kullanılan yaklaşım dinamik programlamadır.

Problemde birden fazla amaç varsa çok amaçlı bir problem haline gelir. Bu tür problemler için kullanılan yaklaşım genellikle hedef programlamadır.

Eğer tüm karar değişkenleri pozitif reel (gerçek) değerler alıyorsa sürekli optimizasyon problemi söz konusudur. Sürekli optimizasyon problemleri doğrusal programlama yöntemi ile çözülür. Sürekli optimizasyon modelinde en azından bir fonksiyonun doğrusal olmaması durumunda ise doğrusal olmayan programlama yöntemi kullanılır.

Tüm karar değişkenlerinin tam sayılı değerler alması gerekiyorsa kesikli optimizasyon problemi olarak ele alınır ve çözüm için tam sayılı programlama yöntemi kullanılır. Bazı karar değişkenlerinin reel, bazılarının tamsayı değer alması durumunda ise karışık kesikli optimizasyon problemi halini alır.

Eğer karar değişkenlerinin kombinatorial seçenekleri söz konusuysa kombinyonel optimizasyon problemleri ortaya çıkar. Kombinyonel optimizasyon problemlerinin belirli bir boyuta kadar olanı tam sayılı programlama yöntemi ile çözülürken, orta ve büyük boyutlu problemlerin sezgisel yöntemlerle çözülmesi gerekmektedir.

4.3. Doğrusal Programlama

Klasik doğrusal programlama (DP) optimizasyon (en iyileme) problemlerinin çözümünde kullanılan bir araçtır. Alternatif hareket tarzlarından birini seçmek yani karar almak sadece insanların değil aynı zamanda işletmelerin de karşılaştıkları bir durumdur. İşletmelerin çözüm getirmek zorunda kaldıkları karar problemleri, esas itibariyle kıt kaynakların rakip faaliyetler arasında optimum (en uygun) şekilde dağıtılması problemleridir. Kısaca karar verme bilimi olan yöneylem araştırması alanında karar verme tekniği niteliğinde yaygın olarak kullanılan matematiksel modellerden birisi de klasik doğrusal programlamadır (Seçme, 2005).

Bir doğrusal programlama problemi genel itibari ile amaç fonksiyonu ve doğrusal sınır/sınırların yer aldığı iki kısımlı bir matematiksel ifadedir. Bu matematiksel ifade ile bir amaç ya maksimize yada minimize edilir. Doğrusallık ifadesi modelde yer alan tüm değişkenler (fonksiyonlar) arasındaki ilişkinin doğrusal olmasından kaynaklanmaktadır. Doğrusal sınırların oluşturduğu kesişim kümesinden yola çıkılarak mümkün çözümler ya da uygun çözüm alanı belirlenir. Belirlenen uygun çözüm alanı ise amaç doğrultusunda

en iyilemeye çalışılır. Doğrusal programlama ile bağımsız değişkenlerden oluşan bir dizi fonksiyon ile yine bir dizi bağımsız değişkenlerin bir fonksiyonu olan bağımlı değişkenin optimal değeri belirlenmeye çalışılır. Bir başka ifade ile doğrusal programlama, belirli bir amacı en iyilemek maksadıyla sınırlı kaynakların nasıl dağıtılması gerektiğine çözüm arayan bir karar verme aracıdır. (Seçme, 2005).

4.3.1. Doğrusal Programlamanın Dayandığı Varsayımlar

Bugünkü doğrusal programlama modeline uygun olan girdi çıktı analizi klasik optimizasyon yöntemlerinin programlama çözümünde yetersiz kalması üzerine 1930'da Leontief tarafından geliştirilmiştir (Babacan, 2015). 1930 ve 1940'lı yıllarda ise Hitcock ve Koopsmans, ulaştırma problemi çözümleri için DP modeli oluşturmuşlardır. Daha sonraki yıllarda ise 1940'da Kantirivich ve 1947'de Dazting DP problemleri için genel çözümler oluşturmuşlardır. DP günümüzde en yaygın kullanılan yöneylem araştırması yöntemlerindendir (Bostancı ve Demir, 2011).

DP, bir problemin hedefine giden yolda, en iyiye ulaşmak için bir karar verme yolu sunan, belirleyici bir matematiksel tekniktir. Diğer bir ifadeyle, belirlenen amaca ulaşmak için sınırlı kaynakların nasıl dağıtılacağına karar vermeyi sağlayan yardımcı bir araçtır. Doğrusal bir değişkeni minimize veya maksimize eden noktanın bulunması işlemi en iyi noktaya ulaşma sürecidir (Karabulut ve Deste, 2021).

Bir DP probleminin çözümünü ele almak ve modelini oluşturmak için bazı varsayımların sağlanması gerekmektedir (Seçme, 2005). Bu varsayımlar aşağıda açıklanmıştır:

Doğrusallık: Doğrusallık varsayımı, değişkenlerin amaç fonksiyonuna olan etkisinin doğrusal olduğu varsayımdır (Arda, 2010). Amaç fonksiyonundaki her karar değişkeninin amaç fonksiyonuna etkisi, karar değişkeninde olacak değişim değeri ile orantılıdır. Bu duruma örnek verilecek olursa; bir makine kapasitesi 300 birim/saat ise, bu makineden 2 saatte $2 \times 300 = 600$ birim ve 3 saatte $3 \times 300 = 900$ birim ürün elde edilmesi durumu doğrusal bir orantı olduğunu göstermektedir. Doğrusallık, orantılı olma ve katkı olarak iki özellikle ilgilidir.

Orantılı olma: Her bir karar değişkeninin hem amaç fonksiyonuna hem de diğer tüm kısıtlara etkisinin değişkenin kendi değeri ile doğru orantılı olması demektir.

Katkı: Amaç fonksiyonundaki tüm değişkenlerin ve tüm kısıtların toplam katkısının değişkenlerin kendi katkılarının toplamından oluşması şartıdır (Seçme, 2005).

Toplanabilirlik: Ayrı ayrı tüm faaliyetlerden elde edilen kar katkılarının toplamı tüm faaliyetlerden elde edilecek kazanca eşittir. Faaliyetler birbirini etkilemez (Arda, 2010).

Bölünebilirlik: Her karar değişkeni farklı bir değişkeni belirttiğinden rakip faaliyetler bölünebilir, yani karar değişkenleri kesirli değerler de alabilir (Özgüven 2003).

Belirlilik (Kesinlik): DP genel olarak gelecekteki faaliyetlerin seçiminde kullanıldığından parametreler gelecekteki koşulları göz önünde bulundurularak belirlenir. Buna göre belirlilik, kaynakların ve kısıt kaynakların mevcut miktarlarının önceden bilinmesi varsayımdır.

Negatif olmama: Negatif ürün eldesi mümkün olmadığından üretim düzeyi ve karar değişkenlerinin de negatif olmama durumudur. Ya sıfıra eşit ya da sıfırdan büyük değer almalıdır (Arda, 2010).

Bu varsayımların hepsinin sağlandığı durumlarda DP modeli kurulabilir. Her karar problemine bu varsayımlar uymadığı takdirde DP modelinin uygulanamayacağı görülmektedir (Seçme, 2005).

Bazı problemlerde bu varsayımlardan bazıları sağlanamayabilir. Örneğin insan bazlı olan planlama problemlerinde sonuçların tam sayılı elde edilmesi gerektiğinden bölünebilirlik varsayımı sağlanamaz. Böyle bir durumda DP'ye bir kısıt daha eklenir ve problem Tam Sayılı Doğrusal Programlamaya dönüştürülür.

- Tam Sayılı Programlama

Saf Tam Sayılı Programlama: Karar değişkenlerinin tümünün tam sayılı istendiği problemlerdir, eklenecek kısıt;

$X_i \geq 0$ ve Tam sayıdır.

Karma Tam Sayılı Programlama: Karar değişkenlerinden bazılarının tam sayılı değerler alması istenir, eklenecek kısıt;

$X_1, X_2 \geq 0$ ve X_1 ; Tam sayıdır.

Sıfır-Bir Tam sayılı Programlama: Karar değişkenleri sadece iki değer alabilir. (var-yok, evet-hayır, 1-0, doğru-yanlış, satın al- alma gibi), eklenecek kısıt;

$X_1, X_2 \geq 0$ ve ya 1'dir.

Karma Sıfır-Bir Tam sayılı Programlama: Karar değişkenlerinden bazıları sıfırdan büyük olduğu durumlarda diğer bazı değişkenler sadece iki değer alabilir. (var-yok, evet-hayır, 1-0, doğru-yanlış, satın al- alma gibi), eklenecek kısıt;

$X_1 \geq 0$ ve X_2 ; 0 veya 1 olur.

- Bulanık Tam Sayılı Programlama
- Hedef Programlama

gibi matematiksel modelleme metotları geliştirilmiştir (Babacan, 2015).

5. İŞ ROTASYON ÇİZELGELEME

Literatür çalışmaları incelendiğinde, personel çizelgeleme problemleri ile çalışan ilk araştırmacının Dantzig (1954) olduğu görülmektedir. Bu çalışmalar ilk halinden bu yana; yasal düzenlemeler, çalışma sistemlerinin ve işletme yapılarının değişmesi gibi nedenlere bağlı olarak farklılaşmıştır.

1980’lerde çalışanların performansını ve esnekliğini arttırmak için ortaya çıkan iş rotasyonu çizelgeleme modelleri; zamanla üretim maliyetlerini ve çevrim sürelerini azaltma vb. amaçlar için kullanılmaya başlanmıştır (Padula ve diğ., 2017). Son dönemlerde KİSR’i engellemek için de kullanıldığı görülmektedir (Frazer ve diğ., 2003; Mossa ve diğ., 2016; Sana ve diğ., 2019).

İş rotasyonu çizelgelemenin en genel tanımı, çalışanların belirli bir işler veya görevler arasındaki en uygun değişimin bulunması olarak ifade edilebilir. Amaç atama maliyetlerinin en küçüklenmesi olduğunda; günlük, haftalık veya aylık çalışan-iş eşleşmesini en düşük atama maliyetleri ile veren bir problem; amaç KİSR’in en aza indirilmesi olduğunda ise çalışanların maruz kaldığı işe bağlı riskleri en aza indirilmesini sağlayan bir problem olarak ifade edilecektir.

İş yükünün kas grupları arasında dağıtılmasına olanak sağlayan iş rotasyonun, kas iskelet sistemi rahatsızlıklarının önlenmesi için iyi sonuçlar verdiği bilinmektedir. Ekonomik ve uygulaması kolay olduğundan kas iskelet sistemi rahatsızlıklarının önlenmesi için kullanılmaktadır (Moussavi ve diğ., 2019).

İnsan iş gücü ile çalışma yapılan üretim sistemlerinde çalışan verimliliği ve iş tatminini artırıp monotonluğu azaltarak sistem verimliliğine olumlu etkiler sağlanabilmesi için iş rotasyon çizelgeleme çalışmalarına başvurulduğu literatürde sıklıkla görülmektedir (Mossa ve diğ., 2016).

İş rotasyon çizelgeleme çalışmalarının, KİSR’e neden olabilecek risklerin azaltılmasının yanında, çalışanların görev çeşitliliğinin arttırılabilmesi, işe bağlı monotonluğun ve stresin azaltılması ve bununla birlikte motivasyonun arttırılması, çalışanın değişime uyum sağlayabilmesi, işe devamsızlıklarının azaltılması gibi birçok faydası bulunmaktadır (Frazer ve diğ., 2003). Çalışanların farklı görevleri yapabilir olması işletme içinde tüm

görevlerde çalışabilecek çalışan kapasitesinde artış ve çalışma saatleri içerisinde farklı işlerle görev alan çalışanlarda monotonluğa bağlı iş kazalarında azalış sağlayacaktır.

İş rotasyonu çalışmalarıyla, iş yükünün çalışanlar arasında eşite en yakın olacak şekilde dağıtılması sağlanarak işle ilgili kas iskelet sistemi rahatsızlıklarının önüne geçmek mümkündür. İş rotasyonu sayesinde hep yüksek veya hep düşük iş yükü ile aynı kişinin çalışması engellenerek çalışanlar arasında dengeleme sağlanabilir. Aynı zamanda çalışma yasalarına göre belirlenen maruziyet limit değerleri de göz önünde bulundurularak iş rotasyonu sağlanabilir.

Carnahan, Redfern ve Norman (2000)'de yayınladıkları teknik bir notta, önerdikleri ergonomi temelli iş rotasyon modeli ile bu alanda geliştirilen ilk modeli sunmuşlardır (Adem, 2020). Çalışmalarında sırt incinme/zedelenme olasılığını azaltan iş rotasyonu için İş Zorlanma İndeksini (JSI) dikkate alan tam sayılı programlama modeli geliştirmiş ve ayrıca genetik algoritma sonuçlarından iş rotasyonu kuralı geliştiren kümeleme analizi ile sonuçları karşılaştırıp değerlendirmişlerdir.

5.1. 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 (Tablo 5.1).

Carnahan ve diğ. (2000), İş Zorlanma İndeksini (JSI) dikkate alan çalışmalarında literatürde yer alan herhangi bir risk değerlendirme metodunu kullanmamışlardır. Çalışmalarında, taşınan cismin ağırlığını, taşıma tekrar sayısını ve taşıma mesafesini minimize ederek iş çizelgesini bulmaya çalışan bir problem üzerinde durmuşlardır. Çizelgeleme için tam sayılı programlama modeli geliştirilmiştir. Modelin amaç fonksiyonu en büyük JSI değerini en küçüklemeyi amaçlamaktadır.

Lin ve diğ. (2001), montaj hattında ürün kalitesi ve ergonomik çalışma arasındaki ilişkiyi inceledikleri çalışmalarında, ergonomik risk faktörlerinin ürün kalitesi üzerindeki etkisini varyans analizi ile değerlendirmişlerdir. Çalışma zamanı ve vücut duruş riskleri

ergonomik faktörler arasında değerlendirilirken; haftalık kusur oranı hattan çıkan ürünün kalitesi olarak değerlendirilmiştir.

Jung ve Jung (2001), Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) yöntemi ve dilsel değişkenleri kullanarak çalışanların maruz kaldığı iş yükünü belirleyen bir iş yükü tahminleme modeli geliştirmişlerdir.

Topaloğlu ve Özkarahan (2004), daha önce dikkate alınmamış bir konu olan çalışan tercihlerinin önemsendiği bir konuyu dikkate alarak çizelgeleme problemlerine dahil etmişlerdir. Çalışma arkadaşı ve iş seçiminin çalışanda motivasyon ve buna bağlı olarak verim artışına neden olabileceğine dikkat çekmişlerdir. Bu konuyu amaç fonksiyonu olarak ele alıp çizelgeleme problemlerini modellemişlerdir.

Seçkiner ve Kurt (2005), iş yükünü minimize etmeyi amaçlayan modellerinde çalışanların tur ve rotasyon çizelgelerini bütünleşik bir şekilde değerlendirmişler ve modeli bir haftalık döngü olacak şekilde düzenlemişlerdir. Çalışmalarında radyografi teknisyenlerinin maruz kaldıkları radyasyon miktarı dikkate alınmıştır. Tur çizelgeleme modeli için Topaloğlu ve Özkarahan'ın (2004) önerdiği modelden faydalanmışlardır. Tur çizelgesinden elde edilen minimum çalışan sayısı rotasyon modeline kısıt olarak eklenmiştir. Önerilen model araştırmacıların kendi oluşturduğu rassal veriler üzerinde denenmiştir.

Yaoyuenyong ve Nanthavanij (2006), çalışmalarında endüstriyel çalışanlarda duyma kaybının öneminden bahsederek, günlük gürültü maruziyet seviyesini 90dB'i geçmeyecek şekilde çalışanların iş değişimi ile en az çalışan çalışan sayısını belirlemeye çalışmışlardır. Kendilerinin oluşturduğu 300 rassal test verisini hibrit çözüm yaklaşımı ile çözüp sonuçları değerlendirmişlerdir.

Asawarungaengkul ve Nanthavanij (2006), 0-1 tam sayılı matematiksel modelleme yöntemi ile bir işletmede gürültü kısıtlamalarını içeren ve gürültüye karşı alınabilecek önlemlerin maliyetini içeren bir iş rotasyon önerisinde bulunmuşlardır. Gürültü maruziyet seviyesini dikkate alarak beş makine ve dört çalışandan oluşan bir modeli rassal veriler üzerinde denemişlerdir.

Seçkiner ve Kurt (2008), karınca kolonisi optimizasyon tekniğini kullanılarak çalışmalarıyla iş rotasyonu çizelgeleme modelini kurarak etkinliğini değerlendirmişlerdir.

Aryanezhad ve diğ. (2009), çalışmalarında sırt ağrısına neden olabilecek potansiyelleri ve gürültü maruziyet değerini küçükleyecek bir iş rotasyon modeli geliştirmişlerdir. Modelin uygulaması için literatürde yer alan altı modelin verileri kullanılmıştır.

Jaber ve Neumann (2010), işçinin yorgunluğunu ve dinlenmesini dikkate alan ve karışık tam sayılı matematiksel modelleme yaklaşımı ile modellenen çalışmalarını LINDO programında çözdürmüşlerdir.

Nanthavanij ve diğ. (2010), kendi önerdikleri sezgisel bir yaklaşımla gürültü üst sınır değerini dikkate alan bir iş rotasyon modeli önermişlerdir. Çalışmalarında Yaoyuanyong ve Nanthavanij (2006) ile aynı gürültü formülünü kullanmışlardır.

Asensio-Cuesta ve diğ. (2012), çok kriterli genetik algoritma yaklaşımından yararlanarak çalışanların maruz kaldıkları ergonomik riskleri azaltıcı bir iş rotasyon çizelgesi modeli önerisinde bulunmuşlardır. Bu çizelgeleme ile çalışanda, yorgunluğun birikmesi ile oluşabilecek kas iskelet sistemi rahatsızlıklarının önüne geçilmesi hedeflenmiş ve önerilen model bir montaj işletmesinde uygulanmıştır. Dikkate alınan kriterler; gün boyunca yorgunluk birikiminin en aza indirilmesi, işçilerin iş için gerekli yetkinliğe sahip olması ve işçilerin görevlerin gerektirdiği fiziksel beceriye sahip olmasıdır. Bir ağırlıklı toplam modeli aracılığıyla her bir kriterin toplamından sonuçlanan bir değerlendirme fonksiyonu kullanılmıştır. Her bir kritere, bir kriterin diğer kriterlere göre önemini belirten ağırlıklı bir katsayı verilmiştir. Uygunluğun değerlendirilmesi için sadece ergonomik ve yeterlilik kriterleri dikkate alınmıştır. Modelde fiziksel beceri kriterleri ceza olarak kabul edilmiştir.

Otto ve Scholl (2011), sezgisel çözüm yöntemleri ile OCRA indeksini dikkate alan bir matematiksel model geliştirmişlerdir. Modelleme aracı olarak tam sayılı matematiksel modelleme yaklaşımını kullanmışlardır.

Mutlu ve Özgörmüş (2012), çalışmalarında işe bağlı kazaların önlenmesi için daha önceki çalışmalarda dikkate alınan işlem süresi ve görev önceliğinin yanı sıra fiziksel iş yükünü

de dikkate alan yeni bir montaj hattı dengeleme problemini ele almışlardır. Klasik montaj hattı dengeleme çalışmalarından farklı olarak, ergonomik açıdan değerlendirilen kriter tekrarlı hareketlerin neden olduğu yaralanmalardır. Aynı zamanda çalışma esnasında kullanılan nesne ağırlığını dikkate alarak NIOSH eşitliğinden faydalanılmıştır.

Wongwien ve Nanthavanij (2012), ergonomik iş yüküne maruz kalmanın kısıt olarak eklendiği çizelgeleme problemlerinde amaçları, rotasyona uğrayacak çalışan sayısının minimizasyonu olmuştur. 0-1 tam sayılı programlama ile geliştirdikleri modellerini çözmek için kendileri bir yaklaşım geliştirmişlerdir. Geliştirilen model ve çözüm yöntemlerinin denemelerini rassal olarak kendilerinin oluşturduğu veriler ile gerçekleştirmişlerdir.

Rattanamanee ve Nanthavanij (2013), ergonomik tehlikelere maruziyetin izin verilebilir limiti geçmeyecek şekilde, planlama periyodu bir günden fazla olan rotasyon çizelgeleme problemlerini modellemişlerdir. Çalışmalarına izin günlerini de dahil etmişlerdir.

Anzanello ve diğ. (2014), literatürde makine çizelgeleme konusunda ergonomik çalışmaların ele alınmadığını belirtmişler ve tekrar sayısı ile görev karmaşıklığını dengeleme yaklaşımlarını ATC sezgiseline ekleyerek yeni bir ATCE (Apparent Tardines Cost with Ergonomic Factors) sezgiseli önermişlerdir. Modellerinde aynı zamanda öğrenme eğrilerine de yer vermişlerdir. Herhangi bir ergonomik risk değerlendirme yöntemi kullanmadıkları modellerinde; işlerin tekrar sayısını, partilerin çalışan takımlara atanması, atandıkları takım içinde ATCE sezgiseli ile sıralanması faktörlerini dikkate alarak iş çizelgesi oluşturmuşlardır.

Baykasoğlu ve Akyol (2014), çalışmalarında sadece hat içerisindeki işlem sürelerini dengeli dağıtmak değil bunun yanı sıra istasyonlardaki zorlanma derecelerinin de göz önünde bulunması gerektiğini belirtmişlerdir. Tekrarlı işler zamanla arttıkça zorlanma artacağı için hat dengeleme problemlerinde kabul edilebilecek en yüksek zorlanma seviyesinin belirlenerek bu risk faktörünün üstüne çıkılmamasını amaçlamışlar ve ergonomik risk seviyesini OCRA indeksini kullanarak belirlemişlerdir.

Wang ve Liu (2014) çalışmalarında, uçak bakım hizmetlerinde çalışanların 24 saatte bir rotasyonu ile vardiyalı çalışmanın uyku düzenine etkisini, uykusuzluğun yorgunluğa ve

performans düşüklüğüne neden olduğunu belirtmişlerdir. Çalışanların yorgunluklarını azaltıcı bir vardiya çizelgeleme programı hazırlamayı hedeflemişlerdir. Çalışan tercihlerini, iş gücü gerekliliklerini ve yasal zorunlulukları dikkate alan problemlerini karışık tam sayılı programlama ile modelleyerek, Xpress IVE ile kodlamış ve farklı parametrelere göre çözdürmüşlerdir.

Boenzi ve diğ. (2015), iş rotasyon çalışmalarında OCRA indeksini ve bunun yanında çalışan yaşına bağlı olarak hissedilen yorgunluğun değişebileceğini göz önünde bulundurmuşlar ve yaş faktörünü yorgunluk modeli ile birleştirerek bir model önerisinde bulunmuşlardır. Ergonomik riskleri kabul edilebilir limitler içerisinde bırakan ve iş yüklerini dengeleyerek sistem performansını maksimize etmeye çalıştıkları problemlerini tam sayılı programlama ile modellemişlerdir.

Mossa ve diğ. (2016), çalışmalarında OCRA indeksi ile yapılan ergonomik risk değerlendirme değerini de dikkate alarak üretim miktarını maksimize etmeyi amaçlamışlardır. Her çalışan için kabul edilebilir bir iş yükü limiti koyarak her çalışan için bu değer yaklaşık olarak aynı kalmasını sağlayan bir kısıt ekleyerek optimum bir iş değişim çizelgesi bulmayı hedeflemişlerdir. Geliştirilen model bir otomotiv yan sanayi firmasının montaj hattında uygulanmıştır.

Song ve diğ. (2016), iş yükü miktarını minimize ederek kas iskelet sistemindeki rahatsızlıkları en aza indiren bir iş rotasyonu modeli önermişlerdir. Önerilen algoritmanın amacı, işçilerin yüksek iş yüküne maruz kalan vücut bölümlerini sürekli olarak kullanmalarını önlemektir. Algoritma ile farklı vücut bölümlerini kullanan görevler düzenlenmeye çalışılmış ve böylece işçilerin birkaç vücut bölümünü aşırı kullanmak yerine dinlenebilmesi hedeflenmiştir.

Yoon ve diğ. (2016), aynı vücut bölgelerinde kümülatif olarak artan iş yükünü minimize edecek bir matematiksel modelleme çalışması yaparak yeni bir iş rotasyonu yaklaşımı önermişlerdir. İş rotasyonu modeli, aynı vücut bölgesindeki kümülatif iş yükünü azaltmayı ve çalışanlar arasında günlük iş yükü varyasyonunu en aza indirmeyi amaçlamaktadır.

Azadeh ve diğ. (2017) çalışmalarında, maliyet ve iş yükü dengeleme amaçları olan problemleri için çok amaçlı bir matematiksel programlama modeli geliştirerek çözümü için sezgisel algoritmaları kullanmışlardır.

Battini ve diğ. (2017) ergonomik olarak çalışanın kaldırabileceği ağırlık miktarını dikkate alan, çalışma ve dinleme zamanını belirleyen bir matematiksel model önermişlerdir.

Polat ve diğ. (2018), sürekli aynı duruşun tekrarlandığı monoton çalışmalarda ağır fiziksel iş yüklerinin oluştuğunu ve bu tür çalışmaların da kas iskelet sistemini olumsuz yönde etkileyerek çalışanların yaşam kalitesini azalttığını ifade etmişlerdir. Klasik montaj hattı dengeleme problemlerinde olduğu gibi sadece üretim (Ct) süresinin dikkate alınmaması, bununla birlikte fiziksel iş yükünün de dengeli dağıtılması gerektiğini savunmuşlardır. Çalışmalarında REBA risk değerlendirme yöntemi ile belirledikleri iş yükünü dikkate alarak, herhangi bir işe bir işçinin atanamaması durumunda maksimum limit değer iş yükünden sapmayı en küçükleyen bir model geliştirmişlerdir.

Yener ve diğ. (2019), çalışmalarında haftalık bir iş rotasyonu çizelgeleme programı oluşturabilmek için çalışanların izin günlerini ve performans düzeylerini dikkate alan 0-1 tam sayılı programlama kullanarak bir model önerisinde bulunmuşlardır. Problemin amacı, fiziksel ve zihinsel iş yüklerinin en küçüklenmesi ve üretim miktarının maksimizasyonudur. Önerilen modelde, daha önceden belirlenmiş bir performans değeri ile çalışanın her işi yapabildiği kabul edilmiştir. Elle yapılan manuel işlerde çalışan performansının belirlenmesi için her iş için görev süresi ölçülmüştür. Fiziksel iş yükünün belirlenebilmesi için REBA ve zihinsel iş yükünün belirlenebilmesi için NASA-TLX İş Yüğü İndeksi yöntemleri kullanılmıştır. Önerilen modelin çözümü için BARON çözdürücüsü kullanılmıştır.

Tutumlu ve diğ. (2020), çalışanların hem sağlık hem yetenek seviyelerini dikkate alarak hangi işçinin hangi istasyona atanacağını belirlemek istedikleri çalışmalarında karma tamsayılı doğrusal karar modelleme yöntemi ile iş istasyonlarına kısmi ve tam kapasiteli işçi atama problemini ele almışlardır. Örnek bir problem üzerinde uyguladıkları modellerini GAMS/CPLEX ve Excel Open Solver çözücüsü kullanarak çözdürmüşlerdir.

Adem (2020), iş rotasyon modeline endüstriyel gürültü, titreşim, termal konfor ve aydınlatma faktörleri ile klasik çizelgeleme özelliklerinden iş atama maliyetleri, çalışanların yetenek seviyesi, çalışanların izin günü isteği, her bir iş istasyonunun farklı sayıda çalışan gerektirmesi gibi durumların eklenerek yeni bir model önerisinde bulunmuştur. Matematiksel model hedef programlama yöntemi ile kurulmuştur.

Rinaldi ve diğ. (2021), çalışmalarında OWAS ve çalışanların antropometrik özelliklerini dikkate alarak, farklı antropometrik özelliklere sahip farklı potansiyel işçiler için iş rotasyon çizelgesi belirlemeye çalışmışlardır. Çalışmada gerçek bir montaj istasyonu simüle edilmiş ve sistemin gerçek değişkenleri dikkate alınarak postüral bir analiz yapılmıştır. Farklı antropometrik özelliklere sahip farklı potansiyel işçiler test edilmiştir. Kritik durumlar belirlenmiş ve farklı iş rotasyonu çözümleri önerilerek çözülmüştür.

Literatürde yer alan çalışmalar incelenmiş ve Tablo 5.1’de özet bir şekilde sunulmuştur.

Tablo 5.1. Literatür araştırmasına ilişkin özet tablo

Yazar, Yıl	Amaç	Ergonomik Faktör	Kullanılan Programlama
Carnahan ve diğ., 2000	Fiziksel iş yükünü dengelemek	Taşıma mesafesi, taşıma tekrarlama sıklığı ve taşınan nesnenin ağırlığı	Tam sayılı programlama
Lin ve diğ, 2001	Ergonomik iş istasyonunda çalışmanın ürün kalitesine etkisini belirlemek	Görevi tamamlama zamanı, duruşsal riskler	Varyans analizi
Jung ve Jung, 2001	İşçilerin maruz kaldığı iş yükünü bulmak	-	AHP ve dilsel değişkenler
Kostreva ve diğ., 2002	Sirkadiyen ritm düzenlemesi için vardiya çizelgelerini değerlendirmek	Uyku döngüsü düzeni	Simülasyon
Malladi ve Min, 2004	Ergonomik ve finansal açıdan optimal bir işgücü çizelgeleme oluşturmak	-	Tam sayılı prog./AHP
Topaloğlu ve Özkarahan, 2004	Çalışanların iş ve çalışma arkadaşı tercihlerine göre yüksek verimi sağlayacak çizelgeleme modellemek	-	Hedef programlama
Seçkiner ve Kurt, 2005	Hastane personeli için yapılan çalışmada radyasyon miktarını azaltıcı bir rotasyon çizelgesi bulmak	Radyasyon miktarı	Tam sayılı programlama

Tablo 5.1. (Devam) Literatür araştırmasına ilişkin özet tablo

Yazar, Yıl	Amaç	Ergonomik Faktör	Kullanılan Programlama
Seçkiner ve Kurt, 2008	İş rotasyonu çizelgelemek	-	Karınca kolonisi
Dağdeviren ve diğ., 2005	Çalışma ortamı koşulları dikkate alınarak çalışanın taşıyabileceği toplam iş yükü seviyesini bulmak	-	ANP (Analitik Ağ Süreci)
Majozi ve Zhu, 2005	En iyi işçi atamasını sağlamak	-	Karma tam sayılı programlama
Yaoyuenyong ve Nanthavani, 2006	Maruz kalınan günlük gürültü seviyesinin 90 dB limit değerinin altında olması koşuluyla min. iş gücünü bulmak	Gürültü sınırlaması	Tam sayılı programlama
Asawarungsaengkul ve Nanthavanij, 2006	Personel çizelgelemek	Gürültü sınırlaması	Tam sayılı programlama
Topaloğlu, 2009	Kıdem seviyeleri farklı olan çalışanların vardiya çizelgelemesini oluşturmak	-	Çok amaçlı programlama AHP
Choi, 2009	İş süresini, iş istasyonu sayısını ve ergonomik koşulları dikkate alarak montaj hattı dengelemek	-	0-1 tam sayılı programlama modeli
Moon ve diğ., 2009	Farklı yeteneklere sahip işçilerin montaj hatlarına uygun şekilde atanmalarını sağlamak	-	Karma tam sayılı programlama
Aryanezhad ve diğ., 2009	Personel çizelgelemek	Gürültü ve sırt ağrısı indeksi	Çok amaçlı
Jaber ve Neumann, 2010	Personel çizelgelemek	Yorgunluk ve dinlenme süresi	Karma tam sayılı programlama
Nanthavanij ve diğ., 2010	İş rotasyonu çizelgelemek	Yorgunluk	0-1 Tam sayılı
Otto ve Scholl, 2011	Montaj hattı dengeleme	OCRA İndeksi	Karışık tam sayılı
Wongwien ve Nanthavanij, 2012	En az işçi sayısı ile günlük ergonomik tehlike maruziyet riskini en aza indirecek çizelgelemeyi bulmak	Herhangi bir ergonomik risk değerlendirme yöntemi kullanılmamış, Rassal risk değeri kullanılmış	0-1 tam sayılı programlama modeli

Tablo 5.1. (Devam) Literatür araştırmasına ilişkin özet tablo

Yazar, Yıl	Amaç	Ergonomik Faktör	Kullanılan Programlama
Mutlu ve Özgörmüş, 2012	İşe bağlı yaralanmaları azaltan bir montaj hattı dengelemek	NIOSH eşitliği	Bulanık doğrusal programlama
Wongwien ve Nanthavanij, 2012	Gürültü düzeyini minimize edecek bir işgücü çizelgelemesi yapmak	Gürültü sınırlaması	0-1 tam sayılı programlama modeli
Asension-Cuesta ve diğ., 2012	İş yükü kaynaklı yorgunlukların sebep olduğu rahatsızlıkları minimize edecek bir iş değişim çizelgesi oluşturmak	Ocra indeks, Kas-iskelet hastalıklarının önlemesi	Genetik algoritma
Otto ve Scholl, 2013	Ergonomik iş değişim çizelgeleri elde etmek	Kişisel ergonomik puan hesaplaması	Tam sayılı programlama
Wongwien ve Nanthavanij, 2013	Ergonomik işgücünü dikkate alarak sistem verimliliğini maksimize edebilen bir çizelgeleme yapmak	Risk sınırı-herhangi bir risk değerlendirme yöntemi kullanılmamış	Çok amaçlı karışık tam sayılı programlama modeli
Rattanamanee ve Nanthavanij, 2013	Ergonomik tehlike limitlerini göz önünde bulunduran bir günlük işgücü çizelgeleme programı oluşturmak	Herhangi bir risk değerlendirme yöntemi kullanılmamış	Karışık tamsayılı doğrusal programlama modeli
Boenzi ve diğ., 2013	Kas sistemi rahatsızlıklarını minimuma indirebilecek, optimal bir mola zamanı ve iş rotasyon çizelgesi bulmak	Ocra indeks, Kas-iskelet hastalıklarının önlemesi	Doğrusal ve doğrusal olmayan tam sayılı programlama modeli
Wang ve Cheng, 2014	Vardiya işçilerinin yorgunluk seviyesini minimize edebilecek bir vardiya çizelgesi oluşturmak	Yorgunluk modeli	Karışık tam sayılı model
Anzanello ve diğ., 2014	Ergonomik değerlendirmeyi dikkate alarak parti çizelgesini elde etmek	Çalışanlara dengeli dağılımı, görev karmaşıklığı ve tekrar sayısının azaltılması,	Matematiksel modelleme ATCE sezgiseli
Wang ve Liu, 2014	Vardiya işçilerinin yorgunluklarını minimize edecek bir optimal vardiya çizelgesi yapmak.	Yorgunluk modeli	Üstel koşullu matematiksel modelleme
Baykasoğlu ve Akyol, 2014	Ergonomik risk seviyelerini dikkate alarak uygun atama yapmak	OCRA indeksi	COMSOAL yaklaşımı

Tablo 5.1. (Devam) Literatür araştırmasına ilişkin özet tablo

Yazar, Yıl	Amaç	Ergonomik Faktör	Kullanılan Programlama
Boenzi ve diğ., 2015	İş yükü dengelemek, sistem performansının maksimize etmek	OCRA indeks/ Yorgunluk modeli	Tam sayılı modelleme
Mossa ve diğ., 2016	Üretim amaçlarını sağlarken, ergonomik çizelgeler elde etmek	OCRA indeks	Tam sayılı doğrusal olmayan modelleme
Akyol ve Baykasoğlu, 2016	Ergonomik riskleri dikkate alarak işçi atamak	OCRA indeksi	-
Song ve diğ., 2016	Kas iskelet sistemindeki bozuklukları en aza indirebilmek için iş yükü miktarını minimize edecek bir iş rotasyonu çizelgelemek	Rodgers Kas Yorgunluğu Analizi NIOSH kaldırma denklemi Kaldırma indeksi	Hibrit genetik algoritma
Moussavi ve diğ., 2016	Ergonomik riskler altında iş rotasyonu oluşturmak	Boy, yaş, deneyim, yetenek	-
Yoon ve diğ., 2016	Vücudun aynı bölgelerinde oluşan kümülatif iş yükünü azaltıcı bir iş rotasyonu oluşturmak	REBA	Matematiksel programlama
Akalp ve Özok, 2017	Sözel belirsizlikler altında riskli iş istasyonunu belirlemek ve Hızlı Maruziyet Tekniği ile karşılaştırma yapmak	Hızlı maruziyet değerlendirme (HMD)	Bulanık TOPSİS
Azadeh ve diğ., 2017	Hücresele imalat sistemleri	İş yükü dengeleme	Karma tam sayılı programlama
Şahin ve Kahya, 2018	Ergonomik risk etmenlerini dikkate alarak basit bir tek modelli montaj hattı problemini modellemek	REBA	Hedef programlama
Ayrim ve Can, 2018	Çalışılan yükün ağırlığı, iş ortamı sıcaklığı, gürültü, aydınlık, çalışma duruşu ve üretim miktarı etmenlerini dikkate alarak iş yükü minimizasyonunu amaçlayan bir işçi atama modeli oluşturmak	REBA	0-1 Tam sayılı programlama
Polat ve diğ., 2018	İzin verilen iş yükünden sapmayı minimize etmeyi amaçlayan bir montaj hattı dengelemek	REBA	Hedef programlama

Tablo 5.1. (Devam) Literatür araştırmasına ilişkin özet tablo

Yazar, Yıl	Amaç	Ergonomik Faktör	Kullanılan Programlama
Ekinci ve Can, 2018	Algılanan iş yüküne göre ergonomik risk seviyelerinin belirlenmesi	REBA	Çok ölçütlü İdeal-Gerçek Karşılaştırma Analizi (MAIRCA)
Yener ve diğ., 2019	Çalışanların fiziksel ve zihinsel iş yüklerini minimize edecek, izinli oldukları günleri dikkate alarak üretim miktarını maksimize edecek bir iş rotasyon çizelgesi belirlemek	REBA NASA-TLX zihinsel iş yükü ölçümü	0-1 Tam sayılı programlama
Tutumlu ve diğ., 2020	Sağlık ve yetenek seviyelerini dikkate alarak çalışanların kısmi ve tam kapasiteli olarak istasyonlara atanmalarını sağlamak	İşçilerin sağlık seviyeleri	Karma tam sayılı doğrusal karar modeli
Adem, 2020	Ergonomik riskler temelinde iş rotasyon çizelgesi belirlemek	Endüstriyel gürültü, el-kol titreşimi, termal konfor ve aydınlatma parametreleri	Hedef programlama
Rinaldi ve diğ., 2021	Farklı antropometrik özelliklere sahip farklı potansiyel işçiler için iş rotasyon çizelgesi belirlemek	OWAS ve antropometrik özellikler	Simülasyon

Literatür taramasında iş rotasyon çizelgeleme konusunda inceleme yapıldığında, iş yükü dengelemesi için farklı amaçları ve kısıtları dikkate alan ergonomik iş rotasyonu çalışmasının sınırlı sayıda olduğu görülmüştür. Aynı zamanda ergonomik iş yükü miktarı oluşturulan modelde genellikle bir kısıt olarak kullanılmıştır.

Literatürde ergonomik koşulların da eklendiği iş rotasyon çizelgelerin kısıtlı sayıda olduğu görülmektedir. Ergonomik faktörlerin iş rotasyon çizelgeleme konusuna dahil edilmiş kısıtlı kaynağın olmama sebebini Elmbach ve diğ., (2019) bu çalışmaların göreceye bağlı yeni bir konu olmasına bağlamaktadırlar.

Literatür çalışmalarının incelenmesi sonucunda, montaj hattı dengeleme ve ergonomik iş yükü çizelgeleme konularında ergonomi faktörlerinin tek yönlü değerlendirildiği görülmektedir. Genel olarak, araştırmacıların çalıştıkları klasik problem tiplerine tek yönlü ergonomik risk faktörlerini ekledikleri görülmektedir.

Literatürde genel olarak OCRA gibi hareket sıklığına dayalı yöntemlerin veya gürültü faktörünün dikkate alındığı çalışmalar bulunmaktadır. Çalışanın fiziksel olarak maruz kaldığı iş yükünü ve bu yükün metabolik enerji tüketimi neticesinde çalışanda yarattığı zihinsel iş yükü ile birlikte değerlendiren matematiksel modellere rastlanmaktadır.

Fiziksel iş yükünü çalışanlar arasında eşit olarak dağıtmaya çalışan rotasyon çizelgeleme modellerinde ise işlere ait iş yükleri sabit olacak şekilde değerlendirilmiştir. Nadir de olsa literatürde, fiziksel iş yükünü detaylı olarak değerlendiren, Akbari (2015) yorgunluk modelleme, vb., Xu ve diğ. (2012), el-aktivite değeri gibi çalışmalar bulunmakla birlikte, fiziksel iş yükünün derinlemesine değerlendirildiği çalışmalarda eksiklik görülmektedir.

İş istasyonlarına rastgele fiziksel iş yükü risk puanı atayarak, risk parametresi net olarak belirtilmeyen ve zamana bağlı ortalama alarak atama yapan çalışmalar da bulunmaktadır (Wongwien ve Nanthavanij, 2012; Wongwien ve Nanthavanij, 2013; Rattanamanee ve Nanthavanij 2013; Wongwien ve Nanthavanij, 2017).

Literatür araştırmaları, montaj hattı dengeleme ve iş rotasyonu olacak şekilde iki ana konu üzerinde özelleştğini; iş rotasyon çizelgeleme problemlerinde fiziksel iş yükünün dengeli dağıtılmasına, montaj hattı dengeleme problemlerinde ise daha çok duruş bozukluklarına ağırlık verildiğini göstermektedir (Adem, 2020).

Tablo 5.1’de kullanılan programlama sütunundan elde edilen bilgiye göre, araştırmacıların çoğunlukla karışık tam sayılı matematiksel programlama yönteminden faydalandıkları görülmektedir. Çoğunlukla tek amaçlı olarak geliştirilen matematiksel modellerde, hedef programlama yönteminin de kullanıldığı görülmektedir.

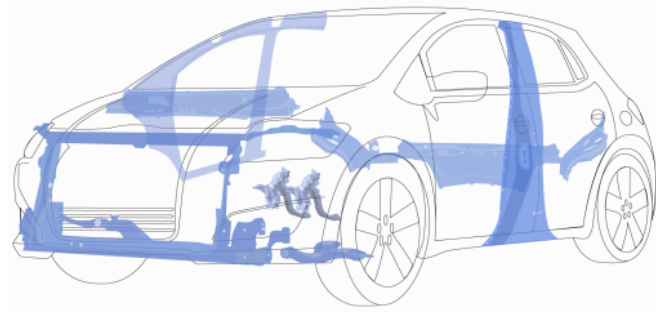
Fiziksel risk etmenlerinin çizelgeleme çalışmalarına dâhil edilmesi konusunda literatürdeki kısıtlı kaynaklar incelendiğinde ise, fiziksel risk etmenleri özelinde çalışmalar bulunmakla birlikte; çalışanların işe uygunluk kriterleri, iş yükü ve mola yerine mesafe etmenlerinin bütünleşik olarak değerlendirilmesine yönelik bir çalışmanın henüz literatürde bulunmadığını söylemek mümkündür. Tez kapsamında geliştirilen modelin temel motivasyonu bu düşünceden hareketle başlatılmıştır.

6. OTOMOTİV SEKTÖRÜNDE İŞ ROTASYONU PROBLEMİ

6.1. İşletmenin Tanımı

Bu çalışma ana merkezi Japonya’da olan ve otomotiv yan sanayinde hizmet veren uluslararası bir şirketin Türkiye’de binek araçlar için gövde, şasi ve montaj parçaları üreten fabrikasındaki verilerle yapılmaktadır. Şirketin dünya çapında gövde, şasi ve montaj parçaları üreten 19 fabrikası bulunmaktadır. Türkiye’de 20 yıldır faaliyet gösteren şirketin bu çalışmada incelenen fabrikasında 1500’e yakın mavi yaka çalışanı bulunmaktadır. Şirketin yönetim politikası gereği bu çalışmada şirket adı ve ürünün detaylı bilgileri gizli tutulmuştur.

Aracın gövdesini oluşturan temel parçalardan olan ön ve orta direk komponentleri, arka alt panel, radyatör takviyesi, göğüs paneli ve benzeri parçalar ile aracın şasisinde yer alan ön süspansiyon takviyesi ve salıncak kolları gibi parçalar, debriyaj ve fren pedalı gibi montaj parçaları firma bünyesindeki pres ve kaynak hatlarında üretilmektedir. Firmada üretilen parçalar Şekil 6.1’de mavi renkli olarak gösterilmektedir. Bu parçalar araç tipine veya model versiyonuna göre değişmektedir.



Şekil 6.1. Firmada üretilen parçalar

Çekme ve kanban sistemi mantığıyla çalışan fabrikada tam zamanında üretim (just in time) felsefesi kullanılmakta, buna göre de talep olunca kısa sürede sıralı ve stoksuz üretim yapılmaktadır. Sac malzeme kesme, soğuk veya sıcak preslerde şekillendirildikten sonra kaynak hatlarında birleştirilmekte veya monte edilmektedir. Kaynak ve montaj sırasında operatörler ayakta, kısa sürede çok sayıda tekrarlı çalışma gerçekleştirmektedir.

6.2. Problemin Tanımı

Bu çalışmada, hem iş ve işçi arasındaki ergonomik yeterlilik seviyesini hem de günlük kümülatif ergonomik iş yükünü dikkate alan bir iş rotasyonu modeli önerilerek çalışanlar arasındaki günlük iş yükü varyansı en aza indirilmeye çalışılmış ve sürekli yüksek iş yükünün oluşması engellenmeye çalışılmıştır. Çalışanın boy, yaş, deneyim, yetenek ve sağlık kriterleri modelin kısıtları olarak göz önünde bulundurulmuş, çalışanın dinlenme yerine gidip-gelirken harcadığı süre de modele eklenmiştir. Modelin uygulanması için ise gövde, şasi ve montaj parçalarının üretiminde KİSR etkilerinin en fazla görüldüğü kaynak operatörleri ele alınmıştır.

6.3. Çalışmaya En Uygun Ergonomik Risk Değerlendirme Yönteminin Seçimi

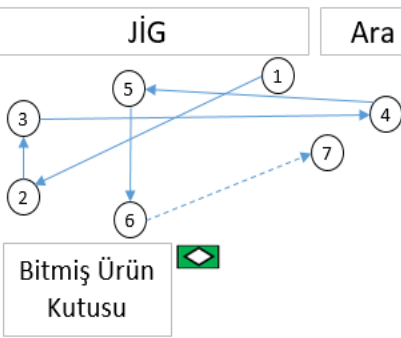
Otomotiv parçaları imalatında genellikle tüm vücut kullanılarak ve manuel olarak yük taşıma, kaldırma ve yerleştirme işleri gerçekleştirilmektedir. Bu sebeple çalışan duruşlarının ergonomik olarak değerlendirilmesi için tüm vücut değerlendirmesine olanak sağlayan yöntemlerin kullanılabileceği değerlendirilmiştir.

Mesleki kas ve iskelet sistemi rahatsızlıklarına yol açabilecek duruşların analizi ile fiziksel iş yükünü belirleyebilmek adına çalışmaya en uygun risk değerlendirme yönteminin tespiti için öncelikle örnek hatlardaki işler incelenmiştir.

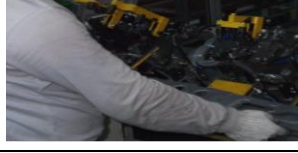
Farklı türde kaynak işlerinin yapıldığı kaynak hatlarında çalışan operatörlerin çalışmaları sırasındaki görüntüleri kaydedilmiştir. Çalışanın yaptığı işi birkaç kez tekrar edeceği süre kadar kayıt işlemine devam edilmiştir. Kaydedilen görüntülerden resimler alınmıştır. 10 farklı kaynak hattı, operatörün yaptığı iş ve çalışma duruşu incelenmiştir.

Tablo 6.1’de gun ile yapılan manuel kaynak işlerinin yapıldığı kaynak hattında operatörün yaptığı işler sırasıyla vücut duruşunu gösteren görsellerle birlikte verilmiş; bu işlerin süresi, etkilenen uzuv bilgisi ve parça ağırlıkları tabloda gösterilmiştir.

Tablo 6.1. Gun ile yapılan manuel kaynak işlerinin yapıldığı kaynak hattının incelenmesi

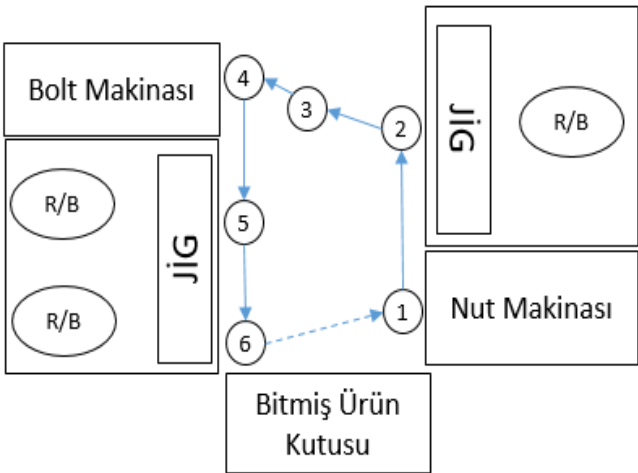
Parça Kodu	63620	JİG Ara Bekleme JİG MİNOMİ Bitmiş Ürün Kutusu 			
Hat No	H24-07-01				
İş Tanımı	Minomi parçasına X ve C gun ile spot kaynak işlemi uygulayıp palete koyma işi.				
Tespit	Parça ağırlığı: 10,9kg / Tekrarlı iş / Ağır balancer gun ile spot atılıyor, itme-çekme hareketi mevcut. Günlük üretim miktarı: 180 adet				
No	OPERASYON İŞ TALİMATI	SÜRE (sn)	GÖRSEL	ETKİNELEN UZUV&TÜR	YÜK (gr)
1a	Klempleme yap. 63631 nolu braketi jige set et.	5		El-Kol-Omuz Boyun	137
2a	63531 nolu paneli al.	2		Çekme-Tutma-Taşıma	2.212
2b	63631 nolu parçayı jige set et.	5		Taşıma-Tutma El-Kol-Omuz Boyun	137
3a	Klempleme yap. 63534 nolu parçayı jige set et. 63622 nolu parçayı jige set et. Klempeleri kapat.	10		El-Kol-Omuz Boyun	534 + 663
3b	Sırasıyla X gunla 3 adet spot kaynağı uygula. Klempeleri aç.	46		Tutma-Çekme El-Kol-Omuz Boyun	Gun çekme kuvveti
3c	Parçayı ara bekleme askılığına as.	3		Taşıma-Tutma El-Kol-Omuz Boyun	3.546
4a	Ara bekleme askılığındaki parçayı al.	3		Çekme-Tutma-Taşıma	4.468

Tablo 6.1. (Devam) Gun ile yapılan manuel kaynak işlerinin yapıldığı kaynak hattının incelenmesi

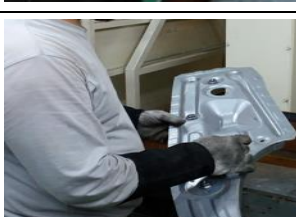
No	OPERASYON İŞ TALİMATI	SÜRE (sn)	GÖRSEL	ETKİLENEN UZUV&TÜR	YÜK (gr)
4b	63622 nolu parçayı jige set et. Klempleri kapat.	3		El-Kol-Omuz Boyun	663
4c	C gun ile 11 adet spot kaynağı uygula.	164		Tutma-Çekme El-Kol-Omuz Boyun	Gun çekme kuvveti
4d	X gun ile 12 adet spot kaynağı uygula. Klempleri aç. X gun ile 3 adet spot kaynağı uygula. Klempleri aç.	220		Tutma-Çekme El-Kol-Omuz Boyun	Gun çekme kuvveti
4f	C gun ile 1 adet spot kaynağı uygula. Klempleri aç.	22		Tutma-Çekme El-Kol-Omuz Boyun	Gun çekme kuvveti
5a	Kontrol formundaki standartlara göre kontrol kalemi ile kontrol işlemi yap.	30		Taşıma-Tutma El-Kol-Omuz-Bel Boyun	-
5b	63514, 63142 ve 63628 nolu plastik braketleri tak.	15		El-Kol-Omuz Boyun	504+279 +909
6	Kontrol işlemini tamamladığın parçayı palete sırasıyla düzgünce koy.	5		Kaldırma-Tutma-Taşıma El-Kol-Omuz Boyun	10.890
7	Home pozisyonuna dön.	2		Yürüme	-
	EK İŞLER				
1	Palet & kutu değişimleri	25		Tutma-İtme-Çekme El-Kol-Omuz Boyun-Bacak	

Tablo 6.2’de robot kaynak işlerinin yapıldığı kaynak hattında operatörün yaptığı işler sırasıyla vücut duruşunu gösteren görsellerle birlikte verilmiş; bu işlerin süresi, etkilenen uzuv bilgisi ve parça ağırlıkları tabloda gösterilmiştir.

Tablo 6.2. Robot kaynak işlerinin yapıldığı kaynak hattının incelenmesi

Parça Kodu	61038-02330				
Hat No	G12-08-1				
İş Tanımı	Karıncadan parça alıp nut basıp robota set etme sonrasında panele bolt basıp robota set etme ve robottan çıkan parçayı kontrol edip palete koyma işi				
Tespit	Parça ağırlığı: 9kg / Tekrarlı iş / Ağır parça taşıma, kaldırma, itme-çekme hareketi mevcut. Günlük üretim miktarı: 980 adet/gün				
No	OPERASYON İŞ TALİMATI	SÜRE (sn)	GÖRSEL	ETKİNELEN UZUV&TÜR	YÜK (gr)
1a	61328-02280 nolu parçayı karıncadan tek elle al. Çift elle 61328-2280 nolu parçayı TT146 yanındaki 1. ara beklemeye bırak.	4		El-Kol-Omuz Tutma	3.547
1b	Tek elle 61381-02240 nolu parçayı karıncadan al.	3,5		El-Kol-Omuz Tutma-Çekme	2.788
1c	Çift elle TT146 nolu nut makinasındaki nut pini'ne set et, sağ elle 90174-W0007 nolu M8 nut'u al ve 1 adet kaynakma işlemi yap	4,7		El-Kol-Omuz-Boyun-Bacak-Kuvvet	2.788
1d	Sağ elle Nut kaynatılmış 61381-02240 nolu parçayı 61328-2280 nolu ara beklemedeki parça içine set ederek her iki parçayı beraber çift elle al.	4		Taşıma-Tutma El-Kol-Omuz Boyun	2788 + 3547 = 6.335

Tablo 6.2. (Devam) Robot kaynak işlerinin yapıldığı kaynak hattının incelenmesi

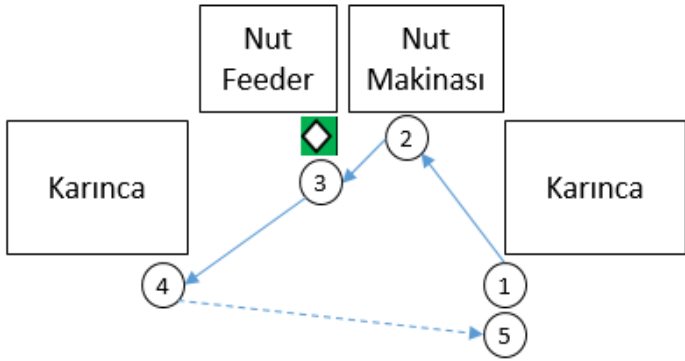
No	OPERASYON İŞ TALİMATI	SÜRE (sn)	GÖRSEL	ETKİNELENEN UZUV&TÜR	YÜK (gr)
2a	Çift elle aldığın parçaları TTJ-887-01 nolu robot jigine set et.	6,2		El-Kol-Omuz Boyun-Bacak Tutma-Kuvvet	6.335
2b	Çift elle lifterdan kaynatılmış parçayı al sol elle robotun start butonuna bas.	2		El-Kol-Omuz Boyun Tutma-Kuvvet	6.335
3a	Lifter dan aldığın kaynatılmış parçayı TT053 nolu makinanın yanındaki 2. ara beklemeye bırak.	3		El-Kol-Omuz Boyun-Taşıma	6.335
3b	Tek elle 61324-02230 nolu parçayı karıncadan al.	3		El-Kol-Omuz Tutma-Çekme	2.677
4	Çift elle TT053 nolu bolt makinasına set et sağ elinle 1 adet 90115-W0040 belirlenen deliğe set et ve kaynatma işlemi yap	12,5		El-Kol-Omuz- Boyun-Bacak- Kuvvet	2.677
5	61324-02230 nolu parçayı sol eline al 61328-02280 nolu parçayıda sağ eline alarak robot önüne gel	3,5		El-Kol-Omuz Boyun- Tutma-Taşıma	6.335
6a	Tek el ile 61038-02330 nolu bitmiş parçayı rollerden al. Son kontrol sehpasına bırak.	5		El-Kol- Tutma-Taşıma	9.070

Tablo 6.2. (Devam) Robot kaynak işlerinin yapıldığı kaynak hattının incelenmesi

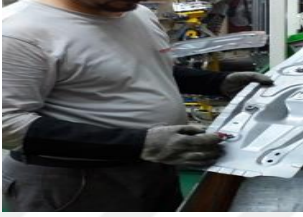
No	OPERASYON İŞ TALİMATI	SÜRE (sn)	GÖRSEL	ETKİLENEN UZUV&TÜR	YÜK (gr)
6b	61038-02330 nolu bitmiş parçayı son kontrol formundaki standartlara göre kontrol kalemi ile kontrol işlemi yap. Standartlara göre palete bırak.	17,6		El-Kol-Omuz Boyun- Tutma-Taşıma	9.070
6c	Home Pozisyona dön.	2		Yürüme	
	EK İŞLER				
	Palet + kutu değişimleri	6		Tutma-İtme- Çekme El-Kol-Omuz Boyun-Bacak	

Tablo 6.3’de sabit spot makinası ile yapılan manuel kaynak işlerinin yapıldığı kaynak hattında operatörün yaptığı işler sırasıyla vücut duruşunu gösteren görsellerle birlikte verilmiş; bu işlerin süresi, etkilenen uzuv bilgisi ve parça ağırlıkları tabloda gösterilmiştir.

Tablo 6.3. Sabit spot makinası ile yapılan manuel kaynak işlerinin yapıldığı kaynak hattının incelenmesi

Parça Kodu	61371-02240				
Hat No	H14-07-01				
İş Tanımı	Karıncadan parçayı alıp, nut kaynatıp, karıncaya koyma işi.				
Tespit	Parça ağırlığı: 3kg / Tekrarlı manuel yapılan kaynak işi / Taşıma, kaldırma, itme-çekme hareketi mevcut. Günlük üretim miktarı: 980 adet.				
No	OPERASYON İŞ TALİMATI	SÜRE (sn)	GÖRSEL	ETKİNELEN UZUV&TÜR	YÜK (gr)
1	Sağ elinle karıncadan 61371-02240 nolu parçayı al.	3		El-Kol-Omuz Çekme-Taşıma	2.788

Tablo 6.3. (Devam) Sabit spot makinası ile yapılan manuel kaynak işlerinin yapıldığı kaynak hattının incelenmesi

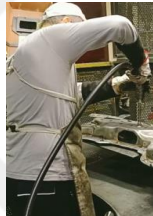
No	OPERASYON İŞ TALİMATI	SÜRE (sn)	GÖRSEL	ETKİLENEN UZUV&TÜR	YÜK (gr)
2	TT 113 nolu nut makinasında 1 adet 90174-W0007 nolu nut'u eline al. Sırasıyla sol elinle start butonuna basarak 4 adet nut kaynat.	18,5		El-Kol-Omuz Boyun-Kuvvet	2.788
3	Son kontrol formunda belirtilen noktalarını kontrol et.	7,2		El-Kol-Omuz Boyun-Bel	2.788
4	Kontrol işlemi biten parçayı sol elinle bitmiş ürün karınca arabasına diz.	2,7		Taşıma-İtme El-Kol-Omuz	2.788
5	Home pozisyonuna dön.	1,5		Yürüme	
	EK İŞLER				
1	Karınca & kutu değişimleri	5			

Tablo 6.4'de ark kaynağı sonlarında yapılan tamir işlerinin yapıldığı kaynak hattında operatörün yaptığı işler sırasıyla vücut duruşunu gösteren görsellerle birlikte verilmiş; bu işlerin süresi, etkilenen uzuv bilgisi ve parça ağırlıkları tabloda gösterilmiştir.

Tablo 6.4. Ark kaynağı sonrası yapılan tamir işleri

Parça Kodu	51201-F4011						
Hat No	H13-05-1 (Tamir)	Tamir İstasyonu 1	Ara Bekleme	Tamir İstasyonu 2	Ara Bekleme	Tamir İstasyonu 3	Ara Bekleme
İş Tanımı	Ark kaynağı işlemi sonrasında parça üzerinde kalan çapakları temizleme ve kılavuz çekme işi						

Tablo 6.4. (Devam) Ark kaynağı sonrası yapılan tamir işleri

No	OPERASYON İŞ TALİMATI	SÜRE (sn)	GÖRSEL	ETKİLENEN UZUV&TÜR	YÜK (gr)
Tespit	Parça ağırlığı: 19,8kg / Çok ağır parça / Tekrarlı iş/ Taşıma, kaldırma, itme-çekme hareketi mevcut. Günlük üretim miktarı: 775 adet.				
1	Ark kaynağı yapılmış parça yüzeyi kontrol ederek kalan tüm çapakları gidermek için taşlama ve kılavuz çekme işlemi	180		El-Kol-Omuz-Bel-Boyun Tutma-Taşıma	19.800
					
					
					

Yapılan incelemelerle, işçiler çalışma sırasında tüm vücutlarını kullandıklarından tüm vücudu değerlendiren fiziksel iş yükü ölçüm yöntemlerinin uygun olduğu görülmüştür. Tüm vücudu değerlendiren HMD, REBA ve LMM yöntemlerinin uygunlukları incelenmiştir.

HMD yönteminde; detaylı çalışma duruşu incelenmeden, gözlemcinin ve çalışanın kendisini değerlendirdiği kontrol listeleri üzerinden değerlendirme yapıldığı için yöntemin güvenilirliği düşüktür.

REBA yönteminin en önemli avantajları, kolay bir şekilde uygulanabilmesi ve gözlem yapan kişinin çok fazla bilgiye sahip olmasını gerektirmeden ölçüm yapabilmesidir. Gözlem aralıklarının ve farklı işler için yapılan uygulamalarda optimum gözlem süresinin

belirsiz olması yöntemin öne çıkan dezavantajlarıdır (Okan ve Kaya, 2015). REBA yöntemi ile yapılan analiz sonuçları sayısal olarak ifade edilebilir. Risklerin sayısal olarak ifade edilmesi ise analiz edilen vücut duruşundaki özel hareket ve duruşların ayrı ayrı değerlendirilmesini ve sayısal sonuç değerine göre tehlike seviyelerinin belirlenmesini sağlar. Bu yöntemde yapılan hareket ve vücut duruşu alt ve üst vücut için belirlenen açılara göre değerlendirilir. Gövde, boyun, alt ve üst uzuvların açılarına göre ayrı ayrı hesaplanan skorların kombinasyonları ile toplam skor hesabı yapılır. REBA yönteminde değerlendirilen diğer faktörler; yapılan hareketin sıklığı, hareket esnasında vücudun sabit durması veya bükülme, dönme olup olmadığı, kaldırılan yükü kavrama şekli ve yükün kolaylık derecesidir. REBA yöntemi; üretim ve montaj hatlarında, ağır ve tehlikeli işlerde, manuel yük kaldırma işlerinde çalışan kişilerin çalışma esnasındaki vücut duruş analizleri için kullanılan yaygın yöntemlerden biridir (Sevimli ve diğ., 2018).

LMM yöntemi, manuel yapılan taşıma, yerleştirme, yer değiştirme ve yük kaldırma işleri için kullanılmaktadır. Bu yöntemin en ayırt edici değerlendirme süreci, ilk adımda zaman ağırlığının belirlenmesidir. Zaman ağırlığının belirlenebilmesi için de öncelikle işin tutma, taşıma, kaldırma ya da yer değiştirme işlerinden hangisi olduğuna karar vermek gerekir. Ayrıca yöntem adımlarından biri olan konum ağırlığının belirlenmesi için de yükün gövdeye göre konumu, bedenden uzaklığı, yük alırken eğilme veya uzanma olup olmadığı değerlendirilir. Yöntem uygulama adımlarında işin yapıldığı koşullar da değerlendirilmektedir. Aydınlatma, yükün ağırlık merkezinin değişkenliği, zemin yapısı gibi durumlar da değerlendirilen kriterler arasında yer almaktadır.

LMM yönteminin değerlendirme temelini; kaldırılan yükün büyüklüğü, tutma-taşıma süresi, tekrar sıklığı bedenin öne eğilme durumu, bedenin yana dönme veya eğilme durumuna göre omurganın zorlanma riski kriterleri oluşturmaktadır. Ard arda yapılan işlerin olduğu çalışmalarda hareketleri ortaklaştırmadan işin daha detaylı incelenerek analiz yapılması gerekir. Detaylı inceleme gerektiren bu yöntem ile çalışanın zorlanmasını arttırıcı faktörler kolayca görülebilir, sonuçlara göre iyileştirme çalışmaları ile iş düzenlemesi yapılabilir ve iyileştirmenin hangi alanda yapılarak daha etkin sonuçlar elde edilebileceği kolayca görülebilir (Sevimli ve diğ., 2018).

Kaynak işlerinde genellikle ayakta, tüm vücut kullanılarak çalışılır ve elle manuel olarak yük taşıma, yerleştirme ve kaldırma işleri yapılır. Bu nedenlerle kaynak işlerinde

ergonomik risk değerlendirme yapabilmek için; tüm vücudun değerlendirilmesine olanak sağlayan REBA yöntemi veya taşıma, tutma, kaldırma ve itme-çekme durumları için detaylı bir analiz yapılabilmesini sağlayan LMM değerlendirme yöntemi kullanılabilir.

6.3.1. REBA Yöntemi

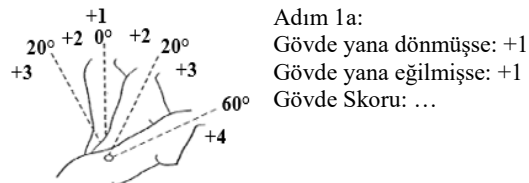
Bir çalışma duruşu REBA yöntemine göre değerlendirilirken vücut A ve B olarak iki gruba ayrılır ve duruş açılarına göre REBA skoru belirlenir.

- A Grubu: Gövde, Boyun ve Bacak
- B Grubu: Üst kol, Alt kol ve Bilekler

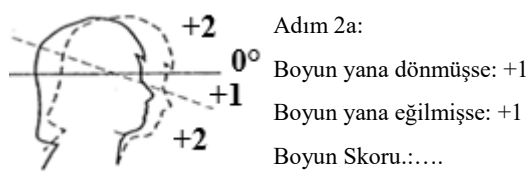
A grubunda değerlendirilen, gövde, boyun ve bacakların duruş açıları ayrı ayrı değerlendirilerek skorları belirlenir ve Şekil 6.2’de verilen Tablo A yardımıyla, gövde, bacak ve boyun skorların kombinasyonundan oluşan yeni bir skor belirlenir. Bununla birlikte taşınan yük / kuvvet skoru da elde edilen skora eklenerek A skoru elde edilmiş olur (Sağıroğlu ve diğ., 2015).

A. Gövde, Boyun ve Kolların Analizi

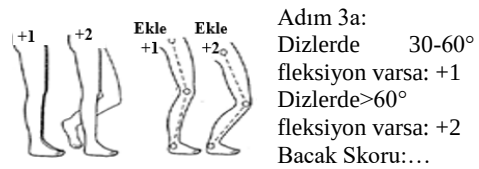
Adım 1: Gövde Pozisyonu



Adım 2: Boyun Pozisyonu



Adım 3: Bacaklar



Adım 4: Tablo A'da duruş puanına bakın

Adım 5: yük/kuvvet skorunu ekle

Yük < 5 kg : +0
Yük = 5 - 10 kg : +1
Ani veya hızlı kuvvet artışı varsa +1 ekle
Yük/Kuvvet Skoru:...

Adım 6: Skor A'yı, Tablo C'de bul

A skorunu bulmak için 4. & 5. adımlardaki skorları ekle, Tablo C'de satırda bul.

A Skoru:

Tablo A		Boyun											
		1				2				3			
		Bacaklar				Bacaklar				Bacaklar			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Gövde	1	1	2	3	4	1	2	3	4	3	3	5	6
	2	2	3	4	5	3	4	5	6	4	5	6	7
	3	2	4	5	6	4	5	6	7	5	6	7	8
	4	3	5	6	7	5	6	7	8	6	7	8	9
	5	4	6	7	8	6	7	8	9	7	8	9	9

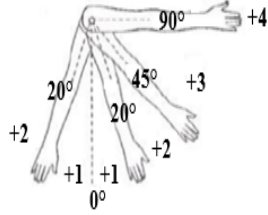
Şekil 6.2. REBA A skoru (S. Hignett and L. McAtamney, 2000)

B skorunu elde etmek için ise; üst kol, alt kol ve bileklerin duruş açılarına göre ayrı ayrı değerlendirilmesi yapılır ve Şekil 6.3'te verilen Tablo B yardımıyla elde edilen skorların kombinasyonundan oluşan bir skor belirlenir. Son olarak kavrama puanı da eklenerek B skoru elde edilmiş olur (Sağıroğlu ve diğ., 2015).

$$(B \text{ Grubu Skoru}) + (\text{Kavrama}) = B \text{ Skoru}$$

B. Üst kol, Alt kol ve Bileklerin Analizi

Adım 7: Üst Kol Pozisyonu

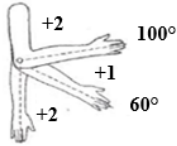


Omuz yükselmişse: +1
Abdüksiyon veya rotasyon varsa: +1
Kolun duruşunda yerçekimi desteği varsa: -1

Üst Kol Skoru:...

Tablo B		Alt Kol					
		1			2		
		Bilekler			Bilekler		
		1	2	3	1	2	3
Üst Kol	1	1	2	2	1	2	3
	2	1	2	3	2	3	4
	3	3	4	5	4	5	6
	4	4	5	5	4	5	5
	5	6	7	8	7	8	8
	6	6	7	8	8	9	9

Adım 8: Alt Kol Pozisyonu



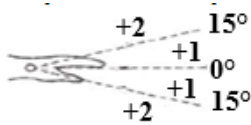
Kollardan biri orta hatta veya vücudun dışına doğru çalışıyorsa: +1

Alt Kol Skoru:...

Adım 10: Tablo B'de duruş puanına bakın
7-9 adımlarındaki değerleri kullan, Tablo B'de puanı bul

Adım 11: Kavrama skorunu ekle
İyi tutma kolu ve orta kavrama gücü, iyi: 0

Adım 9: Bileklerin Pozisyonu



Bileklerde yana esneme veya dönme varsa: +1
Bilek Skoru:...

Kabul edilebilir tutuş/kavrama, uygun: +1
El tutuşu uygun olmamasına rağmen mümkün, kötü: +2
Uygun değil: +3

B Skoru:

Şekil 6.3. REBA B Skoru (S. Hignett and L. McAtamney, 2000)

REBA yönteminde son adım olarak, ayrı ayrı elde edilen A ve B skorlarının kombinasyonuna karşılık gelen değer Şekil 6.4'de verilen Tablo C'den bulunur, bulunan bu değer C skorudur. C skoruna da aktivite yoğunluk puanı eklenerek REBA skoru elde edilmiş olur.

$$(C \text{ skoru}) + (\text{Aktivite Skoru}) = \text{REBA Skoru}$$

Adım 12: Skor B'yi, Tablo C'de bul
Skor B'yi elde etmek için 10 & 11 adımlarındaki değerleri ekleyin, **Table C'de** A ve B skorlarını karşılaştırarak C skorunu bulun.

Adım 13: Aktivite Skoru

+1 Bir veya daha fazla vücut bölgesi sabit (1 dk'dan uzun süre tutma)

+1 Kısa aralıklarla tekrar eden işler (1 dk'da 4'ten fazla tekrar eden iş, yürüme hariç)

+1 Yapılan iş duruşta hızlı ve büyük değişikliğe neden oluyorsa veya sabit olmayan zeminde çalışıyorsa

Tablo C Skoru + Aktivite = REBA

Tablo C		A Skoru											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
B Skoru	1	1	1	1	2	3	3	4	5	6	7	7	7
	2	1	2	2	3	4	4	5	6	6	7	7	8
	3	2	3	3	3	4	5	6	7	7	8	8	8
	4	3	4	4	4	5	6	7	8	8	9	9	9
	5	4	4	4	5	6	7	8	8	9	9	9	9
	6	6	6	6	7	8	8	9	9	10	10	10	10
	7	7	7	7	8	9	9	9	10	10	11	11	11
	8	8	8	8	9	10	10	10	10	10	11	11	11
	9	9	9	9	10	10	10	11	11	11	12	12	12
	10	10	10	10	11	11	11	11	12	12	12	12	12
	11	11	11	11	11	12	12	12	12	12	12	12	12
	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12

Şekil 6.4. REBA skoru (S. Hignett and L. McAtamney, 2000)

REBA puanı 1 ile 15 arasında bir değer almaktadır. Bu puanların dereceleri, risk düzeyleri ve alınması gereken önlemler Tablo 6.5'te belirtilmiştir.

Tablo 6.5. Risk karar tablosu (Sağıroğlu ve diğ., 2015)

Derece	REBA Skoru	Risk Seviyesi	Önlem
0	1	İhmal edilebilir risk	Gerekli değildir
1	2- 3	Düşük risk	Gerekli olabilir
2	4≤...≤7	Orta risk	Gereklidir
3	8 ≤...≤10	Yüksek risk	Yakın zamanda gerekli olabilir
4	11≤...≤15	Çok Yüksek risk	Hemen gereklidir

6.3.2. BAUA LMM Yöntemi

Almanya Federal İş Sağlığı ve Güvenliği Enstitüsü tarafından geliştirilen bu yöntem, yasal gereklilikleri dikkate alarak, tutma-kaldırma ve taşıma işlerinin (LMM-1, Leitmerkmalmethoden, Anahtar özellik yöntemleri), itme-çekme işlerinin (LMM-2) ve manuel taşıma işlerinin (LMM-3) zorlanma limitlerini bilimsel ölçümlere göre değerlendirilmesini sağlamaktadır. Kriterlere göre değerlendirme imkanı sağlar (Sevimli ve diğ., 2018). BAUA, manuel yapılan yük kaldırma, yerleştirme ve tutma veya yer değiştirme işlerinin değerlendirilmesi için kullanılır (Acar ve diğ., 2019). Göz önünde bulundurulmuş kriterler ve puanlar, gerçekleştirilen görevin türüne göre değişir. Değerlendirme sonucunda risk katsayısı hesaplanır. Yöntemin adımları aşağıda detaylandırılmıştır.

Bu yöntemin en kritik noktası zaman ağırlıklı puanının (ZAP) hesaplanmasıdır. ZAP için öncelikle görevin kaldırma-yerleştirme, tutma veya taşıma olduğuna karar vermek gerekir. Kaldırma-yer değiştirme işleri için bir gündeki işlem tekrar sayısı, tutma işleri için bir gündeki toplam tutma sayısı, taşıma işleri için ise bir günde taşıma işlemi sırasında yapılan toplam yol mesafesi dikkate alınarak zaman ağırlık puanı belirlenmektedir (Babalık, 2016).

a. Tutma, Kaldırma, Taşıma İşleri için BAUA (LMM-1) Adımları

1. Adım: Zaman ağırlığı puanının belirlenmesi

Zaman ağırlığı belirlenirken öncelikle işin tutma işi mi, kaldırma-yer değiştirme işi mi veya tutma-taşıma işi mi olduğunda karar vermek gerekir (Acar ve diğ., 2019). Kaldırma-yer değiştirme işleri için bir gündeki işlem tekrar sayısı, tutma işleri için bir gündeki toplam tutma sayısı, taşıma işleri için ise bir günde taşıma işlemi sırasında yapılan toplam yol mesafesi dikkate alınarak zaman ağırlık puanı belirlenmektedir (Babalık, 2016). Zaman ağırlık puanları Tablo 6.6'da gösterilmektedir.

Tablo 6.6. LMM-1 Zaman ağırlık puanının belirlenmesi, BAUA (2001)

Kaldırma ve Yer Değiştirme (<5s)		Tutma (>5s)		Taşıma (>5s)	
Bir günde yapılan toplam iş sayısı	Zaman ağırlık puanı	Bir günde toplam süre	Zaman Ağırlık puanı	Bir gündeki toplam yer değiştirme	Zaman Ağırlık puanı
<10	1	>5 dak.	1	<300 m	1
10-39	2	5-15 dak.	2	300<...<1000 m	2
40-199	4	15-60 dak.	4	1<...<4 km	4
200-499	6	1-2 saat	6	4<...<8 km	6
500-999	8	2-4 saat	8	8<...<16 km	8
≥1000	10	≥4 saat	10	≥16 km	10

2. Adım: A. Yük ağırlık puanının belirlenmesi

Yük ağırlık puanı, işi yapanın cinsiyetine bağlı olarak değişmektedir. İş yaparken kaldırılan yüklerin ağırlığı aynı değil ise, kaldırılan yüklerin ortalama değeri hesaplanmalıdır (Berber, 2020). Yük ağırlık puanı Tablo 6.7'de gösterilmektedir.

Tablo 6.7. LMM-1 Yük ağırlık puanının belirlenmesi, BAUA (2001)

Etken kuvvet (Erkekler için)	Yük ağırlık puanı	Etken kuvvet (Kadınlar için)	Yük ağırlık puanı
<10 kg	1	<5 kg	1
10-19 kg	2	5-10 kg	2
20-29 kg	4	10-15 kg	4
30-39 kg	7	15-25 kg	7
≥40 kg	25	≥25 kg	25

2. Adım: B. Duruş ve yük pozisyonu ağırlık puanının belirlenmesi

Duruş ve yük pozisyonu ağırlık puanı; yükü kaldırırken eğilme veya uzanma durumuna, yükün gövdeden uzak veya yakın olmasına bağlı göre belirlenir (Acar ve diğ., 2019). Tablo 6.8’de duruş ve yük pozisyonu ağırlık puanı gösterilmektedir.

Tablo 6.8. LMM-1 Duruş ve yük pozisyonu ağırlık puanının belirlenmesi, BAUA (2001)

	Yükün bedene göre konumu	Konum ağırlığı
	- Üst gövde postürü dik, dönme yok - Yük gövdenin çok yakınında	1
	- Üst gövdede çok hafif eğilmiş veya dönmüş - Yük gövdenin yakınında	2
	- Öne doğru fazla eğilme - Öne doğru az eğilirken, üst gövdenin döndürülmesi - Yük omuz yüksekliğinde veya gövdeden uzakta	4
	- Öne doğru fazla eğilirken, üst gövdenin döndürülmesi - Yük gövdeden uzakta - Dizlerin üzerine çökme veya çömelme var	8

2. Adım: C. Uygulama ve ortam ağırlık puanının belirlenmesi

Uygulamanın yapıldığı yerin tavan yüksekliği, zemin, aydınlatma, yükün ağırlık merkezi değişkenliği; uygulama ve ortam ağırlık puanının belirlenmesinde dikkate alınan faktörlerdir (Sevimli ve diğ., 2018). Bu faktörlere göre uygulama ve ortam ağırlık puanları Tablo 6.9’da verilmiştir.

Tablo 6.9. LMM-1 Uygulama ve ortam ağırlık puanının belirlenmesi, BAUA (2001)

Uygulama koşulları	Ağırlık puanı
Ortam ergonomik koşulları iyidir. Örneğin; düz kaymayan zemin, yeterli alan ve aydınlatma, yükü tutabilme kolay	0
Ortam ergonomik koşulları kötüdür. Örneğin; düz olmayan zemin, alçak tavan ve hareket etme olanağı sınırlı alan	1
Hareket etme olanı çok sınırlı alan ve ağırlık merkezi değişken yük ile çalışma.	2

3. Adım: LMM-1 Sonuç skorunun belirlenmesi

LMM-1 risk faktörü; 2. Adımda belirlenen tüm koşulların skorları toplanarak zaman ağırlık puanı ile çarpılarak hesaplanır (Eşitlik 6.1).

$$\text{LMM} - 1 \text{ Risk Faktörü} = \text{Zaman ağırlık puanı} \times (\text{Yükün ağırlık puanı} + \text{Konum ağırlığı} + \text{Uygulama şartları}) \quad (6.1)$$

LMM-1 risk faktör değeri Tablo 6.10'da risk derecesi ve belirlenen risk bölgesine göre alınması gereken tedbirler belirtilmiştir.

Tablo 6.10. LMM-1 Risk değerlendirme tablosu, BAUA (2001)

Risk	Alanı	Risk puanı	Değerlendirme
1		< 10	Düşük Yük; sağlık kaybı riski oluşturmaz.
2		0-24	Biraz Fazla Yük; vücudun fazla zorlanması mümkündür. İyileştirme yapılabilir.
3		25-49	Epey Fazla Yük; vücudun fazla zorlanma olasılığı yüksektir. Mutlaka iyileştirme yapılmalıdır.
4		≥50	Çok Fazla Yük; vücudun fazla zorlanma olasılığı çok yüksektir. İyileştirme yapılması şarttır.

b. İtme-Çekme İşleri için BAUA (LMM-2) Adımları

1. Adım: Zaman ağırlığı puanının belirlenmesi

Zaman ağırlığının değerlendirilmesi yapılırken öncelikle bir seferde kat edilen yol (5 metreden az veya fazla) mesafesine bakılır. Kat edilen yol mesafesi 5 metreden az ise yapılan toplam iş sayısına, mesafe 5 metreden fazla ise günlük toplam alınan yol

miktarına göre puanlandırılır (Yavuzkan ve diğ., 2015). Tablo 6.11’de zaman ağırlık puanının değerlendirme detayları verilmektedir.

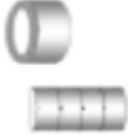
Tablo 6.11. LMM-2 Zaman ağırlık puanının belirlenmesi, BAUA (2001)

Bir seferde <5m’den az yol kat edilen itme-çekme işleri		Bir seferde >5m’den az yol kat edilen itme-çekme işleri	
Bir günde yapılan iş		Bir günde toplam	
Adet	Puan	Toplam mesafe	Puan
< 10	1	< 300 m	1
10-39	2	300 m<...<1 km	2
40-199	4	1 km<...<4 km	4
200-499	6	4 km<...<8 km	6
500-999	8	8 km<...<10 km	8
≥1000	10	>16 km	10

2. Adım: A. Yardımcı araç ağırlık puanının belirlenmesi

İkinci adımda itme-çekme işlemi yapılacak iş için kullanılacak yardımcı araç ve itme-çekme yapılacak yükün ağırlığına göre bulunur. Yardımcı araç ve uygulama katsayıları Tablo 6.12’de gösterilmektedir. Yük kaydırılarak, yuvarlanarak veya tabloda belirtilen taşıma aracı yardımıyla taşınabilir. Kullanılan araç seçildikten sonra yükün ağırlığı da dikkate alınarak puan belirlenir. Farklı ağırlıklarda itme-çekme yapıldığı durumlarda yüklerin ağırlıklarının ortalaması alınmalı, farklı grupta taşıma yapılıyorsa büyük olan grup dikkate alınarak değerlendirme yapılmalıdır (Sevimli ve diğ., 2018).

Tablo 6.12. LMM-2 Zaman ağırlık puanının belirlenmesi, BAUA (2001)

	Yardımcı Araç kullanmadan, yük yuvarlanıyorsa	El arabası	Tekerlekli taşıyıcı (yönlendirme olanağı olanaksız)	Transpalet veya manuel çalışan forklift	Manipülör ör
Hareket ettirilecek (yuvarlanarak) (kg)					
< 50	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
50 < * < 100	1	1	1	1	1
100 < * < 200	1,5	2	2	1,5	2
200 < * < 300	2	4	3	2	4
300 < * < 400	3		4	3	
400 < * < 600	4		5	4	
600 < * < 1000	5			5	

Tablo 6.12. (Devam) LMM-2 Zaman ağırlık puanının belirlenmesi, BAUA (2001)

	Yardımcı Araç kullanmadan, yük yuvarlanıyorsa	El arabası	Tekerlekli taşıyıcı (yönlendirme olanağı olanaksız)	Transpalet veya manuel çalışan forklift	Manipülör
> 1000					
Kaydırarak (kg)					
< 10	1				
10 < * < 25	2				
25 < * < 50	4				
> 50					

2. Adım: B. Hareket hızı ağırlık puanının belirlenmesi

İtme-çekme işinin hareket hızı ağırlık puanı Tablo 6.13’de belirtilen şartlara göre belirlenmektedir

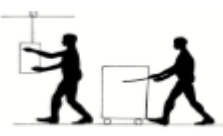
Tablo 6.13. LMM-2 Hareket hızı ağırlık puanının belirlenmesi, BAUA (2001)

Konum hassasiyeti	Hareket hızı	
	Yavaş	Hızlı
	< 0,8 m/s	0,8-1,3 m/s
Önemsiz: Hareket yolu sorunsuzdur. Yükün durması bir engelle sağlanabilir veya yuvarlanabilir.	1	2
Önemli: Yükün konulacağı yer ve hareket yolu kesin bellidir, buna uyulmalıdır, yön sıklıkla değiştirilir.	2	4

2. Adım: C. Beden konumu ağırlık puanının belirlenmesi

Beden konumu için Tablo 6.14’de belirtilen konumlara göre değerlendirme yapılır, farklı konumlarda çalışıldığında interpolasyon yapılabilir.

Tablo 6.14. LMM-2 Beden konumu ağırlık puanının belirlenmesi, BAUA (2001)

Beden konumu	Ağırlık puanı
	Dönem hareketi yoktur ve üst beden diktir 1
	Tek yönlü çekme vardır, üst gövde hafif öne eğik veya dönüktür 2

Tablo 6.14. (Devam)LMM-2 Beden konumu ağırlık puanının belirlenmesi, BAUA (2001)

Beden konumu	Ağırlık puanı
	Hareketin olduğu yöne doğru eğim fazladır, çömelme veya diz çökme vardır 3
	Üst gövde öne doğru çok eğiktir ve aynı zamanda dönme vardır 4

2. Adım: D. Uygulama koşulları ağırlık puanının belirlenmesi

Uygulama koşulları değerlendirilirken en çok tekrarlanan işlerin uygulama şartları incelenir (Tablo 6.15). İş güvenliği yönünden etkisi olmayan sadece işin konforunu azaltacak etkenler dikkate alınmaz (Sevimli ve diğ., 2018).

Tablo 6.15. LMM-2 Uygulama koşulları ağırlık puanının belirlenmesi, BAUA (2001)

Uygulama koşulları	Ağırlık puanı
İyi: Eğim ve engel yok, zemin sabit, tekerlekler kolayca dönebiliyor, yer kaygan değil	1
Sınırlı: Zemin 2° eğimli ve kirli, etrafta engel var, tekerlekler kolay dönmez	2
Zor: 2°- 5° eğimli, sabit ve sağlam olmayan zemin, taşıma aracını hareket ettirebilmek için çok kuvvet gerekir, tekerlekler kirli ve zor döner	4
Komplike, çok zor: Hareket yolunda merdiven veya basamak vardır, eğim 5° den fazla, diğer tüm zorlu koşullar birlikte bulunur	8

3. Adım: LMM-2 Sonuç skorunun belirlenmesi

LMM-2 risk faktörü; 2. Adımda belirlenen tüm koşulların skorları toplanarak zaman ağırlık puanı ile çarpılarak hesaplanır (Eşitlik 6.2). Sonuç değerlendirmesinde kadınların performanslarının erkeklere oranlara daha düşük olduğu varsayımıyla, sonuç kadın çalışanlar için 1,3 faktörüyle çarpılır (Sevimli ve diğ., 2018).

$$\text{LMM} - 2 \text{ Risk Faktörü} = \text{Zaman ağırlık puanı} \times (\text{Yardımcı araç} + \text{Hareket hızı} + \text{Beden konumu} + \text{Uygulama şartları}) \times 1,3 \text{ (Kadınlar için)} \quad (6.2)$$

LMM-2 risk faktör değeri Tablo 6.16'da risk derecesi ve belirlenen risk bölgesine göre alınması gereken tedbirler belirtilmiştir.

Tablo 6.16. LMM-2 Risk değerlendirme tablosu, BAUA (2001)

Risk	Alanı	Risk puanı	Değerlendirme
1		< 10	Düşük Yük; sağlık kaybı riski oluşturmaz.
2		0-24	Biraz Fazla Yük; vücudun fazla zorlanması mümkündür. İyileştirme yapılabilir.
3		25-49	Epey Fazla Yük; vücudun fazla zorlanma olasılığı yüksektir. Mutlaka iyileştirme yapılmalıdır.
4		≥50	Çok Fazla Yük; vücudun fazla zorlanma olasılığı çok yüksektir. İyileştirme yapılması şarttır.

c. Manuel İşler için BAUA (LMM-3) Adımları

Orta kuvvette efor ve normal işleri içeren çalışmalar için LMM-3 risk değerlendirme yöntemi uygulanır. Bu işler genel olarak orta derece kuvvetle, ayakta yapılan ve bu sebeple bacaklar, sırt ve omuzlarda statik yük birikimine neden olan, ayrıca tekrarlı hareketler nedeniyle el ve kol kaslarında yüklenmelerin meydana geldiği işlerdir (Yüce, 2019).

1. Adım: Zaman ağırlığı puanının belirlenmesi

Bir vardiya süresinde yapılan el işinin toplamda ne kadar sürdüğü hesaplanarak Tablo 6.17 kullanılarak zaman ağırlık değeri bulunur.

Tablo 6.17. LMM-3 Zaman ağırlık puanının belirlenmesi, BAUA (2001)

Proses süresi	toplam	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Zaman puanı	ağırlık	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5

2. Adım: A. Tutma veya taşımaya göre parmak/eldeki kuvvet ağırlık değerinin belirlenmesi

Yapılan işin taşıma mı yoksa tutma mı olmasına, ortalama taşıma veya tutma süresine ve parmak ya da ellere yüklenen kuvvet değerine göre Tablo 6.18 baz alınarak değeri belirlenir. Yapılan işi sahada izleyip videoya çekmek gerekir. İki el ile taşıma yapıldığı durumlarda ağırlık ikiye bölünerek her iki el için ayrı hesap yapılır, BAUA (2001).

Tablo 6.18. LMM-3 Tutma veya taşımaya göre parmak/eldeki kuvvet ağırlık değerinin belirlenmesi, BAUA (2001)

(A) Tutma veya taşımaya göre parmak/eldeki kuvvet ağırlık değerinin belirlenmesi											
Parmak veya eldeki kuvvet (tipleri)		Tutma					Taşıma				
		Ortalama tutma süresi					Ortalama tekrar hareketi				
		Dakikadaki tutma süresi					Dakikadaki tekrar sayısı				
		60-31	30-16	15-20	<4	<1	1-4	5-15	16-30	31-60	>60
Seviye	Tanım	Ağırlık puanı									
Düşük	Çok düşük kuvvet	2	1	0,5	0	0	0,5	1	2	3	
	Düşük kuvvet	3	1,5	1	0	0	1	1,5	3	5	
	Orta kuvvet	5	2	1	0	0,5	1	2	5	8	
	Büyük kuvvet	8	4	2	0,5	1	2	4	8	13	
	Çok büyük kuvvet	12	6	3	1	1	3	6	12	21	
	Zirve kuvvet	19	9	4	1	2	4	9	19	33	
Yüksek	Vurma: Başparmak, el ya da yumrukla	-	-	-	1	1	3	6	12	21	
Sol ve sağ el için ayrı ayrı hesaplanan değerden en yükseği toplam puan derecelendirme değeridir		Uygulanan kuvvetin derecelendirme tarafı:				Sol el:			Sağ el:		
(B) Kuvvet iletimi ve tutuş şartları ağırlık değerinin belirlenmesi											
Kuvvet iletimi, tutuş şartları								Skor			
Kuvvet aktarımı optimum, tutuş kolay								0			
Kuvvet aktarımı sınırlı, tutma kuvveti daha büyük olmalı								2			
Aktarma / uygulama zor (kaygan, yumuşak, keskin kenarla)								4			

2. Adım: B. Kuvvet iletimi ve tutuş şartları ağırlık değerinin belirlenmesi

Yapılan iş esnasındaki kuvvet iletimi ve tutuş şartlarına göre ağırlık puanı Tablo 5.18 yardımıyla bulunur.

2. Adım: C. El / kol pozisyonu ve hareketi ağırlık değerinin belirlenmesi

El/kol eklemlerindeki hareket ve pozisyonlara göre Tablo 6.19'den uygun değer bulunur.

Tablo 6.19. LMM-3 El / kol pozisyonu ve hareketi ağırlık puanının belirlenmesi, BAUA (2001)

El ve kol pozisyonu / hareketi			Puan
		İyi: Eklem pozisyonları / hareketlerinde sınır yok, sapma az	0
		Sınırlandırılmış: Eklem pozisyonları / hareketleri ara sıra sınırlı	1
		Elverişsiz: Eklem hareket aralıkları sınırlı	2
		Kötü: Eklem hareketleri sabit veya el-kol desteği olmadan sabit tutma	3
Sürekli yapılan pozisyonlar göz önünde bulundurulmalıdır. Nadir sapmalar göz ardı edilebilir.			

2. Adım: D. İş Organizasyon Değeri ağırlık değerinin belirlenmesi

İş organizasyon yapısına göre Tablo 6.20'den uygun değer seçilir.

Tablo 6.20. LMM-3 İş organizasyonu ağırlık puanının, BAUA (2001)

İş organizasyonu	Puan
Yapılan diğer aktivitelere bağlı olarak yük durumunun sıkça değişmesi, çalışma esnasında çok sayıda operasyon, iyileştirme fırsatı yeterli	0
Çalışma esnasında az sayıda operasyon, diğer aktivitelere bağlı olarak yük durumunun nadiren değişmesi yeterli	1
Diğer aktivitelere bağlı olarak yük durumu değişimi hiç yok, operasyonlar arası dengesiz çalışma, iyileşme süreleri çok az veya çok kısa	2

2. Adım: E. Uygulama koşulları ağırlık değerinin belirlenmesi

Özellikle çalışılan ortamın iklim şartları, aydınlatma, gürültü vb. fiziksel risk faktörlerine göre Tablo 6.21'den uygun değer seçilir.

Tablo 6.21. LMM-3 Uygulama koşulları ağırlık puanının belirlenmesi, BAUA (2001)

Uygulama koşulları	Puan
İyi: İklim koşulları iyidir, detaylar göz kamaştırıcı değil, güvenilir şekilde tanımlanmıştır	0
Sınırlı: Aşırı küçük ve göz kamaştırıcı detaylar, gürültü, soğuk ve ıslak nedeniyle bozulmuş konsantrasyon	1
Koşullar aşırı derece olumsuz ise puanlama 2 olarak belirlenebilir.	

2. Adım: F. Vücut postürü ağırlık değerinin belirlenmesi

Çalışma esnasındaki vücut postürüne ve buna bağlı olarak oluşan zorlanma değeri için Tablo 6.22 kullanılır.

Tablo 6.22. LMM-3 Vücut postürü ağırlık puanının belirlenmesi, BAUA (2001)

Postür		Puan
	İyi: Ayakta durma, dinamik oturma ve yürüme mümkündür, bükülme yoktur, omuz yüksekliğinin üzerinde kavrama yoktur ve gerekirse el-kol desteği ile çalışılabilir	0
	Kısıtlı: Oturma fazla, ayakta durma veya yürüme nadir, gövde hafif eğimli, bazen omuz yüksekliğinin üzerine eğilme olabilir	1

Tablo 6.22. (Devam) LMM-3 Vücut postürü ağırlık puanının belirlenmesi, BAUA (2001)

Postür		Puan
	Olumsuz: Hareket serbestliği kısıtlı, gövde açıkça öne doğru eğilmiş, sık sık kavrama olmadan omuz yüksekliğinin üstünde çalışarak yürüme	3
	Zayıf: Sabit vücut duruşu, gövde öne doğru çok fazla eğilmiş, omuz yüksekliğinde kavrama hareketi sabit, baş eğik veya bükülmüş	5
Sürekli yapılan pozisyonlar göz önünde bulundurulmalıdır. Nadir sapmalar göz ardı edilebilir.		

3. Adım: LMM-3 Sonuç skorunun belirlenmesi

LMM-3 risk faktörü; 2. Adımda belirlenen tüm koşulların skorları toplanıp zaman ağırlık puanı ile çarpılarak hesaplanır (Eşitlik 6.3) (Yüce, 2019).

$$\text{LMM} - 3 \text{ Risk Faktörü} = \text{Zaman ağırlık puanı} \times (A + B + C + D + E + F) \quad (6.3)$$

LMM-3 risk faktör değeri Tablo 6.23’da risk derecesi ve belirlenen risk bölgesine göre alınması gereken tedbirler belirtilmiştir.

Tablo 6.23. LMM-3 Risk değerlendirme tablosu, BAUA (2001)

Risk	Alanı	Risk puanı	Değerlendirme
1		< 10	Düşük Yük; sağlık kaybı riski oluşturmaz.
2		0-24	Biraz Fazla Yük; vücudun fazla zorlanması mümkündür. İyileştirme yapılabilir.
3		25-49	Epey Fazla Yük; vücudun fazla zorlanma olasılığı yüksektir. Mutlaka iyileştirme yapılmalıdır.
4		≥50	Çok Fazla Yük; vücudun fazla zorlanma olasılığı çok yüksektir. İyileştirme yapılması şarttır.

6.3.3. Reba ve BAUA LMM Yöntemi ile Ergonomik Analiz ve Karşılaştırma

Bu çalışmada fiziksel zorlanmanın en fazla olduğu kaynak hatlarında değerlendirme ve iyileştirme çalışmaları yapılmıştır. Bunlar sabit spot makinasının kullanıldığı manuel kaynak hattı, gun kaynak makinası kullanılan kaynak hattı, ark kaynağı tamir hattı ve pedallı kaynak hattıdır. Üretimde her işi yapan birden fazla çalışan olmasına rağmen,

Çalışma şekli çalışanlar arasında farklılık göstermediği için üretim hattında rastgele bir çalışan seçilerek REBA ve BAUA analizleri yapılmıştır. Öncelikle belirlenen alanlarda çalışanlar gözlemlenmiş ve video kayıtları üzerinden fotoğraflanarak görev sırasındaki vct pozisyonları detaylı olarak değerlendirilmiştir.

Bir kaynak hattında, bir çalışan görev sırasına göre aynı anda birden fazla iş türü yapar. Vct duruşu her zaman aynı pozisyonda değildir ve statik bir şekilde değişir. REBA ile değerlendirme yapılırken çalışanın her bir vct duruşu, yöntemin kurallarına göre değerlendirilmiş ve en yüksek iş yükünün belirlenmesi için en yüksek puan dikkate alınmıştır.

BAUA ile değerlendirme için öncelikle işin türü belirlenmiş ve LMM-1, LMM-2 veya LMM-3 gruplarından hangisinin kullanılacağına karar verilmiştir. Uygun tekniğe göre iş yükü değerlendirilerek risk puanları bulunmuştur.

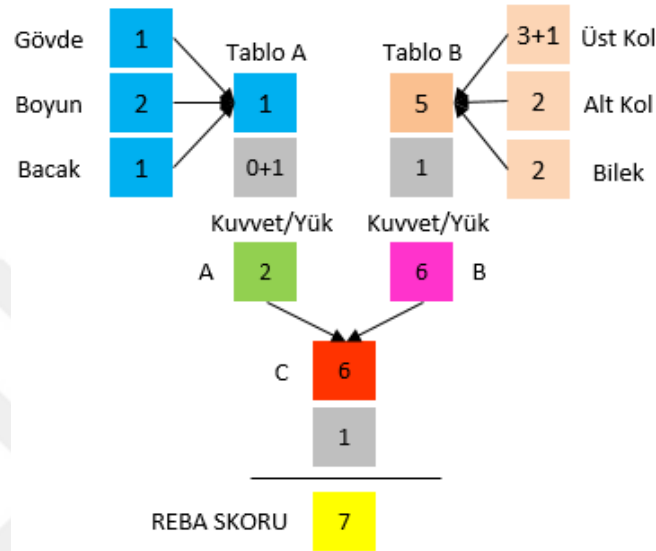
6.3.3.1. Sabit Spot Kaynak Hattı

Sabit spot makinesine yerleştirilen parçaya elektrik akımı ve basınç uygulanarak kaynak işlemi gerçekleştirilir. alışan parçayı askıdan alır, makineye yerleştirir ve bir eliyle parçayı tutup diğer eliyle başlat düğmesine basarak işlemi tamamlar. Manuel kaynak hattındaki görevler sabit punta makinesinde manuel kaynak, ara işlemlerde parça taşıma ve parça askı arabasını itmedir. Çalışanların operasyonlar sırasındaki vct duruşları şekil 6.5'te gösterilmiştir.



şekil 6.5. Manuel kaynak hattı. (a) Sabit spot makinesinde manuel kaynak, (b) ara proseslerde parça taşıma, (c) karınca arabasını itme

a. Sabit spot makinesinde manuel kaynak: Çalışan parçayı sabit spot makinesine yerleştirdikten sonra sol eli ile start butonuna basar ve art arda 4 spot kaynağı yapar. (Şekil 6.5a). Parça ağırlığı 2,8 kg'dır. REBA skoru Şekil 6.6'da verilmiştir. Değerlendirme sonucu REBA skoru 7'dir. Ergonomik risk düzeyi “Orta” ergonomik olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 6.6. Sabit spot makinesinde manuel kaynak için REBA skoru

İncelenen kaynak hatlarının REBA skorları Tablo 6.24’de verilmiştir.

Tablo 6.24. REBA risk değerlendirmesi

Proses	Proses ögesi	Risk düzeyi
Manuel kaynak hattı	Sabit spot makinesinde manuel kaynak	7 “orta”
	Parça taşıma	4 “orta”
	Karınca arabasını itme	6 “orta”
Ark kaynak hattı	Parçayı palete koyma	10 “yüksek”
	Paleti itme	5 “orta”
	Ark kaynak tamiri	3 “düşük”
Pedal kaynak/ Montaj hattı	Kutu itme	4 “orta”
	Havşa açma	5 “orta”
Balancer gunlu manuel kaynak hattı	Parçayı palate koyma	4 “orta”
	Balancerlı gun ile manuel kaynak	10 “yüksek”
	Pnömatik jigde kaynak	2 “düşük”

Sabit spot makinesinde manuel kaynak işlemi BAUA'ya göre manuel çalışma grubunda olduğu için LMM-3 grubunda değerlendirilmiştir. Belirlenen parça üretim süresi toplamda 54,4 saniye ve vardiya başına üretim miktarı 216 adettir. Vardiyadaki toplam

işlem süresi 3,2 saat olduğundan ZAP 2'dir. Yapılan ölçümlere göre çalışanın maruz kaldığı toplam kuvvet 10,6 kgf olup, çok yüksek bir yük olarak kabul edilmekte ve 54,4 saniyelik bir tutma işlemi olduğu için kuvvet ağırlık puanı 12 olarak belirlenmiştir. Değerlendirme detayları Tablo 6.25'de gösterilmiş ve değerlendirme puanı 46 puan olarak belirlenmiştir. Bu değere göre risk seviyesi "3"tür ve işlem sırasında oluşan iş yükü yüksektir. İşlemi gerçekleştirirken çalışanın vücut duruşu uygun değildir.

Tablo 6.25. BAUA LMM-3 risk değerlendirme

Proses	Proses ögesi	Adım 1 ZAP	Adım 2 A B C D E F	Adım 3 Değerlendirme	Risk Seviyesi	Açıklama
Manuel kaynak hattı	Sabit spot makinesin de manuel kaynak	2	1 2 3 2 2 2	$2*(12+2+3+2+2+2)=46$	3	Yüksek yük
Ark kaynak hattı	Ark kaynak tamiri	1,5	4 0 1 0 0 1	$1,5*(4+0+1+0+0+1)=9$	1	Düşük yük
Pedal kaynak/ Montaj hattı	Havşa açma	1	2 3 1 1 0,5	$1*(19+2+3+1+1+0,5)=26,5$	3	Yüksek yük
Balancer gunlu manuel kaynak hattı	Pnömatik jigde kaynak	3	1 2 0 0 0 0	$1*(1+2+0+0+0+0)=9$	1	Düşük yük

b. Ara proseslerde parça taşıma: Bu çalışma sırasında tutma, kaldırma ve taşıma yapıldığından BAUA'ya göre LMM-1 grubunda değerlendirilmiştir. Parça ağırlığı 2,8 kg olup, 1 vardiyada 216 adet üretilmektedir. Bir parça 4 kez kaldırılıp taşınır. Bir vardiyada $216*4 = 648$ yarı mamul taşınır, 5 saniyeden az süren bir çalışma grubundadır. ZAP 8'dir, ortalama ağırlığı 10,5 kg olduğundan yük önemi 1'dir ve taşıma sırasında hafifçe eğilme olduğu için konum puanı 2'dir. Risk puanı 32, risk seviyesi yüksek (3) iş yüküdür. Değerlendirme puanları Tablo 6.26'da verilmiştir. REBA'ya göre puan 4'tür ve "orta yük" ergonomik risk olarak değerlendirilir.

Tablo 6.26. BAUA LMM-1 risk değerlendirme

Proses	Proses ögesi	Adım 1 ZAP	Adım 2 A B C	Adım 3 Değerlendirme	Risk seviyesi	Açıklama
Manuel kaynak hattı	Parça taşıma	8	2 2 1	$8*(2+2+1)=40$	3	Yüksek yük

Tablo 6.26. (Devam) BAUA LMM-1 risk değerlendirme

Proses	Proses ögesi	Adım 1 ZAP	Adım 2 A B C	Adım 3 Değerlendirme	Risk seviyesi	Açıklama
Ark kaynak hattı	Palet parka koyma	7	3 3 2	$7*(3+3+2)=56$	4	Çok yüksek yük
Pedal kaynak/ Montaj hattı	-	-	- - -	-	-	-
Balancer gunlu manuel kaynak hattı	Palet parka koyma	4	1 4 1	$4*(1+4+1)=24$	2	Orta yük

c. Karıncaya arabasını itme: İtme-çekme çalışması olduğu için BAUA'nın LMM-2 grubunda değerlendirilir. Her arabada 20 parça vardır. Vardiya boyunca üretilen 216 parça için $(216/20)$ 11 kez dolu ve 11 boş araba için toplam 22 çekme işlemi gerçekleştirilir. ZAP 2'dir. Çekilen tam araba ağırlığı $20\text{pcs} * 3,3\text{kgf (dolu)} + 20 * 0,5\text{kgf} = 76\text{ kg'dır}$. Yardımcı araç tekerlekli ve buna karşılık gelen ağırlık puanı 1'dir. Gövde dik olduğundan ve dönme hareketi olmadığından vücut pozisyon puanı 1'dir. Değerlendirme puanları Tablo 6.27'de verilmiştir. Risk puanı 6 ve risk düzeyi ise 1'dir. "1", düşük yük grubundadır. REBA puanı 6 olup, "orta yük" ergonomik risk olarak değerlendirilmiştir.

Tablo 6.27. BAUA LMM-2 risk değerlendirme

Proses	Proses ögesi	Ağırlık	Adım 1 ZAP	Adım 2 A B C D	Adım 3 Değerlendirme	Risk seviyesi	Açıklama
Manuel kaynak hattı	Karıncaya arabası itme	50-100 kg	2	1 1 1 0	$2*(1+1+1+0)=6$	1	Düşük yük
Ark kaynak hattı	Palet itme	<10kg	2	3 1 2 1	$2*(3+1+2+1)=7$	2	Orta yük
Pedal kaynak/ montaj hattı	Kutu itme	<10kg	2	1 1 1 1	$2*(1+1+1+1)=8$	1	Düşük yük
Balancer gunlu manuel kaynak hattı	Balancer gunlu manuel kaynak	35kg	10	0,5 1 2 1	$10*(0,5+2+1+1)=45$	3	Yüksek yük

6.3.3.2. Ark kaynak hattı

Ark kaynağı, elektrik arkının ürettiği ısı ile iki parça arasında eriyen metal sac parçalarının birleştirilmesi işlemidir. Ark kaynağı, ark robotları ile yapılır. Ark kaynak hattında değerlendirilen işler; parçanın palete yerleştirilmesi, paletin itilmesi ve ark kaynağından sonar 19,8 kg'lık parçanın üzerinden çapakların temizlenmesi, kılavuz çekme vb. manuel yapılan işlerdir. Çalışanların süreç içerisindeki vücut duruşları Şekil 6.7'de gösterilmektedir.

a. Parçanın palete koyulması: Tüm işlerin REBA değerlendirmesi hatta yapılmış olup, REBA skoru en yüksek olan işin yapılırken vücut duruşu Şekil 6.7a'da gösterilmiştir. En yüksek REBA skoru, 19,8 kg'lık parçayı tamir standından alıp palete yerleştirdiği işine aittir. REBA skoru 10'dur (Tablo 6.24) ve ergonomik riski “yüksek iş yükü” olarak değerlendirilir.



Şekil 6.7. Ark kaynak hattı. (a) parçanın palete koyulması, (b) palet itme, (c) ark kaynağı

BAUA'ya göre LMM-1 grubunda değerlendirilen parçanın palete yerleştirilmesi işi için vardiya başına 300 kez kaldırma işi gerçekleştirilir. ZAP 7'dir. Değerlendirme puanları Tablo 10'da verilmiştir. Risk puanı 56 olarak belirlenmiş ve aşırı yüklenme var.

b. Palet itme: BAUA'ya göre LMM-2 itme işleri grubunda değerlendirilen palet itme işinin değerlendirme puanları Tablo 6.27'de verilmiştir. Risk skoru 13,5 ve risk seviyesi "2"dir, fiziksel aşırı yüklenme ve sağlık sorunları olabilir. . REBA puanı 5'tir. "Orta yük" ergonomik risk olarak değerlendirilir.

c. Ark kaynağı tamiri: Motorlu el tabancası yardımı ile kuvvet uygulanarak onarımlar gerçekleştirilir. BAUA'ya göre LMM-3 grubunda değerlendirilir. Parça başına işlem

süresi 21 saniyedir. ZAP 1.5'tir. Puanlama detayları Tablo 6.25'de verilmiştir. Risk puanı "9", risk seviyesi düşük iş yüküdür. REBA puanı 3'tür ve "düşük yük"tedir. Ergonomik iş yükü düşük olduğundan sağlık riski olası değildir.

6.3.3.3. Pedal Kaynak/Montaj Hattı

Pedal kaynak/montaj hattında iş sırasına göre pedal pad montajı, sıkma, robot ark kaynağı işleri yapılır. Bunlar arasında diğer işlere göre risk seviyesi daha yüksek olan işler Şekil 6.8'de gösterilen kutu itme ve havşa açmadır.



Şekil 6.8. Pedal kaynak / montaj hattı. (a) kutu itme, (b) havşa açma

a. Kutu itme: Şekil 6.8a'da gösterilmiştir. Çalışan içinde 6 pedal bulunan kutuyu iterek rafın üzerine yerleştirir ve 4 kutuyu üst üste istifleyerek iter. Parça ağırlığı 2 kg'dır. REBA detayları Tablo 6.24'de verilmiştir. Değerlendirmenin REBA puanı 4'tür. "Orta yük" ergonomik risk olarak değerlendirilir.

Kutu itme işi BAUA'ya göre LMM-2 grubunda değerlendirilir. ZAP 2'dir. Değerlendirme puanları Tablo 6.27'de verilmiştir. Risk puanı 8 ve risk seviyesi "1"dir, fiziksel aşırı yüklenme olası değildir. Herhangi bir sağlık riski beklenmemektedir.

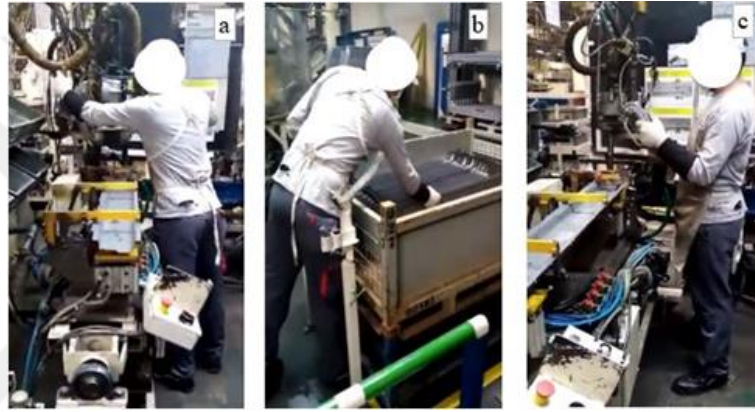
B. Havşa Açma: Önceden delinmiş deliklere konik veya silindirik yuvaların yapılması işlemidir. Sol el ile parçayı tutarken, sağ kol ile yukarıdan aşağıya doğru hareket ederek havşa açma işlemi yapılır. İşlem sırasında $103,6 \text{ N} / 9,806 = 10 \text{ kg}$ yük sağ kolu etkiler. REBA puanı 5'tir ve risk seviyesi "orta yük"tür.

Havşa açma işlemi, el-kol-omuz bölgesinde iş yükü oluşturan daha çok manuel yapılan bir iş olduğu için BAUA'ya göre LMM-3 grubunda değerlendirilmektedir. Bir

vardiyadaki toplam çalışma süresi 1 saatten az olduğu için ZAP 1'dir. Diğer kriterler de tablolara göre değerlendirilir ve risk seviyesi "3", yük fazladır.

6.3.3.4. Balancer Gun ile Manuel Kaynak Hattı

Mevcut istasyonda çalışan, balancer gun ile 13 spot kaynağı yapmaktadır. Parçayı makineye yerleştirdikten sonra çalışan 15-20 kg'lık balancer gunı çekerek / iterek kaynak yapar. İşlem ayakta, ağır gun uygun mesafede tutularak ve boyun önde tutularak gerçekleştirilir. Değerlendirilen işler; balancer gun ile kaynak yapılması, parçanın palete yerleştirilmesi ve pnömatik jigde kaynak yapılmasıdır (Şekil 6.9).



Şekil 6.9. Balancer gun ile manuel kaynak hattı. (a) balancer gun ile manuel kaynak, (b) parçanın palete yerleştirilmesi, (c) pnömatik jigde kaynak

a. Balancer gun ile manuel kaynak: Gun ile yapılan manuel kaynağın REBA puanı (Şekil 6.9a) 10'dur (Bkz. Tablo 6.24). “Yüksek seviye” bir ergonomik risk olarak değerlendirilir. İtme-çekme çalışmaları olduğu için BAUA'ya göre LMM-2 grubunda değerlendirilir. Gun hareketi 15 kez, 15 frekans x tek kişi ortalama 120 adet = 1800 frekans, toplam vardır. Buna göre ZAP 10'dur. 45 olan risk puanına karşı risk seviyesi “3”tür ve süreç içerisindeki yük fazladır. Balancer gun ile kaynak işlemi sırasında ani yükleri minimuma indirmek için ağır balancer kullanımı ve buna bağlı itme-çekme çalışmaları hatta bir robot yerleştirilerek tamamen ortadan kaldırılmıştır. İyileştirme önerisi sonucunda REBA puanı da 2'ye (düşük yük) düşürülmüştür.

b. Parçanın palete yerleştirilmesi: Kaynak yapıldıktan sonra bitmiş parçalar palete yerleştirilir (Şekil 6.9b). Palet yerleştirme işinde daha çok kaldırma ve taşıma olduğundan BAUA'ya göre LMM-1 grubunda değerlendirilir. Her parçayı palete yerleştirmek 3

saniye sürer. (120 adet x3 / 60 = 6dk/gün) Buna göre ZAP 4'tür. Risk puanı 24, risk seviyesi "2" iken ergonomik iş yükü orta düzeydedir. REBA puanı 4'tür (orta seviye).

6.3.3.5. Ergonomik Risk Değerlendirmesi ve Yöntem Çıktılarının Karşılaştırılması

Çalışanların en çok zorlandıkları duruşları tespit etmek için kullanılacak yonteme karar vermek büyük önem taşımaktadır. Tablo 6.28'deki REBA ve BAUA puanları incelendiğinde, benzer sonuçların çoğunda BAUA puanlarının bazen daha yüksek olduğu görülmektedir. Örneğin Tablo 6.28'deki pedal kaynak hattı sonuçlarına baktığımızda REBA'ya göre sonucun orta yükte olduğu görülmüştür. Bu puanın risk değerlendirmesi "iyileştirme gerekli olabilir" şeklindedir. BAUA LMM-2 puanı "yüksek yük" olarak belirlenir ve bu puana göre risk değerlendirme sonucu "iyileştirme gerekli" olur. Bu durumda REBA sonucuna göre iyileştirme çalışması yapılmayabilirken, BAUA sonucuna göre gerekli hale gelmiştir. Ergonomi çalışmalarının amacı KİSR risklerini ortadan kaldırmak olduğundan iyileştirme çalışmalarına nereden başlayacağınızı gösterecek sonuçlar en doğru şekilde belirlenmeli ve hiçbir etken gözden kaçırılmamalıdır.

Tablo 6.28. Dört kaynak hattının REBA ve BAUA yöntemine göre ergonomik risk değerlendirme skorları

	1- Gunlı manuel kaynak hattı		2- Sabit spot kaynak hattı		3- Ark kaynağı tamir hattı		4- Pedal kaynak hattı	
	Risk Puanı	Düzy	Risk Puanı	Düzy	Risk Puanı	Düzy	Risk Puanı	Düzy
REBA	7	Orta yük	10	Yüksek yük	5	Orta yük	4	Orta yük
LMM-1	40	Yüksek yük	56	Çok yüksek yük	-	-	24	Orta yük
LMM-2	6	Düşük yük	7	Düşük yük	8	Düşük yük	45	Yüksek yük
LMM-3	46	Yüksek yük	9	Düşük yük	26,5	Yüksek yük	9	Düşük yük

Tablo 6.29, REBA ve BAUA karşılaştırmasını içermektedir. BAUA'yı LMM-1, 2 ve 3 olarak bir bütün olarak ele aldığımızda REBA'dan daha fazla kriteri analiz ettiği söylenebilir. Hem REBA hem de BAUA, tüm vücut kullanılarak yapılan işler için kullanılır. REBA ve BAUA arasındaki en büyük fark, ZAP değerlendirmesinin BAUA'da her zaman kullanılması ve REBA'da zamanın dikkate alınmamasıdır. BAUA'da öncelikle

kaldırma mı yer değiştirme mi tutma mı yoksa taşıma işi mi olduğuna karar vermek gerekir. BAUA'da REBA'ya göre uygulama koşulları, parmak ve eldeki kuvvet, hareket hızı ve iş organizasyonu da incelenir.

Tablo 6.29. REBA ve BAUA yöntemlerinin karşılaştırılması

	Gövde Boyun Bacak	Üst kol Alt kol Bilek	Yük	Tutuş (Kavrama)	Hareket Frekans	Süre	Uygulama koşulları	Hareket hızı	Parmak & eldeki kuvvet	İş organizasyo nu
REBA	√	√	√	√	√	X	X	√	X	X
LMM-1	√	X	√	√	√	√	√	X	X	X
LMM-2	√	X	√	X	√	√	√	√	X	X
LMM-3	√	√	√	√	√	√	√	X	√	√

İşletmenin tüm üretim hatları incelenerek, çalışanların maruz kaldığı fiziksel zorlamaların en fazla olduğu kaynak işlemlerinde riskli çalışma alanları belirlenmiştir. REBA ve BAUA risk değerlendirme yöntemleri arasındaki uyumluluk ve yöntemlerin dört riskli işin risk düzeyini doğru bir şekilde sınıflandırma yeteneği incelenmiş ve yöntemler arasında risk altındaki işlerin risk altında olarak tanımlanabilmesinde önemli farklılıklar bulunmuştur.

REBA yönteminde vücut her duruş için üst ve alt olarak ikiye ayrılır ve duruş sırasında uzuvların açılara göre değerlendirme yapılır. Toplam puan boyun, vücut, üst ve alt uzuv pozisyonlarının kombinasyonu ile hesaplanır.

Art arda farklı işler yapıyorsa bunları ortaklaşa değerlendirmek pek kolay ve doğru değildir. Böyle durumlarda risk değerlendirmesi yapabilmek için işin daha detaylı analizi gerekir. BAUA yöntemi zorlanma sınırının iş bilimsel ölçütlere göre saptanmasında pratiğe yönelik, basit yasal zorunlulukları yerine getiren, çok boyutlu bir değerlendirme imkânı sağlamaktadır. Bu yöntem tıbbi ve iş bilimsel bakış açılarının yanı sıra çalışma koşullarının sosyal ve iş yasalarına uygunluğunun saptanmasında yardımcı bir yöntemdir. Bu yöntemi diğer yöntemlerden ayıran en önemli unsur yapılan işin çalışma süresi içinde tekrarlanma sıklığına, süresine veya alınan yol mesafesine göre zaman ağırlığının belirlenmesidir. İş yaparken vücut uzvunun aldığı duruş şeklinin yanı sıra el-kol pozisyonu ile birlikte parmak ve el bölgesinde uygulanan gücün seviyesi, başka işlere

göre yüklenmedeki değerlendirilmeler ve işin görülme netliği, gürültü, rutubet ve hava akımı gibi uygulama koşulları da değerlendirilmektedir.

6.4. Çözüm Yöntemlerinin Kararı

Otomotiv sektöründeki kaynak hatlarında yapılan ergonomik risk değerlendirme çalışmalarının REBA ve BAUA karşılaştırılma sonuçlarından da görüleceği gibi sıralı işlerin yapıldığı bir iş istasyonunda, daha çok güç ve vücut kullanılarak yapılan işlerde daha detaylı analiz yapma imkanı sunan BAUA yöntemi daha başarılı olacaktır. BAUA yöntemi, daha fazla kriteri dikkate aldığından REBA yönteminde göz ardı edilmiş durumların da değerlendirilmesine imkan sağlamaktadır. Otomotiv sektöründe yapılan çalışmalarda zaman en önemli unsurdur. BAUA yöntemini diğer yöntemlerden ayıran en önemli unsur yapılan işin çalışma süresi içinde tekrarını, süresini, alınan yol mesafesini göz önünde bulundurmak olduğundan çalışma için en uygun ergonomik risk değerlendirme yönteminin BAUA olduğunu karar verilmiştir.

Doğrusal Programlama (DP) yöntemi, gerçek vaka analizlerinin yapıldığı işletmelerde minimum maliyet-maksimum kar ile en uygun bileşeni üretme, en uygun üretim karışımını elde etme gibi çalışmalarda yöneticiler tarafından tercih edilen bir yöntemdir. Bir DP probleminde, modelden beklenen sonucun elde edilmesi için ulaşılmak istenen amacın net bir şekilde biliniyor olması ve nicel olarak yazılabiliyor olması gereklidir. Ele alınan bu problemde çalışanların önemli 5 kriterini ve ergonomik iş yüklerini göz önünde bulundurarak iş yükü düzeylerini minimize eden kompleks bir iş rotasyon çizelgeleme problemi ele alınmıştır. DP'nin doğrusallık, toplanabilirlik ve kesinlik varsayımları sağlanmakla birlikte insan planlaması olduğu için bölünebilirlik varsayımı çalıştırılmaz, sonuçların tam sayılı elde edilmesi gerekir bu nedenle model doğrusal programlama ile kurulmuştur. DP'nin üç temel bileşeni olan amaç fonksiyonu, kısıtlayıcı fonksiyonlar ve pozitif kısıtlamalar ele alınan problemde net bir şekilde belirlenerek nicel olarak ifade edilebilmiştir.

7. ÖNERİLEN MATEMATİKSEL MODEL

Bu tez çalışmasında, yöneylem araştırması alanındaki optimizasyon teknikleri, insan kriterlerini dikkate alan iş rotasyon planını geliştirmek için kullanılmıştır. Ergonomik iş yükünü dikkate alan tam sayılı doğrusal programlama ile iş rotasyonu modeli, hat verimliliğini korurken ergonomik tehlikeye maruz kalmayı etkili bir şekilde azaltabilir. Modelin amacı gün içerisindeki toplam iş yükünü işçinin işe uygunluğunu da dikkate alacak şekilde minimize ederek ve benzer işlerin ard arda gelmesini engelleyerek işçiler arasında dengeli iş yükü dağılımını sağlamaktır. Problem çözümü için doğrusal 0-1 tam sayılı model önerilmiştir. Koşullar şunlardır:

Varsayımlar:

- (1) Kümülatif iş yükü, bir sonraki iş gününe taşınmaz. Bu nedenle, herhangi bir iş istasyonu, bir gün içindeki ilk çalışma döneminde çalışana atanabilir.
- (2) İş rotasyonu programı oluşturulduğunda, işçiler sonraki iş günü başlangıcı için bir sonraki iş istasyonuna atanacaktır. Diğer bir deyişle, ilk iş gününde 1. iş istasyonuna rotasyon 1 için atanan işçi, sonraki gün başında 2. iş istasyonuna atanacaktır.
- (3) Çalışanların ve istasyonların boy, yaş, yetenek, deneyim ve sağlık kriterleri/gereklikleri değerlendirilerek modele uygunluk puanı olarak eklenmiştir.

Kısıtlar:

- (1) Bir işçi, her rotasyonda yalnızca bir iş istasyonunun görevlerini yapar.
- (2) Her rotasyonda iş istasyonuna yalnızca bir işçi atanır.
- (3) İşçiler, aynı vücut bölgesinde nispeten yüksek iş yükü olan iş istasyonlarında art arda çalışmamalıdır.

İndisler:

i : İşçi indisi ($i=1,2,3...I$)

j : İstasyon indisi ($j=1,2,3...J$)

p : Rotasyon indisi ($p=1,2,3...P$)

k : Ergonomi iş yükü türü indisi ($k=1,2,...,K$)

Alias k,h ; (k ve h aynı indisler)

Parametreler:

F_j : İstasyonlar ve mola yeri arasındaki yürüyüş süresinin iş yüküne etkisini gösteren bir parametredir.

T_j : j istasyonundan mola yerine yürüme süresi

T_{avg} : İstasyonlar ve mola yeri arasında ortalama yürüme süresi

M_{ij} : j . istasyonda çalışacak i operatörünün ağırlıklı toplam uygunluk puanı

w_b : boy parametre ağırlığı

w_y : yaş parametre ağırlığı

w_d : deneyim parametre ağırlığı

w_e : yetenek parametre ağırlığı

w_s : sağlık parametre ağırlığı

M_{ij}^b : j . istasyonda çalışacak i operatörünün boy uygunluk puanı

M_{ij}^y : j . istasyonda çalışacak i operatörünün yaş uygunluk puanı

M_{ij}^d : j . istasyonda çalışacak i operatörünün deneyim uygunluk puanı

M_{ij}^e : j . istasyonda çalışacak i operatörünün yetenek uygunluk puanı

M_{ij}^s : j . istasyonda çalışacak i operatörünün sağlık uygunluk puanı

LMM_{jk} : j istasyonun LMM_k puanı

$SLMM_{jk}$: j istasyonun LMM_k puanının $\{0-1\}$ binary cinsinden değeri

LMM_{max} : LMM değerlerinin en büyüğü

Karar Değişkenleri:

$$X_{ijp} = \begin{cases} 1, & i \text{ işçisi } p \text{ rotasyonunda } j \text{ istasyonuna atanırsa} \\ 0, & \text{diğer durumlar} \end{cases}$$

$S+ikh, S-ikh$: Her i için, k ve h türündeki LMM'lerin birbirinden farkını ifade eden pozitif değişkenlerdir.

Matematiksel Model:

$$\text{Min}Z = \left(\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{p=1}^P \sum_{k=1}^K LMM_{jk} * F_j / M_{ij} * X_{ijp} \right) + \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \sum_{h=1}^H (S_{+ik} + S_{-ik}) \quad (7.1)$$

Eşitlik 7.1; işçinin işe uygunluğunu da dikkate alarak bir gün içerisindeki toplam iş yükünü minimize etmek ve pozitif olan S değişkenini yani LMM iş yükleri arasındaki farkları en aza indirmektir.

$$\text{Top}(j,p;X_{ijp}*LMM_{jk}) - \text{Top}(j,p,X_{ijp}*LMM_{jh}) = S_{+ik} - S_{-ik} \quad \text{Her } i,k,h \text{ k!=h, k<h;} \quad (7.2)$$

Eşitlik 7.2; her i için, LMM türleri arasındaki fark S+ ve S- değişkenleriyle ifade edilir. LMM1 ve LMM2, LMM2 ve LMM3, LMM1 ve LMM3 arasındaki mutlak farkların toplamı arasındaki değişimi kontrol etmektedir. Diğer bir deyişle LMM türleri arasındaki farkları (+) ve (-) yönde minimize etmeye çalışır.

$$M_{ij}^{total} = w_b.M_{ij}^b + w_y.M_{ij}^y + w_d.M_{ij}^d + w_e.M_{ij}^e + w_s.M_{ij}^s \quad \forall i,j \quad (7.3)$$

Eşitlik 7.3; j. istasyonda çalışacak i işçinin toplam uygunluk puanını hesaplamak için kullanılır.

Uygunluk, boy, yaş, yetenek, deneyim ve sağlık parametrelerinin iş istasyonunun gerektirdiği sınır değer ve işçinin sahip olduğu değere göre matrisler üzerinden hesaplanır.

$$F_j = \frac{T_j}{T_{avg}} \quad , \forall j \quad (7.4)$$

$$T_{avg} = \frac{\sum_{j=1}^J T_j}{J}$$

Eşitlik 7.4; istasyonlar ve mola yeri arasındaki yürüyüş süresinin iş yüküne etkisini gösteren bir parametredir.

İşçinin her rotasyondan sonra işe başlama süresi belirli ve herkes için aynıdır. Yürüyüş süresi arttıkça işçinin mola süresi azalacaktır. Mola süresinin azalması iş yükü azaltıcı yönde etki etmez, ters orantılıdır.

$$\sum_{j=1}^J [(X_{ijp} * SLMM_{jk}) + (X_{ijp+1} * SLMM_{jk})] \leq 1 \quad p = 1, \dots, p-1 \quad \forall i, k \quad (7.5)$$

Eşitlik 7.5; işçiye aynı tür yüksek iş yükünün yüklenmesine sebep olan ardışık iş istasyonlarının atanmasını önler.

Her i, k ve p için, işçinin ardışık iki rotasyonda SLMM parametre sonucu 1 olan işlere atama yapılmayacaktır. Yaparsa kısıt sağlanmayacaktır.

$$SLMM_{jk} = \begin{cases} 1, & LMM_{jk} \geq 25 \\ 0, & \text{diğer durumlar} \end{cases} \quad (7.6)$$

Eşitlik 7.6; LMM puanları 25'ten büyükse 1, değilse 0 değeri aldığını gösterir.

LMM skorları düşük iş yükünden ağır iş yüküne kadar 1-4 arasındadır. Puan 25 (skor 3) olduğunda; iş yükü yüksektir ve ergonomik düzenlemenin yapılması gerekir. Bu nedenle sınır değer olarak “25” baz alınmıştır.

$$\sum_{j=1}^J X_{ijp} = 1 \quad , \quad \forall i, \forall p \quad (7.7)$$

Eşitlik 7.7; işçi her periyotta bir işe atanır.

$$\sum_{i=1}^I X_{ijp} = 1 \quad , \quad \forall p, \forall j \quad (7.8)$$

Eşitlik 7.8; her rotasyonda bir işçi sadece bir işe atanır.

$$\sum_{p=1}^P X_{ijp} \leq M_{ij}^b * P \quad , \quad \forall i, \forall j$$

$$\sum_{p=1}^P X_{ijp} \leq M_{ij}^y * P \quad , \quad \forall i, \forall j$$

$$\sum_{p=1}^P X_{ijp} \leq M_{ij}^d * P \quad , \quad \forall i, \forall j$$

$$\sum_{p=1}^P X_{ijp} \leq M_{ij}^e * P \quad , \quad \forall i, \forall j$$

$$\sum_{p=1}^P X_{ijp} \leq M_{ij}^s * P \quad , \quad \forall i, \forall j$$

$$X_{ijp} \in \{0,1\} \quad , \quad \forall i, j, p \quad (7.9)$$

Eşitlik 7.9; işaret kısıtlarıdır.

7.1. Matematiksel Modelin Uygulaması

Firmada son beş yılın revir kayıtları incelendiğinde işe bağlı kas iskelet sistemi rahatsızlıklarının en fazla görüldüğü bölümün kaynak bölümü olduğu belirlenmişti, bu nedenle de çalışmalar için pilot bölüm olarak kaynak operatörleri seçilmiştir (Tablo 7.1).

Tablo 7.1. 5 yıllık işe bağlı kas iskelet sistemi rahatsızlıklarının kayıtları

Hastalık Kategorisi	Kişi Sayısı/5 yıl			
	Pres	Kaynak	Kalite	Lojistik
Bel Rahatsızlığı	579	672	31	287
Boyun Rahatsızlığı	94	101	1	35
Kas-İskelet Sistemi Rahatsızlıkları	787	841	28	370
Toplam	1460	1614	60	672

Modelin uygulaması 10 kaynak iş istasyonunda 10 işçi ile gün içerisinde 4 kez rotasyon olacak şekilde yapılmıştır. Problem ILOG CPLEX adlı optimizasyon yazılım programında çözülmüştür. Çalışmanın adımları aşağıdaki gibidir:

- 1-Öncelikle her iş istasyonu için 5 ergonomik kritere göre gereklilikleri belirlenmiştir.
- 2-10 işçinin her biri her 10 iş için, 5 ergonomik kritere göre belirli puan aralığıyla değerlendirilmiş ve uygunluk matrisleri oluşturulmuştur.
- 3-Ergonomik kriterlerin önem ağırlıkları; iş yerindeki iş güvenliği uzmanları ve iş yeri hekimi tarafından yapılan değerlendirmeler ile AHP yöntemine göre belirlenmiştir.
- 4-10 iş istasyonu BAUA yöntemine göre değerlendirilerek, işlerin LMM1, LMM2, LMM3 iş yükü skorları belirlenmiştir.
- 5- 10 iş istasyonunun mola yerine olan yürüme süresi ölçülmüştür.
- 6- Kurulan modelde elde edilen veriler kullanılarak 10 işçi için gün içerisinde uygulanacak iş rotasyonu sırası elde edilmiştir.

7.1.1. İş İstasyonlarının Ergonomik Kriterlere göre Gereklilikleri

Pilot bölge olarak belirlenen 10 iş istasyonunun ergonomik kriterlere göre değerlendirilmesi yapılmış ve gerekli değerler Tablo 7.2’de gösterilmiştir.

Tablo 7.2. İş istasyonlarının ergonomik kriterlere göre gereklilikleri

Kriter/ (iş)j	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8	J9	J10
Boy (cm)	$170 \leq B \leq 185$	$B \geq 170$	-	$B \geq 170$	$165 \leq B \leq 175$	-	$B \geq 170$	$170 \leq B \leq 185$	-	$B \geq 165$
Yaş	$Y \geq 30$	$25 \leq Y \leq 40$	-	$25 \leq Y \leq 45$	$Y \geq 25$	$Y \geq 25$	$25 \leq Y \leq 45$	$25 \leq Y \leq 40$	-	$25 \leq Y \leq 45$
Deneyim	$D \geq 5$	$D \geq 3$	-	$D \geq 5$	$D \geq 3$	$D \geq 3$	$D \geq 2$	$D \geq 5$	-	$D \geq 3$
Yetenek (skor)	$E \geq 1$	$E \geq 1$	$E \geq 1$	$E \geq 1$	$E \geq 1$	$E \geq 1$	$E \geq 1$	$E \geq 1$	$E \geq 1$	$E \geq 1$
Sağlık (skor)	$S \geq 2$	$S \geq 1$	$S \geq 1$	$S \geq 2$	$S \geq 1$	$S \geq 1$	$S \geq 2$	$S \geq 2$	$S \geq 1$	$S \geq 2$

7.1.2. İşçilerin Ergonomik Kriterler için İş İstasyonlarının Gerekliliklerine göre Değerlendirilmesi

İşçilerin boy ve yaş durumları Tablo 7.3’de verilmiştir. İşlerin gereksinimlerine göre 0-2 arasında puanlanmıştır.

Tablo 7.3. İşçilerin boy ve yaş durumları

Kriter/i	İşçi 1	İşçi 2	İşçi 3	İşçi 4	İşçi 5	İşçi 6	İşçi 7	İşçi 8	İşçi 9	İşçi 10
Boy (cm)	165	189	160	170	168	163	175	180	174	165
Yaş (yıl)	27	32	40	38	50	42	38	33	43	52

Tablo 7.4’de kriterlerin değerlendirme aralıkları gösterilmektedir. Bu seviyelere uygun olacak şekilde 1. işin boy kriteri değerlendirme aralıkları Tablo 7.5’de gösterilmektedir. 10 iş için aynı şekilde işin gerekliliklerine göre değerlendirme aralıkları belirlenmiştir.

Tablo 7.4. Kriterlerin değerlendirme seviyeleri

Seviyeler	Değerlendirme
0	Çalışamaz
1	Yeterli değil
2	Yeterli

a) Boy

Tablo 7.5. Birinci işin boy kriterine göre değerlendirilmesi

Kriter	Seviyeler	Değerlendirme
<165 & >190	0	Çalışamaz
$165-169$ & $186-190$	1	Uygun
$170 \leq B \leq 185$	2	En uygun

Tablo 7.6’da 10 işçinin boy kriteri için 0-2 değerlendirme aralığında yapılan işlere uygunluk skorları gösterilmektedir.

Tablo 7.6. İşçilerin boy kriterine göre işlere uygunluk matrisi (M_{ij}^b)

M_{ij}^b İşçi/İş	j_1	j_2	j_3	j_4	j_5	j_6	j_7	j_8	j_9	j_{10}
i1	1	1	1	1	2	2	1	1	1	1
i2	1	2	2	2	0	2	2	1	2	2
i3	1	2	2	2	2	2	2	1	2	2
i4	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
i5	1	2	2	2	2	2	2	1	2	2
i6	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
i7	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
i8	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2
i9	1	1	2	1	2	2	1	1	1	1
i10	1	1	2	1	2	2	1	1	1	1

b)Yaş

Tablo 7.7’de 1. işin yaş kriteri değerlendirme aralıkları gösterilmektedir. 10 iş için aynı şekilde işin gerekliliklerine göre değerlendirme aralıkları belirlenmiştir.

Tablo 7.7. Birinci işin yaş kriterine göre değerlendirilmesi

Kriter	Seviyeler	Değerlendirme
<28	0	Çalışamaz
28-29	1	Uygun
≥ 30	2	En uygun

Tablo 7.8’de 10 işçinin yaş kriteri için 0-2 değerlendirme aralığında yapılan işlere uygunluk skorları gösterilmektedir.

Tablo 7.8. İşçilerin yaş kriterine göre işlere uygunluk matrisi (M_{ij}^y)

M_{ij}^y İşçi/İş	j_1	j_2	j_3	j_4	j_5	j_6	j_7	j_8	j_9	j_{10}
i1	1	1	2	1	2	2	1	1	2	1
i2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
i3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
i4	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
i5	1	1	2	1	2	2	1	1	2	1
i6	2	1	2	2	2	2	1	2	2	1
i7	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
i8	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
i9	2	1	2	2	2	2	1	2	2	1
i10	1	1	2	1	2	2	1	1	2	1

c) Deneyim

Tablo 7.9’da 1. işin deneyim kriteri değerlendirme aralıkları gösterilmektedir.

Tablo 7.9. Birinci işin deneyim kriterine göre değerlendirilmesi

Kriter (yıl)	Seviyeler	Değerlendirme
$D < 1$ & $E < 1$	0	Çalışamaz
$4 \leq D < 5$	1	Uygun
$D \geq 5$	2	En uygun

10 işçinin deneyim kriteri için 0-2 değerlendirme aralığında yapılan işlere uygunluk skorları Tablo 7.10’da gösterilmektedir.

Tablo 7.10. İşçilerin deneyim kriterine göre işlere uygunluk matrisi (M_{ij}^d)

M_{ij}^d İşçi/İş	j_1	j_2	j_3	j_4	j_5	j_6	j_7	j_8	j_9	j_{10}
i1	0	2	2	0	2	2	2	0	0	2
i2	2	2	2	2	0	2	0	2	2	2
i3	0	2	2	0	2	2	2	2	2	0
i4	1	0	2	1	0	2	2	0	2	0
i5	2	0	2	0	2	2	2	2	2	2
i6	2	2	2	0	0	2	2	2	2	2
i7	1	0	2	1	0	0	2	1	0	2
i8	1	2	2	0	2	2	0	1	0	2
i9	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
i10	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2

d) Yetenek

1. işin yetenek kriteri değerlendirme aralıkları Tablo 7.11’de gösterilmektedir.

Tablo 7.11. Birinci işin yetenek kriterine göre değerlendirilmesi

Kriter (skor)	Seviyeler	Değerlendirme
$E < 1$	0	Çalışamaz
$1 \leq E \leq 2$	1	Uygun
$3 \leq E \leq 4$	2	En uygun

Pers onel	Hat				Bildiği Hat Sayısı		G1-09-1	G2-04-1	G3-01-1	G3-04-1	G4-06-1	G4-09-1	G5-06-1	G6-04-1	G4-09-1	G5-06-1	G6-04-1	G7-01-1	G7-04-1
	1	2	3	4	≤5	≥6													
A	5	0	1	0															
B	7	2	0	0															
C	4	0	1	0															
D	9	0	2	1															

Açıklama:

	Prosesini yapar, kontrol edilmesi gerekir.		Prosesini kalite standartlarına uygun yapar.
	Prosesini kalite standartlarına uygun ve süresinde yapar.		Prosesini kalite standartlarına uygun yapar ve diğerlerine öğretebilir.

Şekil 7.1. İşçi yetenek değerlendirme formu örneği

Çalışma kapsamında işçiler için yetenek değerlendirme formu oluşturulmuş ve takım liderleri tarafından işçilerin yetenek değerlendirmesi yapılmıştır. Şekil 7.1’de örnek işçi yetenek değerlendirme formu gösterilmektedir.

Tablo 7.12’de 10 işçinin yetenek kriteri için 0-2 değerlendirme aralığında yapılan işlere uygunluk skorları gösterilmektedir.

Tablo 7.12. İşçilerin yetenek kriterine göre işlere uygunluk matrisi (M_{ij}^e)

M_{ij}^e İşçi/İş	j_1	j_2	j_3	j_4	j_5	j_6	j_7	j_8	j_9	j_{10}
i1	1	1	2	0	2	2	2	1	0	2
i2	1	2	2	1	0	2	0	1	2	1
i3	0	2	2	0	1	2	1	1	2	0
i4	1	0	2	2	0	2	2	0	2	0
i5	2	0	2	0	2	2	2	1	2	2
i6	1	1	2	0	0	1	2	1	2	1
i7	2	0	2	1	0	0	2	2	0	2
i8	1	2	1	0	1	1	0	2	0	1
i9	2	1	2	1	1	2	1	1	2	1
i10	1	2	2	1	2	2	1	1	1	2

e) Sağlık

Tablo 7.13’de 1. işin sağlık kriteri değerlendirme aralıkları gösterilmektedir.

Tablo 7.13. Birinci işin sağlık kriterine göre değerlendirilmesi

Kriter	Seviyeler	Değerlendirme
$S < 1$	0	Çalışamaz
$S \geq 1$	1	Hafif rahatsız
$S = 2$	2	Rahatsızlık yok

İş yeri hekimi tarafından yapılan işçinin sağlık değerlendirmesinde göz önünde bulundurulacak sağlık kriterleri:

*Bel rahatsızlığı

*Boyun rahatsızlığı

*Boyun fıtığı

*Menüsküs

*Diğer kas-iskelet sistemi rahatsızlıklarıdır.

10 işçinin sağlık kriteri için 0-2 değerlendirme aralığında yapılan işlere uygunluk skorları Tablo 7.14’de gösterilmektedir.

Tablo 7.14. İşçilerin sağlık kriterine göre işlere uygunluk matrisi (M_{ij}^s)

M_{ij}^s İşçi/İş	j_1	j_2	j_3	j_4	j_5	j_6	j_7	j_8	j_9	j_{10}
i1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
i2	0	2	1	0	2	1	2	1	2	0
i3	0	2	1	1	2	1	2	0	2	0
i4	1	2	2	2	0	2	2	1	2	1
i5	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
i6	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
i7	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2
i8	1	2	2	2	0	2	2	1	2	1
i9	0	2	1	2	2	1	2	1	2	0
i10	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2

7.1.3. Ergonomik Kriterlerin Önem Ağırlıklarının Belirlenmesi

Boy, yaş, deneyim, yetenek ve sağlık ergonomik kriterlerinin önem ağırlıklarının belirlenebilmesi için AHP çok kriterli karar verme tekniğinden yararlanılmıştır.

Çeşitli alternatifler arasında, birden fazla kriteri göz önünde bulundurarak seçim yapılabilmesini sağlayan çok kriterli karar verme problemlerinde; kriterler arasında önem, üstünlük veya ağırlık belirlemede karşılaşılan temel sorunlardır. AHP yöntemi bu sorunu çözmek için kullanılan bir ÇKKV yöntemidir. Karar vericinin hem öznel hem de nesnel düşüncelerini karar sürecine dahil edebilmeyi sağlayan AHP yöntemi, grup veya bireyin önceliklerini de dikkate alan, nicel ve nitel değişkenleri birlikte değerlendiren bir matematiksel metottur. Yöntemin bu özelliği, diğer karar verme metodlarına göre AHP’yi daha güçlü kılmaktadır. AHP, karar vericiye nasıl karar verilmesi konusunda bir zorunluluk kılmadan kendi karar verme kriterlerini göz önünde bulundurma fırsatı sağlayarak daha iyi kararların alınması sağlar. Somut ve soyut kriterler bir arada kullanılabildiğinden çok fazla sayıda varsayım yapmaya gerek kalmadan geçmiş

verilere ve ileri düzey matematik bilgisine ihtiyaç olmadan yöntem kolayca uygulanabilir. AHP yöntemi genel bir ifadeyle, yargılar daha genel ve az kontrol edilebilenden, daha özel ve daha fazla kontrol edilebilene doğru düzenlenmektedir. Ayrıca, karar veren de uygulayan da kendi değerlendirmesini modele yansıtabildiği ve karar sürecinde birebir yer aldığı için yöntemin sonuçlarını kolayca anlar ve yorumlar. Böylece sonuçların uygulanma olasılığı da diğer modellere kıyasla daha yüksektir (Gülenç ve Bilgin, 2010).

AHP yönteminin ilk aşamasında karar problemi ayrıntılı olarak tanımlanır. Daha sonraki aşamada ise kararın hiyerarşisi kurulur. Karar hiyerarşisinin oluşturulabilmesi için alternatifler ve kriterler belirlenir.

İş yerindeki iş güvenliği uzmanları ve iş yeri hekimi ile yapılan ortak bir çalışma sonunda karar alternatifleri ve karar kriterleri aşağıdaki gibi belirlenmiş ve tanımlanmıştır.

İşçilerin işe uygunluk matrisinin elde edilebilmesi için kullanılan boy, yaş, deneyim, yetenek ve sağlık karar kriterlerinin önem ağırlıklarının belirlenebilmesi için beşli likert ölçeği kullanılarak karşılaştırma yapılmıştır.

- 1- Hiç katılmıyorum
- 2-Katılmıyorum
- 3-Kararsızım
- 4-Katılıyorum
- 5-Kesinlikle katılıyorum

Tablo 7.15’de beş kriter için değerlendiricilerden biri tarafından yapılan örnek bir ikili karşılaştırma matrisi verilmiştir.

Tablo 7.15. İkili karşılaştırma matrisi

	Boy	Yaş	Deneyim	Yetenek	Sağlık
Boy	1,00	0,50	0,25	0,20	0,20
Yaş	2,00	1,00	0,33	0,20	0,20
Deneyim	4,00	3,00	1,00	0,50	0,25
Yetenek	5,00	5,00	2,00	1,00	0,33
Sağlık	5,00	5,00	4,00	3,00	1,00

Tablo 7.16’da ise ikili karşılaştırmaların toplam matrisi verilmiştir.

Tablo 7.16. İkili karşılaştırmalar toplam matrisi

	Boy	Yaş	Deneyim	Yetenek	Sağlık
Boy	1,00	0,80	0,23	0,20	0,20
Yaş	1,25	1,00	0,30	0,22	0,21
Deneyim	4,35	3,33	1,00	0,32	0,23
Yetenek	5,00	4,55	3,09	1,00	0,26
Sağlık	5,00	4,76	4,35	3,90	1,00
S. Toplam	16,60	14,44	8,97	5,64	1,90

İkili karşılaştırmalar toplam matrisinden sonra normalize edilir. Karşılaştırma matrisinde yer alan her eleman ait olduğu sütunun toplamına bölünerek normalize edilmiş olur. Normalize matris Tablo 7.17’de gösterilmektedir.

Tablo 7.17. Normalize matris

	Boy	Yaş	Deneyim	Yetenek	Sağlık	Kriter Ağırlık	
Boy	0,0602	0,0554	0,0256	0,0355	0,1054	0,0564	Mij ^b
Yaş	0,0753	0,0692	0,0334	0,0390	0,1107	0,0655	Mij ^y
Deneyim	0,2620	0,2308	0,1115	0,0573	0,1213	0,1566	Mij ^d
Yetenek	0,3012	0,3148	0,3448	0,1773	0,1353	0,2547	Mij ^e
Sağlık	0,3012	0,3298	0,4847	0,6909	0,5272	0,4668	Mij ^s

Tablo 7.17’de toplam matrisinden elde edilen normalize matrisinde satır toplamı yapıldığından kriterlerin ağırlıkları bulunur. Ağırlıklar bulunduktan sonra. Tutarlılık Oranının hesaplanması gerekir. İkili karşılaştırma matrisindeki yargıların tutarlılığı tutarlılık oranı ile sağlanmaktadır. Çeşitli örneklerin sonuçlarına göre bu oran 0,10 olarak tespit edilmiştir. Tutarlılık oranı eğer 0,10’un üzerinde çıkarsa bu durum bir tutarsızlık göstergesidir ve ikili karşılaştırma matrisinde elde edilen veriler gözden geçirilmelidir. Tutarlılık oranının 0,10’dan küçük olması tutarsızlığın kabul edilebilir olduğu anlamına gelmektedir ve verileri gözden geçirmeye gerek yoktur (Özdağoğlu, 2011).

Tablo 7.18. (RI) Rassal indeks değerleri

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0	0,52	0,89	1,11	1,25	1,35	1,40	1,45	1,49

$$\text{Tutarlılık oranı (CR)} = \frac{CI}{RI} \quad (7.10)$$

$$CI (\text{tutarlılık indeksi}) = \frac{\lambda_{\max} - 1}{n - 1} \quad (7.11)$$

Tutarlılık oranı (CR) Eşitlik 7.10'e göre hesaplanır. Tablo 7.18'den Rassal indeks (RI) değeri alınır ve Eşitlik 7.11 ile tutarlılık indeksi (CI) hesaplandıktan sonra $CR=CI/RI=0,00974/1,15=0,087$ olarak bulunmuştur. Tutarlılık oranı 0,10'dan düşük çıktığından AHP yöntemine göre kriterlerin karşılaştırılması yeterince tutarlıdır.

Kriterlerin önem ağırlıkları Tablo 7.17'de gösterilmektedir. Buna göre önem ağırlıkları sırasıyla; boy:0,0564; yaş:0,0655; deneyim:0,1566; yetenek:0,2547 ve sağlık:0,4668'dir. Elde edilen ağırlıklara göre modelde verilen uygunluk denkleminde işçilerin işlere uygunluk matrisi (Tablo 7.19) elde edilir.

Tablo 7.19. İşçilerin işlere uygunluk matrisi (M_{ij})

Mij İşçi/iş	j ₁	j ₂	j ₃	j ₄	j ₅	j ₆	j ₇	j ₈	j ₉	j ₁₀
i1	1,3	1,6	1,9	1,1	2,0	2,0	1,9	1,3	1,1	1,9
i2	0,8	2,0	1,5	0,8	1,1	1,5	1,2	1,2	2,0	0,8
i3	0,2	2,0	1,5	0,7	1,7	1,5	1,7	0,8	2,0	0,2
i4	1,1	1,2	2,0	1,8	0,2	2,0	2,0	0,7	2,0	0,7
i5	1,9	1,1	2,0	1,1	2,0	2,0	1,9	1,6	2,0	1,9
i6	1,7	1,7	2,0	1,2	1,2	1,7	1,9	1,7	2,0	1,7
i7	1,8	1,2	2,0	1,1	1,2	1,2	2,0	1,8	1,2	2,0
i8	1,1	2,0	1,7	1,2	0,8	1,7	1,2	1,4	1,2	1,3
i9	1,0	1,6	1,5	1,7	1,7	1,5	1,6	1,2	1,9	0,7
i10	1,6	1,9	2,0	1,6	2,0	2,0	1,6	1,6	1,7	1,9

7.1.4. Kaynak İş İstasyonlarının BAUA LMM Yöntemine Göre Ergonomik İş Yüklerinin Belirlenmesi

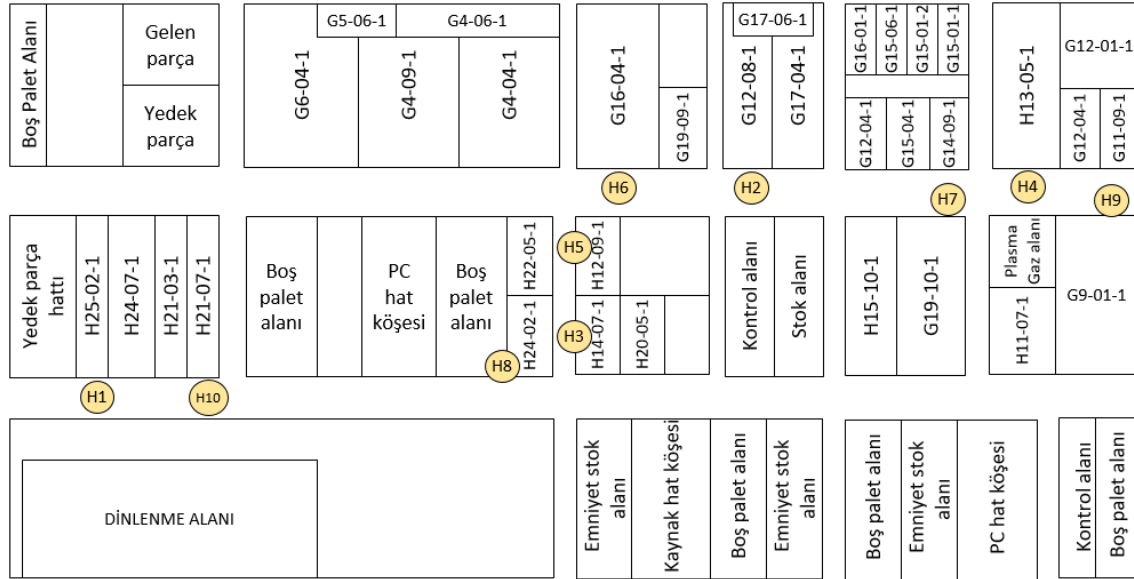
BAUA LMM-1 yönteminde göz önünde bulundurulanan temel kriterler; gövdenin öne eğilme durumu, yana dönme ya da eğilme olup olmaması, tekrar sıklığı, süresi ve yükün büyüklüğüdür, yapılan değerlendirme sonucu omurgadaki zorlanma hakkında bilgi verir. LMM-2 değerlendirme yönteminde ise itme-çekme işleri incelenir. Temel olarak; itme-çekme işlemi yaparken kullanılan yardımcı araca göre yükün ağırlığı, hareket hızı, bedenin düz ya da dik oluşu, çömelme, diz bükme, eğilme ve dönme durumu ve ayrıca işin yapıldığı alanın eğimli, kirli, çukurlu vb. durumları incelenir. LMM-3 değerlendirme yöntemi ile el-kol-omuz sistemi kasları kullanımıyla gerçekleştirilen manuel işler incelenmektedir. Bu yöntemde el-kol pozisyonu ile birlikte parmak ve el bölgesinde uygulanan gücün seviyesi de detaylı bir biçimde değerlendirilmektedir. Tablo 7.20'de 10 iş istasyonunda yapılan değerlendirme sonucunda LMM ergonomik iş yükü skorları verilmiştir.

Tablo 7.20. İş istasyonlarına ait LMM iş yükü skorları

LMM/iş	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8	J9	J10
LMM-1	20	50	30	60	0	12	30	12	30	0
LMM-2	45	15	9	13,5	8	0	8	45	8	4
LMM-3	9	14	18	9	32	9	9	24	24	26

7.1.5. 10 İş İstasyonunun Mola Yerine Olan Yürüme Süresinin Belirlenmesi

İşçilerin işe başlama ve molaya çıkma saatleri standarttır. Mola yerine yürüme süresi mola saatinin içinde sayılacağından iş istasyonunun mola yerine olan uzaklığı/yürüme süresi de dikkate alınmıştır. Örneğin her işçi için 10:00-10:15 arasında mola yapacaksa, mola yerine uzak olan istasyondaki işçinin yürüme süresi daha fazla olduğundan 15 dakika sürmesi gereken mola süresinde daha az dinlenmiş olacaktır. Şekil 7.2’de iş istasyonlarının mola yerlerine göre konumları ve Tablo 7.21’de de iş istasyonlarından mola yerlerine kadar olan yürüme süreleri gösterilmektedir.



Şekil 7.2. Kaynak hatları yerleşim planı

Tablo 7.21. İş istasyonlarından mola yerlerine kadar olan yürüme süreleri

Tj (min)	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	Tavg
Mola yeri	1,9	2,8	2,2	4,2	2,2	2,5	4,08	2,02	4,5	1,9	2,83
Fj:Tj/Tavg	0,67	0,99	0,78	1,48	0,78	0,88	1,44	0,71	1,59	0,67	

7.1.6. Modele Göre İş Rotasyonu Sırasının Belirlenmesi

Problem elde edilen verilere göre ILOG CPLEX adlı optimizasyon yazılım programında çözülmüş ve 10 işçi için gün içerisinde uygulanacak iş rotasyonu sırası elde edilmiştir. Tablo 7.22’de önerilen modeli kullanarak optimize edilmiş iş rotasyonu gösterilmektedir. Gün içerisinde işçiler 4 periyotta bir yer değiştireceklerdir.

Tablo 7.22. Kümülatif iş yükünü önleyen iş rotasyon programı

İşçi/ rotasyon periyodu	p ₁	p ₂	p ₃	p ₄
i ₁	j ₁₀	j ₃	j ₁₀	j ₃
i ₂	j ₉	j ₂	j ₉	j ₂
i ₃	j ₅	j ₉	j ₅	j ₉
i ₄	j ₆	j ₄	j ₆	j ₄
i ₅	j ₁	j ₇	j ₁	j ₇
i ₆	j ₈	j ₉	j ₈	j ₉
i ₇	j ₇	j ₈	j ₇	j ₈
i ₈	j ₂	j ₁₀	j ₂	j ₁₀
i ₉	j ₄	j ₅	j ₄	j ₅
i ₁₀	j ₃	j ₁	j ₃	j ₁

Tablo 7.22’de gösterildiği gibi; örneğin işçi 1, bir gün içerisinde, sırasıyla 10-3-10-3 numaralı istasyonlarda çalışacaktır.

Önerilen modelin performansını görebilmek için mevcut durum ve iş rotasyonu sonrası amaç fonksiyonu değerlendirilmesi yapılmıştır.

Tablo 7.23. Mevcut durum ve rotasyon sonrası iş yüklerinin karşılaştırılması

İşçi	Mevcut	Rotasyon	Zi değişim		Mevcut durumdaki LMM değerleri				Rotasyon sonrası LMM değerleri				LMM fark
	Zi total	Zi total			LMM 1	LMM 2	LMM 3	Topla m	LMM 1	LMM 2	LMM 3	Topla m	
1. işçi	67,6	149,8	82,2	LMM: LMM Fark:	128 88	40 40	80 48	248 176	83 4	79 7	86 3	248 14	-92%
2. işçi	185,9	208,1	22,1	LMM: LMM Fark:	72 16	56 88	144 72	272 176	66 23	89 27	116 50	271 100	-43%
3. işçi	217,9	160,3	-57,7	LMM: LMM Fark:	180 120	60 20	80 100	320 240	77 1	78 1	79 2	234 4	-98%
4. işçi	186,7	142,2	-44,5	LMM: LMM Fark:	56 64	120 88	32 24	208 176	74 2	72 5	77 3	223 10	-94%
5. işçi	379,1	104,8	-274,2	LMM: LMM Fark:	32 76	108 60	168 136	308 272	52 4	56 3	53 1	161 8	-97%

Tablo 7.23. (Devam) Mevcut durum ve rotasyon sonrası iş yüklerinin karşılaştırılması

İşçi	Mevcut Zi total	Rotasyon Zi total	Zi değişim		Mevcut Durumdaki LMM değerleri				Rotasyon sonrası LMM değerleri				LMM fark azalış
					LMM 1	LMM 2	LMM 3	Topla m	LMM 1	LMM 2	LMM 3	Topla m	
6. işçi	427,0	207,1	-219,9	LMM: LMM Fark:	20 60	80 32	48 28	148 120	91 8	83 6	89 2	263 16	-87%
7. işçi	292,8	155,9	-136,9	LMM: LMM Fark:	100 28	72 48	120 20	292 96	92 6	98 10	108 16	298 32	-67%
8. işçi	403,4	108,4	-295,1	LMM: LMM Fark:	40 72	112 28	84 44	236 144	78 6	84 12	72 6	234 24	-83%
9. işçi	207,8	197,3	-10,6	LMM: LMM Fark:	112 28	140 68	72 40	324 136	90 1	89 3	92 2	271 6	-96%
10. işçi	43,7	204,3	160,6	LMM: LMM Fark:	40 16	24 12	36 4	100 32	77 7	84 8	92 15	253 30	-6%
ΣZ :	2412,0	1638,2											-76%
Z fark:	-773,8	-32%											

İş rotasyonu modeli ile işçilerin işe uygunluk puanları dikkate alınmış ve aynı tür işlerin ard arda gelmesi engellenerek işçilerin uygun işlerde çalışması sağlanmıştır. İşe uygunluk puanlarını da dikkate alan kümülatif iş yükü miktarı mevcut duruma göre %32 (Tablo 7.23) azalmıştır. Aynı zamanda benzer işlerin ard arda gelmesini engelleyecek model ile LMM 1-2-3 iş yükleri arasındaki mutlak farklar dikkate alınarak işlerin işçiler arasında dengeli bir şekilde dağılımı sağlanmıştır. Mevcut duruma göre iş yüklerinin mutlak farkları ortalama %76 azalmıştır.

7.1.7. Sentetik Verilerle Modelin Uygulanması ve Sonuçların Değerlendirilmesi

Model performansını değerlendirmek için 30 sentetik senaryo üretilerek sonuçlar değerlendirilmiştir. Ek-A'da sentetik veri bilgileri ve sonuçları ayrıntılı olarak anlatılmıştır. Tablo 24'de sentetik verilerle çalışan modelin sonuçları ve önceki durumlarına göre değişim miktarları verilmiştir. Rotasyon sonrası toplam iş yükü ve LMM iş yükleri arasındaki farkların azaldığı tablo değerlerinde gösterilmektedir. Bu simülasyon çalışmalarının sonuçlarına göre daha olumlu sonuçlar elde edildiğinden modelin geçerli olduğu kabul edilebilmektedir.

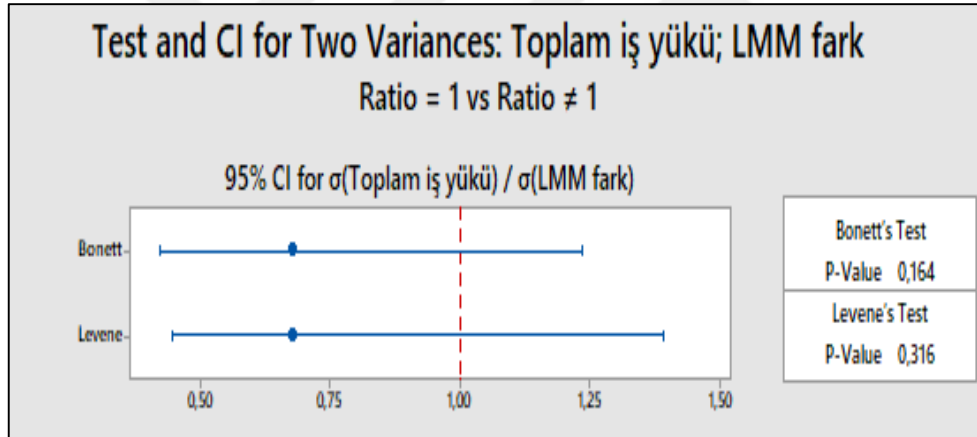
Tablo 7.24. Sentetik verilerle modelin uygulama sonuçları

Simülasyon no	Mevcut toplam iş yükü	Rotasyon sonrası toplam iş yükü	İş yükü değişimi		LMM iş yükleri arasındaki mutlak farkların değişim miktarı
1	2070,6	1435,8	-634,8	-31%	-83%
2	2594,2	1834,2	-760,0	-29%	-70%
3	1945,5	1432,0	-513,4	-26%	-88%
4	1933,6	1333,1	-600,5	-31%	-60%
5	1784,9	1257,7	-527,2	-30%	-43%
6	2043,4	1588,6	-454,8	-22%	-84%
7	2340,4	1470,6	-869,8	-37%	-62%
8	2412,0	1638,2	-773,8	-32%	-76%
9	2545,1	1615,5	-837,6	-34%	-88%
10	2192,2	1470,4	-721,8	-33%	-93%
11	2068,9	1406,8	-662,1	-32%	-84%
12	2198,4	1665,6	-532,9	-24%	-86%
13	2315,0	1622,1	-692,9	-30%	-78%
14	2391,2	1643,0	-748,2	-31%	-73%
15	2391,2	1483,4	-907,8	-38%	-40%
16	1767,9	1493,1	-274,8	-16%	-89%
17	2106,9	1490,0	-616,9	-29%	-89%
18	1969,0	1481,9	-487,1	-25%	-86%
19	1825,6	1375,1	-450,5	-25%	-91%
20	2704,3	1577,9	-1126,4	-42%	-84%
21	1468,6	1407,4	-61,6	-4%	-89%
22	2199,0	1704,2	-494,8	-23%	-90%
23	2464,4	1579,5	-884,9	-36%	-68%
24	2198,1	1477,8	-720,4	-33%	-81%
25	1805,0	1366,3	-438,7	-24%	-76%
26	1987,4	1449,1	-538,3	-27%	-86%
27	1956,8	1381,5	-575,4	-29%	-53%
28	1883,2	1481,9	-401,3	-21%	-85%
29	2303,9	1581,0	-722,9	-31%	-89%
30	1785,7	1433,1	-352,5	-20%	-81%

Eşitlik 7.1’de gösterilen amaç fonksiyonunda 2 amaç yer almaktadır. Bu iki bağımsız örneklemin ortalamaları arasındaki farkın anlamlılığını test etmek için Minitab paket programında 2-örneklem bağımsız t testi yapılmıştır.

$$\text{MinZ} = \underbrace{\left(\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{p=1}^P \sum_{k=1}^K LMM_{jk} * F_j / M_{ij} * X_{ijp} \right)}_{\text{Toplam iş yükü}} + \underbrace{\sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \sum_{h=1}^H (S_{+ikh} + S_{-ikh})}_{\text{LMM iş yükleri arasındaki fark}}$$

Bağımsız gruplar t test istatistiği, gruplar arası varyansın eşit olup olmamasına göre farklılık göstereceğinden t-testi yapılmadan önce grupların varyanslarının eşitliği test edilmiştir. Bunun için homojenlik testi olarak da bilinen Levene testi uygulanmıştır. Şekil 7.3’de Levene testi sonucu gösterilmektedir ve p değeri 0,316 bulunmuştur. p değerinin 0,05’den büyük olması her iki grubun varyanslarının homojen olduğunu göstermektedir. Bu sonuca göre t-testi sonucu da değişkenlik göstermektedir.



Şekil 7.3. Levene testi sonucu, Minitab çıktısı

Bağımsız gruplar t-testi hipotezleri aşağıdaki gibidir:

H_0 : Toplam iş yükü değerlerinin ortalaması, LMM iş yükleri arasındaki fark değerlerinin ortalamasından farklı değildir.

H_1 : Toplam iş yükü değerlerinin ortalaması, LMM iş yükleri arasındaki fark değerlerinin ortalamasından farklıdır.

Two-Sample T-Test and CI: Toplam iş yükü; LMM fark				
Two-sample T for Toplam iş yükü vs LMM fark				
	N	Mean	StDev	SE
Toplam iş yükü	30	1503	124	23
LMM fark	30	303	183	33
Difference = μ (Toplam iş yükü) - μ (LMM fark)				
Estimate for difference: 1200,1				
95% CI for difference: (1119,4; 1280,7)				
T-Test of difference = 0 (vs $\neq$): T-Value = 29,78 P-Value = 0,000 DF = 58				
Both use Pooled StDev = 156,0615				

Şekil 7.4. T- testi sonucu, Minitab çıktısı

Şekil 7.4’de gösterilen t-test istatistiğinin p değerine bakılarak H_0 hipotezi kabul veya reddedilir. p değeri $<0,05$ ise H_0 hipotezi reddedilir. p değeri 0,000 olarak bulunmuştur, buna göre istatistiksel olarak gruplar arasında anlamlı bir fark olduğuna karar verilir. H_0 hipotezi reddedilir, sonucuna göre toplam iş yükü değerlerinin ortalaması ile LMM iş yükleri arasındaki farkların ortalaması arasında anlamlı bir fark olduğu görülmektedir.

7.1.8. Amaç Fonksiyonunda Katsayıların Değerlendirilmesi

Eşitlik 7.1 amaç fonksiyonunda 2 amaç yer almaktadır. Bu iki amacın katsayıları eşitlikte 1 olarak kabul edilmiştir. Katsayısı değişimlerinin sonuca etkisini görebilmek amacıyla 0,1 aralığıyla katsayılarda değişim yapılarak problem çözdürülmüş ve değerlendirilmiştir. Eşitlik 7.1’de katsayı değerlendirmesini görebilmek için eşitlik gruplandırılarak basit forma getirilmiştir. Eşitlik 7.12’de amaç fonksiyonunun basitleştirilmiş hali verilmiştir.

$$\text{Min}Z = \underbrace{\left(\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{p=1}^P \sum_{k=1}^K LMM_{jk} * F_j / M_{ij} * X_{ijp} \right)}_{\text{A: Toplam iş yükü}} + \underbrace{\left(\sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \sum_{h=1}^H (S_{+ik} + S_{-ik}) \right)}_{\text{B: LMM iş yükleri arasındaki fark}}$$

Burada;

A: Çalışanların 5 kritere göre hesaplanan uygunluk puanı ve mola yerine yürüme mesafesi dikkate alınarak hesaplanan toplam iş yükü

B: LMM iş yükleri arasındaki fark

olmak koşuluyla amaç fonksiyonu;

$$\text{Min}Z = x * A + y * B \quad (7.12)$$

Amaç fonksiyonunda yer alan x ve y katsayılarındaki değişimin çözüme etkisini görebilmek için x=0; 0,1...1 ve y=1; 0,9...0 olacak şekilde sentetik 30 veri kümesi için model katsayılar değiştirilerek çözdürülmüş ve sonuçlara göre elde edilen A ve B değerlerinin pareto grafikleri yorumlanmıştır.

Tablo 7.25’de 1.sentetik veri kümesi için x ve y katsayıları 0,1 aralıklı olacak şekilde çözülmüş sonuçları yer almaktadır. Elde edilen grafiğe göre; minimizasyon olan amaç fonksiyonuna göre grafik eğrisi azalan yöndedir. Eşitlikte yer alan A’nın (Toplam iş yükü miktarı) katsayısı arttıkça A tarafının minimizasyonuna daha çok önem verildiği; B’nin (LMM iş yükleri arasındaki fark) katsayısı arttıkça B tarafının minimizasyonuna daha çok önem verildiği elde edilen sonuçlarla da görülmektedir. Ayrıca; grafikte 11 denemede 6 farklı sonuç elde edildiği diğer durumlarda sonuçların değişmediği görülmüştür.

x=0..0,2 ile y=1..0,8 iken sonuç değişmemekte,

x=0,3..0,4 ile y=0,7..0,6 iken sonuç değişmemekte,

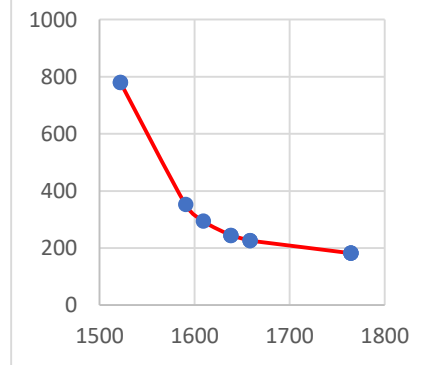
x=0,5..0,6 ile y=0,5..0,4 iken sonuç değişmemekte,

x=0,9..1 ile y=0,1..0 iken sonuç değişmemektedir.

Tablo 7.25. Amaç fonksiyonundaki katsayıların değerlendirilmesi (Sentetik-1)

		x eksen				y eksen			
x	*	A	+	y	*	B	=	Zamaç	
0	*	1764	+	1	*	182	=	182	
0,1	*	1764	+	0,9	*	182	=	340	
0,2	*	1764	+	0,8	*	182	=	498	
0,3	*	1658	+	0,7	*	226	=	656	
0,4	*	1658	+	0,6	*	226	=	799	
0,5	*	1638	+	0,5	*	244	=	941	
0,6	*	1638	+	0,4	*	244	=	1081	
0,7	*	1609	+	0,3	*	294	=	1214	
0,8	*	1591	+	0,2	*	352	=	1343	
0,9	*	1522	+	0,1	*	780	=	1455	
1	*	1522		0	*	780	=	1522	

x	y
1522	780
1591	352
1609	294
1638	244
1658	226
1764	182



Ek-B’de 30 sentetik veri kümesi için x ve y katsayıları 0,1 aralıklı olacak şekilde çözülmüş sonuçları ayrıntılı olarak anlatılmıştır. 30 sentetik veri kümesinin x ve y katsayılarının 0,1 aralıklı artırılarak modelde kullanılması ile elde edilen sonuçların medyan değerleri incelendiğinde $x=0,4-0,6$ ve $y=0,6-0,4$ iken hem A’nın (iş yükü toplamı) minimizasyonu hem de B’nin (LMM iş yükleri arasındaki farklar) minimizasyonu sağlanabilmektedir. Tablo 7.26’da aynı A ve B sonuçlarını veren x ve y katsayıları değerleri verilmiştir. Her iki taraf için de minimizasyonun sağlandığı katsayılar $x=0,5$ $y=0,5$ ’tir. Bu katsayıların dışında x artarken A azalmakta, y azalırken B artmaktadır. x ve y katsayılarının birbirine yakın olmaları amaç fonksiyonunda bulunan her iki amacı da minimize edebilmektedir. Elde edilen sonuçlarla da teyit edilmiştir.

Tablo 7.26. Amaç fonksiyonundaki katsayıların değerlendirilmesi

Veri No	x	y	Veri No	x	y
1	$x=0..0,2$ $x=0,3..0,4$ $x=0,5..0,6$ $x=0,9..1$	$y=1..0,8$ $y=0,7..0,6$ $y=0,5..0,4$ $y=0,1..0$	16	$x=0,1..0,4$ $x=0,6..0,7$	$y=0,9..0,6$ $y=0,4..0,3$
2	$x=0,1..0,2$ $x=0,3..0,7$ $x=0,9..1$	$y=0,9..0,8$ $y=0,7..0,3$ $y=0,1..0$	17	$x=0,1..0,6$	$y=0,9..0,4$
3	$x=0,1..0,2$ $x=0,5..0,6$ $x=0,7..0,8$	$y=0,9..0,8$ $y=0,5..0,4$ $y=0,3..0,2$	18	$x=0,1..0,7$	$y=0,9..0,3$
4	$x=0,2..0,3$ $x=0,4..0,5$ $x=0,7..0,8$	$y=0,8..0,7$ $y=0,6..0,5$ $y=0,3..0,2$	19	$x=0,1..0,3$ $x=0,6..0,7$	$y=0,9..0,7$ $y=0,4..0,3$
5	$x=0,1..0,4$ $x=0,5..0,7$	$y=0,9..0,6$ $y=0,5..0,3$	20	$x=0,1..0,3$ $x=0,4..0,5$ $x=0,7..0,8$	$y=0,9..0,7$ $y=0,6..0,5$ $y=0,3..0,2$
6	$x=0,1..0,3$ $x=0,4..0,5$ $x=0,6..0,7$	$y=0,9..0,7$ $y=0,6..0,5$ $y=0,4..0,3$	21	$x=0,1..0,5$	$y=0,9..0,5$
7	$x=0,1..0,4$ $x=0,5..0,8$	$y=0,9..0,6$ $y=0,5..0,2$	22	$x=0,1..0,5$	$y=0,9..0,5$
8	$x=0,1..0,2$ $x=0,3..0,4$ $x=0,8..0,9$	$y=0,9..0,8$ $y=0,7..0,6$ $y=0,2..0,1$	23	$x=0,2..0,3$ $x=0,5..0,6$ $x=0,8..0,9$	$y=0,8..0,7$ $y=0,5..0,4$ $y=0,2..0,1$
9	$x=0,2..0,3$ $x=0,4..0,6$ $x=0,7..0,8$ $x=0,9..1$	$y=0,8..0,7$ $y=0,6..0,4$ $y=0,3..0,2$ $y=0,1..0$	24	$x=0,1..0,3$ $x=0,9..1$	$y=0,9..0,7$ $y=0,1..0$
10	$x=0,1..0,5$	$y=0,9..0,5$	25	$x=0,1..0,4$ $x=0,7..0,8$	$y=0,9..0,6$ $y=0,3..0,2$
11	$x=0,1..0,3$	$y=0,9..0,7$	26	$x=0,2..0,3$ $x=0,6..0,7$ $x=0,8..0,9$	$y=0,8..0,7$ $y=0,4..0,3$ $y=0,2..0,1$
12	$x=0,1..0,2$ $x=0,7..0,8$	$y=0,9..0,8$ $y=0,3..0,2$	27	$x=0,2..0,4$	$y=0,8..0,6$

Tablo 7.26. (Devam) Amaç fonksiyonundaki katsayıların değerlendirilmesi

Veri No	x	y	Veri No	x	y
13	x=0,1..0,2 x= 0,3..0,5 x= 0,7..0,8	y=0,9..0, y= 0,7..0,5 y= 0,3..0,2	28	x=0,1..0,5 x=0,6..0,8	y=0,9..0,5 y=0,4..0,2
14	x=0,1..0,4 x= 0,6..0,7	y=0,9..0, y= 0,4..0,3	29	x=0,3..0,5 x=0,6..0,7	y=0,7..0,5 y=0,4..0,3
15	x=0,2..0,3 x= 0,4..0,6	y=0,8..0,7 y= 0,6..0,4	30	x=0,1..0,4	y=0,9..0,6

Uygulama yapılan işletmede modelin kolayca uygulanabilir olması için Cplex çözdürücünün excelden veri okuma ve sonuçları excele yazdırması için kod yazılmıştır. x ve y katsayıları için yapılan pareto analizi sonuçlarına göre $x=0,4 - 0,5 - 0,6 - 0,7$ ve $y=1-x$ olacak şekilde program girilen veri setine göre 4 sonuç elde edecek ve karar vericiye 4 sonuçtan birini elde etme imkanı sağlanabilecektir. Şekil 7.5’de veri girişinin yapıldığı excel sayfalarının görüntüleri verilmiştir.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	#Boy										
2	M_{ij}^b										
3	W/Job	j1	j2	j3	j4	j5	j6	j7	j8	j9	j10
4	i1	1	2	1	1	2	2	2	1	1	1
5	i2	1	1	1	2	1	1	2	2	2	1
6	i3	1	2	1	0	2	2	1	2	1	2
7	i4	2	1	2	2	2	1	2	2	2	2
8	i5	1	2	1	1	1	2	2	2	1	1
9	i6	2	1	2	1	2	1	1	2	1	2
10	i7	1	2	1	1	1	2	2	1	2	1
11	i8	2	1	1	2	0	2	1	1	1	1
12	i9	1	2	1	2	1	1	2	1	2	1
13	i10	2	1	2	1	2	2	2	1	1	1

Şekil 7.5. Çalışanların boy kriteri değerleri excel giriş ekranı

Şekil 7.5’de çalışana ait boy kriterine ait değerlerin girildiği sayfa gösterilmiştir. Çalışana ait diğer yaş, deneyim, yetenek ve sağlık kriterlerinin değerleri de işlere ait LMM değerleri ile iş istasyonlarının mola yerine olan mesafesi de Şekil 7.6’da görüldüğü gibi aynı excel veri dosyasına karar verici tarafından girilecektir.

FILE

HOME

INSERT

PAGE LAYOUT

Normal

Page Break

Preview

Page Layout

Custom Views

Workbook Views

☒ Ruler

☐ Gridline

Picture 1

:

✕

✓

fx

	A	B	C	D	E
1					
2			LMM-1	LMM-2	LMM-3
3		J1	50	35	12
4		J2	15	10	35
5		J3	18	20	12
6		J4	30	8	25
7		J5	8	20	10
8		J6	18	20	32
9		J7	12	26	9
10		J8	21	15	10
11		J9	21	15	30
12		J10	19	25	27

(a)

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
Tj (min)	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	Tavg	
Mola yeri	3,2	2,1	1,4	2,5	3,5	1,9	3,9	4	1,8	2,5	2,68	
Fj:Tj/Tavg	1,19	0,78	0,52	0,93	1,31	0,71	1,46	1,49	0,67	0,93		

(b)

Şekil 7.6. İşlere ait LMM yükleri (a) ve iş istasyonlarının mola yerine olan mesafesi (b) excel giriş ekranı

Excele veri girişi tamamlandıktan sonra Cplex çözdürücüsü çalıştırılır ve sonuçlar otomatik olarak aynı excele program tarafından aktarılır. Şekil 7.7’de çözümün geldiği excel görüntüsü verilmiştir.

	B	C	D	E	F	G	H	I	J
x	*	A	+	y	*	B	=	Zamaç	
0,4	*	1514	+	0,6	*	174	=	710	
0,5	*	1478	+	0,5	*	210	=	844	
0,6	*	1462	+	0,4	*	226	=	968	
0,7	*	1439	+	0,3	*	278	=	1091	

(a)

	B	C	D	E	F
Worker/ rotation period	P1	P2	P3	P4	
i1	1	2	9	6	
i2	5	3	6	5	
i3	10	5	3	4	
i4	7	4	10	7	
i5	6	6	1	10	
i6	9	10	5	3	
i7	2	9	2	9	
i8	4	1	4	2	
i9	3	8	7	8	
i10	8	7	8	1	

(b)

Şekil 7.7. Z amaç fonksiyonu ve rotasyon sonuçları, excel sonuç ekranı

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Üretim işletmelerinde ergonomik risk faktörleri genellikle ekonomik nedenlerle göz ardı edilmektedir. Çalışanların maruz kaldıkları fiziksel risk etmenlerinin tamamen ortadan kaldırılması gerekse de, çalışma ortamının zaruri gereklilikleri, ekonomik ve kalitesel nedenlerden dolayı sağlanamayabilir. Vardiya planı yapılırken genellikle, sadece gerekli personeli minimum maliyetle atarken ergonomik faktörleri dikkate almamaktadır. İşverenin sorumluluklarından biri olan çalışan sağlığı için risk etmenleri tamamen ortadan kaldırılamazsa da önlemler alınarak riskler azaltılmalıdır.

İş rotasyon çizelgeleri, kas iskelet sistemi hastalıklarını önleyici çalışmalar arasında sıklıkla kullanılan yöntemlerden biri olmuştur. Ancak çalışanların iş değiştirmesine dayalı bu rotasyon çizelgelerinde her işin gereksinimlerinin ve her işçinin sahip olduğu kişisel özelliklerinin değişken olduğu unutulmamalıdır. Bu nedenle, çalışma ortamında iş – işçi arasındaki dengenin kurulması zordur.

Bu tez çalışmasında, aynı vücut bölgesinin art arda kullanımından kaynaklanan kümülatif iş yüklerini azaltabilecek bir iş rotasyonu planı için bir model önerisinde bulunulmuştur. Klasik iş çizelgeleme amaçlarının yanı sıra işin gerekliliğine göre, işçilerin kişisel özelliklerinin işe uyumu değerlendirilerek, fiziksel iş yükünü ve çalışanlar arasındaki iş dağılımını dengelemeyi amaçlayan iş rotasyon model önerisinde bulunulmuştur. İşin gerekliliğine göre değerlendirilen kişisel kriterler; boy, yaş, deneyim, yetenek ve sağlık faktörleridir. Bu kriterler uzman kişiler tarafından değerlendirilmiş ve işçilerin işe uygunluk skorları elde edilmiştir. İşe uygunlukları değerlendirilirken kullanılan uygunluk fonksiyonu için kriterlerin önem ağılıkları AHP ÇKKV yöntemi ile belirlenmiştir. Bu beş kişisel kriterle birlikte modele eklenen diğer faktörler; BAUA/Almanya İş Güvenliği ve İş Hekimliği Kurumunun Değerlendirme Yöntemi (LMM) kullanılarak ölçülen iş yükleri, ve iş istasyonlarının dinlenme yerine uzaklıklarıdır.

Rotasyon yapılmayan işlerde; bazı işçiler sürekli yüksek iş yüküne maruz kalırken, bazıları da düşük iş yüküne maruz kalabilmekte ve vücudun aynı bölgesi yüksek maruziyet altında olabilmektedir. Önerilen bu iş rotasyon çizelgeleri, aynı vücut bölgesinde art arda yüksek iş yüklerine maruz kalmayı önler ve iş yüklerinin çalışanlar arasında dengeli bir şekilde dağılımını sağlar. Ayrıca modelde BAU yöntemine göre

ölçülen LMM iş yükü türleri arasındaki standart sapma dikkate alınarak bir işçinin sürekli aynı tür işte çalışması dolayısıyla vücudunda aynı bölgenin etkilenmesi etkilenmiş olur. Ek olarak işçilerin sürekli ağır veya sürekli hafif işte çalışmasının önlenmesi de modelin amaçları arasındadır.

Modelin uygulaması otomotiv parçaları üreten bir firmada kaynak işleri ve burada çalışan işçiler üzerinde yapılmıştır. BAU LMM yöntemine göre iş yükleri ve iş istasyonlarından mola yerine yürüme sırasında geçen süreler ölçülmüş ve yaş, boy, deneyim, yetenek, sağlık faktörlerine göre işçiler değerlendirilerek model için veri tabanı oluşturulmuştur. Matematiksel model Cplex Studio paket programı yardımı ile çözdürülerek optimum rotasyon çizelgesi elde edilmiştir. İşçilerin uygunluk fonksiyonun dikkate alarak hesaplanan iş yükü ve LMM iş yükü türleri arasındaki dağılımlar mevcut durum ve modelin verdiği çizelge planından sonrasındaki durum olarak karşılaştırılmıştır. İşletmeden alınan örnek vaka çalışmasına göre; 10 işçi için işçilerin işe uyumlarını da dikkate alacak şekilde toplam iş yükünün %32 oranında düştüğü, iş yükleri arasındaki dağılımı gösteren LMM iş yükleri arasındaki farkın ise %76 oranında düştüğü görülmektedir (Tablo 7.23). Bu düşüş LMM iş yüklerinin işçiler arasında daha dengeli şekilde dağıtıldığının bir göstergesidir.

Modelin etkinliğini görmek için 30 adet sentetik senaryo verisi üretilerek sonuçlar değerlendirilmiş ve tüm sentetik senaryo sonuçlarında önerilen modelin verdiği rotasyon çizelgesi sonuçlarının daha iyi olduğu görülmüştür. Hem işçilerin işe uyumlarını da dikkate alacak şekilde toplam iş yüklerinin hem de iş yükleri arasındaki dağılımı gösteren LMM iş yükleri arasındaki fark değerleri düşmüştür.

Literatürde ergonomik iş rotasyonu çizelgeleme alanında daha çok yasal maruziyet seviyelerini dikkate alan çizelgeleme modelleri ile birlikte son dönemlerde REBA ve OCRA iş yükü ölçüm yöntemi ile ölçülen iş yüklerini dikkate alana model önerileri bulunmaktadır. Ancak, hem işçilerin işin gerekliliğine göre değerlendirilmiş boy, yaş, deneyim, yetkinlik ve sağlık kriterlerinin hem iş istasyonlarından mola yerlerine olan süreleri hem de BAU yöntemine göre ölçülen ergonomik iş yüklerini birada dikkate alan bir modele literatürde rastlanmamıştır. Ayrıca, işin yapıldığı süreyi dikkate alarak daha detaylı bir inceleme fırsatı sağlayan BAU yöntemine özel bir iş rotasyon çizelgeleme modeli literatürde bulunmamaktadır. Bu açıdan, fiziksel ergonomik risk yüklerini ve

işçilerin belirli parametrelerle işe uyumunu dikkate alarak bütünleşik olarak değerlendirmesi tarafıyla literatüre önemli bir katkı sağlaması amaçlanmaktadır.

Ek olarak, vardiya başında rotasyon çizelgelerinin elde edilmesi için kullanılacak veri tabanını kullanarak çözdürülecek model ve Cplex Studio programının kullanımını kolaylaştırması için programa yazılan kod ile verilerin bir excel sayfasından otomatik olarak okunması ve çözümün otomatik olarak excele aktarımı sağlanmıştır.

Ergonomik iş yüklerinin ve çalışanların işe uyumunun göz önünde bulundurulduğu bu modelde zihinsel iş yükü değerlendirilmesi dikkate alınmamıştır. Daha sonraki çalışmalarda, çalışanların zihinsel iş yükü, iş yeri ortamında bulunan fiziksel risk etmenleri gibi etmenler de göz önünde bulundurularak modeller geliştirilebilir.

Önerilen iş rotasyonu modeli, çeşitli endüstriyel sektörlerde iş rotasyonu planlamasına uygulanabilir. Özellikle benzer görevlere sahip üretim istasyonlarında iş rotasyonu planlama zorlukları olan uygulayıcılar için faydalı olacaktır.

KAYNAKLAR

- Acar, Ş.B., Şahin, D., Kahya, E., Sarıççek İ. (2019). Soba Montaj Hattında Ergonomik Risk Değerlendirmesi. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 27(1), 21-39.
- Adnan, N.H., Ressang, A. (2016). Ergonomics Awareness on Construction Site. *International Journal of Construction Management*, 2(1), 190-203.
- Adem, A. (2020). Rotasyon Çizelgelemede Fiziksel Ergonomik Risk Faktörlerini İçeren Matematiksel Model Önerileri. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 645232.
- Akalp, G., Özok, A.F. (2017). Ergonomik Risklerin Bulanık Mantık Yöntemi ile Modellenmesi ve Bir Uygulama. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 5, 69-79.
- Akay, D., Dağdeviren, M., Kurt M. (2003). Çalışma Duruşlarının Ergonomik Analizi. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 18(3), 73-84.
- 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), 3-5 Mart 2015.
- Akkale, E.C. (2014). Elle Taşıma İşlerinde İş Sağlığı ve Güvenliğinin Nıosh Kaldırma Denklemi ile İncelenmesi. *Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı İş Teftiş Kurulu Başkanlığı, İş Müfettişi Yardımcılığı Etüdü*, İzmir.
- Aksüt, G., Eren, T., Tüfekçi, M. (2020). Ergonomik Risk Faktörlerinin Sınıflandırılması: Bir Literatür Taraması. *Ergonomi*, 3(3), 169-192.
- Akyol, Ş. (2014). Ergonomik Montaj Hattı Dengeleme. *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, 29(4), 785-792.
- Akyol, S., Baykasoğlu, A. (2016). ErgoALWABP: A Multiple-Rule Based Constructive Randomized Search Algorithm For Solving Assembly Line Worker Assignment and Balancing Problem Under Ergonomic Risk Factors. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 30, 291-302
- Altıparmakogulları, Y., Cifter, A. S. (2012). Oturma Yüzeyinin Destekli ve Desteksiz Olarak Farklı Konumlandırılmasıyla Değişen Basınç Değerlerinin İncelenmesi. 18. *Ulusal Ergonomi Kongresi*. Gaziantep, Türkiye, 16-18 Kasım 2012.
- Anzanello, M.J., Fogliatto, F.S., Santos, L. (2014). Learning Dependent Job Scheduling in Mass Customized Scenarios Considering Ergonomic Factors. *International Journal of Production Economics*, 154, 136-145.

- Arda, R.İ. (2010). Tedarikçi Seçiminde Bulanık Mantık ve Doğrusal Programlamanın Birlikte Kullanılması. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul, 277882.
- Aryanezhad, M. B., Kheirkhah, A. S., Deljoo, V., 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.
- Asawarungsangkul, 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., Andrés-Romano, C. (2012). A Genetic Algorithm For The Design of Job Rotation Schedules Considering Ergonomic and Competence Criteria. *Int J Adv Manuf Technol*, 60, 1161–1174.
- Ayanoğlu, C. (2007). Ergonomic and Stress at Work. *Occupational Health and Safety Journal*, 1(34), 29-31.
- Ayanoğlu, C. (2007). İşyerinde Ergonomi ve Stres. *İş Sağlığı ve Güvenliği*, 34(4) ,26-34.
- Ayrim, Y., Can, G.F. (2018). İş Yüklü Minimizasyonunu Hedefleyen Ergonomik Bir İşçi Atama Modeli Önerisi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 6, 148-158.
- Azadeh, A., Ravanbaskhsh, M., Rezaei-Malek, Ö., Sheikhalishahi, M., Moghaddam, A. (2017). Unique NSGA-II and MOPSO Algorithms for Improved Dynamic Cellular Manufacturing Systems Considering Human Factors. *Applied Mathematical Modelling*, 48, 655–672.
- Babacan, A., (2015). Doğrusal Programlama Modeli ile Bir Kobi'de Hizmet Üretim Planlaması. *Erzincan Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 8(2), 139-148.
- Babalık, F. (2016). *Mühendisler İçin Ergonomi –İşbilim* (6.basım) (123-135). Bursa: Dora Yayıncılık.
- Baykasoğlu, A., Demirkol, Akyol Ş. (2014). Ergonomik Montaj Hattı Dengeleme. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 29(4), 785-792.
- Battini, D., Glock, C., Grosse, E., Persona, A., 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.
- Beño, R. (2013). *Scientific Monographs in Automation and Computer Science*. Ilmenau (Germany):Verlagshaus Monsenstein und Vannerdat OHG.

- Berber, N. (2020). REBA, BAUA, NIOSH ve SNOOK Tabloları Yöntemleriyle Ergonomik Risk Analizi İncelemesi: Gıda Sektörüne Yönelik Bir Uygulama. Yüksek Lisans Tezi, Üsküdar Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 615958.
- Boenzi, F., Digiesi, S., Mossa, G., Mummolo, G., Romano, V.A. (2015). Modelling Workforce Aging in Job Rotation Problems. *IFAC-Papers On Line*, 48(3), 604–609.
- Boenzi, F., Digiesi, S., Mossa, G., Mummolo, G., Romano, V.A. (2013). Optimal Working Time Model and Job Rotation Schedule of High Repetitive – Low Load Manual Tasks in Assembly Lines. In: Manufacturing Modelling, Management and Control. *IFAC Proceedings*, 7, 1896-1901.
- Bostancı, B., Demir, H. (2011). Taşınmaz Geliştirmede Doğrusal Programlama. *TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası 13. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı*, 18-22 Nisan 2011, Ankara.
- Büker, N., Aslan, E., Altuğ, F., Cavlak, U. (2006). Hekimlerde Kas-İskelet Sistemi Problemlerinin Analizi. *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 10, 163-170.
- Can, G.F., Atalay, K.D., Eraslan, E., Özçakmak, B.C. (2015). Bir Devlet Hastanesinde Yaşanan İstifa Sayılarındaki Artışın Nedenlerinin Araştırılması. *Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, ÖS: Ergonomi*, 3(3), 583-590.
- Carnahan, B.J., Redfern, M.S., Norman, B. (2000). Designing Safe Job Rotation Schedules Using Optimization and Heuristic Search. *Ergonomics*, 43(4), 543-560.
- Choi, G. (2009). A Goal Programming Mixed-Model Line Balancing for Processing Time and Physical Workload. *Computers & Industrial Engineering*, 57(1), 395-400.
- Çoker, İ. (2019). Bir İmalat İşletmesinde Kas İskelet Sistemi Rahatsızlıklarına Yönelik Ergonomik Risk Değerlendirme. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 567029.
- Dağdeviren, M., Eraslan E., Kurt, M. (2005). Çalışanların Toplam İş Yükü Seviyelerinin Belirlenmesine Yönelik Bir Model ve Uygulaması. *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak.*, 20(4), 517-525.
- Dantzig, G. B. (1948). Programming in A Linear Structure. In *Bulletin of the American Mathematical Society*, 54(11), 1074-1074.
- David, G. C. (2005). Ergonomic Methods For Assessing Exposure to Risk Factors for Work-Related Musculoskeletal Disorders. *Occupational Medicine*, 55, 190–199.

- Delice, E. K. (2016). Acil Servis Hekimlerinin Nasa-RTLX Yöntemi ile Zihinsel İş Yüklerinin Değerlendirilmesi: Bir Uygulama Çalışması. *Atatürk Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 30(3), 645-662.
- Deste, M., Karabulut, M. (2021). Doğrusal Programlama Tekniğiyle Üretim Planlama Yaklaşımı ve Tekstil Sektöründe Bir Uygulama. *Süleyman Demirel Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 26(3), 247-258.
- Ekinci, E.B., Can, G.F. (2018). Algılanan İş Yükü ve Çalışma Duruşları Dikkate Alınarak Operatörlerin Ergonomik Risk Düzeylerinin Çok Kriterli Karar Verme Yaklaşımı ile Değerlendirilmesi. *Ergonomi*, 1(2), 77-91.
- Elmbach, A.F., Scholl, A., Walter, R. (2019). Minimizing the Maximal Ergonomic Burden in Intra-Hospital Patient Transportation. *European Journal of Operational Research*, 276(3), 840-854.
- Felekoğlu, B., Taşan, S.Ö. (2017). İş İle İlgili Kas İskelet Sistemi Rahatsızlıklarına Yönelik Ergonomik Risk Değerlendirme: Reaktif/Proaktif Bütünleşik Bir Sistematik Yaklaşım. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 32(3), 777-793.
- Frazer, M., Norman, R., Wells, R., Neumann, P. (2003). The Effects of Job Rotation on the Risk of Reporting Low Back Pain. *Ergonomics*, 46(9), 904-919.
- Hart, S. C., Staveland, L. E. (1988). Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research. *Elsevier Science*, 130-183.
- Hignett, S., McAtamney, L. (2000). Rapid Entire Body Assessment (REBA). *Applied Ergonomics*, 31(2), 201-205.
- Jaber, M.Y., Neumann, W.P. (2010). Modelling Worker Fatigue and Recovery in Dual-Resource Constrained Systems. *Computers & Industrial Engineering*, 59(1), 75-84.
- Jaffar, N., Abdul-Tharim, A. H., Mohd-Kamar, I. F., Lop, N. S. (2011). A Literature Review of Ergonomics Risk Factors in Construction Industry. *Elsevier*, 20, 89-97.
- Jung, H.S., Jung, H.-S. (2001). Establishment of Overall Workload Assessment Technique for Various Tasks and Workplaces. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 28, 341-353.
- Karwowski, W. (2006). The Discipline of Ergonomics and Human Factors. *Handbook of Human Factors and Ergonomics*, 3-31.
- Kocabaş, M. (2009). Ağır ve Tehlikeli İşlerde Çalışan İş Görenlerde Zorlanmaya Neden Olan Çalışma Duruşlarının Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 238000.

- Koç, S., Testik, Ö.M. (2016). Mobilya Sektöründe Yaşanan Kas-İskelet Sistemi Risklerinin Farklı Değerlendirme Metotları İle İncelenmesi ve Minimizasyonu. *Endüstri Mühendisliği Dergisi*, 27(2), 2-27.
- Kostreva, M., Mcnelis, E., Clemens, E. (2002). Using a Circadian Rhythms Model to Evaluate Shift Schedules. *Ergonomics*, 45(11), 739-763.
- Li, X., Gul, M., Al-Hussein, M. (2019). An Improved Physical Demand Analysis Framework Based on Ergonomic Risk Assessment Tools for the Manufacturing Industry. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 70, 58-69.
- Lin, L. Drury, C.G., Kim, S.-W. (2001). Ergonomics and Quality in Paced Assembly Lines. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing*, 11(4) 377–382.
- Majozi, T., Zhu, X.X. (2005). A Combined Fuzzy Set Theory and MILP Approach in Integration of Planning and Scheduling of Batch Plants—Personnel Evaluation and Allocation. *Computers and Chemical Engineering*, 29, 2029–2047.
- Malladi, S., Min, K. J. (2004). Workforce Scheduling with Costs and Ergonomic Considerations. *Paper presented at the IIE Annual Conference, Institute of Industrial Engineers*, Hilton Americas, Houston, Texas, 15-19 Mayıs 2004.
- Moon, I., Logendran, R., Lee, J. (2009). Integrated Assembly Line Balancing with Resource Restrictions. *International Journal of Production Research*, 47(19), 5525–5541.
- Moore, J.S., Garg, A. (1995). The Strain Index: A Proposed Method to Analyze Jobs for Risk of Distal Upper Extremity Disorders. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 56(5) , 443-458.
- Mossa, G., Boenzi F., Digiesi, S., Mummolo, G., 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., Grunder, O. (2016). Reducing Production Cycle Time by Ergonomic Workforce Scheduling. *IFAC-Papers On Line*, 49(12), 419–424.
- Moussavi, S. E., Zare, M., Mahdjoub, M., 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.
- Mufti, D., Putri, A. (2019). Workplace Ergonomic Risk Assessment Toward Small-Scale Household Business. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 528(2019).
- Mulyati, G., Maksum, M., Purwantana, B., Ainuri, M. (2019). Ergonomic Risk Identification for Rice Harvesting Worker. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 355(1).

- Mutlu, Ö., Özgörmüş, E. (2012). A Fuzzy Assembly Line Balancing Problem with Physical Workload Constraints. *International Journal of Production Research*, 50(18), 5281-5291.
- Nanthavanij, S., Yaoyuenyong, S., Jeenanunta, C. (2010). Heuristic Approach to Workforce Scheduling with Combined Safety and Productivity Objective. *International Journal of Industrial Engineering*, 17(4), 319-333.
- Neşeli, C. (2016). Ergonomik Risk Analizi Yöntemlerinin Karşılaştırılması ve Bir Kalıp İmalat Firmasında Uygulanması. Yüksek Lisans Tezi, İzmir Katip Çelebi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 459004.
- Okan, S., Kaya, A. (2015). Orman Fidanlıklarında Fidan Repikaj İşlerinde Çalışma Duruşlarının REBA Yöntemi ile Analizi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 3(3), 157-163.
- Otto, A., Battaia, O. (2017). Reducing Physical Ergonomic Risks at Assembly Lines by Line Balancing and Job Rotation: A Survey. *Computers & Industrial Engineering*, 111, 467-480.
- Otto, A., Scholl, A. (2011). Incorporating Ergonomic Risks into Assembly Line Balancing. *European Journal of Operational Research*, 212, 277-286.
- Otto, A., Scholl, A. (2013). Reducing Ergonomic Risks by Job Rotation Scheduling. *Spectrum*, 35, 711-733.
- Özcan, U., Peker, A. (2007). Karışık Modelli U-Tipi Montaj Hatlarında Hat Dengeleme ve Model Sıralama Problemleri için Yeni Bir Sezgisel Yaklaşım. *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, 22(2), 277-286.
- Özcan, E., Sakar, N., Alptekin, H.K., Özcan E.E. (2007). Mesleki Kas İskelet Risklerinin Değerlendirilmesinde QEC Ölçeğinin (Quick Exposure Check-Hızlı Maruziyet Değerlendirme) Türkçe Uyarlamasının Güvenilirliği. *İst. Tıp Fak.Derg.*, 70, 98-102.
- Özel E., Çetik O. (2010). Mesleki Görevlerin Ergonomik Analizinde Kullanılan Araçlar ve Bir Uygulama Örneği. *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 22, 41-56.
- Özgüven, C. (2003). *Doğrusal Programlama ve Uzantıları* (2.basım). Ankara: Detay Yayıncılık.
- Padula, R. S., Comper, M. L. C., Sparer, E. H. 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.

- Polat, O., Mutlu, Ö., Özgörmüş, E. (2018). A Mathematical Model for Assembly Line Balancing Problem Type 2 Under Ergonomic Workload Constraint. *The Ergonomics Open Journal*, 11, 1-10.
- Rattanamanee, T., Nanthavanij, S. (2013). Multi-Workday Ergonomic Workforce Scheduling with Days Off. *Proceedings of the 4th International Conference on Engineering, Project and Production Management*, Tayland, 23-25 Ekim 2013.
- Rinaldi, M., Caterino, M., Fera, M., Macchiaroli, R. (2021). Reducing the Physical Ergonomic Risk by Job Rotation: A Simulation-based Approach. *Sciendirect, IFAC Papers online*, 54(1), 1-6.
- Sağioğlu, H., Coşkun, M.B., Erginel, N. (2015). REBA ile Bir Üretim Hattındaki İş İstasyonlarının Ergonomik Risk Analizi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 3(3), 339-345.
- Sakalar, E. (2018). Montaj Hattında Ergonomik Risk Faktörlerinin REBA Metodu ile İncelenmesi: Otomotiv Yan Sanayi Sektörüne Yönelik Bir Uygulama. Yüksek Lisans Tezi, İzmir Ekonomi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 517456.
- Sana, S. S., Ospina-Mateus, H., Arrieta, F. G., 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.
- Seçkiner, S., Kurt, M. (2005). Bütünleşik Tur-Rotasyon Çizelgeleme Yaklaşımı ile İş yükü Minimizasyonu. *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Dergisi*, 20(2), 161-169.
- Seçkiner, S., Kurt, M. (2008). Ant Colony Optimization for the Job Rotation Scheduling Problem. *Applied Mathematics and Computation*, 201, 149–160.
- Seçme, N. (2005). Klasik Doğrusal Programlama ve Bulanık Doğrusal Programlamanın Karşılaştırmalı Bir Analizi: Üretim Planlama Örneği. Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Kayseri.
- Sevimli, M., Ulusu, H., Gündüz, T. (2018). Pirinç Paketleme İşinde Çalışanların Çalışma Koşullarının Ergonomik Risk Analizleri ile Geliştirilmesi. *BAUN Fen Bil. Enst. Dergisi*, 20(1), 38-54.
- Song, J., Lee, C., Lee, W., Bahn, S., Jung, C., Yuna, M.H. (2016). Development of a Job Rotation Scheduling Algorithm for Minimizing Accumulated Work Load Per Body Parts. *Work*, 53, 511–521.
- Sökmen, Ö., Yılmaz, M. (2019). İş Zorlanma İndeksi ile Ergonomik Risk Değerlendirme ve Bir Uygulama. *Ergonomics*, 2(1), 25-31.

- Şahin, B.N., Kahya, E. (2018). Hedef Programlama Modeli ile Ergonomik Kısıtlar Altında Montaj Hattı Dengelemesi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 6, 188-196.
- Stevens, E.M., Vos, G.A., Stephens, J.P., Moore, J.S., College, S.M. (2004). Inter-Rater Reliability of the Strain Index. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 1(11), 745-751.
- Taşan, S., Felekoğlu, B. (2019). Otomotiv Sektöründe Bütünleşik Ergonomik Risk Değerlendirme Uygulaması. *BAUN Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 21(1), 378-396.
- Topaloğlu, Ş., Özkarahan, İ. (2004). An Implicit Goal Programming Model for the Tour Scheduling Problem Considering the Employee Work Preferences. *Annals of Operations Research*, 128, 135–158.
- Topaloğlu, S. (2009). A Shift Scheduling Model for Employees with Different Seniority Levels and An Application in Healthcare. *European Journal of Operational Research*, 198, 943–957.
- Tutumlu, B., Aygün, B., Saraç, T. (2020). İşçilerin Sağlık ve Yetenek Seviyelerine Göre İş İstasyonlarına Kısmi ya da Tam Kapasiteli Olarak Atanması Problemi için Bir Çözüm Yaklaşımı. *Journal of Industrial Engineering*, 31(1), 18-27.
- URL-1: https://www.baua.de/EN/Home/Home_node.html , (Ziyaret tarihi: 20.01.2020).
- Wang, T.C., Liu, C.C. (2014). Optimal Work Shift Scheduling with Fatigue Minimization and Day Off Preferences. *Mathematical Problems in Engineering*, 2014, 1-8.
- Winston, W.L., Goldberg, J.B. (2004). *Operations Research: Applications and Algorithms* (4.Basım). Belmont: Thomson Brooks/Cole.
- Wongwien, T., Nanthavanij, S. (2012). Ergonomic Workforce Scheduling Under Complex Worker Limitation and Task Requirements: Mathematical Model and Approximation Procedure. *Songklanakarin J. Sci. Technol.*, 34(5), 541-549.
- Wongwien, T., 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., Nanthavanij, S. (2017). Priority-based Ergonomic Workforce Scheduling for Industrial Workers Performing Hazardous Jobs. *Journal of Industrial and Production Engineering*, 34, 52-60.

- Xu, Z., Ko, J., Cochran, D.J., Jung, M.C. (2012). Design of Assembly Lines with the Concurrent Consideration of Productivity and Upper Extremity Musculoskeletal Disorders Using Linear Models. *Computers & Industrial Engineering*, 62(2), 431-441.
- Yaoyuenyong, S., Nanthavanij, S. (2006). Hybrid Procedure to Determine Optimal Workforce without Noise Hazard Exposure. *Computers & Industrial Engineering*, 51(4), 743-764.
- Yavuzkan, G., Kaya, K., Yağız, M.C., Erdem, M., Acar, I. (2015). Ergonomi Risk Analizleri Yazılımlaştırılması Ergonomi-İş Sağlığı Güvenliği Risk Haritalandırılması. *Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 3(3), 603-614.
- Yener, Y., Can, G.F., Toktaş, P. (2019) Fiziksel Zorlanma ve Algılanan İş Yükü Düzeylerini Dikkate Alan Bir İş Rotasyonu Önerisi. *Journal of Engineering and Architecture Faculty of Eskisehir Osmangazi University*, 27(1), 9-20.
- Yoon, S., Ko, J., Yung, 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.
- Yörükoğlu K., Saymer, A., Akalın, E. (2005). Occupational Health Hazards and Safety Guidelines in Histopathology Laboratory. *Aegean Pathology Journal*, 2, 98-115.
- Yüce, D. (2019). Otomotiv sektöründe BAUA LMM Yöntemleriyle Ergonomik Risk Değerlendirmesi: Teknik Servis Çalışmaları Vaka Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Üsküdar Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 560363.



EKLER

b) İş yükleri:

Aşağıdaki tabloda sentetik olarak üretilmiş senaryo-1 veri setindeki işlere ait LMM iş yükü skorları gösterilmektedir.

Tablo A.1. Sentetik 1- iş istasyonlarına ait LMM iş yükü skorları

LMM/İş	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8	J9	J10
LMM-1	35	8	18	24	0	12	6	48	15	8
LMM-2	9	55	33	12	8	9	30	12	20	16
LMM-3	24	14	0	52	28	0	15	12	40	26

c) İş istasyonlarının mola yerine olan yürüme süreleri:

Aşağıdaki tabloda sentetik olarak üretilmiş senaryo-1 veri setindeki iş istasyonlarından mola yerlerine kadar olan yürüme süreleri gösterilmektedir.

Tablo A.2. Sentetik 1- iş istasyonlarından mola yerlerine kadar olan yürüme süreleri

T _j (min)	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T _{avg}
Mola yeri	2,5	1,8	4,2	2	1,7	2,5	4,5	2,5	4,2	2,3	2,82
F _j :T _j /T _{avg}	0,89	0,64	1,49	0,71	0,60	0,89	1,60	0,89	1,49	0,82	

d) Modele göre iş rotasyonu sırasının belirlenmesi:

Aşağıdaki tabloda sentetik-1 verileriyle çalıştırılan modelin verdiği rotasyon sırası gösterilmektedir.

Tablo A.3. Sentetik 1- kümülatif iş yükünü önleyen iş rotasyon programı

İşçi/ rotasyon periyodu	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄
i1	3	9	6	9
i2	7	8	7	4
i3	2	1	5	1
i4	9	2	9	8
i5	1	10	1	2
i6	5	3	4	3
i7	6	5	3	5
i8	10	6	10	6
i9	8	4	2	10
i10	4	7	8	7

Rotasyondan önce ve rotasyondan sonra, LMM iş yükleri toplamı ve LMM iş yüklerinin dağılımı aşağıdaki tabloda gösterilmiştir. 10 işçi için işçilerin işe uyumlarını da dikkate

alacak şekilde toplam iş yükünün %31 oranında düştüğü, iş yükleri arasındaki dağılımı gösteren LMM iş yükleri arasındaki farkın ise %83 oranında düştüğü görülmektedir. Bu düşüş LMM iş yüklerinin işçiler arasında daha dengeli şekilde dağıtıldığının bir göstergesidir.

Tablo A.4. Sentetik 1- mevcut durum ve rotasyon sonrası iş yükü karşılaştırılması

İşçi	Mevcut	Rotasyon	Zi değişim		Mevcut Durumdaki LMM değerleri				Rotasyon sonrası LMM değerleri				LMM fark değişim
	Zi total	Zi total			LMM 1	LMM 2	LMM 3	Topla m	LMM 1	LMM 2	LMM 3	Topla m	
1. işçi	164,40	184,38	20,0	LMM: LMM Fark:	140 104	36 60	96 44	272 208	60 22	82 2	80 20	222 44	-79%
2. işçi	196,60	174,24	-22,4	LMM: LMM Fark:	32 188	220 164	56 24	308 376	84 0	84 10	94 10	262 20	-95%
3. işçi	303,83	110,93	-192,9	LMM: LMM Fark:	72 60	132 132	0 72	204 264	78 3	81 9	90 12	249 24	-91%
4. işçi	198,97	209,90	10,9	LMM: LMM Fark:	96 48	48 160	208 112	352 320	86 21	107 1	106 20	299 42	-87%
5. işçi	59,18	117,49	58,3	LMM: LMM Fark:	0 32	32 80	112 112	144 224	86 3	89 1	88 2	263 6	-97%
6. işçi	69,89	158,67	88,8	LMM: LMM Fark:	48 12	36 36	0 48	84 96	60 26	86 6	80 20	226 52	-46%
7. işçi	212,45	93,87	-118,6	LMM: LMM Fark:	24 96	120 60	60 36	204 192	30 28	58 2	56 26	144 56	-71%
8. işçi	255,32	65,60	-189,7	LMM: LMM Fark:	192 144	48 0	48 144	288 288	40 10	50 2	52 12	142 24	-92%
9. işçi	446,81	140,12	-306,7	LMM: LMM Fark:	60 20	80 80	160 100	300 200	88 7	95 9	104 16	287 32	-84%
10. işçi	163,12	180,59	17,5	LMM: LMM Fark:	32 32	64 40	104 72	200 144	84 0	84 10	94 10	262 20	-86%
ΣZ: Zfark	2070,6 -634,7	1435,8 -31%											-83%

b) İş yükleri:

Aşağıdaki tabloda sentetik olarak üretilmiş senaryo-2 veri setindeki işlere ait LMM iş yükü skorları gösterilmektedir.

Tablo A.5. Sentetik 2- iş istasyonlarına ait LMM iş yükü skorları

LMM/İş	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8	J9	J10
LMM-1	0	55	18	35	8	8	30	60	8	19
LMM-2	40	30	20	17	0	40	8	17	20	62
LMM-3	10	12	0	56	32	28	12	45	15	27

c) İş istasyonlarının mola yerine olan yürüme süreleri:

Aşağıdaki tabloda sentetik olarak üretilmiş senaryo-2 veri setindeki iş istasyonlarından mola yerlerine kadar olan yürüme süreleri gösterilmektedir.

Tablo A.6. Sentetik 2- iş istasyonlarından mola yerlerine kadar olan yürüme süreleri

Tj (min)	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	Tavg
Mola yeri	1,5	2,2	1,8	2,2	3,4	3	2,8	1,9	4,7	2	2,55
Fj:Tj/Tavg	0,59	0,86	0,71	0,86	1,33	1,18	1,10	0,75	1,84	0,78	

d) Modele göre iş rotasyonu sırasının belirlenmesi:

Aşağıdaki tabloda sentetik-2 verileriyle çalıştırılan modelin verdiği rotasyon sırası gösterilmektedir.

Tablo A.7. Sentetik 2- kümülatif iş yükünü önleyen iş rotasyon programı

İşçi/ rotasyon periyodu	p1	p2	p3	p4
i1	6	7	6	3
i2	10	9	4	9
i3	7	6	7	10
i4	3	4	3	6
i5	1	8	1	8
i6	9	10	9	4
i7	2	5	2	5
i8	4	3	10	7
i9	8	1	8	1
i10	5	2	5	2

Rotasyondan önce ve rotasyondan sonra, LMM iş yükleri toplamı ve LMM iş yüklerinin dağılımı aşağıdaki tabloda gösterilmiştir. 10 işçi için işçilerin işe uyumlarını da dikkate alacak şekilde toplam iş yükünün %29 oranında düştüğü, iş yükleri arasındaki dağılımı

gösteren LMM iş yükleri arasındaki farkın ise %70 oranında düştüğü görülmektedir. Bu düşüş LMM iş yüklerinin işçiler arasında daha dengeli şekilde dağıtıldığının bir göstergesidir.

Tablo A.8. Sentetik 2- mevcut durum ve rotasyon sonrası iş yükü karşılaştırılması

İşçi	Mevcut Zi total	Rotasyon Zi total	Zi değişim		Mevcut Durumdaki LMM değerleri				Rotasyon sonrası LMM değerleri				LMMfark değişim
					LMM 1	LMM 2	LMM 3	Topla m	LMM 1	LMM 2	LMM 3	Topla m	
1. işçi	111,36	159,23	47,9	LMM: LMM Fark:	0 160	160 120	40 40	200 320	64 44	108 40	68 4	240 88	-73%
2. işçi	334,75	227,20	-107,5	LMM: LMM Fark:	220 100	120 72	48 172	388 344	70 49	119 6	113 43	302 98	-72%
3. işçi	107,29	187,71	80,4	LMM: LMM Fark:	72 8	80 80	0 72	152 160	87 31	118 39	79 8	284 78	-51%
4. işçi	322,25	174,55	-147,7	LMM: LMM Fark:	140 72	68 156	224 84	432 312	79 18	97 13	84 5	260 36	-88%
5. işçi	193,92	142,53	-51,4	LMM: LMM Fark:	32 32	0 128	128 96	160 256	120 6	114 4	110 10	344 20	-92%
6. işçi	309,23	228,09	-81,1	LMM: LMM Fark:	32 128	160 48	112 80	304 256	70 49	119 6	113 43	302 98	-62%
7. işçi	219,61	179,26	-40,4	LMM: LMM Fark:	120 88	32 16	48 72	200 176	126 66	60 28	88 38	274 132	-25%
8. işçi	363,61	192,61	-171,0	LMM: LMM Fark:	240 172	68 112	180 60	488 344	102 5	107 12	95 7	304 24	-93%
9. işçi	339,26	134,06	-205,2	LMM: LMM Fark:	32 48	80 20	60 28	172 96	120 6	114 4	110 10	344 20	-79%
10. işçi	292,96	208,98	-84,0	LMM: LMM Fark:	76 172	248 140	108 32	432 344	126 66	60 28	88 38	274 132	-62%
ΣZ: Zfark :	2594,2 -760,0	1834,2 -29%											-70%

b) İş yükleri:

Aşağıdaki tabloda sentetik olarak üretilmiş senaryo-1 veri setindeki işlere ait LMM iş yükü skorları gösterilmektedir.

Tablo A.9. Sentetik 3- iş istasyonlarına ait LMM iş yükü skorları

LMM/iş	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8	J9	J10
LMM-1	25	25	20	26	5	45	0	18	10	22
LMM-2	32	12	25	9	25	20	31	34	12	6
LMM-3	17	35	8	20	34	12	10	12	30	25

c) İş istasyonlarının mola yerine olan yürüme süreleri:

Aşağıdaki tabloda sentetik olarak üretilmiş senaryo-3 veri setindeki iş istasyonlarından mola yerlerine kadar olan yürüme süreleri gösterilmektedir.

Tablo A.10. Sentetik 3- iş istasyonlarından mola yerlerine kadar olan yürüme süreleri

Tj (min)	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	Tavg
Mola yeri	2,1	2,6	1,3	3,5	1,8	1,2	4	4,4	3,8	1,9	2,66
Fj:Tj/Tavg	0,79	0,98	0,49	1,32	0,68	0,45	1,50	1,65	1,43	0,71	

d) Modele göre iş rotasyonu sırasının belirlenmesi:

Aşağıdaki tabloda sentetik-3 verileriyle çalıştırılan modelin verdiği rotasyon sırası gösterilmektedir.

Tablo A.11. Sentetik 3- kümülatif iş yükünü önleyen iş rotasyon programı

İşçi/rotasyon periyodu	p1	p2	p3	p4
i1	3	9	1	10
i2	8	2	8	4
i3	6	5	6	5
i4	9	3	2	3
i5	1	10	7	2
i6	2	8	10	8
i7	5	6	3	9
i8	7	4	5	6
i9	10	1	9	1
i10	4	7	4	7

Rotasyondan önce ve rotasyondan sonra, LMM iş yükleri toplamı ve LMM iş yüklerinin dağılımı aşağıdaki tabloda gösterilmiştir. 10 işçi için işçilerin işe uyumlarını da dikkate

alacak şekilde toplam iş yükünün %26 oranında düştüğü, iş yükleri arasındaki dağılımı gösteren LMM iş yükleri arasındaki farkın ise %88 oranında düştüğü görülmektedir. Bu düşüş LMM iş yüklerinin işçiler arasında daha dengeli şekilde dağıtıldığının bir göstergesidir.

Tablo A.12. Sentetik 3- mevcut durum ve rotasyon sonrası iş yükü karşılaştırılması

İşçi	Mevcut Zi total	Rotasyon Zi total	Zi değişim		Mevcut Durumdaki LMM değerleri				Rotasyon sonrası LMM değerleri				LMMfark değişim
					LMM 1	LMM 2	LMM 3	Topla m	LMM 1	LMM 2	LMM 3	Topla m	
1.işçi	159,32	121,05	-38,3	LMM: LMM Fark:	100 28	128 60	68 32	296 120	77 2	75 5	80 3	232 10	-92%
2.işçi	281,50	228,00	-53,5	LMM: LMM Fark:	100 52	48 92	140 40	288 184	87 2	89 10	79 8	255 20	-89%
3.işçi	103,61	104,35	0,7	LMM: LMM Fark:	80 20	100 68	32 48	212 136	100 10	90 2	92 8	282 20	-85%
4.işçi	197,36	124,65	-72,7	LMM: LMM Fark:	104 68	36 44	80 24	220 136	75 1	74 7	81 6	230 14	-90%
5.işçi	118,11	133,50	15,4	LMM: LMM Fark:	20 80	100 36	136 116	256 232	72 9	81 6	87 15	240 30	-87%
6.işçi	138,95	182,34	43,4	LMM: LMM Fark:	180 100	80 32	48 132	308 264	83 3	86 2	84 1	253 6	-98%
7.işçi	160,94	106,74	-54,2	LMM: LMM Fark:	0 124	124 84	40 40	164 248	80 2	82 2	84 4	246 8	-97%
8.işçi	397,41	139,46	-257,9	LMM: LMM Fark:	72 64	136 88	48 24	256 176	76 9	85 9	76 0	237 18	-90%
9.işçi	236,83	150,58	-86,2	LMM: LMM Fark:	40 8	48 72	120 80	208 160	82 0	82 7	89 7	253 14	-91%
10.işçi	151,43	141,36	-10,1	LMM: LMM Fark:	88 64	24 76	100 12	212 152	52 28	80 20	60 8	192 56	-63%
ΣZ: Zfark :	1945,5 -513,4	1432,0 -26%											-88%

b) İş yükleri:

Aşağıdaki tabloda sentetik olarak üretilmiş senaryo-4 veri setindeki işlere ait LMM iş yükü skorları gösterilmektedir.

Tablo A.13. Sentetik 4- iş istasyonlarına ait LMM iş yükü skorları

LMM/iş	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8	J9	J10
LMM-1	4	9	38	12	8	0	65	4	30	45
LMM-2	18	23	0	26	34	9	20	15	5	18
LMM-3	12	5	45	12	18	25	24	0	18	6

c) İş istasyonlarının mola yerine olan yürüme süreleri:

Aşağıdaki tabloda sentetik olarak üretilmiş senaryo-1 veri setindeki iş istasyonlarından mola yerlerine kadar olan yürüme süreleri gösterilmektedir.

Tablo A.14. Sentetik 4- iş istasyonlarından mola yerlerine kadar olan yürüme süreleri

Tj (min)	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	Tavg
Mola yeri	4	3,2	2,5	2	1,8	1,9	2,5	3	2,7	1,5	2,51
Fj:Tj/Tavg	1,59	1,27	1,00	0,80	0,72	0,76	1,00	1,20	1,08	0,60	

d) Modele göre iş rotasyonu sırasının belirlenmesi:

Aşağıdaki tabloda sentetik-4 verileriyle çalıştırılan modelin verdiği rotasyon sırası gösterilmektedir.

Tablo A.15. Sentetik 4- kümülatif iş yükünü önleyen iş rotasyon programı

İşçi/ rotasyon periyodu	p1	p2	p3	p4
i1	9	4	9	4
i2	6	7	6	7
i3	5	9	5	9
i4	4	10	4	3
i5	7	5	3	5
i6	10	6	10	6
i7	2	2	2	2
i8	8	3	1	10
i9	1	1	7	1
i10	3	8	8	8

Rotasyondan önce ve rotasyondan sonra, LMM iş yükleri toplamı ve LMM iş yüklerinin dağılımı aşağıdaki tabloda gösterilmiştir. 10 işçi için işçilerin işe uyumlarını da dikkate

alacak şekilde toplam iş yükünün %31 oranında düştüğü, iş yükleri arasındaki dağılımı gösteren LMM iş yükleri arasındaki farkın ise %60 oranında düştüğü görülmektedir. Bu düşüş LMM iş yüklerinin işçiler arasında daha dengeli şekilde dağıtıldığının bir göstergesidir.

Tablo A.16. Sentetik 4- mevcut durum ve rotasyon sonrası iş yükü karşılaştırılması

İşçi	Mevcut Zi total	Rotasyon Zi total	Zi değişim		Mevcut Durumdaki LMM değerleri				Rotasyon sonrası LMM değerleri				LMMfark değişim
					LMM 1	LMM 2	LMM 3	Topla m	LMM 1	LMM 2	LMM 3	Topla m	
1. işçi	158,59	109,07	-49,5	LMM: LMM Fark:	16 56	72 24	48 32	136 112	84 22	62 2	60 24	206 48	-57%
2. işçi	297,90	189,46	-108,4	LMM: LMM Fark:	36 56	92 72	20 16	148 144	130 72	58 40	98 32	286 144	0%
3. işçi	504,67	121,05	-383,6	LMM: LMM Fark:	152 152	0 180	180 28	332 360	76 2	78 6	72 4	226 12	-97%
4. işçi	79,68	134,40	54,7	LMM: LMM Fark:	48 56	104 56	48 0	200 112	107 37	70 5	75 32	252 74	-34%
5. işçi	86,06	181,08	95,0	LMM: LMM Fark:	32 104	136 64	72 40	240 208	119 31	88 17	105 14	312 62	-70%
6. işçi	58,99	74,23	15,2	LMM: LMM Fark:	0 36	36 64	100 100	136 200	90 36	54 8	62 28	206 72	-64%
7. işçi	325,52	105,59	-219,9	LMM: LMM Fark:	260 180	80 16	96 164	436 360	36 56	92 72	20 16	148 144	-60%
8. işçi	65,98	127,68	61,7	LMM: LMM Fark:	16 44	60 60	0 16	76 120	91 40	51 12	63 28	205 80	-33%
9. işçi	235,72	187,23	-48,5	LMM: LMM Fark:	120 100	20 52	72 48	212 200	77 3	74 14	60 17	211 34	-83%
10. işçi	120,51	103,31	-17,2	LMM: LMM Fark:	180 108	72 48	24 156	276 312	50 5	45 0	45 5	140 10	-97%
ΣZ: Zfark:	1933,6 -600,5	1333,1 -31%											-60%

Senaryo-5

Aşağıda sentetik olarak üretilmiş senaryo-5 veri setine ait işçilerin (a) boy, (b) yaş, (c) deneyim, (d) yetenek, (e) sağlık kriterlerinin değerlendirme tabloları ve kriterlerin ağırlıkları ile elde edilmiş (f) uygunluk matrisi gösterilmektedir.

(a) Boy

(b) Yaş

(c) Deneyim

(d) Yetenek

(e) Sağlık

(f) Uygunluk Matrisi

Şekil A.5. Sentetik 5- işçilerin boy, yaş, deneyim, yetenek, sağlık sağlık kriterine göre işlere uygunluk matrisleri (M_{ij}^b , M_{ij}^y , M_{ij}^d , M_{ij}^e , M_{ij}^s)

b) İş yükleri:

Aşağıdaki tabloda sentetik olarak üretilmiş senaryo-5 veri setindeki işlere ait LMM iş yükü skorları gösterilmektedir.

Tablo A.17. Sentetik 5- iş istasyonlarına ait LMM iş yükü skorları

LMM/İş	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8	J9	J10
LMM-1	5	13	15	20	35	6	16	7	10	12
LMM-2	37	24	30	8	12	25	26	35	18	20
LMM-3	15	32	10	22	15	14	8	12	8	27

c) İş istasyonlarının mola yerine olan yürüme süreleri:

Aşağıdaki tabloda sentetik olarak üretilmiş senaryo-1 veri setindeki iş istasyonlarından mola yerlerine kadar olan yürüme süreleri gösterilmektedir.

Tablo A.18. Sentetik 5- iş istasyonlarından mola yerlerine kadar olan yürüme süreleri

Tj (min)	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	Tavg
Mola yeri	1,5	2	2,4	3	1,8	2,4	2,7	2	3	3,8	2,46
Fj:Tj/Tavg	0,61	0,81	0,98	1,22	0,73	0,98	1,10	0,81	1,22	1,54	

d) Modele göre iş rotasyonu sırasının belirlenmesi:

Aşağıdaki tabloda sentetik-5 verileriyle çalıştırılan modelin verdiği rotasyon sırası gösterilmektedir.

Tablo A.19. Sentetik 5- kümülatif iş yükünü önleyen iş rotasyon programı

İşçi/rotasyon periyodu	p1	p2	p3	p4
i1	3	10	3	9
i2	8	4	7	4
i3	7	2	1	5
i4	6	9	6	2
i5	4	1	5	1
i6	5	8	10	8
i7	9	6	4	6
i8	10	3	9	3
i9	1	5	8	10
i10	2	7	2	7

Rotasyondan önce ve rotasyondan sonra, LMM iş yükleri toplamı ve LMM iş yüklerinin dağılımı aşağıdaki tabloda gösterilmiştir. 10 işçi için işçilerin işe uyumlarını da dikkate alacak şekilde toplam iş yükünün %30 oranında düştüğü, iş yükleri arasındaki dağılımı

gösteren LMM iş yükleri arasındaki farkın ise %43 oranında düştüğü görülmektedir. Bu düşüş LMM iş yüklerinin işçiler arasında daha dengeli şekilde dağıtıldığının bir göstergesidir.

Tablo A.20. Sentetik 5- mevcut durum ve rotasyon sonrası iş yükü karşılaştırılması

İşçi	Mevcut Zi total	Rotasyon Zi total	Zi değişim		Mevcut Durumdaki LMM değerleri				Rotasyon sonraki LMM değerleri				LMMfark değişim
					LMM 1	LMM 2	LMM 3	Topla m	LMM 1	LMM 2	LMM 3	Topla m	
1.işçi	94,78	145,19	50,4	LMM: LMM Fark:	20 128	148 88	60 40	228 256	52 46	98 43	55 3	205 92	-64%
2.işçi	194,01	112,13	-81,9	LMM: LMM Fark:	52 44	96 32	128 76	276 152	54 32	86 18	68 14	208 64	-58%
3.işçi	214,63	136,67	-78,0	LMM: LMM Fark:	60 60	120 80	40 20	220 160	69 30	99 29	70 1	238 60	-63%
4.işçi	194,39	107,78	-86,6	LMM: LMM Fark:	80 48	32 56	88 8	200 112	35 57	92 24	68 33	195 114	2%
5.işçi	107,45	134,56	27,1	LMM: LMM Fark:	140 92	48 12	60 80	248 184	68 27	95 30	65 3	228 60	-67%
6.işçi	144,77	118,43	-26,3	LMM: LMM Fark:	24 76	100 44	56 32	180 152	69 21	90 29	61 8	220 58	-62%
7.işçi	174,95	107,55	-67,4	LMM: LMM Fark:	64 40	104 72	32 32	200 144	42 34	76 18	58 16	176 68	-53%
8.işçi	119,73	143,87	24,1	LMM: LMM Fark:	28 112	140 92	48 20	216 224	52 46	98 43	55 3	205 92	-59%
9.işçi	175,61	120,95	-54,7	LMM: LMM Fark:	40 32	72 40	32 8	144 80	57 49	106 34	72 15	235 98	23%
10.işçi	364,55	130,55	-234,0	LMM: LMM Fark:	48 32	80 28	108 60	236 120	58 42	100 20	80 22	238 84	-30%
ΣZ: Zfark:	1784,9 -527,2	1257,7 -30%											-43%

b) İş yükleri:

Aşağıdaki tabloda sentetik olarak üretilmiş senaryo-6 veri setindeki işlere ait LMM iş yükü skorları gösterilmektedir.

Tablo A.21. Sentetik 6- iş istasyonlarına ait LMM iş yükü skorları

LMM/İş	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8	J9	J10
LMM-1	32	12	55	5	38	18	25	0	47	0
LMM-2	15	10	0	45	8	10	6	40	25	5
LMM-3	9	8	12	9	15	42	33	30	8	37

c) İş istasyonlarının mola yerine olan yürüme süreleri:

Aşağıdaki tabloda sentetik olarak üretilmiş senaryo-6 veri setindeki iş istasyonlarından mola yerlerine kadar olan yürüme süreleri gösterilmektedir.

Tablo A.22. Sentetik 6- iş istasyonlarından mola yerlerine kadar olan yürüme süreleri

T _j (min)	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T _{avg}
Mola yeri	1,5	3	2,4	2	2,3	1,7	2,2	3,5	1,8	3,2	2,36
F _j :T _j /T _{avg}	0,64	1,27	1,02	0,85	0,97	0,72	0,93	1,48	0,76	1,36	

d) Modele göre iş rotasyonu sırasının belirlenmesi:

Aşağıdaki tabloda sentetik-6 verileriyle çalıştırılan modelin verdiği rotasyon sırası gösterilmektedir.

Tablo A.23. Sentetik 6- kümülatif iş yükünü önleyen iş rotasyon programı

İşçi/ rotasyon periyodu	p ₁	p ₂	p ₃	p ₄
i1	7	2	9	10
i2	3	10	5	4
i3	8	1	2	7
i4	1	8	1	6
i5	10	9	10	9
i6	6	3	8	3
i7	4	5	6	1
i8	9	6	3	8
i9	2	7	4	5
i10	5	4	7	2

Rotasyondan önce ve rotasyondan sonra, LMM iş yükleri toplamı ve LMM iş yüklerinin dağılımı aşağıdaki tabloda gösterilmiştir. 10 işçi için işçilerin işe uyumlarını da dikkate alacak şekilde toplam iş yükünün %22 oranında düştüğü, iş yükleri arasındaki dağılımı

gösteren LMM iş yükleri arasındaki farkın ise %84 oranında düştüğü görülmektedir. Bu düşüş LMM iş yüklerinin işçiler arasında daha dengeli şekilde dağıtıldığının bir göstergesidir.

Tablo A.24. Sentetik 6- mevcut durum ve rotasyon sonrası iş yükü karşılaştırılması

İşçi	Mevcut Zi total	Rotasyon Zi total	Zi değişim		Mevcut Durumdaki LMM değerleri				Rotasyon sonrası LMM değerleri				LMM fark değişim
					LMM 1	LMM 2	LMM 3	Topla m	LMM 1	LMM 2	LMM 3	Topla m	
1.işçi	73,25	144,22	71,0	LMM: LMM Fark:	128 68	60 24	36 92	224 184	84 38	46 40	86 2	216 80	-57%
2.işçi	286,07	185,38	-100,7	LMM: LMM Fark:	48 8	40 8	32 16	120 32	73 3	76 3	73 0	222 6	-81%
3.işçi	229,05	142,94	-86,1	LMM: LMM Fark:	120 48	72 24	48 72	240 144	69 2	71 9	80 11	220 22	-85%
4.işçi	136,36	155,45	19,1	LMM: LMM Fark:	20 160	180 144	36 16	236 320	82 2	80 10	90 8	252 20	-94%
5.işçi	205,60	159,55	-46,1	LMM: LMM Fark:	152 120	32 28	60 92	244 240	94 34	60 30	90 4	244 68	-72%
6.işçi	146,51	181,96	35,4	LMM: LMM Fark:	72 32	40 128	168 96	280 256	78 8	86 10	96 18	260 36	-86%
7.işçi	320,19	135,50	-184,7	LMM: LMM Fark:	100 76	24 108	132 32	256 216	93 15	78 3	75 18	246 36	-83%
8.işçi	232,38	174,13	-58,2	LMM: LMM Fark:	0 160	160 40	120 120	280 320	95 2	93 1	92 3	280 6	-98%
9.işçi	186,15	146,87	-39,3	LMM: LMM Fark:	188 88	100 68	32 156	320 312	80 11	69 4	65 15	214 30	-90%
10.işçi	227,80	162,56	-65,2	LMM: LMM Fark:	0 20	20 128	148 148	168 296	80 11	69 4	65 15	214 30	-90%
ΣZ: Zfark :	2043,4 -454,8	1588,6 -22%											-84%

b) İş yükleri:

Aşağıdaki tabloda sentetik olarak üretilmiş senaryo-7 veri setindeki işlere ait LMM iş yükü skorları gösterilmektedir.

Tablo A.25. Sentetik 7- iş istasyonlarına ait LMM iş yükü skorları

LMM/İş	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8	J9	J10
LMM-1	7	37	7	30	38	5	12	0	28	4
LMM-2	20	20	0	45	0	17	25	12	30	26
LMM-3	35	15	5	48	20	35	30	12	0	18

c) İş istasyonlarının mola yerine olan yürüme süreleri:

Aşağıdaki tabloda sentetik olarak üretilmiş senaryo-7 veri setindeki iş istasyonlarından mola yerlerine kadar olan yürüme süreleri gösterilmektedir.

Tablo A.26. Sentetik 7- iş istasyonlarından mola yerlerine kadar olan yürüme süreleri

Tj (min)	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	Tavg
Mola yeri	1,2	2	1,8	2,4	0,9	1	2,7	3	4	3,2	2,22
Fj:Tj/Tavg	0,54	0,90	0,81	1,08	0,41	0,45	1,22	1,35	1,80	1,44	

d) Modele göre iş rotasyonu sırasının belirlenmesi:

Aşağıdaki tabloda sentetik-7 verileriyle çalıştırılan modelin verdiği rotasyon sırası gösterilmektedir.

Tablo A.27. Sentetik 7- kümülatif iş yükünü önleyen iş rotasyon programı

İşçi/ rotasyon periyodu	p1	p2	p3	p4
i1	9	6	9	6
i2	7	5	7	3
i3	8	4	8	5
i4	2	7	2	7
i5	1	2	1	2
i6	6	9	6	9
i7	5	8	4	8
i8	4	3	3	4
i9	10	1	10	1
i10	3	10	5	10

Rotasyondan önce ve rotasyondan sonra, LMM iş yükleri toplamı ve LMM iş yüklerinin dağılımı aşağıdaki tabloda gösterilmiştir. 10 işçi için işçilerin işe uyumlarını da dikkate alacak şekilde toplam iş yükünün %37 oranında düştüğü, iş yükleri arasındaki dağılımı

gösteren LMM iş yükleri arasındaki farkın ise %62 oranında düştüğü görülmektedir. Bu düşüş LMM iş yüklerinin işçiler arasında daha dengeli şekilde dağıtıldığının bir göstergesidir.

Tablo A.28. Sentetik 7- mevcut durum ve rotasyon sonrası iş yükü karşılaştırılması

İşçi	Mevcut Zi total	Rotasyon Zi total	Zi değişim		Mevcut Durumdaki LMM değerleri				Rotasyon sonrası LMM değerleri				LMMfar k değişim
					LMM 1	LMM 2	LMM 3	Topla m	LMM 1	LMM 2	LMM 3	Topla m	
1. işçi	134,05	154,43	20,4	LMM: LMM Fark:	28 52	80 60	140 112	248 224	66 28	94 24	70 4	230 56	-75%
2. işçi	440,70	136,63	-304,1	LMM: LMM Fark:	148 68	80 20	60 88	288 176	69 19	50 35	85 16	204 70	-60%
3. işçi	31,25	135,41	104,2	LMM: LMM Fark:	28 28	0 20	20 8	48 56	68 1	69 23	92 24	229 48	-14%
4. işçi	360,16	176,85	-183,3	LMM: LMM Fark:	120 60	180 12	192 72	492 144	98 8	90 0	90 8	278 16	-89%
5. işçi	94,05	141,73	47,7	LMM: LMM Fark:	152 152	0 80	80 72	232 304	88 8	80 20	100 12	268 40	-87%
6. işçi	58,84	150,84	92,0	LMM: LMM Fark:	20 48	68 72	140 120	228 240	66 28	94 24	70 4	230 56	-77%
7. işçi	244,33	139,40	-104,9	LMM: LMM Fark:	48 52	100 20	120 72	268 144	68 1	69 23	92 24	229 48	-67%
8. işçi	98,26	167,27	69,0	LMM: LMM Fark:	0 48	48 0	48 48	96 96	74 16	90 16	106 32	270 64	-33%
9. işçi	698,10	155,42	-542,7	LMM: LMM Fark:	112 8	120 120	0 112	232 240	22 70	92 14	106 84	220 168	-30%
10. işçi	180,61	112,64	-68,0	LMM: LMM Fark:	16 88	104 32	72 56	192 176	53 1	52 9	61 8	166 18	-90%
ΣZ: Zfark :	2340,4 -869,8	1470,6 -37%											-62%

b) İş yükleri:

Aşağıdaki tabloda sentetik olarak üretilmiş senaryo-8 veri setindeki işlere ait LMM iş yükü skorları gösterilmektedir.

Tablo A.29. Sentetik 8- iş istasyonlarına ait LMM iş yükü skorları

LMM/İş	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8	J9	J10
LMM-1	32	18	45	14	8	5	25	10	28	10
LMM-2	10	14	15	30	27	20	18	28	35	6
LMM-3	20	36	20	8	42	12	30	21	18	9

c) İş istasyonlarının mola yerine olan yürüme süreleri:

Aşağıdaki tabloda sentetik olarak üretilmiş senaryo-8 veri setindeki iş istasyonlarından mola yerlerine kadar olan yürüme süreleri gösterilmektedir.

Tablo A.30. Sentetik 8- iş istasyonlarından mola yerlerine kadar olan yürüme süreleri

T _j (min)	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T _{avg}
Mola yeri	0,8	1,6	2	2,1	3	3,6	2,5	4	2,3	1,5	2,34
F _j :T _j /T _{avg}	0,34	0,68	0,85	0,90	1,28	1,54	1,07	1,71	0,98	0,64	

d) Modele göre iş rotasyonu sırasının belirlenmesi:

Aşağıdaki tabloda sentetik-8 verileriyle çalıştırılan modelin verdiği rotasyon sırası gösterilmektedir.

Tablo A.31. Sentetik 8- kümülatif iş yükünü önleyen iş rotasyon programı

İşçi/ rotasyon periyodu	p1	p2	p3	p4
i1	1	2	9	6
i2	5	3	6	5
i3	10	5	3	4
i4	7	4	10	7
i5	6	6	1	10
i6	9	10	5	3
i7	2	9	2	9
i8	4	1	4	2
i9	3	8	7	8
i10	8	7	8	1

Rotasyondan önce ve rotasyondan sonra, LMM iş yükleri toplamı ve LMM iş yüklerinin dağılımı aşağıdaki tabloda gösterilmiştir. 10 işçi için işçilerin işe uyumlarını da dikkate alacak şekilde toplam iş yükünün %32 oranında düştüğü, iş yükleri arasındaki dağılımı

gösteren LMM iş yükleri arasındaki farkın ise %76 oranında düştüğü görülmektedir. Bu düşüş LMM iş yüklerinin işçiler arasında daha dengeli şekilde dağıtıldığının bir göstergesidir.

Tablo A.32. Sentetik 8- mevcut durum ve rotasyon sonrası iş yükü karşılaştırılması

İşçi	Mevcut	Rotasyon	Zi değişim		Mevcut Durumdaki LMM değerleri				Rotasyon sonrası LMM değerleri				LMM fark değişim
	Zi total	Zi total			LMM 1	LMM 2	LMM 3	Toplam	LMM 1	LMM 2	LMM 3	Toplam	
1.işçi	67,58	149,81	82,2	LMM: LMM Fark:	128 88	40 40	80 48	248 176	83 4	79 7	86 3	248 14	-92%
2.işçi	185,98	208,07	22,1	LMM: LMM Fark:	72 16	56 88	144 72	272 176	66 23	89 27	116 50	271 100	-43%
3.işçi	217,99	160,33	-57,7	LMM: LMM Fark:	180 120	60 20	80 100	320 240	77 1	78 1	79 2	234 4	-98%
4.işçi	186,67	142,21	-44,5	LMM: LMM Fark:	56 64	120 88	32 24	208 176	74 2	72 5	77 3	223 10	-94%
5.işçi	379,07	104,88	-274,2	LMM: LMM Fark:	32 76	108 60	168 136	308 272	52 4	56 3	53 1	161 8	-97%
6.işçi	427,00	207,07	-219,9	LMM: LMM Fark:	20 60	80 32	48 28	148 120	91 8	83 6	89 2	263 16	-87%
7.işçi	292,78	155,89	-136,9	LMM: LMM Fark:	100 28	72 48	120 20	292 96	92 6	98 10	108 16	298 32	-67%
8.işçi	403,42	108,35	-295,1	LMM: LMM Fark:	40 72	112 28	84 44	236 144	78 6	84 12	72 6	234 24	-83%
9.işçi	207,83	197,26	-10,6	LMM: LMM Fark:	112 28	140 68	72 40	324 136	90 1	89 3	92 2	271 6	-96%
10.işçi	43,70	204,31	160,6	LMM: LMM Fark:	40 16	24 12	36 4	100 32	77 7	84 8	92 15	253 30	-6%
ΣZ:	2412,0	1638,2											-76%
Z fark:	-773,8	-32%											

b) İş yükleri:

Aşağıdaki tabloda sentetik olarak üretilmiş senaryo-9 veri setindeki işlere ait LMM iş yükü skorları gösterilmektedir.

Tablo A.33. Sentetik 9- iş istasyonlarına ait LMM iş yükü skorları

LMM/İş	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8	J9	J10
LMM-1	6	26	35	23	26	18	5	15	40	20
LMM-2	35	10	20	15	0	31	26	25	10	27
LMM-3	10	40	32	18	45	21	0	9	25	9

c) İş istasyonlarının mola yerine olan yürüme süreleri:

Aşağıdaki tabloda sentetik olarak üretilmiş senaryo-9 veri setindeki iş istasyonlarından mola yerlerine kadar olan yürüme süreleri gösterilmektedir.

Tablo A.34. Sentetik 9- iş istasyonlarından mola yerlerine kadar olan yürüme süreleri

T _j (min)	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T _{avg}
Mola yeri	3	2,5	1,5	1	3,2	1,8	2	2,2	1,7	1,2	2,01
F _j :T _j /T _{avg}	1,49	1,24	0,75	0,50	1,59	0,90	1,00	1,09	0,85	0,60	

d) Modele göre iş rotasyonu sırasının belirlenmesi:

Aşağıdaki tabloda sentetik-9 verileriyle çalıştırılan modelin verdiği rotasyon sırası gösterilmektedir.

Tablo A.35. Sentetik 9- kümülatif iş yükünü önleyen iş rotasyon programı

İş/rotasyon periyodu	p1	p2	p3	p4
i1	1	2	10	9
i2	9	7	5	1
i3	10	5	8	4
i4	7	9	1	2
i5	4	6	9	6
i6	2	8	3	8
i7	5	10	4	7
i8	3	1	2	10
i9	6	3	6	3
i10	8	4	7	5

Rotasyondan önce ve rotasyondan sonra, LMM iş yükleri toplamı ve LMM iş yüklerinin dağılımı aşağıdaki tabloda gösterilmiştir. 10 işçi için işçilerin işe uyumlarını da dikkate alacak şekilde toplam iş yükünün %34 oranında düştüğü, iş yükleri arasındaki dağılımı

gösteren LMM iş yükleri arasındaki farkın ise %88 oranında düştüğü görülmektedir. Bu düşüş LMM iş yüklerinin işçiler arasında daha dengeli şekilde dağıtıldığının bir göstergesidir.

Tablo A.36. Sentetik 9- mevcut durum ve rotasyon sonrası iş yükü karşılaştırılması

İşçi	Mevcut	Rotasyon	Zi değişim		Mevcut Durumdaki LMM değerleri				Rotasyon sonrası LMM değerleri				LMM fark değişim
	Zi total	Zi total			LMM 1	LMM 2	LMM 3	Toplam	LMM 1	LMM 2	LMM 3	Toplam	
1. işçi	242,67	184,48	-58,2	LMM : LMM Fark:	24 116	140 100	40 16	204 232	92 10	82 2	84 8	258 20	-91%
2. işçi	378,11	204,82	-173,3	LMM : LMM Fark:	104 64	40 120	160 56	304 240	77 6	71 9	80 3	228 18	-93%
3. işçi	218,39	138,90	-79,5	LMM : LMM Fark:	140 60	80 48	128 12	348 120	84 17	67 14	81 3	232 34	-72%
4. işçi	132,13	156,23	24,1	LMM : LMM Fark:	92 32	60 12	72 20	224 64	77 4	81 6	75 2	233 12	-81%
5. işçi	377,33	139,99	-237,3	LMM : LMM Fark:	104 104	0 180	180 76	284 360	99 12	87 2	85 14	271 28	-92%
6. işçi	470,23	180,79	-289,4	LMM : LMM Fark:	72 52	124 40	84 12	280 104	91 11	80 10	90 1	261 22	-79%
7. işçi	116,79	125,47	8,7	LMM : LMM Fark:	20 84	104 104	0 20	124 208	74 6	68 4	72 2	214 12	-94%
8. işçi	201,33	185,34	-16,0	LMM : LMM Fark:	60 40	100 64	36 24	196 128	87 5	92 1	91 4	270 10	-92%
9. işçi	172,99	151,50	-21,5	LMM : LMM Fark:	160 120	40 60	100 60	300 240	106 4	102 4	106 0	314 8	-97%
10. işçi	143,11	147,96	4,9	LMM : LMM Fark:	80 28	108 72	36 44	224 144	69 3	66 6	72 3	207 12	-92%
ΣZ : Z fark:	2453,1 -837,61	1615,5 -34%											-88%

Senaryo-10

a) İşçilerin boy, yaş, deneyim, yetenek ve sağlık kriterlerine göre değerlendirilmesi:

Aşağıda sentetik olarak üretilmiş senaryo-10 veri setine ait işçilerin (a) boy, (b) yaş, (c) deneyim, (d) yetenek, (e) sağlık kriterlerinin değerlendirme tabloları ve kriterlerin ağılıkları ile elde edilmiş (f) uygunluk matrisi gösterilmektedir.

M_{ij}^b		M_{ij}^y
W/Job	j_1 j_2 j_3 j_4 j_5 j_6 j_7 j_8 j_9 j_{10}	W/Job j_1 j_2 j_3 j_4 j_5 j_6 j_7 j_8 j_9 j_{10}
i1	1 2 1 2 2 1 2 1 1 2	i1 1 1 1 2 1 2 2 2 0 1
i2	1 2 1 1 1 1 1 2 1 0	i2 2 1 2 2 2 1 1 1 1 2
i3	2 1 1 1 1 1 2 1 2 2	i3 1 1 1 1 1 2 1 2 2 1
i4	2 1 2 1 1 2 2 1 1 2	i4 1 1 2 1 2 1 2 2 1 0
i5	1 1 1 2 0 2 1 2 2 1	i5 1 2 1 1 1 2 1 2 1 1
i6	1 1 2 1 2 1 1 2 1 1	i6 2 1 2 0 1 1 2 1 2 1
i7	1 0 1 2 1 2 0 2 1 2	i7 1 2 1 1 2 1 1 2 1 1
i8	1 1 2 2 2 1 1 1 2 1	i8 1 2 1 2 1 2 1 1 1 1
i9	2 1 1 1 1 2 2 2 1 2	i9 2 1 2 2 2 1 2 2 1 2
i10	1 2 2 1 2 1 1 1 1 1	i10 1 2 1 1 2 1 1 1 1 1
(a) Boy		(b) Yaş
M_{ij}^d		M_{ij}^e
W/Job	j_1 j_2 j_3 j_4 j_5 j_6 j_7 j_8 j_9 j_{10}	W/Job j_1 j_2 j_3 j_4 j_5 j_6 j_7 j_8 j_9 j_{10}
i1	1 2 1 2 1 1 2 1 2 1	i1 1 2 2 2 1 2 1 1 1 1
i2	0 1 1 1 1 1 2 1 1 2	i2 1 1 2 1 1 1 1 1 1 1
i3	2 1 1 1 2 1 1 2 1 2	i3 1 2 1 2 1 2 2 1 1 1
i4	1 2 1 0 2 1 1 1 2 1	i4 2 1 1 1 1 1 2 2 2 2
i5	2 1 1 1 1 2 2 2 1 1	i5 2 1 1 1 1 2 1 2 1 2
i6	2 1 2 2 1 1 2 1 1 1	i6 1 2 1 1 2 1 2 2 1 1
i7	1 2 1 1 1 2 0 1 1 1	i7 2 1 1 2 2 2 1 2 2 1
i8	2 1 2 2 1 1 1 2 1 2	i8 1 1 2 1 1 1 2 1 2 0
i9	1 1 1 2 2 2 1 2 1 1	i9 2 1 0 1 2 1 1 1 1 2
i10	1 1 0 2 2 1 2 1 2 1	i10 1 1 1 2 1 2 1 2 1 1
(c) Deneyim		(d) Yetenek
M_{ij}^s		M_{ij}
W/Job	j_1 j_2 j_3 j_4 j_5 j_6 j_7 j_8 j_9 j_{10}	W/Job j_1 j_2 j_3 j_4 j_5 j_6 j_7 j_8 j_9 j_{10}
i1	1 2 1 2 2 1 2 1 1 2	i1 1,0 1,9 1,3 2,0 1,5 1,3 1,7 1,1 1,1 1,5
i2	1 1 2 1 1 0 1 1 1 1	i2 0,9 1,1 1,8 1,1 1,1 0,5 1,2 1,1 1,0 1,2
i3	2 2 1 1 2 1 1 2 2 1	i3 1,7 1,7 1,0 1,3 1,6 1,3 1,3 1,7 1,6 1,2
i4	2 1 2 1 1 1 2 1 1 1	i4 1,8 1,2 1,6 0,8 1,2 1,1 1,8 1,3 1,4 1,2
i5	1 1 1 2 1 1 1 1 2 1	i5 1,4 1,1 1,0 1,5 0,9 1,5 1,2 1,5 1,5 1,3
i6	2 1 2 1 1 2 1 1 2 1	i6 1,7 1,3 1,7 1,1 1,3 1,5 1,5 1,3 1,5 1,0
i7	1 1 1 2 2 1 1 2 1 2	i7 1,3 1,2 1,0 1,8 1,8 1,5 0,8 1,8 1,3 1,5
i8	2 1 1 2 1 1 1 1 1 1	i8 1,6 1,1 1,5 1,7 1,1 1,1 1,3 1,2 1,3 0,9
i9	1 1 2 1 2 2 1 2 1 1	i9 1,4 1,0 1,3 1,2 1,9 1,7 1,1 1,7 1,0 1,4
i10	1 1 1 2 2 2 1 2 0 2	i10 1,0 1,1 0,9 1,9 1,7 1,7 1,2 1,7 0,7 1,5
(e) Sağlık		(f) Uygunluk Matrisi

Şekil A.10. Sentetik 10- işçilerin boy, yaş, deneyim, yetenek, sağlık kriterlerine göre işlere uygunluk matrisleri (M_{ij}^b , M_{ij}^y , M_{ij}^d , M_{ij}^e , M_{ij}^s)

b) İş yükleri:

Aşağıdaki tabloda sentetik olarak üretilmiş senaryo-10 veri setindeki işlere ait LMM iş yükü skorları gösterilmektedir.

Tablo A.37. Sentetik 10- iş istasyonlarına ait LMM iş yükü skorları

LMM/İş	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8	J9	J10
LMM-1	40	10	28	15	8	12	9	30	0	25
LMM-2	20	25	12	0	35	27	42	8	10	8
LMM-3	2	32	9	29	42	8	15	20	12	18

c) İş istasyonlarının mola yerine olan yürüme süreleri:

Aşağıdaki tabloda sentetik olarak üretilmiş senaryo-10 veri setindeki iş istasyonlarından mola yerlerine kadar olan yürüme süreleri gösterilmektedir.

Tablo A.38. Sentetik 10- iş istasyonlarından mola yerlerine kadar olan yürüme süreleri

T _j (min)	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T _{avg}
Mola yeri	3,5	2	1,8	1,7	2,8	2,3	2,6	2	3,6	1,1	2,34
F _j :T _j /T _{avg}	1,50	0,85	0,77	0,73	1,20	0,98	1,11	0,85	1,54	0,47	

d) Modele göre iş rotasyonu sırasının belirlenmesi:

Aşağıdaki tabloda sentetik-10 verileriyle çalıştırılan modelin verdiği rotasyon sırası gösterilmektedir.

Tablo A.39. Sentetik 10- kümülatif iş yükünü önleyen iş rotasyon programı

İşçi/ rotasyon periyodu	p1	p2	p3	p4
i1	7	10	2	10
i2	3	2	3	2
i3	1	5	10	9
i4	8	9	8	7
i5	9	8	7	8
i6	2	3	5	1
i7	6	4	1	5
i8	4	7	9	3
i9	5	1	6	4
i10	10	6	4	6

Rotasyondan önce ve rotasyondan sonra, LMM iş yükleri toplamı ve LMM iş yüklerinin dağılımı aşağıdaki tabloda gösterilmiştir. 10 işçi için işçilerin işe uyumlarını da dikkate alacak şekilde toplam iş yükünün %33 oranında düştüğü, iş yükleri arasındaki dağılımı

gösteren LMM iş yükleri arasındaki farkın ise %93 oranında düştüğü görülmektedir. Bu düşüş LMM iş yüklerinin işçiler arasında daha dengeli şekilde dağıtıldığının bir göstergesidir.

Tablo A.40. Sentetik 10- mevcut durum ve rotasyon sonrası iş yükü karşılaştırılması

İşçi	Mevcut Zi total	Rotasyon Zi total	Zi değişim		Mevcut Durumdaki LMM değerleri				Rotasyon sonrası LMM değerleri				LMMfar k değişim
					LMM 1	LMM 2	LMM 3	Topla m	LMM 1	LMM 2	LMM 3	Topla m	
1.işçi	370,94	103,10	-267,8	LMM: LMM Fark:	160 80	80 72	8 152	248 304	69 14	83 0	83 14	235 28	-91%
2.işçi	216,82	150,60	-66,2	LMM: LMM Fark:	40 60	100 28	128 88	268 176	76 2	74 8	82 6	232 16	-91%
3.işçi	150,77	158,93	8,2	LMM: LMM Fark:	112 64	48 12	36 76	196 152	73 0	73 1	74 1	220 2	-99%
4.işçi	151,60	138,86	-12,7	LMM: LMM Fark:	60 60	0 116	116 56	176 232	69 1	68 1	67 2	204 4	-98%
5.işçi	431,17	150,29	-280,9	LMM: LMM Fark:	32 108	140 28	168 136	340 272	69 1	68 1	67 2	204 4	-99%
6.işçi	125,98	199,72	73,7	LMM: LMM Fark:	48 60	108 76	32 16	188 152	86 6	92 7	85 1	263 14	-91%
7.işçi	372,73	180,28	-192,4	LMM: LMM Fark:	36 132	168 108	60 24	264 264	75 7	82 1	81 6	238 14	-95%
8.işçi	171,45	128,26	-43,2	LMM: LMM Fark:	120 88	32 48	80 40	232 176	52 12	64 1	65 13	181 26	-85%
9.işçi	135,38	173,35	38,0	LMM: LMM Fark:	0 40	40 8	48 48	88 96	75 7	82 1	81 6	238 14	-85%
10.işçi	65,38	87,04	21,7	LMM: LMM Fark:	100 68	32 40	72 28	204 136	64 2	62 1	63 1	189 4	-97%
ΣZ: Z fark:	2192,2 -721,8	1470,4 -33%											-93%

b) İş yükleri:

Aşağıdaki tabloda sentetik olarak üretilmiş senaryo-11 veri setindeki işlere ait LMM iş yükü skorları gösterilmektedir.

Tablo A.41. Sentetik 11- iş istasyonlarına ait LMM iş yükü skorları

LMM/İş	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8	J9	J10
LMM-1	0	35	9	30	12	15	20	8	33	8
LMM-2	45	10	25	8	35	7	25	12	0	25
LMM-3	15	8	15	20	0	20	32	38	16	10

c) İş istasyonlarının mola yerine olan yürüme süreleri:

Aşağıdaki tabloda sentetik olarak üretilmiş senaryo-11 veri setindeki iş istasyonlarından mola yerlerine kadar olan yürüme süreleri gösterilmektedir.

Tablo A.42. Sentetik 11- iş istasyonlarından mola yerlerine kadar olan yürüme süreleri

T _j (min)	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T _{avg}
Mola yeri	1,2	4	2,5	1,8	3	3,2	2,2	1,8	2,2	1,7	2,36
F _j :T _j /T _{avg}	0,51	1,69	1,06	0,76	1,27	1,36	0,93	0,76	0,93	0,72	

d) Modele göre iş rotasyonu sırasının belirlenmesi:

Aşağıdaki tabloda sentetik-11 verileriyle çalıştırılan modelin verdiği rotasyon sırası gösterilmektedir.

Tablo A.43. Sentetik 11- kümülatif iş yükünü önleyen iş rotasyon programı

İşçi/ rotasyon periyodu	p1	p2	p3	p4
i1	2	10	8	10
i2	9	1	9	3
i3	6	7	6	5
i4	3	8	3	2
i5	10	4	10	6
i6	7	2	5	8
i7	1	9	1	9
i8	4	3	4	1
i9	8	5	2	7
i10	5	6	7	4

Rotasyondan önce ve rotasyondan sonra, LMM iş yükleri toplamı ve LMM iş yüklerinin dağılımı aşağıdaki tabloda gösterilmiştir. 10 işçi için işçilerin işe uyumlarını da dikkate alacak şekilde toplam iş yükünün %32 oranında düştüğü, iş yükleri arasındaki dağılımı gösteren LMM iş yükleri arasındaki farkın ise %84 oranında düştüğü görülmektedir. Bu düşüş LMM iş yüklerinin işçiler arasında daha dengeli şekilde dağıtıldığının bir göstergesidir.

Tablo A.44. Sentetik 11- Mevcut durum ve rotasyon sonrası iş yükü karşılaştırılması

İşçi	Mevcut	Rotasyon	Zi değişim		Mevcut Durumdaki LMM değerleri				Rotasyon sonrası LMM değerleri				LMM fark değişim
	Zi total	Zi total			LMM 1	LMM 2	LMM 3	Toplam	LMM 1	LMM 2	LMM 3	Toplam	
1.işçi	100,60	153,35	52,7	LMM: LMM Fark:	0 180	180 120	60 60	240 360	59 13	72 6	66 7	197 26	-93%
2.işçi	380,82	128,11	-252,7	LMM: LMM Fark:	140 100	40 8	32 108	212 216	75 5	70 8	62 13	207 26	-88%
3.işçi	207,63	148,50	-59,1	LMM: LMM Fark:	36 64	100 40	60 24	196 128	62 12	74 2	72 10	208 24	-81%
4.işçi	176,95	176,65	-0,3	LMM: LMM Fark:	120 88	32 48	80 40	232 176	61 11	72 4	76 15	209 30	-83%
5.işçi	238,98	116,99	-122,0	LMM: LMM Fark:	48 92	140 140	0 48	188 280	61 4	65 5	60 1	186 10	-96%
6.işçi	227,80	151,79	-76,0	LMM: LMM Fark:	60 32	28 52	80 20	168 104	75 7	82 4	78 3	235 14	-87%
7.işçi	287,12	115,41	-171,7	LMM: LMM Fark:	80 20	100 28	128 48	308 96	66 24	90 28	62 4	218 56	-42%
8.işçi	167,50	93,30	-74,2	LMM: LMM Fark:	32 16	48 104	152 120	232 240	69 17	86 16	70 1	225 34	-86%
9.işçi	182,71	172,28	-10,4	LMM: LMM Fark:	132 132	0 64	64 68	196 264	75 7	82 4	78 3	235 14	-95%
10.işçi	98,75	150,43	51,7	LMM: LMM Fark:	32 68	100 60	40 8	172 136	77 2	75 3	72 5	224 10	-93%
ΣZ: Z fark:	2068,9 -662,05	1406,8 -32%											-84%

b) İş yükleri:

Aşağıdaki tabloda sentetik olarak üretilmiş senaryo-12 veri setindeki işlere ait LMM iş yükü skorları gösterilmektedir.

Tablo A.45. Sentetik 12- iş istasyonlarına ait LMM iş yükü skorları

LMM/İş	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8	J9	J10
LMM-1	35	0	30	9	13	12	12	20	45	28
LMM-2	10	15	12	18	40	25	22	13	26	12
LMM-3	21	32	0	25	9	38	30	30	7	10

c) İş istasyonlarının mola yerine olan yürüme süreleri:

Aşağıdaki tabloda sentetik olarak üretilmiş senaryo-12 veri setindeki iş istasyonlarından mola yerlerine kadar olan yürüme süreleri gösterilmektedir.

Tablo A.46. Sentetik 12- iş istasyonlarından mola yerlerine kadar olan yürüme süreleri

Tj (min)	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	Tavg
Mola yeri	3,2	2,2	1,7	1,8	3,4	2,8	2	2,1	3,6	4	2,68
Fj:Tj/Tavg	1,19	0,82	0,63	0,67	1,27	1,04	0,75	0,78	1,34	1,49	

d) Modele göre iş rotasyonu sırasının belirlenmesi:

Aşağıdaki tabloda sentetik-12 verileriyle çalıştırılan modelin verdiği rotasyon sırası gösterilmektedir.

Tablo A.47. Sentetik 12- kümülatif iş yükünü önleyen iş rotasyon programı

İşçi/ rotasyon periyodu	p1	p2	p3	p4
i1	3	6	3	6
i2	8	5	7	1
i3	7	1	8	5
i4	6	3	6	3
i5	1	4	10	4
i6	2	9	2	9
i7	9	2	9	2
i8	5	7	1	7
i9	10	8	5	8
i10	4	10	4	10

Rotasyondan önce ve rotasyondan sonra, LMM iş yükleri toplamı ve LMM iş yüklerinin dağılımı aşağıdaki tabloda gösterilmiştir. 10 işçi için işçilerin işe uyumlarını da dikkate alacak şekilde toplam iş yükünün %24 oranında düştüğü, iş yükleri arasındaki dağılımı gösteren LMM iş yükleri arasındaki farkın ise %86 oranında düştüğü görülmektedir. Bu

düşüş LMM iş yüklerinin işçiler arasında daha dengeli şekilde dağıtıldığının bir göstergesidir.

Tablo A.48. Sentetik 12- mevcut durum ve rotasyon sonrası iş yükü karşılaştırılması

İşçi	Mevcut Zi total	Rotasyon Zi total	Zi değişim		Mevcut Durumdaki LMM değerleri				Rotasyon sonraki LMM değerleri				LMMfark değişim
					LMM 1	LMM 2	LMM 3	Topla m	LMM 1	LMM 2	LMM 3	Topla m	
1. işçi	238,76	115,99	-122,8	LMM: LMM Fark:	140 100	40 44	84 56	264 200	84 10	74 2	76 8	234 20	-90%
2. işçi	165,15	198,05	32,9	LMM: LMM Fark:	0 60	60 68	128 128	188 256	80 5	85 5	90 10	255 20	-92%
3. işçi	106,57	163,56	57,0	LMM: LMM Fark:	120 72	48 48	0 120	168 240	80 5	85 5	90 10	255 20	-92%
4. işçi	139,70	131,50	-8,2	LMM: LMM Fark:	36 36	72 28	100 64	208 128	84 10	74 2	76 8	234 20	-84%
5. işçi	314,63	152,40	-162,2	LMM: LMM Fark:	52 108	160 124	36 16	248 248	81 23	58 23	81 0	220 46	-81%
6. işçi	313,43	185,34	-128,1	LMM: LMM Fark:	48 52	100 52	152 104	300 208	90 8	82 4	78 12	250 24	-88%
7. işçi	191,04	215,93	24,9	LMM: LMM Fark:	48 40	88 32	120 72	256 144	90 8	82 4	78 12	250 24	-83%
8. işçi	185,32	162,97	-22,3	LMM: LMM Fark:	80 28	52 68	120 40	252 136	72 22	94 4	90 18	256 44	-68%
9. işçi	285,74	171,46	-114,3	LMM: LMM Fark:	180 76	104 76	28 152	312 304	81 3	78 1	79 2	238 6	-98%
10. işçi	258,10	168,34	-89,8	LMM: LMM Fark:	112 64	48 8	40 72	200 144	74 14	60 10	70 4	204 28	-81%
ΣZ: Z fark:	2198,4 -532,9	1665,6 -24%											-86%

b) İş yükleri:

Aşağıdaki tabloda sentetik olarak üretilmiş senaryo-13 veri setindeki işlere ait LMM iş yükü skorları gösterilmektedir.

Tablo A.49. Sentetik 13- iş istasyonlarına ait LMM iş yükü skorları

LMM/İş	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8	J9	J10
LMM-1	5	0	45	27	35	10	25	35	0	8
LMM-2	15	15	27	9	0	50	12	8	56	32
LMM-3	25	12	11	25	30	12	38	18	5	10

c) İş istasyonlarının mola yerine olan yürüme süreleri:

Aşağıdaki tabloda sentetik olarak üretilmiş senaryo-13 veri setindeki iş istasyonlarından mola yerlerine kadar olan yürüme süreleri gösterilmektedir.

Tablo A.50. Sentetik 13- iş istasyonlarından mola yerlerine kadar olan yürüme süreleri

T _j (min)	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T _{avg}
Mola yeri	1,2	3,5	4	1,8	2,7	2,2	3	3,5	2,1	3,8	2,78
F _j :T _j /T _{avg}	0,43	1,26	1,44	0,65	0,97	0,79	1,08	1,26	0,76	1,37	

d) Modele göre iş rotasyonu sırasının belirlenmesi:

Aşağıdaki tabloda sentetik-13 verileriyle çalıştırılan modelin verdiği rotasyon sırası gösterilmektedir.

Tablo A.51. Sentetik 13- kümülatif iş yükünü önleyen iş rotasyon programı

İşçi/ rotasyon periyodu	p1	p2	p3	p4
i1	2	3	1	8
i2	1	8	9	4
i3	10	4	10	7
i4	5	6	5	9
i5	7	2	8	6
i6	4	9	4	2
i7	6	5	6	5
i8	9	7	2	3
i9	3	1	3	1
i10	8	10	7	10

Rotasyondan önce ve rotasyondan sonra, LMM iş yükleri toplamı ve LMM iş yüklerinin dağılımı aşağıdaki tabloda gösterilmiştir. 10 işçi için işçilerin işe uyumlarını da dikkate alacak şekilde toplam iş yükünün %30 oranında düştüğü, iş yükleri arasındaki dağılımı

gösteren LMM iş yükleri arasındaki farkın ise %78 oranında düştüğü görülmektedir. Bu düşüş LMM iş yüklerinin işçiler arasında daha dengeli şekilde dağıtıldığının bir göstergesidir.

Tablo A.52. Sentetik 13- mevcut durum ve rotasyon sonrası iş yükü karşılaştırılması

İşçi	Mevcut Zi total	Rotasyon Zi total	Zi değişim		Mevcut Durumdaki LMM değerleri				Rotasyon sonrası LMM değerleri				LMMfar k değişim
					LMM 1	LMM 2	LMM 3	Topla m	LMM 1	LMM 2	LMM 3	Topla m	
1.işçi	73,55	178,31	104,8	LMM : LMM Fark:	20 40	60 40	100 80	180 160	85 20	65 1	66 19	216 40	-75%
2.işçi	135,97	131,32	-4,7	LMM : LMM Fark:	0 60	60 12	48 48	108 120	67 21	88 15	73 6	228 42	-65%
3.işçi	477,70	172,01	-305,7	LMM : LMM Fark:	180 72	108 64	44 136	332 272	68 17	85 2	83 15	236 34	-88%
4.işçi	136,60	143,53	6,9	LMM : LMM Fark:	108 72	36 64	100 8	244 144	80 26	106 29	77 3	263 58	-60%
5.işçi	229,53	155,53	-74,0	LMM : LMM Fark:	140 140	0 120	120 20	260 280	70 15	85 5	80 10	235 30	-89%
6.işçi	197,06	96,82	-100,2	LMM : LMM Fark:	40 160	200 152	48 8	288 320	54 35	89 22	67 13	210 70	-78%
7.işçi	323,74	157,26	-166,5	LMM : LMM Fark:	100 52	48 104	152 52	300 208	90 10	100 16	84 6	274 32	-85%
8.işçi	307,19	187,36	-119,8	LMM : LMM Fark:	140 108	32 40	72 68	244 216	70 40	110 44	66 4	246 88	-59%
9.işçi	197,25	163,32	-33,9	LMM : LMM Fark:	0 224	224 204	20 20	244 448	100 16	84 12	72 28	256 56	-88%
10.işçi	236,37	236,64	0,3	LMM : LMM Fark:	32 96	128 88	40 8	200 192	76 8	84 8	76 0	236 16	-92%
ΣZ: Z fark:	2315 -692,9	1622,1 -30%											-78%

b) İş yükleri:

Aşağıdaki tabloda sentetik olarak üretilmiş senaryo-14 veri setindeki işlere ait LMM iş yükü skorları gösterilmektedir.

Tablo A.53. Sentetik 14- iş istasyonlarına ait LMM iş yükü skorları

LMM/İş	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8	J9	J10
LMM-1	15	28	0	26	5	52	10	30	10	12
LMM-2	10	9	40	45	25	10	18	0	22	35
LMM-3	0	12	35	15	20	8	45	35	4	9

c) İş istasyonlarının mola yerine olan yürüme süreleri:

Aşağıdaki tabloda sentetik olarak üretilmiş senaryo-14 veri setindeki iş istasyonlarından mola yerlerine kadar olan yürüme süreleri gösterilmektedir.

Tablo A.54. Sentetik 14- iş istasyonlarından mola yerlerine kadar olan yürüme süreleri

Tj (min)	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	Tavg
Mola yeri	4	1,8	3,2	1,9	2,5	2	4,5	2,5	1,2	1	2,46
Fj:Tj/Tavg	1,63	0,73	1,30	0,77	1,02	0,81	1,83	1,02	0,49	0,41	

d) Modele göre iş rotasyonu sırasının belirlenmesi:

Aşağıdaki tabloda sentetik-14 verileriyle çalıştırılan modelin verdiği rotasyon sırası gösterilmektedir.

Tablo A.55. Sentetik 14- kümülatif iş yükünü önleyen iş rotasyon programı

İşçi/ rotasyon periyodu	p1	p2	p3	p4
i1	6	3	7	10
i2	4	9	1	8
i3	10	7	9	7
i4	9	1	5	6
i5	7	10	2	3
i6	5	2	10	2
i7	1	8	6	9
i8	2	5	4	5
i9	8	6	8	1
i10	3	4	3	4

Rotasyondan önce ve rotasyondan sonra, LMM iş yükleri toplamı ve LMM iş yüklerinin dağılımı aşağıdaki tabloda gösterilmiştir. 10 işçi için işçilerin işe uyumlarını da dikkate alacak şekilde toplam iş yükünün %31 oranında düştüğü, iş yükleri arasındaki dağılımı

gösteren LMM iş yükleri arasındaki farkın ise %73 oranında düştüğü görülmektedir. Bu düşüş LMM iş yüklerinin işçiler arasında daha dengeli şekilde dağıtıldığının bir göstergesidir.

Tablo A.56. Sentetik 14- mevcut durum ve rotasyon sonrası iş yükü karşılaştırılması

İşçi	Mevcut	Rotasyon	Zi değişim		Mevcut Durumdaki LMM değerleri				Rotasyon sonraki LMM değerleri				LMM fark değişim
	Zi total	Zi total			LMM 1	LMM 2	LMM 3	Toplam	LMM 1	LMM 2	LMM 3	Toplam	
1.işçi	258,27	218,08	-40,2	LMM: LMM Fark:	104 104	0 224	224 120	328 448	102 8	94 14	108 6	304 28	-94%
2.işçi	266,91	138,88	-128,0	LMM: LMM Fark:	88 52	36 12	48 40	172 104	70 3	67 32	99 29	236 64	-38%
3.işçi	354,33	153,01	-201,3	LMM: LMM Fark:	60 100	160 20	140 80	360 200	72 5	67 26	93 21	232 52	-74%
4.işçi	74,08	112,91	38,8	LMM: LMM Fark:	104 84	20 40	60 44	184 168	76 6	70 22	92 16	238 44	-74%
5.işçi	196,85	263,59	66,7	LMM: LMM Fark:	20 80	100 20	80 60	200 160	89 6	83 29	112 23	284 58	-64%
6.işçi	134,46	176,85	42,4	LMM: LMM Fark:	140 60	80 48	32 108	252 216	91 22	69 20	89 2	249 44	-80%
7.işçi	168,48	148,71	-19,8	LMM: LMM Fark:	40 8	32 48	80 40	152 96	79 3	82 10	92 13	253 26	-73%
8.işçi	358,27	119,95	-238,3	LMM: LMM Fark:	32 116	148 68	80 48	260 232	58 6	64 3	67 9	189 18	-92%
9.işçi	81,26	170,47	89,2	LMM: LMM Fark:	40 60	100 68	32 8	172 136	77 17	94 10	104 27	275 54	-60%
10.işçi	498,27	140,58	-357,7	LMM: LMM Fark:	168 64	104 76	180 12	452 152	82 8	90 10	100 18	272 36	-76%
ΣZ: Z fark:	2391,2 -748,2	1643,0 -31%											-73%

b) İş yükleri:

Aşağıdaki tabloda sentetik olarak üretilmiş senaryo-15 veri setindeki işlere ait LMM iş yükü skorları gösterilmektedir.

Tablo A.57. Sentetik 15- iş istasyonlarına ait LMM iş yükü skorları

LMM/İş	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8	J9	J10
LMM-1	26	22	15	26	5	35	10	8	10	42
LMM-2	0	9	40	5	25	20	8	37	25	26
LMM-3	56	12	35	15	20	8	20	20	8	45

c) İş istasyonlarının mola yerine olan yürüme süreleri:

Aşağıdaki tabloda sentetik olarak üretilmiş senaryo-15 veri setindeki iş istasyonlarından mola yerlerine kadar olan yürüme süreleri gösterilmektedir.

Tablo A.58. Sentetik 15- iş istasyonlarından mola yerlerine kadar olan yürüme süreleri

T _j (min)	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T _{avg}
Mola yeri	2	4,2	2,5	1,5	2,5	2,2	3	3,5	1,2	2,8	2,54
F _j :T _j /T _{avg}	0,79	1,65	0,98	0,59	0,98	0,87	1,18	1,38	0,47	1,10	

d) Modele göre iş rotasyonu sırasının belirlenmesi:

Aşağıdaki tabloda sentetik-15 verileriyle çalıştırılan modelin verdiği rotasyon sırası gösterilmektedir.

Tablo A.59. Sentetik 15- kümülatif iş yükünü önleyen iş rotasyon programı

İşçi/ rotasyon periyodu	p ₁	p ₂	p ₃	p ₄
i1	6	3	6	3
i2	8	4	8	4
i3	10	7	10	7
i4	5	6	5	6
i5	4	9	4	9
i6	2	10	2	10
i7	9	1	9	1
i8	7	5	7	5
i9	1	8	1	8
i10	3	2	3	2

Rotasyondan önce ve rotasyondan sonra, LMM iş yükleri toplamı ve LMM iş yüklerinin dağılımı aşağıdaki tabloda gösterilmiştir. 10 işçi için işçilerin işe uyumlarını da dikkate alacak şekilde toplam iş yükünün %38 oranında düştüğü, iş yükleri arasındaki dağılımı

gösteren LMM iş yükleri arasındaki farkın ise %40 oranında düştüğü görülmektedir. Bu düşüş LMM iş yüklerinin işçiler arasında daha dengeli şekilde dağıtıldığının bir göstergesidir.

Tablo A.60. Sentetik 15- mevcut durum ve rotasyon sonrası iş yüklerinin karşılaştırılması

İşçi	Mevcut	Rotasyon	Zi değişim		Mevcut Durumdaki LMM değerleri				Rotasyon sonrası LMM değerleri				LMM fark değişim
	Zi total	Zi total			LMM 1	LMM 2	LMM 3	Toplam	LMM 1	LMM 2	LMM 3	Toplam	
1. işçi	258,27	176,65	-84,6	LMM : LMM Fark:	104 104	0 224	224 120	328 448	100 20	120 34	86 14	306 68	-85%
2. işçi	266,91	137,80	-33,5	LMM : LMM Fark:	88 52	36 12	48 40	172 104	68 16	84 14	70 2	222 32	-69%
3. işçi	354,33	225,15	-8,9	LMM : LMM Fark:	60 100	160 20	140 80	360 200	104 36	68 62	130 26	302 124	-38%
4. işçi	74,08	114,18	-114,3	LMM : LMM Fark:	104 84	20 40	60 44	184 168	80 10	90 34	56 24	226 68	-60%
5. işçi	196,85	65,69	60,8	LMM : LMM Fark:	20 80	100 20	80 60	200 160	72 12	60 14	46 26	178 52	-68%
6. işçi	134,46	218,24	122,3	LMM : LMM Fark:	140 60	80 48	32 108	252 216	128 58	70 44	114 14	312 116	-46%
7. işçi	168,48	90,94	-5,0	LMM : LMM Fark:	40 8	32 48	80 40	152 96	72 22	50 78	128 56	250 156	63%
8. işçi	358,27	97,28	-58,3	LMM : LMM Fark:	32 116	148 68	80 48	260 232	30 36	66 14	80 50	176 100	-57%
9. işçi	81,26	161,36	-29,4	LMM : LMM Fark:	40 60	100 68	32 8	172 136	68 6	74 78	152 84	294 168	24%
10. işçi	498,27	196,09	62,6	LMM : LMM Fark:	168 64	104 76	180 12	452 152	74 24	98 4	94 20	266 48	-68%
ΣZ: Z fark:	2391,2 -907,80	1483,4 -38%											-40%

b) İş yükleri:

Aşağıdaki tabloda sentetik olarak üretilmiş senaryo-16 veri setindeki işlere ait LMM iş yükü skorları gösterilmektedir.

Tablo A.61. Sentetik 16- iş istasyonlarına ait LMM iş yükü skorları

LMM/İş	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8	J9	J10
LMM-1	8	25	18	34	8	40	10	24	25	9
LMM-2	47	9	20	5	34	8	26	15	5	32
LMM-3	10	12	30	25	18	12	18	15	30	27

c) İş istasyonlarının mola yerine olan yürüme süreleri:

Aşağıdaki tabloda sentetik olarak üretilmiş senaryo-16 veri setindeki iş istasyonlarından mola yerlerine kadar olan yürüme süreleri gösterilmektedir.

Tablo A.62. Sentetik 16- iş istasyonlarından mola yerlerine kadar olan yürüme süreleri

T _j (min)	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T _{avg}
Mola yeri	4	2,1	1,1	2,5	3,2	1,9	4,2	3,8	1,8	2,3	2,69
F _j :T _j /T _{avg}	1,49	0,78	0,41	0,93	1,19	0,71	1,56	1,41	0,67	0,86	

d) Modele göre iş rotasyonu sırasının belirlenmesi:

Aşağıdaki tabloda sentetik-16 verileriyle çalıştırılan modelin verdiği rotasyon sırası gösterilmektedir.

Tablo A.63. Sentetik 16- kümülatif iş yükünü önleyen iş rotasyon programı

İşçi/ rotasyon periyodu	p1	p2	p3	p4
i1	5	4	5	4
i2	7	3	6	3
i3	8	8	9	1
i4	6	10	8	10
i5	2	5	3	2
i6	1	9	7	6
i7	4	7	2	5
i8	3	2	1	9
i9	9	1	4	7
i10	10	6	10	8

Rotasyondan önce ve rotasyondan sonra, LMM iş yükleri toplamı ve LMM iş yüklerinin dağılımı aşağıdaki tabloda gösterilmiştir. 10 işçi için işçilerin işe uyumlarını da dikkate

alacak şekilde toplam iş yükünün %16 oranında düştüğü, iş yükleri arasındaki dağılımı gösteren LMM iş yükleri arasındaki farkın ise %89 oranında düştüğü görülmektedir. Bu düşüş LMM iş yüklerinin işçiler arasında daha dengeli şekilde dağıtıldığının bir göstergesidir.

Tablo A.64. Sentetik 16- kümülatif iş yükünü önleyen iş rotasyon programı

İşçi	Mevcut	Rotasyon	Zi değişim		Mevcut Durumdaki LMM değerleri				Rotasyon sonrası LMM değerleri				LMM fark değişim
	Zi total	Zi total			LMM 1	LMM 2	LMM 3	Toplam	LMM 1	LMM 2	LMM 3	Toplam	
1. işçi	282,90	154,60	-128,3	LMM: LMM Fark:	32 156	188 148	40 8	260 312	84 6	78 8	86 2	248 16	-95%
2. işçi	226,79	128,30	-98,5	LMM: LMM Fark:	100 64	36 12	48 52	184 128	86 12	74 16	90 4	250 32	-75%
3. işçi	169,75	167,72	-2,0	LMM: LMM Fark:	72 8	80 40	120 48	272 96	81 1	82 12	70 11	233 24	-75%
4. işçi	118,96	170,24	51,3	LMM: LMM Fark:	136 116	20 80	100 36	256 232	82 5	87 6	81 1	250 12	-95%
5. işçi	142,75	94,13	-48,6	LMM: LMM Fark:	32 104	136 64	72 40	240 208	76 4	72 0	72 4	220 8	-96%
6. işçi	97,13	153,38	56,3	LMM: LMM Fark:	160 128	32 16	48 112	240 256	83 3	86 16	70 13	239 32	-88%
7. işçi	182,95	148,65	-34,3	LMM: LMM Fark:	40 64	104 32	72 32	216 128	77 3	74 1	73 4	224 8	-94%
8. işçi	271,96	123,78	-148,2	LMM: LMM Fark:	96 36	60 0	60 36	216 72	76 5	81 1	82 6	239 12	-83%
9. işçi	131,41	198,45	67,0	LMM: LMM Fark:	100 80	20 100	120 20	240 200	77 6	83 0	83 6	243 12	-94%
10. işçi	143,26	153,81	10,5	LMM: LMM Fark:	36 92	128 20	108 72	272 184	82 5	87 6	81 1	250 12	-93%
ΣZ:	1767,9	1493,1											-89%
Z fark:	-274,8	-16%											

b) İş yükleri:

Aşağıdaki tabloda sentetik olarak üretilmiş senaryo-17 veri setindeki işlere ait LMM iş yükü skorları gösterilmektedir.

Tablo A.65. Sentetik 17- iş istasyonlarına ait LMM iş yükü skorları

LMM/İş	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8	J9	J10
LMM-1	25	6	46	26	12	8	20	16	11	18
LMM-2	12	37	12	9	24	40	8	27	25	5
LMM-3	18	15	10	38	8	20	32	0	32	12

c) İş istasyonlarının mola yerine olan yürüme süreleri:

Aşağıdaki tabloda sentetik olarak üretilmiş senaryo-17 veri setindeki iş istasyonlarından mola yerlerine kadar olan yürüme süreleri gösterilmektedir.

Tablo A.66. Sentetik 17- iş istasyonlarından mola yerlerine kadar olan yürüme süreleri

Tj (min)	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	Tavg
Mola yeri	1,5	1,2	1,6	3,4	1,8	2,2	3	2,6	3,8	1,9	2,3
Fj:Tj/Tavg	0,65	0,52	0,70	1,48	0,78	0,96	1,30	1,13	1,65	0,83	

d) Modele göre iş rotasyonu sırasının belirlenmesi:

Aşağıdaki tabloda sentetik-17 verileriyle çalıştırılan modelin verdiği rotasyon sırası gösterilmektedir.

Tablo A.67. Sentetik 17- kümülatif iş yükünü önleyen iş rotasyon programı

İşçi/ rotasyon periyodu	p1	p2	p3	p4
i1	3	9	1	6
i2	9	3	5	9
i3	5	7	8	7
i4	6	4	6	3
i5	2	10	10	10
i6	4	2	3	2
i7	1	5	9	1
i8	10	6	4	5
i9	8	1	2	4
i10	7	8	8	8

Rotasyondan önce ve rotasyondan sonra, LMM iş yükleri toplamı ve LMM iş yüklerinin dağılımı aşağıdaki tabloda gösterilmiştir. 10 işçi için işçilerin işe uyumlarını da dikkate

alacak şekilde toplam iş yükünün %29 oranında düştüğü, iş yükleri arasındaki dağılımı gösteren LMM iş yükleri arasındaki farkın ise %89 oranında düştüğü görülmektedir. Bu düşüş LMM iş yüklerinin işçiler arasında daha dengeli şekilde dağıtıldığının bir göstergesidir.

Tablo A.68. Sentetik 17- mevcut durum ve rotasyon sonrası iş yükü karşılaştırılması

İşçi	Mevcut	Rotasyon	Zi değişim		Mevcut Durumdaki LMM değerleri				Rotasyon sonrası LMM değerleri				LMM fark değişim
	Zi total	Zi total			LMM 1	LMM 2	LMM 3	Toplam	LMM 1	LMM 2	LMM 3	Toplam	
1.işçi	88,39	153,23	64,8	LMM : LMM Fark:	100 52	48 24	72 28	220 104	90 1	89 9	80 10	259 20	-81%
2.işçi	114,58	214,79	100,2	LMM : LMM Fark:	24 124	148 88	60 36	232 248	80 6	86 4	82 2	248 12	-95%
3.işçi	189,22	147,98	-41,2	LMM : LMM Fark:	184 136	48 8	40 144	272 288	68 1	67 5	72 4	207 10	-97%
4.işçi	265,91	176,15	-89,8	LMM : LMM Fark:	104 68	36 116	152 48	292 232	88 13	101 13	88 0	277 26	-89%
5.işçi	93,91	61,65	-32,3	LMM : LMM Fark:	48 48	96 64	32 16	176 128	60 8	52 1	51 9	163 18	-86%
6.işçi	246,27	165,68	-80,6	LMM : LMM Fark:	32 128	160 80	80 48	272 256	84 11	95 17	78 6	257 34	-87%
7.işçi	313,04	118,11	-194,9	LMM : LMM Fark:	80 48	32 96	128 48	240 192	73 0	73 3	76 3	222 6	-97%
8.işçi	230,53	136,12	-94,4	LMM : LMM Fark:	64 44	108 108	0 64	172 216	64 14	78 0	78 14	220 28	-87%
9.işçi	449,39	133,92	-315,5	LMM : LMM Fark:	44 56	100 28	128 84	272 168	73 12	85 14	71 2	229 28	-83%
10.işçi	115,65	182,38	66,7	LMM : LMM Fark:	72 52	20 28	48 24	140 104	72 2	70 6	64 8	206 16	-85%
ΣZ:	2106,9	1490,0											-89%
Z fark:	-616,9	-29%											

b) İş yükleri:

Aşağıdaki tabloda sentetik olarak üretilmiş senaryo-18 veri setindeki işlere ait LMM iş yükü skorları gösterilmektedir.

Tablo A.69. Sentetik 18- iş istasyonlarına ait LMM iş yükü skorları

LMM/İş	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8	J9	J10
LMM-1	5	40	8	25	30	21	21	27	10	12
LMM-2	40	24	25	20	18	16	13	9	18	20
LMM-3	15	32	8	14	15	30	28	35	8	10

c) İş istasyonlarının mola yerine olan yürüme süreleri:

Aşağıdaki tabloda sentetik olarak üretilmiş senaryo-18 veri setindeki iş istasyonlarından mola yerlerine kadar olan yürüme süreleri gösterilmektedir.

Tablo A.70. Sentetik 18- iş istasyonlarından mola yerlerine kadar olan yürüme süreleri

Tj (min)	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	Tavg
Mola yeri	2,2	1,8	2,5	3	3,6	2,4	3,8	1,2	2,5	1,2	2,42
Fj:Tj/Tavg	0,91	0,74	1,03	1,24	1,49	0,99	1,57	0,50	1,03	0,50	

d) Modele göre iş rotasyonu sırasının belirlenmesi:

Aşağıdaki tabloda sentetik-18 verileriyle çalıştırılan modelin verdiği rotasyon sırası gösterilmektedir.

Tablo A.71. Sentetik 18- kümülatif iş yükünü önleyen iş rotasyon programı

İşçi/ rotasyon periyodu	p1	p2	p3	p4
i1	6	4	6	3
i2	4	9	3	8
i3	7	5	1	2
i4	9	2	9	6
i5	2	1	7	4
i6	1	8	10	5
i7	5	3	8	9
i8	10	6	5	10
i9	8	10	2	1
i10	3	7	4	7

Rotasyondan önce ve rotasyondan sonra, LMM iş yükleri toplamı ve LMM iş yüklerinin dağılımı aşağıdaki tabloda gösterilmiştir. 10 işçi için işçilerin işe uyumlarını da dikkate alacak şekilde toplam iş yükünün %25 oranında düştüğü, iş yükleri arasındaki dağılımı

gösteren LMM iş yükleri arasındaki farkın ise %86 oranında düştüğü görülmektedir. Bu düşüş LMM iş yüklerinin işçiler arasında daha dengeli şekilde dağıtıldığının bir göstergesidir.

Tablo A.72. Sentetik 18- mevcut durum ve rotasyon sonrası iş yükü karşılaştırılması

İşçi	Mevcut	Rotasyon	Zi değişim		Mevcut Durumdaki LMM değerleri				Rotasyon sonraki LMM değerleri				LMM fark değişim
	Zi total	Zi total			LMM 1	LMM 2	LMM 3	Toplam	LMM 1	LMM 2	LMM 3	Toplam	
1.işçi	148,75	149,56	0,8	LMM: LMM Fark:	20 140	160 100	60 40	240 280	75 2	77 5	82 7	234 14	-95%
2.işçi	285,62	111,45	-174,2	LMM: LMM Fark:	160 64	96 32	128 32	384 128	70 2	72 7	65 5	207 14	-89%
3.işçi	169,42	215,23	45,8	LMM: LMM Fark:	32 68	100 68	32 0	164 136	96 1	95 5	90 6	281 12	-91%
4.işçi	233,18	126,53	-106,6	LMM: LMM Fark:	100 20	80 24	56 44	236 88	81 5	76 2	78 3	235 10	-89%
5.işçi	255,58	171,02	-84,6	LMM: LMM Fark:	120 48	72 12	60 60	252 120	91 6	97 8	89 2	277 16	-87%
6.işçi	249,44	141,57	-107,9	LMM: LMM Fark:	84 20	64 56	120 36	268 112	74 13	87 12	75 1	236 26	-77%
7.işçi	254,14	124,06	-130,1	LMM: LMM Fark:	84 32	52 60	112 28	248 120	75 5	70 4	66 9	211 18	-85%
8.işçi	140,83	125,20	-15,6	LMM: LMM Fark:	108 72	36 104	140 32	284 208	75 1	74 9	65 10	214 20	-90%
9.işçi	148,76	112,76	-36,0	LMM: LMM Fark:	40 32	72 40	32 8	144 80	84 9	93 1	92 8	269 18	-78%
10.işçi	83,31	204,49	121,2	LMM: LMM Fark:	48 32	80 40	40 8	168 80	75 4	71 7	78 3	224 14	-83%
ΣZ: Z fark:	1969,0 -487,1	1481,9 -25%											-86%

b) İş yükleri:

Aşağıdaki tabloda sentetik olarak üretilmiş senaryo-19 veri setindeki işlere ait LMM iş yükü skorları gösterilmektedir.

Tablo A.73. Sentetik 19- iş istasyonlarına ait LMM iş yükü skorları

LMM/iş	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8	J9	J10
LMM-1	22	0	30	20	35	5	5	29	30	8
LMM-2	5	25	10	34	27	18	15	8	12	36
LMM-3	12	18	25	10	9	30	7	35	15	18

c) İş istasyonlarının mola yerine olan yürüme süreleri:

Aşağıdaki tabloda sentetik olarak üretilmiş senaryo-19 veri setindeki iş istasyonlarından mola yerlerine kadar olan yürüme süreleri gösterilmektedir.

Tablo A.74. Sentetik 19- iş istasyonlarından mola yerlerine kadar olan yürüme süreleri

Tj (min)	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	Tavg
Mola yeri	2	2,5	1,2	3,5	1,8	0,9	4	4,5	3,8	1,9	2,61
Fj:Tj/Tavg	0,77	0,96	0,46	1,34	0,69	0,34	1,53	1,72	1,46	0,73	

d) Modele göre iş rotasyonu sırasının belirlenmesi:

Aşağıdaki tabloda sentetik-19 verileriyle çalıştırılan modelin verdiği rotasyon sırası gösterilmektedir.

Tablo A.75. Sentetik 19- kümülatif iş yükünü önleyen iş rotasyon programı

İşçi/ rotasyon periyodu	p1	p2	p3	p4
i1	9	10	9	6
i2	4	8	4	8
i3	1	6	5	7
i4	2	3	7	9
i5	10	1	10	1
i6	8	4	3	10
i7	7	9	2	3
i8	6	5	6	5
i9	5	7	8	2
i10	3	2	1	4

Rotasyondan önce ve rotasyondan sonra, LMM iş yükleri toplamı ve LMM iş yüklerinin dağılımı aşağıdaki tabloda gösterilmiştir. 10 işçi için işçilerin işe uyumlarını da dikkate

alacak şekilde toplam iş yükünün %25 oranında düştüğü, iş yükleri arasındaki dağılımı gösteren LMM iş yükleri arasındaki farkın ise %91 oranında düştüğü görülmektedir. Bu düşüş LMM iş yüklerinin işçiler arasında daha dengeli şekilde dağıtıldığının bir göstergesidir.

Tablo A.76. Sentetik 19- mevcut durum ve rotasyon sonrası iş yükü karşılaştırılması

İşçi	Mevcut	Rotasyon	Zi değişim		Mevcut Durumdaki LMM değerleri				Rotasyon sonraki LMM değerleri				LMM fark değişim
	Zi total	Zi total			LMM 1	LMM 2	LMM 3	Topla m	LMM 1	LMM 2	LMM 3	Topla m	
1.işçi	81,50	130,14	48,6	LMM: LMM Fark:	88 68	20 28	48 40	156 136	73 5	78 0	78 5	229 10	-93%
2.işçi	164,75	231,05	66,3	LMM: LMM Fark:	0 100	100 28	72 72	172 200	98 14	84 6	90 8	272 28	-86%
3.işçi	119,54	94,97	-24,6	LMM: LMM Fark:	120 80	40 60	100 20	260 160	67 2	65 7	58 9	190 18	-89%
4.işçi	234,05	126,46	-107,6	LMM: LMM Fark:	80 56	136 96	40 40	256 192	65 3	62 3	65 0	192 6	-97%
5.işçi	133,53	80,06	-53,5	LMM: LMM Fark:	140 32	108 72	36 104	284 208	60 22	82 22	60 0	202 44	-79%
6.işçi	73,10	194,19	121,1	LMM: LMM Fark:	20 52	72 48	120 100	212 200	87 1	88 0	88 1	263 2	-99%
7.işçi	108,02	131,02	23,0	LMM: LMM Fark:	20 40	60 32	28 8	108 80	65 3	62 3	65 0	192 6	-93%
8.işçi	466,01	86,39	-379,6	LMM: LMM Fark:	116 84	32 108	140 24	288 216	80 10	90 12	78 2	248 24	-89%
9.işçi	264,57	164,79	-99,8	LMM: LMM Fark:	120 72	48 12	60 60	228 144	69 6	75 6	69 0	213 12	-92%
10.işçi	180,54	136,04	-44,5	LMM: LMM Fark:	32 112	144 72	72 40	248 224	72 2	74 9	65 7	211 18	-92%
ΣZ: Z fark:	1825,6 -450,5	1375,1 -25%											-91%

Senaryo-20

a) İşçilerin boy, yaş, deneyim, yetenek ve sağlık kriterlerine göre değerlendirilmesi:

Aşağıda sentetik olarak üretilmiş senaryo-20 veri setine ait işçilerin (a) boy, (b) yaş, (c) deneyim, (d) yetenek, (e) sağlık kriterlerinin değerlendirme tabloları ve kriterlerin ağırlıkları ile elde edilmiş (f) uygunluk matrisi gösterilmektedir.

M_{ij}^b											M_{ij}^y										
W/Job	j ₁	j ₂	j ₃	j ₄	j ₅	j ₆	j ₇	j ₈	j ₉	j ₁₀	W/Job	j ₁	j ₂	j ₃	j ₄	j ₅	j ₆	j ₇	j ₈	j ₉	j ₁₀
i1	1	1	1	1	1	2	1	1	2	1	i1	1	1	2	2	1	2	2	2	1	1
i2	1	1	2	1	1	2	1	2	1	1	i2	2	1	1	1	2	1	1	1	1	2
i3	2	1	1	2	2	1	1	1	1	2	i3	1	2	1	2	1	2	1	2	2	2
i4	2	1	2	1	1	1	1	2	2	1	i4	2	2	1	1	0	1	1	1	1	1
i5	2	1	1	2	2	2	1	1	1	1	i5	1	1	2	2	1	2	1	2	1	2
i6	1	2	1	1	1	1	2	1	2	2	i6	2	2	2	1	2	1	1	2	1	2
i7	1	1	1	2	1	2	1	0	2	1	i7	1	2	1	1	1	1	2	1	1	1
i8	1	1	2	1	2	1	2	1	2	2	i8	2	1	2	1	2	1	1	2	2	1
i9	2	1	1	2	1	1	1	1	1	1	i9	1	2	2	2	1	1	1	1	1	2
i10	1	2	1	2	1	1	2	2	1	1	i10	2	1	1	1	1	2	1	2	2	1

(a) Boy

M_{ij}^d											M_{ij}^e										
W/Job	j ₁	j ₂	j ₃	j ₄	j ₅	j ₆	j ₇	j ₈	j ₉	j ₁₀	W/Job	j ₁	j ₂	j ₃	j ₄	j ₅	j ₆	j ₇	j ₈	j ₉	j ₁₀
i1	1	1	1	2	2	2	1	2	1	2	i1	1	2	2	1	1	2	2	1	2	1
i2	1	1	2	2	1	2	1	1	2	1	i2	1	1	1	1	2	1	2	2	1	1
i3	2	1	1	1	2	1	2	2	1	2	i3	2	2	1	1	2	1	2	1	1	2
i4	1	1	2	1	1	2	1	1	2	1	i4	1	1	1	1	1	1	2	2	2	1
i5	1	2	1	2	1	2	2	1	2	2	i5	2	1	2	1	1	2	1	1	1	2
i6	2	2	1	1	2	1	1	2	1	2	i6	1	2	2	2	2	1	2	2	1	2
i7	2	1	2	2	1	2	1	2	2	1	i7	1	1	2	1	2	2	1	2	2	1
i8	1	1	1	1	2	2	1	1	1	1	i8	1	1	1	0	1	1	2	1	2	1
i9	2	1	2	1	2	2	1	1	1	1	i9	2	2	1	1	1	2	1	2	1	1
i10	1	2	2	1	2	1	1	2	1	1	i10	1	2	1	2	1	1	2	1	1	1

(c) Deneyim

M_{ij}^s											M _{ij}										
W/Job	j ₁	j ₂	j ₃	j ₄	j ₅	j ₆	j ₇	j ₈	j ₉	j ₁₀	W/Job	j ₁	j ₂	j ₃	j ₄	j ₅	j ₆	j ₇	j ₈	j ₉	j ₁₀
i1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	1	i1	1,0	1,7	1,8	1,2	1,2	2,0	1,8	1,2	1,3	1,2
i2	2	1	1	2	2	1	2	2	1	1	i2	1,5	1,0	1,2	1,6	1,8	1,2	1,7	1,8	1,2	1,1
i3	1	1	1	1	1	2	1	1	1	2	i3	1,5	1,3	1,0	1,1	1,5	1,5	1,4	1,2	1,1	2,0
i4	1	2	1	1	1	1	2	1	2	1	i4	1,1	1,5	1,2	1,0	0,9	1,2	1,7	1,3	1,9	1,0
i5	2	1	1	2	0	1	2	1	1	2	i5	1,8	1,2	1,3	1,7	0,6	1,5	1,6	1,1	1,2	1,9
i6	1	1	2	2	1	1	1	2	1	1	i6	1,2	1,5	1,8	1,7	1,5	1,0	1,3	1,9	1,1	1,5
i7	1	1	1	1	2	1	2	1	2	1	i7	1,2	1,1	1,4	1,2	1,7	1,5	1,5	1,4	1,9	1,0
i8	1	2	1	2	1	2	1	1	1	2	i8	1,1	1,5	1,1	1,2	1,3	1,6	1,3	1,1	1,4	1,5
i9	2	2	1	1	2	1	1	2	1	1	i9	1,9	1,8	1,2	1,1	1,6	1,4	1,0	1,7	1,0	1,1
i10	1	1	1	2	1	1	2	1	1	1	i10	1,1	1,5	1,2	1,8	1,0	1,1	1,8	1,3	1,1	1,0

(e) Sağlık

(f) Uygunluk Matrisi

Şekil A.20. Sentetik 20- İşçilerin boy, yaş, deneyim, yetenek, sağlık kriterlerine göre işlere uygunluk matrisleri (M_{ij}^b , M_{ij}^y , M_{ij}^d , M_{ij}^e , M_{ij}^s)

b) İş yükleri:

Aşağıdaki tabloda sentetik olarak üretilmiş senaryo-20 veri setindeki işlere ait LMM iş yükü skorları gösterilmektedir.

Tablo A.77. Sentetik 20- iş istasyonlarına ait LMM iş yükü skorları

LMM/İş	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8	J9	J10
LMM-1	0	30	12	45	15	8	17	4	37	25
LMM-2	6	0	35	24	52	12	28	26	5	28
LMM-3	25	52	18	27	9	8	5	14	40	12

c) İş istasyonlarının mola yerine olan yürüme süreleri:

Aşağıdaki tabloda sentetik olarak üretilmiş senaryo-20 veri setindeki iş istasyonlarından mola yerlerine kadar olan yürüme süreleri gösterilmektedir.

Tablo A.78. Sentetik 20- iş istasyonlarından mola yerlerine kadar olan yürüme süreleri

Tj (min)	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	Tavg
Resting place	1,5	2	1,2	3	3,5	1,6	3,8	4,2	3	2,6	2,64
Fj:Tj/Tavg	0,57	0,76	0,45	1,14	1,33	0,61	1,44	1,59	1,14	0,98	

d) Modele göre iş rotasyonu sırasının belirlenmesi:

Aşağıdaki tabloda sentetik-20 verileriyle çalıştırılan modelin verdiği rotasyon sırası gösterilmektedir.

Tablo A.79. Sentetik 20- kümülatif iş yükünü önleyen iş rotasyon programı

İşçi/ rotasyon periyodu	p1	p2	p3	p4
i1	6	3	2	7
i2	5	4	8	2
i3	1	10	6	10
i4	3	9	7	6
i5	7	1	10	1
i6	2	8	4	5
i7	9	5	9	3
i8	10	6	3	9
i9	8	2	5	4
i10	4	7	1	8

Rotasyondan önce ve rotasyondan sonra, LMM iş yükleri toplamı ve LMM iş yüklerinin dağılımı aşağıdaki tabloda gösterilmiştir. 10 işçi için işçilerin işe uyumlarını da dikkate alacak şekilde toplam iş yükünün %42 oranında düştüğü, iş yükleri arasındaki dağılımı

gösteren LMM iş yükleri arasındaki farkın ise %84 oranında düştüğü görülmektedir. Bu düşüş LMM iş yüklerinin işçiler arasında daha dengeli şekilde dağıtıldığının bir göstergesidir.

Tablo A.80. Sentetik 20- mevcut durum ve rotasyon sonrası iş yükü karşılaştırılması

İşçi	Mevcut	Rotasyon	Zi değişim		Mevcut Durumdaki LMM değerleri				Rotasyon sonraki LMM değerleri				LMM fark değişim
	Zi total	Zi total			LMM 1	LMM 2	LMM 3	Toplam	LMM 1	LMM 2	LMM 3	Toplam	
1. işçi	70,45	101,38	30,9	LMM : LMM Fark:	0 24	24 76	100 100	124 200	67 8	75 8	83 16	225 32	-84%
2. işçi	248,48	225,08	-23,4	LMM : LMM Fark:	120 120	0 208	208 88	328 416	94 8	102 0	102 8	298 16	-96%
3. işçi	118,18	87,09	-31,1	LMM : LMM Fark:	48 92	140 68	72 24	260 184	58 16	74 17	57 1	189 34	-82%
4. işçi	436,36	129,01	-307,4	LMM : LMM Fark:	180 84	96 12	108 72	384 168	74 6	80 9	71 3	225 18	-89%
5. işçi	683,47	97,09	-586,4	LMM : LMM Fark:	60 148	208 172	36 24	304 344	42 26	68 1	67 25	177 52	-85%
6. işçi	67,88	208,13	140,3	LMM : LMM Fark:	32 16	48 16	32 0	112 32	94 8	102 0	102 8	298 16	-50%
7. işçi	187,87	175,81	-12,1	LMM : LMM Fark:	68 44	112 92	20 48	200 184	101 4	97 10	107 6	305 20	-89%
8. işçi	262,78	146,50	-116,3	LMM : LMM Fark:	16 88	104 48	56 40	176 176	82 2	80 2	78 4	240 8	-95%
9. işçi	372,73	234,73	-138,0	LMM : LMM Fark:	148 128	20 140	160 12	328 280	94 8	102 0	102 8	298 16	-94%
10. işçi	256,06	173,12	-82,9	LMM : LMM Fark:	100 12	112 64	48 52	260 128	66 18	84 13	71 5	221 36	-72%
ΣZ: Z fark:	2704,3 -1126,4	1577,9 -42%											-84%

b) İş yükleri:

Aşağıdaki tabloda sentetik olarak üretilmiş senaryo-21 veri setindeki işlere ait LMM iş yükü skorları gösterilmektedir.

Tablo A.81. Sentetik 21- iş istasyonlarına ait LMM iş yükü skorları

LMM/İş	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8	J9	J10
LMM-1	8	9	30	12	18	24	15	4	30	42
LMM-2	15	23	17	25	33	12	8	12	5	32
LMM-3	12	5	40	15	10	52	28	0	21	10

c) İş istasyonlarının mola yerine olan yürüme süreleri:

Aşağıdaki tabloda sentetik olarak üretilmiş senaryo-21 veri setindeki iş istasyonlarından mola yerlerine kadar olan yürüme süreleri gösterilmektedir.

Tablo A.82. Sentetik 21- iş istasyonlarından mola yerlerine kadar olan yürüme süreleri

T _j (min)	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T _{avg}
Mola yeri	3,5	2	3,2	3	1,5	1,8	2,8	1,9	3,6	2,9	2,62
F _j :T _j /T _{avg}	1,34	0,76	1,22	1,15	0,57	0,69	1,07	0,73	1,37	1,11	

d) Modele göre iş rotasyonu sırasının belirlenmesi:

Aşağıdaki tabloda sentetik-21 verileriyle çalıştırılan modelin verdiği rotasyon sırası gösterilmektedir.

Tablo A.83. Sentetik 21- kümülatif iş yükünü önleyen iş rotasyon programı

İşçi/ rotasyon periyodu	p1	p2	p3	p4
i1	10	1	6	4
i2	8	3	8	7
i3	9	2	4	3
i4	7	4	7	10
i5	2	7	9	2
i6	4	8	10	6
i7	3	5	3	5
i8	1	9	1	8
i9	5	6	5	9
i10	6	10	2	1

Rotasyondan önce ve rotasyondan sonra, LMM iş yükleri toplamı ve LMM iş yüklerinin dağılımı aşağıdaki tabloda gösterilmiştir. 10 işçi için işçilerin işe uyumlarını da dikkate alacak şekilde toplam iş yükünün %31 oranında düştüğü, iş yükleri arasındaki dağılımı

gösteren LMM iş yükleri arasındaki farkın ise %83 oranında düştüğü görülmektedir. Bu düşüş LMM iş yüklerinin işçiler arasında daha dengeli şekilde dağıtıldığının bir göstergesidir.

Tablo A.84. Sentetik 21- mevcut durum ve rotasyon sonrası iş yükü karşılaştırılması

İşçi	Mevcut	Rotasyon	Zi değişim		Mevcut Durumdaki LMM değerleri				Rotasyon sonrası LMM değerleri				LMM fark değişim
	Zi total	Zi total			LMM 1	LMM 2	LMM 3	Toplam	LMM 1	LMM 2	LMM 3	Toplam	
1.işçi	122,78	152,28	29,5	LMM: LMM Fark:	32 28	60 12	48 16	140 56	86 2	84 5	89 3	259 10	-82%
2.işçi	112,98	132,22	19,2	LMM: LMM Fark:	36 56	92 72	20 16	148 144	53 4	49 19	68 15	170 38	-74%
3.işçi	267,53	162,08	-105,5	LMM: LMM Fark:	120 52	68 92	160 40	348 184	81 11	70 11	81 0	232 22	-88%
4.işçi	133,28	162,61	29,3	LMM: LMM Fark:	48 52	100 40	60 12	208 104	84 11	73 8	81 3	238 22	-79%
5.işçi	82,81	144,90	62,1	LMM: LMM Fark:	72 60	132 92	40 32	244 184	63 4	59 0	59 4	181 8	-96%
6.işçi	136,02	130,42	-5,6	LMM: LMM Fark:	96 48	48 160	208 112	352 320	82 1	81 4	77 5	240 10	-97%
7.işçi	137,22	118,83	-18,4	LMM: LMM Fark:	60 28	32 80	112 52	204 160	96 4	100 0	100 4	296 8	-95%
8.işçi	36,99	125,54	88,5	LMM: LMM Fark:	16 32	48 48	0 16	64 96	50 3	47 2	45 5	142 10	-90%
9.işçi	209,84	130,24	-79,6	LMM: LMM Fark:	120 100	20 64	84 36	224 200	90 7	83 10	93 3	266 20	-90%
10.işçi	229,10	148,28	-80,8	LMM: LMM Fark:	168 40	128 88	40 128	336 256	83 1	82 3	79 4	244 8	-97%
ΣZ:	1468,6	1407,40											-89%
Z fark:	-61,16	-4%											

b) İş yükleri:

Aşağıdaki tabloda sentetik olarak üretilmiş senaryo-22 veri setindeki işlere ait LMM iş yükü skorları gösterilmektedir.

Tablo A.85. Sentetik 22- iş istasyonlarına ait LMM iş yükü skorları

LMM/İş	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8	J9	J10
LMM-1	8	15	30	0	15	28	40	12	17	42
LMM-2	25	36	12	18	8	15	13	25	32	10
LMM-3	31	5	25	10	38	20	0	50	12	18

c) İş istasyonlarının mola yerine olan yürüme süreleri:

Aşağıdaki tabloda sentetik olarak üretilmiş senaryo-22 veri setindeki iş istasyonlarından mola yerlerine kadar olan yürüme süreleri gösterilmektedir.

Tablo A.86. Sentetik 22- iş istasyonlarından mola yerlerine kadar olan yürüme süreleri

Tj (min)	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	Tavg
Mola yeri	1,5	2	3,2	3	1,5	1,8	2,8	3,5	1,8	3	2,41
Fj:Tj/Tavg	0,62	0,83	1,33	1,24	0,62	0,75	1,16	1,45	0,75	1,24	

d) Modele göre iş rotasyonu sırasının belirlenmesi:

Aşağıdaki tabloda sentetik-22 verileriyle çalıştırılan modelin verdiği rotasyon sırası gösterilmektedir.

Tablo A.87. Sentetik 22- kümülatif iş yükünü önleyen iş rotasyon programı

İşçi / rotasyon periyodu	p1	p2	p3	p4
i1	8	7	2	5
i2	7	8	7	8
i3	10	4	5	2
i4	2	10	8	6
i5	9	3	4	3
i6	6	1	6	9
i7	4	5	9	10
i8	1	6	1	7
i9	5	2	10	1
i10	3	9	3	4

Rotasyondan önce ve rotasyondan sonra, LMM iş yükleri toplamı ve LMM iş yüklerinin dağılımı aşağıdaki tabloda gösterilmiştir. 10 işçi için işçilerin işe uyumlarını da dikkate alacak şekilde toplam iş yükünün %23 oranında düştüğü, iş yükleri arasındaki dağılımı

gösteren LMM iş yükleri arasındaki farkın ise %90 oranında düştüğü görülmektedir. Bu düşüş LMM iş yüklerinin işçiler arasında daha dengeli şekilde dağıtıldığının bir göstergesidir.

Tablo A.88. Sentetik 22- mevcut durum ve rotasyon sonrası iş yükü karşılaştırılması

İşçi	Mevcut	Rotasyon	Zi değişim		Mevcut Durumdaki LMM değerleri				Rotasyon sonrası LMM değerleri				LMM fark değişim
	Zi total	Zi total			LMM 1	LMM 2	LMM 3	Toplam	LMM 1	LMM 2	LMM 3	Toplam	
1. işçi	159,34	182,21	22,9	LMM: LMM Fark:	32 68	100 24	124 92	256 184	82 0	82 11	93 11	257 22	-88%
2. işçi	220,40	287,09	66,7	LMM: LMM Fark:	60 84	144 124	20 40	224 248	104 28	76 24	100 4	280 56	-77%
3. işçi	283,62	148,88	-134,7	LMM: LMM Fark:	120 72	48 52	100 20	268 144	72 0	72 1	71 1	215 2	-99%
4. işçi	69,71	180,73	111,0	LMM: LMM Fark:	0 72	72 32	40 40	112 144	97 11	86 7	93 4	276 22	-85%
5. işçi	110,39	162,53	52,1	LMM: LMM Fark:	60 28	32 120	152 92	244 240	77 3	74 2	72 5	223 10	-96%
6. işçi	111,44	113,34	1,9	LMM: LMM Fark:	112 52	60 20	80 32	252 104	81 6	87 4	83 2	251 12	-88%
7. işçi	303,76	173,88	-129,9	LMM: LMM Fark:	160 108	52 52	0 160	212 320	74 6	68 10	78 4	220 20	-94%
8. işçi	382,81	130,32	-252,5	LMM: LMM Fark:	48 52	100 100	200 152	348 304	84 6	78 4	82 2	244 12	-96%
9. işçi	171,03	132,82	-38,2	LMM: LMM Fark:	68 60	128 80	48 20	244 160	80 1	79 13	92 12	251 26	-84%
10. işçi	386,47	192,36	-194,1	LMM: LMM Fark:	168 128	40 32	72 96	280 256	77 3	74 2	72 5	223 10	-96%
ΣZ:	2199	1704,2											-90%
Z fark:	-494,8	-23%											

b) İş yükleri:

Aşağıdaki tabloda sentetik olarak üretilmiş senaryo-23 veri setindeki işlere ait LMM iş yükü skorları gösterilmektedir.

Tablo A.89. Sentetik 23- iş istasyonlarına ait LMM iş yükü skorları

LMM/İş	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8	J9	J10
LMM-1	10	25	8	32	18	26	25	15	28	10
LMM-2	18	18	28	30	12	8	18	20	30	12
LMM-3	28	8	12	8	25	30	32	18	20	9

c) İş istasyonlarının mola yerine olan yürüme süreleri:

Aşağıdaki tabloda sentetik olarak üretilmiş senaryo-23 veri setindeki iş istasyonlarından mola yerlerine kadar olan yürüme süreleri gösterilmektedir.

Tablo A.90. Sentetik 23- iş istasyonlarından mola yerlerine kadar olan yürüme süreleri

Tj (min)	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	Tavg
Mola yeri	1,2	2,0	1,8	2,4	0,9	1,0	2,7	3,0	4,0	3,2	2,22
Fj:Tj/Tavg	0,54	0,90	0,81	1,08	0,41	0,45	1,22	1,35	1,80	1,44	

d) Modele göre iş rotasyonu sırasının belirlenmesi:

Aşağıdaki tabloda sentetik-23 verileriyle çalıştırılan modelin verdiği rotasyon sırası gösterilmektedir.

Tablo A.91. Sentetik 23- kümülatif iş yükünü önleyen iş rotasyon programı

İşçi/ rotasyon periyodu	p1	p2	p3	p4
i1	9	6	9	6
i2	7	5	7	3
i3	8	4	8	5
i4	2	7	2	7
i5	1	2	1	2
i6	6	9	6	9
i7	5	8	4	8
i8	4	3	3	4
i9	10	1	10	1
i10	3	10	5	10

Rotasyondan önce ve rotasyondan sonra, LMM iş yükleri toplamı ve LMM iş yüklerinin dağılımı aşağıdaki tabloda gösterilmiştir. 10 işçi için işçilerin işe uyumlarını da dikkate alacak şekilde toplam iş yükünün %36 oranında düştüğü, iş yükleri arasındaki dağılımı

gösteren LMM iş yükleri arasındaki farkın ise %68 oranında düştüğü görülmektedir. Bu düşüş LMM iş yüklerinin işçiler arasında daha dengeli şekilde dağıtıldığının bir göstergesidir.

Tablo A.92. Sentetik 23- mevcut durum ve rotasyon sonrası iş yükü karşılaştırılması

İşçi	Mevcut	Rotasyon	Zi değişim		Mevcut Durumdaki LMM değerleri				Rotasyon sonrası LMM değerleri				LMM fark değişim
	Zi total	Zi total			LMM 1	LMM 2	LMM 3	Toplam	LMM 1	LMM 2	LMM 3	Toplam	
1.işçi	121,08	157,59	36,5	LMM: LMM Fark:	40 32	72 40	112 72	224 144	81 3	78 3	81 0	240 6	-96%
2.işçi	312,16	209,71	-102,4	LMM: LMM Fark:	100 28	72 40	32 68	204 136	73 11	84 10	94 21	251 42	-69%
3.işçi	124,98	204,61	79,6	LMM: LMM Fark:	32 80	112 64	48 16	192 160	93 1	92 21	71 22	256 44	-73%
4.işçi	204,97	182,31	-22,7	LMM: LMM Fark:	128 8	120 88	32 96	280 192	80 4	76 0	76 4	232 8	-96%
5.işçi	89,19	113,26	24,1	LMM: LMM Fark:	72 24	48 52	100 28	220 104	69 3	66 7	59 10	194 20	-81%
6.işçi	66,07	203,73	137,7	LMM: LMM Fark:	104 72	32 88	120 16	256 176	76 14	90 13	77 1	243 28	-84%
7.işçi	273,50	108,20	-165,3	LMM: LMM Fark:	100 28	72 56	128 28	300 112	93 21	72 6	66 27	231 54	-52%
8.işçi	217,00	94,77	-122,2	LMM: LMM Fark:	60 20	80 8	72 12	212 40	68 4	72 12	84 16	224 32	-20%
9.işçi	938,83	182,56	-756,3	LMM: LMM Fark:	112 8	120 40	80 32	312 80	77 1	78 1	77 0	232 2	-98%
10.işçi	116,65	122,79	6,1	LMM: LMM Fark:	40 8	48 12	36 4	124 24	78 10	68 7	75 3	221 20	-17%
ΣZ:	2464,4	1579,5											-68%
Z fark:	-884,9	-36%											

b) İş yükleri:

Aşağıdaki tabloda sentetik olarak üretilmiş senaryo-24 veri setindeki işlere ait LMM iş yükü skorları gösterilmektedir.

Tablo A.93. Sentetik 24- iş istasyonlarına ait LMM iş yükü skorları

LMM/İş	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8	J9	J10
LMM-1	50	15	18	30	8	18	12	21	21	19
LMM-2	35	10	20	8	20	20	26	15	15	25
LMM-3	12	35	12	25	10	32	9	10	30	27

c) İş istasyonlarının mola yerine olan yürüme süreleri:

Aşağıdaki tabloda sentetik olarak üretilmiş senaryo-24 veri setindeki iş istasyonlarından mola yerlerine kadar olan yürüme süreleri gösterilmektedir.

Tablo A.94. Sentetik 24- iş istasyonlarından mola yerlerine kadar olan yürüme süreleri

Tj (min)	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	Tavg
Mola yeri	3,2	2,1	1,4	2,5	3,5	1,9	3,9	4	1,8	2,5	2,68
Fj:Tj/Tavg	1,19	0,78	0,52	0,93	1,31	0,71	1,46	1,49	0,67	0,93	

d) Modele göre iş rotasyonu sırasının belirlenmesi:

Aşağıdaki tabloda sentetik-24 verileriyle çalıştırılan modelin verdiği rotasyon sırası gösterilmektedir.

Tablo A.95. Sentetik 24- kümülatif iş yükünü önleyen iş rotasyon programı

İşçi/ rotasyon periyodu	p1	p2	p3	p4
i1	4	5	10	3
i2	10	8	9	8
i3	9	7	2	1
i4	3	9	3	10
i5	2	1	6	5
i6	8	10	8	6
i7	5	4	5	9
i8	7	6	7	4
i9	1	2	1	2
i10	6	3	4	7

Rotasyondan önce ve rotasyondan sonra, LMM iş yükleri toplamı ve LMM iş yüklerinin dağılımı aşağıdaki tabloda gösterilmiştir. 10 işçi için işçilerin işe uyumlarını da dikkate alacak şekilde toplam iş yükünün %33 oranında düştüğü, iş yükleri arasındaki dağılımı

gösteren LMM iş yükleri arasındaki farkın ise %81 oranında düştüğü görülmektedir. Bu düşüş LMM iş yüklerinin işçiler arasında daha dengeli şekilde dağıtıldığının bir göstergesidir.

Tablo A.96. Sentetik 24- mevcut durum ve rotasyon sonrası iş yükü karşılaştırılması

İşçi	Mevcut	Rotasyon	Zi değişim		Mevcut Durumdaki LMM değerleri				Rotasyon sonrası LMM değerleri				LMM fark değişim
	Zi total	Zi total			LMM 1	LMM 2	LMM 3	Topla m	LMM 1	LMM 2	LMM 3	Topla m	
1.işçi	463,28	125,60	-337,7	LMM: LMM Fark:	200 60	140 92	48 152	388 304	75 2	73 1	74 1	222 4	-99%
2.işçi	188,06	163,35	-24,7	LMM: LMM Fark:	60 20	40 100	140 80	240 200	82 12	70 7	77 5	229 24	-88%
3.işçi	104,48	152,85	48,4	LMM: LMM Fark:	72 8	80 32	48 24	200 64	98 12	86 0	86 12	270 24	-63%
4.işçi	222,52	100,05	-122,5	LMM: LMM Fark:	120 88	32 68	100 20	252 176	76 4	80 1	81 5	237 10	-94%
5.işçi	122,28	155,55	33,3	LMM: LMM Fark:	32 48	80 40	40 8	152 96	91 6	85 4	89 2	265 12	-88%
6.işçi	140,66	172,35	31,7	LMM: LMM Fark:	72 8	80 48	128 56	280 112	79 4	75 4	79 0	233 8	-93%
7.işçi	225,54	145,43	-80,1	LMM: LMM Fark:	48 56	104 68	36 12	188 136	67 4	63 12	75 8	205 24	-82%
8.işçi	363,57	141,08	-222,5	LMM: LMM Fark:	84 24	60 20	40 44	184 88	72 8	80 5	75 3	227 16	-82%
9.işçi	138,68	179,32	40,6	LMM: LMM Fark:	84 24	60 60	120 36	264 120	130 40	90 4	94 36	314 80	-33%
10.işçi	229,06	142,17	-86,9	LMM: LMM Fark:	76 24	100 8	108 32	284 64	78 4	74 4	78 0	230 8	-88%
ΣZ:	2198,1	1477,8											-81%
Z fark:	-720,4	-33%											

b) İş yükleri:

Aşağıdaki tabloda sentetik olarak üretilmiş senaryo-25 veri setindeki işlere ait LMM iş yükü skorları gösterilmektedir.

Tablo A.97. Sentetik 25- iş istasyonlarına ait LMM iş yükü skorları

LMM/İş	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8	J9	J10
LMM-1	10	25	8	32	18	26	25	15	28	10
LMM-2	18	18	28	30	12	8	18	20	30	12
LMM-3	28	8	12	8	25	30	32	18	20	9

c) İş istasyonlarının mola yerine olan yürüme süreleri:

Aşağıdaki tabloda sentetik olarak üretilmiş senaryo-25 veri setindeki iş istasyonlarından mola yerlerine kadar olan yürüme süreleri gösterilmektedir.

Tablo A.98. Sentetik 25- iş istasyonlarından mola yerlerine kadar olan yürüme süreleri

T _j (min)	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	Tavg
Mola yeri	1,8	2,5	3,4	2	4	3,8	1,2	2,5	2	3,6	2,68
F _j :T _j /Tavg	0,67	0,93	1,27	0,75	1,49	1,42	0,45	0,93	0,75	1,34	

d) Modele göre iş rotasyonu sırasının belirlenmesi:

Aşağıdaki tabloda sentetik-25 verileriyle çalıştırılan modelin verdiği rotasyon sırası gösterilmektedir.

Tablo A.99. Sentetik 25- kümülatif iş yükünü önleyen iş rotasyon programı

işçi/ rotasyon periyodu	p1	p2	p3	p4
i1	2	10	7	10
i2	8	7	8	4
i3	1	4	10	7
i4	6	3	6	3
i5	4	1	2	5
i6	3	6	3	6
i7	10	9	5	9
i8	7	8	4	1
i9	5	2	1	2
i10	9	5	9	8

Rotasyondan önce ve rotasyondan sonra, LMM iş yükleri toplamı ve LMM iş yüklerinin dağılımı aşağıdaki tabloda gösterilmiştir. 10 işçi için işçilerin işe uyumlarını da dikkate alacak şekilde toplam iş yükünün %24 oranında düştüğü, iş yükleri arasındaki dağılımı

gösteren LMM iş yükleri arasındaki farkın ise %76 oranında düştüğü görülmektedir. Bu düşüş LMM iş yüklerinin işçiler arasında daha dengeli şekilde dağıtıldığının bir göstergesidir.

Tablo A.100. Sentetik 25- mevcut durum ve rotasyon sonrası iş yükü karşılaştırılması

İşçi	Mevcut	Rotasyo n	Zi değişim		Mevcut Durumdaki LMM değerleri				Rotasyon sonrası LMM değerleri				LMMfar k değişim
	Zi total	Zi total			LMM 1	LMM 2	LMM 3	Topla m	LMM 1	LMM 2	LMM 3	Topla m	
1.işçi	130,08	85,01	-45,1	LMM: LMM Fark:	40 32	72 40	112 72	224 144	70 10	60 2	58 12	188 24	-83%
2.işçi	190,30	134,30	-56,0	LMM: LMM Fark:	100 28	72 40	32 68	204 136	87 1	88 12	76 11	251 24	-82%
3.işçi	243,58	104,00	-139,6	LMM: LMM Fark:	32 80	112 64	48 16	192 160	77 1	78 1	77 0	232 2	-99%
4.işçi	166,54	168,39	1,8	LMM: LMM Fark:	128 8	120 88	32 96	280 192	68 4	72 12	84 16	224 32	-83%
5.işçi	202,27	134,88	-67,4	LMM: LMM Fark:	72 24	48 52	100 28	220 104	85 7	78 9	69 16	232 32	-69%
6.işçi	210,86	198,32	-12,5	LMM: LMM Fark:	104 72	32 88	120 16	256 176	68 4	72 12	84 16	224 32	-82%
7.işçi	90,96	151,42	60,5	LMM: LMM Fark:	100 28	72 56	128 28	300 112	84 0	84 10	74 10	242 20	-82%
8.işçi	170,99	118,06	-52,9	LMM: LMM Fark:	60 20	80 8	72 12	212 40	82 4	86 0	86 4	254 8	-80%
9.işçi	232,84	119,16	-113,7	LMM: LMM Fark:	112 8	120 40	80 32	312 80	78 12	66 3	69 9	213 24	-70%
10.işçi	166,57	152,77	-13,8	LMM: LMM Fark:	40 8	48 12	36 4	124 24	89 3	92 9	83 6	264 18	-25%
ΣZ: Z fark:	1805 -438,7	1366,3 -24%											-76%

b) İş yükleri:

Aşağıdaki tabloda sentetik olarak üretilmiş senaryo-26 veri setindeki işlere ait LMM iş yükü skorları gösterilmektedir.

Tablo A.101. Sentetik 26- iş istasyonlarına ait LMM iş yükü skorları

LMM/İş	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8	J9	J10
LMM-1	30	28	18	15	10	12	30	42	5	10
LMM-2	12	32	15	21	20	27	25	26	10	25
LMM-3	18	15	30	29	30	10	15	20	12	18

c) İş istasyonlarının mola yerine olan yürüme süreleri:

Aşağıdaki tabloda sentetik olarak üretilmiş senaryo-26 veri setindeki iş istasyonlarından mola yerlerine kadar olan yürüme süreleri gösterilmektedir.

Tablo A.102. Sentetik 26- iş istasyonlarından mola yerlerine kadar olan yürüme süreleri

T _j (min)	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	Tavg
Mola yeri	2	2,2	3,5	4,5	3,8	1,8	1,2	1,4	2,8	3,3	2,65
F _j :T _j /Tavg	0,75	0,83	1,32	1,70	1,43	0,68	0,45	0,53	1,06	1,25	

d) Modele göre iş rotasyonu sırasının belirlenmesi:

Aşağıdaki tabloda sentetik-26 verileriyle çalıştırılan modelin verdiği rotasyon sırası gösterilmektedir.

Tablo A.103. Sentetik 26- Kümülatif iş yükünü önleyen iş rotasyon programı

İşçi/ rotasyon periyodu	p1	p2	p3	p4
i1	7	4	7	4
i2	2	3	10	1
i3	8	5	2	5
i4	3	7	9	2
i5	10	9	8	9
i6	6	1	6	3
i7	1	10	5	7
i8	9	6	1	10
i9	5	8	3	6
i10	4	2	4	8

Rotasyondan önce ve rotasyondan sonra, LMM iş yükleri toplamı ve LMM iş yüklerinin dağılımı aşağıdaki tabloda gösterilmiştir. 10 işçi için işçilerin işe uyumlarını da dikkate alacak şekilde toplam iş yükünün %27 oranında düştüğü, iş yükleri arasındaki dağılımı

gösteren LMM iş yükleri arasındaki farkın ise %86 oranında düştüğü görülmektedir. Bu düşüş LMM iş yüklerinin işçiler arasında daha dengeli şekilde dağıtıldığının bir göstergesidir.

Tablo A.104. Sentetik 26- mevcut durum ve rotasyon sonrası iş yükü karşılaştırılması

İşçi	Mevcut	Rotasyon	Zi değişim		Mevcut Durumdaki LMM değerleri				Rotasyon sonraksı LMM değerleri				LMMfar k değişim
	Zi total	Zi total			LMM 1	LMM 2	LMM 3	Topla m	LMM 1	LMM 2	LMM 3	Topla m	
1.işçi	156,61	162,41	5,8	LMM: LMM Fark:	120 72	48 24	72 48	240 144	90 2	92 4	88 2	270 8	-94%
2.işçi	249,06	183,34	-65,7	LMM: LMM Fark:	112 16	128 68	60 52	300 136	86 2	84 3	81 5	251 10	-93%
3.işçi	332,83	155,91	-176,9	LMM: LMM Fark:	72 12	60 60	120 48	252 120	90 8	98 3	95 5	283 16	-87%
4.işçi	336,74	126,32	-210,4	LMM: LMM Fark:	60 24	84 32	116 56	260 112	81 1	82 10	72 9	235 20	-82%
5.işçi	297,56	119,28	-178,3	LMM: LMM Fark:	40 40	80 40	120 80	240 160	62 9	71 9	62 0	195 18	-89%
6.işçi	77,34	112,31	35,0	LMM: LMM Fark:	48 60	108 68	40 8	196 136	72 9	81 13	68 4	221 26	-81%
7.işçi	89,84	150,49	60,6	LMM: LMM Fark:	120 20	100 40	60 60	280 120	80 2	82 1	81 1	243 4	-97%
8.işçi	153,31	116,30	-37,0	LMM: LMM Fark:	168 64	104 24	80 88	352 176	57 17	74 16	58 1	189 34	-81%
9.işçi	114,11	133,94	19,8	LMM: LMM Fark:	20 20	40 8	48 28	108 56	82 6	88 2	90 8	260 16	-71%
10.işçi	179,99	188,81	8,8	LMM: LMM Fark:	40 60	100 28	72 32	212 120	100 0	100 7	93 7	293 14	-88%
ΣZ: Z fark:	1987,4 -538,3	1449,1 -27%											-86%

Senaryo-27

a) İşçilerin boy, yaş, deneyim, yetenek ve sağlık kriterlerine göre değerlendirilmesi:

Aşağıda sentetik olarak üretilmiş senaryo-27 veri setine ait işçilerin (a) boy, (b) yaş, (c) deneyim, (d) yetenek, (e) sağlık kriterlerinin değerlendirme tabloları ve kriterlerin ağırlıkları ile elde edilmiş (f) uygunluk matrisi gösterilmektedir.

M_{ij}^b	W/Job	j ₁	j ₂	j ₃	j ₄	j ₅	j ₆	j ₇	j ₈	j ₉	j ₁₀
i1		1	1	2	1	2	2	1	2	1	1
i2		2	1	2	1	1	0	1	1	1	1
i3		1	1	1	1	2	1	2	2	1	2
i4		1	0	1	1	2	2	2	2	1	1
i5		1	2	1	1	1	1	2	1	1	1
i6		1	1	1	2	2	1	1	2	2	1
i7		2	2	1	1	2	2	1	1	1	1
i8		2	1	2	1	1	1	2	1	1	1
i9		1	1	1	2	2	1	1	1	2	1
i10		1	1	2	2	1	1	1	1	1	1

(a) Boy

M_{ij}^y	W/Job	j ₁	j ₂	j ₃	j ₄	j ₅	j ₆	j ₇	j ₈	j ₉	j ₁₀
i1		2	2	1	2	1	1	2	1	1	2
i2		1	1	1	1	2	2	1	1	0	1
i3		1	2	1	2	1	2	2	2	1	2
i4		2	2	2	1	1	1	1	2	1	1
i5		2	2	1	1	1	0	2	1	2	2
i6		2	1	2	1	2	2	1	2	1	1
i7		1	2	1	2	2	1	1	1	1	2
i8		2	1	2	1	1	2	1	2	2	1
i9		0	1	1	2	2	1	1	1	1	2
i10		2	1	2	1	1	2	2	1	1	1

(b) Yaş

M_{ij}^d	W/Job	j ₁	j ₂	j ₃	j ₄	j ₅	j ₆	j ₇	j ₈	j ₉	j ₁₀
i1		2	1	1	2	1	2	1	2	2	1
i2		1	1	1	1	1	2	2	1	1	1
i3		2	1	1	1	2	2	1	2	1	1
i4		1	1	2	1	1	1	0	1	1	2
i5		2	1	1	2	1	1	2	2	1	2
i6		2	1	1	2	1	1	2	1	2	1
i7		1	2	0	1	2	1	1	1	1	1
i8		2	2	2	2	1	2	2	1	1	1
i9		1	1	1	1	2	1	1	2	1	1
i10		1	1	2	2	2	1	2	1	0	1

(c) Deneyim

M_{ij}^e	W/Job	j ₁	j ₂	j ₃	j ₄	j ₅	j ₆	j ₇	j ₈	j ₉	j ₁₀
i1		2	1	1	2	1	2	1	2	2	1
i2		1	1	1	1	1	2	2	1	1	1
i3		2	1	1	1	2	2	1	2	1	1
i4		1	1	2	1	1	1	0	1	1	2
i5		2	1	1	2	1	1	2	2	1	2
i6		2	1	1	2	1	1	2	1	2	1
i7		1	2	0	1	2	1	1	1	1	1
i8		2	2	2	2	1	2	2	1	1	1
i9		1	1	1	1	2	1	1	2	1	1
i10		1	1	2	2	2	1	2	1	0	1

(d) Yetenek

M_{ij}^s	W/Job	j ₁	j ₂	j ₃	j ₄	j ₅	j ₆	j ₇	j ₈	j ₉	j ₁₀
i1		2	2	1	2	1	1	2	1	1	2
i2		1	0	1	1	2	1	1	1	1	2
i3		1	2	1	2	1	2	2	2	1	1
i4		1	2	2	1	1	2	1	2	1	1
i5		1	2	1	1	1	1	2	1	2	1
i6		2	1	2	1	2	1	1	1	1	1
i7		1	2	1	2	2	2	1	1	1	0
i8		2	1	2	2	1	1	1	2	2	1
i9		0	1	1	2	2	2	1	1	1	1
i10		2	1	2	1	1	1	1	1	1	1

(e) Sağlık

M_{ij}	W/Job	j ₁	j ₂	j ₃	j ₄	j ₅	j ₆	j ₇	j ₈	j ₉	j ₁₀
i1		1,9	1,5	1,1	1,9	1,1	1,5	1,5	1,5	1,4	1,5
i2		1,1	0,5	1,1	1,0	1,5	1,4	1,4	1,0	0,9	1,5
i3		1,4	1,5	1,0	1,5	1,5	1,9	1,6	2,0	1,0	1,1
i4		1,1	1,5	1,9	1,0	1,1	1,5	0,6	1,6	1,0	1,4
i5		1,5	1,6	1,0	1,4	1,0	0,9	2,0	1,4	1,5	1,5
i6		1,9	1,0	1,5	1,5	1,6	1,1	1,4	1,1	1,5	1,0
i7		1,1	2,0	0,6	1,5	2,0	1,5	1,0	1,0	1,0	0,6
i8		2,0	1,4	2,0	1,9	1,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,0
i9		0,5	1,0	1,0	1,6	2,0	1,5	1,0	1,4	1,1	1,1
i10		1,5	1,0	2,0	1,5	1,4	1,1	1,5	1,0	0,6	1,0

(f) Uygunluk Matrisi

Şekil A.27. Sentetik 27- işçilerin boy, yaş, deneyim, yetenek, sağlık kriterine göre işlere uygunluk matrisleri (M_{ij}^b , M_{ij}^y , M_{ij}^d , M_{ij}^e , M_{ij}^s)

b) İş yükleri:

Aşağıdaki tabloda sentetik olarak üretilmiş senaryo-27 veri setindeki işlere ait LMM iş yükü skorları gösterilmektedir.

Tablo A.105. Sentetik 27- iş istasyonlarına ait LMM iş yükü skorları

LMM/iş	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8	J9	J10
LMM-1	33	8	28	7	20	10	16	18	38	26
LMM-2	18	13	10	16	40	5	20	11	24	10
LMM-3	16	20	0	20	15	8	9	40	7	10

c) İş istasyonlarının mola yerine olan yürüme süreleri:

Aşağıdaki tabloda sentetik olarak üretilmiş senaryo-27 veri setindeki iş istasyonlarından mola yerlerine kadar olan yürüme süreleri gösterilmektedir.

Tablo A.106. Sentetik 27- iş istasyonlarından mola yerlerine kadar olan yürüme süreleri

Tj (min)	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	Tavg
Mola yeri	3	1,7	2,3	2,5	3,5	3,3	2,7	3,8	4	1,9	2,87
Fj:Tj/Tavg	1,05	0,59	0,80	0,87	1,22	1,15	0,94	1,32	1,39	0,66	

d) Modele göre iş rotasyonu sırasının belirlenmesi:

Aşağıdaki tabloda sentetik-27 verileriyle çalıştırılan modelin verdiği rotasyon sırası gösterilmektedir.

Tablo A.107. Sentetik 27- kümülatif iş yükünü önleyen iş rotasyon programı

İşçi/ rotasyon periodu	p1	p2	p3	p4
i1	4	1	4	1
i2	5	10	7	10
i3	7	8	10	5
i4	10	6	6	3
i5	8	7	9	7
i6	1	5	1	2
i7	2	9	2	6
i8	9	4	8	9
i9	6	3	5	8
i10	3	2	3	4

Rotasyondan önce ve rotasyondan sonra, LMM iş yükleri toplamı ve LMM iş yüklerinin dağılımı aşağıdaki tabloda gösterilmiştir. 10 işçi için işçilerin işe uyumlarını da dikkate alacak şekilde toplam iş yükünün %29 oranında düştüğü, iş yükleri arasındaki dağılımı

gösteren LMM iş yükleri arasındaki farkın ise %53 oranında düştüğü görülmektedir. Bu düşüş LMM iş yüklerinin işçiler arasında daha dengeli şekilde dağıtıldığının bir göstergesidir.

Tablo A.108. Sentetik 27- mevcut durum ve rotasyon sonrası iş yükü karşılaştırılması

İşçi	Mevcut Zi total	Rotasyon Zi total	Zi değişim		Mevcut Durumdaki LMM değerleri				Rotasyon sonrası LMM değerleri				LMM fark değişim
					LMM 1	LMM 2	LMM 3	Topla m	LMM 1	LMM 2	LMM 3	Topla m	
1.işçi	144,14	110,61	-33,5	LMM: LMM Fark:	132 60	72 8	64 68	268 136	80 12	68 4	72 8	220 24	-82%
2.işçi	182,17	131,21	-51,0	LMM: LMM Fark:	32 20	52 28	80 48	164 96	88 8	80 36	44 44	212 88	-8%
3.işçi	121,81	161,79	40,0	LMM: LMM Fark:	112 72	40 40	0 112	152 224	80 1	81 7	74 6	235 14	-94%
4.işçi	149,83	71,97	-77,9	LMM: LMM Fark:	28 36	64 16	80 52	172 104	74 44	30 4	26 48	130 96	-8%
5.işçi	365,85	169,83	-196,0	LMM: LMM Fark:	80 80	160 100	60 20	300 200	88 13	75 10	65 23	228 46	-77%
6.işçi	99,28	153,92	54,6	LMM: LMM Fark:	40 20	20 12	32 8	92 40	94 5	89 22	67 27	250 54	35%
7.işçi	169,34	137,82	-31,5	LMM: LMM Fark:	64 16	80 44	36 28	180 88	64 9	55 0	55 9	174 18	-80%
8.işçi	238,49	205,09	-33,4	LMM: LMM Fark:	72 28	44 116	160 88	276 232	101 26	75 1	74 27	250 54	-77%
9.işçi	364,12	158,95	-205,2	LMM: LMM Fark:	152 56	96 68	28 124	276 248	76 10	66 3	63 13	205 26	-90%
10.işçi	121,81	80,26	-41,6	LMM: LMM Fark:	104 64	40 0	40 64	184 128	71 22	49 9	40 31	160 62	-52%
ΣZ: Z fark:	1956,8 -575,4	1381,5 -29%											-53%

b) İş yükleri:

Aşağıdaki tabloda sentetik olarak üretilmiş senaryo-28 veri setindeki işlere ait LMM iş yükü skorları gösterilmektedir.

Tablo A.109. Sentetik 28- iş istasyonlarına ait LMM iş yükü skorları

LMM/İş	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8	J9	J10
LMM-1	45	32	8	20	12	35	8	30	5	16
LMM-2	8	26	22	34	26	5	30	6	17	21
LMM-3	17	8	30	16	9	24	34	25	20	8

c) İş istasyonlarının mola yerine olan yürüme süreleri:

Aşağıdaki tabloda sentetik olarak üretilmiş senaryo-28 veri setindeki iş istasyonlarından mola yerlerine kadar olan yürüme süreleri gösterilmektedir.

Tablo A.110. Sentetik 28- iş istasyonlarından mola yerlerine kadar olan yürüme süreleri

T _j (min)	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	Tavg
Mola yeri	3,2	3	3,5	2,5	2,2	3,6	4,2	3	1,5	3,7	3,04
F _j :T _j /Tavg	1,05	0,99	1,15	0,82	0,72	1,18	1,38	0,99	0,49	1,22	

d) Modele göre iş rotasyonu sırasının belirlenmesi:

Aşağıdaki tabloda sentetik-28 verileriyle çalıştırılan modelin verdiği rotasyon sırası gösterilmektedir.

Tablo A.111. Sentetik 28- kümülatif iş yükünü önleyen iş rotasyon programı

İşçi/ rotasyon periyodu	p1	p2	p3	p4
i1	7	10	10	6
i2	5	1	5	3
i3	9	5	6	5
i4	3	2	3	1
i5	8	4	8	4
i6	10	6	7	10
i7	4	8	4	8
i8	1	7	9	2
i9	6	9	2	9
i10	2	3	1	7

Rotasyondan önce ve rotasyondan sonra, LMM iş yükleri toplamı ve LMM iş yüklerinin dağılımı aşağıdaki tabloda gösterilmiştir. 10 işçi için işçilerin işe uyumlarını da dikkate alacak şekilde toplam iş yükünün %21 oranında düştüğü, iş yükleri arasındaki dağılımı

gösteren LMM iş yükleri arasındaki farkın ise %85 oranında düştüğü görülmektedir. Bu düşüş LMM iş yüklerinin işçiler arasında daha dengeli şekilde dağıtıldığının bir göstergesidir.

Tablo A.112. Sentetik 28- mevcut durum ve rotasyon sonrası iş yükü karşılaştırılması

İşçi	Mevcut Zi total	Rotasyon Zi total	Zi değişim		Mevcut Durumdaki LMM değerleri				Rotasyon sonrası LMM değerleri				LMMfar k değişim
					LMM 1	LMM 2	LMM 3	Topla m	LMM 1	LMM 2	LMM 3	Topla m	
1. işçi	223,25	150,93	-72,3	LMM: LMM Fark:	180 148	32 36	68 112	280 296	75 2	77 3	74 1	226 6	-98%
2. işçi	225,26	145,47	-79,8	LMM: LMM Fark:	128 24	104 72	32 96	264 192	77 5	82 17	65 12	224 34	-82%
3. işçi	188,39	108,95	-79,4	LMM: LMM Fark:	32 56	88 32	120 88	240 176	64 10	74 12	62 2	200 24	-86%
4. işçi	199,09	174,87	-24,2	LMM: LMM Fark:	80 56	136 72	64 16	280 144	93 15	78 7	85 8	256 30	-79%
5. işçi	227,21	117,76	-109,4	LMM: LMM Fark:	48 56	104 68	36 12	188 136	100 20	80 2	82 18	262 40	-71%
6. işçi	156,72	175,14	18,4	LMM: LMM Fark:	140 120	20 76	96 44	256 240	75 2	77 3	74 1	226 6	-98%
7. işçi	259,67	160,37	-99,3	LMM: LMM Fark:	32 88	120 16	136 104	288 208	100 20	80 2	82 18	262 40	-81%
8. işçi	225,98	153,71	-72,3	LMM: LMM Fark:	120 96	24 76	100 20	244 192	90 9	81 2	79 11	250 22	-89%
9. işçi	42,65	106,57	63,9	LMM: LMM Fark:	20 48	68 12	80 60	168 120	77 12	65 7	72 5	214 24	-80%
10. işçi	134,96	188,08	53,1	LMM: LMM Fark:	64 20	84 52	32 32	180 104	93 7	86 3	89 4	268 14	-87%
ΣZ: Z fark:	1883,2 -401,3	1481,9 -21%											-85%

Senaryo-29

a) İşçilerin boy, yaş, deneyim, yetenek ve sağlık kriterlerine göre değerlendirilmesi:

Aşağıda sentetik olarak üretilmiş senaryo-29 veri setine ait işçilerin (a) boy, (b) yaş, (c) deneyim, (d) yetenek, (e) sağlık kriterlerinin değerlendirme tabloları ve kriterlerin ağırlıkları ile elde edilmiş (f) uygunluk matrisi gösterilmektedir.

M_{ij}^b	W/Job	j ₁	j ₂	j ₃	j ₄	j ₅	j ₆	j ₇	j ₈	j ₉	j ₁₀
i1		1	2	1	2	1	2	1	1	1	2
i2		2	1	1	2	2	2	2	2	2	1
i3		1	1	2	1	1	1	0	1	1	1
i4		1	1	1	2	1	2	1	2	2	1
i5		1	2	1	2	2	1	2	1	1	2
i6		2	1	2	1	1	2	1	2	1	1
i7		2	2	1	2	2	1	1	2	2	2
i8		1	2	1	1	2	1	2	1	1	2
i9		1	1	2	1	2	1	1	1	1	1
i10		1	1	2	2	1	1	1	2	2	1

(a) Boy

M_{ij}^y	W/Job	j ₁	j ₂	j ₃	j ₄	j ₅	j ₆	j ₇	j ₈	j ₉	j ₁₀
i1		2	2	2	2	1	1	2	1	2	1
i2		1	1	1	1	1	2	2	1	1	2
i3		2	1	1	1	2	1	1	1	2	2
i4		1	1	2	1	1	2	1	1	2	1
i5		2	1	2	1	2	2	1	2	1	2
i6		2	1	1	1	1	1	2	1	2	2
i7		2	2	2	2	1	1	2	1	1	2
i8		1	2	1	2	1	2	1	2	1	1
i9		1	1	2	1	2	1	1	1	1	2
i10		2	2	1	1	2	1	1	2	1	1

(b) Yaş

M_{ij}^d	W/Job	j ₁	j ₂	j ₃	j ₄	j ₅	j ₆	j ₇	j ₈	j ₉	j ₁₀
i1		2	1	1	1	2	2	1	1	1	2
i2		2	1	2	2	1	1	2	2	2	1
i3		1	1	1	2	2	1	1	1	2	1
i4		1	2	1	1	1	2	2	1	1	1
i5		2	2	1	2	1	1	1	2	2	2
i6		0	1	1	1	2	1	2	1	1	1
i7		2	1	2	1	1	2	1	1	2	2
i8		1	2	1	2	1	2	2	1	2	1
i9		2	1	2	1	2	1	1	1	1	1
i10		1	2	1	2	1	1	2	2	2	1

(c) Deneyim

M_{ij}^e	W/Job	j ₁	j ₂	j ₃	j ₄	j ₅	j ₆	j ₇	j ₈	j ₉	j ₁₀
i1		1	2	1	1	1	2	1	2	2	1
i2		1	1	2	1	1	1	2	2	2	1
i3		1	2	1	2	2	2	1	1	1	1
i4		1	1	2	1	1	1	0	1	2	2
i5		2	2	1	1	1	2	2	1	1	2
i6		2	2	1	2	2	1	2	1	2	1
i7		1	1	2	2	0	1	1	1	1	1
i8		2	2	2	2	1	1	2	1	1	1
i9		2	1	1	1	1	2	1	2	1	1
i10		1	1	2	2	1	1	2	1	2	1

(d) Yetenek

M_{ij}^s	W/Job	j ₁	j ₂	j ₃	j ₄	j ₅	j ₆	j ₇	j ₈	j ₉	j ₁₀
i1		1	1	2	1	2	2	1	1	1	1
i2		1	1	1	2	1	1	1	1	2	1
i3		2	1	1	1	1	1	2	1	1	2
i4		2	0	1	1	2	2	1	1	2	1
i5		1	1	2	1	1	1	2	2	1	1
i6		2	1	1	2	1	1	1	1	2	1
i7		1	2	2	1	2	2	1	2	1	2
i8		1	2	1	1	1	1	2	1	2	1
i9		1	1	2	1	1	0	1	2	1	1
i10		1	1	2	2	1	1	1	1	1	1

(e) Sağlık

M_{ij}	W/Job	j ₁	j ₂	j ₃	j ₄	j ₅	j ₆	j ₇	j ₈	j ₉	j ₁₀
i1		1,2	1,4	1,5	1,1	1,6	1,9	1,1	1,3	1,3	1,2
i2		1,2	1,0	1,4	1,7	1,1	1,1	1,5	1,5	1,9	1,1
i3		1,5	1,3	1,1	1,4	1,5	1,3	1,4	1,0	1,2	1,5
i4		1,5	0,7	1,3	1,1	1,5	1,7	0,9	1,1	1,8	1,3
i5		1,5	1,5	1,5	1,2	1,1	1,3	1,8	1,7	1,2	1,5
i6		1,7	1,3	1,1	1,7	1,4	1,1	1,5	1,1	1,8	1,1
i7		1,3	1,6	1,9	1,4	1,3	1,6	1,1	1,5	1,2	1,7
i8		1,3	2,0	1,3	1,5	1,1	1,2	1,9	1,1	1,6	1,1
i9		1,4	1,0	1,7	1,0	1,3	0,8	1,0	1,7	1,0	1,1
i10		1,1	1,2	1,8	1,9	1,1	1,0	1,4	1,3	1,5	1,0

(f) Uygunluk Matrisi

Şekil A.29. Sentetik 29- işçilerin boy, yaş, deneyim, yetenek, sağlık kriterine göre işlere uygunluk matrisleri (M_{ij}^b , M_{ij}^y , M_{ij}^d , M_{ij}^e , M_{ij}^s)

b) İş yükleri:

Aşağıdaki tabloda sentetik olarak üretilmiş senaryo-29 veri setindeki işlere ait LMM iş yükü skorları gösterilmektedir.

Tablo A.113. Sentetik 29- iş istasyonlarına ait LMM iş yükü skorları

LMM/İş	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8	J9	J10
LMM-1	28	0	40	28	15	8	25	35	20	15
LMM-2	30	15	18	9	21	20	12	8	30	40
LMM-3	38	12	32	30	5	18	38	18	6	20

c) İş istasyonlarının mola yerine olan yürüme süreleri:

Aşağıdaki tabloda sentetik olarak üretilmiş senaryo-29 veri setindeki iş istasyonlarından mola yerlerine kadar olan yürüme süreleri gösterilmektedir.

Tablo A.114. Sentetik 29- iş istasyonlarından mola yerlerine kadar olan yürüme süreleri

Tj (min)	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	Tavg
Mola yeri	1,6	3	2,5	1,8	2	3,5	2,9	2,3	2,8	2,2	2,46
Fj:Tj/Tavg	0,65	1,22	1,02	0,73	0,81	1,42	1,18	0,93	1,14	0,89	

d) Modele göre iş rotasyonu sırasının belirlenmesi:

Aşağıdaki tabloda sentetik-29 verileriyle çalıştırılan modelin verdiği rotasyon sırası gösterilmektedir.

Tablo A.115. Sentetik 29- kümülatif iş yükünü önleyen iş rotasyon programı

İşçi/ rotasyon periyodu	p1	p2	p3	p4
i1	1	6	8	6
i2	7	9	7	9
i3	4	5	4	10
i4	6	1	6	8
i5	5	8	2	1
i6	10	4	5	4
i7	2	3	10	3
i8	9	7	9	7
i9	8	2	1	5
i10	3	10	3	2

Rotasyondan önce ve rotasyondan sonra, LMM iş yükleri toplamı ve LMM iş yüklerinin dağılımı aşağıdaki tabloda gösterilmiştir. 10 işçi için işçilerin işe uyumlarını da dikkate

alacak şekilde toplam iş yükünün %31 oranında düştüğü, iş yükleri arasındaki dağılımı gösteren LMM iş yükleri arasındaki farkın ise %89 oranında düştüğü görülmektedir. Bu düşüş LMM iş yüklerinin işçiler arasında daha dengeli şekilde dağıtıldığının bir göstergesidir.

Tablo A.116. Sentetik 29- mevcut durum ve rotasyon sonrası iş yükü karşılaştırılması

İşçi	Mevcut	Rotasyon	Zi değişim		Mevcut Durumdaki LMM değerleri				Rotasyon sonrası LMM değerleri				LMM fark değişim
	Zi total	Zi total			LMM 1	LMM 2	LMM 3	Topla m	LMM 1	LMM 2	LMM 3	Topla m	
1. işçi	204,36	164,21	-40,2	LMM: LMM Fark:	112 8	120 32	152 40	384 80	79 1	78 14	92 13	249 28	-65%
2. işçi	131,71	181,23	49,5	LMM: LMM Fark:	0 60	60 12	48 48	108 120	90 6	84 4	88 2	262 12	-90%
3. işçi	346,31	135,82	-210,5	LMM: LMM Fark:	160 88	72 56	128 32	360 176	86 7	79 6	85 1	250 14	-92%
4. işçi	185,62	171,55	-14,1	LMM: LMM Fark:	112 76	36 84	120 8	268 168	79 1	78 14	92 13	249 28	-83%
5. işçi	118,84	128,19	9,4	LMM: LMM Fark:	60 24	84 64	20 40	164 128	78 4	74 1	73 5	225 10	-92%
6. işçi	247,80	143,52	-104,3	LMM: LMM Fark:	32 48	80 8	72 40	184 96	86 7	79 6	85 1	250 14	-85%
7. işçi	331,90	153,27	-178,6	LMM: LMM Fark:	100 52	48 104	152 52	300 208	95 4	91 5	96 1	282 10	-95%
8. işçi	214,10	169,94	-44,2	LMM: LMM Fark:	140 108	32 40	72 68	244 216	90 6	84 4	88 2	262 12	-94%
9. işçi	254,96	136,37	-118,6	LMM: LMM Fark:	80 40	120 96	24 56	224 192	78 4	74 1	73 5	225 10	-95%
10. işçi	268,29	196,91	-71,4	LMM: LMM Fark:	60 100	160 80	80 20	300 200	95 4	91 5	96 1	282 10	-95%
ΣZ:	2303,9	1581,0											-89%
Z fark:	-722,9	-31%											

b) İş yükleri:

Aşağıdaki tabloda sentetik olarak üretilmiş senaryo-30 veri setindeki işlere ait LMM iş yükü skorları gösterilmektedir.

Tablo A.117. Sentetik 30- iş istasyonlarına ait LMM iş yükü skorları

LMM/iş	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J7	J8	J9	J10
LMM-1	26	10	15	12	50	15	20	15	25	8
LMM-2	8	28	21	25	20	35	8	20	30	10
LMM-3	12	12	38	0	15	10	15	42	8	30

c) İş istasyonlarının mola yerine olan yürüme süreleri:

Aşağıdaki tabloda sentetik olarak üretilmiş senaryo-30 veri setindeki iş istasyonlarından mola yerlerine kadar olan yürüme süreleri gösterilmektedir.

Tablo A.118. Sentetik 30- iş istasyonlarından mola yerlerine kadar olan yürüme süreleri

Tj (min)	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	Tavg
Mola yeri	1,2	1,8	3	2,8	1,9	3,5	2,6	1,8	2,5	1,2	2,23
Fj:Tj/Tavg	0,54	0,81	1,35	1,26	0,85	1,57	1,17	0,81	1,12	0,54	

d) Modele göre iş rotasyonu sırasının belirlenmesi:

Aşağıdaki tabloda sentetik-30 verileriyle çalıştırılan modelin verdiği rotasyon sırası gösterilmektedir.

Tablo A.119. Sentetik 30- kümülatif iş yükünü önleyen iş rotasyon programı

İşçi/ rotasyon periyodu	p1	p2	p3	p4
i1	9	10	9	10
i2	7	3	1	6
i3	6	8	6	5
i4	2	1	10	4
i5	8	9	7	9
i6	1	6	3	1
i7	4	7	2	7
i8	3	4	5	3
i9	5	2	8	2
i10	10	5	4	8

Rotasyondan önce ve rotasyondan sonra, LMM iş yükleri toplamı ve LMM iş yüklerinin dağılımı aşağıdaki tabloda gösterilmiştir. 10 işçi için işçilerin işe uyumlarını da dikkate

alacak şekilde toplam iş yükünün %31 oranında düştüğü, iş yükleri arasındaki dağılımı gösteren LMM iş yükleri arasındaki farkın ise %83 oranında düştüğü görülmektedir. Bu düşüş LMM iş yüklerinin işçiler arasında daha dengeli şekilde dağıtıldığının bir göstergesidir.

Tablo A.120. Sentetik 30- mevcut durum ve rotasyon sonrası iş yükü karşılaştırılması

İşçi	Mevcut	Rotasyon	Zi değişim		Mevcut Durumdaki LMM değerleri				Rotasyon sonrası LMM değerleri				LMM fark değişim
	Zi total	Zi total			LMM 1	LMM 2	LMM 3	Toplam	LMM 1	LMM 2	LMM 3	Toplam	
1. işçi	99,01	115,04	16,0	LMM: LMM Fark:	104 72	32 16	48 56	184 144	66 14	80 4	76 10	222 28	-81%
2. işçi	161,43	162,49	1,1	LMM: LMM Fark:	40 72	112 64	48 8	200 144	76 4	72 3	75 1	223 8	-94%
3. işçi	289,25	175,50	-113,8	LMM: LMM Fark:	60 24	84 68	152 92	296 184	95 15	110 33	77 18	282 66	-64%
4. işçi	121,20	91,01	-30,2	LMM: LMM Fark:	48 52	100 100	0 48	148 200	56 15	71 17	54 2	181 34	-83%
5. işçi	274,21	153,34	-120,9	LMM: LMM Fark:	200 120	80 20	60 140	340 280	85 3	88 15	73 12	246 30	-89%
6. işçi	223,04	143,07	-80,0	LMM: LMM Fark:	60 80	140 100	40 20	240 200	82 10	72 0	72 10	226 20	-90%
7. işçi	108,79	110,53	1,7	LMM: LMM Fark:	80 48	32 28	60 20	172 96	62 7	69 27	42 20	173 54	-44%
8. işçi	176,16	217,41	41,2	LMM: LMM Fark:	60 20	80 88	168 108	308 216	92 5	87 4	91 1	270 10	-95%
9. işçi	265,13	135,99	-129,1	LMM: LMM Fark:	100 20	120 88	32 68	252 176	85 11	96 15	81 4	262 30	-83%
10. işçi	67,43	128,74	61,3	LMM: LMM Fark:	32 8	40 80	120 88	192 176	85 10	75 12	87 2	247 24	-86%
ΣZ: Z fark:	1785,7 -352,5	1433,1 -20%											-81%

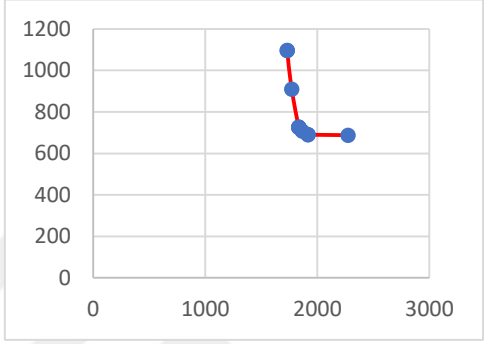
Ek-B

Amaç Fonksiyonunda Katsayıların Değerlendirilmesi

Senaryo-2 Katsayıları

Tablo B.1. Amaç fonksiyonundaki katsayıların değerlendirilmesi (Sentetik-2)

		x ekseni			y ekseni		
x	*	A	+	y	*	B	= Zamaç
0	*	2273	+	1		688	= 688
0,1	*	1915	+	0,9	*	690	= 813
0,2	*	1915	+	0,8	*	690	= 935
0,3	*	1865	+	0,7	*	708	= 1055
0,4	*	1834	+	0,6	*	726	= 1169
0,5	*	1834	+	0,5	*	726	= 1280
0,6	*	1834	+	0,4	*	726	= 1391
0,7	*	1834	+	0,3	*	726	= 1502
0,8	*	1770	+	0,2	*	910	= 1598
0,9	*	1731	+	0,1	*	1096	= 1674
1	*	1731	+	0	*	1096	= 1731



Tablo B.1’de 2.sentetik veri kümesi için x ve y katsayıları 0,1 aralıklı olacak şekilde çözülmüş sonuçları yer almaktadır. Elde edilen grafiğe göre; minimizasyon olan amaç fonksiyonuna göre grafik eğrisi azalan yöndedir. Eşitliklerde yer alan A’nın (Toplam iş yükü miktarı) katsayısı arttıkça A tarafının minimizasyonuna daha çok önem verildiği; B’nin (LMM iş yükleri arasındaki fark) katsayısı arttıkça B tarafının minimizasyonunu daha çok önem verildiği elde edilen sonuçlarla da görülmektedir. Ayrıca; grafikte 11 denemede 6 farklı sonuç elde edildiği diğer durumlarda sonuçların değişmediği görülmüştür.

x=0,1..0,2 ile y=0,9..0,8 iken sonuç değişmemek,

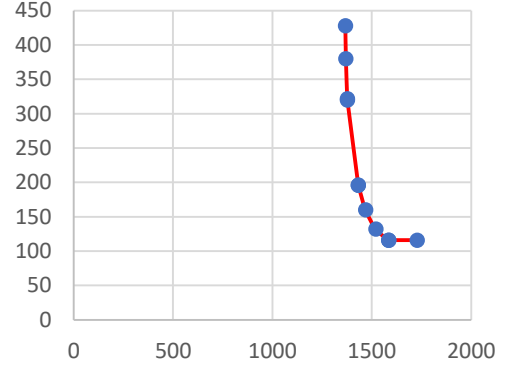
x=0,3..0,7 ile y=0,7..0,3 iken sonuç değişmemekte,

x=0,9..1 ile y=0,1..0 iken sonuç değişmemektedir.

Senaryo-3 Katsayıları

Tablo B.2. Amaç fonksiyonundaki katsayıların değerlendirilmesi (Sentetik-3)

		x ekseni				y ekseni		
x	*	A	+	y	*	B	=	Zamaç
0	*	1729	+	1	*	116	=	116
0,1	*	1585	+	0,9	*	116	=	263
0,2	*	1585	+	0,8	*	116	=	410
0,3	*	1521	+	0,7	*	132	=	549
0,4	*	1469	+	0,6	*	160	=	684
0,5	*	1432	+	0,5	*	196	=	814
0,6	*	1432	+	0,4	*	196	=	938
0,7	*	1377	+	0,3	*	320	=	1060
0,8	*	1377	+	0,2	*	322	=	1166
0,9	*	1370	+	0,1	*	380	=	1281
1	*	1367	+	0	*	428	=	1367



Tablo B.2’de 3.sentetik veri kümesi için x ve y katsayıları 0,1 aralıklı olacak şekilde çözülmüş sonuçları yer almaktadır. Elde edilen grafiğe göre; minimizasyon olan amaç fonsiyonuna göre grafik eğrisi azalan yöndedir. Eşitliklerde yer alan A’nın (Toplam iş yükü miktarı) katsayısı arttıkça A tarafının minimizasyonuna daha çok önem verildiği; B’nin (LMM iş yükleri arasındaki fark) katsayısı arttıkça B tarafının minimizasyonunu daha çok önem verildiği elde edilen sonuçlarla da görülmektedir. Ayrıca; grafikte 11 denemede 8 farklı sonuç elde edildiği diğer durumlarda sonuçların değişmediği görülmüştür.

x=0,1..0,2 ile y=0,9..0,8 iken sonuç değişmemekte,

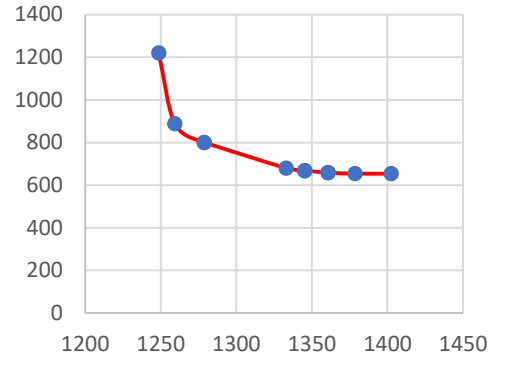
x=0,5..0,6 ile y=0,5..0,4 iken sonuç değişmemekte,

x=0,7..0,8 ile y=0,3..0,2 iken sonuç değişmemektedir.

Senaryo-4 Katsayıları

Tablo B.3. Amaç fonksiyonundaki katsayıların değerlendirilmesi (Sentetik-4)

		x ekseni			y ekseni			
x	*	A	+	y	*	B	=	Zamaç
0	*	1403	+	1	*	654	=	654
0,1	*	1378	+	0,9	*	654	=	726
0,2	*	1361	+	0,8	*	658	=	799
0,3	*	1361	+	0,7	*	658	=	869
0,4	*	1345	+	0,6	*	668	=	939
0,5	*	1345	+	0,5	*	668	=	1007
0,6	*	1333	+	0,4	*	680	=	1072
0,7	*	1279	+	0,3	*	800	=	1135
0,8	*	1279	+	0,2	*	800	=	1183
0,9	*	1259	+	0,1	*	888	=	1226
1	*	1249	+	0	*	1220	=	1249



Tablo B.3’de 4.sentetik veri kümesi için x ve y katsayıları 0,1 aralıklı olacak şekilde çözülmüş sonuçları yer almaktadır. Elde edilen grafiğe göre; minimizasyon olan amaç fonsiyonuna göre grafik eğrisi azalan yöndedir. Eşitliklerde yer alan A’nın (Toplam iş yükü miktarı) katsayısı arttıkça A tarafının minimizasyonuna daha çok önem verildiği; B’nin (LMM iş yükleri arasındaki fark) katsayısı arttıkça B tarafının minimizasyonunu daha çok önem verildiği elde edilen sonuçlarla da görülmektedir. Ayrıca; grafikte 11 denemede 8 farklı sonuç elde edildiği diğer durumlarda sonuçların değişmediği görülmüştür.

x=0,2..0,3 ile y=0,8..0,7 iken sonuç değişmemekte,

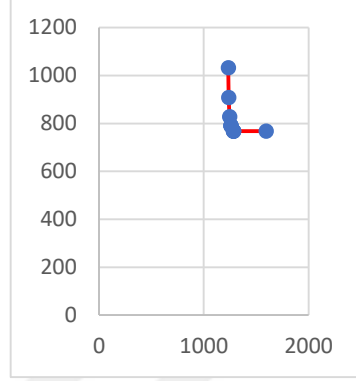
x=0,4..0,5 ile y=0,6..0,5 iken sonuç değişmemekte,

x=0,7..0,8 ile y=0,3..0,2 iken sonuç değişmemektedir.

Senaryo-5 Katsayıları

Tablo B.4. Amaç fonksiyonundaki katsayıların değerlendirilmesi (Sentetik-5)

x eksen		y eksen					
x	*	A	+	y	*	B	= Zamaç
0	*	1595	+	1		768	= 768
0,1	*	1282	+	0,9	*	768	= 819
0,2	*	1282	+	0,8	*	768	= 871
0,3	*	1282	+	0,7	*	768	= 922
0,4	*	1282	+	0,6	*	768	= 973
0,5	*	1258	+	0,5	*	790	= 1024
0,6	*	1258	+	0,4	*	790	= 1071
0,7	*	1258	+	0,3	*	790	= 1117
0,8	*	1247	+	0,2	*	828	= 1163
0,9	*	1238	+	0,1	*	908	= 1208
1	*	1234	+	0	*	1032	= 1234



Tablo B.4’de 5.sentetik veri kümesi için x ve y katsayıları 0,1 aralıklı olacak şekilde çözülmüş sonuçları yer almaktadır. Elde edilen grafiğe göre; minimizasyon olan amaç fonksiyonuna göre grafik eğrisi azalan yöndedir. Eşitliklerde yer alan A’nın (Toplam iş yükü miktarı) katsayısı arttıkça A tarafının minimizasyonuna daha çok önem verildiği; B’nin (LMM iş yükleri arasındaki fark) katsayısı arttıkça B tarafının minimizasyonunu daha çok önem verildiği elde edilen sonuçlarla da görülmektedir. Ayrıca; grafikte 11 denemede 6 farklı sonuç elde edildiği diğer durumlarda sonuçların değişmediği görülmüştür.

x=0,1..0,4 ile y=0,9..0,6 iken sonuç değişmemekte,

x=0,5..0,7 ile y=0,5..0,3 iken sonuç değişmemektedir.

Senaryo-6 Katsayıları

Tablo B.5. Amaç fonksiyonundaki katsayıların değerlendirilmesi (Sentetik-6)

		x eksen				y eksen			
x	*	A	+	y	*	B	=	Zamaç	
0	*	1790	+	1	*	284	=	284	
0,1	*	1701	+	0,9	*	284	=	426	
0,2	*	1701	+	0,8	*	284	=	567	
0,3	*	1701	+	0,7	*	284	=	709	
0,4	*	1589	+	0,6	*	334	=	836	
0,5	*	1589	+	0,5	*	334	=	961	
0,6	*	1568	+	0,4	*	358	=	1084	
0,7	*	1568	+	0,3	*	358	=	1205	
0,8	*	1526	+	0,2	*	488	=	1318	
0,9	*	1479	+	0,1	*	832	=	1420	
1	*	1459	+	0	*	1056	=	1459	

Tablo B.5’de 6.sentetik veri kümesi için x ve y katsayıları 0,1 aralıklı olacak şekilde çözülmüş sonuçları yer almaktadır. Elde edilen grafiğe göre; minimizasyon olan amaç fonksiyonuna göre grafik eğrisi azalan yöndedir. Eşitliklerde yer alan A’nın (Toplam iş yükü miktarı) katsayısı arttıkça A tarafının minimizasyonuna daha çok önem verildiği; B’nin (LMM iş yükleri arasındaki fark) katsayısı arttıkça B tarafının minimizasyonunu daha çok önem verildiği elde edilen sonuçlarla da görülmektedir. Ayrıca; grafikte 11 denemede 7 farklı sonuç elde edildiği diğer durumlarda sonuçların değişmediği görülmüştür.

x=0,1..0,3 ile y=0,9..0,7 iken sonuç değişmemekte,

x=0,4..0,5 ile y=0,6..0,5 iken ve x= 0,6..0,7 ile y= 0,4..0,3 iken sonuç değişmemektedir

Senaryo-7 Katsayıları

Tablo B.6. Amaç fonksiyonundaki katsayıların değerlendirilmesi (Sentetik-7)

		x eksen				y eksen			
x	*	A	+	y	*	B	=	Zamaç	
0	*	1612	+	1	*	482	=	482	
0,1	*	1592	+	0,9	*	482	=	593	
0,2	*	1592	+	0,8	*	482	=	704	
0,3	*	1592	+	0,7	*	482	=	815	
0,4	*	1592	+	0,6	*	482	=	926	
0,5	*	1471	+	0,5	*	584	=	1027	
0,6	*	1471	+	0,4	*	584	=	1116	
0,7	*	1471	+	0,3	*	584	=	1205	
0,8	*	1471	+	0,2	*	584	=	1293	
0,9	*	1467	+	0,1	*	600	=	1389	
1	*	1453	+	0	*	888	=	1453	

Tablo B.6’da 7.sentetik veri kümesi için x ve y katsayıları 0,1 aralıklı olacak şekilde çözülmüş sonuçları yer almaktadır. Elde edilen grafiğe göre; minimizasyon olan amaç fonksiyonuna göre grafik eğrisi azalan yöndedir. Eşitliklerde yer alan A’nın (Toplam iş yükü miktarı) katsayısı arttıkça A tarafının minimizasyonuna daha çok önem verildiği; B’nin (LMM iş yükleri arasındaki fark) katsayısı arttıkça B tarafının minimizasyonunu daha çok önem verildiği elde edilen sonuçlarla da görülmektedir. Ayrıca; grafikte 11 denemede 5 farklı sonuç elde edildiği diğer durumlarda sonuçların değişmediği görülmüştür.

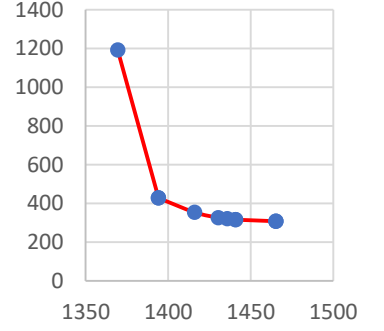
x=0,1..0,4 ile y=0,9..0,6 iken sonuç değişmemekte,

x=0,5..0,8 ile y=0,5..0,2 iken sonuç değişmemektedir.

Senaryo-8 Katsayıları

Tablo B.7. Amaç fonksiyonundaki katsayıların değerlendirilmesi (Sentetik-8)

		x eksen			y eksen			
x	*	A	+	y	*	B	=	Zamaç
0,1	*	1465	+	0,9	*	308	=	424
0,2	*	1465	+	0,8	*	308	=	539
0,3	*	1441	+	0,7	*	316	=	653
0,4	*	1441	+	0,6	*	316	=	766
0,5	*	1436	+	0,5	*	320	=	878
0,6	*	1430	+	0,4	*	326	=	989
0,7	*	1416	+	0,3	*	354	=	1097
0,8	*	1394	+	0,2	*	428	=	1201
0,9	*	1394	+	0,1	*	428	=	1307
1	*	1369	+	0	*	1192	=	1369



Tablo B.7’de 8.sentetik veri kümesi için x ve y katsayıları 0,1 aralıklı olacak şekilde çözülmüş sonuçları yer almaktadır. Elde edilen grafiğe göre; minimizasyon olan amaç fonsiyonuna göre grafik eğrisi azalan yöndedir. Eşitliklerde yer alan A’nın (Toplam iş yükü miktarı) katsayısı arttıkça A tarafının minimizasyonuna daha çok önem verildiği; B’nin (LMM iş yükleri arasındaki fark) katsayısı arttıkça B tarafının minimizasyonunu daha çok önem verildiği elde edilen sonuçlarla da görülmektedir. Ayrıca; grafikte 11 denemede 6 farklı sonuç elde edildiği diğer durumlarda sonuçların değişmediği görülmüştür.

x=0,1..0,2 ile y=0,9..0,8 iken sonuç değişmemekte,

x=0,3..0,4 ile y=0,7..0,6 iken sonuç değişmemekte,

x= 0,8..0,9 ile y= 0,2..0,1 iken sonuç değişmemektedir.

Senaryo-9 Katsayıları

Tablo B.8. Amaç fonksiyonundaki katsayıların değerlendirilmesi (Sentetik-9)

		x eksen				y eksen			
x	*	A	+	y	*	B	=	Zamaç	
0	*	1846	+	1	*	138	=	138	
0,1	*	1777	+	0,9	*	138	=	302	
0,2	*	1688	+	0,8	*	148	=	456	
0,3	*	1688	+	0,7	*	148	=	610	
0,4	*	1615	+	0,6	*	176	=	752	
0,5	*	1615	+	0,5	*	176	=	896	
0,6	*	1615	+	0,4	*	176	=	1040	
0,7	*	1523	+	0,3	*	342	=	1169	
0,8	*	1523	+	0,2	*	342	=	1287	
0,9	*	1464	+	0,1	*	620	=	1388	
1	*	1464	+	0	*	620	=	1464	

Tablo B.8’de 9.sentetik veri kümesi için x ve y katsayıları 0,1 aralıklı olacak şekilde çözülmüş sonuçları yer almaktadır. Elde edilen grafiğe göre; minimizasyon olan amaç fonksiyonuna göre grafik eğrisi azalan yöndedir. Eşitliklerde yer alan A’nın (Toplam iş yükü miktarı) katsayısı arttıkça A tarafının minimizasyonuna daha çok önem verildiği; B’nin (LMM iş yükleri arasındaki fark) katsayısı arttıkça B tarafının minimizasyonunu daha çok önem verildiği elde edilen sonuçlarla da görülmektedir. Ayrıca; grafikte 11 denemede 6 farklı sonuç elde edildiği diğer durumlarda sonuçların değişmediği görülmüştür.

x=0,2..0,3 ile y=0,8..0,7 iken sonuç değişmemekte,

x=0,4..0,6 ile y=0,6..0,4 iken sonuç değişmemekte,

x= 0,7..0,8 ile y= 0,3..0,2 iken sonuç değişmemekte,

x= 0,9..1 ile y= 0,1..0 iken sonuç değişmemektedir.

Senaryo-10 Katsayıları

Tablo B.9. Amaç fonksiyonundaki katsayıların değerlendirilmesi (Sentetik-10)

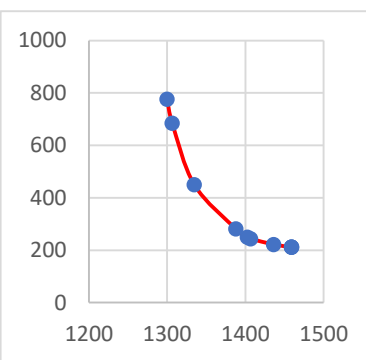
		x eksen				y eksen			
x	*	A	+	y	*	B	=	Zamaç	
0,1	*	1470	+	0,9	*	126	=	260	
0,2	*	1470	+	0,8	*	126	=	395	
0,3	*	1470	+	0,7	*	126	=	529	
0,4	*	1470	+	0,6	*	126	=	664	
0,5	*	1470	+	0,5	*	126	=	798	
0,6	*	1418	+	0,4	*	196	=	929	
0,7	*	1389	+	0,3	*	260	=	1050	
0,8	*	1343	+	0,2	*	388	=	1152	
0,9	*	1322	+	0,1	*	522	=	1250	
1	*	1299	+	1	*	1104	=	2403	

Tablo B.9’da 10.sentetik veri kümesi için x ve y katsayıları 0,1 aralıklı olacak şekilde çözülmüş sonuçları yer almaktadır. Elde edilen grafiğe göre; minimizasyon olan amaç fonksiyonuna göre grafik eğrisi azalan yöndedir. Eşitliklerde yer alan A’nın (Toplam iş yükü miktarı) katsayısı arttıkça A tarafının minimizasyonuna daha çok önem verildiği; B’nin (LMM iş yükleri arasındaki fark) katsayısı arttıkça B tarafının minimizasyonunu daha çok önem verildiği elde edilen sonuçlarla da görülmektedir. Ayrıca; grafikte 11 denemede 6 farklı sonuç elde edildiği diğer durumlarda sonuçların değişmediği görülmüştür.

x=0,1..0,5 ile y=0,9..0,5 iken sonuç değişmemektedir.

Senaryo-11 Katsayıları

Tablo B.10. Amaç fonksiyonundaki katsayıların değerlendirilmesi (Sentetik-11)

x eksen		y eksen							
x	*	A	+	y	*	B	=	Zamaç	
0,1	*	1459	+	0,9	*	212	=	337	
0,2	*	1459	+	0,8	*	212	=	461	
0,3	*	1459	+	0,7	*	212	=	586	
0,4	*	1436	+	0,6	*	222	=	708	
0,5	*	1407	+	0,5	*	244	=	825	
0,6	*	1403	+	0,4	*	250	=	942	
0,7	*	1388	+	0,3	*	282	=	1056	
0,8	*	1335	+	0,2	*	450	=	1158	
0,9	*	1307	+	0,1	*	684	=	1251	
1	*	1300	+	1	*	776	=	2076	

Tablo B.10’da 11.sentetik veri kümesi için x ve y katsayıları 0,1 aralıklı olacak şekilde çözülmüş sonuçları yer almaktadır. Elde edilen grafiğe göre; minimizasyon olan amaç fonksiyonuna göre grafik eğrisi azalan yöndedir. Eşitliklerde yer alan A’nın (Toplam iş yükü miktarı) katsayısı arttıkça A tarafının minimizasyonuna daha çok önem verildiği; B’nin (LMM iş yükleri arasındaki fark) katsayısı arttıkça B tarafının minimizasyonunu daha çok önem verildiği elde edilen sonuçlarla da görülmektedir. Ayrıca; grafikte 11 denemede 8 farklı sonuç elde edildiği diğer durumlarda sonuçların değişmediği görülmüştür.

x=0,1..0,3 ile y=0,9..0,7 iken sonuç değişmemektedir.

Senaryo-12 Katsayıları

Tablo B.11. Amaç fonksiyonundaki katsayıların değerlendirilmesi (Sentetik-12)

		x eksen				y eksen			
x	*	A	+	y	*	B	=	Zamaç	
0,1	*	1766	+	0,9	*	192	=	349	
0,2	*	1766	+	0,8	*	192	=	507	
0,3	*	1744	+	0,7	*	198	=	662	
0,4	*	1688	+	0,6	*	232	=	815	
0,5	*	1666	+	0,5	*	252	=	959	
0,6	*	1623	+	0,4	*	310	=	1098	
0,7	*	1597	+	0,3	*	354	=	1224	
0,8	*	1597	+	0,2	*	354	=	1348	
0,9	*	1564	+	0,1	*	564	=	1474	
1	*	1558	+	0	*	796	=	1558	

Tablo B.11’de 12.sentetik veri kümesi için x ve y katsayıları 0,1 aralıklı olacak şekilde çözülmüş sonuçları yer almaktadır. Elde edilen grafiğe göre; minimizasyon olan amaç fonksiyonuna göre grafik eğrisi azalan yöndedir. Eşitliklerde yer alan A’nın (Toplam iş yükü miktarı) katsayısı arttıkça A tarafının minimizasyonuna daha çok önem verildiği; B’nin (LMM iş yükleri arasındaki fark) katsayısı arttıkça B tarafının minimizasyonunu daha çok önem verildiği elde edilen sonuçlarla da görülmektedir. Ayrıca; grafikte 11 denemede 8 farklı sonuç elde edildiği diğer durumlarda sonuçların değişmediği görülmüştür.

x=0,1..0,2 ile y=0,9..0,8 iken sonuç değişmemekte,

x= 0,7..0,8 ile y= 0,3..0,2 iken sonuç değişmemektedir.

Senaryo-13 Katsayıları

Tablo B.12. Amaç fonksiyonundaki katsayıların değerlendirilmesi (Sentetik-13)

		x eksen				y eksen			
x	*	A	+	y	*	B	=	Zamaç	
0	*	1853	+	1	*	448	=	448	
0,1	*	1675	+	0,9	*	448	=	571	
0,2	*	1675	+	0,8	*	448	=	693	
0,3	*	1622	+	0,7	*	466	=	813	
0,4	*	1622	+	0,6	*	466	=	928	
0,5	*	1622	+	0,5	*	466	=	1044	
0,6	*	1600	+	0,4	*	490	=	1156	
0,7	*	1567	+	0,3	*	546	=	1261	
0,8	*	1567	+	0,2	*	546	=	1363	
0,9	*	1536	+	0,1	*	738	=	1465	
1	*	1533	+	0	*	876	=	1533	

Tablo B.12’de 13.sentetik veri kümesi için x ve y katsayıları 0,1 aralıklı olacak şekilde çözülmüş sonuçları yer almaktadır. Elde edilen grafiğe göre; minimizasyon olan amaç fonksiyonuna göre grafik eğrisi azalan yöndedir. Eşitliklerde yer alan A’nın (Toplam iş yükü miktarı) katsayısı arttıkça A tarafının minimizasyonuna daha çok önem verildiği; B’nin (LMM iş yükleri arasındaki fark) katsayısı arttıkça B tarafının minimizasyonunu daha çok önem verildiği elde edilen sonuçlarla da görülmektedir. Ayrıca; grafikte 11 denemede 7 farklı sonuç elde edildiği diğer durumlarda sonuçların değişmediği görülmüştür.

x=0,1..0,2 ile y=0,9..0,8 iken sonuç değişmemekte,

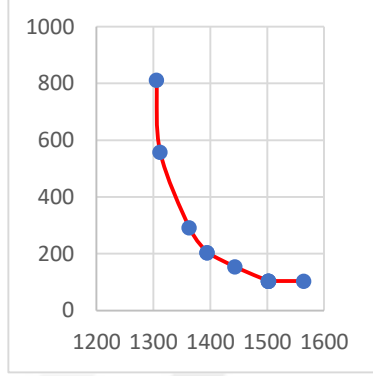
x= 0,3..0,5 ile y= 0,7..0,5 iken sonuç değişmemekte,

x= 0,7..0,8 ile y= 0,3..0,2 iken sonuç değişmemektedir.

Senaryo-14 Katsayıları

Tablo B.13. Amaç fonksiyonundaki katsayıların değerlendirilmesi (Sentetik-14)

x eksen				y eksen			
x	*	A	+	y	*	B	= Zamaç
0	*	1564		1	*	104	= 104
0,1	*	1502	+	0,9	*	104	= 244
0,2	*	1502	+	0,8	*	104	= 384
0,3	*	1502	+	0,7	*	104	= 524
0,4	*	1502	+	0,6	*	104	= 663
0,5	*	1443	+	0,5	*	154	= 799
0,6	*	1394	+	0,4	*	204	= 918
0,7	*	1394	+	0,3	*	204	= 1037
0,8	*	1363	+	0,2	*	292	= 1149
0,9	*	1312	+	0,1	*	558	= 1244
1	*	1305	+	0	*	812	= 1305



Tablo B.13’de 14.sentetik veri kümesi için x ve y katsayıları 0,1 aralıklı olacak şekilde çözülmüş sonuçları yer almaktadır. Elde edilen grafiğe göre; minimizasyon olan amaç fonksiyonuna göre grafik eğrisi azalan yöndedir. Eşitliklerde yer alan A’nın (Toplam iş yükü miktarı) katsayısı arttıkça A tarafının minimizasyonuna daha çok önem verildiği; B’nin (LMM iş yükleri arasındaki fark) katsayısı arttıkça B tarafının minimizasyonunu daha çok önem verildiği elde edilen sonuçlarla da görülmektedir. Ayrıca; grafikte 11 denemede 7 farklı sonuç elde edildiği diğer durumlarda sonuçların değişmediği görülmüştür.

x=0,1..0,4 ile y=0,9..0,6 iken sonuç değişmemekte,

x= 0,6..0,7 ile y= 0,4..0,3 iken sonuç değişmemektedir.

Senaryo-15 Katsayıları

Tablo B.14. Amaç fonksiyonundaki katsayıların değerlendirilmesi (Sentetik-15)

		x eksen				y eksen			
x	*	A	+	y	*	B	=	Zamaç	
0	*	1940	+	1	*	364	=	364	
0,1	*	1835	+	0,9	*	364	=	511	
0,2	*	1694	+	0,8	*	396	=	656	
0,3	*	1694	+	0,7	*	396	=	785	
0,4	*	1643	+	0,6	*	424	=	912	
0,5	*	1643	+	0,5	*	424	=	1034	
0,6	*	1643	+	0,4	*	424	=	1155	
0,7	*	1520	+	0,3	*	676	=	1267	
0,8	*	1520	+	0,2	*	676	=	1351	
0,9	*	1490	+	0,1	*	810	=	1429	
1	*	1483	+	0	*	932	=	1483	

Tablo B.14’de 15.sentetik veri kümesi için x ve y katsayıları 0,1 aralıklı olacak şekilde çözülmüş sonuçları yer almaktadır. Elde edilen grafiğe göre; minimizasyon olan amaç fonksiyonuna göre grafik eğrisi azalan yöndedir. Eşitliklerde yer alan A’nın (Toplam iş yükü miktarı) katsayısı arttıkça A tarafının minimizasyonuna daha çok önem verildiği; B’nin (LMM iş yükleri arasındaki fark) katsayısı arttıkça B tarafının minimizasyonunu daha çok önem verildiği elde edilen sonuçlarla da görülmektedir. Ayrıca; grafikte 11 denemede 7 farklı sonuç elde edildiği diğer durumlarda sonuçların değişmediği görülmüştür.

x=0,2..0,3 ile y=0,8..0,7 iken sonuç değişmemekte,

x= 0,4..0,6 ile y= 0,6..0,4 iken sonuç değişmemektedir.

Senaryo-16 Katsayıları

Tablo B.15. Amaç fonksiyonundaki katsayıların değerlendirilmesi (Sentetik-16)

		x eksen				y eksen			
x	*	A	+	y	*	B	=	Zamaç	
0	*	1541	+	1	*	140	=	140	
0,1	*	1534	+	0,9	*	140	=	279	
0,2	*	1534	+	0,8	*	140	=	419	
0,3	*	1534	+	0,7	*	140	=	558	
0,4	*	1534	+	0,6	*	140	=	697	
0,5	*	1493	+	0,5	*	168	=	831	
0,6	*	1442	+	0,4	*	238	=	961	
0,7	*	1442	+	0,3	*	238	=	1081	
0,8	*	1420	+	0,2	*	312	=	1198	
0,9	*	1404	+	0,1	*	378	=	1312	
1	*	1379	+	0	*	768	=	1379	

Tablo B.15’de 16.sentetik veri kümesi için x ve y katsayıları 0,1 aralıklı olacak şekilde çözülmüş sonuçları yer almaktadır. Elde edilen grafiğe göre; minimizasyon olan amaç fonksiyonuna göre grafik eğrisi azalan yöndedir. Eşitliklerde yer alan A’nın (Toplam iş yükü miktarı) katsayısı arttıkça A tarafının minimizasyonuna daha çok önem verildiği; B’nin (LMM iş yükleri arasındaki fark) katsayısı arttıkça B tarafının minimizasyonunu daha çok önem verildiği elde edilen sonuçlarla da görülmektedir. Ayrıca; grafikte 11 denemede 7 farklı sonuç elde edildiği diğer durumlarda sonuçların değişmediği görülmüştür.

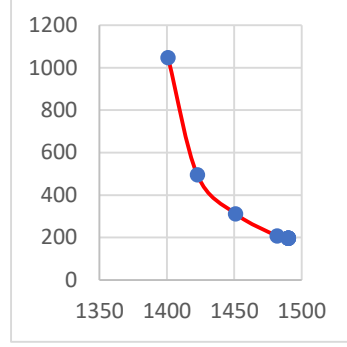
x=0,1..0,4 ile y=0,9..0,6 iken sonuç değişmemekte,

x= 0,6..0,7 ile y= 0,4..0,3 iken sonuç değişmemektedir.

Senaryo-17 Katsayıları

Tablo B.16. Amaç fonksiyonundaki katsayıların değerlendirilmesi (Sentetik-17)

		x eksen			y eksen			
x	*	A	+	y	*	B	=	Zamaç
0,1	*	1490	+	0,9	*	198	=	327
0,2	*	1490	+	0,8	*	198	=	456
0,3	*	1490	+	0,7	*	198	=	586
0,4	*	1490	+	0,6	*	198	=	715
0,5	*	1490	+	0,5	*	198	=	844
0,6	*	1490	+	0,4	*	198	=	973
0,7	*	1482	+	0,3	*	208	=	1100
0,8	*	1451	+	0,2	*	312	=	1223
0,9	*	1423	+	0,1	*	496	=	1339
1	*	1401	+	0	*	1048	=	1401



Tablo B.16’da 17.sentetik veri kümesi için x ve y katsayıları 0,1 aralıklı olacak şekilde çözülmüş sonuçları yer almaktadır. Elde edilen grafiğe göre; minimizasyon olan amaç fonksiyonuna göre grafik eğrisi azalan yöndedir. Eşitliklerde yer alan A’nın (Toplam iş yükü miktarı) katsayısı arttıkça A tarafının minimizasyonuna daha çok önem verildiği; B’nin (LMM iş yükleri arasındaki fark) katsayısı arttıkça B tarafının minimizasyonunu daha çok önem verildiği elde edilen sonuçlarla da görülmektedir. Ayrıca; grafikte 11 denemede 5 farklı sonuç elde edildiği diğer durumlarda sonuçların değişmediği görülmüştür.

x=0,1..0,6 ile y=0,9..0,4 iken sonuç değişmemektedir.

Senaryo-18 Katsayıları

Tablo B.17. Amaç fonksiyonundaki katsayıların değerlendirilmesi (Sentetik-18)

		x eksen				y eksen			
x	*	A	+	y	*	B	=	Zamaç	
0,1	*	1482	+	0,9	*	162	=	294	
0,2	*	1482	+	0,8	*	162	=	426	
0,3	*	1482	+	0,7	*	162	=	558	
0,4	*	1482	+	0,6	*	162	=	690	
0,5	*	1482	+	0,5	*	162	=	822	
0,6	*	1482	+	0,4	*	162	=	954	
0,7	*	1482	+	0,3	*	162	=	1086	
0,8	*	1419	+	0,2	*	340	=	1203	
0,9	*	1399	+	0,1	*	448	=	1314	
1	*	1394	+	0	*	544	=	1394	

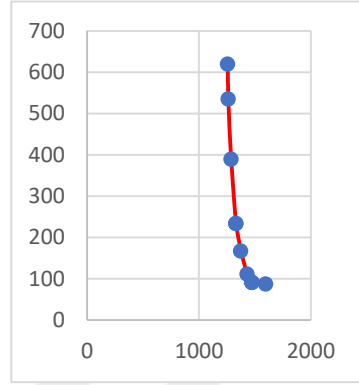
Tablo B.17’de 18.sentetik veri kümesi için x ve y katsayıları 0,1 aralıklı olacak şekilde çözülmüş sonuçları yer almaktadır. Elde edilen grafiğe göre; minimizasyon olan amaç fonksiyonuna göre grafik eğrisi azalan yöndedir. Eşitliklerde yer alan A’nın (Toplam iş yükü miktarı) katsayısı arttıkça A tarafının minimizasyonuna daha çok önem verildiği; B’nin (LMM iş yükleri arasındaki fark) katsayısı arttıkça B tarafının minimizasyonunu daha çok önem verildiği elde edilen sonuçlarla da görülmektedir. Ayrıca; grafikte 11 denemede 4 farklı sonuç elde edildiği diğer durumlarda sonuçların değişmediği görülmüştür.

x=0,1..0,7 ile y=0,9..0,3 iken sonuç değişmemektedir.

Senaryo-19 Katsayıları

Tablo B.18. Amaç fonksiyonundaki katsayıların değerlendirilmesi (Sentetik-19)

x eksen		y eksen					
x	*	A	+	y	*	B	= Zamaç
0	*	1598	+	1	*	88	= 88
0,1	*	1474	+	0,9	*	92	= 230
0,2	*	1474	+	0,8	*	92	= 368
0,3	*	1474	+	0,7	*	92	= 507
0,4	*	1433	+	0,6	*	112	= 640
0,5	*	1375	+	0,5	*	168	= 772
0,6	*	1331	+	0,4	*	234	= 892
0,7	*	1331	+	0,3	*	234	= 1002
0,8	*	1288	+	0,2	*	390	= 1108
0,9	*	1263	+	0,1	*	536	= 1197
1	*	1258	+	0	*	620	= 1258



Tablo B.18’de 19.sentetik veri kümesi için x ve y katsayıları 0,1 aralıklı olacak şekilde çözülmüş sonuçları yer almaktadır. Elde edilen grafiğe göre; minimizasyon olan amaç fonksiyonuna göre grafik eğrisi azalan yöndedir. Eşitliklerde yer alan A’nın (Toplam iş yükü miktarı) katsayısı arttıkça A tarafının minimizasyonuna daha çok önem verildiği; B’nin (LMM iş yükleri arasındaki fark) katsayısı arttıkça B tarafının minimizasyonunu daha çok önem verildiği elde edilen sonuçlarla da görülmektedir. Ayrıca; grafikte 11 denemede 8 farklı sonuç elde edildiği diğer durumlarda sonuçların değişmediği görülmüştür.

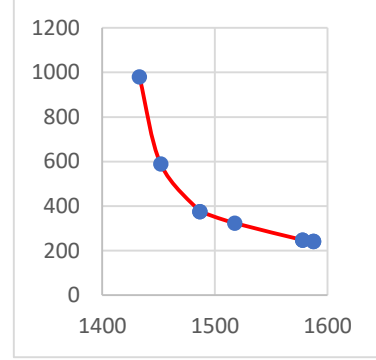
x=0,1..0,3 ile y=0,9..0,7 iken sonuç değişmemekte,

x=0,6..0,7 ile y=0,4..0,3 iken sonuç değişmemektedir.

Senaryo-20 Katsayıları

Tablo B.19. Amaç fonksiyonundaki katsayıların değerlendirilmesi (Sentetik-20)

x eksen				y eksen				
x	*	A	+	y	*	B	=	Zamaç
0,1	*	1587	+	0,9	*	242	=	377
0,2	*	1587	+	0,8	*	242	=	511
0,3	*	1587	+	0,7	*	242	=	646
0,4	*	1578	+	0,6	*	248	=	780
0,5	*	1578	+	0,5	*	248	=	913
0,6	*	1517	+	0,4	*	324	=	1040
0,7	*	1487	+	0,3	*	376	=	1153
0,8	*	1487	+	0,2	*	376	=	1264
0,9	*	1452	+	0,1	*	590	=	1374
1	*	1433	+	0	*	980	=	1433



Tablo B.19’da 20.sentetik veri kümesi için x ve y katsayıları 0,1 aralıklı olacak şekilde çözülmüş sonuçları yer almaktadır. Elde edilen grafiğe göre; minimizasyon olan amaç fonksiyonuna göre grafik eğrisi azalan yöndedir. Eşitliklerde yer alan A’nın (Toplam iş yükü miktarı) katsayısı arttıkça A tarafının minimizasyonuna daha çok önem verildiği; B’nin (LMM iş yükleri arasındaki fark) katsayısı arttıkça B tarafının minimizasyonunu daha çok önem verildiği elde edilen sonuçlarla da görülmektedir. Ayrıca; grafikte 11 denemede 6 farklı sonuç elde edildiği diğer durumlarda sonuçların değişmediği görülmüştür.

x=0,1..0,3 ile y=0,9..0,7 iken sonuç değişmemekte,

x=0,4..0,5 ile y=0,6..0,5 ve x=0,7..0,8 ile y=0,3..0,2 iken sonuç değişmemektedir.

Senaryo-21 Katsayıları

Tablo B.20. Amaç fonksiyonundaki katsayıların değerlendirilmesi (Sentetik-21)

		x eksen				y eksen			
x	*	A	+	y	*	B	=	Zamaç	
0,1	*	1407	+	0,9	*	156	=	281	
0,2	*	1407	+	0,8	*	156	=	406	
0,3	*	1407	+	0,7	*	156	=	531	
0,4	*	1407	+	0,6	*	156	=	657	
0,5	*	1407	+	0,5	*	156	=	782	
0,6	*	1400	+	0,4	*	164	=	906	
0,7	*	1393	+	0,3	*	176	=	1028	
0,8	*	1350	+	0,2	*	316	=	1143	
0,9	*	1313	+	0,1	*	498	=	1240	
1	*	1293	+	0	*	744	=	1293	

Tablo B.20’de 21.sentetik veri kümesi için x ve y katsayıları 0,1 aralıklı olacak şekilde çözülmüş sonuçları yer almaktadır. Elde edilen grafiğe göre; minimizasyon olan amaç fonksiyonuna göre grafik eğrisi azalan yöndedir. Eşitliklerde yer alan A’nın (Toplam iş yükü miktarı) katsayısı arttıkça A tarafının minimizasyonuna daha çok önem verildiği; B’nin (LMM iş yükleri arasındaki fark) katsayısı arttıkça B tarafının minimizasyonunu daha çok önem verildiği elde edilen sonuçlarla da görülmektedir. Ayrıca; grafikte 11 denemede 6 farklı sonuç elde edildiği diğer durumlarda sonuçların değişmediği görülmüştür.

x=0,1..0,5 ile y=0,9..0,5 iken sonuç değişmemektedir.

Senaryo-22 Katsayıları

Tablo B.21. Amaç fonksiyonundaki katsayıların değerlendirilmesi (Sentetik-22)

		x eksen				y eksen			
x	*	A	+	y	*	B	=	Zamaç	
0,1	*	1747	+	0,9	*	186	=	342	
0,2	*	1704	+	0,8	*	192	=	494	
0,3	*	1704	+	0,7	*	192	=	646	
0,4	*	1704	+	0,6	*	192	=	797	
0,5	*	1704	+	0,5	*	192	=	948	
0,6	*	1681	+	0,4	*	226	=	1099	
0,7	*	1650	+	0,3	*	284	=	1240	
0,8	*	1603	+	0,2	*	414	=	1365	
0,9	*	1509	+	0,1	*	900	=	1454	
1	*	1507	+	0		928	=	1507	

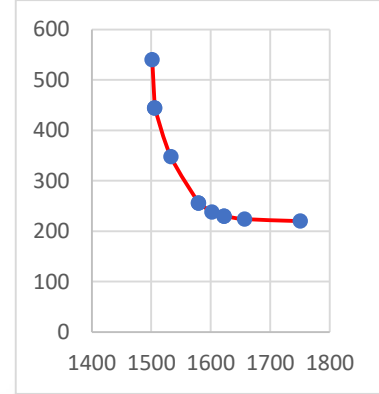
Tablo B.21’de 22.sentetik veri kümesi için x ve y katsayıları 0,1 aralıklı olacak şekilde çözülmüş sonuçları yer almaktadır. Elde edilen grafiğe göre; minimizasyon olan amaç fonksiyonuna göre grafik eğrisi azalan yöndedir. Eşitliklerde yer alan A’nın (Toplam iş yükü miktarı) katsayısı arttıkça A tarafının minimizasyonuna daha çok önem verildiği; B’nin (LMM iş yükleri arasındaki fark) katsayısı arttıkça B tarafının minimizasyonunu daha çok önem verildiği elde edilen sonuçlarla da görülmektedir. Ayrıca; grafikte 11 denemede 7 farklı sonuç elde edildiği diğer durumlarda sonuçların değişmediği görülmüştür.

x=0,1..0,5 ile y=0,9..0,5 iken sonuç değişmemektedir.

Senaryo-23 Katsayıları

Tablo B.22. Amaç fonksiyonundaki katsayıların değerlendirilmesi (Sentetik-23)

x eksen		y eksen					
x	*	A	+	y	*	B	= Zamaç
0	*	1750	+	1	*	220	= 220
0,1	*	1657	+	0,9	*	224	= 367
0,2	*	1623	+	0,8	*	230	= 509
0,3	*	1623	+	0,7	*	230	= 648
0,4	*	1602	+	0,6	*	238	= 784
0,5	*	1580	+	0,5	*	256	= 918
0,6	*	1580	+	0,4	*	256	= 1050
0,7	*	1533	+	0,3	*	348	= 1177
0,8	*	1506	+	0,2	*	444	= 1294
0,9	*	1506	+	0,1	*	444	= 1410
1	*	1502	+	0	*	540	= 1502



Tablo B.22’de 23.sentetik veri kümesi için x ve y katsayıları 0,1 aralıklı olacak şekilde çözülmüş sonuçları yer almaktadır. Elde edilen grafiğe göre; minimizasyon olan amaç fonksiyonuna göre grafik eğrisi azalan yöndedir. Eşitliklerde yer alan A’nın (Toplam iş yükü miktarı) katsayısı arttıkça A tarafının minimizasyonuna daha çok önem verildiği; B’nin (LMM iş yükleri arasındaki fark) katsayısı arttıkça B tarafının minimizasyonunu daha çok önem verildiği elde edilen sonuçlarla da görülmektedir. Ayrıca; grafikte 11 denemede 8 farklı sonuç elde edildiği diğer durumlarda sonuçların değişmediği görülmüştür.

x=0,2..0,3 ile y=0,8..0,7 iken sonuç değişmemekte,

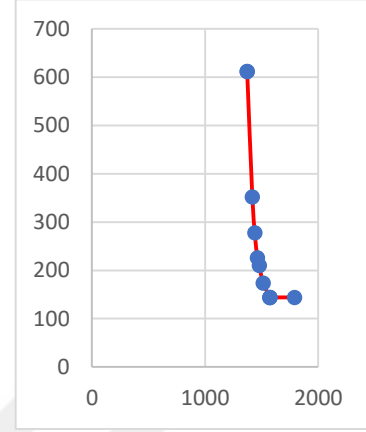
x=0,5..0,6 ile y=0,5..0,4 iken sonuç değişmemekte,

x=0,8..0,9 ile y=0,2..0,1 iken sonuç değişmemektedir.

Senaryo-24 Katsayıları

Tablo B.23. Amaç fonksiyonundaki katsayıların değerlendirilmesi (Sentetik-24)

x eksen		y eksen					
x	*	A	+	y	*	B	= Zamaç
0	*	1790	+	1	*	144	= 144
0,1	*	1573	+	0,9	*	144	= 287
0,2	*	1573	+	0,8	*	144	= 430
0,3	*	1573	+	0,7	*	144	= 573
0,4	*	1514	+	0,6	*	174	= 710
0,5	*	1478	+	0,5	*	210	= 844
0,6	*	1462	+	0,4	*	226	= 968
0,7	*	1439	+	0,3	*	278	= 1091
0,8	*	1418	+	0,2	*	352	= 1205
0,9	*	1372	+	0,1	*	612	= 1304
1	*	1372	+	0	*	612	= 1372



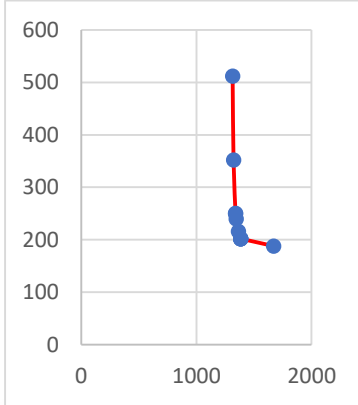
Tablo B.23’de 24.sentetik veri kümesi için x ve y katsayıları 0,1 aralıklı olacak şekilde çözülmüş sonuçları yer almaktadır. Elde edilen grafiğe göre; minimizasyon olan amaç fonksiyonuna göre grafik eğrisi azalan yöndedir. Eşitliklerde yer alan A’nın (Toplam iş yükü miktarı) katsayısı arttıkça A tarafının minimizasyonuna daha çok önem verildiği; B’nin (LMM iş yükleri arasındaki fark) katsayısı arttıkça B tarafının minimizasyonunu daha çok önem verildiği elde edilen sonuçlarla da görülmektedir. Ayrıca; grafikte 11 denemede 8 farklı sonuç elde edildiği diğer durumlarda sonuçların değişmediği görülmüştür.

x=0,1..0,3 ile y=0,9..0,7 iken sonuç değişmemekte,

x=0,9..1 ile y=0,1..0 iken sonuç değişmemektedir.

Senaryo-25 Katsayıları

Tablo B.24. Amaç fonksiyonundaki katsayıların değerlendirilmesi (Sentetik-25)

		x eksen				y eksen			
x	*	A	+	y	*	B	=	Zamaç	
0	*	1670	+	1	*	188	=	188	
0,1	*	1385	+	0,9	*	202	=	320	
0,2	*	1385	+	0,8	*	202	=	439	
0,3	*	1385	+	0,7	*	202	=	557	
0,4	*	1385	+	0,6	*	202	=	675	
0,5	*	1366	+	0,5	*	216	=	791	
0,6	*	1347	+	0,4	*	240	=	904	
0,7	*	1340	+	0,3	*	250	=	1013	
0,8	*	1340	+	0,2	*	250	=	1122	
0,9	*	1323	+	0,1	*	352	=	1235	
1	*	1315	+	0	*	512	=	1315	

Tablo B.24’de 25.sentetik veri kümesi için x ve y katsayıları 0,1 aralıklı olacak şekilde çözülmüş sonuçları yer almaktadır. Elde edilen grafiğe göre; minimizasyon olan amaç fonksiyonuna göre grafik eğrisi azalan yöndedir. Eşitliklerde yer alan A’nın (Toplam iş yükü miktarı) katsayısı arttıkça A tarafının minimizasyonuna daha çok önem verildiği; B’nin (LMM iş yükleri arasındaki fark) katsayısı arttıkça B tarafının minimizasyonunu daha çok önem verildiği elde edilen sonuçlarla da görülmektedir. Ayrıca; grafikte 11 denemede 7 farklı sonuç elde edildiği diğer durumlarda sonuçların değişmediği görülmüştür.

x=0,1..0,4 ile y=0,9..0,6 iken sonuç değişmemektedir,

x=0,7..0,8 ile y=0,3..0,2 iken sonuç değişmemektedir.

Senaryo-26 Katsayıları

Tablo B.25. Amaç fonksiyonundaki katsayıların değerlendirilmesi (Sentetik-26)

		x eksen				y eksen			
x	*	A	+	y	*	B	=	Zamaç	
0	*	1850		1	*	132	=	132	
0,1	*	1551	+	0,9	*	132	=	274	
0,2	*	1484	+	0,8	*	144	=	412	
0,3	*	1484	+	0,7	*	144	=	546	
0,4	*	1479	+	0,6	*	146	=	679	
0,5	*	1449	+	0,5	*	166	=	808	
0,6	*	1423	+	0,4	*	196	=	932	
0,7	*	1423	+	0,3	*	196	=	1055	
0,8	*	1402	+	0,2	*	250	=	1171	
0,9	*	1402	+	0,1	*	250	=	1298	
1	*	1391		0	*	452	=	1391	

Tablo B.25’de 26.sentetik veri kümesi için x ve y katsayıları 0,1 aralıklı olacak şekilde çözülmüş sonuçları yer almaktadır. Elde edilen grafiğe göre; minimizasyon olan amaç fonksiyonuna göre grafik eğrisi azalan yöndedir. Eşitliklerde yer alan A’nın (Toplam iş yükü miktarı) katsayısı arttıkça A tarafının minimizasyonuna daha çok önem verildiği; B’nin (LMM iş yükleri arasındaki fark) katsayısı arttıkça B tarafının minimizasyonunu daha çok önem verildiği elde edilen sonuçlarla da görülmektedir. Ayrıca; grafikte 11 denemede 7 farklı sonuç elde edildiği diğer durumlarda sonuçların değişmediği görülmüştür.

x=0,2..0,3 ile y=0,8..0,7 iken sonuç değişmemekte,

x=0,6..0,7 ile y=0,4..0,3 iken sonuç değişmemekte,

x=0,8..0,9 ile y=0,2..0,1 iken sonuç değişmemektedir.

Senaryo-27 Katsayıları

Tablo B.26. Amaç fonksiyonundaki katsayıların değerlendirilmesi (Sentetik-27)

x eksen		y eksen							
x	*	A	+	y	*	B	=	Zamaç	
0		1624	+	1		472	=	472	
0,1	*	1409	+	0,9	*	472	=	566	
0,2	*	1393	+	0,8	*	474	=	658	
0,3	*	1393	+	0,7	*	474	=	750	
0,4	*	1393	+	0,6	*	474	=	842	
0,5	*	1381	+	0,5	*	482	=	932	
0,6	*	1334	+	0,4	*	534	=	1014	
0,7	*	1322	+	0,3	*	562	=	1094	
0,8	*	1306	+	0,2	*	622	=	1169	
0,9	*	1275	+	0,1	*	822	=	1234	
1		1268	+	0		928	=	1268	

Tablo B.26’da 27. sentetik veri kümesi için x ve y katsayıları 0,1 aralıklı olacak şekilde çözülmüş sonuçları yer almaktadır. Elde edilen grafiğe göre; minimizasyon olan amaç fonksiyonuna göre grafik eğrisi azalan yöndedir. Eşitliklerde yer alan A’nın (Toplam iş yükü miktarı) katsayısı arttıkça A tarafının minimizasyonuna daha çok önem verildiği; B’nin (LMM iş yükleri arasındaki fark) katsayısı arttıkça B tarafının minimizasyonunu daha çok önem verildiği elde edilen sonuçlarla da görülmektedir. Ayrıca; grafikte 11 denemede 8 farklı sonuç elde edildiği diğer durumlarda sonuçların değişmediği görülmüştür.

x=0,2..0,4 ile y=0,8..0,6 iken sonuç değişmemektedir.

Senaryo-28 Katsayıları

Tablo B.27. Amaç fonksiyonundaki katsayıların değerlendirilmesi (Sentetik-28)

		x eksen			y eksen				
x	*	A	+	y	*	B	=	Zamaç	
0,1	*	1482	+	0,9	*	240	=	364	
0,2	*	1482	+	0,8	*	240	=	488	
0,3	*	1482	+	0,7	*	240	=	613	
0,4	*	1482	+	0,6	*	240	=	737	
0,5	*	1482	+	0,5	*	240	=	861	
0,6	*	1467	+	0,4	*	258	=	984	
0,7	*	1467	+	0,3	*	258	=	1105	
0,8	*	1467	+	0,2	*	258	=	1225	
0,9	*	1429	+	0,1	*	496	=	1345	
1	*	1409	+	0	*	832	=	1409	

Tablo B.27’de 28. sentetik veri kümesi için x ve y katsayıları 0,1 aralıklı olacak şekilde çözülmüş sonuçları yer almaktadır. Elde edilen grafiğe göre; minimizasyon olan amaç fonksiyonuna göre grafik eğrisi azalan yöndedir. Eşitliklerde yer alan A’nın (Toplam iş yükü miktarı) katsayısı arttıkça A tarafının minimizasyonuna daha çok önem verildiği; B’nin (LMM iş yükleri arasındaki fark) katsayısı arttıkça B tarafının minimizasyonunu daha çok önem verildiği elde edilen sonuçlarla da görülmektedir. Ayrıca; grafikte 11 denemede 4 farklı sonuç elde edildiği diğer durumlarda sonuçların değişmediği görülmüştür.

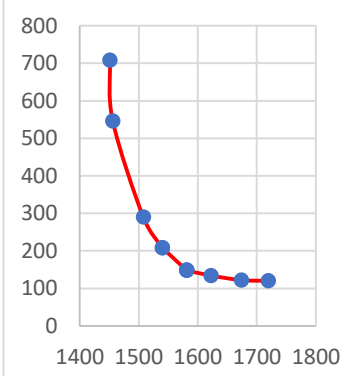
x=0,1..0,5 ile y=0,9..0,5 iken sonuç değişmemekte,

x=0,6..0,8 ile y=0,4..0,2 iken sonuç değişmemektedir.

Senaryo-29 Katsayıları

Tablo B.28. Amaç fonksiyonundaki katsayıların değerlendirilmesi (Sentetik-29)

		x eksen			y eksen			
x	*	A	+	y	*	B	=	Zamaç
0	*	1719	+	1	*	120	=	472
0,1	*	1674	+	0,9	*	122	=	277
0,2	*	1623	+	0,8	*	134	=	432
0,3	*	1581	+	0,7	*	148	=	578
0,4	*	1581	+	0,6	*	148	=	721
0,5	*	1581	+	0,5	*	148	=	865
0,6	*	1540	+	0,4	*	208	=	1007
0,7	*	1540	+	0,3	*	208	=	1140
0,8	*	1508	+	0,2	*	290	=	1264
0,9	*	1456	+	0,1	*	546	=	1374
1	*	1451	+	0	*	708	=	472



Tablo B.28’de 29. sentetik veri kümesi için x ve y katsayıları 0,1 aralıklı olacak şekilde çözülmüş sonuçları yer almaktadır. Elde edilen grafiğe göre; minimizasyon olan amaç fonksiyonuna göre grafik eğrisi azalan yöndedir. Eşitliklerde yer alan A’nın (Toplam iş yükü miktarı) katsayısı arttıkça A tarafının minimizasyonuna daha çok önem verildiği; B’nin (LMM iş yükleri arasındaki fark) katsayısı arttıkça B tarafının minimizasyonunu daha çok önem verildiği elde edilen sonuçlarla da görülmektedir. Ayrıca; grafikte 11 denemede 8 farklı sonuç elde edildiği diğer durumlarda sonuçların değişmediği görülmüştür.

x=0,3..0,5 ile y=0,7..0,5 iken sonuç değişmemekte,

x=0,6..0,7 ile y=0,4..0,3 iken sonuç değişmemektedir.

Senaryo-30 Katsayıları

Tablo B.29. Amaç fonksiyonundaki katsayıların değerlendirilmesi (Sentetik-30)

		x eksen				y eksen			
x	*	A	+	y	*	B	=	Zamaç	
0,1	*	1451	+	0,9	*	292	=	408	
0,2	*	1451	+	0,8	*	292	=	524	
0,3	*	1451	+	0,7	*	292	=	640	
0,4	*	1451	+	0,6	*	292	=	756	
0,5	*	1433	+	0,5	*	304	=	869	
0,6	*	1428	+	0,4	*	312	=	981	
0,7	*	1407	+	0,3	*	352	=	1091	
0,8	*	1400	+	0,2	*	378	=	1196	
0,9	*	1372	+	0,1	*	548	=	1298	
1	*	1352	+	0	*	844	=	1352	

Tablo B.29’da 30. sentetik veri kümesi için x ve y katsayıları 0,1 aralıklı olacak şekilde çözülmüş sonuçları yer almaktadır. Elde edilen grafiğe göre; minimizasyon olan amaç fonksiyonuna göre grafik eğrisi azalan yöndedir. Eşitliklerde yer alan A’nın (Toplam iş yükü miktarı) katsayısı arttıkça A tarafının minimizasyonuna daha çok önem verildiği; B’nin (LMM iş yükleri arasındaki fark) katsayısı arttıkça B tarafının minimizasyonunu daha çok önem verildiği elde edilen sonuçlarla da görülmektedir. Ayrıca; grafikte 11 denemede 7 farklı sonuç elde edildiği diğer durumlarda sonuçların değişmediği görülmüştür.

x=0,1..0,4 ile y=0,9..0,6 iken sonuç değişmemektedir.

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

- Özcan, A.G.** (2022). Application of REBA and Karakuri Kaizen Techniques to Reduce Ergonomic Risk Levels in a Workplace. *Journal of Engineering Sciences and Design*, DOI: 10.21923.
- Özcan, A.G.** (2021). Ergonomics in Automotive Welding Lines and Comparison of Method Output. *Dicle University Journal of Engineering*, 12(4), 645-659.
- Özcan, A.G., Özer, K., Şahin, A., Yiğit, E.** (2021). Debriyaj Pedalı Dayanıklılık Test Cihazının Tasarımı ve Yapımı. 8. *Uluslararası Mühendislik Mimarlık ve Tasarım Kongresi*, Online, Türkiye, 6-7 Aralık 2021.
- Özcan, A.G.** (2020). The Analysis of Ergonomic Risk Factors in a Production Lines with BAUA LMM Methods: An Application for Automotive Industry. 5. *International Scientific and Vocational Studies Congress-Engineering*, Online, Türkiye, 12-15 Aralık 2020.
- Özcan, A.G., Yiğit, E., Toksöz, N.Y.** (2020). Transfer Preslerde Durum İzlemesi ve Bir Kestirimci Bakım Sisteminin Geliştirilmesi. 7. *Uluslararası Bilimsel Araştırmalar Kongresi*, Ankara, Türkiye, 13-14 Mart 2020.
- Özcan, A.G., Peşteli V., Yöntem O.** (2018). Yüksek Mukavemetli Çelik Sacların Kaynaklanabilirliği ve Direnç Spot Kaynağı Parametrelerinin Taguchi Metoduyla Optimizasyonu. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 23(2), 333-350.
- Gürsoy, A., Yöntem, O., Onursal, F.S.** (2016). Faaliyet Tabanlı Maliyet Sistemi ile Doğru Maliyetlendirme Araçları: Otomotiv Sektöründe Bir Uygulama. *Doğuş Üniversitesi Dergisi*, 17(1), 67-81.
- Gürsoy, A., Hatipoğlu, T., Esen, H., Fırlalı, N.** (2014). Forecasting Costs of Tire Mold with Artificial Neural Networks Approach. *CIE44 & IMSS'14 Proceedings*, İstanbul, Türkiye, 14-16 Ekim 2014.
- Baynal K., **Gürsoy A.**, Gülkaç H., Aktel A. (2011). Deney Tasarımı ve Okuma Hızı Optimizasyonunda Uygulama Çalışması. *XI. Üretim Araştırmaları Sempozyumu*, İstanbul, Türkiye, 23- 24 Haziran 2011.

ÖZGEÇMİŞ

İlk, orta ve lise öğrenimini Balıkesir’de tamamladı. 2005 yılında girdiği Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Tekstil Mühendisliği Bölümü’nden 2009 yılında mezun oldu. 2009-2012 yılları arasında, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans öğrenimini tamamladı. Toyotetsu Otomotiv Parçaları firması ArGe Merkezi Proje Yönetimi Bölümünde Müdür Yardımcısı olarak görev yapmaktadır. 2015 yılından beri Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Doktora öğrenimini yapmaktadır.

