

Ergonomik Montaj Hattı Dengeleme Probleminin Konik Skalerleştirme Yöntemiyle
Çözümü

Büşra Nur Yetkin

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Temmuz 2019

Solution of Ergonomic Assembly Line Balancing Problem by Conic Scalarization Method

Büşra Nur Yetkin

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Industrial Engineering

July 2019

Ergonomik Montaj Hattı Dengeleme Probleminin Konik Skalerleştirme Yöntemiyle
Çözümü

Büşra Nur Yetkin

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

Danışman: Prof. Dr. Emin KAHYA

Temmuz 2019

ONAY

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi İslam Altın'ın YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı “Kentsel Suçların Önlenmesine Yönelik Bir Karar Destek Sistemi” başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek oybirliği ile kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Muzaffer Kapanoğlu

İkinci Danışman : -

Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:

Üye : Prof. Dr. Muzaffer Kapanoğlu

Üye : Yrd. Doç. Dr. Tuğba Saraç

Üye : Doç. Dr. Bayram Topal

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Hürriyet ERŞAHAN
Enstitü Müdürü

ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Prof. Dr. Emin KAHYA danışmanlığında hazırlamış olduğum “Ergonomik Montaj Hattı Dengeleme Probleminin Konik Skalerleştirme Yöntemiyle Çözümü” başlıklı YÜKSEK LİSANS tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel etik ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim.

Bu tez çalışması kapsamında Fen ve Mühendislik Bilimleri Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Kurulu’ndan 53893652-299-E.42842 sayılı karar ile izin alındığını beyan ederim.
21/06/2019

Büşra Nur Yetkin

İmza

ÖZET

Montaj hatlarında tekrarlı işler sırasında oluşan statik gövde duruşları, işle ilgili Kas-İskelet Rahatsızlıklarının (KİSR) artmasına neden olarak çalışanların ve hatların verimliliğini etkileyebilmektedir. Dolayısıyla, hat dengeleme problemlerinde çevrim zamanı ve istasyon sayısı gibi kısıtlara ek olarak, montaj istasyonunda yapılması gereken işlemlerin neden olabileceği zorlanma riskleri de dikkate alınmalıdır. Bu tez çalışmasında montaj hattı dengeleme problemi (MHDP) için, çevrim zamanı ve ergonomik risk düzeyleri eşzamanlı dikkate alınarak çok amaçlı bir matematiksel model geliştirilmiştir. Matematiksel modelde hem istasyon zamanını enküçüklemek hem de ergonomik risk skorlarının toplam sapmalarını enküçüklemek amaçlanmıştır. İki amaçtan oluşan çok amaçlı modelin çözümü için ağırlıklı toplam ve konik skalerleştirme yöntemleri uygulanmıştır. Konik skalerleştirme yöntemi, karar vericinin tercihlerini de modele yansıtır ve diğer skalerleştirme yöntemlerindeki gibi dışbükeylik şartı gerektirmez, bu nedenle çok geniş ve NP-zor problemlerde tatmin edici çözümler üretir. Geliştirilen modelin gerçek hayatta nasıl sonuçlar elde edeceğini analiz amacıyla bir beyaz eşya montaj hattında uygulama yapılmıştır. Toplam 32 istasyondan oluşan hat, 108 iş elemanına ayrılmış, yapılan zaman etüdü çalışmalarıyla standart süreler hesaplanmış ve REBA (Rapid Entire Body Assessment) kullanılarak çalışma duruşlarına ilişkin risk skorları belirlenmiştir. İş elemanları en az 2,3 en çok 35,9 saniye sürmekte ve REBA skorları en az 2, en çok 8 değerini almaktadır. Tek modelli ankastre bulaşık makinesi hattının çevrim süresi günlük üretilmek istenen miktara göre 41 saniye olarak belirlenmiştir. Hat önce tek amaçlı olarak istasyon zamanının en küçüklenmesi amacıyla GAMS paket programında çözülmüş ve sonuçlar gösterilmiştir. KSY ergonomik MHDP' de ilk kez kullanılmış, klasik çözüm yöntemlerinin tarayamadığı çözüm alanlarında farklı pareto çözüm elde edilmiştir. Ergonomik riskler dikkate alındığında yüksek riskli istasyon sayısının azaldığı görülmüştür. Çok amaçlı matematiksel model için bir toplam performans göstergesi elde etmek amacıyla iki amaç ağırlıklandırılmış ve bu iki gösterge OMAX (Objektif Matris) ölçüm yöntemi ile değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Montaj Hattı Dengeleme, Ergonomik Risk Değerlendirme, Konik Skalerleştirme, Çok Amaçlı Matematiksel Programlama.

SUMMARY

Static body postures that are induced by the repetitive works in the assembly lines result in ergonomic risks since they provide a basis for growth of Work-related Musculoskeletal Disorders which may affect the efficiency of lines. Therefore, in addition to restrictions caused by cycle time and amount of stations, the potential straining risks due to required job elements must be taken into account. To this end, in this thesis work a multi-objective mathematical model is developed that consider balancing of assembly line cycle time and levels of ergonomic risks, simultaneously. In this mathematical model, it is aimed both to minimize station time and to minimize the total deviations of ergonomic risk scores. Weighted sum method and conic scalarization methods were applied to solve the multi-purpose model consisting of two purposes. The conic scalarization method also reflects the decision-maker's preferences and does not require convexity as in other scalarization methods, thus producing satisfactory solutions to very large and NP-hard problems. To analyse the outcomes of the developed model in real life environment, an application is performed at a home appliance assembly line. The assembly line consisting of a total of 32 stations was divided into 108 work element, and the standard times were calculated by the time studies and REBA (Rapid Entire Body Assessment) risk scores were determined. Work elements take a minimum of 2.3 maximum 35.9 seconds and REBA scores have a minimum of 2 and a maximum of 8. The cycle time of the single model built-in dishwasher line was determined as 41 seconds according to the desired amount to be produced daily. The model is solved in the GAMS packet program for the purpose of minimizing station time and the results were shown. Solving the problem not only single, but also multi-objectively, balancing results are evaluated by OMAX (Objective Matrix) method.

Keywords: Assembly Line Balancing, Ergonomic Risk Evaluation, Conic Scalarization, Multi-Objective Programming.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca verdiği destek ve sağladığı katkılar için saygıdeğer danışman hocam; Prof. Dr. Emin KAHYA' ya, akademik hayata başlama ve devam etme sürecinde ihtiyaç duyduğum destek ve yardımı esirgemeyen sevgili eşim M. Burak YETKİN' e, uygulama yapabilmem için her türlü yardımı sağlayan RENTA Elektrikli Ev Aletleri bulaşık makinesi bölümüne sonsuz teşekkürlerimi sunarım.



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	vi
SUMMARY	vii
TEŞEKKÜR.....	vii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xiii
1. GİRİŞ VE AMAÇ	1
2. MONTAJ HATLARINDA ERGONOMİ	4
2.1. Montaj Hattı Dengeleme Problemi	4
2.1.1. Montaj hattı dengeleme problemlerinin sınıflandırılması	5
2.1.2. Montaj hattı dengeleme problemi çözüm yöntemleri	8
2.2. Ergonomik Risk Değerlendirme	9
2.2.1. Kas iskelet sistemi rahatsızlıkları	10
2.2.2. Ergonomik risk değerlendirme yöntemleri	11
2.2.3. Montaj hatlarında KISR	13
3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	15
3.1. Basit Gözlem Yöntemlerini Kullanan Çalışmalar	16
3.2. Direkt Ölçüm Yöntemleri ve Diğer Yöntemler Kullanılarak Yapılmış Çalışmalar	22
4. MATERYAL VE YÖNTEM	31
4.1. Problemin Tanımı	31
4.1.1. Risk değerlendirme yönteminin seçimi	31
4.1.2. Verilerin toplanması	32
4.2. İş Elemanı ve İstasyonları için Fiziksel Risk Skoru Hesaplanması	33
4.3. Ergonomik Risk Kısıtlarını İçeren Çok Amaçlı Optimizasyon Modeli	34
4.4. Çok Amaçlı MHDP'nin Konik Skalerleştirme Yöntemi Kullanılarak Skalerleştirilmesi	38
4.4.1. Konik skalerleştirme yöntemi	39
4.4.2. Çok amaçlı MHDP'nin skalerleştirilmesi	40
5. BULGULAR VE TARTIŞMA	42
5.1. Geliştirilen Modelin Farklı Yöntemlerle Çözülmesi	42

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
5.2. Elde Edilen Çözümlerin Karşılaştırılması ve Analizi	45
5.3. KSY İle Elde Edilen Çözümün OMAX Yöntemiyle Analizi	49
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	51
KAYNAKLAR DİZİNİ.....	53
EK AÇIKLAMALAR	59
Ek Açıklama-A: Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Kurulu.....	60
Ek Açıklama-B: REBA Risk Değerlendirme Formu	63
Ek Açıklama-C: İş Elemanları İçin Tanım ve Veriler	68
Ek Açıklama-D: İş Elemanları İçin Öncelik Diyagramı	76
Ek Açıklama-E: İstasyon Zamanının Enküçüklenmesi.....	77
Ek Açıklama-F: Çok Amaçlı Matematiksel Modelin KSY ile Enküçüklenmesi	80

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. 8 İş elemanlı bir öncelik diyagramı	5
4.1. İstasyon iş yükü hesabı	34
4.2. İki amaçlı örnek problem için dışbükey olmayan görüntü kümesi.	39
5.1. Örnek problemin ideal ve nadir noktaları.	43
5.2. Pareto etkin çözümlerin oluşturduğu sınır	44
5.3. Konik skalerleştirme yöntemiyle bulunan yeni pareto çözüm	45
5.4. Bulaşık makinesi hattındaki iş elemanlarının süre ve risk düzeylerine göre sınıflandırılması	46

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Cizelge</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. REBA risk derecelendirmesi	13
3.1. Ergonomik riskleri dikkate alan literatürdeki çalışmalar	29
5.1. Her amaç fonksiyonunun optimizasyon değeri ve diğer amaç fonksiyonuna etkisi	43
5.2. Örnek problem için ağırlıklı toplam ile elde edilen çözümler.....	44
5.3. Problem için konik skalerleştirme yöntemiyle bulunan yeni pareto etkin çözüm.....	45
5.4. İstasyon risk düzeyleri	47
5.5. Örnek bir istasyon sonuçları	47
5.6. Çözüm sonuçlarının karşılaştırılması	48
5.7. İki modelin maksimum istasyon zamanı açısından çözüm sonuçları.....	49
5.8. Hattın iki performans göstergesi açısından maksimum değerleri	49
5.9. Performans göstergeleri için 10' lu skala	50
5.10. OMAX yöntemiyle hesaplanan toplam performans	50

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Kısaltmalar

Açıklama

ACGIH	The American Conference of Governmental Industrial Hygienists
ANOVA	Analysis of Variance
ARP	Accumulated Risk Posture
BMHDP	Basit Montaj Hattı Dengeleme Problemi
COMSOAL	Computer Method for Sequencing Operations for Assembly Lines
EASHW	European Agency for Safety and Health at Work
EAWS	Ergonomic Assessment Work-Sheet
GAMS	The General Algebraic Modeling System
GRASP	Aç Gözlü-Rasgele-Adaptif Algoritması
KİSR	Kas-İskelet Sistemi Rahatsızlıkları
KSY	Konik Skalerleştirme Yöntemi
MHD	Montaj Hattı Dengeleme
MHDP	Montaj Hattı Dengeleme Problemi
NIOSH	National Institute for Occupational Safety and Health
OCRA	Occupational Repetitive Actions
OMAX	Objektif Matris Yöntemi
OWAS	Ovako Working Posture Analyzing System
REBA	Rapid Entire Body Assessment
RULA	Rapid Upper Limb Assesment
TT	Takt Time
Vd	Ve Diğerleri
QEC	Quick Exposure Check

1. GİRİŞ VE AMAÇ

Günümüzde sanayileşmenin artmasıyla, bir yandan daha ekonomik ve daha verimli üretim sistemleri oluşturmak bir yandan da yüksek fiziksel çaba gerektiren işlerin neden olduğu rahatsızlıkları azaltmak ve ergonomik anlamda uygun olmayan çalışma koşullarını iyileştirmek kritik bir problem olarak karşımıza çıkmaktadır. İş yerindeki ergonomik risk faktörleri çalışanın sağlığını tehdit eder, iş kazalarına ve meslek hastalıklarına yol açarak çalışanın hayat kalitesini düşürür. İşletmeler gerekli ergonomik standartları sağlamayı, iş gücünde artışa neden olabileceği için külfetli bir düzenleme olarak görmektedir. Ancak yapılan araştırmalar, iyi düzenlenmiş iş yerlerinin çalışanın performansında artış sağlayarak ekonomik hedefleri gerçekleştirme olasılığını arttırdığını göstermiştir. 2008 yılında ergonomik düzenlemelerin maliyet-fayda analizi üzerine yapılan bir çalışmaya göre, kas-iskelet sistemi rahatsızlıklarının (KİSR) azalması, işe devam etme sonucu iş günü kayıplarında düşüşler ayrıca üretimde artan verimlilik ve kalite sayesinde, ergonomik yatırımların geri dönüş süresinin bir yıldan daha az sürede gerçekleştiğini göstermiştir (Otto ve Battaia, 2017).

Modern üretim sistemlerinde artan otomasyona rağmen her duruma cevap veren, makul maliyetlerle esnek ve güvenilir çözümler bulunamamaktadır. Manuel montaj hatları, katma değeri yüksek işlemlerden oluşması, nihai ürün pazarına bağlı olması, yüksek son ürün kalitesi ve belirsiz müşteri taleplerine cevap verebilecek üretim ve süreç esnekliğini sağlaması nedeniyle hala en verimli üretim yöntemlerinden biri olarak görülmektedir.

Son yıllarda birçok şirket, daha esnek, daha verimli, daha yüksek kalite seviyesine sahip olmak ve taşımaları, nihai ürün stoklarını azaltmak amacıyla montaj hatlarına dönüş yapmışlardır. İşçilik maliyetinin düşük olduğu ülkelerde, gerekli esnekliği sağlayacak montaj hatlarından maksimum üretkenliği elde etmek için klasik montaj hattı dengeleme sorunları oldukça önemsenmektedir. Bu nedenle, manuel montaj hatları ve montaj hattı dengeleme sorunları sadece gelişmekte olan ekonomiler için değil, gelişmiş ülkeler için de önemli bir yere sahiptir.

Montaj hattı; malzemelerin bir hat boyunca işgücü yardımıyla ya da konveyör gibi uygun bir otomatik malzeme aktarma sistemi ile transfer edilmeleri ve parça üzerindeki işlemlerin de bir hat boyunca sıralı iş istasyonlarında yapılması olarak tanımlanabilir.

Manuel montaj istasyonlarında operatörler, çoğunlukla üst beden ve kolları kullanarak, istasyonda veya istasyonlar arasında yürüme, montajı yapılacak malzemelerin depolandığı birim yüklerden malzeme getirme ve montaj işlemlerini gerçekleştirir. Temel montaj faaliyetlerinde KİSR'ye neden olabilecek; benzer işlerin kısa çevrimlerde çok sayıda tekrarlı hareketlerle yapılması, yüksek seviyede fiziksel kuvvet gerektiren işlemler ve uygun olmayan vücut duruşlarına sık rastlanmaktadır. Bu nedenle son yıllarda montaj operatörlerinin fiziksel zorlanmaları hakkında yapılan çalışmalar ve operatörlerin maruz kaldığı KİSR önem kazanmıştır.

European Agency for Safety and Health at Work (EASHW) (2012)' ye göre, mesleklerin %30' u uygun olmayan çalışma duruşları, ağır yük kaldırma ya da tekrarlı işlerden oluşmakta ve KİSR tüm meslek hastalıkları içinde %40 oranla en yaygın meslek hastalığı olmaktadır. Dördüncü Avrupa Çalışma Koşulları Anketi'ne göre, makine operatörlerinin ve montaj operatörlerinin % 35'i düzenli sırt ve kas ağrıları olduğunu bildirmektedirler (Schneider ve Irastorza, 2010).

Manuel montaj işleri ve KİSR' nin meydana gelmesi arasında bu şekilde doğrudan bağlantı olması ve gerçek hayatta manuel montaj hatlarının verimliliğinin çalışanlara bağlı olması, montaj hattı tasarımı ve istasyonların ergonomik düzeyi arasında da direkt bir bağlantı olduğunu göstermektedir. Bir montaj hattı tasarımında verimlilik ve ergonomi RİSK düzeylerini en çok etkileyen faktör montaj işlerinin istasyonlara atanma problemidir.

Montaj hatları için çok sayıda formülasyon ve algoritma geliştirilmesine rağmen, bunların birçoğu üretim ortamındaki uygulamalarda gerçeği yansıtmamaktadır. Montaj hattı dengeleme problemlerinde (MHDP) genellikle çevrim zamanı, istasyon sayısı, işin monotonluk düzeyi gibi kısıtlar dikkate alınmış, ürün çıktısı ya da üretim maliyetleri düşürülerek hattın verimliliğinin artırılması hedeflenmiştir. Ancak montaj hattı dengeleme (MHD) büyük yatırımlar gerektirdiğinden uzun vadeli bir karar verme problemidir ve birçok faktörden kaynaklanabilecek olası sorunların da hesaba katılması gerekmektedir.

Bu nedenlerden dolayı araştırmacılar MHDP' de risk faktörlerine değinmeye ve yeni kısıtlar ekleyerek farklı modeller geliştirmeye odaklanmışlar ve literatüre ergonomik riski ifade edebilen birçok farklı bakış açısı kazandırmışlardır.

Bu çalışma kapsamında emek yoğun montaj hatlarında verimlilik parametrelerine ek olarak montaj işlerinin çalışan sağlığını olumsuz etkileyebilecek risklerini de dikkate almak amaçlanmıştır. Bu amaçla MHDP' de kullanılabilecek ve çalışanların tekrarlı montaj işleri sırasında maruz kaldığı riskleri dikkate alan bir çok amaçlı matematiksel model geliştirilmiştir. İşler istasyonlara atanırken sadece çevrim süresi ve öncelik ilişkileri değil, işlerin operatörlerin üzerinde oluşturduğu zorlanma da hesaba katılmıştır. Bir beyaz eşya fabrikasının toplam 32 istasyon ve 108 iş elemanından oluşan bulaşık makinesi montaj hattında zaman etüdü çalışması ile standart süreler hesaplanmış, öncelik ilişkileri oluşturulmuştur. Buna ek olarak, REBA yöntemi ile her bir iş elemanının oluşturduğu çalışma duruşuna ilişkin risk düzeyleri hesaplanmış, işlem süreleri ile ağırlıklandırılarak yeni bir kümülatif risk skoru oluşturulmuştur. Hattın istasyon zamanını enküçüklemek ve istasyonların ergonomik risk sapmalarını enküçüklemek amaçlarından oluşan iki amaçlı bir model geliştirilmiştir. Çok amaçlı oluşturulan model bulaşık makinesi hattı verileri kullanarak, konik skalerleştirme yöntemi ile çözülmüştür. Geliştirilen modelin karşılaştırılması için; istasyon zamanını enküçükleyen tek amaçlı model de probleme uygulanarak GAMS ile çözülmüştür. İki dengeleme sonucu oluşan istasyonların risk seviyelerine göre sonuçlar değerlendirilmiştir. Bir performans ölçüm yöntemi olarak Objektif Matris Yöntemi (OMAX) uygulanmış ve iki amaç için hattın toplam performans değeri hesaplanmıştır.

Bu tez çalışmasının ikinci bölümünde genel MHDP kavramları ve ergonomik risk değerlendirme yöntemleri açıklanacaktır. Üçüncü bölümde ergonomik riskleri dikkate alan MHDP hakkında yapılan literatür araştırmasına yer verilecektir. Yapılan çalışma ve yöntemler tüm aşamalarıyla dördüncü bölümde anlatılacaktır. Beşinci bölümde bir fabrika uygulamasında verilerin toplanması ve modelin uygulanması tüm aşamalarıyla anlatılacak ve çalışma sonuçlarına ilişkin analizlere yer verilecektir. Sonuçların değerlendirilmesi ile gelecek çalışmalar altıncı bölümde sunulacaktır.

2. MONTAJ HATLARINDA ERGONOMİ

Bu bölümde MHDP ile ilgili teorik kavramlar açıklanmış, literatürde yaygın olarak yapılan sınıflandırma çeşitleri sunulmuştur. Ayrıca MHDP' de kullanılan bazı ergonomik risk değerlendirme yöntemleri de verilmiş ve bunlar arasından bazı basit gözlem yöntemleri ve çalışmada kullanılan REBA yöntemi açıklanmıştır.

2.1. Montaj Hattı Dengeleme Problemi

MHD, bir seri üretim sisteminde işlemlerin istasyonlara atanmasına karar verme süreci olarak tanımlanabilir.

MHDP yalın üretim sisteminde oldukça önemli yere sahip (polinom zamanda çözünemeyen) NP-zor, kombinatorik bir yöneylem araştırması optimizasyon problemidir ve bir ürünü monte/ demonte etmek için gerekli olan iş elemanları kümesini, tutarlı ve etkin bir şekilde hattı oluşturan iş istasyonlarına atamaya odaklanır. Genellikle operatörler ve gerekli ekipmanlardan oluşan bu iş istasyonları, seri olacak biçimde ardışık olarak dizilir ve sabit hızla ilerleyen bir taşıma sistemi ile birbirine bağlanır. Bu sistem ile her iş istasyonunun atanan iş elemanlarını tamamlamak için sabit bir çevrim zamanı vardır. Problem için gerekli olan bazı tanım ve kavramlar aşağıda açıklanmıştır.

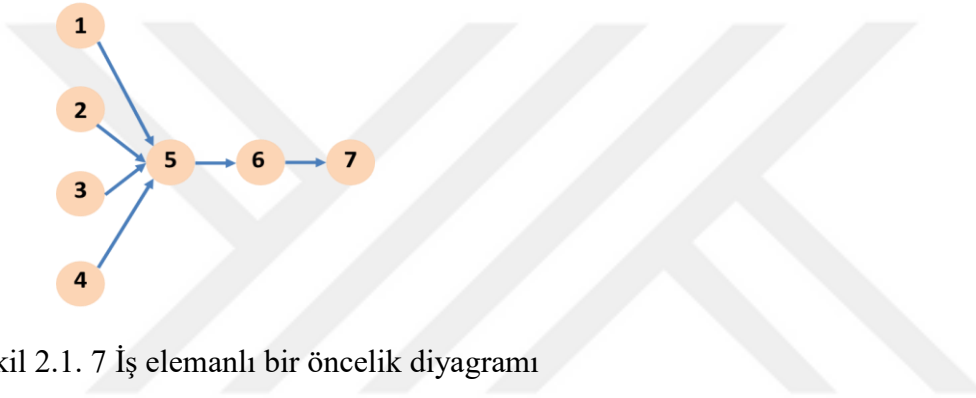
İş Elemanı: Montaj istasyonunda yapılacak işlemlerin, bölünebilecek en küçük parçalarına iş elemanı denir.

Çevrim Zamanı: Çevrim zamanı, doğrudan gözlemle süre tutulduğunda, bir operatörün istasyonda bütün iş elemanlarını tekrar etmeye başlamadan önce tamamlaması için gereken süredir. Aynı zamanda hedeflenen üretim miktarını gerçekleştirmek için her bir istasyonda izin verilen en büyük süredir. Bu değer, günlük hedeflenen üretim miktarını günlük üretim süresine bölerek bulunabilir. Çevrim zamanı, işlem zamanı en büyük olan iş elemanı süresinden daha küçük olamaz.

İstasyon zamanı: Bir istasyona atanmış iş elemanlarının işlem zamanlarının toplamıdır.

İstasyon boş zamanı: Her bir istasyon için, çevrim zamanı ve istasyonda bulunan iş elemanlarının toplam işlem zamanı arasındaki farktır.

Öncelik Diyagramı: Bir ürünün montajı için yapılacak iş elemanlarının işlem sıraları arasındaki ilişkiyi gösterir, düğümler veya grafiklerle temsil edilebilir. Ürünler bu kurala uymak zorundadır, ürünün sonraki istasyona taşınabilmesi için, önceki istasyondaki işlemleri tamamlanmalıdır. Eğer j işi, i işi bitmeden başlayamıyorsa bir (i,j) düğümü oluşturularak bu ilişkiler Şekil 2.1 ' deki gibi bir öncelik diyagramında veya matris şeklinde gösterilebilir.



Şekil 2.1. 7 İş elemanlı bir öncelik diyagramı

Hat etkinliği: Hattın etkinliğinin bir ölçüsü olarak, iş elemanlarının işlem zamanları toplamının bir ürünün hatta geçirdiği toplam zamana bölünmesiyle bulunur.

MHDP' nin bilinen ilk formülasyonu Salveson (1955) tarafından yapılmıştır. Doğrusal sıralı iş istasyonlarına $M = \{1, 2, \dots, k, \dots, m\}$, bir iş elemanı kümesinden $I = \{1, 2, \dots, I, \dots, |I|\}$, öncelik diyagramı P ile belirttiği iş sıralarına uygun olacak şekilde atamalar yapmıştır. Burada amaç, çevrim zamanı ve öncelik ilişkileri kısıtlarına uyarak, gerekli istasyon sayısını enküçükmektir. Bu problem Baybars (1986) tarafından Basit Montaj Hattı Dengeleme Problemi (BMHDP) olarak adlandırılmıştır.

2.1.1. Montaj hattı dengeleme problemlerinin sınıflandırılması

Montaj hatları literatürde yaygın olarak, model sayısı, hat yerleşim tipi ve amaç çeşitleri kriterlerine göre sınıflandırılmaktadır. Bu sınıflandırma çeşitlerinden aşağıda kısaca bahsedilmiştir.

Ürün Model Sayısına Göre Montaj Hatları; bu kritere göre montaj hatları; tek modelli, çok modelli ve karışık modelli hatlar olarak ayrılmaktadır.

Tek modelli hatlar, basit montaj hatları olarak da bilinir ve tek bir ürün veya model çeşidi üretilir. Bu tip hatların tasarımı çok basittir ancak farklı modellerin üretimi için uygun esneklik sağlayamaz.

Karma modelli hatlar, temel bir ürün ailesinden birkaç farklı model aynı anda karışık olarak üretilmektedir. Modellerin ana işlemleri oldukça benzerdir ancak bu tip montaj hatlarında oldukça karmaşık tasarım ve işlem sorunları meydana gelmektedir.

Çok modelli hatlar, değişik modeller ayrı gruplar halinde ve farklı zamanlarda yapılır. Bu hatlar farklı gruplar arasında geçiş yaparken bir hazırlık zamanı gerektirmektedir.

Hat yerleşim tipine göre montaj hatları; literatürde düz montaj hatları, paralel montaj hatları ve U tipi montaj hatları olmak üzere üç kategori olarak sınıflandırılır.

Amaç fonksiyonuna göre MHDP' lerde; farklı performans ölçütleri veya birden fazla performans ölçütü aynı anda en iyilenmek istenebilir. Literatürde en çok kullanılan üç amaç fonksiyonu aşağıdaki gibidir:

Belirli bir çevrim zamanı için istasyon sayısını (m) en küçükmek. Bu amaç literatürde en çok kullanılan amaçtır ve MHDP-1 şeklinde gösterilir. İstasyon sayısı sabitken hattın çevrim zamanını(c) en küçükmek. MHDP-2 şeklinde gösterilir.

Üçüncü amaç ise, hat etkinliğini en büyükmek ya da istasyon sayısı ve çevrim zamanı çarpımını ($m.c$) en küçükmek. Doğrusal olmayan bir yapıda olduğu için uğraşması en zor ve literatürde en az kullanılan amaçtır (Wei ve Chao, 2011).

Bu performans kriterlerinin yanı sıra sıklıkla kullanılan diğer amaç fonksiyonlarından bazılarını şöyle sıralayabiliriz (Battaia ve Dolgui, 2013).

Hat etkinliğinin başka bir ölçüsü olan sistem kullanımının (Utilization, U) enbüyüklenmesidir ve gerekli olan asgari operator sayısının fiili olarak atanmış operator sayısına oranı ile bulunabilir.

Bir diğer amaç da, düzgünlük indeksini enküçükmektir. Montaj hattının denge kalitesinin değerlendirilmesi için aşağıdaki performans kriterleri kullanılabilir:

$$\text{Mutlak/ karekök alınmış/ ortalama sapmalar} \quad \left| \sum_{j=1}^{|J|} t_j X_{j,k} - T_{ort} \right|, \\ \sqrt{\sum_{j=1}^{|J|} t_j X_{j,k} - T_{ort} , (\sum_{j=1}^{|J|} t_j X_{j,k} - T_{ort})^2}$$

En büyük veya ortalama istasyon zamanlarını hedeflenen çevrim zamanı ile karşılaştırmak ve aynı ürün için tüm istasyonlardaki istasyon zamanı sapmaları, aynı istasyondaki farklı ürünler için istasyondaki sapmalar veya her iki tür sapmaların kullanılması.

Montaj hatlarının sınıflandırılması sayesinde, üretimin miktarı ve çeşidine göre en uygun hat yerleşimi seçilebilir. Yine buna göre hat dengeleme problemleri ve amaçları oluşturulabilir. Hem en başta hat kurulurken uygun konfigürasyonların seçiminde, hem de mevcut hatların iyileştirme çalışmalarında sistemi daha iyi anlayabilmek için montaj hatlarındaki sınıflandırmalar önemli yere sahiptir.

BMHDP, tek bir ürün tipi için düz bir montaj hattını dikkate alır. Bu problem diğer hat konfigürasyonları, ürün çeşitleri ve performans gereksinimlerine göre genelleştirilmiştir. Her yeni amaç fonksiyonu, kısıtlar ve kararlar yeni bir MHDP formülasyonu oluşturmuştur. Böylelikle klasik MHDP, demontaj hattı dengeleme problemi, transfer montaj hattı dengeleme problemi gibi çok sayıda tanım ortaya çıkmıştır.

BMHDP için temel varsayımlar aşağıdaki gibidir (Gökçen, 1994).

- Düz bir montaj hattı üzerinde sıralanmış istasyonlarda tek bir ürünün seri üretimi gerçekleştirilir.
- İşlem zamanları deterministiktir.

- Öncelik ilişkileri bilinmektedir.
- Bir iş elemanı, öncelik diyagramına göre kendinden önce gelen iş tamamlanmadan başlayamaz.
- Bir iş elemanı sadece bir istasyonda yapılabilir, daha fazla istasyona bölünemez.

BMHDP farklı amaç fonksiyonları ile çeşitlendirilerek birkaç versiyonu oluşturulmuştur, literatürde en çok kullanılan amaçlar aşağıdaki gibidir.

BMHDP-1: Belirli bir çevrim zamanında gerekli istasyon sayısının en küçükleme amaçlanır.

BMHDP-2: Belirli bir istasyon sayısında çevrim zamanının en küçükleme amaçlanır.

BMHDP-E: Burada istasyon sayısı ve çevrim zamanı bir değişken olarak alınır ve hattın etkinliğinin en büyükleme amaçlanır.

BMHDP-F: Belirli çevrim zamanı ve istasyon sayısında uygunluk kontrolü yapılır.

2.1.2. Montaj hattı dengeleme problemi çözüm yöntemleri

Yöntemler kesin çözüm yöntemleri ve yaklaşık çözüm yöntemleri olmak üzere iki kategoride incelenir. BMHDP bile NP-zor olduğu için, optimal çözümü elde etmek için gerekli çözüm zamanı ele alınan problemin büyüklüğü ile üstel olarak artmaktadır. Bu nedenle büyük ölçekli problemler için yaklaşık çözüm sunan yöntemlere ihtiyaç duyulmaktadır. Bunlara ek olarak benzetim de hattın dinamik yapısını değerlendirmek amacıyla kullanılabilir.

Kesin Yöntemler: Bu yöntemler; 0-1 tamsayılı programlama, karma tam sayılı programlama, dal-sınır algoritması, dinamik programlama, amaç programlama, doğrusal olmayan tamsayılı programlama gibi yöneylem araştırması teknikleridir.

Sezgisel Yöntemler: Belirli kural adımları ile çeşitli prosedürler uygulanarak elde edilir. Elde edilen çözüm en iyi çözümü garanti etmez ancak kabul edilebilir, en iyiye yakın çözümlerdir. Günümüze kadar çok sayıda sezgisel yöntem geliştirilmiştir. Bunlara örnekler aşağıda yer almaktadır:

- Literatürde geçerliliği kabul edilmiş bazı sezgisel yöntemler:
 - Aşamalı sırayla çözüm
 - Konum ağırlıklı dengeleme tekniği
 - Öncelik diyagramı ile çözüm
 - COMSOAL (Computer Method for Sequencing Operations for Assembly Lines) Yöntemi
 - İki aşamalı dengeleme tekniği
 - Aday matris ile çözüm
 - İlişkili etkinlik yöntemi
 - Kilbridge-Wester yöntemi
 - Gruplama yöntemi
 - En büyük aday yöntemi
- olarak sıralanabilir.

Yukarıda verilen sezgisel yöntemler dışında genetik algoritma, karınca kolonisi optimizasyonu, tabu arama algoritması ve tavlama benzetimi gibi metasezgisel yöntemler de son yıllarda MHDP için kullanılmaya başlanmış ve yeni yaklaşımlar getirilmiştir.

2.2. Ergonomik Risk Değerlendirme

Çalışma duruşlarından kaynaklanan KİSR'i tespit etmek amacıyla geliştirilen çok sayıda ergonomik risk değerlendirme yöntemi bulunmaktadır. Bu nedenle yapılan işe, ortama ve amaca uygun şekilde, KİSR' i değerlendirmek için doğru ergonomik risk değerlendirme yönteminin seçimi önem kazanmıştır. Bu bölümde KİSR genel hatlarıyla açıklanacak ve bazı risk değerlendirme yöntemleri sunulacaktır.

2.2.1. Kas iskelet sistemi rahatsızlıkları

Duruş (postür); vücudun, baş, gövde, kol ve bacak uzuvlarının boşluktaki konfigürasyonu, hizalanması olarak tanımlanmaktadır. Çalışma duruşunu ise bu tanıma bağlı olarak, vücut, baş, gövde, kol ve bacakların yapılan işe ve işin özelliklerine göre hizalanması şeklinde tanımlanmaktadır (Li ve Haslegrave, 1994). Her insanın antropometrik özellikleri farklıdır ve bu kapasitenin izin verdiği ölçüde verimli bir fiziksel çaba gösterebilirler. Duruş, stres ve iş sırasında duyulan rahatsızlığın en az seviyeye düşürülmesi ve sağlıklı çalışmayı sağlamak, işin performans değeri kadar önemlidir. Aksi takdirde eğilme, bükülme, uzanma gibi kas iskelet sistemini zorlayıcı hareketler ve duruş bozuklukları ortaya çıkar. Eğer duruş doğru değilse, bu operatöre stres, yorgunluk ve ağrı olarak geri döner. Çalışan kasları kendini yenileyene kadar çalışmasına ara vermek zorunda kalır (Akay vd., 2003).

KİSR, kaslar, sinirler, tendonlar, eklemler ve damar sistemi gibi vücudun farklı yapılarında meydana gelen çeşitli rahatsızlıklardır. Karpal tünel sendromu, tendonit, torasik çıkış sendromu, gergin boyun sendromu bu rahatsızlıklara örnektir. Bu rahatsızlıklar genellikle kademeli olarak yavaş yavaş gelişen ve bahsedilen vücudun farklı yapılarının aşırı ve tekrarlayan kullanımı nedeniyle oluşmaktadır. Kaza nedeniyle oluşan ani yaralanmalar KİSR olarak kabul edilmez. KİSR bükme, kavrama, tutma, uzanma gibi el ve kol hareketlerinden kaynaklanmaktadır. Bu hareketler günlük hayatta birçok faaliyette kullanılır ve bir problem oluşturmaz. Ancak hareketlerin genellikle kuvvetli bir şekilde ve yüksek hızda sürekli tekrarlanması, aralarında toparlanma için yeterli zaman olmaması bu tür hareketleri tehlikeli hale getirmektedir (CCOHS, 2019)

Kas İskelet Sistemi Rahatsızlıklarına:

- monoton duruşlar,
- sürekli ve tekrarlı hareketler,
- işin süresi ve sıklığı,
- uygunsuz duruşlardan dolayı meydana gelen zorlanmalar,
- uygun harekete izin vermeyen işler ve
- titreşim, sıcaklık

neden olmaktadır (Akay vd., 2003).

KİSR'na sebep olan risk faktörleri; işe bağlı faktörler, bireysel faktörler ve psikososyal faktörler olarak sınıflandırılmaktadır. İşe bağlı risk faktörleri; çalışma esnasındaki tekrarlayıcı hareketler, uygun olmayan duruşlar, ağır yük kaldırma ve işle ilgili eğitimin yetersizliği gibi faktörlerdir. Bireysel risk faktörleri; kişinin cinsiyeti, yaşı, kilosu, fiziksel kapasitesi ile ilgili olmaktadır. Psikososyal risk faktörleri ise takım çalışması eksikliği, sosyo-ekonomik seviye ve eğitim seviyesi gibi faktörlerdir (Bernard, 1997).

2.2.2. Ergonomik risk değerlendirme yöntemleri

Çalışma esnasında uygun olmayan duruşlar ve tekrarlayan hareketler zorlanmalara ve hatta KİSR' e neden olmaktadır. Uygun olmayan çalışma duruşlarının iyileştirilmesi, zorlanmaların azaltılması çalışanın sağlığı ve aynı zamanda iş performansı açısından oldukça önemlidir (David, 2005).

KİSR riskini değerlendirmek için kullanılan yöntemler;

- Kişisel anket yöntemleri,
- Sistematik gözlemlere dayalı yöntemler ve
- Direkt ölçüm yöntemleri

olarak sınıflandırılabilir (Chiasson vd., 2012; Mert, 2014;)

Basit Gözleme Dayalı Yöntemlerden bazıları:

- Amerika Ulusal İş Güvenliği ve Sağlığı Enstitüsü Yük Kaldırma Endeksi (NIOSH Lifting Equation),
- Hızlı Üst Uzuv Değerlendirmesi (Rapid Upper Limb Assessment - RULA),
- Mesleki Tekrarlamalı Hareketler İndeksi (Occupational Repetitive Actions Index - OCRA),
- Hızlı Maruziyet Değerlendirme Yöntemi (Quick Exposure Check - QEC),
- Hızlı Tüm Vücut Değerlendirmesi (REBA),
- Ovako Çalışma Duruşları Analiz Sistemi (Ovako Working Posture Analyzing System - OWAS).

NIOSH: Bu yöntem kaldırma operasyonları için önerilen yük sınır değeri belirler (NIOSH, 1981). Yük kaldırma/ indirme esnasında yükün ağırlığı, yükün yatay ve dikeydeki konumu, taşınma uzaklığı, kaldırma frekansı, süresi ve kavrama sınıflamasını dikkate alır.

OCRA indeksi: OCRA indeksi (Colombini, 1998; Occhipinti, 1998) işlemi analiz ederek elde edilen Teknik Hareket Sıklığı ve Önerilen Referans Sıklık arasındaki orana dayanmaktadır. Önerilen sıklık değeri, hareketlerin sıklığı ve tekrarlanabilirliği, kuvvet kullanımı, duruş, yetersiz dinlenme periyodu ve ek risk faktörleri dikkate alınarak elde edilir. Bu yöntem, vücudun sağ ve sol taraflarının her biri için, omuz, dirsek, bilek ve el bölgelerini dikkate alan iki ayrı indeks sağlar.

QEC: Gözlemcinin değerlendirmesini ve çalışanın kapalı sorulara verdiği cevaplarla gereksinimlerini birleştirerek; bel, omuz, kol, boyun ve bilek bölgeleri için KİSR' ye yol açan risk faktörlerinin değerlendirilmesini sağlayan bir yöntemdir (Li ve Buckle, 1999a) Tüm vücut için genel bir puana ek olarak, değerlendirilen vücut bölgeleri için de bir risk indeksi sağlar. Değerlendirme, psikososyal risk faktörleri ve titreşime maruz kalmanın yanında, duruş, hareket sıklığı, ve çabayı da dikkate alır.

OWAS: Vücut duruşlarını sırt için 4 pozisyon, kol için 3 pozisyon ve bacak için 7 pozisyon tanımlayarak sınıflandırır ve her bir duruşun maruz kalma süresi ve sıklığını da değerlendirir. Gözlemler sabit zaman aralıklarında örnekleme yoluyla gerçekleştirilir.

REBA: REBA yöntemi, Hignett ve McAtamney (2000) tarafından Nottingham'da geliştirilen, statik veya değişken tüm vücut hareketlerinin duruş analizinin yapılması için kullanılan gözleme dayalı bir yöntemdir. Tüm vücut hareketleri sırasında duruşların analiz edilerek puanlanmasını ve böylece elde edilen sayısal değerle mesleki açıdan risk yaratabilecek duruşların belirlenmesini sağlar. REBA için işler seçilirken çalışma sırasında çok sık tekrarlanan, fazla zaman alan, yüksek kuvvet veya kas faaliyeti gerektiren, çalışanı rahatsız eden, uygunsuz olarak tanımlanabilecek ve iyileştirilebilecek duruşlar ele alınmalıdır.

REBA yönteminin uygulanmasında ilk olarak gövde, boyun ve bacakların duruşu açısal olarak gözlemlenir ve puanlanır. Yönteme ait Ek Açıklama-B' de bulunan A tablosundan gövde, boyun ve bacakların duruş puanları ile bir skor elde edilir. Bu skora duruş sırasında uygulanan kuvvet veya taşınan yüke ilişkin puan eklenir. Böylece A skoru elde edilmiş olmaktadır.

Diğer yandan üst kol, alt kol ve bileklerin duruşu analiz edilir ve puanlanır. A skoru ile benzer şekilde Ek Açıklama-B' de bulunan B tablosundan üst kol, alt kol ve bileklerin duruş puanları ile bir puan elde edilir ve bu puana kavramaya ilişkin puan eklenir, böylece B skoru hesaplanmaktadır.

A ve B skorları kullanılarak C tablosundan elde edilen değere, son olarak aktivite skoru eklenerek duruşun REBA skoru elde edilmektedir.

Hesaplanan REBA skoru ile ele alınan çalışma duruşunun risk seviyesi ihmal edilebilir, düşük, orta, yüksek ve çok yüksek risk olmak üzere derecelendirilmektedir. Risk seviyeleri ve her seviyeye göre alınması gereken önlem dereceleri Çizelge 2.1'de görülmektedir (Sue ve McAtamney, 2000).

Çizelge 2.1. REBA risk derecelendirmesi

Derece	REBA Skoru	Risk Seviyesi	Önlem
0	1	İhmal Edilebilir	Gerekli değil
1	2-3	Düşük	Gerekli olabilir
2	4-7	Orta	Gerekli
3	8-10	Yüksek	Kısa zaman içerisinde gerekli
4	11-15	Çok Yüksek	Hemen gerekli

2.2.3. Montaj hatlarında KİSR

Üretimde montaj işlemleri, insan gücüne en fazla ihtiyaç duyulan aşamalardan biridir. Bu aşamada yapılan bazı işler, çalışanları bedensel olarak zorlayan veya rahatsız eden duruşlar oluşturabilmektedir. Çalışma sırasında uzun süre ayakta kalma, çömelme, eğilme, uzanma veya dönme gibi durumlar montaj işlerinde gözlemlenen ve çalışanların sağlığını ve iş performansını olumsuz yönde etkileyen duruşlardır. Montaj hatlarında işler genelde monoton olduğundan ergonomik açıdan uygun olmayan bu çalışma duruşları gün içinde tekrarlanmaktadır.

Ayakta durma, eğilme, uzanma ve bu duruşlarda bir süre sabit olarak kalma kaslarda kan akışını azaltmaktadır. Kan akışının azalmasıyla oksijensiz kalan bacak, sırt, bel, boyun ve kol kaslarında yorgunluk ve ağrı oluşabilmektedir. Bu nedenle bir montaj masasında uzun süre benzer durumlarda çalışmak zorunda kalan çalışanların yaşadığı yorgunluk ve ağrılar, daha sonra kas iskelet sistemi rahatsızlıklarına dönüşmektedir.

İşle ilgili kas-iskelet sistemi bozukluklarının ve insan hatasının önlenmesi için risk değerlendirmesi gerekmektedir. Bazı fiziksel iş yükleri, uygun olmayan vücut duruşu veya ağır yükler nedeniyle hat üretim sistemlerinde yapılan montaj çalışmalarından kaynaklanmaktadır. Fiziksel iş yükünün ölçülmesi, iş yükünün azaltılmasına, iş güvenliğinin artırılmasına ve işçi moralinin iyileştirilmesine katkı sağlar.

3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

MHDP' yi ilk olarak Salveson (1955) çalıştıktan sonra, günümüze kadar çok fazla sayıda makale yayınlanmıştır. MHD ile ilgili literatür çok kapsamlı ve çok çeşitli prosedürlerde olduğu için burada sunmak makul değildir. Bu konuda Baybars (1986), Ghosh ve Gagnon (1989), Erel ve Sarin (1998), Becker ve Scholl (2006) ve Battaia ve Dolgui (2013) 'ün yaptığı detaylı inceleme ve değerlendirme makaleleri okunabilir.

Montaj hatlarında KİSR' yi önlemeye çalışan yaklaşımlar iki kategoriye ayrılabilir. İlk kategori fiziksel iş yükünü azaltmak amacıyla çalışma koşullarının iyileştirilmesidir. Bu yaklaşımda ürün tasarımında veya işlemlerin yapılış yönteminde değişiklikler yapılabilir. Bunlara ek olarak, montaj masası yüksekliğinin ayarlanması, kullanılan araç-gereçlerin ergonomik olarak tasarlanması, üretim hızının düşürülmesi, uygun olmayan duruşların, aşırı güç sarfetmenin ve titreşimin önlenmesi gibi düzenlemelerin yapılmasını içerir. Diğer kategori ise, çalışanların yaptığı işlemlerin çeşitlendirilmesidir. Böylece, vücudun aynı bölgelerinin tekrarlı olarak kullanılması önlenir ve KİSR' ye neden olan fizyolojik zorlanma hafifletilir (Kedlaya ve Kim, 2011). Bu kategoride iş ve işçi rotasyonu, işin genişletilmesi ve işlerin farklı şekillerde atanması gibi yaklaşımlar bulunur. Hem hattın verimliliğini hem de ergonomik risk düzeyini dikkate alan en etkili uygulama montaj hattı dengeleme esnasında çevrim zamanı, istasyon sayısı gibi ekonomik faktörlerin yanında ergonomik risk faktörlerini de dikkate almaktır.

Bu bölümde, tez çalışmasının konusunu oluşturan ergonomik MHDP ve çözüm yöntemleri ile ilgili literatürden örnekler sunulmuştur. Çalışmalarda hangi tip montaj hatlarında nasıl ergonomik analizler yapıldığı ve çözüm yaklaşımlarının nasıl uygulandığı anlatılmıştır.

MHDP literatürde çok fazla çalışılmasına rağmen bu probleme ergonomik risklerin dahil edilmesi konusunda literatürdeki çalışmalar kısıtlıdır. Özellikle son yıllarda montaj hatlarından kaynaklanan sağlık sorunlarının fark edilmesiyle oldukça ilgi görmeye başlayan konulardan biri olmuştur. Bu bölümde, erişilebilir literatürden mevcut çalışmalar sunulmuştur.

Literatürde yapılan çalışmalarda, ergonomik riskin dengeleme problemine dahil edilmesinde farklılıklar vardır. Bu çalışmada, literatürde konuya ilişkin yapılan çalışmalar ergonomik riski basit gözlem yöntemleriyle dikkate alan ve enerji tüketimi gibi direkt ölçüm yöntemlerini kullanan çalışmalar olmak üzere iki grupta incelenmiştir.

3.1. Basit Gözlem Yöntemlerini Kullanan Çalışmalar

Bu bölümde, literatürde yaygın olarak kullanılan REBA, OCRA, OWAS ve NIOSH gibi basit gözlem yöntemleriyle yapılan çalışmalar sunulmuştur. Bu yöntemler ile çalışanın toplam yorgunluğu ve zorlanması direk ölçülemediği için MHDP' ye dahil edilirken farklı yöntemler geliştirilmiştir.

Colombini ve Occhipinti (2006), montaj hatlarında OCRA indeksini de hesaba katarak, istasyon sayısı arttırılmadan yeniden düzenlenerek dengeleme yapılabileceğini göstermiştir. İstasyon sayısı 10 olan bir hatta, 61 adet ürün üretilirken mevcut ortalama OCRA indeksi 2.3 hesaplanmıştır. Yeniden alternatif dengelemeler denenerek, istasyon sayısı arttırılmadan ve riskli istasyon sayısında %25 azalma sağlayarak 69 ürün üretiminin gerçekleştirilebileceği görülmüştür.

Otto ve Scholl (2011), MHDP-1 için ergonomik riskleri modele farklı şekillerde entegre etmeyi denemişlerdir. Literatürde en sık uygulanan yaklaşım olan, maksimum izin verilen ergonomik riskin kısıt olarak modele eklenmesi ve ergonomik riskin kısıt olarak değil amaç fonksiyonu ile modele eklenmesi incelenmiştir. İstasyon sayısı ve ergonomik risk arasında uzlaşık çözümlerin bulunması için iki amacı ağırlıklı toplayarak birleştiren bir çok amaçlı fonksiyon oluşturulmuştur. Amaç fonksiyonunda ergonomik risk farklı versiyonlarda uygulanmıştır. Eğer işçi rotasyonu mümkünse ortalama ergonomik risk hesabı ile, mümkün değilse hattın ergonomik sapmalarının karelerini toplayarak amaç fonksiyonuna eklenmiştir. Çözüm yöntemi olarak iki aşamalı tavlama benzetimi ve yerel arama sezgiselleri uygulanmıştır. Modelin uygulanması için 268 adet test problemi oluşturulmuş ve istasyonların ergonomik risk skorunu hesaplamada OCRA, NIOSH, EAWS yöntemlerinden faydalanılmış ve alternatif dengelemeler elde edilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, ergonomik risk fonksiyonlarının farklı versiyonları aynı yönde iyileştirme sağlamakta ve ergonomik riskleri azaltmaya çalışmaktadır, yüksek riskli istasyonların

sayısının azaltılması, daha düşük OCRA ortalamasının oluşması ve ergonomik risklerin daha düzgün dağılması gibi sonuçlar yüksek derecede benzer bulunmuştur. Ancak her model versiyonu için kendi amaç fonksiyonu en etkili çözümü vermektedir.

Cheshmehgaz vd. (2012), MHDP' ne çalışanın duruşunu entegre eden yeni bir model geliştirmişlerdir. Çalışanın duruş çeşitliliğini sağlayarak, tekrarlı ve monoton duruşlardan kaynaklanan ergonomik riskleri azaltmayı amaçlamışlardır. Hat dengeleme modelinde kullanmak için ARP adlı, çalışanın farklı vücut bölgeleri için (kollar, bacaklar ve sırt) birikimli duruş riskini hesaplayan bir formül kullanmışlardır. Duruşlardan kaynaklanan risklerin değerlendirilmesinde OWAS yöntemini kullanmışlardır. MHDP-2 için; istasyonlar arasında ideal istasyon zamanından en büyük sapmanın enküçüklenmesi, istasyonların toplam ergonomik risk düzeyinin ideal riskten en büyük sapmanın enküçüklenmesi ve ARP' nin enküçüklenmesinden oluşan üç amaç fonksiyonlu bir model önerilmiştir. Bu amaçlar için kesin değerler atanamayacağı için bulanık hedef programlama modeli seçilmiş ve amaçlar bulanıklaştırılmıştır. Kısıtlar ve amaç fonksiyonlarının çeşitli kombinasyonlarıyla 5 farklı model oluşturulmuş, modeller test problemlerine uygulanmış ve çözüm yöntemi olarak genetik algoritma kullanılmıştır. Sonuç olarak ARP amaç fonksiyonunda ergonomik risk anlamında iyi sonuçlar elde edilmiştir ancak istasyon sayısı arttıkça çözüm zamanı artmış ve daha az uygun çözüm bulunmuştur.

Benedetto ve Fanti (2012), montaj hattındaki iş elemanları için risk skoru hesaplayan ve hat dengelemeyi de bütünleşik bir şekilde yapabilen ErgoAnalysis adlı bir yazılım sunmuşlardır. Bu yazılımda bir arayüz sayesinde montaj hattı ve iş elemanları tanıtılarak veri girişi yapılır ve risk indeksi OCRA veya NIOSH yöntemleri ile hesaplanır. Yazılımda aynı zamanda montaj hattı dengeleme modülüyle mühendis mümkün kombinasyonlarla iş elemanlarını istasyonlara atar ve atamaya göre ekranda görünen istasyonun risk düzeyi ve istasyon zamanına göre seçim uygun değilse yeni bir atama denir.

Xu vd. (2012), ergonomik riskleri MHDP' ye entegre eden yeni bir metodoloji geliştirmek için, hat dengeleme modeliyle ergonomik riskler arasında doğrusal bir ilişki kurmayı amaçlamışlardır. Bunun için fiziksel risk skorlarını; el ve kolların maruz kaldığı, kuvvet uygulama sıklığı, görev zamanı, maksimum güç , titreşim hızı ve titreşim süresi özellikleriyle değerlendiren ACGIH yöntemi kullanılmıştır. Bu özellikler MHDP'ye daha

kolay entegre edilmek için, görev atamanın doğrusal bir fonksiyonu şeklinde formüle edilmiştir. Karma modellenli MHDP için istasyon sayısını en küçükleme amaçlanmış ve doğrusallaştırılmış ergonomik risklerin beraber ve ayrı ayrı farklı kombinasyonlarını kısıt olarak ekleyerek alternatif modeller oluşturulmuştur. Model bir test probleminde uygulanmış, GAMS paket programıyla çözülmüş ve sonuçta istasyon sayısı arttırılmadan daha düşük ergonomik riskte istasyonların oluştuğu görülmüştür.

Jaturanonda ve Nanthavanij (2006), Jaturanonda vd. (2013), iki benzer çalışmada istasyon zamanını ve çalışanlar arasındaki duruş nedenli yükleri ve fiziksel yükleri eşzamanlı dengeleme amacıyla sezgisel bir prosedür sunmuşlardır. İlk olarak Kilbridge ve Wester algoritması kullanılarak istasyon süresine dayanan bir başlangıç atama gerçekleştirilmiştir. Daha sonra duruş ve fiziksel yükleri çalışanlar arasında dengelemek amacıyla, ilk aşamada elde edilen atamayı yeniden düzenlemek için yinelemeli yerel arama sezgiseli uygulanmıştır. Duruşsal ve fiziksel yükler RULA ile hesaplanmış ve istasyonun risk skoru işlemlerin risk skorları toplanarak elde edilmiştir. İstasyon işlem zamanı ve ergonomik risk için ayrı ayrı ortalamadan sapmalar hesaplanıp sonra ağırlıklandırılarak bütünlük bir indeks elde edilmiştir. Sayısal bir örnekte, geliştirilen yöntem kullanılarak, duyarlılık analizleri gerçekleştirilmiştir. İki kritere de eşit ağırlık vererek elde edilen sonuçlarda, ürün miktarında %10' dan az bir düşüş gözlemlenmiştir.

Baykasoğlu ve Demirkol Akyol (2014), BMHDP-2 için olurlu çözüm bulabilen COMSOAL yöntemi ile, ergonomik risk düzeyleri açısından daha kabul edilebilir bir dengeleme yapmışlardır. İşçilerin duruşları, OCRA indeksi kullanılarak hesaplanmış, COMSOAL ile dengeleme yapılırken istasyona atanabilecek işlemler kümesinde, çevrim süresi ve öncelik kısıtlarına ek olarak kabul edilebilir risk seviyesini aşmayacak işlemler seçilmiştir. Sonuçta, istasyon sayısı aşılmadan, belirlenen ergonomik risk seviyesinin altında kalan istasyonlarla çözüm elde edilmiştir.

Polat vd. (2015), BMHDP-2 için çevrim zamanının yanında istasyonların ergonomik risklerini de en küçüklemeyi amaçlayan çok amaçlı bir model geliştirmişlerdir. Ergonomik riskler REBA yöntemiyle hesaplanmış ve her bir istasyonun alabileceği en büyük risk skoru sınır koyularak, pozitif ve negatif sapmalar kısıtlara eklenmiştir. Amaç fonksiyonunda, en büyük risk skorunu aşan toplam pozitif sapmaların enküçülenmesi amaçlanmıştır. İki

amaçlı model küçük boyutlu bir test problemine uygulanarak, hedef programlama yöntemiyle GAMS paket programında çözülmüştür. Sonuç olarak ergonomik risk skorlarını dikkate alan modelde çevrim zamanı 1 birim artarken, ergonomik olarak daha dengeli bir hat oluşturulmuştur.

Bautista vd. (2016a) öncelikle duruşsal yüklenme, tekrarlı hareketler ve elle taşıma gibi farklı fiziksel ergonomik risk faktörlerini birlikte değerlendirmek için bir sınıflandırma önermişlerdir. Sınıflandırmada, risk seviyeleri dört kategoriye ayrılmış ve bu kategoriler için yapılması gereken aksiyonlar belirlenmiştir. Bu sınıflandırma sayesinde, farklı fiziksel risk faktörleri eşzamanlı dikkate alınarak bir işin toplam risk seviyesi belirlenebilmiştir. Çalışmada, duruşsal yükleri belirlemede REBA, tekrarlı hareketleri incelemek için OCRA ve elle taşıma işlerini değerlendirmek için NIOSH yöntemleri kullanılarak önerilen sınıflandırma yaklaşımıyla çalışanların gün boyu maruz kaldığı toplam birleşik risk seviyesini belirlemişlerdir. Ergonomik riskler, saniye cinsinden ölçülen bir zaman birimi olarak tanımlanmış ergo-saniye ile hesaplanmıştır. Normal iş temposunda 1 saniye süren bir işlem, 1 risk kategorisine denk gelmektedir. Elde edilen birleşik ergonomik risk seviyesini MHDP' ye katarak yeni bir yaklaşım ortaya koymuşlardır. Yaklaşım dokuz farklı ürün çeşidinin olduğu bir hatta ve farklı talep miktarları denenerek uygulanmıştır. Bu çalışmada çevrim zamanı, ergonomik risk seviyesi ve alan kısıtları olmak üzere üç farklı amaç, iki farklı fonksiyon ile ele alınmıştır. Önce üç farklı amaç için sınırlama fonksiyonları oluşturulmuştur. Bu fonksiyon ile, amaç değişkenlerinin her istasyon için izin verilen en büyük sınır değerleri, her istasyon için ihtiyaç duyulan miktarlar arasındaki en büyük değere eşit olması sağlanır. İkinci tür fonksiyon ise, üç değişken için belirlenen ideal değerler ve gerçekleşen değerler arasındaki farkı yani pozitif ve negatif sapmaları enküçüklemeyi sağlar. Burada, sapmaları direk toplayarak, kareler toplamını alarak ve kareler toplamının karekökünü alarak farklı kombinasyonlarda amaç fonksiyonu oluşturulmuştur. Klasik ağırlıklandırma yöntemiyle her amaca eşit ağırlık verilerek hat dengelenmiştir.

Oluşturulan modelde klasik montaj hattı dengeleme kısıtlarına ilave olarak; istasyondaki kabul edilebilir en büyük ergonomik risk düzeyi kısıtı ve her istasyonun ergonomik risk ve ortalama ergonomik risk arasındaki pozitif ve negatif sapmaları tanımlayan kısıtlar eklenmiştir. Üç amaç için oluşturulan farklı fonksiyonlarla ve dokuz farklı model için birçok konfigürasyon elde edilmiştir. En iyi konfigürasyonu seçebilmek

için bir karar verme metodolojisi geliştirmişlerdir. Sonuç olarak; en iyi çözümleri sağlayan üç alternatif çözüm bulunmuştur.

Bautista vd. (2016b), karışık modelli MHDP için, istasyonların ergonomik risk düzeylerinin ortalama mutlak sapmalarını en küçüklemeyi amaçlayan bir matematiksel model oluşturmuşlardır. Tek amaçlı bu modelin çözümünde, karışık tam sayılı programlama yöntemi ve Greedy Randomized Adaptive Search Procedure (GRASP) kullanılarak iki farklı çözüm yolunu karşılaştırmışlardır. Ergonomik risk değerlendirme yöntemi olarak RULA, OCRA ve NIOSH yöntemleri kullanılmış ve çözüm yollarının performansını karşılaştırmak için; hattın en büyük ergonomik riski ve hattaki en iyi ve en kötü ergonomik risk dereceleri arasındaki farkın miktarına bakmışlardır. Sonuç olarak; GRASP algoritması çok daha kısa sürelerde çözüm bulmuş ve maksimum ergonomik risk açısından daha iyi çözümlere ulaşmıştır. Karışık tam sayılı programlama ise daha uzun sürelerde çözüm bulmasına rağmen ergonomik risk dereceleri arasındaki fark açısından optimum çözümleri elde edebilmiştir.

Takanokura vd. (2017), montaj hatlarında günlük birikimli fiziksel risk yükünü hesaplayabilen bir metot önermişlerdir. Bir istasyona atanan işlemlerin oluşturduğu toplam risk yükünü işlem zamanları ile ağırlıklandırmış ve çevrim süresine bölerek kümülatif bir risk yükü elde etmişlerdir. Montaj işlemlerinde çevrim süresi üretim planına bağlıdır, üretim miktarı dönemsel olarak değişebilir. İşletmeler üretim hızını ve montaj işinin içeriğini müşteri talebine göre belirler. Bu nedenle çalışmada, bir işçinin günlük birikimli fiziksel risk yükünü hesaplarken, o gün üretilen ürün miktarı ile, bir çevrim için hesaplanan ağırlıklı risk yükü çarpılmıştır. Yöntem bir otomat makinesi montaj hattında, hat dengeleme amacıyla kullanılmıştır. Fiziksel risk yükünü değerlendirmek için REBA ve RULA yöntemleri temel alınarak revize edilmiş bit yöntem kullanılmıştır. İş elemanlarının süresi ve hat dengeleme bir yazılım aracılığıyla yapılmış daha sonra oluşan istasyonların geliştirilen yöntem ile risk yükleri hesaplanmıştır. Yüksek risk yükü çıkan istasyonlar saptanmış ve kaizen uygulamalarıyla riskin düşürülmesi önerilmiştir.

Bortolini vd. (2017), montaj hatlarında iş elemanlarının işlem sürelerine ek olarak, çalışanın montaj işlemi için gerekli malzemeleri toplayıp istasyona getirmesini de hem süre hem ergonomik risk olarak hesaba katmışlardır. Her bir istasyon için çevrim süresi; işlem zamanı, malzeme toplama zamanı ve boş kalma zamanından oluşmaktadır. Ergonomik

riskler REBA yöntemiyle hesaplanmıştır. Çalışanın toplam ergonomik riskini hesaplarken, montaj işlemi sırasında oluşan risk ve malzeme toplama sırasındaki riskin yanında, boş kalmanın kas-iskelet rahatsızlıklarına pozitif etkisini göstermek amacıyla, çalışanın boş kaldığı sürede ergonomik riskini 1 kabul ederek bu 3 aktivitenin oluşturduğu bileşke ergonomik risk hesabı için bir formül geliştirilmiştir. MHDP-1 için maksimum istasyon zamanını enküçüklemek ve maksimum istasyon riskinin en küçüklemek amaçları altında bir çok amaçlı matematiksel model geliştirilmiştir. Modelin çözümünde Messac vd. (2003) tarafından önerilen, pareto optimal çözümlerin tümünü içeren küme bulunmuş, bir ampirik kural ile rassal araştırmalar yapılarak en iyi çözüm seçilmiştir. Sonuç olarak her iki amaç fonksiyonu kendi optimal değerlerinden sadece %2 kötüleşme ile uzaklık çözüm bulunmuş ve işçiler arasındaki ergonomik riskler çok daha dengeli dağıtılmıştır.

Baykasoğlu vd. (2017), MHDP, alt MHDP, işçi atama ve istasyon yerleşim problemlerinin hepsini içeren montaj hattı tasarımında ergonomik risk faktörlerini içeren bir yaklaşım sunmuşlardır. Alt problem olarak ele alınan montaj hattı dengelemede; ergonomik risk skorları OCRA indeks yöntemiyle hesaplanmış ve tüm istasyonların risk değerleri, ortalama risk değeri etrafında düzgün dağılması için kısıt oluşturulmuştur. Modelin amaç fonksiyonu; çevrim zamanının enküçüklenmesi, risk skoru yüksek istasyon sayısının ve ortalama kırmızı OCRA indeksinin enküçüklenmesi ve ortalama OCRA indeksinden mutlak sapmaların en küçüklenmesi olarak oluşturulmuştur. Çok sayıda amaç ve kısıt olması nedeniyle kesin çözüm yöntemleri yerine kural tabanlı bir sezgisel yöntem geliştirilmiş ve windows tabanlı bir karar verme programı oluşturulmuştur. Elde edilen çözümler incelendiğinde yüksek riskli istasyon sayısı önemli ölçüde azalmıştır ve yeni bir istasyon açılması ile tamamen yok edilebileceği görülmüştür.

Tiacci ve Mimmi (2018), karışık modeli, stokastik işlem zamanlı ve paralel MHDP için ergonomik risk faktörlerini de dikkate alan bir model geliştirmişlerdir. Ergonomik riskler OCRA indeksi ile değerlendirilmiştir. Modelin amaç fonksiyonu işçilik, ekipman ve hat besleme maliyetlerini, hattın çevrim zamanı aşıldığında oluşan ceza maliyetlerini ve hattın OCRA indeksi ile belirlenen ergonomik risk değeri aştığında verilen ceza maliyetlerini enküçüklemek olarak belirlenmiş ve tek bir formülasyon ile ifade edilmiştir. Modelin çözümü için Tiacci (2015) tarafından geliştirilen bir genetik algoritma prosedürü uygulanmıştır. Model, hem OCRA indeksi dikkate alınarak hem de hariç tutularak çözülmüş

ve OCRA indeksli modelin tüm istasyonlarda hedeflenen risk değerlerini sağladığı, hariç tutulduğunda bu oranın %80' lere düştüğü görülmüştür. Bunlara ek olarak, ergonomik risk kısıtlarını sağlama maliyetinin tüm maliyetler içerisinde oldukça küçük miktarlarda kaldığı gösterilmiştir.

Şahin ve Kahya (2018), istasyon sayısını ve iş yükünden sapmaları enküçükleme amacı altında bir hedef programlama modeli geliştirilmiştir. İş elemanlarının ergonomik risk skoru REBA yöntemiyle belirlenmiş, her bir istasyon için olması iatenen maksimum REBA limiti de kısıt olarak modele eklenmiştir. Sonuçların karşılaştırılması için istasyon zamanı ve risk skoru için olmak üzere, sapmaların ortalamasını temel alan iki tane performans ölçütü tanımlanmıştır. Çalışma sonucunda gerek ergonomik risk gerek ise istasyon sayısı bakımından daha dengeli bir montaj hattı oluşturulmuştur.

Kahya vd. (2018), istasyon zamanını ve çalışanlar arasındaki fiziksel risk düzeylerini eşzamanlı dengeleme amacıyla sezgisel bir algoritma sunmuşlardır. İlk olarak COMSOAL algoritması kullanılarak istasyon süresine dayanan bir başlangıç atama gerçekleştirilir. Daha sonra yeniden görev atama algoritması ile ilk aşamada elde edilen atama, fiziksel yüklerin çalışanlar arasında dengelenmesi amacıyla, risk skorları dikkate alınarak tekralanır. Ergonomik risk skorları REBA risk değerlendirme yöntemiyle hesaplanmış ve istasyonun risk skoru işlemlerin risk skorları toplanarak elde edilmiştir. Sonuçların karşılaştırılması için istasyon zamanı ve risk skoru için olmak üzere, sapmaların ortalamasını temel alan iki tane performans ölçütü tanımlanmıştır.

3.2. Direkt Ölçüm Yöntemleri ve Diğer Yöntemler Kullanılarak Yapılmış Çalışmalar

Bu bölümde ergonomik riskleri dikkate alırken enerji tüketim miktarını belirleyerek direkt ölçüm yöntemleri kullanan çalışmalar anlatılmıştır. Bunlara ek olarak, yapılan işlemleri monotonluk, kolaylık, benzerlik gibi özellikler açısından sınıflandıran çalışmalara yer verilmiştir.

Ergonomik riskleri MHDP' ye dahil etmeye yönelik ilk çalışma Gunther vd. (1983) tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada 11 adet sözlüksel (lexicographic) sıralama ile düzenlenmiş amacı olan bir hedef programlama modeli ve çözüm yöntemi olarak dal-sınır

algoritması önerilmiştir. Her görev için gereken enerji tüketim miktarını belirten fiziksel bir talep parametresi oluşturulmuştur. İstasyondaki görevlerin toplam enerji ihtiyacı çalışanın bireysel olarak belirlenen fiziksel toleransını aşmayacak şekilde kısıtlara eklenmiştir.

Carnahan vd. (2001), BMHDP-2 için, fiziksel yorulmayı da hesaba katan bir model geliştirmişlerdir. Fiziksel yorulma, çalışanın manuel işlerde uyguladığı kavrama kuvveti olarak tanımlanmış ve bir formül yardımıyla, işçinin dört saatlik bir çalışmadan sonra kalan kavrama kuvveti oranı ile hesaplanmıştır. Modelin çözümü için; klasik genetik algoritma, hibrit problem uzayı genetik algoritması ve çoklu sıralama sezgiseli adını verdikleri üç farklı sezgisel yöntem geliştirmişlerdir. 100 adet test problemi ile model ve sezgiseller denenmiştir. Öncelikle çevrim süresi ve fiziksel yorulma ayrı ayrı amaç fonksiyonu olarak çözülmüş daha sonra iki amaç tek bir formülle birleştirilmiş ve bu formül amaç fonksiyonu olarak kullanılmıştır. Sezgisel yöntemlerin hat dengelemedeki etkinliğini değerlendirmek için iki faktörlü ANOVA modeli kullanılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde en kısa çevrim süresi ve daha az fiziksel yorulmaya sahip çözümleri hibrit genetik algoritma yönteminin bulunduğu görülmüştür.

Özgörmüş ve Mutlu (2007), tek modelli BMHDP-1 için istasyon sayısının en küçüklmesini amaçlayan, farklı ergonomik risk faktörlerinin kısıt olarak eklendiği bulanık matematiksel model geliştirmişlerdir. Ergonomik risk faktörleri olarak; işlemlerin zorluk derecesi, risk derecesi ve monotonluk gibi kavramlar bulanık olarak ifade edilmiş ve tüm istasyonlar için maksimum limit değerler belirlenerek kısıtlar oluşturulmuştur. Kısıtlar ve amaç fonksiyonu bulanıklıklaştırılarak, Jackson (Jackson, 1956) test problemine uygulanmış ve LINGO paket programıyla çözülmüştür. Sonuçta istasyon sayısı arttırılmadan, ergonomik riskler açısından daha dengeli istasyonlar oluşturulmuştur.

Choi (2009), MHDP-2 için iki amaçtan oluşan, 0-1 tamsayılı bir model geliştirmiştir. Modelin amaçları; istasyonların ortalama işlem zamanından toplam pozitif sapmalarını enküçüklemek ve istasyonların toplam ergonomik risk düzeylerinin, en iyi çalışma koşullarında işçide biriken iş yükü olarak belirlenen standart bir değerden toplam pozitif sapmalarını enküçüklemek olarak belirlenmiştir. Ergonomik riskleri dikkate alırken, işçinin maruz kaldığı fiziksel riskleri tanımlayan 13 farklı parametre tanımlanmıştır. Bu parametreler: statik ve uygun olmayan vücut duruşları; uygun olmayan sıcaklık, aydınlatma,

titreşim gibi çevresel risk faktörleri ve tekrarlı hareketler, yük kaldırma gibi fiziksel yorulmaya neden olan faktörler olmak üzere 3 grupta toplanmıştır. Bu parametreler ağırlıklandırarak toplamış ve bileşke bir risk faktörü oluşturmuştur. Çok amaçlı modelin çözümünde, Chebyshev hedef programlama yöntemini kullanmış ve 20 adet test probleminde denemeler yapılmıştır. Sonuç olarak çevrim süresinde göz ardı edilebilir miktarda artış olsa da ergonomik risk seviyeleri çok daha dengeli istasyonlar elde edilmiştir.

Güner ve Hasgöl (2012), U-tipi montaj hatları için ergonomik faktörleri içeren bir tamsayı model geliştirmişlerdir. İşlemler arasındaki uyumsuzlukların dikkate alınması, her bir işlemin gerektirdiği enerji düzeyini hesaplayarak, bir vardiyada istasyonda yapılan işin sürekli performans sınır ile kısıtlanması ve işçilerin yaş, cinsiyet, tecrübe gibi özelliklerine göre performans değerini belirleyip ona göre işlemlerin atanması sağlanarak, modele ergonomik risk kısıtları eklenmiştir. Model istasyon sayısını enküçüklemek amacı altında küçük ve orta boyutlu test problemlerine uygulanmış ve GAMS paket programıyla çözülmüştür. Sonuç olarak uzun vadede daha sürdürülebilir olduğu düşünülen bir hat dengeleme modeli önerilmiştir.

Sternatz (2013), montaj hatlarında tüm gereklilikleri karşılayabilecek esneklik ve hızda yeni bir sezgisel prosedür geliştirmiştir. Gerekli kısıtlamaları göz önünde bulundurmak için Fleszar ve Hindi' nin (Fleszar ve Hindi, 2003) çoklu-Hoffman sezgiseli genişletilerek kullanılmıştır. Tüm işlemler biyomekanik olarak analiz edilmiş, istasyonda bulunan işler biyomekanik zorlanma düzeyine bağlı olarak; riskli, potansiyel riskli ve risksiz olarak sınıflandırılmıştır. Sezgisel prosedürün, uygulandığı test problemlerinde risksiz ve potansiyel riskli istasyonlardan oluşan etkin çözümler bulmuştur.

Kara vd. (2014), tek modelli montaj hatları için, kaynak ve ergonomik kısıtları içeren maliyet tabanlı bir çok amaçlı matematiksel model geliştirmişlerdir. Model, işçi maliyeti, gerekli yardımcı işçi maliyeti, ekipman kullanım maliyeti ve yüksek aydınlatma maliyetlerinin toplam yıllık değerini ayrıca ayakta çalışan işçi sayısını enküçüklemeyi amaçlamaktadır. Modelde klasik MHDP kısıtlarına ek olarak yedi adet kısıt kullanmıştır. Literatürde rijitlik ölçüsü olarak bilinen, işlerin yapılış bakımından esnek olup olmaması ve gerektiğinde çalışanın inisiyatif alıp almamasına göre puanlandırıldığı ölçütü ağırlıklandırarak kullanmış ve bu kısıtı işin psikolojik talebi olarak adlandırmışlardır.

Operatörlerin çalışırken harcadıkları oksijen tüketim miktarını kilokaloriye çevirip, yapılan işin dakikada kalori cinsinden gerektirdiği enerji tüketimini hesaplayarak, işlerin fiziksel talebi olarak tanımladıkları bir kısıt eklemişlerdir. Her işin gerektirdiği beceri düzeylerini ve her çalışanın beceri düzeyini belirleyerek çalışan beceri kısıtı oluşturmuşlardır. Ağır ve uzun süren işlerin yapılışında başka bir operatöre ihtiyaç duyulması durumunu da hesaba katarak, her istasyonda görevlendirilebilecek yardımcı operatör kısıtı eklemişlerdir. Aynı ekipmanların kullanıldığı işlerin aynı istasyona atanmasını sağlayan ve böylelikle ekipman ihtiyacını da belirledikleri bir kısıt oluşturmuşlardır. Bu beş kısıta ek olarak literatürde daha önce kullanılmayan çalışan duruşu ve aydınlatma seviyesi kısıtlarını geliştirmişlerdir. Çalışan duruşu kısıtına göre, ayakta ve oturarak olmak üzere iki çeşit çalışma duruşu ele alınmış ve bir çevrimde çalışanın hem ayakta hem oturarak çalışmasının enerji tüketimini arttıracığı düşünülerek, aynı duruşların aynı istasyona atanmasını sağlayacak bir kısıt geliştirmişlerdir. Son olarak işlerin gerektirdiği aydınlatma seviyesini de normal ve yüksek olarak tanımlayıp, aynı aydınlatma seviyesindeki işlerin aynı istasyonlara atanmasını sağlamışlardır.

Kara vd.'nin geliştirdiği model 30 iş elemanı olan örnek bir problemde uygulanmış, optimal sonuçlar farklı çevrim süreleri ve kısıt çıkarılması/eklenmesi gerçekleştirilen duyarlılık analizleriyle değerlendirilmiştir. Böylelikle, çalışmada doğrudan ergonomik kısıt olarak değerlendirilen enerji tüketimi ve rijitlik kısıtları da modele eklenip ve çıkarılarak montaj hattındaki maliyetleri kolayca elde edilmiştir. Sonuçlar ergonomik kısıtların maliyetleri arttırdığını göstermekedir ancak literatürde yapılan birçok çalışma bulgularına göre verimlilik ve kalitenin de iyileşeceği değerlendirilmektedir.

Battini vd. (2016a) tek modellenli BMHDP-2 için dört farklı amaçtan oluşan çok amaçlı bir matematiksel model geliştirmişlerdir. Bu amaçlar süre performansı ile ilgili olarak; istasyonlar arası iş dağılımının eşit olması için düzgünlük indeksinin en küçüklenmesi ve toplam çıktının artmasını sağlayan maksimum istasyon zamanının en küçüklenmesidir. MHDP' nin ergonomik kapsamında da iki farklı amaç ele alınmıştır. İşlemlerin ergonomik risk seviyesini ölçmek için, oksijen ve metabolik enerji tüketimine dayanan (Predetermined Motion Energy System) PMES adında bir hareket enerji sistemi geliştirmişlerdir. Bu yöntemde Garg vd. (1978) 'nin geliştirdiği, işi oluşturan her hareket ve vücut duruşunu gerçekleştirmek için ortaya çıkan toplam enerji tüketiminin işin toplam süresine

bölünmesiyle hesaplanan ortalama metabolik tüketim formülasyonu kullanılmaktadır. Cinsiyet, kilo, kaldırılan yük ağırlığı, yük kaldırma yüksekliği gibi etkenleri de dikkate alarak net metabolik enerji tüketimi hesaplanmaktadır. MHDP’ de kullanılmak üzere, geliştirilen yöntem ile tüm işlemlerin gerektirdiği enerji tüketim miktarları hesaplanmıştır. Enerji düzgünlük indeksi olarak tanımladıkları, işçiler arasında fiziksel yükü eşit seviyelerde dağıtarak, istasyonların risk seviyesini düşüren ve en yüksek enerji tüketimine sahip istasyonun tüketimini en küçükmeyi amaçlayan, istasyonun ergonomik boyutuyla ilgili iki tane amaç fonksiyonu tanımlamışlardır. Dört amaç fonksiyonundan oluşan matematiksel modeli gerçek hayatta uygulayarak, epsilon kısıt yöntemiyle çözmüşler ve bu amaçların sonuca olan etkisini göstermek için duyarlılık analizlerini de eklemişlerdir.

Battini vd. (2016b), karışık modellenli hatlarda MHDP-1 için, istasyonlara malzeme tedariki ve fiziksel ergonomik kısıtları dikkate alan yeni bir model önermişlerdir. Fiziksel ergonomik kısıtları her bir işlem için dakikada gerekli olan kcal olarak modele eklenmiş ve hesaplamak için Garg vd. (1978) tarafından geliştirilen detaylı metabolik enerji tüketimi formülleri kullanmışlardır. Her operatör için gerekli dinlenme süreleri kısıt olarak eklenmiş ve operatörün enerji tüketimi sınır değerini aştığında, ek dinlenme süresi verilmesi sağlanmıştır. Çalışmanın odak noktası modelin geliştirilmesi olmuş, optimal veya yaklaşık çözüm bulma aşaması sonraki çalışmalara bırakılmıştır.

Bautista vd. (2016c), karışık modellenli montaj hatlarında işçilerin refahını arttırmayı amaçlamış ve MHDP için biri en büyük ergonomik riski enküçükmeyi amaçlayan, biri de ortalama ergonomik riskten sapmaları enküçükleyen iki farklı model oluşturmuşlardır. Bir işçinin ergonomik riskini hesaplarken ergo-saniye adıyla geliştirdikleri bir ölçüm metoduyla, duruşlardan kaynaklanan, tekrarlı hareketlerden ve taşımalarından kaynaklanan fiziksel ergonomik riskleri birleşik halde belirlemişlerdir. İki farklı amaç fonksiyonunu hem MHDP-1 hem de MHDP-2 problem çeşitleri için ele almış, hem de geliştirdikleri GRASP algoritması ve karışık tamsayılı programlama yöntemleriyle çözmüşlerdir. Oluşan farklı modelleri ve farklı çözüm yöntemlerini karşılaştırmak için bir araba montaj hattında uygulama yapılmıştır. Sonuçta maksimum ergonomik riski enküçüklemek amacı altında, MHDP-1 problem çeşidi karma tamsayılı programlama çözüm yöntemiyle en iyi sonuçları vermiştir. Ergonomik risk aralığını en küçüklemek amacı altında, MHDP-2 problem çeşidi karışık tamsayılı programlama çözüm yöntemiyle en iyi sonuçları vermiştir. GRASP

algoritması daha kısa sürede çözüm bulması ve en iyi çözümlerden %3 gibi bir sapma göstermesi nedeniyle rekabet gücü yüksek bir çözüm yöntemi olarak tanımlanmıştır.

Alghazi ve Kurz (2018), karma modellenli montaj hatları için paralel görev atama ve ergonomik risk kısıtları altında, toplam operator sayısını en küçüklemeyi amaçlayan bir matematiksel model geliştirmişlerdir. Ergonomik risk kısıtları, yapılacak işlemlerin benzerlikleri ve montajı yapılacak parçanın pozisyonuna göre istasyona atamak gibi, işlemler ve istasyonlar açısından dolaylı olarak değerlendirilmiştir. Her işlemin ergonomik risk skoru belirlenmiş ve bir operatöre atanan işlemlerin toplam ergonomik risk yükünün, önceden tanımlanmış maksimum yükü aşmaması için bir kısıt oluşturulmuştur. Geliştirilen modelin büyük boyutlu gerçek bir montaj hattında uygulaması yapılmıştır ancak çözüm aşamasında tamsayılı programlama optimal çözümü istenen sürede bulamamıştır. Bu nedenle genelde çizelgeleme problemlerinde kullanılan kısıt programlama yöntemi ile çözüm sağlanmıştır. Sonuçlar incelendiğinde en büyük ergonomik risk skoru nedeniyle problemin zorlaştığı ve tamsayılı programlama ile çözüm bulunamadığı ancak kısıt programlama yönteminin en iyi çözüme kısa sürede ulaştığı görülmüştür.

Abdous vd. (2018), karma modellenli MHDP için çalışanların yorgunluğunu dikkate alan bir model geliştirmişlerdir. Ma vd. tarafından geliştirilen genel kas yorgunluğu formülü ile, ergonomik kısıt olarak hat dengelemeye entegre edebilmek amacıyla formül doğrusal hale getirilmiştir. İstasyon sayısının ve en büyük yorgunluk seviyesinin enküçüklenmesi amaçlanarak, çok amaçlı matematiksel model test problemlerine uygulanmış ve epsilon kısıt yöntemiyle çözülmüştür. Daha az yorgunluk seviyesinde istasyonlar elde eden pareto etkin çözümler elde edilmiştir.

Finco vd. (2019), BMHDP-2 için, hattın düzgünlük indeksini enküçüklemeyi amaçlamış ve işçinin enerji tüketim miktarının modele etkisini araştırmışlardır. Battini vd. (2015) tarafından geliştirilen metodoloji ile hesaplanan enerji tüketim miktarları bulunarak, Price (1990) 'ın formülü ile buradan işçilerin dinlenme süreleri hesaplanmıştır. Dinlenme sürelerini modele montaj hattını dengelemeden önce, dengeleme esnasında ve sonrasında olmak üzere farklı yollarla ilave edilmesi denenmiştir. Çözüm için optimal çözüm sağlayan matematiksel programlama ve sonrasında sezgisel bir algoritma geliştirilmiş ve küçük boyutlu bir test probleminde uygulanmıştır. Model GAMS programında ve C++

programlarında çözülmüştür. Sonuçlar elde edilen çevrim zamanı ve düzgünlük indeksi açısından incelendiğinde dinlenme süresi kısıtını dengeleme esnasında modele dahil etmenin daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Dinlenme süreleri ile elde edilen çözümlerde çevrim zamanının artış gösterme eğiliminde olduğu görülmüştür.

Literatürde incelenen çalışmalar Çizelge 3.1’ de ergonomik risk ölçüm yöntemleri ve çözüm yöntemleri halinde özetlenmiştir.

Yapılan çalışmalar, birçok ergonomik risk değerlendirme yönteminin başarılı bir şekilde montaj hattı dengeleme problemine entegre edilebileceğini göstermiştir. Ergonomik risklerin azaltılmasının daha yüksek çevrim zamanı ya da ek istasyon gerektirebileceği ve böylece montaj hattı verimlilik göstergelerinin kötüleşebileceği görülmektedir. Çalışmaların çoğunda, farklı ergonomik risk değerlendirme yöntemleri kullanılarak genişletilmiş ve farklı üretim hatlarına uygulanabilecek esnek modeller geliştirilmiştir.

Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde basit gözleme dayalı yöntemler (REBA, RULA, OCRA, OWAS v.b.) ile risklerin tespit edilmesi ve direkt ölçüm yöntemleri kullanılarak kasların yorgunluğu, enerji tüketim miktarlarının ölçülmesi yaygın olarak yer almıştır. Ancak elde edilen risk skorları ve fizyolojik değerlerin nasıl MHDP’ ye entegre edileceği tartışma konusu olmuştur. Montaj hatlarında işçiler tek bir işlemde değil, birkaç işlemin birleşiminden sorumludurlar ve bu işlemleri tekrarlı olarak yaparlar. İşçinin ergonomik risk anlamında kümülatif iş yükünü hesaplayabilen bir metot eksikliği vardır. Literatürdeki bazı çalışmalarda kompleks analizler ve formüller kullanılarak bu ihtiyaca çözüm önerilmiş, bazı çalışmalarda ise bir takım varsayımlar altında ergonomik riskler hesaba katılmıştır. Bu tez çalışmasının da amaçlarından biri bu ihtiyaca yeni bir yaklaşım önermektir. Kompleks analizler yapılabilir ya da simülasyonlar geliştirilip kullanılabilir, ancak bunlar zaman alan, beceri ve bilgi birikimi gerektiren uygulamalardır. Gerçek hayatta yöneticiler ve üretim ortamında çalışan mühendislerin, böyle bir ergonomik yaklaşımı uygulayabilmesi için danışmanlık hizmeti alması gerekmektedir. Bunun yerine maliyet ve süre açısından makul, uygulaması daha basit teknikler kullanmak isterler. Bu çalışmada montaj istasyonlarında ergonomik risk yüklerinin hesabında kullanmak amacıyla, mühendisler için ekstra bilgi ve yetenek gerektirmeyen bir metot önerilmiştir ve büyük boyutlu bir gerçek hayat probleminde uygulanmıştır.

Çizelge 3.1. Ergonomik riskleri dikkate alan literatürdeki çalışmalar

Çalışma	Ergonomik Risk Ölçümü	Ergonomik Risk		Model ve Çözüm Yöntemi
		Kısıtta	Amaç fonksiyonunda	
Gunther vd. (1983)	Enerji Tüketimi	×		Hedef programlama, Dal-Sınır Algoritması
Carnahan vd. (2001)	Fiziksel yorgunluk		×	Genetik Algoritma, Sezgisel
Colombini ve Occhipinti (2006)	OCRA	×		Sezgisel
Özgörmüş ve Mutlu (2007)	işlemlerin zorluk derecesi, monotonluk ve risk düzeyi	×		Fuzzy Tek amaçlı Doğrusal Programlama
Choi (2009)	Çevresel parametreler, uygun olmayan duruş, fiziksel yorulma		×	Chebyshev Hedef programlama
Otto ve Scholl (2011)	NIOSH, OCRA, EAWS	×	×	Yerel arama ve Tavlama Benzetimi
Cheshmehgaz vd. (2012)	OWAS		×	Bulanık Hedef programlama, Genetik Algoritma
Benedetto ve Fanti (2012)	OCRA, NIOSH			Yazılım
Xu vd. (2012)	ACGIH	×		Tek amaçlı Doğrusal Programlama
Güner ve Hasgül (2012)	Sürekli performans sınırı, işlerin enerji gereksinimi	×		Doğrusal Programlama
Kara vd. (2014)	Enerji tüketimi, işlerin rijitliği, aydınlatma seviyesi	×		Doğrusal Programlama
Alghazi ve Kurz	İşlemlerin benzerlikleri, işlemin gerektirdiği duruşlar	×		Kısıt Programlama

Çizelge 3.1. Ergonomik riskleri dikkate alan literatürdeki çalışmalar (devam)

Çalışma	Ergonomik Risk Ölçümü	Ergonomik Risk		Model ve Çözüm Yöntemi
		Kısıtta	Amaç fonksiyonunda	
Battini vd. (2016)	Enerji Tüketimi		×	Epsilon Kısıt Yöntemi
Polat vd. (2015)	REBA	×	×	Hedef programlama
Bautista vd. (2016)	RULA, OCRA, NIOSH		×	GRASP
Bautista vd. (2016)	RULA, OCRA, NIOSH	×	×	Klasik ağırlıklandırma
Bautista vd. (2016)	Ergo-Saniye	×		GRASP ve Doğrusal Programlama
Takanokura vd. (2017)	REBA, RULA	×		Yazılım
Bortolini vd. (2017)	REBA		×	Pareto Optimal
Baykasoğlu vd. (2017)	OCRA	×	×	
Tiacci ve Mimmi (2018)	OCRA		×	Genetik Algoritma, Sezgisel
Abdous vd. (2018)	Kas yorgunluğu		×	Epsilon Kısıt Yöntemi
Finco vd. (2019)	Dinlenme süreleri	×		Doğrusal Programlama, Sezgisel
Jaturanonda ve Nanthavanij (2006)	RULA		×	Kilbridge ve Wester, Yerel arama
Jaturanonda vd. (2013)	RULA		×	Kilbridge ve Wester, Yerel arama
Sternatz (2013)	Statik ve uygun olmayan duruşlar için biyomekanik zorlanma	×		Çoklu-Hoffman sezgiseli
Şahin ve Kahya (2018)	REBA	×	×	Hedef programlama
Kahya vd. (2018)	REBA	×		COMSOAL, Sezgisel

4. MATERYAL VE YÖNTEM

4.1. Problemin Tanımı

Tez çalışmasında, montaj hattında yapılacak iş elemanlarının; çevrim zamanı ve öncelik ilişkilerine ek olarak ergonomik risk faktörlerini de dikkate alan BMHDP ele alınmıştır. Çalışma kapsamında öncelikle ergonomik risk faktörlerinin değerlendirilmesi için kullanılacak yöntem seçilmiştir. Bu kümülatif risk skorunun MHDP esnasında dikkate alınması için, yeni bir, istasyon kapsamında kümülatif risk hesaplama yöntemi önerilmiştir. Ancak bu problemde hedeflenen, ergonomik risk faktörlerinin enküçüklenmesi ve MHDP’de çevrim zamanı veya istasyon zamanı enküçüklenmesi amaçları birbiriyle çatışmaktadır. Bu nedenle dengeleme problemi bir uzlaşma karar problemi haline gelir ve karar vericiler bu çatışan hedefleri makul değerlerle en iyilemek isterler. Çatışan amaçlar için literatürde geliştirilmiş birçok sezgisel ve kesin yöntemler bulunmaktadır. Bu çalışmada da oluşturulan çok amaçlı BMHDP çözümünde kesin yöntemlerden konik skalerleştirme yöntemi kullanılmış ve pareto etkin çözümler elde edilmiştir.

4.1.1. Risk değerlendirme yönteminin seçimi

Çalışmada, matematiksel modelde kullanılmak üzere, montaj hatlarındaki iş elemanlarının oluşturduğu fiziksel iş yükünün hesaplanması için REBA yöntemi tercih edilmiştir. Yöntem, tüm vücut hareketleri sırasında duruşların analiz edilerek puanlanmasını ve böylece elde edilen sayısal değerle mesleki açıdan risk yaratabilecek duruşların belirlenmesini sağlar. Boyun, gövde, kollar, bacaklar ve bilekler olmak üzere tüm vücut için değerlendirme yaparak, araç-gereçlerin kavranma durumunu, yük kaldırmayı ve sık tekrar eden aktiviteleri de dikkate alır.

Diğer kullanılabilir gözlem yöntemleri incelendiğinde montaj hatlarında gerek duyulan bazı analizlere cevap vermedikleri görülmüştür. NIOSH denklemi, biyomekanik yüklenmeyle ilgili duruşları analiz edebilen bir denklemdir ancak iki elle yapılan taşıma ile sınırlıdır. REBA yöntemi vücut duruşu ve yük kaldırmayı da içerdiğinden NIOSH denklemine göre daha geneldir. OWAS bir iş örnekleme metodudur ve tüm vücut duruşlarını analiz eder. Vücut duruşunu ve yük/güç uygulanmasını dikkate alır ancak hareket sıklığına

bakmaz. Ayrıca OWAS eller ve boyun hareketlerini dikkate almaz, montaj hattında işçiler sıklıkla ellerini ve boyunlarını kullanmaktadırlar. OWAS yüksek geçerliliği olan kullanışlı bir metot ancak montaj hatları için geçerli hassasiyeti yoktur. OCRA yöntemi tekrarlı işlerin oluşturduğu riski hesaplar ancak vücut duruşunun analizinde yalnızca üst vücut uzuvlarını dikkate alır, bunlar el, bilek, dirsek ve omuzdur. Bu açıdan montaj hattındaki duruşlar için hassasiyeti düşüktür. Diğer yöntemlerin özellikleri dikkate alındığında, literatürde de yaygın kullanımı olan REBA yöntemi tercih edilmiştir.

4.1.2. Verilerin toplanması

Çalışmanın gerçekleştirildiği fabrikada, tek modelli ankastre bulaşık makinesinin montajı yapılmaktadır. Banttaki mevcut durumda 32 istasyon bulunmakta ve her bir istasyonda 1 işçi işlem yapmaktadır. Haftada 5 gün ve günde 9 saat çalışılmakta, mevcut durumda hattaki tüm kaynakların kullanılmasıyla ortalama 650-700 adet bulaşık makinesinin montajı tamamlanmaktadır. Mevcut durumda günlük 790 adet bulaşık makinesinin montaj işlemini yapmak hedeflenmiş ve çevrim süresi de bu hedefe göre 41 saniye olarak belirlenmiştir. Standart sürelerin güncel olmaması nedeniyle planlamanın belirlediği günlük ve haftalık üretim miktarları çoğu kez tutmamaktadır. Montaj hattında yapılan işlemler tanımlı olmasına rağmen, bu işlemleri oluşturan iş elemanlarının ve bunların süreleri ile yine bunlar arasındaki öncelik ilişkilerinin belirlenmemiş olması, öncelikle bir iş etüdü çalışması yapılmasını gerektirmiştir. Bu nedenle çalışmaya öncelikle iş elemanlarının belirlenmesiyle başlanmış ve işlemler başlangıç ve bitiş noktaları belirgin olacak şekilde iş elemanlarına ayrılmıştır. Bu ayrımda, iş elemanlarının tanımlanabilir ve ölçülebilir bir süreye sahip olması gereklidir. Toplam 108 iş elemanı olarak tespit edilmiştir ve bunların isimleriyle süreleri Ek Açıklama-C' de verilmiştir. Farklı günlerde ve rassal olarak belirlenen zaman noktalarında standart zamanları belirleyebilmek için ölçümler yapılmıştır.

İş elemanlarına ait zamanlar ile performans derecelerinin kaydedilmesinde ve o işin tanımlanmış bir performans düzeyinde yürütülmesi için gerekli olan normal zamanı elde etmek üzere, verilerin analizinde kullanılan bir iş ölçüm tekniği olan zaman etüdü uygulanmıştır. İş elemanları zaman etüdü formunda listelendikten sonra standart zaman hesabı kapsamında her bir iş elemanı için %90 güven aralığı ve %10 hata payı için ortalama

50-75 adet ölçümü alınmıştır. Normal zamanlara belirlenen paylar eklenerek tüm iş elemanları için standart süreler tespit edilmiştir.

Zaman etüdü çalışması yapılırken gözlemler ve video kayıtları ile analiz yapılmıştır. Bu esnada REBA risk değerlendirme formu ile de bir iş elemanı yapılırken en zorlayıcı ve uygun olmayan duruşlar için risk skoru belirlenmiştir. Standart zamanlar ve REBA skorları belirlendikten sonra tekrar düzenlenerek aynı istasyonda yapılması gereken iş elemanlarından bazıları birleştirilerek nihai durumda 78 adet iş elemanı belirlenmiştir. Daha sonra iş elemanları arasındaki öncelik ilişkileri incelenerek Ek Açıklama-D' de verildiği gibi öncelik diyagramı oluşturulmuştur.

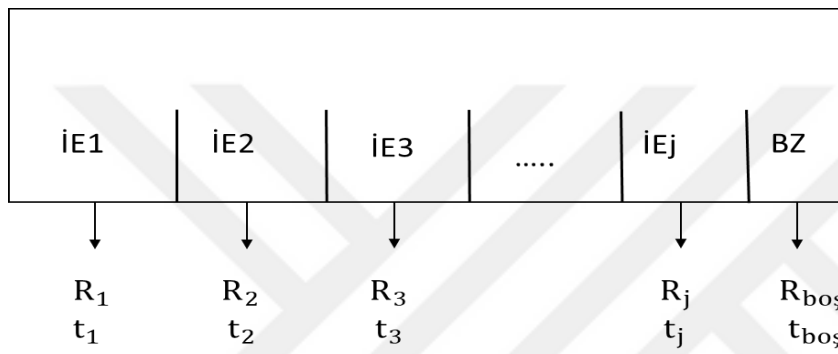
4.2. İş Elemanı ve İstasyonları için Fiziksel Risk Skoru Hesaplanması

Gözlem yöntemlerinde risk değerlendirmesi yapılırken, çalışanın herhangi bir andaki duruşuna odaklanılmaktadır. Ancak bu gerçekliği yansıtmaz çünkü bir montaj istasyonu birçok iş elemanının birleşiminden oluşmakta ve çalışan duruşunu sürekli değiştirmektedir. İş elemanları da her bir duruşu incelemek için daha küçük hareket elemanlarına bölünerek daha güvenilir bir skor elde edilebilir ancak bu çok maliyetli ve uzun süren bir süreci gerektirir, işletmelerde uygulanabilirliği çok düşüktür.

Önerilen yöntem ile bir iş elemanı esnasında gerçekleşen en yüksek risk skoru REBA ile hesaplanmıştır. İş elemanlarının süresi ile belirlenen REBA risk skoru çarpılarak, uzun süre aynı vücut duruşunda devam eden iş elemanları için toplam risk skoru hesaplanmış olur. Bir istasyonda işçinin çalışma süresi iş elemanlarının toplam süresi kadardır, geriye kalan istasyon boş zamanı boyunca işçi boş aktiviteler yapar. Hareketsizliğin KİSR üzerindeki olumlu etkisini yansıtmak amacıyla risk hesabına dahil edilmiştir. İşçilerin boş zamandaki REBA skoru, formda insan vücudunun doğal duruşu için incelenmiş, her vücut bölgesinin skoru 1 değerine denk geldiği ve herhangi bir kavrama, yük kaldırma da olmadığı için 1 olarak hesaplanmıştır.

Şekil 4.1' de bir istasyonu oluşturan iş elemanları ve boş zaman, bir çevrim zamanı için gösterilmiştir. Önerilen yöntem ile kümülatif ergonomik risk skorunun nasıl hesaplanacağı Denklem (4.1)' de gösterilmektedir. R_j istasyonda bulunan j iş elemanının REBA yöntemiyle hesaplanmış risk skorudur. Bir iş elemanının oluşturduğu ergonomik risk

skoru, işlem süresi ile çarpılarak bulunur. Bir istasyonun ergonomik riski iş elemanlarının ergonomik riskleri toplanarak hesaplanır. Bunlara ek olarak bu çalışmada, bir çevrim süresi içinde hiç durmaksızın saatlerce çalışmanın işçide kısa zamanda KİSR' e neden olacağı ve dinlenme sürelerinden ayrı olarak, her yeni bir ürüne geçmeden çalışanın birkaç saniye hareketsiz/serbest kalmasının kümülatif riski azaltıcı etkisi de dikkate alınmak istenmiştir. Bu amaçla bir çevrim için geçirilen boş zaman süre ağırlıklı toplam risk yükünden çıkarılmıştır. Ağırlıklı ortalama risk yükünün hesaplanması için istasyon çevrim zamanına bölünmüştür.



Şekil 4.1. İstasyon iş yükü hesabı

İEj = İş elemanı

Rj = Reba Skoru

tj = İş elemanının süresi

BZ= İstasyon boş zaman faaliyetleri

Rboş = Boş işçinin REBA skoru

tboş = İstasyon boş zamanı

$$ER_k = \frac{(\sum_{j=1}^n R_j * t_j) - R_{boş} * t_{boş}}{C} \quad (4.1)$$

4.3. Ergonomik Risk Kısıtlarını İçeren Çok Amaçlı Optimizasyon Modeli

Bu bölümde, BMHDP' ye yeni bir yaklaşım sunularak, iş elemanları istasyonlara atanırken, işlem sürelerinin yanında risk skorlarını da dikkate alan çok amaçlı bir model önerisi yapılmıştır. Geliştirilen çok amaçlı modelin amacı aynı anda hem istasyon

zamanlarını en küçüklemek hem de ergonomik risk skorlarını en küçüklemektir. Bu iki amaç farklı şekillerde biçimlendirilebilir. Örneğin bir işin işlem zamanı, çevrim süresi veya gerçekleşen istasyon zamanının ideal istasyon zamanından sapmaları gibi farklı ifadeler kullanılabilir. Benzer şekilde bir iş elemanının veya istasyonun ergonomik risk skoru, maksimum ergonomik risk limiti veya ortalama risk skorundan sapmalar gibi farklı ifadelerle karakterize edilebilir.

Matematiksel modelden önce, parametre ve değişken tanımlamaları aşağıdaki gibidir:

İndis ve parametreler kümesi:

j, i : İş elemanları indisi ($j=1, \dots, |J|$).

k : İstasyon indisi ($k=1, \dots, |K|$).

P_j : j iş elemanından önce iş elemanları indisi.

m : İstasyon sayısı, $m=|K|$, bilinen ve sabit bir değer.

t_j : j iş elemanlarının işlem süresi.

C : Çevrim süresi.

R_j : j iş elemanının REBA skoru.

ER_j : j iş elemanının ergonomik risk skoru, Denklem (4.2)'deki gibidir.

$$ER_j = R_j * t_j \quad (4.2)$$

T_{ort} : Bir ürün üretmek için her istasyondaki ortalama süre, Denklem (4.3)'te verilmiştir.

$$T_{ort} = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^{|J|} t_j \quad (4.3)$$

ER_{ort} : Her istasyon için ortalama ergonomik risk skoru, bakınız Denklem (4.4).

$$ER_{ort} = \frac{(\sum_{j=1}^{|J|} R_j * t_j) - (k * C - \sum_{j=1}^{|J|} t_j * X_{j,k}) ER_{boş}}{C * k} \quad (4.4)$$

$R_{boş}$: İşçinin boş kaldığı zamanlardaki ergonomik riski

BZ_k : k istasyonunda boş geçen zaman, bakınız Denklem (4.5)

$$BZ_k = C - \sum_{j \in (x_{jk}=1)} t_j \quad (4.5)$$

ER_{max} = Bir istasyonun alabileceği izin verilen maksimum ergonomik risk skoru
Olmak üzere,

Karar Değişkenleri:

$$x_{jk} = \begin{cases} 1, & j \text{ iş elemanı } k \text{ istasyonuna atandıysa} \\ 0, & \text{d. d.} \end{cases}$$

$T_{j,k}$: k istasyonuna atanmış j iş elemanlarının toplam işlem zamanı, Denklem (4.6)'daki gibidir.

$$T_{j,k} = \sum_{j \in (x_{jk}=1)} t_j \quad (4.6)$$

$ER_{j,k}$: k istasyonuna atanmış j iş elemanlarının toplam ergonomik risk skoru, bakınız Denklem (4.7).

$$ER_{j,k} = \sum_{j \in (x_{jk}=1)} ER_j \quad (4.7)$$

$$ER_{ort} = \frac{(\sum_{j=1}^n R_j * t_j) - R_{boş} * BZ_k}{C} \quad (4.8)$$

$S_k^+ (T)$ = Ortalama istasyon zamanını aşan süre, pozitif sapma, Denklem (4.9)'da gösterilmiştir.

$$S_k^+ (T) = \left[\sum_{j=1}^{|J|} t_j X_{j,k} - T_{ort} \right] \quad (4.9)$$

$S_k^- (T)$ = Ortalama istasyon zamanının altında kalan süre, negatif sapma, bakınız Denklem (4.10).

$$S_k^- (T) = \left[T_{ort} - \sum_{j=1}^{|J|} t_j X_{j,k} \right] \quad (4.10)$$

$S_k^+ (ER)$ = Ortalama istasyon ergonomik risk skorunu aşan risk, pozitif sapma, bakınız Denklem (4.11).

$$S_k^+(ER) = \left[\sum_{j=1}^{|J|} ER_j \cdot X_{j,k} - ER_{ort} \right] \quad (4.11)$$

$S_k^-(ER)$ = Ortalama istasyon ergonomik risk skorunu altında kalan risk, negatif sapma, bakınız Denklem (4.12).

$$S_k^-(ER) = \left[ER_{ort} - \sum_{j=1}^{|J|} ER_j \cdot X_{j,k} \right] \quad (4.12)$$

Y= Maksimum istasyon zamanı

Bu çalışmada ergonomik montaj hattı dengeleme problemi için iki farklı amaç fonksiyonuna göre en iyi çözüm değerleri araştırılmıştır. İlgili amaç fonksiyonlarından birisi klasik MHDP amacı olan Denklem (4.13)' te verildiği gibi en büyük istasyon zamanını enküçüklemektir. Amaç fonksiyonuna her istasyondaki en büyük istasyon zamanını enküçüklemesi gibi bir koşul yazılamayacağı için bu ifade kısıtlara eklenmiş ve Y değişkeniyle amaç fonksiyonunda kullanılmıştır. Bir diğer amaç fonksiyonu ise Denklem (4.14)' te gösterildiği gibi; tüm istasyonların ergonomik risk skor ortalamasından pozitif sapmaların, yani ortalama risk skorunun üzerinde kalan toplam risk skorlarının enküçüklenmesidir. Denklem (4.15) ve Denklem (4.16) numaralı kısıtlar, atama kısıtlarını oluşturur; iş elemanlarının en fazla bir istasyona atanmasını temin eder, ayrıca tüm iş elemanlarının atanmasını sağlar. Denklem (4.17) numaralı kısıt öncelik kısıtıdır. Öncelik diyagramındaki görevler arasındaki her bir öncelik ilişkisinin bozulmaması sağlanmıştır. Denklem (4.18) numaralı kısıt; çevrim zamanı kısıtıdır, görevlerin atandığı istasyonun işlem zamanlarının çevrim zamanını geçmesi engellenmiştir. Denklem (4.19) numaralı kısıt, istasyonların alabileceği toplam ergonomik risk skorunu belirlenen maksimum seviyede sınırlandırması sağlanmıştır. Denklem (4.20) numaralı kısıt istasyonların zamanının, ortalama istasyon zamanından pozitif ve negatif sapmalarını belirlenmesi sağlanmıştır. Denklem (4.21) numaralı kısıt istasyonların ergonomik risk faktörlerinin, ortalama ergonomik risk düzeyinden pozitif ve negatif sapmaları belirlenmesi sağlanmıştır. Denklem (4.22) numaralı kısıt ile hattaki maksimum istasyon süresinin bulunması sağlanmıştır, böylece direk değişken olarak amaç fonksiyonunda kullanılabilir.

1. Amaç Fonksiyonu:

$$F_1(x) = Y \quad (4.13)$$

2. Amaç Fonksiyonu:

$$F_2(x) = \sum_{k=1}^K S_k^+(ER) \quad (4.14)$$

Kısıtlar:

$$\sum_{k=1}^{|K|} X_{j,k} = 1, \quad \forall j \quad (4.15)$$

$$\sum_{j=1}^{|J|} X_{j,k} \geq 1, \quad \forall k \quad (4.16)$$

$$k(\sum_{k=1}^{|K|} X_{i,k} - \sum_{k=1}^{|K|} X_{j,k}) \leq 0, \quad i \in P_j \text{ ve } \forall j \quad (4.17)$$

$$\sum_{j=1}^{|J|} t_j X_{j,k} \leq C, \quad \forall k \quad (4.18)$$

$$\sum_{j=1}^{|J|} ER_j X_{j,k} \leq ER_{max}, \quad \forall k \quad (4.19)$$

$$\sum_{j=1}^{|J|} t_j X_{j,k} - S_k^+(T) + S_k^-(T) = T_{ort}, \quad \forall k \quad (4.20)$$

$$\frac{(\sum_{j=1}^n R_j * t_j) - ER_{boş} * BZ_k}{C} - S_k^+(ER) + S_k^-(ER) = ER_{ort}, \quad \forall k \quad (4.21)$$

$$Y \geq \max \left[\sum_{j \in (x_{jk}=1)} t_j X_{j,k} \right], \quad \forall k \quad (4.22)$$

4.4. Çok Amaçlı MHDP'nin Konik Skalerleştirme Yöntemi Kullanılarak Skalerleştirilmesi

Skalerleştirme, birden fazla amaç fonksiyonunun hepsini temsil edebilecek tek bir fonksiyona dönüştürülmesidir. Literatürde birçok skalerleştirme yöntemi mevcuttur (Luc,

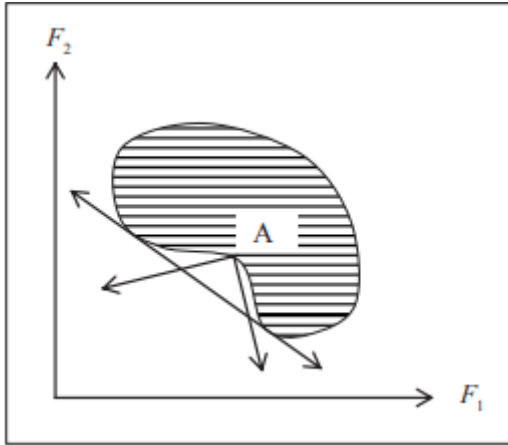
1989; Chankong ve Haimes, 1983; Ehrgott, 2005). Gasimov (2001) tarafından önerilen yaklaşım: kullanılışlığı, bir referans noktasına yakın çözümlerin araştırılmasına olanak tanınması, çok geniş bir problem sınıfına uygulanabilmesi ve en önemlisi de hiper düzlemlerle desteklenmesi mümkün olmayan noktaların desteklenmesine olanak tanınmasıyla öne çıkmaktadır. Bu bölümde söz konusu yaklaşımın Çok Amaçlı MHDP çözümünde nasıl kullanılabileceği açıklanmaktadır.

4.4.1. Konik skalerleştirme yöntemi

Klasik ağırlıklı toplam yönteminde, her bir amaç fonksiyonu ($F_i(x)$) belirli bir ağırlık (w_i) değeriyle çarpılarak toplanır ve böylece problem tek amaçlı bir yapıya dönüştürülmüş olur. K amaçlı bir yapı için ağırlıklı toplam gösterimi Denklem (4.23)'te verilmiştir.

$$\text{enk}[\sum_{i=1}^K w_i * F_i(x)] \quad (4.23)$$

Ancak, klasik ağırlıklandırma yöntemiyle çözüm uzayında hiper düzlemlerle desteklenemeyen Pareto etkin çözümleri elde etmek mümkün değildir. Şekil 4.1'de iki amaçlı bir örnek problemin dışbükey olmayan görüntü kümesi yer almaktadır. Bu dışbükey olmayan kümedeki A noktasının bir doğru ile desteklenmesi mümkün değildir. Ama aynı nokta bir koni ile desteklenebilir.



Şekil 4.2. İki amaçlı örnek problem için dışbükey olmayan görüntü kümesi (Sipahioğlu ve Saraç, 2010)

Konik skalerleştirme yönteminde noktalar hiper düzlemlerle değil konilerle desteklendiğinden, klasik ağırlıklandırma ile bulunması mümkün olmayan Pareto etkin

çözümlerin elde edilmesi mümkün olabilmektedir. Konik skalerleştirme yöntemi, dışbükeylik koşulu gerektirmedüğinden çok geniş bir problem sınıfına başarıyla uygulanabilmektedir. Yöntemde farklı amaç fonksiyonlarının birleştirilmesinde dışbükey monoton fonksiyonlar kullanıldığından, eğer asıl problem doğrusal veya dışbükey ise dışbükeylik korunmaktadır (Gasimov, 2001). Konik skalerleştirme formülasyonu Gasimov (2001) tarafından mihjubvgerçekleştirilmiş ve Denklem (4.24)' de gösterilmiştir.

$$[\alpha \sum_{i=1}^K |F_i(x) - B_i| + \sum_{i=1}^K w_i (F_i(x) - B_i)] \quad (4.24)$$

Burada α ve w_i kullanıcı tarafından belirlenmesi gereken parametrelerdir. Parametrelerin $0 \leq \alpha < \text{enk}\{w_1, w_2\}$, $w_1, w_2 > 0$ koşullarını sağlayacak şekilde seçilmeleri gerekmektedir. Geometrik açıdan α , oluşturulacak destek konisinin tepe açısını değiştirmek için kullanılmaktadır. Mutlak değer içindeki ifadenin her zaman pozitif değer almasını önlemek amacıyla kullanılması gereken bir sabit değerdir. Aksi hâlde konik yapı oluşamaz. B_i aynı zamanda çözümlerin civarında aranacağı bir referans noktası görevini de yerine getirmektedir. İki amaçlı bir $\text{enk}[F_1(x), F_2(x)]$ problemiyle bu problemin amaç fonksiyonlarından sabit sayıların çıkarılmasıyla elde edilmiş $\text{enk}[F_1(x) - B_1, F_2(x) - B_2]$ probleminin aynı Pareto etkin çözüm kümesine sahip olduğu ispat edilmiştir.

4.4.2. Çok amaçlı MHDP'nin skalerleştirilmesi

0-1 çok amaçlı montaj hattı dengeleme problemini konik skalerleştirme yöntemiyle (KSY) çözebilmek için izlenmesi gereken yöntem aşağıda maddeler halinde verilmiştir (Sipahioğlu ve Saraç, 2010).

Adım 1: α ve w_i değerlerini $0 \leq \alpha \leq \text{enk}\{w_1, w_2\}$ koşullarını sağlayacak şekilde, $[1, 50]$ aralığından seç.

Adım 2: Problemi önce verilen parametre aralığında, 4.23 numaralı ağırlıklı toplam formülasyonunu kullanarak çöz ve Pareto etkin noktaları belirle (Elde edilen bu noktalar dışbükey Pareto çözümlerdir.).

Adım 3: Olası içbükey Pareto çözümleri elde etmek için 4.24 numaralı formülasyonu kullan. Oluşan matematiksel modeli çöz ve Pareto etkin çözümleri belirle.

Burada dikkat edilmesi gereken bir nokta vardır. Problemin yapısı gereği eğer birim kârlar pozitif ise, tüm amaç fonksiyonları pozitif değer alacağı için konik yapı oluşamaz. Konik yapıyı elde edebilmek için, mutlak değerin içinde negatif ifadelerin de oluşabilmesini sağlamak gerekir. Bunun için i. amaç fonksiyonundan sabit bir sayı (B_i) çıkarılmıştır. B_i 'lerin alacağı değerler, klasik ağırlıklandırma ile elde edilen çözüm aralıklarının arttığı bölgelerden rassal olarak seçilebilir. Böylece daha önce belirlenmiş olan bazı dışbükey Pareto çözümler arasında, içbükey Pareto çözümlerin de olup olmadığının araştırılması mümkün olur. B_i belli bir değer civarındaki içbükey Pareto çözümlerin araştırılmasına olanak tanıdığı için referans değer olarak isimlendirilmektedir.



5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde geliştirilen model ve çözüm metodolojisinin beyaz eşya fabrikasının tek model ankastre bulaşık makinesi üretilen montaj hattında uygulaması sunulmuştur. Montaj hattındaki iş elemanları sayısının çokluğu bir montaj hattının dengelenmesindeki en büyük zorluklardandır. Bu çalışmadaki bir başka zorluk kaynağı da, risk skorlarının da dikkate alınması olmuştur. Her biri ayrı amacı gerçekleştirmek üzere iki farklı çözüm elde edilmiştir. İlk olarak istasyon zamanının enküçüklemek amacı altında risk skorları dikkate alınmadan model oluşturulmuş ve GAMS Cplex çözücüsü kullanılmıştır. İkinci çözümde ise, model çok amaçlı olarak kurulmuş ve farklı çözüm yöntemleri ile pareto çözümler elde edilmiştir. Son olarak kurulan iki modele ait sonuçlar değerlendirilmiştir.

5.1. Geliştirilen Modelin Farklı Yöntemlerle Çözülmesi

Bu bölümde, geliştirilen çok amaçlı matematiksel modelin, 4. bölümde anlatılan bulaşık makinesi hattını dengeleme problemine uygulanması sonucunda elde edilen bulgular analiz edilmiştir. Bu modelin temel varsayımları şunlardır (Gökçen,1994):

- Tek çeşit bir ürünün montajı büyük miktarlarda gerçekleştirilir.
- İş elemanlarının süresi deterministiktir.
- Problemin öncelik diyagramı bilinmektedir.
- Bir iş elemanı iki ya da daha fazla istasyon arasında bölüştürülemez.
- Bir iş elemanı kendisinden önce gelen işlemler tamamlanmadan başlayamaz.

Öncelikle iki amaç fonksiyonu, en büyük istasyon zamanı ve ortalama ergonomik risk skorundan pozitif sapmalar, ayrı ayrı tek amaçlı model halinde eniyilenmiştir. Çizelge 5.1’ de gösterildiği gibi sadece istasyon zamanının enküçüklenmesi pozitif ergonomik risk sapmalarını optimal değerine göre % 73.7 kadar arttırırken; sadece pozitif sapmaların enküçüklenmesi amaçlandığında istasyon zamanı optimal değerine göre % 12.2 kadar artmıştır.

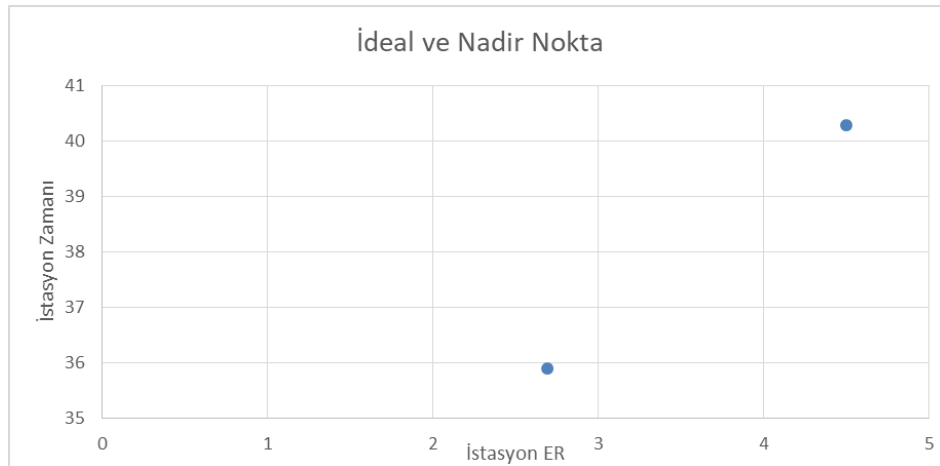
Çizelge 5.1. Her bir amaç fonksiyonunun optimizasyon değeri ve diğer amaç fonksiyonuna etkisi

Amaç fonksiyonu değeri ve artış miktarı	Tek amaçlı optimizasyon problemi	
	min(max TT)	min (S(ER)+)
TT	35,9	40,28
risk skor sapmaları	10,25	2,69
istasyon süresinde artış %	-	12,20%
risk skor sapmalarında artış %	73,70%	-

Çok amaçlı modeller de amaçlara yönelik öncelikle ideal ve nadir noktalar bulunmalıdır. İdeal nokta; amaç uzayında her bir amaç fonksiyonu eniyilendiğinde amaç fonksiyonların aldığı en iyi değerdir. Nadir nokta ise, pareto etkin çözümlerin içinde amaç fonksiyonunu en kötü yapan değerdir. Nadir noktanın bulunması için her bir amaç için bulunan ideal değerler kısıt olarak modele eklenir ve sonra diğer amaç eniyilenir. Şekil 5.1’de problem için iki amaç değerinin ideal ve nadir noktaları gösterilmiştir.

İdeal Nokta = (35,9 ; 2,69)

Nadir Nokta = (40,28 ; 4,50)



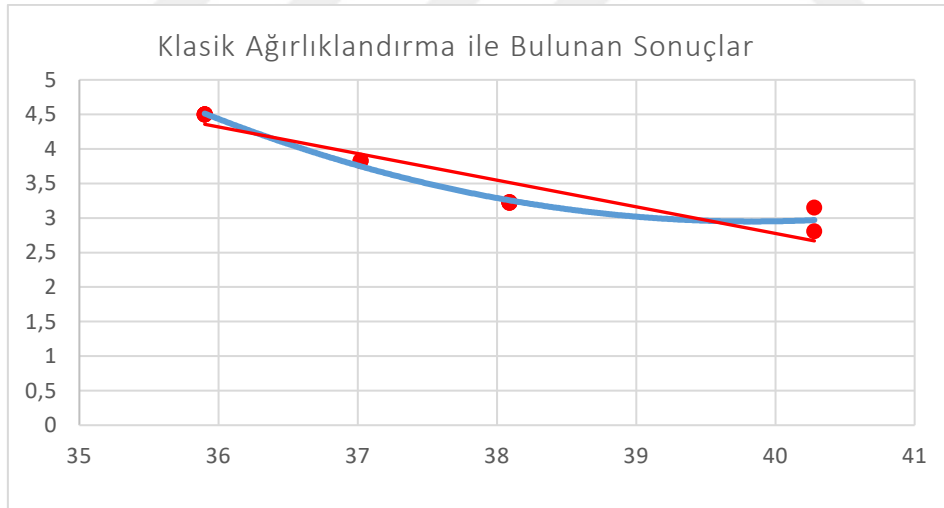
Şekil 5.1. Örnek problemin ideal ve nadir noktaları.

Çözümler için birçok çözücü denenmiş ve hem Dicopt hem Cplex çözücüsüyle Conopt çözücüsünün kombinasyonu en iyi çözümleri bulmayı başarmıştır. Örnek problemin klasik ağırlıklı toplam yöntemiyle bulunan Pareto etkin çözümleri Çizelge 5.2’ de verilmiştir. Birinci amaç fonksiyonu yani istasyon zamanının aldığı değer F_1 , ikinci amaç

fonksiyonu ergonomik risk sapmalarının aldığı değer F_2 ile gösterilmiştir, w_1 ve w_2 amaç fonksiyonlarının ağırlıklarıdır. Burada w_1 ve w_2 'nin 1-50 arasındaki tüm kombinasyonları için 6 farklı pareto etkin çözüm bulunmuştur. Örneğin, w_1 (0-31) ve w_2 (50-19) aralığındayken F_1 ve F_2 için (35,9 ; 4,5) pareto noktası bulunmuştur. Çizelge 5.2' de verilen değerler dışbükey Pareto çözümlerdir ve Şekil 5.2' de bu çözümlerin oluşturduğu pareto sınır görüntü kümesi verilmiştir.

Çizelge 5.2. Örnek problem için ağırlıklı toplam ile elde edilen çözümler

w1	w2	F1	F2
9-0	41-50	35,9	4,5
15--31	35-19	35,9	4,5
32	18	37,02	3,83
32,5	17,5	37,02	3,83
33-38	17--12	38,09	3,22
39	0	38,09	3,22
40	10	40,28	3,15
42-50	8-0	40,28	2,81



Şekil 5.2. Pareto etkin çözümlerin oluşturduğu sınır

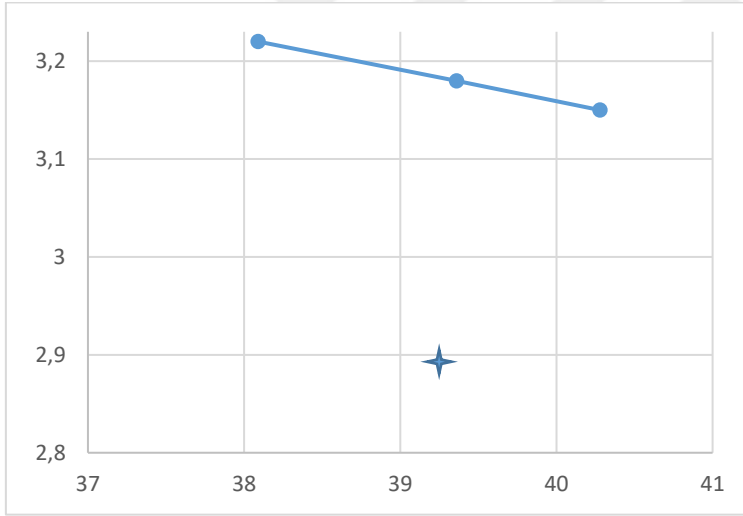
Bu çözümlerin aralarında başka çözümlerin olup olmadığı KSY ile araştırılmıştır. Sırasıyla, problemdeki (38,09 ; 3,22) ve (40,28 ; 2,81) noktaları arasında ve (35,9 ; 4,5) ve (38,09 ; 3,22) noktaları arasında hiper düzlem ile desteklenemeyen ve bu nedenle ağırlıklı toplam yöntemiyle elde edilemeyecek çözümlerin varlığı araştırılmıştır. Bu amaçla, referans

değerleri B_1 , B_2 sırasıyla (37; 3,80) ve (38,2 ; 3,20) seçilerek KSY uygulanmış ve Çizelge 5.3’ te verilmiş olan yeni Pareto çözüm elde edilmiştir.

Çizelge 5.3. Problem için konik skalerleştirme yöntemiyle bulunan yeni pareto etkin çözüm

α	w_1	w_2	F_1	F_2
5	44	6	39,36	2,91

Bulunan yeni Pareto çözümün klasik ağırlıklandırma ile elde edilemeyeceği Şekil 5.3’te grafik olarak gösterilmiştir. Görüldüğü gibi yeni Pareto etkin nokta, ağırlıklı toplam yöntemiyle daha önce bulunmuş olan iki nokta arasındaki doğrunun gerisinde kalmaktadır. Bu da o bölgede bir dışbükey olmayan alan olduğunun ve hiper düzlemin o noktada doğru ile desteklenemeyeceğini; yani klasik skalerleştirme yöntemlerinin herhangi biriyle bulunamayacağını göstermektedir.



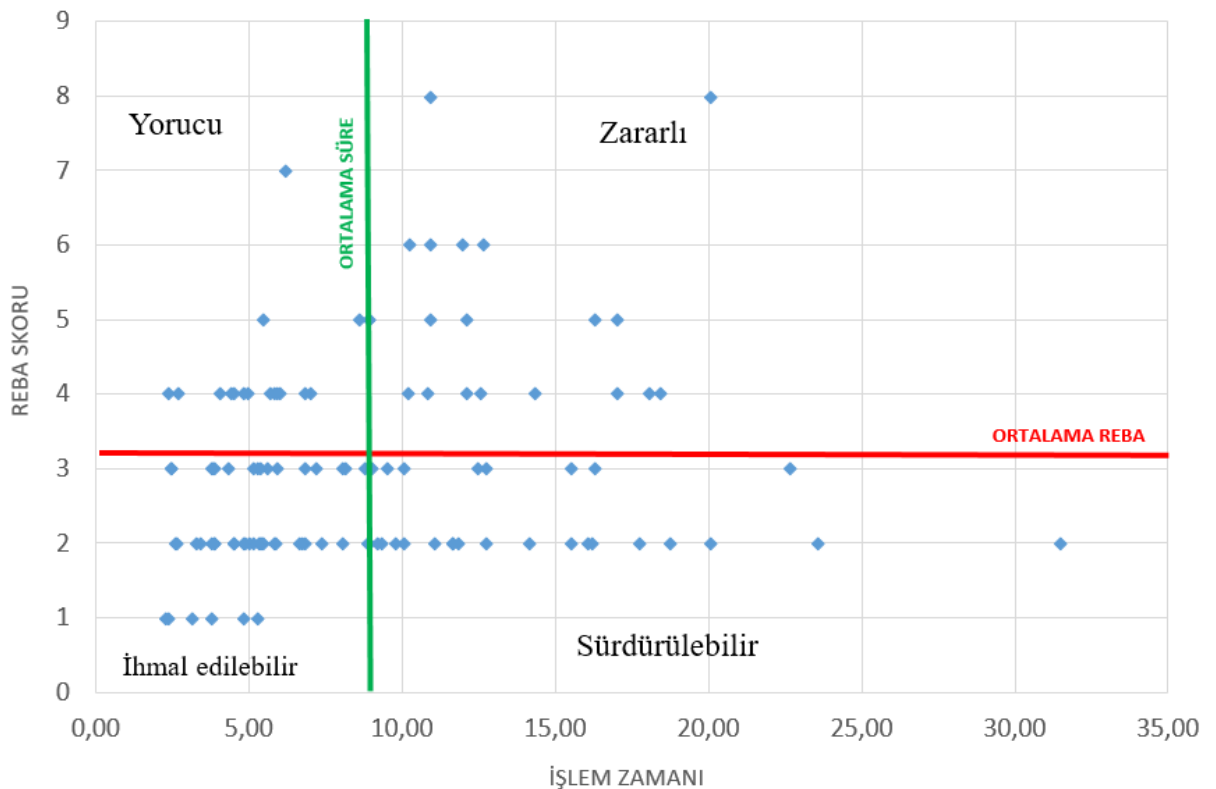
Şekil 5.3. Konik skalerleştirme yöntemiyle bulunan yeni Pareto çözüm

5.2. Elde Edilen Çözümlerin Karşılaştırılması ve Analizi

Uygulanan yaklaşımlarda çoğunlukla işlemlerin ergonomik riski ve süresi ayrı ayrı ele alınmıştır. Önerilen kümülatif istasyon risk düzeyinin hesaplanması da işlem sürelerini ve risk skorlarını eşzamanlı dikkate aldığından dolayı literatüre yeni bir yaklaşım sunmaktadır. Bu bölümde öncelikle montaj hattında yapılan iş elemanları için, işlem süreleri

ve REBA skorlarını dikkate alan bir sınıflandırma yapılmıştır (Bortolini vd., 2017). Bu sınıflandırmaya göre; yüksek risk seviyesinde ve kısa süreli iş elemanları “Yorucu” olarak adlandırılmıştır, bu işlerin çalışan üzerindeki ergonomik riski kısıtlıdır. Buna karşılık, uzun süreli düşük risk seviyesindeki vücut duruşlarını oluşturan işler “Sürdürülebilir” olarak tanımlanmıştır. En tehlikeli iş elemanları ise; zararlı olarak tanımlanan uzun süreli devam eden, yüksek risk seviyesindeki iş elemanlarıdır. Son olarak işlem süresi ve risk seviyesi ortalama seviyelerin altında olan iş elemanları “İhmal edilebilir” olarak sınıflandırılmıştır. İncelenen Bulaşık Makinesi hattındaki iş elemanları bu sınıflandırmaya göre Şekil 5.4’ teki gibi oluşturulmuştur. Hatta yapılan iş elemanlarının:

Ortalama REBA skoru ; 3,06, ortalama işlem zamanı; 8,75’ tir. Bu değerlere göre Şekil 5.4 oluşturulmuş ve bulaşık makinesi hattındaki iş elemanlarının çoğunluğunun ihmal edilebilir ve sürdürülebilir iş elemanı olduğu görülmektedir. İş elemanlarının %16’ sı ise hem risk skoru yüksek hem de süresi fazla olan zararlı iş elemanı kategorisinde bulunmaktadır.



Şekil 5.4. Bulaşık makinesi hattındaki iş elemanlarının süre ve risk düzeylerine göre sınıflandırılması

Montaj Hattının belirlenen iş elemanları süre ve REBA skorlarına göre ortalama kümülatif risk seviyesi ise Denklem 5.1’ deki gibi hesaplanabilir:

$$ER_{ORT} = \frac{(\sum_{j=1}^n R_j * t_j) - [k * C - \sum_{j=1}^n R_j * t_j]}{C * k} \quad (5.1)$$

Buna göre hattın ortalama kümülatif risk seviyesi aşağıdaki gibi bulunmuştur.

$$\frac{3100,9 - [32 * 41 - (944,96)]}{41 * 32} = 2,08$$

Bu değerler temel alınarak istasyonların risk seviyesi için Çizelge 5.4’ teki sınıflandırma yapılmıştır:

Çizelge 5.4. İstasyon risk düzeyleri

İstasyonun Kümülatif Risk Skoru	Risk Düzeyi
$ER \geq 2.1$	Yüksek Riskli
$1.6 \geq ER < 2.1$	Riskli
$ER < 1.6$	Düşük Riskli

İlk olarak montaj hattı problemi, ergonomik risk düzeyleri dikkate alınmadan tek amaçlı olarak çözülmüş ve istasyonlara atanan iş elemanları sonucunda oluşan istasyon zamanı, istasyon boş zamanı , yani takt time (TT) ve istasyon kümülatif risk düzeyi (ER) incelenmiştir. Bu çözümle elde edilen tüm istasyon atamaları Ek Açıklama-E’ de verilmiştir. Bu atama sonucunda her bir istasyonun kümülatif risk skoru; işlem zamanını, boş zamanı ve REBA skorlarını hesaba katan önerilen yöntem ile hesaplanmıştır. Örneğin Ek Açıklama-E’ de 1. istasyona atanan iş elemanları sonucu Çizelge 5.5’ te gösterilmiştir:

Çizelge 5.5. Örnek bir istasyon sonuçları

İstasyon	İş Elemanı	İşlem Zamanı	ER(R*t)	TT (sn)	Boş Zaman	İstasyon ER(R*t)
1	2	15,19	45,58	31,24	9,76	1,66
	4	16,05	32,10			

Birinci istasyonun toplam işlem zamanı: 31,24 sn

Boş zaman: 9,76 olarak elde edilmiştir.

İlgili istasyonun kümülatif risk skoru Denklem (4.1) kullanılarak hesaplanınca:

$$\frac{(45,58+32,10-9,76)}{41} = 1,66 \text{ olarak hesaplanmıştır.}$$

Ek Açıklama-E' de Maksimum istasyon zamanının enküçüklenmesi amaçlanarak elde edilen çözümler incelendiğinde, atama sonucu yukarıda yapılan sınıflandırmaya göre: Yüksek Riskli İstasyon sayısı 13, Riskli istasyon sayısı 10 ve Düşük Riskli İstasyon Sayısı 8 olmuştur.

Daha sonra model KSY yöntemiyle hem istasyon zamanı hem de ortalama ergonomik risk seviyesinden sapmaların enküçüklenmesi amacıyla çözülmüştür, elde edilen sonuçlar Ek Açıklama-F' de verilmiştir. Elde edilen atama sonucu Çizelge 5.4' te yapılan sınıflandırmaya göre: yüksek riskli istasyon sayısı 9, riskli istasyon sayısı 14 ve düşük riskli istasyon Sayısı 9 olmuştur. İki çözüm prosedürünün sonucunda elde edilen atamalar sonucu hatta oluşan istasyonların risk seviyeleri Çizelge 5.6' da özetlenmiştir.

Çizelge 5.6. Çözüm sonuçlarının karşılaştırılması

	Tek Amaç (TT)	Çok Amaç (KSM)
Yüksek Riskli İstasyon	13	9
Riskli İstasyon	10	14
Düşük Riskli İstasyon	9	9

Özetle modele eklenen ikinci amaç sonucunda yüksek riskli istasyon sayısı 13' ten 9' a düşmüştür ve ergonomik risk anlamında daha dengeli bir hat elde edilmiştir.

İki farklı modelin çözümleri maksimum istasyon zamanı açısından sonuçları Çizelge 5.7' deki gibidir. KSY ile elde edilen çözümde maksimum istasyon zamanı 3,46 saniye artış göstermiştir, bu süre yine de çevrim zamanından (41) daha kısa bir sürede hattın dengelenmesini sağlamıştır.

Çizelge 5.7. İki modelin maksimum istasyon zamanı açısından çözüm sonuçları

	Tek Amaç (TT)	Çok Amaç (KSM)
Maksimum istasyon zamanı	35,9	39,36

5.3. KSY İle Elde Edilen Çözümün OMAX Yöntemiyle Analizi

Objektif Matris Yöntemi (OMAX), bir toplam performans göstergesi elde etmek için, çeşitli performans göstergelerini ağırlıklandırma yöntemiyle bir arada değerlendiren bir performans ölçüm yöntemidir (Riggs, 1970). Burada performans göstergesi olarak maksimum istasyon zamanı ve ergonomik risk sapması kriterleri kullanılmıştır. Her performans ölçütü için 0' dan 10' a kadar puanlara karşılık gelen performans değeri yazılır ve en küçük (0 puan) ve en büyük (10 puan) arasında 11 düzeye bölünür. Montaj hattı için maksimum değer, montaj hattının dengelenebileceği maksimum istasyon zamanıdır, dolayısıyla bu değer çevrim zamanına denk gelir. Çevrim zamanı 41 saniye, hattın alabileceği en büyük değerdir. Minimum değer ise hattın en kısa zamanda dengelenebileceği değerdir bu da tek amaçlı matematiksel model ile bulunan ideal noktaya karşılık gelir. Dolayısıyla 35,9 hattın alabileceği minimum değerdir. Ergonomik risk sapmaları için de hattın alabileceği maksimum değer, tek amaçlı modelde nadir nokta ile elde edilen 4,5 değeridir. Minimum değer ise ideal nokta ile bulunan 2,61 değeridir. Bu değerler Çizelge 5.8' deki gibi gösterilmiştir.

Çizelge 5.8. Hattın iki performans göstergesi açısından maksimum değerleri

	Süre Kriteri	ER Kriteri
Maksimum Değer	41	4,5
Minimum Değer	35,9	2,61

Daha sonra Çizelge 5.9' daki gibi 10 lu skalada çelişen iki performans göstergesi için dengeleme performansları bulunmuştur. KSY ile dengelenen hattın istasyon zamanı ve risk skorları değerleri sırasıyla 39,36 ve 2,91 olarak elde edilmiştir. Bu değerlerin her iki kriterde denk geldiği aralık tabloda ara değerlere denk geliyorsa interpolasyon ile hesaplanarak ayrı ayrı dengeleme performansı elde edilir. Burada istasyon zamanı 39,36, (38,96-39,47) aralığına denk gelmektedir, o halde süre için dengeleme performansı interpolasyon ile yaklaşık olarak 3,2 ye denk gelir, bu da skor olarak %0,32 olarak ifade edilir. KSY ile elde edilen risk sapması 2,91 ise tabloda (2,80-2,99) aralığına gelmektedir, interpolasyon ile bu

değer 9,5 performans değerine denk gelir ve skor olarak % 0,95 olarak ifade edilir. OMAX yönteminde karar vericinin ölçülen kriterlere bir ağırlık tayin etmesi gerekir. KSY ağırlıklar w_1 ve w_2 sırasıyla 6 ve 44 olduğunda etkin pareto çözümü elde etmişti. Burada KSY ile bulunan çözümün performansı analiz edildiği için ağırlıklar aynı alınmıştır. Sonuçta bu dengelemenin performansı Çizelge 5.10’ da gösterildiği gibi %87 olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 5.9. Performans göstergeleri için 10’ lu skala

Süre Kriteri	ER Kriteri	Dengeleme Performansı
35,9	2,61	10
36,41	2,80	9
36,92	2,99	8
37,43	3,18	7
37,94	3,37	6
38,45	3,56	5
38,96	3,74	4
39,47	3,93	3
39,98	4,12	2
40,49	4,31	1
41	4,50	0

Çizelge 5.10. OMAX yöntemiyle hesaplanan toplam performans

Skor	0,32	0,95
Ağırlık	0,12	0,88
Değer	0,04	0,84
Toplam dengeleme performansı	0,87	

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, MHDP' ye çok amaçlı bir model yaklaşımı geliştirilmiştir. Çoğunlukla ayrı ayrı değerlendirilen montaj işlerinin süreleri ve oluşturdukları ergonomik riskler eşzamanlı değerlendirilerek, risk skorları da MHDP' ye dahil edilmiştir. Bu amaçla geliştirilen modelin amaçları; hem en büyük istasyon zamanını enküçüklemek, hem de ortalama ergonomik risk sapmalarını enküçüklemektir. Birçok çalışmada istasyonların risk skoru hesaplanırken iş elemanlarının anlık risk skorunun toplanabileceği varsayılarak kısıtlara veya amaç fonksiyonuna bu şekilde eklenmektedir. Bu çalışmada risk skorları modele eklenirken yeni bir yaklaşım ile hesaplanarak kısıt haline getirilmiştir. İstasyonların kümülatif ergonomik risk skoru için; işlem zamanı, boş zaman ve REBA skoru kullanılarak literatüre katkı sağlayan bir formülasyon geliştirilmiştir. Bu iki amacın birbiriyle çelişmesi nedeniyle amaç fonksiyonu skaler hale getirilmiştir. Klasik skalerleştirmenin çözüm bulamadığı alanlardaki alternatif eniyi çözümlerin araştırılması için KSY ergonomik risk kısıtlarını içeren MHDP' de ilk defa denenmiş ve büyük boyutlu problemlerde bile başarıyla uygulanabileceği literatüre katkı sağlaması amacıyla gösterilmiştir. Bir beyaz eşya fabrikasının bulaşık makinesi montaj hattında modelin uygulaması yapılarak sonuçlar analiz edilmiştir. Problem hem tek amaçlı hem çok amaçlı olarak GAMS (The General Algebraic Modeling System) paket programı ile çözülmüş ve en büyük istasyon süresi ve ergonomik risk sapmaları açısından karşılaştırılmıştır. Çok amaçlı oluşturulan modelin çözümünde klasik ağırlıklandırma ve KSY olmak üzere iki farklı yöntem uygulanmıştır. KSY' de iki amaç için farklı ağırlık kombinasyonları ve farklı referans değerler ile bulunan pareto çözümler analiz edilerek, klasik ağırlıklandırma yöntemiyle bulunamayacak bir pareto çözüm elde edildiği görülmüştür. Burada toplam ergonomik risk sapması kısıtına verilen ağırlık arttıkça GAMS çözüm süresinin hem klasik ağırlıklandırma hem KSY' de arttığı görülmüştür. KSY, farklı pareto noktanın bulunması için 5000 saniye süre ile klasik ağırlıklandırmadan daha fazla sürede çözüm elde etmesine rağmen, hem yüksek riskli istasyon sayısını azaltması hem de çevrim süresi ve istasyon sayısını aşmayarak üretim hedeflerini sağlaması nedeniyle oldukça iyi performans göstermiştir. Tek amaçlı, istasyon zamanını en küçüklemeyi amaçlayan modelde yüksek riskli istasyon sayısı 13 tane elde edilmişken, çok amaçlı KSY ile çözülen modelde istasyon sayısında bir artış olmadan, yüksek riskli istasyon sayısı 9 olarak bulunmuştur. Atama sonuçları incelendiğinde, ilk

atamada elde edilen yüksek riskli istasyonlara, kümülatif risk skoru daha düşük olan farklı iş elemanları atandığı görülmüştür. KSY ile elde edilen çözümde bir istasyonun kümülatif risk skoru en fazla 3,3 değerini alırken bu değer tek amaçlı modelde 4' e çıkmıştır. Ayrıca istasyonun süre ve ergonomik risk gibi farklı kriterler bazında performans değerlendirmesi için OMAX yönteminin MHDP sonuçlarını değerlendirmede bir analiz aracı olarak kullanılabileceği literatüre katkı sağlaması için gösterilmiştir.

Gelecek çalışmalarda çok modelli, karma modelli, stokastik süreli montaj hatları gibi farklı montaj hattı karakteristiklerinde de modelin uygulaması yapılabilir. Örneğin karma modelli hatlarda, farklılıklardan ve karmaşıklıklardan oluşacak hata yapma ve işçinin bilişsel yük faktörleri dikkate alınabilir. Basit gözleme dayalı ergonomik risk ölçümler yerine direk ölçüm yöntemleri kullanılabilir. REBA yöntemi ile hesaplanan risk skorunda hareketin sıklığı dikkate alınıyor ancak montaj hattında risk değerlemesi için bazı noktalarda basit kalmaktadır. Çalışan iş elemanı sırasında bile duruşunu değiştirebilmektedir. Çalışmada önerilen yöntem ile bir iş elemanı esnasında gerçekleşen en yüksek risk skoru değerlendirilir. İş elemanı hareket birimlerine bölünerek daha güvenilir sonuçlar elde edilebilir ancak bu yöntem de gerçek hayatta uygulanma zorluğu doğuracaktır. Bunlara ek olarak öngörülen risk seviyeleri ve çalışanların öznel düşünceleri arasında da bir ilişki kurulabilir. İş elemanından doğan fiziksel risk faktörlerine ek olarak bireysel, çevresel ve psikolojik risk faktörleri de montaj hattı dengeleme problemine adapte edilebilir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- 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.
- Akyol, Ş., ve Baykasoğlu, A., 2016, A Multiple-Rule Based Constructive Randomized Search Algorithm for Solving Assembly Line Worker Assignment and Balancing Problem, Journal of Intelligent Manufacturing, 1–17.
- Alghazi, A. ve Kurz, Mary E., 2018, Mixed Model Line Balancing with Parallel Stations, Zoning Constraints, and Ergonomics, Constraints 23,1, 123–53.
- Arkhipov, D., Battaia, O., Cegarra J., ve Lazarev, A., 2018a, Operator Assignment Problem in Aircraft Assembly Lines: A New Planning Approach Taking into Account Economic and Ergonomic Constraints, Procedia CIRP 76, 63–66.
- Arkhipov, D., Battaia, O., Cegarra, J. ve Lazarev, A., 2018b, Work Planning in Low-Volume Assembly Lines under Ergonomic Constraints, Procedia CIRP 72, 786–89. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.03.019>.
- Battaia, O., ve Dolgui, A., 2013, A Taxonomy Of Line Balancing Problems And Their Solution Approaches, International Journal of Production Economics, 142, 259–277.
- Battini, D., Calzavara M., Otto, A. ve Sgarbossa, F., 2016, The Integrated Assembly Line Balancing and Parts Feeding Problem with Ergonomics Considerations, IFAC-Papers OnLine 49,12, 191–96. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.07.594>.
- Battini, D., Delorme, X. Ve Dolgui, A., 2016, Ergonomics in Assembly Line Balancing Based on Energy Expenditure: A Multi-Objective Model, International Journal of Production Research 54, 3, 824–45. <http://dx.doi.org/10.1080/00207543.2015.1074299>.
- Bautista, J., Rocío, A. ve Batalla-García, C., 2016, Maximizing Comfort in Assembly Lines with Temporal, Spatial and Ergonomic Attributes, International Journal of Computational Intelligence Systems 9, 4 788–99.
- Bautista, J., Batalla-García, C. ve Alfaro-Pozo, R., 2016, Models for Assembly Line Balancing by Temporal, Spatial and Ergonomic Risk Attributes, European Journal of Operational Research, 251,3, 814–29.
- Bautista, J., Alfaro-pozo, R. ve Batalla, C., 2016, Advances in Artificial Hands, The Sciences 5,10, 9–12.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Baybars, I., 1986, A Survey of Exact Algorithms for the Simple Assembly Line Balancing Problems, *Management Science* 32, 909-932.
- Baykasoglu, A., Tasan, S., Tasan, A. ve Akyol, S., 2017, Modeling and Solving Assembly Line Design Problems by Considering Human Factors with a Real-Life Application, *Human Factors and Ergonomics In Manufacturing* 27,2, 96–115.
- Becker, C. ve Armin, S., 2006, A Survey on Problems and Methods in Generalized Assembly Line Balancing, *European Journal of Operational Research* 168, 3, 694–715.
- Boenzi, F., Digiesi S., Mossa, G., Mummolo, G., Romano, V., 2013, Optimal Break and Job Rotation Schedules of High Repetitive - Low Load Manual Tasks in Assembly Lines: An OCRA - Based Approach, 46 IFAC Proceedings Volumes IFAC, <http://dx.doi.org/10.3182/20130619-3-RU-3018.00625>.
- Bortolini, M., Maurizio, F., Mauro, G., ve Francesco, P., 2017, Multi-Objective Assembly Line Balancing Considering Component Picking and Ergonomic Risk, *Computers and Industrial Engineering*, 112, 348–67. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cie.2017.08.029>.
- Chankong, V., Haimes, Y.Y., 1983, *Multiobjective Decision Making: Theory and Methodology*, Elsevier Science Publishing Co, New York.
- Carnahan, Brian J., Norman, Bryan A. ve Redfern, Mark S., 2001, Incorporating Physical Demand Criteria into Assembly Line Balancing, *IIE Transactions (Institute of Industrial Engineers)* 33,10, 875–87.
- Choi, G., 2009, A Goal Programming Mixed-Model Line Balancing for Processing Time and Physical Workload, *Computers and Industrial Engineering* 57, 1, 395–400. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cie.2009.01.001>.
- Christmansson, M., Fridén J., ve Sollerman, C., 1999, Task Design, Psycho-Social Work Climate and Upper Extremity Pain Disorders - Effects of an Organisational Redesign on Manual Repetitive Assembly Jobs, *Applied Ergonomics* 30, 5, 463–72.
- Cohen, A. L., Gjessing, C. C., Bernard, B. P., & McGlothlin, J. D. (1997). *Elements of ergonomics programs: A primer based on workplace evaluations of musculoskeletal disorders*. Cincinnati: U.S. Department of Health and Human Services.
- Colombini, D. ve Occhipinti, E., 2006, Preventing Upper Limb Work-Related Musculoskeletal Disorders (UL-WMSDs): New Approaches in Job (Re)Design and Current Trends in Standardization, *Applied Ergonomics* 37, 4 SPEC. ISS., 441–50.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- David, G.C., 2005. Ergonomic Methods For Assessing Exposure To Risk Factors For Work-Related Musculoskeletal Disorders, *Occupational Medical*, 55, 3, 190-199.
- Di Benedetto, Raffaele, ve Michele Fanti. 2012, An Integrated Tool to Support Engineers for WMSDs Risk Assessment during the Assembly Line Balancing, *Work* 41, SUPPL.1, 2329–33.
- EASHW (European Agency for Safety and Health at Work), 2012, Promoting Active Ageing In The Workplace.
- Ehrgott, M., 2005, Multicriteria Optimization, 2. Baskı, Springer- Verlag, Berlin.
- Erel, E., Sarin, S.C., 1998, A Survey Of The Assembly Line Balancing procedures, *Production Planning and Control* 9, 5, 414–434.
- Fleszar, K., ve Hindi, K. S., 2003, An enumerative heuristic and reduction methods for the assembly line balancing problem, *European Journal of Operational Research*, 145, 606-620.
- Garg, A., Chaffin, D. B. ve Herrin, G. D., 1978, Prediction of Metabolic Rates for Manual Materials Handling Jobs, *American Industrial Hygiene Association Journal* 39-8, 661–674.
- Gasimov, R.N. 2001., Characterization of the Benson Proper Efficiency and Scalarization in Nonconvex Vector Optimization, *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*, 507, 189-198.
- Ghosh, S., Gagnon, J., 1989, A Comprehensive Literature Review And Analysis Of The Design, Balancing And Scheduling Of Assembly Systems. *International Journal of Production Research* 27, 637-670.
- Gökçen, H., 1994, Karışık modellenli Deterministik montaj hattı dengeleme problemleri için yeni modeller, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Güner, B. ve Hasgöl, S., 2012, Sürdürülebilir Denge İçin Ergonomik Faktörleri İçeren U-Tipi Montaj Hattı Dengelemesi, *Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 27, 2, 407-415.
- Hignett S, McAtamney L., 2000, Rapid Entire Body Assessment (REBA). *Applied Ergonomics*, 31, 2, 201-205.
- Li, G., Haslegrave, C. M. ve Corlett, E. N. 1995, Factors Affecting Posture For Machine Sewing Tasks: The Need For Changes In Sewing Machine Design, *Applied Ergonomics*, 26, 35- 46.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Li, G. ve Buckle, P., 1998, The development of a practical method for the exposure assessment of risks to work-related musculoskeletal disorders. General report to the HSE, Robens Centre for Health Ergonomics, European Institute of Health and Medical Sciences, University of Surrey.
- Quick Exposure Check (QEC). The Human Factors and Ergonomics Society 42nd Annual Meeting, 1998 October 5- October 9, Chicago.
- Jackson, J.R.,1956, A Computing Procedure for a Line Balancing Problem, *Management Science*, 3, 261-271.
- Jaturanonda, Chorkaew, ve Suebsak Nanthavanij, 2006, Heuristic Procedure for Two-Criterion Assembly Line Balancing Problem, *Industrial Engineering & Management Systems* 5,2, 1–13.
- Jones, T., ve Kumar, S., 2007, Assessment of Physical Demands and Comparison of Multiple Exposure Definitions in a Repetitive Sawmill Job: Board Edger Operator, *Ergonomics* 50,5 676–93.
- Kahya, E., Şahin, B., Daşdelen, E. ve Doğru, S., 2018, Ergonomik Risk Kısıtları Altında Yeni Bir Montaj Hattı Dengeleme Modeli Geliştirilmesi, *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi* 6, ÖS:Ergonomi2017, 188–196.
- Kara, Y., Atasagün, Y., Gökçen, H., Hezer, S. ve Demirel, N., 2014, An Integrated Model to Incorporate Ergonomics and Resource Restrictions into Assembly Line Balancing.” *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 27,11, 997–1007.
- Khandan, M., M Nili, A. Koohpaei, ve Mosaferchi, S., 2016, Integrating the Ergonomics Techniques with Multi Criteria Decision Making as a New Approach for Risk Management: An Assessment of Repetitive Tasks-Entropy Case Study, *Journal of Research in Health Sciences*,16,2, 85–89.
- Luc, D.T., 1989,Theory of Vector Optimization, *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*, Springer Verlag, Berlin.
- Mossa, G., Boenzi, F., Mummolo G., Romano, V., 2016, Productivity and Ergonomic Risk in Human Based Production Systems: A Job-Rotation Scheduling Model, *International Journal of Production Economics* 171, 471–77. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpe.2015.06.017>.
- Nicholson, B., 2010, Ergonomic Assessment and Improvement of the XYZ+ Assembly Line, Yüksek Lisans Tezi, The Graduate School University of Wisconsin, USA

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Otto , A. ve Battaia, O., 2017, Reducing Physical Ergonomic Risks at Assembly Lines by Line Balancing and Job Rotation: A Survey, Computers and Industrial Engineering 111, 467–80. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cie.2017.04.011>.
- Otto, A., ve Scholl, A., 2011, Incorporating Ergonomic Risks into Assembly Line Balancing, European Journal of Operational Research 212, 2, 277–86. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2011.01.056>.
- Rajabalipour, C., Haron, H., Kazemipour, F. ve Desa, M., 2012, Accumulated Risk of Body Postures in Assembly Line Balancing Problem and Modeling through a Multi-Criteria Fuzzy-Genetic Algorithm, Computers and Industrial Engineering 63, 2, 503–12. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cie.2012.03.017>.
- Salveson, M. E., 1955, The assembly line balancing problem. Journal of Industrial Engineering, 6, 18–25.
- Sipahioğlu, A., ve Saraç, T., 2010, Çok Amaçlı Sırt Çantası Probleminin Çözümüne Yeni Bir Yaklaşım: Konik Skalerleştirme, Endüstri Mühendisliği Dergisi, 4,21, 2-12. http://www.mmo.org.tr/sites/default/files/c9618e3c30ff116_ek.pdf.
- Sternatz, J., 2014, Enhanced Multi-Hoffmann Heuristic for Efficiently Solving Real-World Assembly Line Balancing Problems in Automotive Industry, European Journal of Operational Research 235,3, 740–54. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2013.11.005>.
- Sue, H. Ve McAtamney, L., 2014, Rapid Entire Body Assessment (REBA). Applied Ergonomics, 201-205.
- Şahin, B. ve Kahya, E., 2018 ,Hedef Programlama Modeli İle Ergonomik Kısıtlar Altında Montaj Hattı Dengelemesi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi 6, ÖS:Ergonomi2017, 188–196.
- Takanokura, M., Tanaka, T., Watanebe I., Kakehi, I., Utsuki, H. ve Nakamura, M.2017, Posture-Based Risk Assessment for Improvement of Physical Workload: Case Study for an Assembly Line, Journal of Japan Industrial Management Association 67, 4, 338–47.
- Tiacci, L., 2018, The Problem of Assigning Rest Times to Reduce Physical Ergonomic Risk at Assembly Lines, IFAC-PapersOnLine 51,11, 692–97. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.399>.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Tiacci, L., ve Mimmi, M., 2018, Integrating Ergonomic Risks Evaluation through OCRA Index and Balancing/Sequencing Decisions for Mixed Model Stochastic Asynchronous Assembly Lines, Omega (United Kingdom), Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2017.08.011>.
- Xu, Z., Jeonghan K., Cochran, D. ve Jung, M., 2012, Design of Assembly Lines with the Concurrent Consideration of Productivity and Upper Extremity Musculoskeletal Disorders Using Linear Models, Computers and Industrial Engineering 62, 2, 431–41. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cie.2011.10.008>.
- Wei, N., Chao, I., 2011, A Solution Procedure For Type E Simple Assembly Line Balancing Problem, Computers & Industrial Engineering 61, 3, 824–830.

EK AÇIKLAMALAR

Ek Açıklama-A: Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Kurulu

Ek Açıklama-B: REBA Risk Değerlendirme Formu

Ek Açıklama-C: İş Elemanları İçin Tanım ve Veriler

Ek Açıklama-D: İş Elemanları İçin Öncelik Diyagramı

Ek Açıklama-E: İstasyon Zamanının Enküçüklenmesi

Ek Açıklama-F: Çok Amaçlı Matematiksel Modelin KSY ile Enküçüklenmesi

Ek Açıklama-A: Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Kurulu



T.C.
ESKİŞEHİR OSMANGAZİ ÜNİVERSİTESİ
Fen ve Mühendislik Bilimleri Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Kurul
HİZMETE ÖZEL



Sayı : 53893652-299-E.42842
Konu : 2019.06.01.Karar.

09/04/2019

Sayın Prof. Dr. Emin KAHYA
Mühendislik Mimarlık Fakültesi
Endüstri Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyesi

Sorumlu Araştırmacısı olduğunuz *“Ergonomik Risk Kısıtları Altında Çok Amaçlı Montaj Hattı Dengeleme”* başlıklı çalışma hakkında alınan karar ilişikte gönderilmektedir.

Bilgilerinizi ve gereğini saygı ile rica ederim.

Prof. Dr. Neşe ÖZTÜRK
Kurul Başkanı

BU BELGE
İMZA ALIŞI
09.04.2019

Sibel AK
Bilgisayar İşletmeni

HİZMETE ÖZEL

Bu evrak 5070 sayılı Elektronik İmza Kanunu'na göre elektronik olarak imzalanmıştır. Evrak doğrulama adresi:

<https://ebysnetm.ogu.edu.tr/Home/Dogrulama/69a0b12e-f880-4a29-b1a2-0b7babbe3c4f>

Adres	: Meslek Kampüsü PK:26480 Odunpazarı	Ayrıntılı Bilgi	: Münevver Sibel AK - Bilgisayar İşletmeni
Telefon	: 0222 2393750-5074	Faks	:
E-Posta	: sibelak@ogu.edu.tr	Elektronik Ağ	: http://www.ogu.edu.tr
		KEP Adresi	: esk.osmangaziunirek@hs01.kep.tr

Ek Açıklama-A: Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Kurulu (devam)

T.C.
ESKİŞEHİR OSMANGAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN VE MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ
BİLİMSEL ARAŞTIRMA VE YAYIN ETİĞİ KURULU
ESKİŞEHİR

Toplantı Tarihi : 05.04.2019

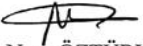
Toplantı No : 2019-06

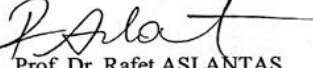
GÜNDEM :

1. Başvuru Sahibi : Prof.Dr. Emin KAHYA. **Konu :** “Ergonomik Risk Kısıtları Altında Çok Amaçlı Montaj Hattı Dengeleme” konulu anket ve içeriğinin, Fen ve Mühendislik Bilimleri Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Kurulu’na etik açıdan uygunluğunun görüşülmesi.

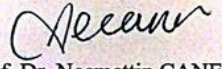
KARAR :

1. Prof.Dr. Emin KAHYA’nın “Ergonomik Risk Kısıtları Altında Çok Amaçlı Montaj Hattı Dengeleme” konulu anket ve içeriğinin, veri toplama araçlarını uygulamak için gerekli yerlerden yasal izinleri almak şartıyla Fen ve Mühendislik Bilimleri Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Kurulu’na uygun olduğuna, oy birliğiyle karar verildi.

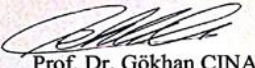

Prof.Dr.Neşe ÖZTÜRK
Başkan


Prof. Dr. Rafet ASLANTAŞ
Başkan Yardımcısı


Prof. Dr. Sibel AKAR
Raportör


Prof. Dr. Necmettin CANER
Üye


Prof. Dr. Bülent SAKA
Üye


Prof. Dr. Gökhan ÇINAR
Üye

Prof. Dr. Volkan KARABACAK
Üye (Görevli)

Ek Açıklama-A: Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Kurulu (devam)

**ESKİŞEHİR OSMANGAZİ ÜNİVERSİTESİ FEN VE MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ BİLİMSEL
ARAŞTIRMA VE YAYIN ETİK KURULU DEĞERLENDİRME FORMU**

Araştırma No : 01	
Araştırma Başlığı : Ergonomik Risk Kısıtları Altında Çok Amaçlı Montaj Hattı Dengeleme	
Sorumlu Araştırmacı : Prof.Dr. Emin KAHYA	
Başvuru Tarihi : 20.03.2019	
☒ Kabul	
☐ Düzeltilme Gereklidir	Gerekçe : 1. 2. 3.
☐ Red	Gerekçe: 1. 2. 3.
Başkan Adı Soyadı Prof. Dr. Neşe ÖZTÜRK	
Tarih 05.04.2019	
 İmza	

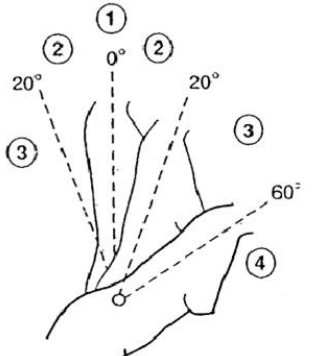
Ek Açıklama-B: REBA Risk Değerlendirme Formu

A. Boyun , Gövde ve Bacak Analizleri

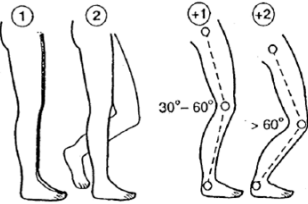
Boyun Duruş Puanlaması

Hareket	Skor	Skor Değişimi	
---------	------	---------------	--

Gövde Duruş Puanlaması

Hareket	Skor	Skor Değişimi	
Dik	1	Yana esneme veya dönme varsa +1	
0° - 20° Fleksiyon 0° - 20° Ekstansiyon	2		
20° - 60° Fleksiyon >20° Ekstansiyon	3		
>60° Fleksiyon	4		

Bacak Duruş Puanlaması

Hareket	Skor	Skor Değişimi	
Bilateral (iki taraflı) ağırlık taşıma, yürüme veya oturma	1	Diz(ler)de 30° - 60° arası fleksiyon +1	
Unilateral (tek taraflı) ağırlık taşıma veya sabit olmayan duruş	2	Diz(ler)de >60° fleksiyon (oturma hariç) +2	

A tablosundan gövde, boyun ve bacakların duruş puanları ile bir skor elde edilir.

Ek Açıklama-B: REBA Risk Değerlendirme Formu (devam)

A Tablosu

		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

Bu skora duruş sırasında uygulanan kuvvet veya taşınan yüke ilişkin puan eklenir

Yük / Kuvvet değerleri

Yük / Kuvvet	Skor
< 5 kg	0
5 – 10 kg	1
> 10 kg	2
Ani veya hızlı kuvvet artışı	+1

A skoru :

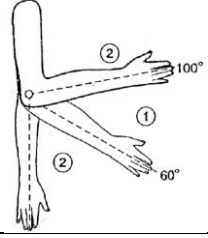
A. Kol ve Bilek Analizleri

Üst Kol Duruş Puanlaması

Hareket	Skor	Skor Değişimi	
20° Fleksiyon - 20° Ekstansiyon	1	Kolda abdüksiyon veya rotasyon varsa +1 Omuz yükselmişse +1 Kolun duruşunda yerçekimi desteği varsa -1	
20° - 45° Fleksiyon >20° Ekstansiyon	2		
45° - 90° Fleksiyon	3		
>90° Fleksiyon	4		

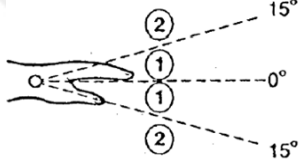
Alt Kol Duruş puanlaması

Ek Açıklama-B: REBA Risk Değerlendirme Formu (devam)

Hareket	Skor	
----------------	-------------	--

	1	
<60° Fleksiyon veya >100° Ekstansiyon	2	

Bilek Duruş Puanlaması

Hareket	Skor	Skor Değişimi	
0° - 15° Fleksiyon veya Ekstansiyon	1	Yana dönme veya esneme varsa +1	
>15° Fleksiyon veya Ekstansiyon	2		

B tablosundan üst kol, alt kol ve bileklerin duruş puanları ile bir puan elde edilir

B tablosu

		Alt Kol						
		1			2			
		Bilek			Bilek			
		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	5	
	4	4	5	5	5	6	7	
	5	6	7	8	7	8	8	
	6	7	8	8	8	9	9	

Bu puana kavramaya ilişkin puan eklenir.

Ek Açıklama-B: REBA Risk Değerlendirme Formu (devam)

Kavrama Değerleri

Ek Açıklama-B: REBA Risk Değerlendirme Formu (devam)

C skoru :

Aktivite değeri

Aktivite	Skor
Bir veya daha fazla vücut bölgesi sabit (1 dakikadan uzun süre tutma)	+1
Kısa aralıklarla tekrar eden işler (1 dakikada 4 kereden fazla tekrar eden iş – yürüme hariç)	+1
Yapılan iş duruşta hızlı ve büyük değişikliğe neden oluyorsa veya sabit olmayan zeminde çalışılıyorsa	+1

REBA SKORU :

Ek Açıklama-C: İş Elemanları İçin Tanım ve Veriler

İE	İşlem Tanımı	Öncelik İlişkileri	Süre (sn)	REBA skoru	ER(R*t)	Birleştirilmiş iş elemanları	Son İE	Süre (sn)	ER(R*t)
1	Makine gelirken tuz kutusunu iç gövde üzerine takın.	2	3,85	2	7,70	1 ve 2	1	12,41	50,50
2	Tuz kutusu somunu alın ve tuz kutusuna elle sıkılayın	8	8,56	5	42,80	3 ve 4	2	15,19	45,58
3	Su cebi alın, iç gövdeye takın	4	5,14	3	15,41				
4	Su cebi kapağını alın iç gövdeye takın ve tabanca ile sıkılayın	8	10,06	3	30,17				
5	Tahliye pompasını alın o ring ile gruplayın ve yağlayın ve hazneye takın.	6	10,06	2	20,12	5 ve 6	3	16,91	33,81
6	Vida alın tahliye pompasını hazneye takın. 1 vida ile hazneye vidalayın	8	6,85	2	13,70				
7	Önceden gruplanmış tuz kutusu- hazne bağlantı hortumunu alın ve hazne ile gruplayın,kelepçelerini sıkılayın	8	16,05	2	32,10	7	4	16,05	32,10
8	Konveyörden iç kapı alın, bezela bezel kumaşı geçirin ve masaya koyun	9	4,92	4	19,69	8 ve 9	5	11,88	47,51
9	İç kapıyı iç gövdeye takın	10	6,96	4	27,82				
10	Sağdan iç kapıyı menteşeye 2 vida ile vidalayın,Soldan iç kapıyı menteşeye 2 vida ile vidalayın	11	11,66	2	23,33	10	6	11,66	23,33
11	İç kapı destek sacına sol yandan 1 topraklama vidalayın ve sağ yandan 1 vida vidalayın kapıyı kapatın		10,91	6	65,48	11	7	10,91	65,48
12	Presostat alın 1 adet şeffaf hortum ile gruplayın,alt plastiğe presostatı gruplayın	13	13,38		0,00	12 ve 13	8	18,00	15,73

Ek Açıklama-C: İş Elemanları İçin Tanım ve Veriler (devam)

İE	İşlem Tanımı	Öncelik İlişkileri	Süre (sn)	REBA skoru	ER(R*t)	Birleştirilmiş iş elemanları	Son İE	Süre (sn)	ER(R*t)
13	Presostat soketlerini gruplayın	14	5,24	3	15,73				
14	Tahliye pompa soketlerini takın	25	4,28	3	12,84	14	9	4,28	12,84
15	1 adet su giriş vanası bağlantı hortumu alın 2 kelepçe ile gruplayın,alt plastiğe takın	22	11,66	2	23,33	15	10	11,66	23,33
16	Mikro contası alın alt plastik üzerindeki yerine koyun ve yağlayın	17	9,74	2	19,47	16 ve 17	11	9,74	43,55
17	Mikroyu conta üzerine koyun ve tabanca ile sıkılayın	20	8,03	3	24,08				
18	Rezistans alın alt plastik üzerindeki yerine koyun ve tabanca ile sıkılayın	19	8,13	3	24,40	18	12	8,13	24,40
19	Rezistans soketlerini takın	21	12,73	2	25,47	19	13	12,73	25,47
20	Mikro soketlerini takın	41	5,89	3	17,66	20	14	5,89	17,66
21	Rezistans kapağını alın, alt plastiğe takın ve 1 vida ile vidalayın	41	8,88	2	17,76	21	15	8,88	17,76
22	NTC al,hazneye tak,2 vida ile vidala	23	10,91	5	54,57	22	16	10,91	54,57
23	Tuz kutusu su cebi soketlerini takın, kabloları düzeltin	24	17,01	4	68,05	23	17	17,01	68,05
24	NTC soketini takın	38	5,46	2	10,91	24	18	5,46	10,91
25	Tahliye hortumunu alın, kelepçe geçirin, alt plastik deliğine geçir, ucunu yağlayın,tahliye pompasına takın	26	16,26	5	81,32	25 ve 26	19	22,90	94,59
26	Tabanca yardımı ile kelepçeyi sıkılayın	27	6,63	2	13,27				
27	Tahliye hortum yüzüğünü takın,hortumu alt plastik üzerinde toplayın	28	14,12	2	28,25	27	20	14,12	28,25

Ek Açıklama-C: İş Elemanları İçin Tanım ve Veriler (devam)

İE	İşlem Tanımı	Öncelik İlişkileri	Süre (sn)	REBA skorları	ER(R*t)	Birleştirilmiş iş elemanları	Son İE	Süre (sn)	ER(R*t)
28	Şebeke kablo alın tutucu plastik ile gruplayın ve alt plastiğe takın, şebeke kablosunu alt plastiğe dolayın	29	17,76	2	35,52	28	21	17,76	35,52
29	Parazit filtre alın kablo bağındaki soketlerini gruplayın	30	16,16	2	32,31	29	22	16,16	32,31
30	1 adet pompa bağlantı hortumu alın, 1 adet vidalı kelepçe geçirin diğer ucuna kulaklı kelepçe geçirin,hazne ile gruplayın	31	11,77	2	23,54	30 ve 31	23	16,26	32,52
31	Hazne tarafı vidalı kelepçeyi tabanca ile sıkılayın	32	4,49	2	8,99				
32	Parazit filtreyi 1 vida ile alt plastiğe vidalayın	33	6,85	4	27,39	32	24	6,85	27,39
33	Base e ayarlı ayak gruplayın	34	5,14	2	10,27	33	25	5,14	10,27
34	Pompa-hazne bağlantı borusuna kulaklı kelepçe tak,motor ile grupla,borunun boşta kalan ucuna vidalı kelepçe tak	35	8,77	3	26,32	34	26	8,77	26,32
35	Motor terminallerini grupla ve motoru alt plastikteki yerine oturt	36	12,52	4	50,08	35	27	12,52	50,10
36	Vidalı kelepçeyi tabanca ile sıkıla,	37	3,85	3	11,56	36 ve 37	28	7,60	22,78
37	2 kulaklı kelepçeyi sıkıcısı ile sıkıla	41	3,75	3	11,24				
38	1 vida ile menteşe destek vidasını vidalayın	58	5,46	5	27,29	38	29	5,46	27,29
39	Önceden gruplanmış su giriş vanası bağlantı hortumu alın,su giriş vanası ile gruplayın ve alt plastiğe takın	40	18,73	2	37,45	39 ve 40	30	22,47	37,45
40	Su giriş vanasının soketini takın	41	3,75	2	7,49				

Ek Açıklama-C: İş Elemanları İçin Tanım ve Veriler (devam)

İE	İşlem Tanımı	Öncelik İlişkileri	Süre (sn)	REBA skorları	ER(R*t)	Birleştirilmiş iş elemanları	Son İE	Süre (sn)	ER(R*t)
41	Ayarlı ayak ayar çubuğu ve vidasını alt plastik üzerinde gruplayın	42	5,78	2	11,56	41	31	5,78	11,55
42	elektriksel bağlantı ve kelepçe kontrollerini yapın	43	10,81	4	43,23	42	32	10,81	43,22
43	su giriş vanasına su giriş hortumu takın elle döndürün, hortumu alt plastik üzerinde döndürün ve kablo bağı ile bağlayın, aparat ile su giriş vanasını sıkılayın	44,45,46	20,01	2	40,02	43	33	20,01	40,00
44	Levha alın, makineyi eğin ve altına koyun, makineyi düzeltin	47	6,21	7	43,44	44	34	6,21	43,44
45	Hortumları alt plastikten sökün, makine yanına asın	47	17,01	5	85,07	45	35	17,01	85,00
46	Pano koruma kumaşını çıkarmın	47	2,57	2	5,14	46	36	2,57	5,00
47	Model etiketini alın ve kapı içine yapıştırın	48,49	7,38	2	14,77	47	37	7,38	14,76
48	1 vida ile sol menteşe destek vidasını vidalayın	61	6,85	3	20,54	48	38	6,85	20,50
49	Kapıyı açın	50, 51	2,46	3	7,38	49 ve 50	39	11,45	27,93
50	Gias etiketini yapıştırın	61	8,99	3	26,96				
51	Önceden gruplu sağ ve sol rayları iç gövdeye takın	52	5,78	4	23,11				
52	Sağ ve sol sepet raylarına 1'er arka kilit takın ve kapıyı kapatın	57,58,59	12,41	3	37,24	51 ve 52	40	18,19	60,35
53	Arabadan üst sepet alın, masaya koyun, 1 önceden gruplanmış üst pervane grubunu sepetle gruplayın	54	10,17	4	40,66	53 ve 54	41	19,47	77,90
54	2 adet sepet rafı alın ve üst sepet ile gruplayın	55	9,31	2	18,62	55 ve 56	42	10,27	24,61
55	Üst sepeti iç gövdeye takın ve kilitlerini kapatın.	56	7,17	3	21,51				
56	1 adet üst sepete strafor takın	61	3,10	1	3,10				

Ek Açıklama-C: İş Elemanları İçin Tanım ve Veriler (devam)

İE	İşlem Tanımı	Öncelik İlişkileri	Süre (sn)	REBA skorları	ER(R*t)	Birleştirilmiş iş elemanları	Son İE	Süre (sn)	ER(R*t)
57	Bir adet topraklama vidasını vidalayın	61	12,63	6	75,76	57	43	12,63	75,76
58	Bir alt pervane alın ve iç gövde tabanına takın	60	5,89	4	23,54	58	44	5,89	23,54
59	Tuz kutusu somununu tabanca ile sıkılayın	61	5,67	4	22,68	59	45	5,67	22,68
60	Pervane ile pervane borusu gruplayın	61	12,09	5	60,46	60	46	12,09	60,46
61	Kasa içinden kapı alın,kontrol edin, iç gövdeye takın ve kapıyı açın	62	9,52	3	28,57	61	47	9,52	28,57
62	Kapı mandalı takın	63	2,25	1	2,25	62 ve 63	48	18,51	51,04
63	Kapıyı 6 vida ile iç kapı ile vidalayın,kapıyı kapatın	64,65	16,26	3	48,79				
64	Beyaz plastiği bez ile silin	69	5,24	1	5,24	64	49	5,24	5,24
65	Yay sacını alkol ile silin	66	3,80	3	11,41	65 ve 66	50	19,32	57,96
66	Yay ve kanca alın yay sacının birer ucuna takın, yay ucunu gresleyin ve alt plastik ile menteşe arasına gruplayın	67	15,52	3	46,55	67 ve 68	51	10,40	21,58
67	Alt plastik ve menteşeye sağ taraftan ayarlı yay takın	68	5,59	3	16,76				
68	Kapıyı açıp kapatın yay sesi kontrol edin	69	4,82	1	4,82				
69	Hortum alın kapıyı açın ve makine içine bırakın,sepet straforu makine üzerine bırakın	79	4,49	4	17,98	69	52	4,49	17,98
70	Şebeke kabloyu takın, crocodili makineye takın	71	4,82	4	19,26	70 ve 71	53	17,55	57,46
71	İki el ile butona basın ve su yükleme boyunca bezeli kontrol edin	72	12,73	3	38,20				
72	Şebeke kablo ve crocodili çıkarın	73	4,07	4	16,26	72 ve 73	54	10,06	40,23
73	Tuz kutusu kapağı takın ve hortumu çıkarın	80	5,99	4	23,97				

Ek Açıklama-C: İş Elemanları İçin Tanım ve Veriler (devam)

İE	İşlem Tanımı	Öncelik İlişkileri	Süre (sn)	REBA skorları	ER(R*t)	Birleştirilmiş iş elemanları	Son İE	Süre (sn)	ER(R*t)
74	Su giriş hortumu ve tahliye hortumunu teste takın,Şebeke kabloyu teste takın ve starta basın	75	5,86	2	11,71	74 75 ve 76	55	20,42	40,85
75	Tuş testi yapın, testi başlatın	76	9,17	2	18,33				
76	Şebeke kablo çıkarın, Su giriş hortumu ve tahliye hortumunu çıkarın, butona basın makineyi gönderin	80	5,40	2	10,80				
77	Makine gelirken şebeke kabloyu takın, Tahliye hortumunu deliğe bırakın	78	2,63	2	5,25	77 ve 78	56	7,63	15,25
78	Şebeke kablosunu çıkarın, kapıyı açın, tahliye hortumunu makine kapağına sıkıştırın, Makine altından sızdırma test levhasını alın	80	5,00	2	10,00				
79	Makine gelirken, tahliye hortumunu pompaya takın su tahliyesi için butona basın	80	4,49	2	8,99	79 ve 80	57	35,95	71,90
80	Su tahliyesi bitince hortumları toplayın ve makine arkasında kablo bağı ile toplayın	81	31,46	2	62,92				
81	Makine kapısını açın,	82	2,65	4	10,61	81, 82	58	7,50	73,53
82	Tuz kutusu kapağını çıkarın, su çekme hortumunu tuz kutusu içine koyun	83	4,85	2	9,69	83 ve 84	59	28,01	77,65
83	Hava tabancası ile makine içi suyu toparlayın, tuz kutusunda kalan suyu da hortum yardımı ile çekin	84	22,65	3	67,96				
84	Tuz kutusu kapağını geri takın	85,86,87,88	5,36	3	16,08				
85	Süzgeç takın	89	5,35	2	10,70	85	60	5,35	10,70
86	Makine içini bez ile kurulayın	89	18,02	4	72,08	86	61	18,02	72,08
87	Kaba filtre takın	89	2,35	4	9,42	87	62	2,35	9,42
88	İç kapının çizilmemesi için üst sepete 1 adet strafor takın	89	2,36	1	2,36	88	63	2,36	2,36

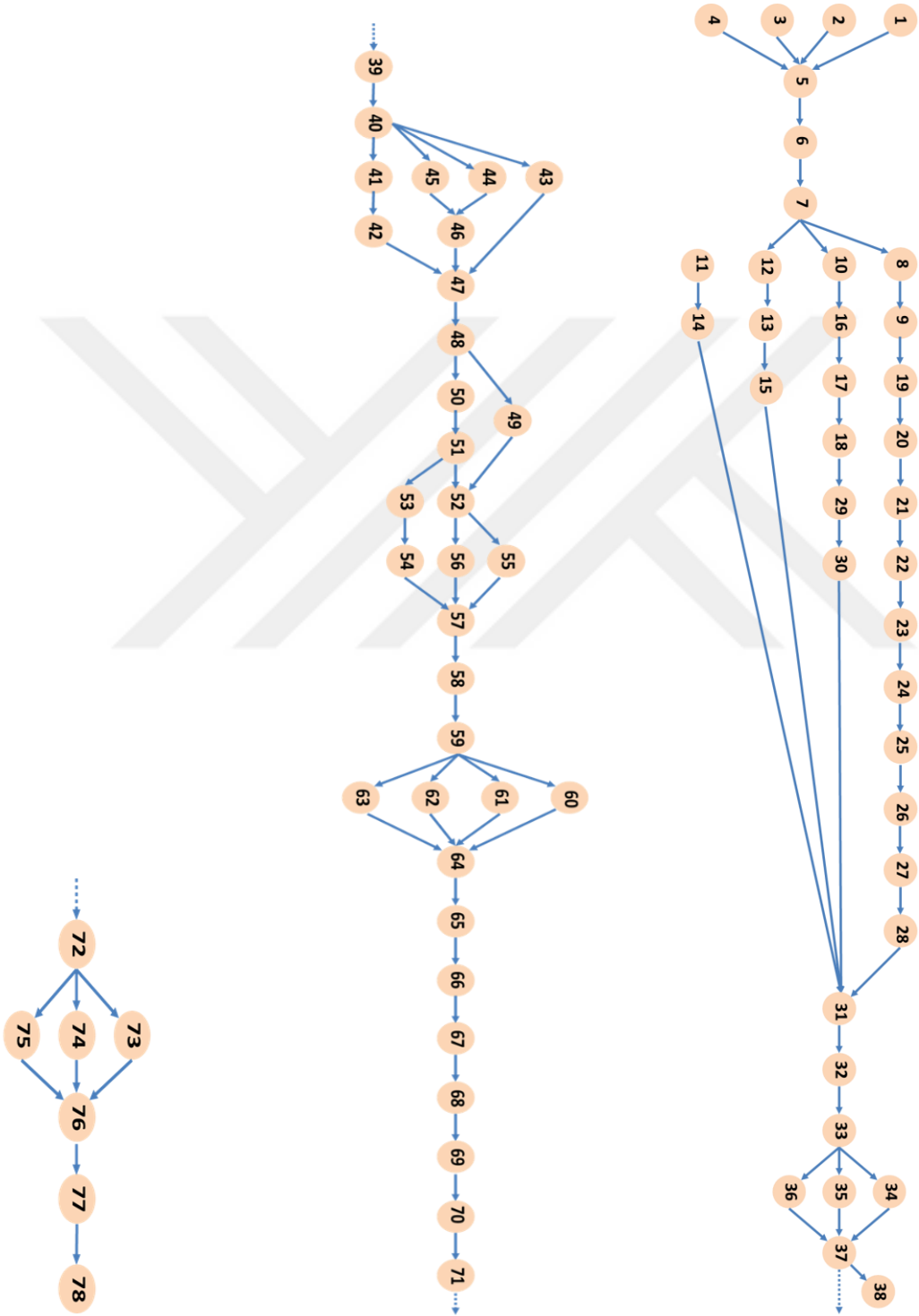
Ek Açıklama-C: İş Elemanları İçin Tanım ve Veriler (devam)

İE	İşlem Tanımı	Öncelik İlişkileri	Süre (sn)	REBA skorları	ER(R*t)	Birleştirilmiş iş elemanları	Son İE	Süre (sn)	ER(R*t)
89	Arabadan alt sepet alın, içine gruplu ÇKS koyun ve alt sepeti sepet desteklerine takın	90,91	18,39	4	73,57	89	64	18,39	73,57
90	Sağ yan panel destek süngerini takın	92	4,77	2	9,54	90 ve 91	65	10,06	20,12
91	Sol yan panel destek süngerini takın	92	5,29	2	10,57				
92	Sağ ve sol yan paneli kasadan alın yere koyun	94, 93	4,39	4	17,55	92 93 94	66	22,23	106,79
93	Sol yan paneli alın, kontrol edin ve makineye takın	95	8,92	5	44,62				
94	Sağ yan paneli kasadan alın, kontrol edin ve makineye takın	95	8,92	5	44,62				
95	1 üst estetik sacı alın ambalajını sökün, makine kapısını açın, gövdeye takın	96	8,90	2	17,80	95	67	8,90	17,80
96	Yan panel sabitleme mastarını alın ve panellerin üzerine takın	97, 98	3,41	2	6,83	96 ve 97	68	15,35	78,47
97	Kapıyı açın sol yan paneli 1 vida ile üst estetik sacına vidalayın, 1 vida ile alt taraftan vidalayın	99	11,94	6	71,65	98	69	10,21	61,25
98	Sağ yan paneli 1 vida ile üst estetik sacına vidalayın, 1 vida ile alt taraftan vidalayın,kapıyı kapatın.	99	10,21	6	61,25				
99	2 vida ile ankastre kapısını sağ ve soldan vidalayın	100,101,102,103	14,32	4	57,27	99	70	14,32	57,27
100	Kapıyı açın Alt sepete 2 strafor, üst sepete 2 sepet straforu takın	104	8,00	2	16,00	100 ve 101	71	11,75	19,75
101	Üst sepete deve boynu takın	104	3,75	1	3,75	102	72	3,85	7,70
102	sepete 1 matbuat koyun,kapıyı kapatın	104	3,85	2	7,70	103	73	3,26	6,53
103	Tuz hunisi alın ve sepete koyun	104	3,26	2	6,53				

Ek Açıklama-C: İş Elemanları İçin Tanım ve Veriler (devam)

İE	İşlem Tanımı	Öncelik İlişkileri	Süre (sn)	REBA skorları	ER(R*t)	Birleştirilmiş iş elemanları	Son İE	Süre (sn)	ER(R*t)
104	Makineyi eğin alt kapama takın	105	20,01	8	160,07	104	74	20,01	160,07
105	Ankastre tekmelik alın,alt plastığe takın,makineyi düzeltin.	106,10 7,108	10,91	8	87,31	105	75	10,91	87,31
106	Makine bezel ve dış kapıyı silin,kontrol edin ve kapıyı açarken yay sesini kontrol edin	109	11,02	2	22,04	106	76	11,02	22,04
107	İç gövde yan flanşları silin,iç kapıyı silin,eksik komponent kontrolü yapın,sepet tekerleklerini kontrol edin,kapıyı kapatın+B84	109	23,54	2	47,08	107	77	23,54	47,08
108	Alt strafora kaşe basın	109	2,46	3	7,38	108	78	2,46	7,38

Ek Açıklama-D: İş Elemanları İçin Öncelik Diyagramı



Ek Açıklama-E: İstasyon Zamanının Enküçüklenmesi

İstasyon	İş Elemanı	İşlem Zamanı	ER(R*t)	TT (sn)	Boş Zaman	İstasyon ER(R*t)
1	2	15,19	45,58	31,24	9,76	1,66
	4	16,05	32,10			
2	1	12,41	50,50	29,32	11,68	1,77
	3	16,91	33,81			
3	5	11,88	47,51	34,45	6,55	3,17
	6	11,66	23,33			
	7	10,91	65,48			
4	10	11,66	23,33	32,31	8,69	2,75
	11	9,74	43,55			
	16	10,91	54,57			
5	8	18,00	15,73	35,01	5,99	1,19
	17	17,01	68,05			
6	9	4,28	12,84	35,31	5,69	3,08
	19	22,90	94,59			
	12	8,13	24,40			
7	13	12,73	25,47	35,74	5	1,72
	15	8,88	17,76			
	20	14,12	32,52			
8	21	17,76	35,52	33,92	7	1,48
	22	16,16	32,31			
9	18	5,46	10,91	34,03	6,97	2,22
	23	16,26	32,52			
	29	5,46	27,29			
	24	6,85	27,39			
10	25	5,14	10,27	34,03	6,97	2,50
	26	8,77	26,32			
	28	7,60	22,78			
	27	12,52	50,10			
11	30	22,47	37,45	34,13	6,87	1,46
	14	5,89	17,66			
	31	5,78	11,55			
12	33	20,01	40,00	30,82	10	1,78
	32	10,81	43,22			

Ek Açıklama-E: İstasyon Zamanının Enküçüklenmesi (devam)

İstasyon	İş Elemanı	İşlem Zamanı	ER(R*t)	TT (sn)	Boş Zaman	İstasyon ER(R*t)
13	34	6,21	43,44	33,17	8	2,81
	37	7,38	14,76			
	36	2,57	5,00			
	35	17,01	85,00			
14	39	11,45	27,93	35,31	6	2,57
	45	5,67	22,68			
	40	18,19	60,35			
15	44	5,89	23,54	35,63	5,37	2,94
	41	19,47	77,90			
	42	10,27	24,61			
16	43	12,63	75,76	24,72	16,28	2,93
	46	12,09	60,46			
17	47	9,52	28,57	33,28	7,72	1,88
	48	18,51	51,04			
	49	5,24	5,24			
18	50	19,32	57,96	34,22	7	2,21
	51	10,40	21,58			
	52	4,49	17,98			
19	53	17,55	57,46	17,55	23	0,83
20	55	20,42	40,85	20,42	21	0,48
21	54	10,06	40,23	17,68	23	1
	56	7,63	15,25			
22	57	35,95	71,90	35,95	5	2
22	53	17,55	57,46	27,61	13,39	2,06
	54	10,06	40,23			
23	58	7,50	73,53	35,51	5,49	2,82
	59	28,01	77,65			
24	60	5,35	10,70	28,09	12,91	1,99
	61	18,02	72,08			
	62	2,35	9,42			
	63	2,36	2,36			
25	64	18,39	73,57	28,45	12,55	1,98
	65	10,06	20,12			
26	66	22,23	106,79	31,14	9,86	2,80
	67	8,90	17,80			

Ek Açıklama-E: İstasyon Zamanının Enküçüklenmesi (devam)

İstas- yon	İş Elemanı	İşlem Zamanı	ER(R*t)	TT (sn)	Boş Zaman	İstasyon ER(R*t)
27	68	15,35	78,47	15,35	26	1
28	69	10,21	61,25	10,21	31	1
29	70	14,32	57,27	26,06	14,94	1,51
	71	11,75	19,75			
30	72	3,85	7,70	15	26	2
	75	10,91	87,31			
31	73	3,26	6,53	34	7	4
	76	11,02	22,04			
	74	20,01	160,07			
32	77	23,54	47,08	26,00	15,00	0,96
	78	2,46	7,38			

Ek Açıklama-F: Çok Amaçlı Matematiksel Modelin KSY ile Enküçüklenmesi

İstas- yon	İş Elemanı	İşlem Zamanı	ER(R*t)	TT (sn)	Boş Zaman	İstasyon ER(R*t)
1	11	9,74	43,55	31,67	9,33	2,05
	14	5,89	17,66			
	4	16,05	32,10			
2	1	12,41	50,50	29,32	11,68	1,77
	3	16,91	33,81			
3	5	11,88	47,51	27,07	13,93	1,93
	2	15,19	45,58			
4	6	11,66	23,33	22,58	18,42	1,72
	7	10,91	65,48			
5	8	18,00	15,73	37,80	3,21	1,47
	10	11,66	23,33			
	12	8,13	24,40			
6	13	12,73	25,47	32,53	8,47	1,59
	15	8,88	17,76			
	16	10,91	54,57			
7	19	22,90	94,59	27,18	13,82	1,96
	9	4,28	12,84			
8	17	17,01	68,05	31,14	9,86	2,11
	20	14,12	28,25			
9	21	17,76	35,52	39,38	1,62	1,88
	22	16,16	32,31			
	18	5,46	10,91			
10	23	16,26	32,52	33,71	7,29	2,20
	24	6,85	27,39			
	29	5,46	27,29			
	25	5,14	10,27			
11	26	8,77	26,32	28,89	12,11	2,12
	27	12,52	50,10			
	28	7,60	22,78			
12	30	22,47	37,45	39,06	1,94	2,20
	31	5,78	11,55			
	32	10,81	43,22			

Ek Açıklama-F: Çok Amaçlı Matematiksel Modelin KSY ile Enküçüklenmesi (devam)

İstas- yon	İş Elemanı	İşlem Zamanı	ER(R*t)	TT (sn)	Boş Zaman	İstasyon ER(R*t)
13	33	20,01	40,00	28,78	12,22	1,86
	36	2,57	5,00			
	34	6,21	43,44			
14	35	17,01	85,00	24,40	16,60	2,03
	37	7,38	14,76			
15	39	11,45	27,93	29,64	11,36	1,88
	40	18,19	60,35			
16	45	5,67	22,68	23,65	17,35	2,18
	46	12,09	60,46			
	44	5,89	23,54			
17	41	19,47	77,90	29,75	11,25	2,23
	42	10,27	24,61			
18	43	12,63	75,76	22,15	18,85	2,08
	47	9,52	28,57			
19	48	18,51	51,04	37,83	3,17	2,58
	50	19,32	57,96			
20	49	5,24	5,24	37,69	3,31	2,41
	51	10,40	21,58			
	52	4,49	17,98			
	53	17,55	57,46			
21	55	20,42	40,85	38,11	2,89	2,28
	54	10,06	40,23			
	56	7,63	15,25			
22	57	35,95	71,90	35,95	5,05	1,63
23	58	7,50	73,53	14,35	26,65	1,64
	38	6,85	20,50			
24	59	28,01	77,65	28,01	12,99	1,58
25	60	5,35	10,70	28,09	12,91	1,62
	61	18,02	72,08			
	62	2,35	9,42			
	63	2,36	2,36			
26	64	18,39	73,57	28,45	12,55	1,98
	65	10,06	20,12			
27	66	22,23	106,79	22,23	18,77	2,15

Ek Açıklama-F: Çok Amaçlı Matematiksel Modelin KSY ile Enküçüklenmesi (devam)

İstas- yon	İş Elemanı	İşlem Zamanı	ER(R*t)	TT (sn)	Boş Zaman	İstasyon ER(R*t)
28	67	8,90	17,80	24,26	16,74	1,94
	68	15,35	78,47			
29	69	10,21	61,25	24,52	16,48	2,49
	70	14,32	57,27			
30	71	11,75	19,75	29,77	11,23	2,68
	72	3,85	7,70			
	73	3,26	6,53			
	75	10,91	87,31			
31	74	20,01	160,07	20,01	20,99	3,39
32	76	11,02	22,04	37,02	3,98	1,77
	77	23,54	47,08			
	78	2,46	7,38			