

Montaj Hattı Dengeleme Probleminde Zorlayıcı Duruşların Değerlendirilmesine Yönelik
Ergonomik Yaklaşım

Sena Gülbandılar Canbazoğlu

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Ocak 2023

An Ergonomic Approach to Evaluation of Compelling Postures in the Assembly Line
Balancing Problem

Sena Gülbandılar Canbazoğlu

MASTER OF SCIENCE

Department of Industrial Engineering

January 2023

Montaj Hattı Dengeleme Probleminde Zorlayıcı Duruşların Değerlendirilmesine Yönelik
Ergonomik Yaklaşım

Sena Gülbandılar Canbazoğlu

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

Danışman: Prof. Dr. EMİN KAHYA

Ocak 2023

ONAY

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı YÜKSEK LİSANS öğrencisi Sena Gülbandılar Canbazoğlu'nun YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı "Montaj Hattı Dengeleme Probleminde Zorlayıcı Duruşların Değerlendirilmesine Yönelik Ergonomik Yaklaşım" başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek oybirliği ile kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Emin Kahya

İkinci Danışman : -

Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:

Üye : Prof. Dr. Emin Kahya

Üye : Prof. Dr. Berna Ulutaş

Üye : Prof. Dr. Tülin Gündüz

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 “Montaj Hattı Dengeleme Probleminde Zorlayıcı Duruşların Değerlendirilmesine Yönelik Ergonomik Yaklaşım” başlıklı Yüksek Lisans tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallarına uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel 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 E-53893652-050.01.04-400429 sayılı karar ile izin alındığını beyan ederim. 23/01/2023

Sena Gülbandır Canbazoğlu

İmza

ÖZET

Montaj hattı dengeleme problemleri, akış odaklı bir üretim sisteminde gerekli tüm görevlerin iş istasyonlarına verimli ve etkili bir şekilde atanmasını amaçlar. Fakat montaj hatlarında meydana gelen tekrarlı işler ve statik duruşlar sebebi ile çalışanlarda Kas-İskelet Sistemi Rahatsızlıklarına sebep olmaktadır. Bu tezde, sadece istasyon sayısını azaltmayı hedefleyen değil aynı zamanda ergonomik zorlanmayı da dengeleyen bir montaj hattı probleminin ele alınması amaçlanmıştır. İstasyonlarda yer alan iş elemanları için zaman etüdü ile işlem süreleri ve istasyon başına düşen ergonomik risk değerleri REBA (Rapid Entire Body Assessment) yöntemi ile belirlenmiştir.

Bir ağır ticari araç işletmesinin motor montaj hattında 24 istasyonda 198 iş elemanı için çevrim süresi 14,31 dakika, toplam dengeleme gecikmesi 42,64 dakikadır. Bu hatta REBA skorları 6 ile 55 arasında değişmektedir. GAMS paket programı ile montaj hattı dengeleme probleminin optimum çözümü ile atamalar yapılmış, yapılan çözümlerinde istasyon sayısı 23 ve toplam dengeleme gecikmesi 28,33 dakika elde edilmiştir. Ergonomik risk kısıtı içeren çözümde ise istasyon sayısı 29'a yükselirken toplam dengeleme gecikmesi 114,39 dakika hesaplanmıştır. Ancak istasyon başına düşen REBA skorlarının dağılımı 6 ile 30 arasında değişkenlik göstermiştir. Modelde; mevcut ortalama ergonomik risk kısıtı için farklı tolerans payları ile, ağırlıklı ergonomik risk kısıtı içeren model ile ve değişken üretim talebi doğrultusunda oluşturulan yeni hedefler ile çözdürülerek duyarlılık analizi yapılmıştır.

Anahtar kelimeler: Montaj Hattı Dengeleme, Ergonomik Risk Değerlendirmesi, REBA

SUMMARY

Assembly line balancing problems aim to assign all required tasks efficiently and effectively to workstations in a flow-oriented production system. However, due to repetitive work and static postures on assembly lines, it causes Musculoskeletal Disorders in employees. In this thesis, it is aimed to address an assembly line problem that not only aims to reduce the number of stations but also balances the ergonomic strain. Time study and operation times and ergonomic risk values per station were determined by the REBA (Rapid Entire Body Assessment) method for the workers in the stations.

In the engine assembly line of a heavy commercial vehicle enterprise, the cycle time is 14.31 minutes and the total balancing delay is 42.64 minutes for 198 workers at 24 stations. In this line, REBA scores range from 6 to 55. With the GAMS package program, the assignments were made with the optimum solution of the assembly line balancing problem, the number of stations was 23 and the total balancing delay was 28.33 minutes in the analysis. In the solution containing ergonomic risk constraint, the number of stations increased to 29, while the total balancing delay was calculated as 114.39 minutes. However, the distribution of REBA scores per station varied between 6 and 30. In the model; Sensitivity analysis was carried out by solving it with different tolerance margins for the current average ergonomic risk constraint, with the model containing the weighted ergonomic risk constraint, and with new targets created in line with the variable production demand.

Keywords: Assembly Line Balancing, Ergonomic Risk Assessment, REBA

TEŞEKKÜR

Tez sürecinde, yapılan araştırmalarda, karşılaştığım problemlerde, tezimin tamamlanmasında bana her zaman destek olan saygıdeğer tez danışmanım Prof. Dr. Emin KAHYA'ya, her zaman olduğu gibi bu süreçte de her türlü destekleriyle yanımda olan sevgili eşim ve kıymetli aileme, uygulamalarım süresince bana ihtiyacım olan tüm desteği sağlayan işletme yöneticilerine sonsuz teőekkürlerimi sunarım.



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	vi
SUMMARY	vii
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ VE AMAÇ	1
2. MONTAJ HATTI DENGELEME PROBLEMİ	6
2.1. Montaj Hattı Dengeleme Probleminin Sınıflandırılması	7
2.2. Montaj Hattı Dengeleme Problemi Çözüm Yöntemleri	7
3. ERGONOMİK RİSK DEĞERLENDİRME YÖNTEMLERİ	9
3.1. Montaj Hatlarında Kas-İskelet Sistemi Rahatsızlıkları	9
3.2. Ergonomik Risk Değerlendirme Yöntemleri	11
3.3. REBA Yöntemi.....	14
4. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	17
4.1. Kısıtlarında Ergonomik Eşitlik Bulunan MHDP Çalışmaları	18
4.2. Amaç Fonksiyonunda Ergonomik Parametre Bulunan Çalışmalar	19
4.3. Karma model üretim, paralel ve/veya U Tipi Üretim hatları, işçi ataması, alan kısıtlamaları gibi diğer yöntemler ile Ergonomik MHDP Çalışmaları	22
5. MATERYAL VE YÖNTEM	24
5.1. Problemin Tanımı ve Çözüm Yöntemi.....	24
5.2. Verilerin Toplanması	24
5.2.1. İşlem Sürelerinin Alınması	25
5.2.2. REBA Ölçümlerinin Değerlendirmesi.....	27
5.3. Mevcut Durumdaki İş İstasyonları	28
5.4. Ergonomik Risk Kısıtı İçermeyen BMHDP'nin GAMS ile Çözümlemesi	28
5.5. Ergonomik Risk Kısıtı İçeren BMHDP'nin GAMS ile Çözümlemesi	30
6. BULGULAR VE TARTIŞMA	32
6.1. Mevcut Montaj Hattının Ergonomik Risk Kısıtı İçermeyen BMHDP ile Karşılaştırılması	32

6.2. İstasyon Ergonomik Risk Kısıtı İçeren BMHDP ile Diğer Modellerin Çözümlerinin Karşılaştırılması	33
6.2.1. Ortalama Ergonomik Risk Kısıtı İçeren Modelin Farklı Toleranslar ile Çözümlerinin Karşılaştırılması	35
6.2.2. Ağırlıklı Ergonomik Risk Kısıtı İçeren Modelin Oluşturulması ve Farklı Toleranslar ile Karşılaştırılması	36
6.3. Değişken Üretim Talebi Doğrultusunda Duyarlılık Analizi.....	37
7. SONUÇ VE ÖNERİLER	40
KAYNAKLAR DİZİNİ	42
EK AÇIKLAMALAR	46



ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Cizelge</u>	<u>Sayfa</u>
3.1. REBA risk derecelendirmesi.....	17
5.1. 1. İstasyon gözlem yeterlilik analizi özet veriler.....	27
6.1. Ortalama ergonomik risk kısıtı içeren modelin diğer modeller ile kıyaslanması.....	34
6.2. Modellere göre istasyon sayılarının REBA skoru kırılımı.....	34
6.3. Ortalama ergonomik risk kısıtı içeren modelin farklı tolerans payları ile kıyaslanması.....	36
6.4. Ağırlıklı ergonomik risk kısıtı içeren modelin oluşturulması ve farklı toleranslar ile karşılaştırılması.	37
6.5. Hedef üretim adedi değişenliğinde üretim hattının duyarlılık analizi karşılaştırması...39	
7.1. Modellere göre istasyon sayılarının REBA skoru kırılımı	41

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklama</u>
KİSR	Kas-İskelet Sistemi Rahatsızlıkları
BMHDP	Basit Montaj Hattı Dengeleme Problemi
SALBP	Simple Assembly Line Balancing Problem
GAMS	General Algebraic Modeling System
JIT	Just in Time
FMC	Flexible Manufacturing Cell
OWAS	Ovako Working Posture Analyzing System
RULA	Rapid Upper Limb Assesment
NIOSH	National Institute for Occupational Safety and Health
OCRA	Occupational Repetitive Actions
REBA	Rapid Entire Body Assessment
QEC	Quick Exposure Check
TT	Takt Time
MHDP	Montaj Hattı Dengeleme Probemleri
COMSOAL	Computer Method for Sequencing Operations for Assembly Lines

1. GİRİŞ VE AMAÇ

Üretim sistemlerinin iyileştirilmesinin arkasındaki ana motivasyon, pazarda daha büyük bir pay ve daha iyi bir imaj için rekabet etmektir. Özellikle tekrarlayan ürünlere sahip olan montaj hatları, üretim sürecinin her aşamasında kullanılmaktadırlar. Montaj hatlarında, otomatik olmayan sistemlerle üretim ve montaj için daha fazla esneklik sağlanabilmektedir. Buna bağlı olarak da montaj hatlarının çoğu hala insan-işçi performansına dayanmaktadır. Otomatik olmayan bu montaj hattı sistemlerinin performansı, hatların dengelenmesine ek olarak ergonomik faktörlerin bu montaj hatlarında nasıl yer aldığına bağlıdır. Ergonomik açıdan riskleri minimize edilmiş montaj hatları, kurumların verimli iş sonuçları elde etmesine olanak sağlamaktadır.

Büyüyen küresel rekabet piyasası; üretim kuruluşlarını, verimliliği ve etkinliği arttırmayı amaçlayan üretkenliği iyileştirme planlarına dahil olmaya zorlamaktadır. Henry Ford döneminden günümüzün endüstri 4.0 çağına kadar, bir montaj hattının akış odaklı montaj süreçleri, endüstrinin çeşitli dallarındaki seri imalat süreçleri için çok önemlidir. Bu bağlamda en temel optimizasyon problemlerinden biri, bir montaj hattının istasyonları arasındaki iş bölümünü amaçlayan montaj hattı dengeleme problemidir. Verimli bir montaj hattı tasarlamak, montaj hatlarını geliştirmede en önemli konulardan biridir. Ancak; montaj hatlarının tasarım ve planlama aşamalarının geliştirilmesi, ergonomik risklerin önleyici bir şekilde azaltılmasıyla tutarlı faydalar getirebilmektedir. Bu faydalar, şirketlerin ergonomik normlara uymalarına ve kârlılıklarını korumalarına yardımcı olabilir.

Günümüzde yaptığımız işlerin birçoğunun enerji tüketimimiz açısından ölçülü ve zararsız olduğunu düşünmek oldukça yaygındır. Ancak montaj hatlarında işlerin büyük çoğunluğu operatörler veya işçiler tarafından yüksek enerji tüketimi içermektedir. Bu fiziksel tüketim, çalışanların sağlığı için riskler doğurabilir. Bu sebeple, işyerlerinin tasarımı, işçilere zarar verebilecek tüm risk faktörleri göz önünde bulundurularak yapılmalıdır. Montaj hattı iş istasyonlarının tasarımında; işçinin iş yükünü uygun şekilde yerine getirebilmesi için ihtiyaç duyduğu alan ve bu yük ile ilişkili ergonomik risk, bu sorunlardan bazılarıdır (Bautista ve Batalla, 2016). Elverişsiz çalışma koşulları veya kötü iş yeri ergonomisi problemi, günümüzde öncelikli bir konu olarak değerlendirilmektedir.

İşyerindeki ergonomik riskler; çalışanların sağlığına, yaşam kalitesine zarar vermekte ve bir bütün olarak değerlendirildiğinde üretim verimliliğini olumsuz etkilemektedir. 2008'de, ABD'de ortalama 10 gün süreyle işten uzak durmayı gerektiren 315.000 işle ilgili kas-iskelet sistemi bozukluğu vakası rapor edilmiştir (Otto ve Scholl, 2011).

Özellikle otomatik olmayan montaj hatlarında aynı tip işler operatör tarafından sürekli olarak yapılmaktadır. Tekrarlayan işlerin işçi üzerinde kümülatif bir etkisi vardır. Ergonomik olarak iyi tasarlanmayan montaj hatları, sadece verimsizliğe değil, aynı zamanda çalışanların meslek hastalıklarına da neden olmaktadır. Meslek hastalığı, çalışma veya çalışma koşullarının bir sonucu olarak ortaya çıkan kronik bir hastalık veya bozukluktur. Sosyal Güvenlik Kurumunun 2020 yılı istatistikleri (<https://www.sgk.gov.tr/Istatistik/Yillik/fcd5e59b-6af9-4d90-a451-ee7500eb1cb4/>) değerlendirildiğinde 17.358.140 (zorunlu sigortalı) işçi istihdam edilmiş, bu iş yerlerinde 908 meslek hastalığı vakası meydana gelmiş, bunların 54 adeti (%5,73) kas iskelet sistemi hastalıkları sınıfında yer almıştır.

Kas-iskelet sistemi rahatsızlıkları, kötü işyeri ergonomisinin bir sonucu olarak ortaya çıkmaktadır. Bu durum iş yeri ergonomisinin önemine işaret etmektedir. Olumsuz çalışma koşullarının ne gibi zararlara yol açabileceğini bilmek, hasarı önlemek için çok önemlidir (Akyol ve Baykasoğlu, 2019). Özellikle gelişmiş ülkelerde işyeri ergonomisi mevzuatla kontrol edilmektedir. 20 Haziran 2012 tarihinde kabul edilen “6331 Sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu”, çalışma ortamında ergonomik risk faktörlerini kontrol altına almak için bazı yasal yükümlülükler getirmiştir.

Montaj işçilerinde kas-iskelet sistemi rahatsızlıklarını azaltmaya yönelik geleneksel yaklaşımlar, genellikle istasyon düzeyinde bireysel montaj işine odaklanır. Bununla birlikte, bu yaklaşımlar, uygun iş tahsisi ile işçiler arasındaki ergonomik yüklerin dengelenmesi gibi, tüm montaj hattı seviyesinde iş dağılımına yeterince dikkat etmemektedir. İşle ilgili KİSR, çoğu endüstride bir sağlık sorunu olarak kabul edilmiştir. Bu sorunlar, fiziksel iş yükleri yüksek olan işçiler arasında önemli ölçüde üretkenlik kaybına da yol açmaktadır. Montaj işçilerinde KİSR'lerin önlenmesine yönelik yaklaşımların çoğu iki kategoriye ayrılabilir.

- Birinci kategori, fiziksel iş yükünü azaltmak için çalışma koşullarını iyileştirmektir. Bu yaklaşımlar, ürün tasarımının ve / veya çalışma yöntemlerinin değiştirilmesini

içerir. Çalışma masası yüksekliklerinin ayarlanmasını, ergonomik olarak tasarlanmış araçların uygulanmasını, çalışma hızının yavaşlatılmasını, ürünlerin şeklinin veya boyutunun değiştirilmesini, uygunsuz duruşların önlenmesini ve aşırı kuvvet ve titreşimin azaltılması gibi.

- Diğer bir kategori, işçilerin görevlerini değiştirmektir. İşçilerin görevlerini çeşitlendirmek, bir insan vücudunun aynı kısımlarını tekrar tekrar kullanmayı engelleyebilir (Kedlaya ve Kim, 2011) ve KİSR risklerini etkileyen psikolojik stresi azaltabilir (Xu vd., 2012).

İmalatta; otomatik olmayan işyerlerinde ergonomik risklerin kontrolü, mevzuat ve işçi sağlığına özen gösterilmesi ekonomik kaygıların da beraberinde getirdiği bir zorunluluktur. İşyerlerinin ergonomik risklerini tahmin etme yöntemleri, montaj tipi üretim kullanan çoğu firmada üretim rutinlerine entegre edilmiştir. Montaj hattının yeniden dengelenmesi, yani görevlerin işçilere yeniden atanması, ergonomik riskleri azaltmak için etkili ve ek iş istasyonlarının gerekli olduğu durumlarda daha uygun bir yöntemdir (Otto ve Scholl, 2011).

Montaj hattı, seri bir şekilde düzenlenmiş istasyon adı verilen üretken alanlardan oluşan akış odaklı bir üretim sistemidir. Nihai ürün, konveyör bant gibi bir taşıma sistemi üzerindeki tüm istasyonlardan geçen hattın aşağı doğru hareket eden bir iş parçası olarak başlar. Her istasyonda iş parçası üzerinde montaj işlemleri gerçekleştirilir. Her iş parçasının bir istasyonun sınırları içinde kaldığı süre, konveyör hızına bağlıdır. İş parçalarının temin süreleri arasındaki aralığa çevrim süresi denir. Genel olarak, herhangi bir istasyonda tek bir operatör tarafından iş parçası üzerinde yapılan montaj işlemlerinin toplam miktarı bu çevrim süresini aşamaz. Montaj işlemlerinin teknolojik ve organizasyonel koşullar nedeniyle bazı öncelik kısıtlamaları vardır. Çevrim süresi sınırlamasını ve operasyonlar arasındaki öncelik şartını sağlarken bazı amaçlara göre montaj operasyonlarının istasyonlara atanmasına ilişkin karar problemine montaj hattı dengeleme problemi denir. Bir montaj hattı, seri veya paralel olarak düzenlenmiş birkaç iş istasyonundan oluşur. Bir üretim ögesinin imalatı bir dizi göreve bölündüğünden, bu görevlerin belirli kısıtlamaları yerine getiren istasyonlara nasıl atanabileceğini belirlemek olağan ve zor bir sorundur. Montaj hattı dengeleme

problemlerinde amaç; görev alt kümelerinin, tesisin istasyonlarına en uygun şekilde atanmasıdır (Chica vd., 2012).

Montaj hattı dengeleme problemi, bir montaj hattını tasarlarırken ortaya çıkan bir karar problemidir ve bazı hedeflere karşılık gelen iş istasyonları arasında her biri bir işlem süresine ve bir dizi öncelik ilişkisine sahip olan görevlerin optimal atamasını bulmaktan oluşur. Problem, kapasite ve maliyet odaklı olandan sosyal ve organizasyonel odaklı olana kadar değişen çeşitli hedeflere göre hattın iş istasyonları arasında montaj işinin optimal dağılımını belirlemeyi hedefler (Zacharia ve Nearchou, 2013).

Pek çok montaj hattında ergonominin üretkenlik ve insan güvenliği üzerinde büyük etkisi olabilir. Geleneksel montaj sistemleri optimizasyon yaklaşımları yalnızca zaman ve maliyet değişkenlerini dikkate alırken, çok az çalışma ergonomi yönlerini de içerir (Battini vd., 2016).

Çalışmada, montaj hattı dengeleme problemini çözmek için çok amaçlı model geliştirilmiş ve ergonomi boyutunu da içerecek şekilde genişletilmesi ele alınmıştır. Öncelik ilişkileri ve çevrim zamanı kısıtına ek olarak çalışma postürlerine ait ergonomik risk düzeyini dikkate alarak istasyon sayısını belirleyen montaj hattı dengelenmesi amaçlanmıştır. Her istasyonun ergonomik risk skoru, maksimum (ortalamanın %10 üzeri) ile minimum (ortalamanın %10 altı) arasında kalacak şekilde kısıtlandırılmıştır. Ergonomik risk, REBA yöntemi kullanılarak belirlenmiştir.

Bu çalışmada, üretim verimliliğinin artmasını amaçlayan montaj hattı dengeleme problemi, ergonomi kısıtları içermeyen BMHDP ve ergonomi kısıtları içeren BMHDP olarak GAMS arayüzünün CPLEX çözücüsü kullanılarak istasyon sayısının en küçüklenmesini amaçlayan modelleri için karşılaştırılmıştır. Aynı zamanda modelin değişken talepler doğrultusunda çözüm sonuçlarının nasıl etkilendiği analiz edilmiştir.

İkinci bölümde, MHDP detayları ile ele alınarak tanımlanmıştır. Üçüncü bölümde, ergonomik risk değerlendirme yöntemleri açıklanmış olup bu çalışma için kullanılacak yöntem tanıtılmıştır. Dördüncü bölümde, montaj hattı çeşitleri için yayınlanmış ergonomik montaj hattı dengeleme çalışmaları araştırılmış ve literatür çalışması olarak bildirilmiştir.

Problemin tanımı ve problem için uygulanan yöntem detaylı olarak beşinci bölümde açıklanmıştır. Altıncı bölümde, uygulanan BMHDP çözümleri değerlendirilmiş ve modellerin karşılaştırılması sunulmuştur. Son bölümde ise uygulanan modellerin çıktıları değerlendirilerek uygulanabilirliği değerlendirilmiştir. Bir sonraki çalışmalar için öneriler sunulmuştur.

2. MONTAJ HATTI DENGELEME PROBLEMİ

Montaj hattı; ardışık iş elemanlarını birbirine bağlamak için oluşturulmuş genellikle bir bant üzerinde hareket eden iş istasyonlarından oluşmuş bir sistemdir. Montaj Hattı Dengeleme ise bir seri üretim sisteminde iş elemanlarının istasyonlara atanması süreci olarak tanımlanabilir (Küçükkoç, 2022).

Montaj hattı dengeleme problemleri, montaj işlemi sırasında, istasyonlar arasındaki öncelik ilişkileri dikkate alınarak iş istasyonlarında düzenleme yapılmasıdır. Bir montaj hattının temel özelliği, iş parçalarının bir istasyondan diğer bir istasyona hareket etmesidir. Mamule göre yerleşimde oldukça kısa bir zamanda geniş hacimde üretim yapılsa bile üretim hattı bir kez kurulduktan sonra prosese göre yerleşimde birtakım problemler ortaya çıkabilir. Montaj hattında meydana gelen bu problemlere çözüm getirmekteki amaç, işler arasında bulunan öncelik şartlarını sağlayacak, her istasyondaki toplam iş yükü zamanını, verilen çevrim süresini aşmayacak ve istenilen performans kriterleri sağlanacak şekilde görevlerin iş istasyonlarına atanmasıdır. Bu problemin tanımlanması için gerekli olan bazı kavramlar aşağıdaki gibi açıklanmıştır (Küçükkoç, 2022).

İş Elemanı: Bir montaj hattının bölünemeyen en küçük parçası olarak kabul edilir.

İstasyon: Bir veya daha fazla iş elemanının montajının yapıldığı birimdir.

Çevrim süresini: Montaj hattında ürünün bir istasyonda kalabileceği en büyük süre veya bir iş istasyonundaki çalışanın o istasyonda yapılması gerekli işleri tamamlaması için gerekli süre olarak tanımlanabilir.

İstasyon zamanı: İstasyona atanmış iş elemanlarının oluşturduğu toplam süre değerleridir.

İstasyon dengeleme gecikmesi: İstasyolar için, çevrim zamanı ve işlem zamanları arasındaki farktır.

Öncelik diyagramı: Bir ürünün montajı süresince iş elemanlarının arasındaki öncelik-sonralık ilişkisini gösterir. Düğümler veya grafiklerle temsil edilebilir.

2.1. Montaj Hattı Dengeleme Probleminin Sınıflandırılması

Montaj hattı dengeleme problemleri, birçok şekilde sınıflandırılabilir. Genel olarak montaj hatlarına ilişkin sınıflandırma; yerleşim şekline göre montaj hatları, model sayısına göre montaj hatları, hattın kontrol yapısına göre montaj hatları, kurulum sıklığına göre montaj hatları ve otomasyon seviyesine göre montaj hatları şeklinde yapılmaktadır. Ürün model sayısına göre montaj hatları; tek modelli, çok modelli ve karışık modelli hatlar olarak ayrılmaktadır.

Montaj hatlarının dengelenmesi sayesinde düzenli bir makine akışı sağlanabilir, insan gücü verimi maksimum seviyelere çıkarılabilir, makine kapasitesinden azami faydalanılabilir, işlem süreleri azaltılabilir, boş süreler ve bekleme zamanları en aza indirilebilir. Sonuç olarak; var olan tüm kısıtların dahilinde sınırları zorlamadan kaynakların verimli kullanılmasını sağlar.

2.2. Montaj Hattı Dengeleme Problemi Çözüm Yöntemleri

Montaj hattı dengeleme problemleri için geliştirilen çözüm yöntemleri üç ana başlıkta incelenmektedir. Bunlar; Simülasyon teknikleri, analitik yöntemler ve sezgisel yöntemlerdir (Takcı, 2013).

Simülasyon yöntemleri; bilgisayar ortamında kullanılan montaj hattı dengeleme yöntemleridir. Gerçek sistemden toplanan bilgiler, bilgisayarda geliştirilen modellere uygulanarak, sayısal birtakım sonuçlara ulaşmak hedeflenir. Simülasyon modelleri aracılığı ile en kötü durum senaryoları da incelenebilir (Koçanalı, 2009).

Kesin yöntemler, bir istasyonun toplam iş süresinin, çevrim süresinden büyük olmadığı ve amacın minimum sayıdaki istasyon sayısına ulaşmak olduğu montaj hattı dengeleme problemlerinde kullanılır. Problemlerde amaç fonksiyonu ve belirli kısıtlar vardır. Bu yöntemler; dal-sınır algoritması, amaç programlama, karma tam sayılı programlama, dinamik programlama, 0-1 tamsayılı programlama, doğrusal olmayan tamsayılı programlama gibi yöneylem araştırması tekniklerini içermektedir.

Sezgisel yöntemler, teknikler özelinde daha önce belirlenmiş kuarl adımları doğrultusunda uygulanarak elde edilir. Elde edilen çözüm en iyi çözümü garanti etmez ancak kabul edilebilir, optimum çözüme yakın çözümlerdir. Günümüze kadar çok sayıda sezgisel yöntem geliştirilmiştir. Literatürde geçerliliği kabul edilmiş bazı sezgisel yöntemler (Küçükkoç, 2022):

- En büyük aday yöntemi
- COMSOAL (Computer Method for Sequencing Operations for Assembly Lines)
- İlişkili etkinlik yöntemi
- Aşamalı sırayla çözüm
- Konum ağırlıklı dengeleme tekniği
- Öncelik diyagramı ile çözüm
- İki aşamalı dengeleme tekniği
- Aday matris ile çözüm
- Kilbridge-Wester yöntemi olarak sıralanabilir.

Son yıllarda; genetik algoritma, karınca kolonisi optimizasyonu, benzetim tavlama algoritması, yapay arı kolonisi optimizasyonu gibi yöntemler de montaj hattı dengeleme probleminin çözümünde yaygın kullanılmaya başlanmıştır.

3. ERGONOMİK RİSK DEĞERLENDİRME YÖNTEMLERİ

İşyerlerinde öncelikli tehlikelerden biri de Kas-İskelet Sistemi Rahatsızlıkları üzerindeki risk faktörleridir. KİSR oluşumu riskini azaltmak için, özellikle insan gücü kullanımının yaygın olduğu ve tekrarlı hareketlerin yapıldığı çalışma ortamlarında oluşabilecek KİSR analiz edilmelidir. Bu analizin; yapılan işe, ortama ve amaca en uygun olacak ergonomik risk değerlendirme yöntemi ile yapılması gerekmektedir. Bu amaç doğrultusunda literatürde geliştirilmiş birçok yöntem bulunmaktadır.

3.1. Montaj Hatlarında Kas-İskelet Sistemi Rahatsızlıkları

Araştırmalara göre montaj hatlarında yapılan işlerin çoğunlukla; taşıma, itme veya çekme, kaldırma, indirme, tutma gibi elle taşıma işlerinden herhangi birisi ile ilişkili olduğu belirtilmektedir. Ek olarak, elle taşıma işlemleri de bel rahatsızlıklarının başlıca sebeplerindendir (Aksüt vd., 2020).

KİSR, genel olarak çalışma ortamlarında iş elemanlarının niteliği doğrultusunda hareketlerin sürekli yapılması ve vücudun uygun olmayan pozisyonlara uzun süre mauz kalması ile ortaya çıkan birikimli travmaların etkisi ile ortaya çıkmaktadır (Bilir, 2011). İşe bağlı KİSR; fiziksel çaba ile ilişkili olup, dünyanın her tarafında en yaygın sağlık problemlerinden biridir (İçağasıoğlu vd., 2015). Meslek hastalıklarından olan KİSR, dünyanın birçok ülkesinde çarpıcı bir şekilde artmaktadır.

Tekrarlı hareketler ve manuel işler sebebiyle oluşan bu KİSR'inin önlenmesi için risk değerlendirilmesi yapılması gerekmektedir. Montaj hattının uygunluğuna göre seçilen ergonomik risk değerlendirme yöntemi ile bazı fiziksel iş yükleri, uygun olmayan vücut duruşları ve ağır yük taşıma gerektiren iş elemanları tespit edilebilir. Montaj hatlarının fiziksel iş yükünün dengelenmesi; öncelikle iş yükünün azaltılmasına, azalan iş yüküne istinaden iş güvenliğinin arttırılmasına ve güvenli iş ortamı sayesinde işçi moralinin iyileştirilmesine katkı sağlar.

Montaj hattı çalışanlarının her biri farklı fizyolojik özelliklere sahiptir. Farklı çalışma pozisyonları bir çalışmada sağlık sorununa veya meslek hastalığına neden olurken, aynı fiziksel şartlar başka bir çalışmada sağlık sorununa neden olmayabilir. Montaj hattı tasarımında farklı antropometrik özelliklere sahip çok sayıda çalışanın her birine hitap edecek bir hat tasarlamak her zaman mümkün değildir. Tasarım yaparken çalışanların uzanma, tutma ve ekipman kullanma gibi yeteneklerinin yanı sıra yorgunluk ve KİSR yaşamadan işlerini ne kadar süre yapabilecekleri dikkate alınmalıdır (Gönen, vd., 2018).

Genel olarak KİSR iki farklı şekilde ortaya çıkabilir (Gönen, vd., 2018):

- Aniden ortaya çıkan ve ağrılı seyreden durumlar, akut problemler olarak değerlendirilir. Uzun bir zaman sürecinde gelişen hastalıklar, kronik uzun süreli problemler olarak ortaya çıkar. Akut KİSR hareket sistemine ait yapıların güçlü ve ani olarak aşırı yüklenmesi ile başlar. Bu yüklenme anatomik yapılarda zedelenme, yetmezlik ve fonksiyon kaybına yol açar. Kırıklar, eklem çıkıkları, kaslarda veya eklem bağlarında yırtılmalar, omurga yaralanmaları görülebilir.

- Kronik KİSR uzun süreli olarak, dokuların kapasitesini zorlayacak şekilde yüklenmeyle ortaya çıkarlar. Bu durumda, birikimsel travma hastalıklarından bahsedilir. Sürekli tekrarlanarak, çalışanın biyomekanik kapasitesini aşan ve travma oluşturan hareketler sonucunda eklem, kas, kiriş ve diğer yumuşak dokularda bozulma, fonksiyon kaybı ve ağrı ile seyreden sendromlara, birikimsel travma hastalıkları denir (Gönen, vd., 2018).

Montaj istasyonlarında yer alan iş elemanları, 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 tekrar eden hareketler, çalışanların sağlığını ve iş performansını olumsuz yönde etkilemektedir. Ayakta durma, eğilme, uzanma gibi duruşlarda belirli 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. Dolayısıyla bir montaj masasında uzun süre benzer durumlarda çalışmak zorunda kalan çalışanların yaşadığı yorgunluk ve ağrılar, daha sonra kas iskelet sistemi rahatsızlıklarına dönüşmektedir (Akay vd., 2003).

Montaj hattı tasarımlarının ergonomik olarak iyileştirilmesi birçok yaklaşım ile gerçekleştirilebilir. Bu yöntemlerden biri montaj hattında gerçekleştirilen operasyonlara ait montaj hattı oluşturulurken ergonomik risk faktörlerinin kısıtlarının da bu oluşuma dahil edilmesidir. Diğer bir yaklaşım ise anketler aracılığıyla KİSR'nın belirlenmesidir (Gönen, vd., 2017).

3.2. Ergonomik Risk Değerlendirme Yöntemleri

Çalışma esnasında uygun olmayan duruşlar ve tekrarlayan hareketler zorlanmalara ve hatta kas iskelet sistemi rahatsızlıklarına neden olmaktadır. Uygun olmayan çalışma duruşlarının iyileştirilmesi, zorlanmaların azaltılması çalışanın sağlığı ve aynı zamanda iş performansı açısından oldukça önemlidir.

KİSR riskini değerlendirmek için kullanılan yöntemler;

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

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

Kişisel Anket Yöntemleri

KİSR riskinin değerlendirilmesi için kullanılan öznel anketler ve kontrol listeleridir. Cornell KİSR Anketi (Cornell Musculoskeletal Discomfort Questionnaire) gibi.

Sistematik Gözlemlere Dayalı Yöntemler

KİSR riskinin nicel olarak değerlendirilebilmesi amacıyla kullanılan yöntemlerdir. Basit gözleme dayalı yöntemler ve gelişmiş gözleme dayalı yöntemler olarak ikiye ayrılabilir.

a) Basit gözleme dayalı yöntemlerden, literatürde en yaygın karşılaşılanları;

- OWAS (Ovako Çalışma Duruşları Analiz Sistemi)
- QEC (Hızlı Maruziyet Değerlendirme Yöntemi)
- OCRA (Mesleki Tekrarlamalı Hareketler İndeksi)
- RULA (Hızlı Üst Uzuv Değerlendirmesi)
- REBA (Hızlı Tüm Vücut Değerlendirmesi)

belirtilebilir. Bu yöntemler, uygulayıcılar tarafından en çok kullanılan yöntemlerdir. İş yerlerindeki iş sağlığı ve güvenliği yönetimi kapsamında, sıklıkla uygulayıcılar için tercih edilmektedir (Koç ve Testik, 2016). Yöntemlerin üstünlükleri;

- ❖ Lisans anlaşması gerekmez, maliyeti düşüktür.
- ❖ Etkili yöntemlerdir, çok sayıda işlemler için uygulanabilmektedir.

b) Gelişmiş gözleme dayalı yöntemler; Ergo-Man, 3DSSPP, Jack, RAMSIS Model, AnyBody Modelleme Sistemi sayılabilir.

Bu yöntemler için yazılım lisans bedeli ödenerek kullanımı gerektiği gibi analiz yapılacak işlemin modellenmesine ihtiyaç duyulması nedeniyle, uygulanması uzun sürmektedir. Bu özellikleri nedeniyle, gerek bilimsel ve gerekse işletmelerde kullanımı nadir yöntemlerdir.

Direkt Ölçüm Yöntemleri, insan hareketlerinin ve duruşlarının analizi için direkt ölçümlerde kullanılan; Elektromiyografi (EMG), LMM, biyomekanik analiz gibi araçlardır. Bu cihazların satın alma fiyatları çok yüksek olduğu gibi, işlemlerim analizi için hazırlıklar da uzun sürdüğü için işletmelerde kullanımı pratik değildir.

Bu tez çalışmasında, gerek satın alma maliyeti gerektirmemesi ve gerekse tez kapsamında işletmede 200'e yakın iş elemanı bulunduğundan, analizin makul sürede sonuçlanabileceği basit gözleme dayalı yöntemlerden birinin kullanımı uygun görülmektedir.

OWAS: Postür kaydedici yöntemdir ve Ovako Çelik Şirketi tarafından 1970 yılında Finlandiya'da geliştirilmiştir (Karhu vd., 1977). Çalışma sırasında sırt, kol ve bacak vücut bölgelerinin duruşları ile eğilme, rotasyon ve elevasyon pozisyonlarını değerlendirir. Her bir duruş özelinde o duruşa maruz kalma süresi ve sıklığı da değerlendirilir. Değerlendirmede duruşların kaydedilmesi aşamasında video-kamera da kullanılabilir ve görüntüler işin özelliğine göre farklı zaman aralıkları ile incelenir. Uzun süreli işlemlerde 15 saniye, daha küçük süreli işlemlerde ise 5 saniye ara ile çalışma duruşunun kaydedilip değerlendirilmesi önerilmektedir (Akay vd., 2003). Sadece üç vücut bölgesinin etkili olduğu işlem türleri için kullanılabilir. Her 5-15 saniyede bir analiz yapılması işlem yükünü arttırır.

QEC: Li ve Buckle (1999) tarafından geliştirilmiş ve David, Woods ve Buckle tarafından yeniden gözden geçirilerek iyileştirilmiştir. İki bölümden oluşan yöntemin, "Gözlemcinin Değerlendirmesi" bölümünde; değerlendirici, çalışma esnasında 4 vücut bölgesinde duruş ve hareketler için 7 değerlendirme yapar. "Çalışanın Değerlendirmesi" bölümünde ise, çalışan; kaldırılan veya taşınan en fazla ağırlık, iş süresi, bir elle uygulanan en yüksek kuvvet, işin gerektirdiği görsel dikkat, taşıt kullanma, titreşim, zorlanma ve iş stresi olmak üzere 8 başlıkta değerlendirme yapar. Toplam 15 farklı bileşen yer alması önemli bir üstünlüğüdür, ancak çalışanın sübjektif değerlendirmesi nedeniyle güvenilirliğin azalması, gerek gözlemci ve gerekse çalışan değerlendirmenin ve risk skoru hesaplamasının uzun sürmesi sakıncalıdır.

OCRA: Özellikle montaj hattı gibi işçinin gün boyu aynı işleri tekrarlı yaptığı durumlar için ergonomik risk analizi yapılırken, işlerin tekrarlanmasından kaynaklanan kümülatif etkiyi hesaplamak oldukça önemlidir. Ergonomik risk değerlendirme yöntemleri arasından

yalnızca OCRA bu kümülatif etkiyi dikkate almaktadır (Baykasoğlu vd., 2014). Diğer yöntemlerde her bir işlem için ayrı ayrı risk analizi yapılırken, OCRA yöntemi ard arda yapılan işlemlerden kaynaklı yorulmaları hesaplanmaktadır. Bu özelliği üstünlüğünü ortaya koyarken yoğun işlem yükü nedeniyle analizin uzun sürede tamamlanması en önemli sakıncasıdır.

RULA: İlk olarak Nottingham Üniversitesi Mesleki Ergonomi Enstitüsü'nden Dr. Lynn McAtamney ve Dr. Nigel Corlett tarafından geliştirilmiş ve 1993 yılında Applied Ergonomics Dergisi'nde tanıtılmıştır. Yöntem; boyun, gövde, üst kol ve ellerin iş görevlerindeki postural yük gereksinimlerini dikkate almakta olup vücudun üst kısmındaki baskıların fazla; bel, sırt ve bacaklardaki yükün daha az olduğu işlerin analizinde kullanılır.

REBA: 6 vücut bölgesi (üst kol, alt kol, bilek, boyun, gövde ve bacak) duruşları ile yük/kuvvet, kavrama ve aktivite değerini (toplam 9 bileşen) analiz etmeyi amaçlayan bir yöntemdir. Bir işlem için uygulama süresi makuldür. Bu özelliği nedeniyle, literatürde en fazla araştırma yapılan yöntemdir.

Yukarıda açıklanan yöntemlerin sakınca ve üstünlükleri dikkate alındığında; bu tezde, uygulama yapılacak işletmedeki montaj hattının 24 istasyonlu ve oldukça fazla sayıda, 198 iş elemanı olması nedeniyle, makul sürede ancak tatminkâr detayda risk skorunun elde edilmesini sağlayacağı düşünülen REBA yönteminin kullanımı uygun görülmüştür.

3.3. REBA Yöntemi

Bu yöntem Sue Hignett ve Lynn McAtamney tarafından Nottingham Hastanesi'nde geliştirilmiş ve 2000 yılında yayınlanmıştır. Ergonomist, fizyoterapist ve hemşirelerden oluşan ekiplerin 600 civarında çalışma duruşunu analiz ettikten sonra ortaklaşa yürüttükleri çalışmanın sonucudur. REBA, üst uzuvların (kol, önkol, bilek), gövde, boyun ve alt ekstremitelerin duruşlarını ortaklaşa analiz etmeyi sağlar. Ayrıca kavrama tipini ve

gerçekleştirilen kas aktivitesini ayırt eder. İhmal edilebilirlerden çok yükseğe kadar beş risk seviyesi tanımlamaktadır (Hignett vd., 2000).

REBA yöntemi, dinamik ve statik duruşlarda söz konusu olan yüklenmeyi, insan-yük etkileşimini göz önüne alarak işgörenin tüm vücudunun duruşsal riskini değerlendirir. Bu analiz aynı zamanda, bir iyileştirme yapıldığı zaman, iyileştirmenin öncesinde ve sonrasında rahatsızlık risklerinin azalıp azalmadığını değerlendirmek için kullanılır (Kahya vd., 2017).

REBA, değerlendirilen duruşa, kuvvet gereksinimlerine, hareket tipine, hareket sıklığına ve görev içinde gözlemlenen eşleşmeye dayalı olarak tek bir nihai puan sağlar. 1 ila 15 arasında değişen bu değer, operatör için işle ilgili ergonomik risk değerini temsil eder. REBA yöntemine göre bir çalışma duruşunun REBA skoru belirlenirken öncelikle vücut kısımları, A (Gövde, Boyun ve Bacak) ve B (Üst kol, Alt kol ve Bilekler) grubu olarak ikiye ayrılır;

REBA yönteminin uygulanmasında ilk olarak gövde, boyun ve bacakların duruşu gözlemlenir ve puanlanır. Yönteme ait A tablosundan gövde, boyun ve bacakların duruş puanlarına bağlı bir skor elde edilir. Bu skora duruş sırasında uygulanan kuvvet veya taşınan yüke ilişkin puan eklenir, A skoru elde edilmiş olur. Üst kol, alt kol ve bileklerin duruşu analiz edilir ve puanlanır. B tablosundan bir puan elde edilir, bu puana kavramaya ilişkin puan eklenir, B skoru hesaplanır. A ve B skorları kullanılarak C tablosundan elde edilen değere, son olarak, aktivite skoru eklenerek duruşun REBA skoru elde edilmektedir.

Hesaplanan REBA skoru ile çalışma duruşunun risk seviyesi derecelendirilmektedir. Risk seviyeleri ve her seviyeye göre alınması gereken önlem dereceleri Çizelge 3.1'de görülmektedir (Kahya vd., 2018) Form Ek Açıklama-B'da yer almaktadır.

Çizelge 3.1. 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



4. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Son yıllarda montaj operatörlerinin üretim hatlarında yaşadıkları zorluklar geniş çapta incelenmiş ve araştırmacıların yakın tarihli araştırmaları, insan operasyonları analizine ergonomi değerlendirmelerinin dahil edilmesinin önemli olduğu montaj sistemlerinde; üretkenlik, verimlilik ve ergonomi arasında bir bağlantı olduğunu göstermiştir.

Bu konuyla ilgili önceki araştırmalar, montaj mühendisliğini ergonomiyle birleştirmenin ekstra değerini göstermiş olup, yapılan çalışmalarının çoğu, çalışanların ergonomik zorlanmalarından kaynaklanan süre kayıpları durumunda geleneksel görev sürelerinin analiz prosedürlerinin yeterli olmadığına anlaşılmaya yol açmıştır. Bu nedenle, en kısa çevrim süresini sağlayan bir çözüm aslında montaj hattının ergonomik risk seviyesi nedeniyle her zaman montaj hattının kabul edilebilir risk sınırlarına uymayabilmektedir.

Bu bölümde, çalışmanın konusunu oluşturan ergonomik MHDP ile ilgili olarak literatür çalışmaları açıklanmıştır. Çalışmalarda önerilen matematiksel modellerde ergonomi etkisinin modellerde nasıl uygulandığı araştırılmıştır. Araştırma, üç başlık altında incelenmiştir.

- Kısıtlarında ergonomik eşitlik bulunan MHDP çalışmaları
- Amaç fonksiyonunda ergonomik parametre bulunan çalışmalar
- Karma model üretim, paralel ve/veya U tipi üretim hatları, işçi ataması, alan kısıtlamaları gibi diğer yöntemler ile ergonomik MHDP çalışmaları

4.1. Kısıtlarında Ergonomik Eşitlik Bulunan MHDP Çalışmaları

Hedef ergonomik risk skorlarının aşılması için eklenen kısıtların bulunduğu çalışmalar bu bölümde incelenmiştir.

Kara vd. (2014), psikolojik talep, fiziksel talep, işçi yetkinliği, işçi sayısı, ekipman gereksinimleri, çalışma duruşları ve aydınlatma seviyelerini içeren bir matematiksel model geliştirmişlerdir. Montaj hattı dengeleme problemlerinin temel kısıtlamalarının yanı sıra diğer kısıtlamalar dahilinde; işçiler, teknisyenler, ekipman ve aşırı aydınlatma ile ilgili toplam maliyeti en aza indirmeyi amaçlamışlardır. Önerilen model, tek model montaj hatları için geliştirilmiştir.

Otto ve Battaia (2017), ergonomik yönlerin montaj hattı dengeleme entegrasyonuna ve zaman içinde ergonomik stresi azaltmak için iş rotasyonuna odaklanan araştırmalara ilişkin bir çalışma sunmuşlardır. Odaklanmış risk faktörünü (örn. tekrarlama, statik duruşlar, sağlıksız pozisyonlar, tekrarlayan kuvvetler ve enerji harcamaları) ve birçok risk değerlendirme yöntemini (NIOSH, OCRA...) aynı çalışmada değerlendirmişlerdir.

Mutlu ve Özgörmüş (2012), çalışmalarında fiziksel işgücü kısıtlamaları ile bulanık montaj hattı dengeleme problemi ele almışlardır. İşle ilgili yaralanmaları azaltmak için görev önceliği, işlem sürelerini ve fiziksel iş yüklerini içeren yeni bir montaj hattı dengeleme problemi sunmuşlardır. Bir görevin fiziksel iş yükünü bulanık bir kavram olarak ele alarak bulanık bir doğrusal programlama modeli önermişlerdir. Kabul edilebilir risk limitini istasyonlar için belirleyerek önerdikleri problemleri GAMS yardımıyla çözmüşlerdir.

Roy vd. (2011), çalışmalarında iş elemanlarının stokastik zaman açısından en iyi şekilde tanımlanması durumunda, tüm problemi farklı bir verimlilik ölçüsü ile ele almışlardır. İş istasyonlarının boşa kalma sürelerinin beklenen varyansı, sistemin kararlılığının ters bir ölçüsü olarak görülmektedir. Mevcut çalışma, çevrim süresi ve görev

sürelerinin dağılımı açısından montaj hattının güvenilirliğini tanımlarken öncelik kısıtlamaları altında problem için bir optimizasyon formülasyonu sunmaktadır. Literatürde iyi bilinen bir örneği stokastik kurulum altında ele almışlar ve modellemişlerdir.

Sternatz (2013), montaj hattı dengeleme probleminin farklı versiyonları için çeşitli kesin ve sezgisel çözüm önerileri geliştirmiştir. Çalışmalarında otomotiv endüstrisindeki tüm ilgili hat dengeleme gereksinimlerini karşılayan yeni bir genel, esnek ve hızlı çözüm önerileri sunmuşlardır. Yöntem, başarılı çoklu Hoffmann buluşsal yöntemine dayanmakta olup gerekli kısıtlamaları dikkate almak üzere geliştirilmiş ve genişletilmiştir.

4.2. Amaç Fonksiyonunda Ergonomik Parametre Bulunan Çalışmalar

Battini vd (2016), montaj hattı dengeleme problemlerinin çözümüne yönelik çok amaçlı yeni bir model geliştirmiş ve ergonomi yönünü de içerecek şekilde tartışmışlardır. İlk olarak, montaj iş istasyonlarının temel özelliklerine dayalı olarak, enerji harcama değerlerinin hızlı bir şekilde tahmin edilmesine yardımcı olan Önceden Belirlenmiş Hareket Enerji Sistemi (Predetermined Motion Energy System) adlı bir teknik sayesinde ergonomi düzeyini tahmin etmek için enerji harcaması kavramı kullanmışlardır. Ardından, optimal çözümlerin etkin sınırlarını tanımlamak için dört farklı amaç fonksiyonuna dayalı çok amaçlı bir yaklaşım tanıtmışlardır. Çalışmayı tamamlamak için, enerji ve zaman değeriyle bağlantılı birkaç parametreyi değiştiren pareto sınırlarının davranışını analiz etmek için gerçek bir durum için bir sayısal örnek sunmuşlardır.

Choi (2009), aynı anda hem işlem süresi hem de fiziksel iş yükü için yeni bir matematiksel hat dengeleme modeli sunmuştur. MHDP ile ilgili çoğu araştırma, toplam işlem süresini ve/veya iş istasyonu sayısını en aza indiren geleneksel endüstriyel önlemlere odaklanmaktadır. Bu nedenle; Choi, işlem süresinin aşılmasını sağlayan ve fiziksel iş yükünü çeşitli risk unsurlarıyla birleştiren 0-1 tamsayı bir programlama modeli önermiştir. Çözüm teknikleri için hedef programlama yaklaşımını benimseyerek, sürece uygun bir algoritma tasarlamışlardır. İşlem süresi modeli, fiziksel iş yükü modeli ve tümleşik model üzerinde çeşitli hesaplamalı test çalıştırmaları gerçekleştirmiştir. Modelin, operasyon

yöneticilerinin iş planlama çalışmalarında karar vermeleri için çok yararlı olabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Özdemir vd. (2021)'nin çalışmalarındaki temel odak noktası; ergonomik riskleri dikkate alarak montaj hatlarını tasarlamak için bir model geliştirmektir. Aynı zamanda simülasyon yazılımı kullanarak montaj görevleri için ergonomik risk analizi yaparak çıkan sonuçları geliştirilen modele dahil etmişlerdir. Problemden birbiriyle çelişen iki amaç bulunmaktadır, bu nedenle gerekli çözüm modeli çok amaçlı olarak kurgulanmıştır. Problemin amaçları belirsiz olduğundan önerilen model bulanık küme teorisini benimseyerek geliştirilmiştir. Geliştirilen bulanık çok amaçlı model, bir buzdolabı şirketinden toplanan veriler ile uygulanmaktadır.

Mura ve Dini (2017), çok amaçlı bir BMHDP çözmek için yeni bir genetik algoritma yaklaşımı önermişlerdir. Hedefler, tipik olarak literatürde sunulan iş istasyonu sayısının ve iş yükü dengesizliğini en aza indirilmesiyle ilgilidir. Aynı zamanda literatürde aynı amaç içerisinde ele alınmayan ve manuel montaj hatlarında çok önemli olan vasıflı işçi sayısı, iş istasyonları ve montaj ekipmanı sayısının en aza indirilmesiyle ilgilidir. Optimize edilmiş montaj hatlarını oluşturmak amacıyla önerilen yöntemin etkinliğini göstermek için literatürde bulunan klasik bir vakayı ele almışlardır.

Otto ve Scholl (2011), çalışmalarında, çoğu ergonomik risk tahmin yöntemlerinin doğrusal olmayan fonksiyonlar içermesine rağmen, bunların düşük ek hesaplama maliyetiyle montaj hattı dengeleme tekniklerine kolayca entegre edilebileceğini göstermişlerdir. Ergonomik riskleri OCRA yöntemini kullanarak, otomobil endüstrisinden aldıkları bir veri seti üzerindeki hesaplama deneyleri ile yeniden değerlendirerek önemli bir azalma tespit etmişlerdir. Böylece, istasyon sayısını artırmadan tüm istasyonlar için kabul edilebilir risk düzeyine sahip örneklerin %50'si için bir denge oluşturmuşlardır. BMHDP, ProExzel-lenz Federal Programı ile çözülmüştür.

Battini vd. (2015), ergonomi ilkelerini dikkate alan montaj hattı dengeleme problemi ele almışlardır. Montaj hattıyla ilgili yeni çözüm önerileri sağlamak ve kullanımlarını bir örnek üzerinde göstermek için iki farklı yaklaşımı sayısal bir örnekle çalışmışlardır. Çözüm önerilerinden ilki; ergonomik risk seviyesini tahmin etmek için kullanılan enerji

harcamasına dayalı çok amaçlı bir model uygulamaktadır. İkincisi, çok amaçlı sorunu tek bir hedefe indirmek için dinlenme süresindeki enerji harcama oranına dönüştürmektedir.

Özdemir vd. (2021), ergonomik montaj hattı dengeleme problemi için, Siemens Tecnomatix Jack simülasyon yazılımı başta olmak üzere yeni risk değerlendirme indekslerini kullanmışlardır. Önerilen risk değerlendirme aracı, her bir montaj görevinin, farklı risk seviyelerine sahip kaldırma, kalça bükme, bilek bükme ve çömelme çalışma ögelerinden oluştuğunu varsaymaktadır. Çalışmada Jack simülasyon modeli kullanılmıştır. Simülasyon sonuçları daha sonra simülasyon çalışmalarından elde edilen iş elemanlarının risk değerlerinin kullanıldığı yeni geliştirilmiş risk değerlendirme denklemlerinde kullanılarak bulanık çok amaçlı bir modele dahil edilmektedir.

Barathwaj vd. (2015), bir imalat sanayisinde ürün talebindeki çeşitliliği karşılamak için karma model montaj hattı tercih etmektedirler. Karma model montaj hattı dengeleme, benzer özelliklere sahip ürünlerin rastgele bir şekilde birleştirilmesine yardımcı olur. Bu çalışmanın amacı, istasyon sayısını, istasyonlar arası ve her istasyon içindeki iş yükü indeksini azaltmaktır. Son montaj hattında çalışanların katkısı daha fazla olduğundan, ergonomi ek bir amaç fonksiyonu olarak alınmıştır. Bir iş istasyonunun ergonomik risk seviyesi, hızlı üst ekstremité değerlendirme (Rapid Upper Limb Assessment - RULA) kontrol sayfası kullanılarak hesaplanan birikmiş risk durumu adı verilen bir parametre kullanılarak değerlendirilmiştir. Problemin çözümünde genetik algoritma kullanılmıştır. Seçme, çaprazlama ve mutasyon gibi genetik algoritma çözümlenmesi ele alınan karma MHDP göre düzenlenmiştir. Sonuçlar, nihai ürünün üretkenliği ve işlem süresi üzerinde önemli bir etki olduğunu, yani üretim hızının %39,5 arttığını ve belirli bir model için montaj süresinin mevcut 18 dakikadan 13 dakikaya düşürüldüğünü göstermektedir. Ayrıca, önerilen montaj hattını kullanmak için gereken alan, mevcut 350 m²'ye karşı sadece 200 m²'dir. Ayrıca algoritma, çalışanların yorgunluğunu azaltmaya da yardımcı olmuştur.

Yetkin ve Kahya (2022), istasyon süresini ve ergonomik risk seviyelerini aynı anda dengelemeyi amaçlayan bir matematiksel model geliştirmiştir. Bu modelin çözümünde ağırlıklı toplam ve konik skalerleştirme yöntemini uygulayarak GAMS paket programı ile

modellemişlerdir. Bir beyaz eşya montaj hattında uygulanmış ve sonuçları OMAX yöntemi ile değerlendirilmiştir.

4.3. Karma model üretim, paralel ve/veya U Tipi Üretim hatları, işçi ataması, alan kısıtlamaları gibi diğer yöntemler ile Ergonomik MHDP Çalışmaları

Mokhtarzadeh vd. (2021), ergonomik riskleri göz önünde bulundurarak karma model paralel U şeklinde bir montaj hattını dengelemek için iki aşamalı bir model geliştirmişlerdir. İlk aşamada, çeşitli ergonomik standartlara göre en iyi-en kötü yöntemi ve ELECTRE TRI kullanılarak her bir görevin ergonomik risklerini belirleyerek görevleri zor, normal ve kolay olarak sınıflandırmışlardır. İkinci aşamada, her sınıfın görev sayısını istasyonlar arasında seviyelendirmek için yeni bir amaç fonksiyonu göz önünde bulundurarak problemin matematiksel bir modelini geliştirmişlerdir. Bu hedef, her bir görevin istasyonlar arasında eşit olarak dağıtılmasını ve her istasyonda eşit sayıda zor, normal ve kolay görevin olmasını sağlamıştır. Problemi çözmek için bir programlama modeli ve bir sezgisel algoritma geliştirmişlerdir. Sayısal sonuçlar, önerilen amaç fonksiyonunun ergonomik riskleri iyi bir şekilde seviyelendirebileceğini göstermektedir. Önerilen çözüm yaklaşımlarının performansı 6 farklı metasezgisel algoritmaya göre incelenmiştir. Sayısal sonuçlar, küçük ve orta boyutlu problemler için kısıt programlama modelinin ve büyük boyutlu problemler için sezgisel algoritmanın üstünlüğünü göstermektedir.

Tiacci ve Mimmi (2018), tarım ekipmanları segmentindeki bir şirketle ilgili bir endüstriyel vaka üzerinde, ergonomik mevzuata uygun asenkron montaj hatları tasarlamaya yönelik bir yaklaşım önerip test etmişlerdir. OCRA yöntemi ile ergonomik risk değerlendirme yapılarak dengeleme/sıralama işlemlerini ideal sonuca ulaştırabilen bir genetik algoritma yaklaşımı önermişlerdir. Yaklaşım, endüstriyel durumların karmaşık senaryosunun birçok özelliğini dikkate alarak hat konfigürasyonları tasarlamaktadır.

Zhang vd. (2020), çevrim sürelerini ve ergonomik riskleri aynı anda en aza indirmek için U şeklinde bir montaj işçisi ataması ve dengeleme problemi formüle etmişlerdir. Ayrıca, basitliği ve akış atölyesi çizelgeleme problemlerindeki başarılı sonuçları nedeniyle, her iki hedefi de optimize etmek için Yeniden Başlatılmış Yinelenen Pareto Açgözlü Algoritması

tasarlamışlardır. Bu algoritmada, ilk çözümü geliştirmek için probleme özgü buluşsal tabanlı bir başlangıç belirlemiştir. Mevcut çözümün etrafındaki alandan yararlanmak için iki önceliğe dayalı açgözlü ve yerel arama aşaması geliştirilmiştir. Son olarak, algoritmanın yerel optimumdan kaçmasına yardımcı olmak için bir başlangıç algoritması önerilmiştir.

Zhang vd. (2020), modellerinde, iş istasyonları ile zaman ve mekân MHDP ele almışlardır. Görev ataması, öncelik, döngü süresi, sıralama ve alan kısıtlamalarını dikkate alarak beş kısıtlı yeni bir MILP modeli ve karınca kolonisi sistemi ile toplam iş istasyonu ve operatör sayısını en aza indirmeyi amaçlamışlardır. Çalışmalarında, MILP modelini küçük ölçekli örneklerde kesin yöntemlerle çözmeyi etkinliğini ve karınca kolonisi optimizasyon algoritmasının çalışma özelindeki üstünlüğü vurgulanmıştır.

Hazır ve Dolgui (2014), tam zamanında üretim ile uyumlu olan U tipi montaj hatlarının dengelenmesi ile büyük ölçekli örnekleri en uygun şekilde çözmeyi amaçlamışlardır. Spesifik olarak, iş istasyonu sayısını ve çevrim süresi hedeflerini en aza indirerek U tipi MHDP ele almışlardır. Büyük ölçekli örnekleri en iyi şekilde çözebilmek için, model geliştirme stratejileri ile ayrıştırma tabanlı bir algoritma önermişlerdir. Algoritmanın etkinliğini test etmek için hesaplama deneyleri yapılarak sonuçlar çalışmada sunulmuştur.

Agrawal ve Tiwari (2008), demontaj hattının gerçekleştirilmesi için en iyi seçenek olarak ürün geri kazanımının kaçınılmaz unsuru olduğunu belirtmişlerdir. Bu makalede, stokastik görev süreli karma model U-şekilli bir sökme hattı (demontaj) önerilmiştir. Yeni bir yaklaşım olan İşbirlikçi Karınca Kolonisi Optimizasyonu, birbiriyle ilişkili hat dengeleme ve model sıralama sorununu aynı anda ele alan bir yaklaşım kullanılmıştır. Önerilen yaklaşımın ayırt edici özelliği, iki diziyi bağımsız olarak tanımlayan, ancak gelecekteki yolu yönlendirmek için iş birliklerinden elde edilen bilgileri kullanan iki taraflı karınca kolonilerini muhafaza etmesi olarak belirtilmiştir. Yaklaşım için, deney tasarımı teknikleri kullanılarak oluşturulan kıyaslama örnekleri üzerinde test edilerek çeşitli faktörlerin hedef üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla varyans analizi yapılmıştır. Önerilen algoritmanın verdiği sonuçlar, Karınca Kolonisi Optimizasyonu ile doğrulanmıştır.

5. MATERYAL VE YÖNTEM

5.1. Problemin Tanımı ve Çözüm Yöntemi

Bu çalışma; bir işletmenin montaj hattında yer alan iş elemanları için çevrim süresi ve öncelik ilişkilerine ek olarak ergonomik risk faktörlerinin ele alındığı BMHDP olarak değerlendirilmiştir. Montaj hattında istasyonlar arasında ergonomik risk değerlerinin dağılımı oldukça dengesiz olduğu için; bu çalışmada istasyon sayısı en aza indirilirken istasyonun ergonomik risk kısıtı da modele eklenmiştir. Ergonomik risk değerleri REBA yöntemi ile hesaplanarak modele eklenmiştir. Modelde istasyon başına düşen ortalama REBA skoru kullanılmıştır.

Mevcut montaj hattı için ergonomik risk kısıtsız optimum çözüm değerlendirilmiş, sonrasında ortalama ergonomik risk değerini baz alan kısıt modele eklenerek çözüm araştırılmıştır. Oluşturulan modelin çözümü için GAMS paket programı kullanılmıştır. Ergonomik risk kısıtının farklı tolerans payları, ağırlıklı ergonomik risk kısıtlı model ve değişken talepler için modeller tekrar kurularak çözüm önerileri sunulmuştur.

5.2. Verilerin Toplanması

Çalışmanın yapılacağı montaj hattı, İşletmedeki ön görüşmeler ve gözlemler sonucunda belirlenmiştir. İlgili alan müdürlüklerine ve sağlık birimlerine çalışmanın hedefleri aktarılmış, öngörülen çalışma planı sunulmuştur. İşletme onayı sonrası ESOGÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Etik Kurul onayı alınmış olup Ek Açıklama-A'da verilmiştir.

Problemin çözümü için montaj istasyonundaki iş elemanlarının sürelerine ve REBA risk skorlarına ihtiyaç bulunmaktadır.

5.2.1. İşlem Sürelerinin Alınması

Modelin geliştirilebilmesi için her istasyondaki iş elemanlarının sürelerinin ölçülmesi gerekmektedir. İş elemanlarının süreleri için, kronometre kullanılarak, zaman etüdü tekniği ile ölçümler alınmıştır. İstasyon süreleri ve öncelik ilişkileri modelin gelişimini ve alternatif çözümlerin oluşumunu sağlamaktadır. Alternatif çözümler, öncelik diyagramına uygun olarak çevrim süresini aşmayan iş elemanları doğrultusunda oluşmaktadır. Model ilk olarak sadece çevrim süresi kısıtını dikkata alarak oluşturulmuştur.

Bu tezde hem istasyon sayısının en küçüklenmesi hem de istasyon başına düşen ergonomik risk skorunun hedef skoru aşmaması hedeflenmiştir. Modelin oluşumu için türetilen farklı olası alternatifler doğrultusunda duyarlılık analizleri yapılmıştır.

Bu montaj hattında, haftanın 6 günü ve 2 vardiya olarak çalışma yapılmaktadır. Gece vardiyasında 7 saat, gündüz vardiyasında 8,5 saat olmak üzere günde net olarak 15,5 saat çalışma yapılmaktadır. Mevcut durumda günlük üretim 65 adet için hedeflenmiş olup bu hedefe göre çevrim süresi 14,31 dakika olarak belirlenmiştir. Montaj hattındaki iş istasyonlarının süre değerleri işletmeden tedarik edilmiştir. 198 iş elemanı için yapılacak analizlerde alınacak ölçümler için çok fazla zaman gerekmektedir. Ancak kurum içi çalışma şartlarından dolayı mesai şartnamesine göre işletmede mesai süreleri belirli bir sınırın üzerine çıkamamaktadır. Kurum çalışanı olarak yapılan çalışmada işletme verilerinin kullanılabilirliği için ilk istasyon özelinde 100 ölçüm alınarak işletmede hali hazırda yapılmış ölçümlerin yeterlilik analizi yapılmıştır. 1. İstasyon özelinde zaman etüdü gözlemleri yapılarak, süre değerlerinin güncelliği teyit edilmiştir. 198 iş elemanı için süre değerleri ve iş elemanlarının tanımları Ek Açıklama-D'de yer almaktadır.

Montaj hattında yer alan verilerin kullanılabilirliği ve güncelliği için 1. İstasyonda yer alan 9 iş elemanı için farklı günlerde ve rassal olarak belirlenen zaman noktalarında 100'er adet ölçümler alınmıştır.

Ölçümler sonucunda alınan gözlemlerin yeterli olup olmadığı, yetersiz ise daha kaç gözlem alınması gerektiği de test edilmelidir. Alınan gözlemlerin yeterli olup olmadığı ya istatistiksel yöntemler ile ya da nomogram kullanılarak test edilebilir (Kahya, 2017). Bu

çalışmada, 1. İstasyondaki iş elemanları için ölçümler alınmış ve Ek Açıklama-H'de verilmiştir.

Her bir iş elemanı için yapılması gerekli gözlem sayısı, %95 güven düzeyi ve %5 hata payını için Denklem 5.1 kullanılmıştır.

N' : Yapılması gerekli gözlem sayısı

N : Yapılmış gözlem sayısı

X_i : İş elemanlarına ait normal süre değerleri

$$N' = \left[\frac{40 \cdot \sqrt{N \cdot \sum X_i^2 - (\sum X_i)^2}}{\sum X_i} \right]^2 \quad (5.1)$$

1. iş elemanı gözlem yeterlilik testi için,

$$N' = \left[\frac{40 \cdot \sqrt{100 \cdot (100,72) - (100,30)^2}}{100,30} \right]^2 = 1,90$$

elde edilmiş olup iş elemanlarının ismi, alınan gözlemlerin ortalama süre değerleri, işletme verileri ve değerler arasındaki mutlak fark Çizelge 5.1.'de verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde tüm iş elemanları için $N > N'$ olduğundan gözlemlerin yeterli olduğu tespit edilmiştir. Alınan ölçümler ile işletme verileri arasındaki farklar oldukça düşük (ortalama %0,37) olduğu için, işletmeden elde edilen işlem sürelerinin modelde kullanımı uygun görülmüştür.

Çizelge 5.1. 1. İstasyon gözlem yeterlilik analizi özet veriler

1. İstasyon	Standart Süre (sn)	Alınması Gereken ölçüm sayısı	İşletme Verileri (sn)	Ölçüm ve İşletme Verileri Arasındaki Mutlak Fark
İş Elemanı 1.1	60,18	1,9	60	0,18
İş Elemanı 1.2	30,15	3,13	30	0,15
İş Elemanı 1.3	30,14	3,77	30	0,14
İş Elemanı 1.4	119,97	4,44	120	0,03
İş Elemanı 1.5	301,52	1,27	300	1,52
İş Elemanı 1.6	119,3	3,55	120	0,7
İş Elemanı 1.7	29,94	3,85	30	0,06
İş Elemanı 1.8	30,07	3,16	30	0,07
İş Elemanı 1.9	90,06	2,63	90	0,06

5.2.2. REBA Ölçümlerinin Değerlendirmesi

Ergonomik risk kısıtı içeren modelin oluşumu için ergonomik risk değerlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Ergonomik faktörlerinin değerlendirilebilmesi için üretim hattına uygulanabilirliği doğrultusunda REBA yöntemi seçilmiştir. Ek Açıklama-B'de verilmiş olan REBA Çalışan Değerlendirme Formu yardımıyla her bir iş elemanının ergonomik risk değerleri kaydedilen videoların analizi ile belirlenmiştir ve skorlar hesaplanmıştır. Ek Açıklama-C'de iş elemanları ve REBA risk değerleri detaylarıyla verilmiştir.

REBA risk değerlendirme çalışması yapılırken gözlemler ve video kayıtları ile analiz edilmiştir. Her bir iş elemanı için süreç tüm detayları ile kayıtlardan takip edilerek hem en kritik risk eleman belirlenmiş hem de boş zamanlar tespit edilmiştir.

Bu çalışmada; bir iş elemanı süresi boyunca, her vücut bölgesi için en yüksek zorlanmanın olduğu risk durumları dikkate alınarak REBA risk değerleri hesaplanmıştır. Bir istasyonun ergonomik riski, iş elemanlarının ergonomik riskleri toplamıdır. Uygulanan tüm modeller için istasyon atamalarıyla oluşan istasyon zamanı, dengeleme gecikmesi ve istasyon başına düşen ergonomik risk değeri detayları ile analiz edilmiştir. Her bir durum

için oluşan ergonomik risk değerleri Ek Açıklama-E, Ek Açıklama-F ve Ek Açıklama-G’de verilmiştir.

5.3. Mevcut Durumdaki İş İstasyonları

İşletmede mevcut durumda motor montaj hattında 24 istasyonda 198 iş elemanı için çevrim süresi 14,31 dakika, toplam istasyon dengeleme gecikmesi 42,64 dakikadır. Mevcut durum için; halihazırda istasyonlara atanmış iş elemanları, iş elemanlarının REBA skorları, iş elemanlarının standart süreleri ve kümülatif REBA skorları Ek Açıklama-E’de , montaj hattı dengeleme probleminin kısıtlarından biri olan öncelik diyagramı da Ek Açıklama-C’de verilmiştir.

Bu hatta iş istasyonlarının REBA risk değerleri 6 ile 55 arasında değişmektedir. Açıkça görülmektedir ki süre yönü ile dengeli olmakla birlikte işçilerin maruz kaldıkları fiziksel zorlanmalar açısından dengeli olmayan bir montaj hattı olduğu açıkça görülmektedir.

5.4. Ergonomik Risk Kısıtı İçermeyen BMHDP’nin GAMS ile Çözümlemesi

Bu bölümde, ele alınan montaj hattı dengeleme problemi için istasyon sayısını ve istasyon dengeleme gecikme zamanını en küçükleyen model sunulmuştur.

Öncelikle matematiksel modelin REBA kısıtı olmadan, sadece istasyon sayısını en küçükleyen model hali çözdürülmüştür.

Matematiksel modelde kullanılan parametre ve değişken tanımlamaları aşağıdaki gibidir:

i, h : İş elemanları indisi ($i= 1, \dots, |I|$)

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

S_k : k istasyonuna yapılan atama

$t(i)$: i . iş elemanına ait süre değeri (dk)

C : Çevrim Süresi (dk)

$$X_{ik} = \begin{cases} 1, & i. \text{ iş elemanı } k \text{ istasyonuna atandıysa} \\ 0, & \text{d. d.} \end{cases}$$

Problemde i ve k olmak üzere iki indis bulunmaktadır. Ergonomik risk kısıtı içermeyen BMHDP'indeki parametreler iş elemanlarının süreleri olup çevrim süresi sabit değer olarak tanımlanmıştır. Problemin kısıtları ve amaç fonksiyonu aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

Atama kısıtı; her görevin sadece bir istasyona atanmasını sağlayan kısıttır. Her bir iş elemanının bir istasyona atamasını sağlayan kısıttır. Denklem (5.2)'de gösterilmiştir.

$$\sum_{k=1}^{k_{max}} X_{i,k} = 1 \quad (5.2)$$

Çevrim süresi kısıtı; faaliyetlerin istasyonun çevrim süresini aşmamasını sağlamaktadır. Problemde çevrim süresi 14,31 dakikadır. Atamaların çevrim süresini geçmemesini sağlayan kısıt Denklem (5.3) ile gösterilmiştir.

$$\sum_{i=1}^{198} t_i * X_{ik} \leq 14,31 * S_k \quad (5.3)$$

Öncelik kısıtı; a iş elemanının, b iş elemanından önce gelmesi gerektiği durumlarda yazılır. Bu problemde öncüllük ilişkisi öncüllük matrisi ile tanımlanmıştır. Modelde

“alias(i,h)” komutu ile öncelik tanımlamaları yapılmıştır. Matematiksel model olarak yazımı Denklem (5.4)’de yer almaktadır.

$$\sum_{k=1}^{k_{max}} k * X_{ak} \leq \sum_{k=1}^{k_{max}} k * X_{bk} \quad (5.4)$$

İstasyon kısıtı, istasyonların sıralı olmasını sağlamaktadır (Denklem (5.5)).

$$S_k \geq S_{k+1} \quad (5.5)$$

Amaç minimum istasyon kullanarak iş elemanlarını istasyonlara atamak olduğu için amaç fonksiyonu Denklem (5.6)’da belirtildiği üzere tanımlanacaktır.

$$MinZ = \sum_{k=1}^{k_{max}} S_K \quad (5.6)$$

Montaj hattının çözümü için kullanılan paket programın kapasite kısıtı sebebiyle model iki aşamada çözümlenmiştir. Montaj hattına başka bir hattan gelen parçanın dahiliyetinin olduğu yer baz alınarak 12. istasyonun başlangıcı ile çözümlenmiştir.

5.5. Ergonomik Risk Kısıtı İçeren BMHDP’nin GAMS ile Çözümlenmesi

Geliştirilen modelde; çevrim süresi kısıtına, öncelik kısıtlarına ve atama kısıtlarına ek olarak ergonomik risk kısıtı da eklenmiştir. Mevcut sistemdeki atamalara istinaden istasyon başına düşmesi beklenen ortalama REBA skoru hesaplanmıştır. Hesaplanan ortalama REBA skoru modele R_max değeri olarak tanımlanmıştır. Bu sayede istasyon başına düşebilecek maksimum REBA kısıtı bu ortalama REBA skoru olacak şekilde

atamalar yapılmıştır. İstasyon atamalarına bu yeni kısıt da eklenerek istasyon başına düşen kümülatif ergonomik risk değerinin azaltılması hedeflenmiştir.

Modelde iş elemanlarının REBA skorları ve süre değerleri parametre olarak tanımlanmıştır. Eklenen yeni parametre ve değişken değerleri aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

R_i : i iş elemanının REBA skoru

R_{max} =matematiksel modele atanabilecek en büyük kümülatif REBA skoru

e_k = k istasyonuna atanan ergonomik risk skoru

R_{ort} : Ortalama REBA skoru, bakınız Denklem (5.7)'de gösterilmiştir.

m: Mevcut durumdaki istasyon sayısı

$$R_{ort} = \frac{\sum_{i=1}^{198} R_i}{m} = 30 \quad (5.7)$$

Tanımlanan REBA kısıtı; istasyonlara atanan iş elemanlarının R_{max} değerini aşmamasını sağlamaktadır. Problemden R_{max} değeri istasyon başına düşen ortalama REBA skorundan yola çıkarak 30 olarak tanımlanmıştır. Atamaların tanımlanan geçmemesini sağlayan kısıt Denklem (5.8) ile aşağıda gösterilmiştir.

$$\sum_{i=1}^{198} R_i * X_{ik} \leq 30 * e_k \quad (5.8)$$

Çalışmada, öncelikle ergonomik kısıt olmaksızın BMHDP ele alınmıştır. Model; GAMS programının iterasyon kısıtlamaları sebebi ile ilk olarak dış kaynak parçasının montaj hattını beslediği kısma kadar olan kısım için çalıştırılmıştır. Bu süreç 1-11 no'lu istasyonları kapsamaktadır. Sonrasında 12-24 no'lu istasyonlar için model çalıştırılmıştır.

6. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, bir işletmenin montaj hattının ergonomik kısıtlar altında dengelenmesi ele alınmıştır. Çalışmanın yapıldığı montaj hattı, çok fazla iş elemanından oluşmaktadır. Ergonomik risk kısıtının, istasyon sayısını en küçükleyen amaç içerisinde yer aldığında çözümün nasıl değiştiği ve hattın verimliliğinin nasıl etkilendiği analiz edilmiştir. Mevcut sistemin analizi, ergonomik risk kısıtı olmadan ve ergonomik risk kısıtı eklenerek yapılan analizler sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

6.1. Mevcut Montaj Hattının Ergonomik Risk Kısıtı İçermeyen BMHDP ile Karşılaştırılması

Mevcut durumda montaj hattında halihazırda kullanılmakta olan yerleşim ile ergonomik risk kısıtı içermeyen modelin karşılaştırılması yapılmıştır. Mevcut sistemin ilk çıktıları diğer tüm atamalar için karşılaştırmaya dahil edilerek oluşturulan modelin verimlilik düzeyi tespit edilmiştir.

Modelin temel varsayımları aşağıdaki gibidir:

- Bir iş elemanı sadece tek bir istasyona atanabilir.
- Bir iş elemanı her zaman öncüllük şartı olan iş elemanından sonra başlayabilir.
- Mola süreleri ve yemek süreleri hesaplamaya dahil edilmemiştir.
- İş elemanlarının süresi deterministiktir.

t_i = i. iş elemanının süresi (dk)

t_{bos} = İstasyon dengeleme gecikmesi

T_{ik} = k istasyonuna atanmış i iş elemanlarının toplam işlem süresi, Denklem (6.1.)'de verilmiştir.

$$T_{ik} = \sum_{i \in (x_{ik}=1)} t_i \quad (6.1)$$

BZ_K = İstasyon dengeleme gecikme zamanı, Denklem (6.2.)

$$BZ_K = C - \sum_{i \in (x_{ik}=1)} ti \quad (6.2)$$

Çizelge 6.1’de görüleceği üzere mevcut sistemde toplam istasyon dengeleme gecikme zamanı 42,64 dakika iken ergonomik risk kısıtı içermeyen model ile hat dengeleme yapıldığında bu süre 28,33 dakikaya düşürülmüştür. Mevcut sistemde maksimum istasyon REBA skoru 55 iken, ergonomik risk kısıtı içermeyen modelde bu skor 60 ‘dır. İstasyon sayısı 24’ten 23’e düşürülmüş, ancak maksimum istasyon REBA skoru ile minimum istasyon REBA skoru arasındaki fark artmıştır.

6.2. İstasyon Ergonomik Risk Kısıtı İçeren BMHDP ile Diğer Modellerin Çözümlerinin Karşılaştırılması

Ortalama ergonomik risk kısıtı içeren modelin çözümlenmesinde, mevcut durumdaki ortalama istasyon REBA skorunu aşmayacak şekilde istasyonlara atama yapılmıştır. Temel varsayımlar bu çözümler için aynı kalmıştır.

Ortalama ergonomik risk kısıtı eklenerek yapılan çözümde en yüksek istasyon süresi 14 dakika iken toplam istasyon dengeleme gecikmesi 114,19 dakika olarak hesaplanmıştır. İstasyon başına düşen ortalama REBA skoru 30 olarak modele eklendiğinde istasyonlar arası REBA skorlarının 6 ile 30 arasında dağıldığı gözlemlenmiştir. Çizelge 6.1.’de mevcut durum, ergonomik risk kısıtı içermeyen modelin çözümü ve ortalama REBA skorunun kısıt olarak atandığı 3 çözüm için karşılaştırma yapılmıştır.

Çizelge 6.1: Ortalama Ergonomik risk kısıtı içeren modelin diğer modeller ile kıyaslanması

	Mevcut Sistem	Ergonomik Risk Kısıtsız BMHDP	Ortalama Ergonomik Risk Kısıtlı BMHDP
Toplam İstasyon Dengeleme Gecikme Zamanı	42,64	28,33	114,19
En Yüksek İstasyon Zamanı	13,67	14,17	14
Maks İstasyon REBA Skoru	55	60	30
Min İstasyon REBA Skoru	6	6	6
İstasyon Sayısı	24	23	29

Ergonomik risk kısıtlı model ile yapılan çözümlene sonucunda ergonomik risk skorlarının istasyonlar özelinde daha dengeli dağıldığı gözlemlenmiştir. Modellere göre toplam REBA skorlarına göre, istasyon sayıları Çizelge 6.2.'deki gibi analiz edilmiştir. Mevcut durumda istasyonların toplam REBA skoru 30-39 aralığında daha fazla var iken; Ergonomik risk kısıtsız modelde 20-29 aralığına düşmüştür. Ancak ortalama ergonomik risk kısıtlı modelde ise istasyon sayısı 23'ten 29'a çıkmış olmakla birlikte risk skoru 30'dan çok istasyon olmayarak zorlanmanın daha az olduğu sonuçlar elde edilmiştir.

Çizelge 6.2: Modellere göre istasyon sayılarının REBA skoru aralığı

Birikimli REBA Skoru Aralığı	Mevcut Durum	Ergonomik Risk Kısıtsız BMHDP	Ortalama Ergonomik Risk Kısıtlı BMHDP
0-9	1	1	1
10-19	4	3	5
20-29	5	8	15
30-39	8	4	8
40-49	4	5	0
50-59	2	1	0
60 ve fazlası	0	1	0

Model için farklı çözüm yöntemleri de denenmiş olup duyarlılık analizleri yapılmıştır. Öncelikle ortalama ergonomik risk skorunun farklı tolerans payları ile çözümü araştırılmıştır. Süre boyunca ergonomik zorlanmaya maruz kalma durumu için ağırlıklı ergonomik risk kısıtı içeren model tanımlanarak çözümler sunulmuştur. Son olarak; modelin değişken üretim taleplerine nasıl yanıt verdiğini gözlemleyebilmek için çevrim süreleri belirli toleranslara istinaden güncellenerek alternatif modeller sunulmuştur.

İzleyen alt başlıklarda çözüm sonuçları detaylı olarak paylaşılacaktır.

6.2.1. Ortalama Ergonomik Risk Kısıtı İçeren Modelin Farklı Toleranslar ile Çözümlerinin Karşılaştırılması

Ortalama ergonomik risk kısıtı içeren model R_{ort} değeri ile kısıtlanarak çözümlendirilmiştir. Modelde R_{max} değeri R_{ort} değeri ile eşit tutulmuştur. Bu çözümleme ile istasyon sayısı 29'a ve istasyon dengeleme gecikme zamanının 114,19 dakika olduğu gözlemlenmiştir. Ergonomik risk kısıtının kabul edilebilir limitinin belirlenebilmesi için ortalama REBA skorunun %5 ve %10 tolerans payı ile modellenmesi yapılmıştır. %5 tolerans payı için R_{max} değeri 32 ; %10 tolerans payı için R_{max} değeri 33 olarak modele kısıt olarak eklenmiştir.

Sonuçlar incelendiğinde (Çizelge 6.3) %5 tolerans payı eklenerek R_{max} değeri 32 ile kısıtlanarak oluşturulan çözümde istasyon dengeleme gecikme zamanı 99,88 dakikaya düşmektedir. En yüksek istasyon zamanı ve istasyon zamanı ortalama ergonomik risk kısıtlı BMHDP ile aynı kalmış olup, istasyonlar arası ergonomik risk dağılımının 6 ile 28 arasında olduğu gözlemlenmiştir.

%10 tolerans payı ile oluşturulan modelde ise R_{max} değeri 33 olarak tanımlanarak modele eklenmiştir. Toplam istasyon dengeleme gecikme zamanının diğer çözümlere kıyasla

69,59 dakikaya ve istasyon sayısının 26'ya düştüğü görülmüştür. En yüksek istasyon zamanı 14,17 dakikadır. İstasyonlar arası risk dağılımı ise 6 ile 33 arasında değişmektedir.

Çizelge 6.3: Ortalama Ergonomik risk kısıtı içeren modelin farklı tolerans payları ile kıyaslanması

	Ortalama Ergonomik Risk Kısıtlı BMHDP	%5 Tolerans Payı Eklenerek Ergonomik Risk Kısıtlı BMDP	%10 Tolerans Payı Eklenerek Ergonomik Risk Kısıtlı BMDP
R_max	30	32	33
Toplam İstasyon Dengeleme Gecikme Zamanı	114,19	99,88	69,59
En Yüksek İstasyon Zamanı	14	14	14,17
Maks İstasyon REBA Skoru	30	32	33
Min İstasyon REBA Skoru	6	6	6
İstasyon Sayısı	29	28	26

6.2.2. Ağırlıklı Ergonomik Risk Kısıtı İçeren Modelin Oluşturulması ve Farklı Toleranslar ile Karşılaştırılması

Ergonomik risk değerlerinin sürekliliğinin analizi ve yapılan atama sonucunda etkisinin ölçülmesi için ağırlıklı ergonomik risk değerleri belirlenmiştir. İş elemanları özelinde ağırlıklı ergonomik risk değerinin nasıl bulunduğu Denklem 6.3.'de belirtilmiştir.

R_{ARS} = i iş elemanının ağırlıklı risk skoru

R_i = i iş elemanının REBA skoru

t_i = i. iş elemanının süresi (dk)

$$R_{ARS} = R_i * t_i \quad (6.3)$$

Ağırlıklı ergonomik risk kısıtı eklenerek modelin çözümlenmesinde öncelikle istasyon başına düşen ağırlıklı ergonomik risk değeri kısıt olarak eklenmiştir. Ancak model çözümsüz olarak bulunmuştur. Ortalama ağırlıklı ergonomik risk değeri 50 bulunmuştur. Ancak İş Elemanı.20.179 için ağırlıklı ergonomik risk değeri 75'tir. Dolayısıyla R_{ARS} değeri öncelikle %50 tolerans payı ile 75 sonrasında %100 tolerans payı alınarak ağırlıklı risk değeri 100 alınarak değerlendirilmiş ve Çizelge 6.4'teki sonuçlar elde edilmiştir.

Çizelge 6.4: Ağırlıklı ergonomik risk kısıtı içeren modelin oluşturulması ve farklı toleranslar ile karşılaştırılması

	Ortalama Ergonomik Risk Kısıtlı BMHDP	%50 Tolerans Payı Eklenerek Ağırlıklı Ergonomik Risk Kısıtlı BMHDP	%100 Tolerans Payı Eklenerek Ağırlıklı Ergonomik Risk Kısıtlı BMHDP
Toplam İstasyon Dengeleme Gecikme Zamanı	114,19	27,02	28,33
En Yüksek İstasyon Zamanı	14	14,17	14,17
Maks İstasyon REBA Skoru	30	52	60
Min İstasyon REBA Skoru	6	6	6
İstasyon Sayısı	29	23	23

6.3. Değişken Üretim Talebi Doğrultusunda Duyarlılık Analizi

Yapılan çalışmanın değişken üretim taleplerine nasıl yanıt verdiğini gözlemleyebilmek için duyarlılık analizi yapılmıştır. Üretim hattında rastlanması muhtemel kapasite artışları için montaj hattı dengelemesi yapılmıştır. Mevcut durumda günlük hedef üretim 65 adet olduğunda; 15,5 saatlik iki vardiya çalışma rutininde çevrim süresinin 14,31 dakika olduğunu 5.2.1. İşlem Sürelerinin Alınması bölümünde bildirmişti. Talebin %5 ve %10 arttığı durumlar için hedef üretim 68 adet ve 72 adet olarak hesaplanmıştır.

%5 kapasite artışı ile 68 adet hedef üretim için çevrim süresi 13,68 dakika hesaplanmıştır. Atama sonucunda toplam istasyon dengeleme gecikme süresi 28,19 dakika ve en yüksek istasyon süresi 13,67 dakika olarak sonuçlanmıştır. İstasyon sayısı 24 olarak kalmış olup istasyon başına düşen en yüksek REBA skoru 50 olarak bulunmuştur. İstasyon başına düşen en düşük REBA skoru 6'dır. İstasyonlar arası kümülatif risk değeri 6 ile 50 arasında değişmektedir.

%10 kapasite artışı ile 72 adet üretim hedefi için yapılan atama sonucunda toplam istasyon dengeleme gecikme süresi 48,04 dakika; en yüksek istasyon süresi ise 48,04 dakika olarak belirlenmiştir. İstasyon başına düşen maksimum REBA skoru 52 iken minimum istasyon REBA skoru 4 olarak belirlenmiştir. Diğer tüm atamalarda 6 olarak belirlenen minimum istasyon REBA skoru bu atama özelinde 4 olarak belirlenmiştir. İş elemanı.24.195 iş elemanının işlem süresi 12 dakika olduğu için ardılı olan İş elemanı.24.196 iş elemanı 12,92 dakika çevrim süresi kısıtını aşmamak için yeni istasyon oluşumuna sebebiyet vermiştir.

Üretim hattının, kapasite dalgalanmalarına verdiği tepkilerin duyarlılık analizi Çizelge 6.5.'de özetlenmiştir. Hedef üretim adedi arttıkça çevrim süresi azaldığı için %10'luk artış durumunda istasyon sayısı 27'e yükselmiştir. İstasyonlar arası ergonomik risk dağılımları 68 adetlik hedef üretimde 6 ile 50 arasında değişirken, 72 adet hedef üretim için 4 ile 52 arasında değiştiği gözlemlenmiştir.

Çizelge 6.5: Hedef üretim adedi değişenliğinde üretim hattının duyarlılık analizi karşılaştırması

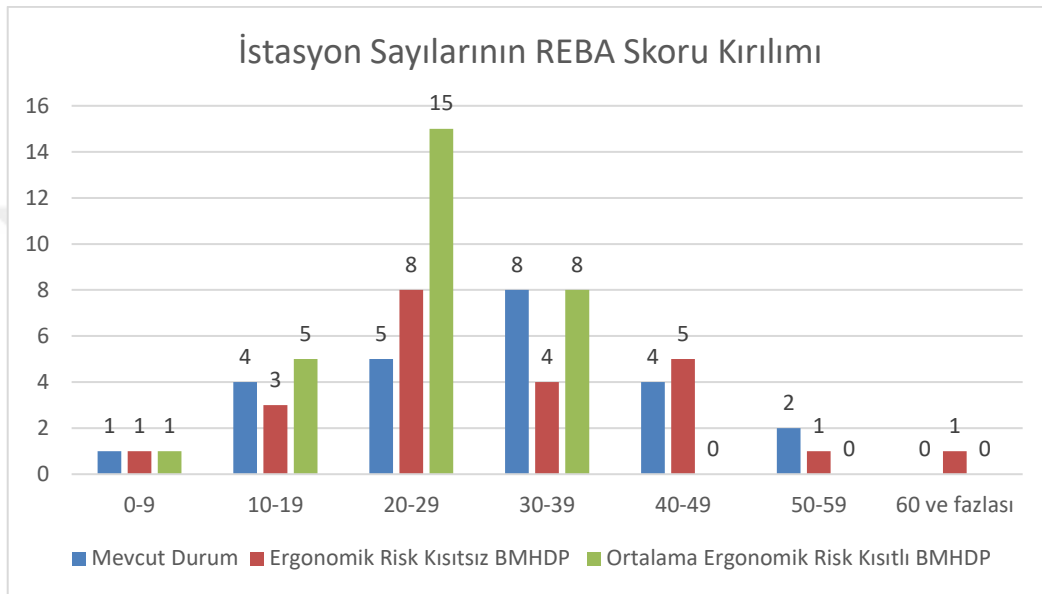
	Mevcut durum 65 adet için çözümleme	%5 kapasite artışı ile 68 adet hedef üretim çözümlemesi	%10 kapasite artışı ile 72 adet hedef üretim çözümlemesi
Çevrim Süresi (dk)	14,31	13,68	12,92
Toplam İstasyon Denegeleme Gecikme Zamanı (dk)	42,64	28,19	48,04
En Yüksek İstasyon Zamanı (dk)	13,67	13,67	12,83
Maks İstasyon REBA Skoru	55	50	52
Min İstasyon REBA Skoru	6	6	4
İstasyon Sayısı	24	24	27

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, MHDP, öncelik kısıtları ve çevrim süresi kısıtlamalarına ek olarak ergonomik risk düzeyini dikkate alan yeni bir model geliştirilmesi ele alınmıştır. Önerilen modelde iki farklı çözüm yöntemi geliştirilmiştir. İlk olarak ergonomik risk kısıtı olmaksızın çevrim süresi ve öncelik kısıtları için model çözümlenmiştir. Ardından bu kısıtlara ek olarak ortalama REBA skoru da istasyonlara atama yapılırken kısıt olarak tanımlanmıştır. Geliştirilen model bir firmada motor montaj hattında uygulanmıştır. Montaj hattında görev süreleri ölçülmüş, öncelikler oluşturulmuş ve REBA yöntemi kullanılarak ergonomik risk skorları hesaplanmıştır. Problem GAMS paket programı ile çözülmüş ve sonuçlar her üç durum için de birbirleri ile kıyaslanmıştır. Mevcut durumda toplam istasyon dengeleme gecikme zamanı 42,64 dakika iken bu süre ergonomik risk kısıtsız BMHDP’nde 28,33 dakikaya düşürülerek montaj hattının verimliliğini %67 arttırmıştır. İstasyon sayısı mevcut durumda 24 iken ergonomik risk kısıtsız BMHDP için yapılan çözümde 23’e düşürülmüştür. En yüksek istasyon zamanı mevcut durum için 13,67 dakika iken ergonomik risk kısıtsız model ile çözümde 14,17 dakika olacak şekilde atama yapılmıştır. Ancak mevcut durumda maksimum istasyon REBA skoru 55 iken yapılan atama sonucunda bu skor 60’a yükselmiştir. Minimum istasyon REBA skoru tüm modellerde 6 olarak bulunmuştur.

Ergonomik risk kısıtlı BMHDP çözümü sonrasında toplam istasyon dengeleme gecikme zamanı 114,19 dakikaya yükselmiştir. İstasyon sayısı ise 29’a yükselmiştir. Ancak maksimum istasyon REBA skoru 30 olarak sabitlenmiştir. Diğer durumlarda maksimum istasyon REBA skoru ile minimum istasyon REBA skoru arasındaki farklar sırasıyla; mevcut durum için 49 ve ergonomik risk kısıtsız BMHDP için önerilen çözümde 54 iken ergonomik risk kısıtlı BMHDP için sunulan çözüm önerisinde 24’tür. Ergonomik risk kısıtlı BMHDP çözümü, istasyonlardaki çalışanlar arasındaki zorlanma düzeyi en düşük istasyon REBA skorları ve en yüksek istasyon REBA skorları arasındaki farka bağlı olarak değerlendirildiğinde; ergonomik risk kısıtı içeren modelin mevcut duruma göre %51, ergonomik risk kısıtı içermeyen modele göre ise %56 daha dengeli olduğu saptanmıştır.

Her üç durum için istasyon sayılarının REBA skorlarına bağlı kırılımı Çizelge 7.1.'de gösterilmiştir. Ortalama ergonomik risk kısıtlı modelin istasyon atamalarının 20-29 arasında yoğunlaştığı ve bu aralıkta 15 istasyon olduğu saptanmıştır. 30-39 aralığında 8 istasyon bulunmaktadır ancak zaten bu 8 istasyonun ergonomik risk değeri 30'dur. Yapılan atama sonucu oluşan dengeli istasyon ataması Şekil 7.1.'deki gibi gözlemlenmektedir.



Çizelge 7.1. Modellere göre istasyon sayılarının REBA skoru kırılımı

Bu çalışmanın uygulanmasında karşılaştığımız problem, kullanılması hedeflenen GAMS paket programının modelin büyüklüğü karşısında yetersiz kalması olmuştur. Karmaşık MHDP için başka çözümler değerlendirilebilir. Python içerisinde bulunan çözümler kullanılarak büyük boyutlardaki montaj hatları için modelleme yapılabilir.

Gelecek araştırmalar için tabu arama, genetik algoritma, karınca kolonisi, tavlama benzetimi, gibi yöntemlerin kullanımı ile çözüm önerileri sunulabilir. İlk aşama olarak klasik sezgisel yöntemlerden Helgeson-Birnie metodu, En Büyük Aday Yöntemi veya COMSOAL algoritması Python ile kodlanarak başlangıç çözüm oluşturulabilir. Herhangi bir çözüm yöntemi seçildikten sonra üretilen sonuçlardan genetik algoritmalar için başlangıç popülasyon çözümü oluşturularak sonuçlar elde edilip karşılaştırma yapılabilir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Agrawal, S., Tiwari, M. 2008, A collaborative ant colony algorithm to stochastic mixed-model U-shaped disassembly line balancing and sequencing problem, *International Journal of Production Research* 46(6):1405-1429.
- Akay, D., Dağdeviren, M., Kurt, M. 2003, Çalışma duruşlarının ergonomik analizi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 18(3), 73-84.
- Aksüt, G., Eren, T., Tüfekçi, M. 2020, Ergonomik Risk Faktörlerinin Sınıflandırılması: Bir Literatür Taraması, *Ergonomi Dergisi*, 3(3), 169 – 192.
- Akyol, S., ve Baykasoğlu, A., 2019, ErgoALWABP: a multiple-rule based constructive randomized search algorithm for solving assembly line worker assignment and balancing problem under ergonomic risk factors, *J Intell Manuf* (2019) 30:291–302
- Barathwaj, N., Raja, P., Gokulraj, S., 2015, Central South University Press and Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Optimization of assembly line balancing using genetic algorithm, 22, 3957-3969.
- Bautista, J., Rocío, A., 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.
- Battini, D., Delorme, X., Dolgui, A., Sgarbossa, F., 2015, IFAC Conference Paper Archive, Assembly line balancing with ergonomics paradigms: two alternative methods, 48-3, 586-591.
- Battini, D., Delorme, X., 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.
- Bilir, N., 2011, Meslek Hastalıkları Tanı, Tedavi ve Korunma İlkeleri, *Hacettepe Tıp Dergisi*, 42(4), 142-157.
- Chica, M., Cordon, Oscar., Damas, S., Bautista, J., 2012, Multiobjective memetic algorithms for time and space assembly line balancing, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 25, 254-273.
- Chiasson, M.E., Imbeau, D., Major, J., Aubry, K., Delisle A. (2012). Comparing the Results of Eight Methods Used to Evaluate Risk Factors Associated With Musculoskeletal Disorders, *International Journal of Industrial Ergonomics*, 42, 478-488
- Choi, G., 2009, A goal programming mixed-model line balancing for processing time and physical workload, *Computers & Industrial Engineering*, 57:1, 395-400.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Gönen, D., Oral A., Ocaktan, B., Karaoğlan, D., Cicibaş, A., Bir transformatör işletmesinde montaj ünitesinin ergonomik analizi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 21 (5), 1067-1080, 2017.
- Gönen, D., Karaoğlan, D., Ocaktan, B., Oral, A., Atıcı, H., Kaya, B., Kas iskelet sistemi rahatsızlıklarının analizinde yeni bir risk değerlendirme yaklaşımı, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 33:2 (2018) 423-438
- Hazır, Ö., Dolgui, A., 2011, A Decomposition based Exact Solution Algorithm for Balancing U-Type Assembly Lines, Conference: 21st International Conference on Production Research
- Hignett, S.; Mcatamney, L., 2000, Rapid entire body assessment (REBA). Appl. Ergon, 31, 201–205.
- İçağasıoğlu, A., Yumuşakhuyulu, Y., Ketenci, A., Toraman, N.F., Maymak Karataş G., Kuru, Ö., Kirazlı, Y., Çapacı, K., Eriman, E. & Haliloğlu, S. (2015). Burden of Chronic Low Back Pain in the Turkish Population. Turkish Journal of Physical Medicine and Rehabilitation, 61(1), 58-64.
- Kahya, E., 2017, İş Etüdü, ESOĞÜ Yayın No 253, s.117.
- Kahya, E., Özoğul, B., Çimen, B., 2017, Bir Metal Sanayi İşletmesinde Ergonomik Risk Analizi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 6, 159-175.
- Kahya, E., Gürleyen, E., 2018, Kombi Montaj Hattında REBA Yöntemi ile Ergonomik Risk Analizi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 58-66.
- Kara, Y., Atasagun, Y., Gökçen, H., Hezer, S. & 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.
- Koçanalı, F., 2009, Montaj Hattı Dengelemeye Yönelik Bir Simülasyon Modeli Önerisi, Kocaeli Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi.
- Mert, E. A. (2014). Ergonomik Risk Değerlendirme yöntemlerinin Karşılaştırılması ve Bir Çanta İmalat Atölyesinde Uygulanması. İş Sağlığı ve Güvenliği Uzmanlık Tezi, T.C. Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı İş Sağlığı ve Güvenliği Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Mura, M., Dini, G., 2017, A multi-objective software tool for manual assembly line balancing using a genetic algorithm, CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 19, 72-83.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Mutlu, Ö., Özgörmüş, E., 2012, A fuzzy assembly line balancing problem with physical workload constraints, *International Journal of Production Research*, 50:18, 5281-5291 GAMS kullanılmış
- Mokhtarzadeh, M., Rabbani, M., Manavizadeh, N., A novel two-stage framework for reducing ergonomic risks of a mixed-model parallel U-shaped assembly-line, *Applied Mathematical Modelling*, 2021, 93, 597-617.
- Otto, A. ve Scholl, A., 2011, Incorporating Ergonomic Risks into Assembly Line Balancing, *European Journal of Operational Research* 212, 277-286.
- Otto, A., Battaia, O., 2017, Reducing physical ergonomic risks at assembly lines by line balancing and job rotation: A survey, *Computers & Industrial Engineering*, 111, 467-480.
- Özdemir, R., Sarıgöl, I., AlMutairi, S., AlMeea, S., Murad, A., Naqi, A., AlNasser, N., 2021, Fuzzy multi-objective model for assembly line balancing with ergonomic risks consideration, *International Journal of Production Economics*, 239.
- Özel, E., Çetik, O. (2010). Mesleki Görevlerin Ergonomik Analizinde Kullanılan Araçlar ve Bir Uygulama Örneği. *Dumlupınar Üni. Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 22, 41-56.
- Roy, D., Khan, D., 2011, Designing of an Assembly Line based on Reliability Approach, *An International Journal of Optimization and Control Theories & Applications (IJOCTA)*” June 2011, Vol.1, No.1, pp.45-52.
- 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, 740-754.
- Takcı, E., 2013, Bir İmalat İşletmesinde Simülasyon Yardımıyla Süreç İyileştirme Uygulaması: Kayseri Gürkar Tekstil Örneği, Yüksek Lisans Tezi.
- Tiacci, L., 2018, The problem of assigning rest times to reduce physical risk at assembly lines, *IFAC Papers Online*, 51-11, 692-697.
- Tiacci, L., Mimmi, M., 2018. "Integrating ergonomic risks evaluation through OCRA index and balancing/sequencing decisions for mixed model stochastic asynchronous assembly lines," *Omega*, Elsevier, vol. 78, 112-138.
- Yetkin, B., Kahya, E., 2022, A bi-objective ergonomic assembly line balancing model with conic scalarization method, *Human Factors and Ergonomics In Manufacturing*, 32, 6, 494-507.

- Zacharia, P., Nearchau, A., 2013, A meta-heuristic algorithm for the fuzzy assembly line balancing type-E problem, *Computers & Operations Research*, 40, 3033-3044.
- Zhang, Z., Tang, Q., Chica, M., 2020, Multi-manned assembly line balancing with time and space constraints: A MILP model and memetic ant colony system, *Computers & Industrial Engineering*,
- Zhang, Z., Tang, Q., Ruiz, R., Zhang, L., 2020, Ergonomic risk and cycle time minimization for the U-shaped worker assignment assembly line balancing problem: A multi-objective approach, *Computers & Operations Research*, 118.



EK AÇIKLAMALAR

Ek Açıklama-A: Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Kurulu

Ek Açıklama-B: REBA Risk Değerlendirme Formu

Ek Açıklama-C: Öncelik Diyagramı

Ek Açıklama-D: İş Elemanlarının Süre ve REBA Skoru Değerleri

Ek Açıklama-E: Mevcut Durum İstasyon Atama ve REBA skorları

Ek Açıklama-F: Ergonomik Risk Kısıtsız BMHDP Çözüm Sonucu İstasyon Atama ve REBA Skorları

Ek Açıklama-G: Ergonomik Risk Kısıtlı BMHDP Çözüm Sonucu İstasyon Atama ve REBA Skorları

Ek Açıklama-H: Birinci İstasyon Zaman Etüdü Örneği

Ek Açıklama-A: Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Kurulu



T.C.
ESKİŞEHİR OSMANGAZI ÜNİVERSİTESİ
Fen ve Mühendislik Bilimleri İnsan Araştırmaları Etik Kurulu

Sayı : E-53893652-050.01.04-400429
Konu : Etik Kurul Kararları.

31.10.2022

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

Sorumlu Araştırmacı olduğunuz "*Çok Amaçlı Programlama Yöntemleri İle Ergonomik Montaj Hattı Dengeleme*" başlıklı çalışma hakkında alınan karar ekte sunulmuştur.
Bilgilerinizi ve gereğini saygı ile rica ederim.

Prof. Dr. Neşe ÖZTÜRK
Kurul Başkanı

Ek: 1. Etik Kurul Kararları.

Bu belge, güvenli elektronik imza ile onaylanmıştır.

Diğer Detaylı Bilgi İçin: <http://www.ogu.edu.tr>

Diğer Detaylı Bilgi İçin: <https://www.bilgi.koc.gov.tr/izlenme-efsa>

Adres : Meşelik Kampüsü 26040 Osmangazi
Telefon : 0222 250 754 Faks: 0222 2290 408
İnternet Adresi : www.ogu.edu.tr
KEP adresi : etik.osmangazi@ogu.edu.tr

Bilgi İsmi : Sibel AK
Telefon : 0222 250 750-3074
E-posta : sibelak@ogu.edu.tr



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

T.C.
ESKİŞEHİR OSMANGAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN VE MÜHENDİSLİK BİLİMLERİ
İNSAN ARAŞTIRMALARI ETİK KURULU
ESKİŞEHİR

Toplantı Tarihi : 14.10.2022

Toplantı No : 2022-16

GÜNDEM :

1. Başvuru Sahibi : Prof.Dr.Emin KAHYA (Sena GÜLBANDILAR CANBAZOĞLU ile birlikte). **Konu :** "Çok Amaçlı Programlama Yöntemleri İle Ergonomik Montaj Hattı Dengeleme" konulu araştırmasının görüşülmesi.

KARAR :

1. Prof.Dr.Emin KAHYA'nın (Sena GÜLBANDILAR CANBAZOĞLU ile birlikte) "Çok Amaçlı Programlama Yöntemleri İle Ergonomik Montaj Hattı Dengeleme" konulu Yüksek Lisans tezi için yaptığı başvurusu 14.10.2022 tarihinde saat 14:00'de ESUZEM üzerinden gerçekleştirilen toplantı ile değerlendirilmiştir. Araştırmalarında kullanacakları ölçme aracının/araçlarının; fikri, hukuki ve telif hakları bakımından metod ve ölçeğine ilişkin sorumluluk başvuru sahibine/sahiplerine ait olmak üzere veri toplamak için gerekli yerlerden yasal izinleri almak şartıyla Üniversitemiz İnsan Araştırmaları Etik Kurulu yönergesine uygunluğuna oy birliği ile karar verilmiştir.

(İmza)
Prof.Dr.Neşe ÖZTÜRK
Başkan

(İmza)
Prof. Dr. Necmettin CANER
Üye

(İmza)
Prof. Dr. Volkan KARABACAK
Üye

(Raporlu)
Prof. Dr. Hatice DAĞHAN
(Raporlu)

(İmza)
Prof. Dr. Mesut TEKKALMAZ
Üye

(İmza)
Prof. Dr. Güneş KÜRKCÜOĞLU
Üye

(İmza)
Prof. Dr. Arzu ALTIN YAVUZ
Üye

Ek Açıklama-B: REBA Risk Değerlendirme Formu

REBA ÇALIŞAN DEĞERLENDİRME FORMU

Bu çalışma, Motor Montaj Hattında yapılacaktır.

İstasyon Adı	:
Faaliyet Adı	:

A. Boyun , Gövde ve Bacak Analizleri**Boyun Duruş Puanlaması**

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

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		

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

Yük / Kuvvet değerleri

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

A skoru :

B. Kol ve Bilek Analizleri Üst Kol Duruş Puanlaması

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

Alt Kol Duruş puanlaması

Hareket	Skor	
60° - 100° Fleksiyon	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		

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

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

Kavrama Değerleri

Derece	Açıklama	Skor
İyi	İyi bir tutma kolu ve orta şiddette kavrama gücü	0
Uygun	El tutuşu uygun fakat ideal değil veya vücudun başka bir bölgesi ile kavrama uygun	1
Kötü	El tutuşu uygun olmamasına rağmen mümkün	2
Uygun değil	Zor ve güvenli olmayan tutuş, tutma kolu yok Vücudun başka bir bölgesi ile tutuş uygun değil	3

B skoru :

C. A ve B skorları kullanılarak C değeri

C tablosu

		B SKORU											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
A SKORU	1	1	1	1	2	3	3	4	5	6	7	7	7
	2	1	2	2	3	4	4	5	6	6	7	7	8
	3	2	3	3	3	4	5	6	7	7	8	8	8
	4	3	4	4	4	5	6	7	8	8	9	9	9
	5	4	4	4	5	6	7	8	8	9	9	9	9
	6	6	6	6	7	8	8	9	9	10	10	10	10
	7	7	7	7	8	9	9	9	10	10	11	11	11
	8	8	8	8	9	10	10	10	10	10	11	11	11
	9	9	9	9	10	10	10	11	11	11	12	12	12
	10	10	10	10	11	11	11	11	12	12	12	12	12
	11	11	11	11	11	12	12	12	12	12	12	12	12
	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12

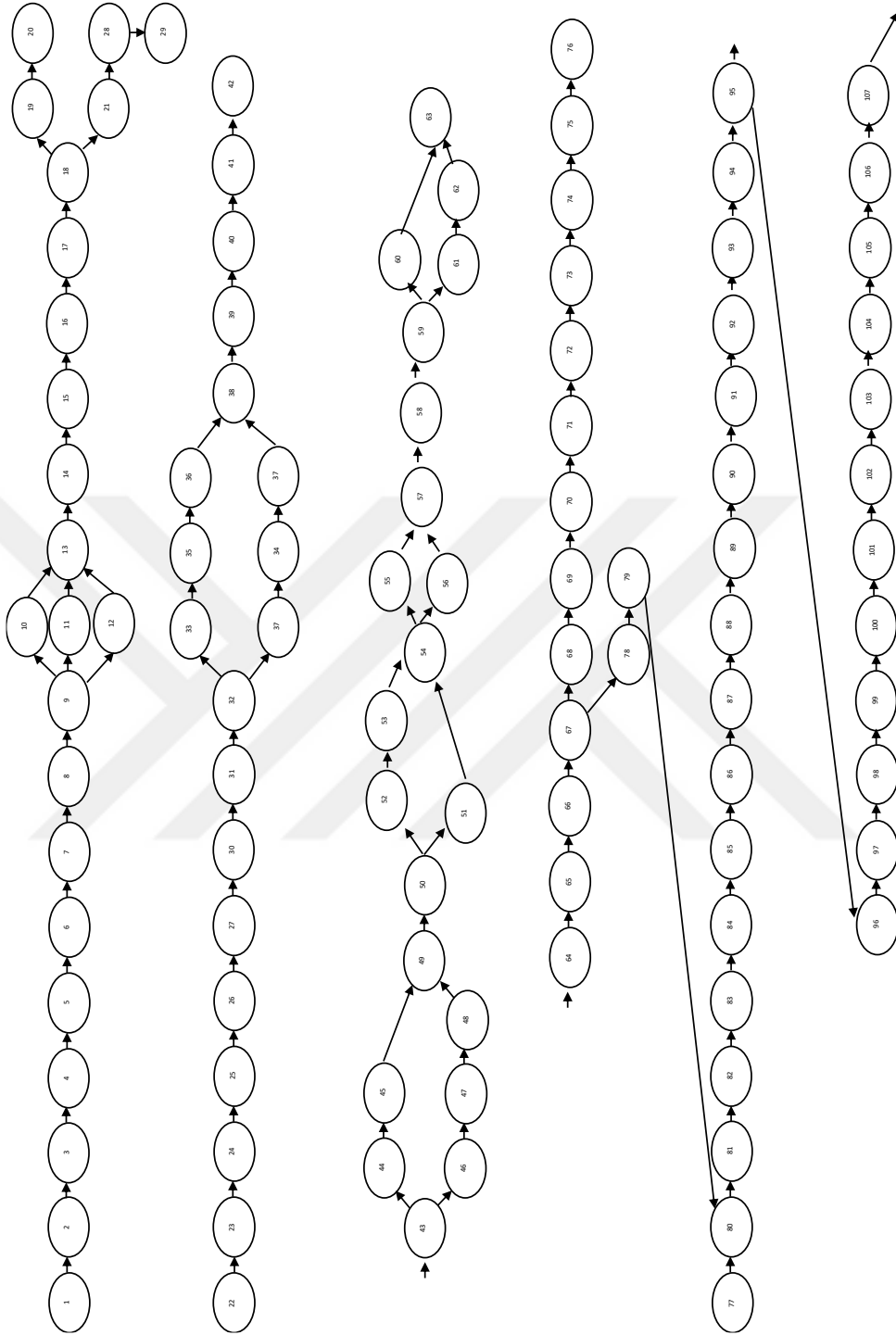
C skoru :

Aktivite değeri

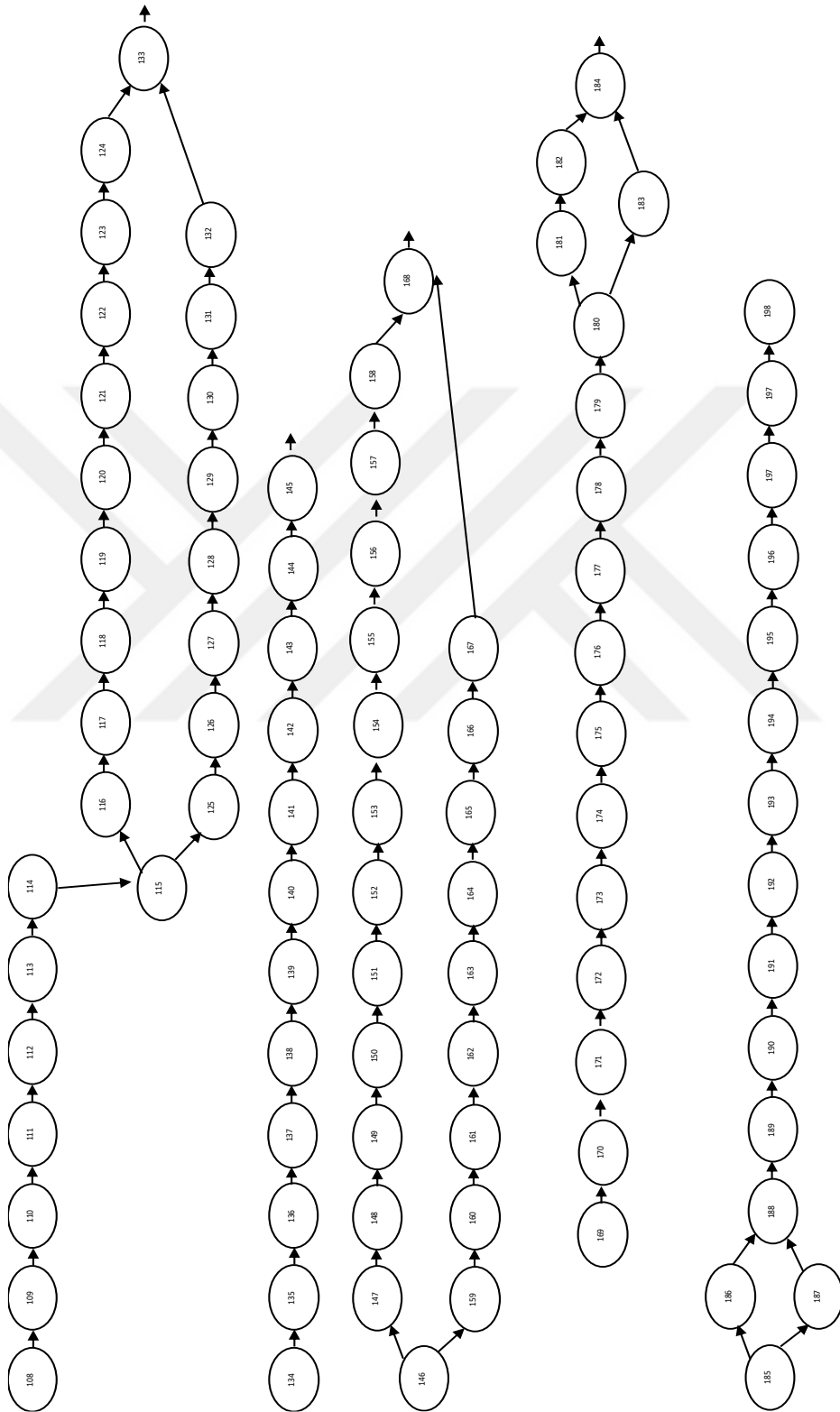
Aktivite	Skor
Bir veya daha fazla vücut bölgesi sabit (1 dakikadan uzun süre tutma)	+1
Kısa aralıklarla tekrar eden işler (1 dakikada 4 kereden fazla tekrar eden iş – yürüme hariç)	+1
Yapılan iş duruşta hızlı ve büyük değişikliğe neden oluyorsa veya sabit olmayan zeminde çalışılıyorsa	+1

REBA SKORU :

Ek Açıklama-C: Öncelik Diyagramı



Ek Açıklama-C: Öncelik Diyagramı (devam)



Ek açıklama-D: İş Elemanlarının Süre ve REBA Skoru Değerleri

İstasyon NO	İş Elemanı	Süre Değeri (Dk)	Boyun	Gövde	Bacak	Taşınan Yük	A Skoru	Üst Kol	Alt Kol	Bilek	Tuma Faktörü	B Skoru	C Skoru	Aktivite Yoğunluğu	REBA Skoru
1	İş Elemanı 1.1	1,00	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	2
	İş Elemanı 1.2	0,50	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	2
	İş Elemanı 1.3	0,50	1	1	1	1	2	1	1	2	0	2	1	1	2
	İş Elemanı 1.4	2,00	1	1	1	1	2	1	1	2	0	2	1	1	2
	İş Elemanı 1.5	5,00	2	4	3	2	9	2	2	1	0	2	9	0	9
	İş Elemanı 1.6	2,00	2	3	1	0	4	1	1	1	0	1	3	1	4
	İş Elemanı 1.7	0,50	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	2
	İş Elemanı 1.8	0,50	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	2
	İş Elemanı 1.9	1,50	2	1	1	0	1	1	2	2	0	2	1	1	2
2	İş Elemanı 2.1	2,00	3	5	1	0	7	1	2	1	0	1	7	1	8
	İş Elemanı 2.2	3,00	3	5	1	0	7	1	2	1	0	1	7	1	8
	İş Elemanı 2.3	0,50	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	2
	İş Elemanı 2.4	1,33	1	4	1	0	3	2	1	1	0	1	2	1	3
	İş Elemanı 2.5	1,33	1	4	1	0	3	2	1	1	0	1	2	1	3
	İş Elemanı 2.6	0,33	1	4	1	0	3	2	1	1	0	1	2	1	3
	İş Elemanı 2.7	2,00	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	2
	İş Elemanı 2.8	3,00	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	2
	3	İş Elemanı 3.1	1,33	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1
İş Elemanı 3.2		0,67	2	2	1	0	3	3	2	1	0	4	3	1	4
İş Elemanı 3.3		0,33	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	2
İş Elemanı 3.4		2,00	2	4	1	0	5	3	1	1	0	3	4	1	5
İş Elemanı 3.5		0,33	2	3	1	0	4	1	1	1	0	1	3	1	4
İş Elemanı 3.6		0,75	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	2
İş Elemanı 3.7		0,67	1	1	1	0	1	3	2	1	0	4	2	1	3
İş Elemanı 3.8		1,17	2	1	1	0	1	2	1	1	0	1	1	1	2
İş Elemanı 3.9		3,67	2	1	1	0	1	2	1	1	0	1	1	1	2
İş Elemanı 3.10		0,05	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	2
İş Elemanı 3.11		1,17	2	1	1	0	1	2	1	1	0	1	1	1	2
İş Elemanı 3.12		1,00	2	1	1	0	1	2	1	1	0	1	1	1	2
4	İş Elemanı 4.1	2,00	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	2
	İş Elemanı 4.2	0,83	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	2
	İş Elemanı 4.3	1,67	3	2	1	0	4	4	2	1	0	5	5	1	6
	İş Elemanı 4.4	0,50	3	2	1	0	4	4	1	1	0	4	4	1	5
	İş Elemanı 4.5	0,83	1	1	1	0	1	3	2	1	0	4	2	1	3
	İş Elemanı 4.6	1,00	3	2	1	0	4	4	1	1	0	4	4	1	5
	İş Elemanı 4.7	2,00	3	2	1	0	4	4	1	1	0	4	4	1	5
	İş Elemanı 4.8	1,17	2	4	1	0	5	1	2	1	0	1	4	1	5
	İş Elemanı 4.9	1,08	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	2
	İş Elemanı 4.10	2,00	2	3	1	0	4	5	2	2	0	8	8	1	9
	İş Elemanı 4.11	0,50	2	3	1	0	4	4	2	1	0	5	5	1	6
5	İş Elemanı 5.1	0,33	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	2
	İş Elemanı 5.2	0,33	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	2
	İş Elemanı 5.3	0,67	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	2
	İş Elemanı 5.4	0,33	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	2
	İş Elemanı 5.5	0,33	2	4	1	1	6	3	1	1	0	3	6	0	6
	İş Elemanı 5.6	0,67	2	3	1	0	2	2	2	1	0	2	2	1	3
	İş Elemanı 5.7	3,00	2	1	1	0	1	3	1	1	0	3	1	1	2
	İş Elemanı 5.8	5,33	2	3	1	0	4	1	1	1	0	1	3	1	4
	İş Elemanı 5.9	0,83	2	1	1	0	1	2	1	1	0	1	1	1	2
	İş Elemanı 5.10	1,00	2	4	1	0	5	1	2	2	0	2	4	1	5
6	İş Elemanı 6.1	0,67	1	1	2	0	1	4	2	1	0	5	3	1	4
	İş Elemanı 6.2	8,33	2	3	1	0	4	4	1	1	0	4	4	2	6
	İş Elemanı 6.3	0,50	2	3	1	0	4	4	1	1	0	4	4	1	5
	İş Elemanı 6.4	2,00	3	4	1	0	6	3	2	1	0	4	7	1	8
	İş Elemanı 6.5	0,50	1	1	2	0	1	4	2	1	0	5	3	1	4
	İş Elemanı 6.6	0,33	1	1	2	0	1	4	2	1	0	5	3	1	4
7	İş Elemanı 7.1	1,67	3	4	2	0	7	5	2	1	0	7	9	0	9
	İş Elemanı 7.2	0,67	2	2	1	0	3	1	1	1	0	1	2	0	2
	İş Elemanı 7.3	1,67	2	2	1	0	3	2	1	1	0	1	2	1	3
	İş Elemanı 7.4	1,50	3	3	1	0	5	3	1	1	0	3	4	1	5
	İş Elemanı 7.5	1,67	1	1	1	0	1	2	1	1	0	1	1	1	2
	İş Elemanı 7.6	0,50	2	1	1	0	1	3	1	2	0	4	2	1	3
	İş Elemanı 7.7	1,67	2	3	3	0	6	4	2	1	0	5	8	1	9
	İş Elemanı 7.8	2,00	2	3	3	0	6	4	2	1	0	5	8	1	9
	İş Elemanı 7.9	0,83	2	3	3	0	6	4	2	1	0	5	8	1	9
	İş Elemanı 7.10	1,00	1	1	3	0	3	2	2	1	0	2	3	1	4

Ek açıklama-D: İş Elemanlarının Süre ve REBA Skoru Değerleri (devam)

İstasyon NO	İş Elemanı	Süre Değeri	Boyun	Gövde	Bacak	Taşınan Yük	A Skoru	Üst Kol	Alt Kol	Bilek	Tuma Faktörü	B Skoru	C Skoru	Aktivite Yoğunluğu	REBA Skoru
8	İş Elemanı 8.1	0,33	2	1	1	0	1	2	1	1	0	1	1	0	1
	İş Elemanı 8.2	2,00	1	1	1	1	2	2	2	1	0	2	2	1	3
	İş Elemanı 8.3	0,67	2	3	3	1	7	2	2	2	1	4	8	1	9
	İş Elemanı 8.4	0,67	2	4	1	0	5	1	1	1	0	1	4	1	5
	İş Elemanı 8.5	1,33	2	4	1	0	5	1	1	1	0	1	4	1	5
	İş Elemanı 8.6	1,00	2	4	1	0	5	1	1	1	0	1	4	1	5
	İş Elemanı 8.7	1,00	1	1	1	0	1	2	2	1	0	2	1	1	2
	İş Elemanı 8.8	1,00	2	4	1	0	5	3	1	1	0	3	4	1	5
	İş Elemanı 8.9	0,67	2	1	1	0	1	2	1	1	0	1	1	0	1
	İş Elemanı 8.10	1,00	2	3	1	0	4	1	1	1	0	1	3	1	4
	İş Elemanı 8.11	0,50	1	2	1	0	2	1	1	1	0	1	1	0	1
	İş Elemanı 8.12	1,67	3	3	1	0	5	4	2	1	0	5	6	1	7
	İş Elemanı 8.13	1,83	2	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	0	1
9	İş Elemanı 9.1	1,67	2	4	1	0	5	1	1	1	0	1	4	1	5
	İş Elemanı 9.2	1,42	2	2	2	0	4	2	1	1	0	1	3	1	4
	İş Elemanı 9.3	0,50	2	1	1	0	1	4	2	1	0	5	3	1	4
	İş Elemanı 9.4	0,33	2	3	1	0	3	4	2	1	0	5	4	1	5
	İş Elemanı 9.5	4,33	2	2	1	0	3	3	1	1	0	3	3	1	4
	İş Elemanı 9.6	5,00	1	2	2	0	3	3	2	1	0	4	3	1	4
10	İş Elemanı 10.1	0,33	2	2	3	0	5	2	2	2	0	3	4	1	5
	İş Elemanı 10.2	2,00	2	2	3	0	5	2	2	2	0	3	4	1	5
	İş Elemanı 10.3	5,33	2	1	1	0	1	2	1	1	0	1	1	0	1
	İş Elemanı 10.4	0,67	2	1	1	0	1	2	1	1	0	1	1	0	1
	İş Elemanı 10.5	3,33	1	1	1	0	1	1	2	3	0	3	1	1	2
	İş Elemanı 10.6	0,50	1	1	1	0	1	4	2	2	0	6	3	0	3
	İş Elemanı 10.7	0,67	1	1	1	0	1	4	2	2	0	6	3	0	3
11	İş Elemanı 11.1	1,67	2	3	1	0	4	4	1	1	0	4	4	0	4
	İş Elemanı 11.2	2,50	2	2	2	0	4	2	1	2	0	2	4	0	4
	İş Elemanı 11.3	2,33	2	2	1	1	4	2	2	2	0	3	4	0	4
	İş Elemanı 11.4	0,67	2	1	1	0	1	5	2	1	0	7	4	0	4
	İş Elemanı 11.5	0,83	2	1	1	0	1	5	2	1	0	7	4	0	4
	İş Elemanı 11.6	1,17	2	1	1	0	1	2	2	2	0	3	1	0	1
	İş Elemanı 11.7	2,00	2	3	1	0	4	3	1	2	0	4	4	0	4
	İş Elemanı 11.8	0,67	2	1	1	0	1	5	2	1	0	7	4	0	4
12	İş Elemanı 12.1	0,83	2	1	1	0	1	1	1	2	0	2	1	0	1
	İş Elemanı 12.2	0,33	2	1	1	0	1	3	1	3	0	5	3	0	3
	İş Elemanı 12.3	0,83	2	1	1	0	1	3	1	3	0	5	3	0	3
	İş Elemanı 12.4	0,83	2	1	1	0	1	1	1	2	0	2	1	0	1
	İş Elemanı 12.5	1,00	2	1	1	0	1	1	1	2	0	2	1	0	1
	İş Elemanı 12.6	0,50	1	1	1	0	1	1	2	3	0	3	1	1	2
	İş Elemanı 12.7	4,67	2	1	1	0	1	1	2	2	0	2	1	0	1
	İş Elemanı 12.8	0,83	2	1	3	0	4	3	2	2	1	6	6	0	6
	İş Elemanı 12.9	1,33	2	3	1	0	4	3	1	2	0	4	4	0	4
	İş Elemanı 12.10	0,83	2	3	1	0	4	3	1	2	0	4	4	0	4
	İş Elemanı 12.11	0,67	2	2	1	0	3	1	1	2	0	2	3	0	3
	İş Elemanı 12.12	0,50	2	2	1	0	3	1	1	2	0	2	3	0	3
	İş Elemanı 12.13	0,33	1	1	1	0	1	1	2	3	0	3	1	1	2
13	İş Elemanı 13.1	0,83	2	1	1	0	1	1	1	2	0	2	1	1	2
	İş Elemanı 13.2	1,00	2	4	2	0	6	2	1	2	0	2	6	1	7
	İş Elemanı 13.3	2,50	2	4	2	1	7	2	1	2	0	2	7	0	7
	İş Elemanı 13.4	0,67	2	4	2	0	6	2	1	2	0	2	6	1	7
	İş Elemanı 13.5	2,00	2	1	1	0	1	4	1	2	0	5	3	1	4
	İş Elemanı 13.6	1,33	2	1	1	0	1	4	1	2	0	5	3	1	4
	İş Elemanı 13.7	0,50	2	1	1	0	1	4	1	2	0	5	3	0	3
	İş Elemanı 13.8	3,67	2	1	1	0	1	4	1	2	0	5	3	0	3
	İş Elemanı 13.9	0,67	2	2	1	0	3	4	2	2	0	6	5	0	5
14	İş Elemanı 14.1	1,00	1	1	1	0	1	1	1	2	0	2	1	0	1
	İş Elemanı 14.2	1,00	1	1	1	0	1	1	1	2	0	2	1	0	1
	İş Elemanı 14.3	1,67	1	1	1	0	1	1	1	2	0	2	1	0	1
	İş Elemanı 14.4	0,50	1	1	1	0	1	3	2	2	0	5	3	0	3
	İş Elemanı 14.5	2,00	2	2	1	0	3	3	1	2	0	4	3	0	3
	İş Elemanı 14.6	0,33	2	2	1	0	3	3	1	2	0	4	3	0	3
	İş Elemanı 14.7	3,33	2	1	1	2	3	3	1	2	0	4	3	0	3
	İş Elemanı 14.8	3,33	2	2	1	0	3	3	1	2	0	4	3	0	3

Ek açıklama-D: İş Elemanlarının Süre ve REBA Skoru Değerleri (devam)

Istasyon NO	İş Elemanı	Süre Değeri (Dk)	Boyun	Gövde	Bacak	Taşınan Yük	A Skoru	Üst Kol	Alt Kol	Bilek	Tuma Faktörü	B Skoru	C Skoru	Aktivite Yoğunluğu	REBA Skoru	
15	İş Elemanı 15.1	1,33	1	1	1	0	1	4	1	2	0	5	3	0	3	
	İş Elemanı 15.2	1,00	2	1	1	0	1	4	1	2	0	5	3	1	4	
	İş Elemanı 15.3	1,00	1	1	1	0	1	3	1	1	0	3	1	0	1	
	İş Elemanı 15.4	2,17	2	1	1	0	1	2	1	3	0	3	1	1	2	
	İş Elemanı 15.5	2,50	2	1	1	0	1	2	1	3	0	3	1	1	2	
	İş Elemanı 15.6	1,00	2	1	1	2	3	4	1	2	0	5	4	1	5	
	İş Elemanı 15.7	0,50	2	1	1	0	1	2	1	3	0	3	1	1	2	
	İş Elemanı 15.8	0,50	2	4	2	2	8	2	1	2	1	3	8	0	8	
	İş Elemanı 15.9	0,50	2	1	1	2	3	1	1	2	1	3	3	1	4	
	İş Elemanı 15.10	0,50	2	1	1	0	1	2	1	3	0	3	1	1	2	
	İş Elemanı 15.11	1,00	2	1	1	2	3	4	1	2	0	5	4	1	5	
	İş Elemanı 15.12	1,00	1	1	1	0	1	3	1	2	0	4	2	1	3	
	İş Elemanı 15.13	0,67	1	1	1	0	1	4	2	1	0	5	3	0	3	
16	İş Elemanı 16.1	1,50	2	3	2	0	5	3	1	2	1	5	6	0	6	
	İş Elemanı 16.2	2,00	2	1	1	0	1	4	1	2	1	6	3	0	3	
	İş Elemanı 16.3	0,83	1	1	1	0	1	4	1	2	0	5	3	0	3	
	İş Elemanı 16.4	2,00	2	2	1	0	3	1	1	2	0	2	3	0	3	
	İş Elemanı 16.5	1,67	1	1	1	0	1	4	1	2	0	4	2	1	3	
	İş Elemanı 16.6	0,33	2	1	1	1	2	3	1	2	1	5	4	0	4	
	İş Elemanı 16.7	0,67	1	1	1	0	1	2	4	2	2	0	6	3	0	3
	İş Elemanı 16.8	0,33	1	1	1	0	1	4	2	2	0	6	3	0	3	
	İş Elemanı 16.9	0,33	1	1	1	0	1	4	2	2	0	6	3	0	3	
	İş Elemanı 16.10	1,00	1	1	1	0	1	4	2	2	0	6	3	0	3	
	İş Elemanı 16.11	1,00	2	3	1	0	4	1	1	2	0	2	4	0	4	
	İş Elemanı 16.12	0,83	2	3	1	0	4	1	1	2	0	2	4	0	4	
	İş Elemanı 17.1	1,00	2	2	1	0	3	3	1	2	0	4	3	0	3	
17	İş Elemanı 17.2	1,00	2	2	1	0	3	3	1	2	0	4	3	0	3	
	İş Elemanı 17.3	4,00	2	2	1	0	3	3	1	2	0	4	3	0	3	
	İş Elemanı 17.4	0,50	2	2	1	0	3	3	2	2	0	5	4	0	4	
	İş Elemanı 17.5	1,00	2	2	1	0	3	3	1	2	0	4	3	0	3	
	İş Elemanı 17.6	0,50	2	2	1	1	4	3	1	2	0	4	4	0	4	
	İş Elemanı 17.7	0,67	2	2	1	1	4	3	1	2	0	4	4	0	4	
	İş Elemanı 17.8	3,00	2	2	1	1	4	3	1	2	0	4	4	0	4	
	İş Elemanı 17.9	0,50	2	2	1	0	3	3	1	2	0	4	3	0	3	
	18	İş Elemanı 18.1	0,83	2	1	2	0	1	1	1	2	0	2	1	1	2
		İş Elemanı 18.2	1,00	2	1	1	0	1	1	2	2	0	2	3	0	3
İş Elemanı 18.3		1,00	2	3	1	0	4	2	1	2	0	2	4	0	4	
İş Elemanı 18.4		2,00	2	3	3	0	6	1	1	2	0	2	6	0	6	
İş Elemanı 18.5		2,00	1	2	3	1	5	4	1	2	0	5	6	0	6	
İş Elemanı 18.6		3,00	2	4	1	0	5	3	1	2	0	4	5	0	5	
İş Elemanı 18.7		1,00	2	3	1	0	4	2	1	2	0	2	4	0	4	
19		İş Elemanı 19.1	1,50	2	4	1	0	5	3	1	2	0	4	5	0	5
	İş Elemanı 19.2	2,00	2	1	1	0	1	1	1	2	0	2	1	2	3	
	İş Elemanı 19.3	3,00	2	1	1	0	1	3	1	2	0	4	2	2	4	
	İş Elemanı 19.4	0,83	2	3	1	0	4	5	1	2	0	7	7	0	7	
	İş Elemanı 19.5	2,00	2	1	1	0	1	1	1	2	0	2	1	2	3	
	İş Elemanı 19.6	4,00	2	4	1	0	5	3	1	2	0	4	5	0	5	
	İş Elemanı 19.7	0,33	2	1	1	0	1	1	1	2	0	2	1	2	3	
20	İş Elemanı 20.1	12,50	2	1	1	0	1	4	2	3	0	7	4	2	6	
	İş Elemanı 20.2	0,50	2	1	1	0	1	4	2	3	0	7	4	0	4	
	İş Elemanı 20.3	0,50	1	2	1	0	2	1	2	2	0	2	2	0	2	
21	İş Elemanı 21.1	2,00	2	1	1	0	1	3	2	2	0	5	3	0	3	
	İş Elemanı 21.2	1,33	2	4	1	0	5	3	3	2	0	5	6	0	6	
	İş Elemanı 21.3	1,67	1	2	1	0	2	1	2	2	0	2	2	0	2	
	İş Elemanı 21.4	1,00	2	2	1	0	3	3	1	2	0	4	3	0	3	
	İş Elemanı 21.5	2,00	2	4	1	0	5	3	1	2	0	4	5	0	4	
	İş Elemanı 21.6	0,83	2	4	1	0	5	3	1	2	0	4	5	0	5	
	İş Elemanı 21.7	2,33	2	1	1	0	1	4	2	2	0	6	3	1	3	
22	İş Elemanı 22.1	1,00	2	1	1	0	1	4	2	3	0	7	4	0	4	
	İş Elemanı 22.2	1,33	2	1	1	0	1	4	2	3	0	7	4	0	3	
	İş Elemanı 22.3	1,00	2	1	1	0	1	2	1	2	0	2	1	1	2	
	İş Elemanı 22.4	1,00	2	1	1	0	1	2	1	2	0	2	1	1	2	
	İş Elemanı 22.5	5,00	2	1	1	0	1	4	2	2	0	6	3	0	3	
	İş Elemanı 22.6	0,50	2	3	2	0	5	3	1	2	0	4	5	0	5	
23	İş Elemanı 23.1	12,00	2	2	1	0	3	2	1	2	0	2	3	1	4	
	İş Elemanı 23.2	1,33	1	1	1	0	1	1	2	2	1	3	1	1	2	
24	İş Elemanı 24.1	2,50	2	3	2	0	5	4	2	2	0	6	7	0	7	
	İş Elemanı 24.2	4,17	1	1	1	0	1	4	1	2	0	5	3	1	4	

Ek Açıklama-E: Mevcut Durum İstasyon Atama ve REBA Skorları

İstasyon NO	İş Elemanı	İş Elemanı Süre (dk)	Ergonomik Risk Değeri(Reba Skoru)	Toplam Süre	İstasyon Dengeleme Gecikme Zamanı	İstasyon REBA skoru
1	İş Elemanı 1.1	1	2	13,5	0,81	27
	İş Elemanı 1.2	0,5	2			
	İş Elemanı 1.3	0,5	2			
	İş Elemanı 1.4	2	2			
	İş Elemanı 1.5	5	9			
	İş Elemanı 1.6	2	4			
	İş Elemanı 1.7	0,5	2			
	İş Elemanı 1.8	0,5	2			
	İş Elemanı 1.9	1,5	2			
2	İş Elemanı 2.1	2,00	8	13,50	0,81	31
	İş Elemanı 2.2	3,00	8			
	İş Elemanı 2.3	0,50	2			
	İş Elemanı 2.4	1,33	3			
	İş Elemanı 2.5	1,33	3			
	İş Elemanı 2.6	0,33	3			
	İş Elemanı 2.7	2,00	2			
	İş Elemanı 2.8	3,00	2			
3	İş Elemanı 3.1	1,33	2	13,13	1,18	32
	İş Elemanı 3.2	0,67	4			
	İş Elemanı 3.3	0,33	2			
	İş Elemanı 3.4	2,00	5			
	İş Elemanı 3.5	0,33	4			
	İş Elemanı 3.6	0,75	2			
	İş Elemanı 3.7	0,67	3			
	İş Elemanı 3.8	1,17	2			
	İş Elemanı 3.9	3,67	2			
	İş Elemanı 3.10	0,05	2			
	İş Elemanı 3.11	1,17	2			
	İş Elemanı 3.12	1,00	2			
4	İş Elemanı 4.1	2,00	2	13,58	0,73	50
	İş Elemanı 4.2	0,83	2			
	İş Elemanı 4.3	1,67	6			
	İş Elemanı 4.4	0,50	5			
	İş Elemanı 4.5	0,83	3			
	İş Elemanı 4.6	1,00	5			
	İş Elemanı 4.7	2,00	5			
	İş Elemanı 4.8	1,17	5			

	İş Elemanı 4.9	1,08	2			
	İş Elemanı 4.10	2,00	9			
	İş Elemanı 4.11	0,50	6			
5	İş Elemanı 5.1	0,33	2	12,83	1,48	30
	İş Elemanı 5.2	0,33	2			
	İş Elemanı 5.3	0,67	2			
	İş Elemanı 5.4	0,33	2			
	İş Elemanı 5.5	0,33	6			
	İş Elemanı 5.6	0,67	3			
	İş Elemanı 5.7	3,00	2			
	İş Elemanı 5.8	5,33	4			
	İş Elemanı 5.9	0,83	2			
	İş Elemanı 5.10	1,00	5			
6	İş Elemanı 6.1	0,67	4	12,33	1,98	31
	İş Elemanı 6.2	8,33	6			
	İş Elemanı 6.3	0,50	5			
	İş Elemanı 6.4	2,00	8			
	İş Elemanı 6.5	0,50	4			
	İş Elemanı 6.6	0,33	4			
7	İş Elemanı 7.1	1,67	9	13,17	1,14	55
	İş Elemanı 7.2	0,67	2			
	İş Elemanı 7.3	1,67	3			
	İş Elemanı 7.4	1,50	5			
	İş Elemanı 7.5	1,67	2			
	İş Elemanı 7.6	0,50	3			
	İş Elemanı 7.7	1,67	9			
	İş Elemanı 7.8	2,00	9			
	İş Elemanı 7.9	0,83	9			
	İş Elemanı 7.10	1,00	4			
8	İş Elemanı 8.1	0,33	1	13,67	0,64	49
	İş Elemanı 8.2	2,00	3			
	İş Elemanı 8.3	0,67	9			
	İş Elemanı 8.4	0,67	5			
	İş Elemanı 8.5	1,33	5			
	İş Elemanı 8.6	1,00	5			
	İş Elemanı 8.7	1,00	2			
	İş Elemanı 8.8	1,00	5			
	İş Elemanı 8.9	0,67	1			
	İş Elemanı 8.10	1,00	4			
	İş Elemanı 8.11	0,50	1			
	İş Elemanı 8.12	1,67	7			
	İş Elemanı 8.13	1,83	1			
9	İş Elemanı 9.1	1,67	5	13,25	1,06	26
	İş Elemanı 9.2	1,42	4			

	İş Elemanı 9.3	0,50	4			
	İş Elemanı 9.4	0,33	5			
	İş Elemanı 9.5	4,33	4			
	İş Elemanı 9.6	5,00	4			
10	İş Elemanı 10.1	0,33	5	12,83	1,48	20
	İş Elemanı 10.2	2,00	5			
	İş Elemanı 10.3	5,33	1			
	İş Elemanı 10.4	0,67	1			
	İş Elemanı 10.5	3,33	2			
	İş Elemanı 10.6	0,50	3			
	İş Elemanı 10.7	0,67	3			
11	İş Elemanı 11.1	1,67	4	11,83	2,48	29
	İş Elemanı 11.2	2,50	4			
	İş Elemanı 11.3	2,33	4			
	İş Elemanı 11.4	0,67	4			
	İş Elemanı 11.5	0,83	4			
	İş Elemanı 11.6	1,17	1			
	İş Elemanı 11.7	2,00	4			
	İş Elemanı 11.8	0,67	4			
12	İş Elemanı 12.1	0,83	1	13,50	0,81	34
	İş Elemanı 12.2	0,33	3			
	İş Elemanı 12.3	0,83	3			
	İş Elemanı 12.4	0,83	1			
	İş Elemanı 12.5	1,00	1			
	İş Elemanı 12.6	0,50	2			
	İş Elemanı 12.7	4,67	1			
	İş Elemanı 12.8	0,83	6			
	İş Elemanı 12.9	1,33	4			
	İş Elemanı 12.10	0,83	4			
	İş Elemanı 12.11	0,67	3			
	İş Elemanı 12.12	0,50	3			
	İş Elemanı 12.13	0,33	2			
13	İş Elemanı 13.1	0,83	2	13,17	1,14	42
	İş Elemanı 13.2	1,00	7			
	İş Elemanı 13.3	2,50	7			
	İş Elemanı 13.4	0,67	7			
	İş Elemanı 13.5	2,00	4			
	İş Elemanı 13.6	1,33	4			
	İş Elemanı 13.7	0,50	3			
	İş Elemanı 13.8	3,67	3			
	İş Elemanı 13.9	0,67	5			
14	İş Elemanı 14.1	1,00	1	13,17	1,14	18
	İş Elemanı 14.2	1,00	1			
	İş Elemanı 14.3	1,67	1			

	İş Elemanı 14.4	0,50	3			
	İş Elemanı 14.5	2,00	3			
	İş Elemanı 14.6	0,33	3			
	İş Elemanı 14.7	3,33	3			
	İş Elemanı 14.8	3,33	3			
15	İş Elemanı 15.1	1,33	3	13,67	0,64	44
	İş Elemanı 15.2	1,00	4			
	İş Elemanı 15.3	1,00	1			
	İş Elemanı 15.4	2,17	2			
	İş Elemanı 15.5	2,50	2			
	İş Elemanı 15.6	1,00	5			
	İş Elemanı 15.7	0,50	2			
	İş Elemanı 15.8	0,50	8			
	İş Elemanı 15.9	0,50	4			
	İş Elemanı 15.10	0,50	2			
	İş Elemanı 15.11	1,00	5			
	İş Elemanı 15.12	1,00	3			
	İş Elemanı 15.13	0,67	3			
16	İş Elemanı 16.1	1,50	6	12,50	1,81	42
	İş Elemanı 16.2	2,00	3			
	İş Elemanı 16.3	0,83	3			
	İş Elemanı 16.4	2,00	3			
	İş Elemanı 16.5	1,67	3			
	İş Elemanı 16.6	0,33	4			
	İş Elemanı 16.7	0,67	3			
	İş Elemanı 16.8	0,33	3			
	İş Elemanı 16.9	0,33	3			
	İş Elemanı 16.10	1,00	3			
	İş Elemanı 16.11	1,00	4			
	İş Elemanı 16.12	0,83	4			
17	İş Elemanı 17.1	1,00	3	12,17	2,14	31
	İş Elemanı 17.2	1,00	3			
	İş Elemanı 17.3	4,00	3			
	İş Elemanı 17.4	0,50	4			
	İş Elemanı 17.5	1,00	3			
	İş Elemanı 17.6	0,50	4			
	İş Elemanı 17.7	0,67	4			
	İş Elemanı 17.8	3,00	4			
	İş Elemanı 17.9	0,50	3			
18	İş Elemanı 18.1	0,83	2	10,83	3,48	30
	İş Elemanı 18.2	1,00	3			
	İş Elemanı 18.3	1,00	4			
	İş Elemanı 18.4	2,00	6			
	İş Elemanı 18.5	2,00	6			

	İş Elemanı 18.6	3,00	5			
	İş Elemanı 18.7	1,00	4			
19	İş Elemanı 19.1	1,50	5	13,67	0,64	30
	İş Elemanı 19.2	2,00	3			
	İş Elemanı 19.3	3,00	4			
	İş Elemanı 19.4	0,83	7			
	İş Elemanı 19.5	2,00	3			
	İş Elemanı 19.6	4,00	5			
	İş Elemanı 19.7	0,33	3			
20	İş Elemanı 20.1	12,50	6	13,50	0,81	12
	İş Elemanı 20.2	0,50	4			
	İş Elemanı 20.3	0,50	2			
21	İş Elemanı 21.1	2,00	3	11,17	3,14	26
	İş Elemanı 21.2	1,33	6			
	İş Elemanı 21.3	1,67	2			
	İş Elemanı 21.4	1,00	3			
	İş Elemanı 21.5	2,00	4			
	İş Elemanı 21.6	0,83	5			
	İş Elemanı 21.7	2,33	3			
22	İş Elemanı 22.1	1,00	4	9,83	4,48	19
	İş Elemanı 22.2	1,33	3			
	İş Elemanı 22.3	1,00	2			
	İş Elemanı 22.4	1,00	2			
	İş Elemanı 22.5	5,00	3			
	İş Elemanı 22.6	0,50	5			
23	İş Elemanı 23.1	12,00	4	13,33	0,98	6
	İş Elemanı 23.2	1,33	2			
24	İş Elemanı 24.1	2,50	7	6,67	7,64	11
	İş Elemanı 24.2	4,17	4			

Ek Açıklama-F: Ergonomik Risk Kısıtsız BMHDP Çözüm Sonucu İstasyon Atama ve REBA Skorları

İstasyon NO	İş Elemanı	İş Elemanı Süre (dk)	Ergonomik Risk Değeri(Reba Skoru)	TT	İstasyon Dengeleme Gecikme Zamanı	İstasyon REBA skoru
1	İş Elemanı 1.1	1,00	2	14,00	0,31	29
	İş Elemanı 1.2	0,50	2			
	İş Elemanı 1.3	0,50	2			
	İş Elemanı 1.4	2,00	2			
	İş Elemanı 1.5	5,00	9			
	İş Elemanı 1.6	2,00	4			
	İş Elemanı 1.7	0,50	2			
	İş Elemanı 1.8	0,50	2			
	İş Elemanı 1.9	1,50	2			
	İş Elemanı 2.3	0,50	2			
2	İş Elemanı 2.1	2,00	8	13,00	1,31	29
	İş Elemanı 2.2	3,00	8			
	İş Elemanı 2.4	1,33	3			
	İş Elemanı 2.5	1,33	3			
	İş Elemanı 2.6	0,33	3			
	İş Elemanı 2.7	2,00	2			
	İş Elemanı 2.8	3,00	2			
3	İş Elemanı 3.1	1,33	2	13,13	1,18	32
	İş Elemanı 3.2	0,67	4			
	İş Elemanı 3.3	0,33	2			
	İş Elemanı 3.4	2,00	5			
	İş Elemanı 3.5	0,33	4			
	İş Elemanı 3.6	0,75	2			
	İş Elemanı 3.7	0,67	3			
	İş Elemanı 3.8	1,17	2			
	İş Elemanı 3.9	3,67	2			
	İş Elemanı 3.10	0,05	2			
	İş Elemanı 3.11	1,17	2			
	İş Elemanı 3.12	1,00	2			
4	İş Elemanı 4.1	2,00	2	14,25	0,06	54
	İş Elemanı 4.2	0,83	2			
	İş Elemanı 4.3	1,67	6			
	İş Elemanı 4.4	0,50	5			
	İş Elemanı 4.5	0,83	3			
	İş Elemanı 4.6	1,00	5			
	İş Elemanı 4.7	2,00	5			
	İş Elemanı 4.8	1,17	5			

	İş Elemanı 4.9	1,08	2			
	İş Elemanı 4.10	2,00	9			
	İş Elemanı 4.11	0,50	6			
	İş Elemanı 5.1	0,33	2			
	İş Elemanı 5.2	0,33	2			
5	İş Elemanı 5.3	0,67	2	10,00	4,31	13
	İş Elemanı 5.4	0,33	2			
	İş Elemanı 5.6	0,67	3			
	İş Elemanı 5.7	3,00	2			
	İş Elemanı 5.8	5,33	4			
6	İş Elemanı 5.5	0,33	6	14,17	0,14	40
	İş Elemanı 5.9	0,83	2			
	İş Elemanı 5.10	1,00	5			
	İş Elemanı 6.1	0,67	4			
	İş Elemanı 6.2	8,33	6			
	İş Elemanı 6.3	0,50	5			
	İş Elemanı 6.4	2,00	8			
İş Elemanı 6.5	0,50	4				
7	İş Elemanı 6.6	0,33	4	13,83	0,48	60
	İş Elemanı 7.1	1,67	9			
	İş Elemanı 7.2	0,67	2			
	İş Elemanı 7.3	1,67	3			
	İş Elemanı 7.4	1,50	5			
	İş Elemanı 7.5	1,67	2			
	İş Elemanı 7.6	0,50	3			
	İş Elemanı 7.7	1,67	9			
	İş Elemanı 7.8	2,00	9			
	İş Elemanı 7.9	0,83	9			
	İş Elemanı 7.10	1,00	4			
	İş Elemanı 8.1	0,33	1			
8	İş Elemanı 8.2	2,00	3	13,33	0,98	48
	İş Elemanı 8.3	0,67	9			
	İş Elemanı 8.4	0,67	5			
	İş Elemanı 8.5	1,33	5			
	İş Elemanı 8.6	1,00	5			
	İş Elemanı 8.7	1,00	2			
	İş Elemanı 8.8	1,00	5			
	İş Elemanı 8.9	0,67	1			
	İş Elemanı 8.10	1,00	4			
	İş Elemanı 8.11	0,50	1			
	İş Elemanı 8.12	1,67	7			
	İş Elemanı 8.13	1,83	1			
	9	İş Elemanı 9.1	1,67			
İş Elemanı 9.2		1,42	4			

	İş Elemanı 9.3	0,50	4			
	İş Elemanı 9.4	0,33	5			
	İş Elemanı 9.5	4,33	4			
	İş Elemanı 9.6	5,00	4			
10	İş Elemanı 10.1	0,33	5	12,17	2,14	17
	İş Elemanı 10.2	2,00	5			
	İş Elemanı 10.3	5,33	1			
	İş Elemanı 10.4	0,67	1			
	İş Elemanı 10.5	3,33	2			
	İş Elemanı 10.6	0,50	3			
11	İş Elemanı 10.7	0,67	3	11,83	2,48	28
	İş Elemanı 11.1	1,67	4			
	İş Elemanı 11.2	2,50	4			
	İş Elemanı 11.3	2,33	4			
	İş Elemanı 11.4	0,67	4			
	İş Elemanı 11.5	0,83	4			
	İş Elemanı 11.6	1,17	1			
	İş Elemanı 11.7	2,00	4			
12	İş Elemanı 11.8	0,67	4	14,17	0,14	38
	İş Elemanı 12.1	0,83	1			
	İş Elemanı 12.2	0,33	3			
	İş Elemanı 12.3	0,83	3			
	İş Elemanı 12.4	0,83	1			
	İş Elemanı 12.5	1,00	1			
	İş Elemanı 12.6	0,50	2			
	İş Elemanı 12.7	4,67	1			
	İş Elemanı 12.8	0,83	6			
	İş Elemanı 12.9	1,33	4			
	İş Elemanı 12.10	0,83	4			
	İş Elemanı 12.11	0,67	3			
	İş Elemanı 12.12	0,50	3			
	İş Elemanı 12.13	0,33	2			
13	İş Elemanı 13.1	0,83	2	14,17	0,14	43
	İş Elemanı 13.2	1,00	7			
	İş Elemanı 13.3	2,50	7			
	İş Elemanı 13.4	0,67	7			
	İş Elemanı 13.5	2,00	4			
	İş Elemanı 13.6	1,33	4			
	İş Elemanı 13.7	0,50	3			
	İş Elemanı 13.8	3,67	3			
	İş Elemanı 13.9	0,67	5			

	İş Elemanı 14.1	1,00	1			
14	İş Elemanı 14.2	1,00	1	13,50	0,81	20
	İş Elemanı 14.3	1,67	1			
	İş Elemanı 14.4	0,50	3			
	İş Elemanı 14.5	2,00	3			
	İş Elemanı 14.6	0,33	3			
	İş Elemanı 14.7	3,33	3			
	İş Elemanı 14.8	3,33	3			
	İş Elemanı 15.1	1,33	3			
15	İş Elemanı 15.2	1,00	4	13,83	0,48	47
	İş Elemanı 15.3	1,00	1			
	İş Elemanı 15.4	2,17	2			
	İş Elemanı 15.5	2,50	2			
	İş Elemanı 15.6	1,00	5			
	İş Elemanı 15.7	0,50	2			
	İş Elemanı 15.8	0,50	8			
	İş Elemanı 15.9	0,50	4			
	İş Elemanı 15.10	0,50	2			
	İş Elemanı 15.11	1,00	5			
	İş Elemanı 15.12	1,00	3			
	İş Elemanı 15.13	0,67	3			
	İş Elemanı 16.1	1,50	6			
16	İş Elemanı 16.2	2,00	3	13,00	1,31	42
	İş Elemanı 16.3	0,83	3			
	İş Elemanı 16.4	2,00	3			
	İş Elemanı 16.5	1,67	3			
	İş Elemanı 16.6	0,33	4			
	İş Elemanı 16.7	0,67	3			
	İş Elemanı 16.8	0,33	3			
	İş Elemanı 16.9	0,33	3			
	İş Elemanı 16.10	1,00	3			
	İş Elemanı 16.11	1,00	4			
	İş Elemanı 16.12	0,83	4			
	İş Elemanı 17.1	1,00	3			
	İş Elemanı 17.2	1,00	3			
	17	İş Elemanı 17.3	4,00			
İş Elemanı 17.4		0,50	4			
İş Elemanı 17.5		1,00	3			

	İş Elemanı 17.6	0,50	4			
	İş Elemanı 17.7	0,67	4			
	İş Elemanı 17.8	3,00	4			
	İş Elemanı 17.9	0,50	3			
	İş Elemanı 18.1	0,83	2			
	İş Elemanı 18.2	1,00	3			
	İş Elemanı 18.3	1,00	4			
18	İş Elemanı 18.4	2,00	6	11,50	2,81	29
	İş Elemanı 18.5	2,00	6			
	İş Elemanı 18.6	3,00	5			
	İş Elemanı 18.7	1,00	4			
	İş Elemanı 19.1	1,50	5			
	İş Elemanı 19.2	2,00	3			
19	İş Elemanı 19.3	3,00	4	10,67	3,64	24
	İş Elemanı 19.4	0,83	7			
	İş Elemanı 19.5	2,00	3			
	İş Elemanı 19.6	4,00	5			
	İş Elemanı 19.7	0,33	3			
	İş Elemanı 20.3	0,50	2			
20	İş Elemanı 20.1	12,50	6	13,00	1,31	10
	İş Elemanı 20.2	0,50	4			
21	İş Elemanı 21.1	2,00	3	13,50	0,81	33
	İş Elemanı 21.2	1,33	6			
	İş Elemanı 21.3	1,67	2			
	İş Elemanı 21.4	1,00	3			
	İş Elemanı 21.5	2,00	4			
	İş Elemanı 21.6	0,83	5			
	İş Elemanı 21.7	2,33	3			
	İş Elemanı 22.1	1,00	4			
	İş Elemanı 22.2	1,33	3			
22	İş Elemanı 22.3	1,00	2	14,17	0,14	23
	İş Elemanı 22.4	1,00	2			
	İş Elemanı 22.5	5,00	3			
	İş Elemanı 24.2	4,17	4			
	İş Elemanı 24.1	2,50	7			
	İş Elemanı 22.6	0,50	5			
23	İş Elemanı 23.1	12,00	4	13,33	0,98	6
	İş Elemanı 23.2	1,33	2			

Ek Açıklama-G: Ergonomik Risk Kısıtlı BMHDP Çözüm Sonucu İstasyon Atama ve REBA Skorları

İstasyon NO	İş Elemanı	İş Elemanı Süre (dk)	Ergonomik Risk Değeri(Reba Skoru)	Toplam Süre	İstasyon Dengeleme Gecikme Zamanı	İstasyon REBA skoru
1	İş Elemanı 1.1	1,00	2	14,00	0,31	29
1	İş Elemanı 1.2	0,50	2			
1	İş Elemanı 1.3	0,50	2			
1	İş Elemanı 1.4	2,00	2			
1	İş Elemanı 1.5	5,00	9			
1	İş Elemanı 1.6	2,00	4			
1	İş Elemanı 1.7	0,50	2			
1	İş Elemanı 1.8	0,50	2			
1	İş Elemanı 1.9	1,50	2			
1	İş Elemanı 2.3	0,50	2			
2	İş Elemanı 2.1	2,00	8			
2	İş Elemanı 2.2	3,00	8			
2	İş Elemanı 2.4	1,33	3			
2	İş Elemanı 2.5	1,33	3			
2	İş Elemanı 2.6	0,33	3			
2	İş Elemanı 2.7	2,00	2			
2	İş Elemanı 2.8	3,00	2	12,13	2,18	30
3	İş Elemanı 3.1	1,33	2			
3	İş Elemanı 3.2	0,67	4			
3	İş Elemanı 3.3	0,33	2			
3	İş Elemanı 3.4	2,00	5			
3	İş Elemanı 3.5	0,33	4			
3	İş Elemanı 3.6	0,75	2			
3	İş Elemanı 3.7	0,67	3			
3	İş Elemanı 3.8	1,17	2			
3	İş Elemanı 3.9	3,67	2			
3	İş Elemanı 3.10	0,05	2			
3	İş Elemanı 3.11	1,17	2	9,00	5,31	30
4	İş Elemanı 3.12	1,00	2			
4	İş Elemanı 4.1	2,00	2			
4	İş Elemanı 4.2	0,83	2			
4	İş Elemanı 4.3	1,67	6			
4	İş Elemanı 4.5	0,83	3			
4	İş Elemanı 4.8	1,17	5			
4	İş Elemanı 4.4	0,50	5	7,25	7,06	30
4	İş Elemanı 4.6	1,00	5			
5	İş Elemanı 4.7	2,00	5	7,25	7,06	30
5	İş Elemanı 4.9	1,08	2			

5	İş Elemanı 4.10	2,00	9			
5	İş Elemanı 4.11	0,50	6			
5	İş Elemanı 5.1	0,33	2			
5	İş Elemanı 5.2	0,33	2			
5	İş Elemanı 5.3	0,67	2			
5	İş Elemanı 5.4	0,33	2			
6	İş Elemanı 5.5	0,33	6			
6	İş Elemanı 5.6	0,67	3			
6	İş Elemanı 5.7	3,00	2			
6	İş Elemanı 5.8	5,33	4	11,83	2,48	26
6	İş Elemanı 5.9	0,83	2			
6	İş Elemanı 5.10	1,00	5			
6	İş Elemanı 6.1	0,67	4			
7	İş Elemanı 6.2	8,33	6			
7	İş Elemanı 6.3	0,50	5			
7	İş Elemanı 6.4	2,00	8	11,67	2,64	27
7	İş Elemanı 6.5	0,50	4			
7	İş Elemanı 6.6	0,33	4			
8	İş Elemanı 7.1	1,67	9			
8	İş Elemanı 7.2	0,67	2			
8	İş Elemanı 7.3	1,67	3			
8	İş Elemanı 7.4	1,50	5			
8	İş Elemanı 7.5	1,67	2			
8	İş Elemanı 7.6	0,50	3			
9	İş Elemanı 7.7	1,67	9			
9	İş Elemanı 7.8	2,00	9	4,50	9,81	27
9	İş Elemanı 7.9	0,83	9			
10	İş Elemanı 7.10	1,00	4			
10	İş Elemanı 8.1	0,33	1			
10	İş Elemanı 8.2	2,00	3			
10	İş Elemanı 8.3	0,67	9			
10	İş Elemanı 8.12	1,67	7			
10	İş Elemanı 8.13	1,83	1			
10	İş Elemanı 8.4	0,67	5			
11	İş Elemanı 8.5	1,33	5			
11	İş Elemanı 8.6	1,00	5			
11	İş Elemanı 8.7	1,00	2			
11	İş Elemanı 8.8	1,00	5			
11	İş Elemanı 8.9	0,67	1			
11	İş Elemanı 8.10	1,00	4			
11	İş Elemanı 8.11	0,50	1			
11	İş Elemanı 9.1	1,67	5			
12	İş Elemanı 9.2	1,42	4			
12	İş Elemanı 9.3	0,50	4	11,92	2,39	26

12	İş Elemanı 9.4	0,33	5			
12	İş Elemanı 9.5	4,33	4			
12	İş Elemanı 9.6	5,00	4			
12	İş Elemanı 10.1	0,33	5			
13	İş Elemanı 10.2	2,00	5			
13	İş Elemanı 10.3	5,33	1			
13	İş Elemanı 10.4	0,67	1			
13	İş Elemanı 10.5	3,33	2	14,17	0,14	19
13	İş Elemanı 10.6	0,50	3			
13	İş Elemanı 10.7	0,67	3			
13	İş Elemanı 11.1	1,67	4			
14	İş Elemanı 11.2	2,50	4			
14	İş Elemanı 11.3	2,33	4			
14	İş Elemanı 11.4	0,67	4			
14	İş Elemanı 11.5	0,83	4			
14	İş Elemanı 11.6	1,17	1	11,33	2,98	29
14	İş Elemanı 11.7	2,00	4			
14	İş Elemanı 11.8	0,67	4			
14	İş Elemanı 12.1	0,83	1			
14	İş Elemanı 12.2	0,33	3			
15	İş Elemanı 12.3	0,83	3			
15	İş Elemanı 12.4	0,83	1			
15	İş Elemanı 12.5	1,00	1			
15	İş Elemanı 12.6	0,50	2			
15	İş Elemanı 12.7	4,67	1			
15	İş Elemanı 12.8	0,83	6	12,33	1,98	30
15	İş Elemanı 12.9	1,33	4			
15	İş Elemanı 12.10	0,83	4			
15	İş Elemanı 12.11	0,67	3			
15	İş Elemanı 12.12	0,50	3			
15	İş Elemanı 12.13	0,33	2			
16	İş Elemanı 13.1	0,83	2			
16	İş Elemanı 13.2	1,00	7			
16	İş Elemanı 14.1	1,00	1			
16	İş Elemanı 14.2	1,00	1			
16	İş Elemanı 14.3	1,67	1			
16	İş Elemanı 14.4	0,50	3	10,83	3,48	28
16	İş Elemanı 14.5	2,00	3			
16	İş Elemanı 14.6	0,33	3			
16	İş Elemanı 13.3	2,50	7			
17	İş Elemanı 13.4	0,67	7			
17	İş Elemanı 13.5	2,00	4	11,17	3,14	24
17	İş Elemanı 13.6	1,33	4			
17	İş Elemanı 14.7	3,33	3			

17	İş Elemanı 14.8	3,33	3			
17	İş Elemanı 13.7	0,50	3			
18	İş Elemanı 13.8	3,67	3	13,83	0,48	27
18	İş Elemanı 13.9	0,67	5			
18	İş Elemanı 15.1	1,33	3			
18	İş Elemanı 15.2	1,00	4			
18	İş Elemanı 15.3	1,00	1			
18	İş Elemanı 15.4	2,17	2			
18	İş Elemanı 15.5	2,50	2			
18	İş Elemanı 15.6	1,00	5			
18	İş Elemanı 15.7	0,50	2			
19	İş Elemanı 15.8	0,50	8			
19	İş Elemanı 15.9	0,50	4			
19	İş Elemanı 15.10	0,50	2			
19	İş Elemanı 15.11	1,00	5			
19	İş Elemanı 15.12	1,00	3			
19	İş Elemanı 15.13	0,67	3			
20	İş Elemanı 16.1	1,50	6	10,00	4,31	28
20	İş Elemanı 16.2	2,00	3			
20	İş Elemanı 16.3	0,83	3			
20	İş Elemanı 16.4	2,00	3			
20	İş Elemanı 16.5	1,67	3			
20	İş Elemanı 16.6	0,33	4			
20	İş Elemanı 16.7	0,67	3			
20	İş Elemanı 17.1	1,00	3			
21	İş Elemanı 16.8	0,33	3	10,00	4,31	30
21	İş Elemanı 16.9	0,33	3			
21	İş Elemanı 16.10	1,00	3			
21	İş Elemanı 16.11	1,00	4			
21	İş Elemanı 16.12	0,83	4			
21	İş Elemanı 17.2	1,00	3			
21	İş Elemanı 17.3	4,00	3			
21	İş Elemanı 17.4	0,50	4			
21	İş Elemanı 17.5	1,00	3	9,50	4,81	30
22	İş Elemanı 17.6	0,50	4			
22	İş Elemanı 17.7	0,67	4			
22	İş Elemanı 17.8	3,00	4			
22	İş Elemanı 17.9	0,50	3			
22	İş Elemanı 18.1	0,83	2			
22	İş Elemanı 18.2	1,00	3			
22	İş Elemanı 18.3	1,00	4	12,50	1,81	27
22	İş Elemanı 18.4	2,00	6			
23	İş Elemanı 18.5	2,00	6			
23	İş Elemanı 18.6	3,00	5			

23	İş Elemanı 18.7	1,00	4			
23	İş Elemanı 19.1	1,50	5			
23	İş Elemanı 19.2	2,00	3			
23	İş Elemanı 19.3	3,00	4			
24	İş Elemanı 19.4	0,83	7	7,17	7,14	18
24	İş Elemanı 19.5	2,00	3			
24	İş Elemanı 19.6	4,00	5			
24	İş Elemanı 19.7	0,33	3			
25	İş Elemanı 20.1	12,50	6	13,50	0,81	12
25	İş Elemanı 20.3	0,50	2			
25	İş Elemanı 20.2	0,50	4			
26	İş Elemanı 21.1	2,00	3	12,17	2,14	30
26	İş Elemanı 21.2	1,33	6			
26	İş Elemanı 21.3	1,67	2			
26	İş Elemanı 21.4	1,00	3			
26	İş Elemanı 21.5	2,00	4			
26	İş Elemanı 21.6	0,83	5			
26	İş Elemanı 21.7	2,33	3			
26	İş Elemanı 22.1	1,00	4	8,83	5,48	15
27	İş Elemanı 22.2	1,33	3			
27	İş Elemanı 22.3	1,00	2			
27	İş Elemanı 22.4	1,00	2			
27	İş Elemanı 22.5	5,00	3			
27	İş Elemanı 22.6	0,5	5	13,33	0,98	6
28	İş Elemanı 23.1	12	4			
28	İş Elemanı 23.2	1,33	2	6,67	7,64	11
29	İş Elemanı 24.1	2,50	7			
29	İş Elemanı 24.2	4,17	4			

Ek Açıklama-H: Birinci İstasyon Zaman Etüdü Örneği

ZAMAN ETÜDÜ ÖLÇÜM FORMU											
NO	İŞ ELEM VE AYIRIM NOKTASI	MİK	ÇEV	1	2	3	4	5	6	ΣN_i	$\Sigma N_i/n$
1	İş Elemanı 1.1.		N_i	60	58	63	62	61	63		
			L								
			t_i	60	58	63	62	61	63		
			F_1	1:00	1:58	3:01	4:03	5:04	6:07		
			F_2								
	İş Elemanı 1.1.		N_i	62	62	62	62	60	63		
			L								
			t_i	62	62	62	62	60	63		
			F_1	7:09	8:11	9:13	10:15	11:15	12:18		
			F_2								
	İş Elemanı 1.1.		N_i	58	57	62	63	62	62		
			L								
			t_i	58	57	62	63	62	62		
			F_1	13:16	14:13	15:15	15:18	16:20	17:22		
			F_2								
ÇEVİRİM NORMAL SÜRELERİ											

NO/ÇEV	...DEN	..E KADAR	SÜRE	ÜRETİM DIŞI FAALİYETLER