

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ERGONOMİK ETMENLER DİKKATE ALINARAK
MONTAJ HATLARINDA DENGELEME YAPILMASI VE
BİR FABRİKA UYGULAMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Keriman Gizem GÖRGÜLÜ

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Endüstri Mühendisliği Programı

HAZİRAN 2019

**ERGONOMİK ETMENLER DİKKATE ALINARAK
MONTAJ HATLARINDA DENGELEME YAPILMASI VE
BİR FABRİKA UYGULAMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Keriman Gizem GÖRGÜLÜ
(507151129)**

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Endüstri Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Murat BASKAK

HAZİRAN 2019

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 507151129 numaralı Yüksek LisansÖğrencisi Keriman Gizem GÖRGÜLÜ, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “ERGONOMİK ETMENLER DİKKATE ALINARAK MONTAJ HATLARINDA DENGELEME YAPILMASI VE BİR FABRİKA UYGULAMASI” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Murat BASKAK**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Mehmet TANYAŞ**
Maltepe Üniversitesi

Doç. Dr. Emre ÇEVİKÇAN
İstanbul Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **03 Mayıs 2019**
Savunma Tarihi : **12 Haziran 2019**





Aileme,



ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasında, montaj hatlarında ergonomik etmenler dikkate alınarak montaj hattı dengelenmesinin yapılması ve bir fabrika uygulamasına yönelik çalışmalar yer almaktadır.

Tez çalışmam süresince, değerli bilgi birikimi ile bana yol gösteren, her türlü desteği ve özverisini esirgemeyen ve önerileriyle tezin gelişmesine büyük katkı sağlayan değerli hocam ve tez danışmanın Sayın Doç Dr. Murat BASKAK'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamın endüstriyel uygulama kısmı için gerekli bilgileri sağlayan Arçelik firması çalışanlarına çok teşekkür ederim.

Üzerimde sonsuz emekleri olan ve bugünlere ulaşmamı sağlayan annem Suna Meliha ÖZKAHYA, babam Teoman ÖZKAHYA ve ablam Diğdem AKÇA'ya şükranlarımı sunarım.

Son olarak, tez çalışmam boyunca büyük bir sabır gösteren, sonsuz desteğini her daim hissettiğim değerli eşim Orkun GÖRGÜLÜ'ye teşekkürü bir borç bilirim.

Nisan 2019

Keriman Gizem GÖRGÜLÜ
Endüstri Mühendisi



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xiii
SEMBOLLER	xv
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xvii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xix
ÖZET	xxi
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ	1
2. ÜRETİM VE MONTAJ HATLARI.....	3
2.1 Üretim.....	3
2.2 Üretim Sistemlerinin Sınıflandırılması	3
2.2.1 Çağdaş üretim sistemleri	4
2.2.2 Geleneksel üretim sistemleri	6
2.2.2.1 Ürüne uygulanan stok politikasına göre sınıflandırma	6
2.2.2.2 Üretim yöntemine göre sınıflandırma	7
2.2.2.3 Üretim cinsine göre sınıflandırma.....	8
2.2.2.4 Üretim sürecine göre sınıflandırma.....	8
2.2.2.5 Ürün çeşidi ve üretim miktarına göre sınıflandırma	8
2.3 Montaj Hatları Kavramı	9
2.4 Montaj Hatlarının Sınıflandırılması	10
2.4.1 Yerleşim tiplerine göre sınıflandırılma	10
2.4.2 Ürün çeşidi sayısına göre sınıflandırma.....	11
2.4.3 İşlevlerine göre sınıflandırma	12
3. MONTAJ HATLARININ DENGELENMESİ PROBLEMİNDE AMAÇ, TANIM, YÖNTEM VE KISITLAR.....	13
3.1 Montaj Hatları Dengelenmesi Kavramı	13
3.2 Montaj Hattı Dengelemenin Amaçları	14
3.3 Montaj Hatlarının Dengelenmesi Problemine Yönelik Tanımlar	14
3.3.1 İş ögesi	14
3.3.2 İş istasyonu.....	15
3.3.3 Süre	15
3.3.4 Denge kaybı	17
3.3.5 Gerekli en az iş istasyonu sayısı	17
3.3.6 Teknolojik öncelik diyagramı ve öncelik matrisi	18
3.3.7 Düzgünlük indeksi	19
3.3.8 Esneklik oranı	20
3.3.9 Hat etkinliği.....	20
3.3.10 Kuramsal etkinlik	20
3.4 Montaj Hattı Dengeleme Yöntemlerinin Sınıflandırılması	21

3.4.1 Çözüm yaklaşımına göre sınıflandırma.....	21
3.4.1.1 Sezgisel yöntemler	21
3.4.1.2 Analitik yöntemler.....	23
3.4.1.3 Benzetim yöntemleri	23
3.4.2 Probleme göre sınıflandırma	24
3.4.2.1 Amaç sayısına göre	24
3.4.2.2 Amaca göre	25
3.4.2.3 Ürün çeşidi sayısına göre	25
3.4.2.4 İstasyondaki işçi sayısına göre	27
3.4.2.5 Hattın durumuna göre.....	27
3.4.2.6 Diğer sınıflandırmalar	27
3.4.3 İşlem sürelerinin deterministik olup olmaması durumuna göre sınıflandırma.....	28
3.5 Montaj Hatlarının Dengelenmesine Yönelik Kısıtlar.....	29
3.5.1 Birincil (Temel) kısıtlar.....	29
3.5.2 İkincil (Yan) kısıtlar	29
3.6 Sezgisel ve Analitik Dengeleme Yöntemlerine Yönelik Sayısal Örnekler	31
3.6.1 Konum ağırlıklı dengeleme tekniğine yönelik sayısal örnek	31
3.6.2 Tamsayı programlama ile dengeleme tekniğine yönelik sayısal örnek ..	36
4. ERGONOMİK ETMENLER VE MONTAJ HATTI Dengeleme	45
4.1 Ergonomi Bilimi ve Amacı	45
4.2 Ergonomiye Sistem Yaklaşımı	46
4.3 Ergonomik Ölçütler	48
4.4 Ergonomik Uygulamaların Yararları.....	48
4.5 İşyeri Düzenlemelerinde Ergonomik Yaklaşımlar	50
4.5.1 Antropometrik açıdan işyeri düzenleme	50
4.5.2 Psikolojik açıdan işyeri düzenleme	50
4.5.3 Fizyolojik açıdan işyeri düzenleme.....	51
4.5.4 Bilgi tekniğine dayalı işyeri düzenleme	52
4.5.5 Güvenlik tekniğine dayalı işyeri düzenleme	52
4.6 İş İle İlgili Risk Etmenleri	53
4.7 Ergonomik Risk Değerlendirme Yöntemleri.....	54
4.7.1 Öznel değerlendirmeler	55
4.7.2 Gözleme dayalı yöntemler	55
4.7.3 Doğrudan ölçüm yöntemleri.....	56
4.8 Gözleme Dayalı Yöntemlere Yönelik Sayısal Örnekler	56
4.8.1 Mesleki yinelemeli hareketler indeksi (OCRA) sayısal uygulaması	56
4.8.2 Hızlı tüm vücut değerlendirmesi (REBA) sayısal uygulaması	63
4.8.2.1 A puanının hesaplanması	68
4.8.2.2 B puanının hesaplanması.....	68
4.8.2.3 C puanının ve REBA skorunun hesaplanması	69
4.8.3 Hızlı üst uzuv değerlendirmesi (RULA) sayısal uygulaması.....	69
4.8.3.1 A puanının hesaplanması	74
4.8.3.2 B puanının hesaplanması.....	74
4.8.3.3 C puanının ve RULA skorunun hesaplanması	75
5. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	77
5.1 I tipi Montaj Hatlarının Dengelenmesine Yönelik Yapılan Çalışmalar	77
5.2 U tipi Montaj Hatlarının Dengelenmesine Yönelik Yapılan Çalışmalar.....	80
5.3 Ergonomik Koşullar Altında Montaj Hattı Dengeleme Konusunda Yapılan Çalışmalar	87

6. ENDÜSTRİYEL UYGULAMA.....	91
6.1 Amaç	91
6.1.1 Firmanın tanıtımı.....	91
6.1.2 Yazılım tanıtımı	94
6.1.3 İş öğeleri tanıtımı	94
6.1.4 Teknolojik öncelik diyagramı	94
6.1.5 Öncelik matrisi	94
6.2 0-1 Tamsayı Programlama Modeli ve GAMS ile Montaj Hattı Dengeleme .	98
6.2.1 İş öğelerine ait REBA skorları dikkate alınmadan montaj hattının dengelenmesi	98
6.2.2 İş öğelerine ait REBA skorları dikkate alınarak montaj hattının dengelenmesi	99
6.3 Performans Ölçütleri	100
6.3.1 Zaman performansı ölçütü	100
6.3.2 REBA performansı ölçütü.....	100
6.3.3 Toplam performans ölçütü	101
6.4 Atamalar Sonrası Montaj Hattı Durum Analizi	102
6.5 Duyarlılık Analizi.....	103
7. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	105
7.1 Sonuçlar.....	105
7.2 Öneriler.....	106
KAYNAKLAR	109
ÖZGEÇMİŞ.....	119



KISALTMALAR

ATO	: Assemble/Finish to Order
BMHDP	: Basit Montaj Hattı Dengeleme Problemi
BTO	: Buy to Order
CIM	:Computer Integrated Manufacturing
CMS	:Cellular Manufacturing Systems
CTO	: Configure to Order
DI	:Düzgünlük İndeksi
DPS	: Dynamic Production Systems
ETO	: Engineer to Order
FMS	:Fleivable Manufacturing Systems
GA	: Genetik Algoritma
GAMS	: General Algebraic Modeling Systems
GES	:Grouping Evolution Strategy
HE	:Hat Etkinliği
HPS	: Hybrid Production Systems
ICA	: Imperialist Competitive Algorithm
JIT	:Just In Time
KE	:Kuramsal Etkinlik
MC	:Mass Customization
MHD	: Montaj Hattı Dengeleme
MOGA	: Multi-Objective Genetic Algorithm
MTS	: Make to Stock
OCRA	: Occupational Repetitive Actions Index
ÖS	: Önerilen Sıklık
ÖSÇ	: Önerilen Sıklık Çarpanı
QEC	: Quick Exposure Check
PBABC	: Pareto Based Artificial Bee Colony Algorithm
REBA	: Rapid Entire Body Assessment
RNLE	: Revised National Institute for Occupational Safety and Health
RULA	: Rapid Upper Limb Assesment

STS : Ship to Stock
VDS : The Visual Decision Platform
VDS : Teknik Hareket Sıklığı



SEMBOLLER

C	: Çevrim süresi
C*	: Ortalama iş istasyonu süresi
DP	: Yetersiz dinlenme periyodu çarpanı
H	: Isı miktarı
K	: Kuvvet çarpanı
M	: Montaj hattındaki iş istasyonu sayısı
n_{enk}	: Gerekli en az iş istasyonu sayısı
n_{olası}	: Gerekli iş istasyonu sayısı
P	: Postür çarpanı
T	: Tekrarlılık çarpanı
t^{mak}	: iş istasyonu sürelerinin en büyüğü
t_i	: i. adımın işlem süresi
TİS	: Tekrarlı işlerin vardiyadaki süresi çarpanı
Y	: Öncelik matrisinde sıfır olan hücre sayısı



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1 : Örnek teknolojik öncelik diyagramının öncelik matris formu.	19
Çizelge 3.2 : Her iş ögesinin azalan konum ağırlıklarına göre sıralanmış durumu..	33
Çizelge 3.3 : Her iş ögesinin konum ağırlıkları	34
Çizelge 3.4 : Örnek için dengeleme sonuçları	35
Çizelge 3.5 : İşlem süreleri ve öncül öğeler.	38
Çizelge 4.1 : Uygunsuz duruş ve hareketlerin çevrim süresindeki ağırlığına göre belirlenen postür çarpanı değerleri(Can, 2013).	58
Çizelge 4.2 : Çeşitli kuvvet uygulamaları için K kuvvet çarpanı değerleri(Can, 2013).....	59
Çizelge 4.3 : Sayısal uygulama ait OCRA parametreleri(Can, 2013).	61
Çizelge 4.4 : Montaj hattı OCRA indeksleri (Can, 2013).	62
Çizelge 4.5 : REBA yönteminde gövde, boyun ve bacak puanları (Sağiroğlu ve diğ, 2015).....	63
Çizelge 4.6 : REBA yönteminde bilek, üst kol ve alt kol puanları (Sağiroğlu ve diğ, 2015).....	64
Çizelge 4.7 : A ve B puanlarının kombinasyonundan C puanının elde edilmesi (Sağiroğlu ve diğ, 2015).	64
Çizelge 4.8 : A ve B puanlarının kombinasyonu (Sağiroğlu ve diğ, 2015).	65
Çizelge 4.9 : REBA yönteminde gövde, boyun ve bacak puan hesaplama puanları(Sağiroğlu ve diğ, 2015).....	65
Çizelge 4.10 : REBA yönteminde bilek, üst kol ve alt kol puan hesaplama puanları (Sağiroğlu ve diğ, 2015).	66
Çizelge 4.11 : Taşınan yük puanı ve tutuş puanı hesaplama tablosu (Sağiroğlu ve diğ, 2015).....	67
Çizelge 4.12 : Aktivite yoğunluğu puanı hesaplama tablosu (Sağiroğlu ve diğ, 2015).	67
Çizelge 4.13 : Üst kol, alt kol ve el bileklerinin puanları (Can, 2013).	70
Çizelge 4.14 : Boyun, gövde ve bacakların puanları (Can, 2013).	70
Çizelge 4.15 : C ve D puanlarının kombinasyonu (Can, 2013).	71
Çizelge 4.16 : RULA mâruzîyet puanı değerlendirme ölçekleri (Can, 2013).	72
Çizelge 4.17 : RULA skoruna yönelik üst kol, alt kol ve bilek puanı hesaplama tablosu (Can, 2013).	72
Çizelge 4.18 : RULA skoruna yönelik boyun, gövde ve bacak puanı hesaplama tablosu (Can, 2013).	72
Çizelge 5.1 : I tipi montaj hattı dengeleme literatürü matrisi.	79
Çizelge 5.2 : U tipi montaj hattı dengeleme literatürü matrisi	86
Çizelge 6.1 : İş öğeleri ve işlem süreleri.....	95
Çizelge 6.2 : Gövde grubu iş öğelerinin öncelik matrisi.	97

Çizelge 6.3 : REBA skorları dikkate alınmadan gövde grubu montaj hattının dengeleme sonuçları	98
Çizelge 6.4 : REBA skorları dikkate alınarak gövde grubu montaj hattının dengeleme sonuçları	99
Çizelge 6.5 : Performans ölçütleri	102
Çizelge 6.6 : REBA skorlarının dikkate alındığı ve çevrim süresin arttırıldığı gövde grubu montaj hattının dengeleme sonuçları.....	103
Çizelge 6.7 : REBA skorlarının dikkate alındığı ve REBA limitinin arttırıldığı gövde grubu montaj hattının dengeleme sonuçları.....	104



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Üretim sistemlerinin basit sınıflandırılması (Işın, 2018).	4
Şekil 2.2 : Üretim sistemlerinin sınıflandırılması.....	5
Şekil 2.3 : Hat doğrultusuna göre sınıflandırılan montaj hatları (Maynard, 1969). ..	11
Şekil 2.4 : İşlevlerine göre montaj hatları tipleri (Erkut ve Baskak, 1997).	12
Şekil 3.1 : n istasyonlu bir montaj hattında çevrim sürelerinin alt süreleri (Baskak, 2017).	16
Şekil 3.2 : Örnek bir teknolojik öncelik diyagramı.	19
Şekil 3.3 : Montaj hattı dengeleme problemlerine yönelik çözüm yaklaşımları.	21
Şekil 3.4 : Tek modellenli montaj hattı örneği.	26
Şekil 3.5 : Çok modellenli bir montaj hattı örneği a) 1-2-3-4-5 no.'lu parçaların birleştirilmesi ile üretilen ürün modeli, b) 6-7-8-9-10 no.'lu parçaların birleştirilmesi ile üretilen ürün modeli (Tanyaş ve Baskak, 2012).	26
Şekil 3.6 : Karışık modellenli modellenli bir montaj hattı örneği (Tanyaş ve Baskak, 2012).	26
Şekil 3.7 : Montaj hattı dengeleme problemlerinin sınıflandırılması.	28
Şekil 3.8 : Montaj hattından örnek bir otomatik cam alma kolu (Url-1).	30
Şekil 3.9 : Konum ağırlıklı dengeleme tekniği ile çözümü yapılan teknolojik öncelik diyagramı.	33
Şekil 3.10 : 0-1 tamsayılı programlama dengeleme tekniği ile çözümü yapılan teknolojik öncelik diyagramı.....	39
Şekil 4.1 : Ergonomiye sistem yaklaşımı (Bağış, 2013).	47
Şekil 4.2 : OCRA sayısal uygulamasında kullanılan montaj diyagramı (Can, 2013).	60
Şekil 4.3 : Hesaplanan puanlara göre REBA skorlama algoritması (Sağiroğlu ve diğ, 2015).	65
Şekil 4.4 : REBA yönteminde gövde, boyun ve bacak duruşları (Sağiroğlu ve diğ, 2015).	66
Şekil 4.5 : REBA yönteminde bilek, üst kol ve alt kol duruşları (Sağiroğlu ve diğ, 2015).	67
Şekil 4.6 : Elde edilen puanlara göre RULA skorlama algoritması (Can, 2013).	71
Şekil 4.7 : RULA skorlamada üst kol, alt kol ve bilek duruşları (Can, 2013).	73
Şekil 4.8 : RULA skorlamada boyun ve gövde duruşları (Can, 2013).	73
Şekil 6.1 : Arçelik Çayirova yerleşkesi.	91
Şekil 6.2 : Arçelik Çayirova çamaşır makinası fabrika ve montaj hattı görüntüleri.	92
Şekil 6.3 : Gövde grubu iş öğelerinin teknolojik öncelik diyagramı.....	96



ERGONOMİK ETMENLER DİKKATE ALINARAK MONTAJ HATLARINDA DENGELEME YAPILMASI VE BİR FABRİKA UYGULAMASI

ÖZET

Yaşadığımız yüzyılda çoğalan nüfusa paralel olarak tüketim mallarına olan talep hızla artmaktadır. Bu nedenle arzın karşılanabilmesi için kitle üretimine yönelmek kaçınılmazdır. Kitle üretimi ise ancak iş gücünün etkin şekilde dağıtılması ile olanaklıdır. Bunun sonucu olarak montaj hatları kavramı ortaya çıkmıştır.

Montaj hatları bir ürünü oluşturmak üzere o ürünün parçalarının, bir akış hattı boyunca insan ve/veya makina yardımı ile birleştirilmesi sonucu oluşturulan üretim sistemleri olarak tanımlanabilir. Montaj hatlarının kurulması ve bakımları, işletmeye ciddi bir mâliyet yaratmaktadır. Bu nedenle montaj hatlarının dengelenmesi yâni bir başka ifade ile hattaki boş zamanın enküçüklenmesi ile montaj hatları etkin bir şekilde çalışabilmektedir. Dolayısıyla montaj hatlarındaki en önemli unsur montaj hatlarının dengelenmesi işleminin yapılmasıdır.

Montaj hattı dengeleme problemi, literatürde birçok araştırmacı tarafından irdelenmiştir. Bununla birlikte yapılan çalışmaların pek azında insan etmeni dikkate alınmıştır. İnsan etmeninin ilk sırasında ise ergonomik kısıtlar gelmektedir. Ergonomik kısıtlar, işlerin insan fizyolojisinin uygunluğuna göre iş istasyonlarına atanmasını sağlamaktadır. Dolayısıyla yapılan çalışmaların birçoğunda sözkonusu ergonomik kısıtlar gözardı edildiği için, elde edilen sonuçlar gerçek durumu yansıtmamaktadır.

Yapılan bu tez çalışmasında ergonomik etmenler dikkate alınarak bir montaj hattının dengelenmesi irdelenmiş ve gerçek veriler kullanılarak bir fabrika uygulaması yapılmıştır. Bu amaçla öncelikli olarak üretim ve montaj hattı dengeleme ilkeleri incelenmiştir.

Çalışmanın sonraki aşamasında, montaj hatlarının dengelenmesine yönelik kavramlar ayrıntılı olarak irdelenmiştir. Montaj hatlarının dengeleme yöntemlerinin sınıflandırılması yapılmış ve literatürde yer alan sayısal örnekler uygulamalı olarak gösterilmiştir.

Çalışmanın üçüncü kısmında ise, ergonomik etmenler altında montaj hattı dengeleme ile ilgili literatür araştırmaları yapılmıştır. Bu amaçla literatürde bulunan ergonomik risk düzeyi yöntemleri incelenmiştir. Ayrıca gözleme dayalı sayısal örneklerle yönelik uygulamalar da verilmiştir.

Yapılan çalışmanın son aşamasında, halihazırda üretim yapılan Arçelik Çayirova Çamaşır Makinası işletmesindeki gövde grubu montaj hattında sayısal uygulama yapılmıştır. Bu amaçla GAMS programı ve CPLEX çözücüsü kullanılarak sözkonusu hattın ergonomik koşulları dikkate alınarak hat dengelemesi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, ergonomik koşullar dikkate alınmadan yapılan montaj hattı dengeleme sonuçları ile karşılaştırılmıştır.



ASSEMBLY LINE BALANCING PROBLEM BY CONSIDERING THE ERGONOMIC FACTORS AND A FACTORY APPLICATION

SUMMARY

In parallel with the increase in population in the present century, demand on consumer goods is also rapidly increasing. It is therefore inevitable to turn towards mass production in order to meet this demand. Mass production is possible only by distributing the workforce in an effective way by using the concept of assembly lines.

An assembly line can be defined as a production system established to assemble the parts of a product with the help of manpower and/or machines through a flow line in order to create the product. On the other hand, construction and maintenance of these assembly lines result in high costs for factory.

For this reason, the assembly lines can be effectively operated by solving the assembly lines balancing problems, i.e. minimizing the non-operative time. Otherwise, a non balanced line cause a loss of production and also cost will increase rapidly. Therefore, primary problem for the managment of assembly lines is balancing of the assembly line

The assembly lines balancing problem is deeply studied by many researchers in the literature. Studies are focused on minimizing the number of stations and/or decreasing the cycle time. However, human factor was not taken into consideration during these studies except for a few ones. For this reason, the results obtained do not reflect the truth as these ergonomic limitations are usually neglected in most of the studies.

The first aspect of the human factor is ergonomic limitations. Ergonomic limitations enable the distribution of tasks to the working stations in accordance with the human physiology. Repetation of the similar jobs by the same workes along the assembly line increases the pressure on the employee and also the probability of the defective manufacturing.

In addition, working on assembly line that is not balanced in terms of ergonomic factors increase the occupational diseases. Therefore, ergonomic constraints should be taken into consideration during the assembly line balancing problem. Thus, assembly line balancing including the ergonomic constraint is not only increases the efficiency of worker on assembly line but also makes cost saving.

In this study, balancing of an assembly line was investigated. During the study ergonomic constraints are taken into consideration. In addition, a factory application was realized using real-time data to obtain the assembly line balancing problem including ergonomic constraints for the real life application in order to analyse the problem more realistic.

Definition of the production and assembly lines principles were given in the first part of the study. In this regard, production can be defined as a set of activities that enable the creation of products and/or services to meet the requirements of society. Production systems can be generally divided into two main group, conventional and modern. Fitting together the component parts of the product by considering the priority order is called the assembly. Production lines in which assembly processes are conducted, defined as assembly line.

Production in automotive, electronics etc. industries are commonly based on assembly lines. For instance, some components of the washing machine manufacturing are thermostat, pump, shock absorbers, main cable groups, motor, capacitor etc. The assembly lines for the production of the washing machine are the lines in which all these main and internal parts assembled on a line (assembly line) to produce the final product.

In the next phase, concepts on assembly line balancing were studied in detail. In this regard, the main issue affecting the cost saving is finalizing the product in assembly line within the minimum time. Therefore, primary problem in assembly line management is to perform assembly line balancing. This can be achieved by grouping of tasks of consecutive workstations.

Constraints such as time, position, priority of process, can be assigned for the assembly line balancing problem. These constraints are effective especially in objective function for assembly line balancing problems. Therefore, it is necessary to assign tasks to the workstation optimally by considering the certain constraints in assembly line balancing problem.

Categorization of assembly lines balancing problem methods were also performed and numerical examples from the literature were investigated in second phase of this study. In this regard, an integer programming algorithm and ranked positional weight technique for assembly line balancing problem is examined.

In the third phase, literature research related to the assembly line balancing problems considering the ergonomic limitations was conducted. Accordingly, methods of ergonomic risk levels in the literature were studied. In this regard, Occupational Repetitive Actions Index (OCRA), Rapid Upper Limb Assessment (RULA), Rapid Entire Body Assessment (REBA) etc. are the main methods based on simple observation while The Visual Decision Platform (VDP), 3D Match, TRAC, Ergo-Man, Sammie Cad, 3DSSPP, Jack Model, Human Builder Model etc. are the improved observation methods.

In addition, some numerical studies were provided based on observation in third part of this thesis. In these numerical studies, Rapid Upper Limb Assessment (RULA) method and Rapid Entire Body Assessment (REBA) method are taken into consideration and ergonomic scores based on these simple observations are obtained by using the formula defined in this study.

In the final phase of this study, a numerical application was conducted in the Arçelik Washing Machine factory. This factory is located in Çayirova, Kocaeli, Turkey and the production already continues. Therefore, real time inputs such as workstations (totally 51 workstations), processing time and also Rapid Entire Body Assessment (REBA) scores are used for the assembly line problem. Thus, obtained results from assembly line balancing problem reflects the real life application not only more precisely but also more realistic.

First of all, precedence diagram is achieved and thereafter precedence matrix is generated. Secondly, assembly line balancing problem is implemented into the software in order to obtain the results with/without the ergonomic factors.

Assembly line balancing problem including the ergonomic constraints was investigated by using the General Algebraic Modeling System (GAMS) program and the IBM ILOG CPLEX Optimization Studio solver. During the analyses 0-1 integer programming model is used.

Solution of the assembly line balancing problem without ergonomic factors shows that totally 18 workstation is required. The maximum workstation time is obtained as 15.3 second. The maximum REBA score is calculated as 20. On the other hand, assembly line balancing problem is solved also by considering the ergonomic constraints. The total workstation and workstation time is obtained as 18 and 15.3 respectively. The maximum REBA score is calculated as 13 since the ergonomic constraints are taken into consideration during solution.

Performance criteria based on time, REBA score and total are also investigated during the analyses. Moreover, sensitivity analyses are also performed. Results were compared with the results of the assembly line balancing without considering the ergonomic constraints.

According to the obtained results, totally 51 tasks are assigned to the 18 workstations. Time performance of the assembly line is achieved as 9.38%. REBA performance of the assembly line is calculated as 45.73% for the problem not considered the ergonomic constraints and 26.92% for the problem based on ergonomic constraints. The total performance criteria is obtained as 27.55% and 18.15%, respectively for the problem not considered the ergonomic constraints and the problem based on ergonomic constraints. The results show the increasing in performance criteria.

The following studies may expand the research by implementing the other methods such as RULA or OCRA instead of REBA score for the ergonomic constraints. In addition, the effect of increasing the tasks in assembly line balancing problem can be investigated. Moreover, parallel lines can be taken into consideration during analyses. Assembly line balancing problem can be investigated not only for the minimizing the number of workstation but also minimizing the cycle time and also increasing the line efficiency in future studies.



1. GİRİŞ

Günümüzde nüfusun hızla artmasına paralel olarak ivmelenen talebe karşılık yeterli arzın sağlanabilmesi, ancak kitle üretimi ile olanaklı olmaktadır. Kitle üretimi ise ancak uzmanlaşmış işgücü ile etkin iş bölümünün üretimde kullanılması ile gerçekleştirilebilir. Bu amaçla ilk olarak 20. yy. başlarında Ford firması tarafından kullanılan montaj hatları, talep miktarı yüksek olan ürünlerin mâliyetini azaltmış, üretimi etkin duruma getirerek üretim süresini kısaltmış, böylelikle ürün geniş kitlelere yayılabilmektedir.

Montaj hatlarının kurulması, düzenlenmesi ve bakımları, üretim mâliyetlerinde çok ciddi bir yere sahiptir. Dolayısıyla montaj hatlarının etkin bir şekilde çalışabilmesi, ancak ve ancak hattın iyi dengelenmesi ile yâni belirli koşullar altında hattaki boş zamanın en aza indirgenmesi için işlerin iş istasyonuna atanmasıyla olanaklı olmaktadır. Aksi durumda, iyi dengelenmemiş bir hat üretimde zaman kaybına ve çok ciddi bir mâliyet artışına da neden olacaktır. Dolayısıyla montaj hattı yönetimindeki birincil sorun, montaj hattı dengelemesidir.

Montaj hattı dengeleme problemi, pek çok araştırmacı tarafından çeşitli yöntemler kullanılarak, genellikle istasyon sayısının ve/veya çevrim süresinin en aza indirilmesi ile irdelenmiştir. Bununla birlikte yapılan çalışmaların pek çoğu, insan etmenini ihmal ettiği için hâlihazırdaki reel sektör uygulamalarını tam olarak yansıtamamaktadır.

İnsan etmeninin ilk sırasında yer alan ergonomik kısıtlar, işlerin zorluk derecelerine yâni bir başka ifadeyle insan fizyolojisi için uygunluğuna göre işlerin iş istasyonlarına atanmasını sağlamaktadırlar. Aynı işlerin hat boyunca aynı kişiler tarafından yinelemeli olarak yapılması sonucunda çalışan üzerindeki baskı ve işçinin hata yapma oranı giderek artmaktadır. Ek olarak, ergonomik kısıtlar altında dengelenmeyen bir hatta çalışan işçinin meslekî hastalıklara yakalanma olasılığı yükselmektedir. Dolayısıyla, hat dengelemesi yapılırken mutlaka ergonomik kısıtlarında dikkate alınması gerekmektedir. Böylece hat üzerinde çalışan işçinin

performansının artması sağlanmaktadır. Aynı zamanda, ergonomik kısıtlar altında dengelenmiş bir hat, gerçek zamanlı ve uygulanabilir olmakta, böylece uygulamada çok daha fazla kabul görmektedir.

Bu çalışmanın amacı, montaj hatlarında ergonomik etmenler altında montaj hattı dengelemesidir. Bu amaçla tezin ilk bölümünde üretim ve montaj hattı kavramları ayrıntılı olarak anlatılmıştır. Sonraki aşamada, montaj hattı dengeleme probleminde amaç, tanım, yöntem ve kısıtlar incelenmiştir.

Çalışmanın üçüncü kısmında ergonomik etmenler altında montaj hattı dengeleme ilkeleri araştırılmıştır. Bu amaçla literatürde bulunan ergonomik risk düzeyi yöntemleri irdelenmiştir.

Çalışmanın son bölümünde, fabrika uygulaması olarak hâlihazırda üretimde bulunan bir montaj hattı verileri sayısal olarak ele alınmıştır. Bu amaçla Arçelik Çayırova Çamaşır Makinası İşletmesinde bulunan gövde grubu montaj hattında ergonomik koşullar dikkate alınarak hat dengelemesi yapılmış ve elde edilen sonuçlar, ergonomik koşullar dikkate alınmadan yapılan hat dengeleme sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

2. ÜRETİM VE MONTAJ HATLARI

2.1 Üretim

Genel bir bakış açısıyla üretim, bir işletmenin, kaynaklarını kullanarak (maddî ve beşerî), gereksinimleri karşılayacak şekilde mal veya hizmet oluşturmaktır (Işın, 2018). Bir başka ifade ile ekonomik değeri olan herhangi bir ürünü ortaya çıkarma işlemine üretim denir (Baskak, 2017). Üretim, belirli girdilerin işlemler sonucunda mal veya hizmet hâline dönüştürülmesi olarak da tanımlanabilir (Tekin, 2005). En genel tanımı ile üretim, toplumun gereksinimlerini karşılamak üzere mal(ürün) veya hizmet oluşturulmasını sağlayan faaliyetlerin bütünüdür.

Mühendis ve ekonomistler için ise üretim iki farklı tanım altında açıklanmaktadır. Ekonomistler için üretim yarar yaratmak (fayda oluşturmak) iken mühendisler için üretim, hammadde veya yarı mamullerde değişiklik yaparak nihai halde kullanılabilir bir mamul yaratmak işidir (Kobu, 1979).

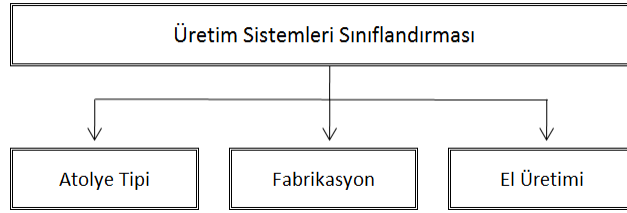
Sistem en yalın haliyle birbirleri ve çevresi ile süreçler bazında etkileşimde olan belirli bir amaca yönelik öğeler topluluğu olarak tanımlanabilir. Üretim sisteminin girdileri(kaynakları) ise doğa, emek, sermaye ve yönetim olarak sıralanabilir. Üretim sonucu bu girdiler ürün veya hizmete dönüştürülürler (Baskak, 1998).

Üretim yönetimi, üretim sistemindeki faaliyetlerin düzenlenmesini sağlar. Bir başka ifade ile üretim yönetimi, hâlihazırda bulunan kaynakların (girdilerin), istenilen nitelikte, zamanda ve en düşük mâliyetle ürün olarak üretimini sağlayacak biçimde bir araya getirilmesidir.

2.2 Üretim Sistemlerinin Sınıflandırılması

Ekonomik anlamda katma değeri olan mal veya hizmet sürecinin bütünü üretim olarak tanımlanabilir. Üretim sistemi tipinin belirlenmesi ise üretim plânlamasının ilk aşamasıdır. Üretim sistemleri, en basit durumda Şekil 2.1’de gösterildiği şekilde

atölye tipi, fabrikasyon ve el üretimi olmak üzere üç ana başlık altında irdelenebilir (Işın, 2018).



Şekil 2.1 : Üretim sistemlerinin basit sınıflandırılması (Işın, 2018).

El üretimi sistemi zanaat şeklinde olup, genellikle üretimde tek bir kişi bulunmaktadır. El üretimi sisteminde sipariş üzerine üretim yapılır ve makinadan çok el emeği ile üretim gerçekleştirilir. Bu bağlamda kuyumculuk, zanaat tipi üretime örnek olarak verilebilir.

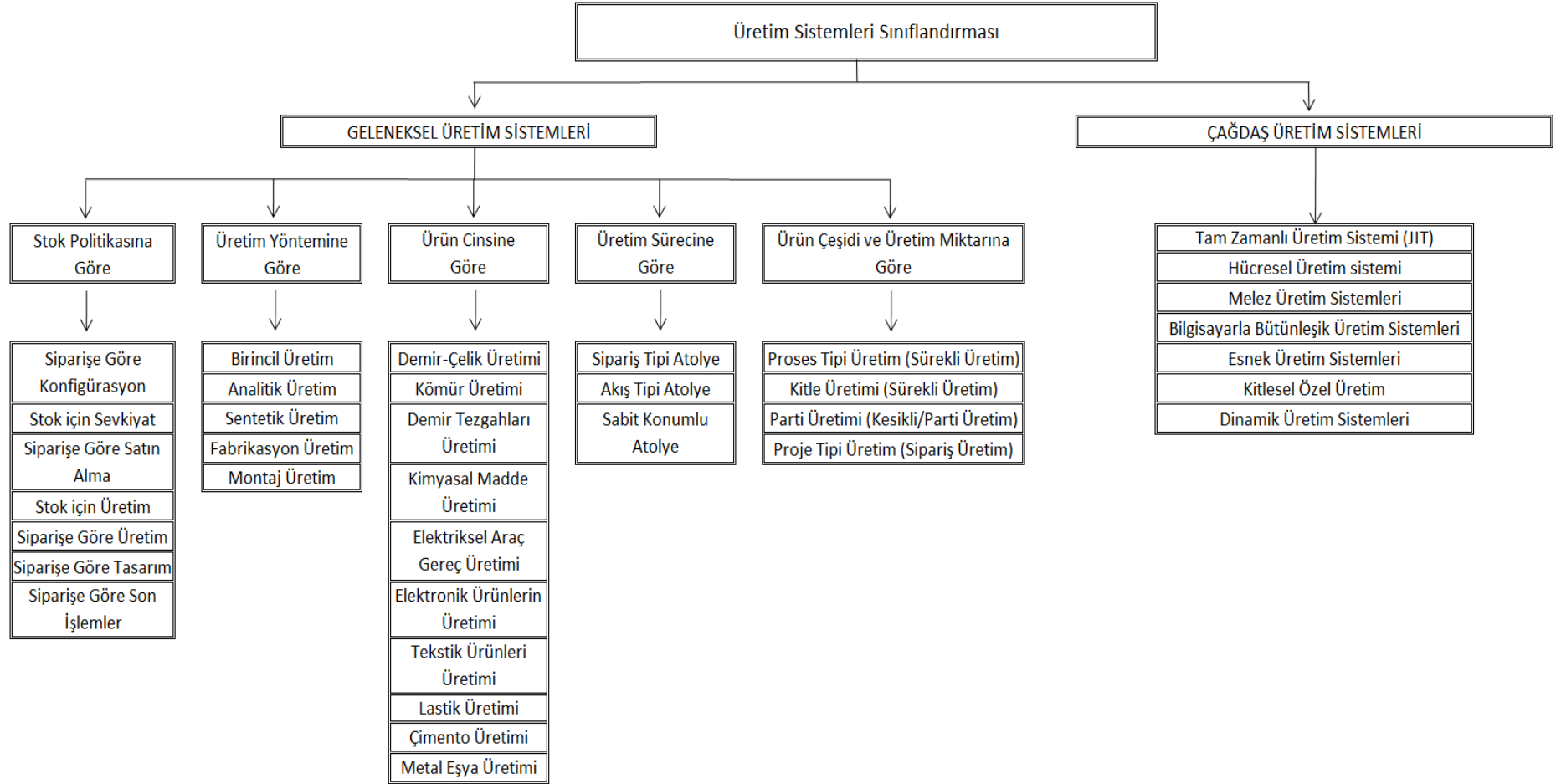
Atölye tipi üretim de el üretimi gibi emeğe dayalı olup, üretimin belirli aşamalarında farklı kişiler etkin olabilir. Bununla birlikte el ile üretim sisteminden farklı olarak uzmanlaşma çok daha gelişmiştir. Sipariş ile mobilya üretimi, atölye tipi üretime örnek olarak verilebilir.

Fabrikasyon üretim sisteminde ise el emeğinden ziyade çoğunlukla makinalar ile üretim gerçekleştirilmektedir. Bu tip üretimde sermaye gereksinimi çok daha fazla olup, teknolojik gelişmelerin yakından izlenmesi gereklidir.

Üretim sistemleri daha ayrıntılı olarak Şekil 2.2’de gösterildiği gibi geleneksel ve çağdaş üretim sistemleri olarak iki ana başlık altında sınıflandırılabilir (Baskak, 2017).

2.2.1 Çağdaş üretim sistemleri

- Tam zamanlı üretim (JIT: Just in time).
- Esnek üretim sistemleri (FMS: Flexible manufacturing systems).
- Hücreli üretim sistemleri (CMS: Cellular manufacturing systems).
- Bilgisayarla bütünleşik üretim sistemleri (CIM: Computer integrated manufacturing).
- Melez üretim sistemleri (HPS: Hybrid production systems).
- Dinamik üretim (DPS: Dynamic production systems).



Şekil 2.2 : Üretim sistemlerinin sınıflandırılması.

2.2.2 Geleneksel üretim sistemleri

Geleneksel üretim sistemlerine göre üretim, stok politikasına, üretim yöntemine, ürün cinsine, üretim süreci ile ürün çeşidi ve üretim miktarına göre olmak üzere beş ayrı başlıkta sınıflandırılabilir.

2.2.2.1 Ürüne uygulanan stok politikasına göre sınıflandırma

Ürüne uygulanan stok politikasına göre üretim sistemleri sipârişe göre konfigürasyon, stok için sevkiyat, sipârişe göre satınalma, stok için üretim, sipârişe göre üretim, sipârişe göre tasarım ve sipârişe göre son işlemler olmak üzere yedi gruba ayrılabilir.

Sipârişe göre konfigürasyonda (CTO: Configure to order) ürünler müşteriden gelen belirli bir spesifikasyona göre üretilir. Örneğin rafinerilerde kullanılan eşanjörlerin elde edilecek ürün tipine ve proses gereklerine bağlı veri föyünde (data sheet) yer alan bilgilere göre ürün üretimi gerçekleştirilir.

Stok için sevkiyatta (STS: Ship to stock) üretici güvence stokları bulundurarak müşteri talebine çok hızlı arz oluşturur. Dolayısıyla bu tip üretim sisteminde ürünler standart olup müşteri ürünü perakende olarak istediği zaman alabilir.

Sipârişe göre satın almada (BTO: Buy to order) ürün çeşitliliği çok olup, müşteri sipârişi ertesinde ürüne yönelik malzemeler tedârik edilerek üretim gerçekleştirilir. Çünkü sipârişe göre satın almada, üretilmesi istenen ürün çok özel olup hammaddeler stokta tutulmayacak kadar spesifikdir.

Stok için üretimde (MTS: Make to stock) müşteriye stok üzerinden ürün verilir ve müşteri herhangi bir özelleştirmeden söz edemez. Bir başka ifade ile müşteri stoktan mal alır ve îmalat/montaj süresini beklemez. Stok için üretim, ürünün stoklanması uygunsa yapılır. Örneğin bozulmaya veya depolanmaya dayanıksız kimyevî ürünlerin stok için üretilmesi uygun değildir. Ürüne sürekli bir pazar sağlanamazsa firmanın stok fazlası nedeniyle zarar görmesi kaçınılmaz olacaktır. Bu nedenle dayanıklı ürünlerde (örneğin beyaz eşya, bilgisayar vb.) stok için üretim uygundur.

Sipârişe göre üretim de (MTO: Make/Build to order) müşteri ürün üzerinde bir değişiklik isteyebilir ancak ürün stok için üretimde olduğu gibi çabuk hazırlanamaz. Dolayısıyla bu tip üretim sisteminde müşteri üretim için gereken süreyi dikkate

almalıdır. Mobilya sektörü sipariş için üretime örnek olarak verilebilir. Müşterinin kullanımına uygun boyutlarda ve adetlerde mobilya üretimi gerçekleştirilir. Bununla birlikte sipariş esaslı olduğu için maliyet ve teslim süresi stok için üretime göre daha fazladır. Bu nedenle sipariş ertesi teslim süresi olabildiğince kısa tutulmalıdır.

Siparişe göre tasarım (ETO: Engineer to order), siparişe göre üretime benzetmekle birlikte eşi olmayan ve karmaşık ürünlerin (örneğin takı tasarımı) üretimine yöneliktir. Dolayısıyla müşteri istekleri doğrultusunda herhangi bir bant hattına oturtulamayacak spesifik, karmaşık ve uzun imalat sürelerine sahip ürünler üretilir.

Siparişe göre son işlemler de (ATO: Assemble/Finish to order) her iki sınıflandırmanın bir çeşit karışımıdır. Üretim hâlihazırda elde tutulan bir kısım parça veya yarı ürün kullanılarak yapılır. Bu stok politikası, standart ürünler veya model farklılığı bulunan ürünler üzerine üretim yapan, örneğin beyaz eşya sektöründe üretim yapan firmalarca yeğlenir. Ürün için gerekli olan bileşenlerin bir kısmının elde hazır olması, teslim süresini kısaltmaktadır.

2.2.2.2 Üretim yöntemine göre sınıflandırma

Üretim yöntemine göre sınıflandırma beş sınıfa ayrılabilir. Birincil üretimde doğada hâlihazırda bulunan madenlerin işlenmesi ve çıkarılması vardır. Örneğin bakır, kömür, petrol vb. üretimi bu sınıfta değerlendirilebilir.

Analitik üretimde belirli işlemler sonucu temel hammaddelerden yararlanarak farklı ürünler elde edilir. Petrokimya endüstrisi (benzin, kerosen vb. üretimler) bu gruba örnek olarak verilebilir.

Analitik üretimin tersi olarak tanımlanabilecek sentetik üretim tipi sınıflandırmada, doğadan elde edilen hammaddeler, birleştirme işlemleri ile yeni ürünleri oluştururlar (örneğin kıyı liman endüstrisinde kullanılan usturmaçaların kauçukları).

Fabrikasyon üretimde, hammaddelerin şekillenmesi yoluyla yeni ürünler üretilir. Bu tip üretime örnek olarak çelik levhaların kesilmesinde kullanılan CNC tezgâhları, tornalama, döküm vb. ürünler verilebilir.

Montaj üretiminde ise beyaz eşya (buzdolabı, çamaşır makinası vb.), binek araçlar (otomobil, traktör vb.), teknolojik aletler (televizyon, bilgisayar vb.) gibi çok bileşenli ürünler, çeşitli hammadde, yarı ürün ve parçaların sistematik olarak birleştirilmesi yoluyla üretilir.

2.2.2.3 Üretim cinsine göre sınıflandırma

Üretim cinsine göre sınıflandırmada, üretilen ürünün nitelikleri yâni özellikleri, sistemin karakteristiklerinin belirlenmesinde rol oynar. Örneğin demir-çelik üretimi, kömür üretimi vb. üretimlerde, üretilen ürün kendi başına ağırlık taşır (Baskak, 2017).

2.2.2.4 Üretim sürecine göre sınıflandırma

Üretim sürecine göre sınıflandırma üç grupta toplanabilir. Sipariş tipi atölyede siparişler makinalar arasında sıraya alınarak üretim döngüsüne sokulur.

Akış tipi atölyede sisteme giren ürünler ardışık sıradaki etkinlikler vasıtası ile üretilirler. Üretim boyunca üretim hattı dengelemesi yapılabilmektedir.

Sabit konumlu atölyede ise her bir üretim parçası, ürünün yanına getirilerek, üretim belirli sabit bir noktada gerçekleştirilir. Bu tip sınıflandırmaya örnek olarak inşaat işleri (köprü, tünel vb.) verilebilir (Tanyaş ve Baskak, 2012).

2.2.2.5 Ürün çeşidi ve üretim miktarına göre sınıflandırma

Ürün çeşidi ve üretim miktarına göre sınıflandırma; proses tipi üretim, kitle, parti ve proje tipi üretim olmak üzere dört alt başlıkta toplanabilir. Proses tipi üretimde imalatı yapılan malzeme akışkandır. Ürün çeşidinin çok az olduğu bu tür üretimlerde müşterinin talepleri stoktan karşılanmaktadır. Yöntemlerin özel olduğu bu tür üretimlerde genellikle nitelikli işgücü gerekli değildir. Bu tip üretime örnek olarak kimyevî ürünler ve meşrubat ürünleri verilebilir (Tanyaş ve Baskak, 2012).

Kitle üretimi de adından da anlaşılacağı gibi aynı tip ürünlerin kitleler hâlinde üretildiği üretim tipidir. Hatlardaki makinaların özel olduğu bu tür üretimin amacı, serî ve çok sayıda ürün üretmektir. Bununla birlikte üretim hattının iyi dengelenmesi, hattın güvenilirliği ve onarımı, hammaddenin zamanında temini ile uygun ara stok miktarının belirlenmesi, kitle üretimi için kritik konulardır.

Parti tipi üretimde ise kitle tipi üretimin tersine, çok çeşitli ürünlerin kısıtlı miktarda üretimi söz konusudur. Dolayısıyla üretim hattı, sırası ile farklı ürünlere ayrılmalıdır. Bu tip üretim hatlarında, genel amaçlı donanımdan ve bunları kullanabilecek nitelikli işgücünden yararlanılır. Parti tipi üretimin belirgin özelliklerinden biri, kısa ve seri

retim uygulanmasıdır. Ayrıca sipariş tipi üretime göre maliyetler ve işin teslim süresi çok daha düşüktür (Kumar ve Suresh, 2008).

Proje tipi üretimde kitle ve parti tipi üretime göre üretim miktarları çok daha düşüktür (Işın, 2018). Bu tip üretim; adından da anlaşılacağı üzere spesifik bir projeye yönelik (örneğin köprü, tünel vs.) üretimi içermektedir (Baskak, 2017). Bir başka ifade ile proje üretiminde, üzerinde çalışılan ürünün tamamlanması ile süreç sona ermektedir. Üretilen ürünler genellikle sabit olduğu için; gerekli malzeme, donanım, tezgâh ve işgücü gibi araçlar, üretimin yapılacağı yere getirilir (Üreten, 2006).

Proses tipi ve kitle üretimleri sürekli üretim, parti tipi üretim aralıklı üretim ve proje tipi üretim ise sipariş tipi üretim alt başlıklarında sınıflandırılabilirler. Sürekli seri üretimlerin karakteristik özelliklerinden birisi standartlaştırılmış ürünlerdir. Ürünler büyük miktarlarda ve uzun süre sürekli bir biçimde üretilirler. Dolayısıyla makina ve tesisler standart bir ürün için özelleştirilmişlerdir. Sınırlı ürün çeşidi vardır ve ancak gereksinim durumunda değiştirilirler. Meşrubat, cam, petrokimya fabrikalarında yapılan üretimler, bu tip üretime örnek olarak verilebilir.

Kesikli seri üretimlerde ise seri üretime benzer şekilde belirli bir siparişin partiler halinde üretimi vardır. Ancak parti tamamlandıktan sonra diğer partinin üretimine geçilebilir. Talebin sürekli olduğu bu üretimde üretime konu partinin büyüklükleri ile parti adedi ve partilerin çizelgelenmesi (plânlanması) çözülmesi gereken iki önemli konudur (Baskak, 2017).

Sipariş tipi üretimde istenilen siparişi karşılamak üzere küçük partilerde üretilen ancak yüksek ürün çeşitliliğine sahip ürünler üretilir. Bir başka deyişle müşterinin belirlediği miktar ve kalitede ürünler üretilir (Üreten, 2006). Sipariş tipi üretim, az miktarda ürünün, yalnızca bir kez üretilmesi, talep oldukça belirli aralıklar ile ve talep oldukça belirsiz aralıklarla üretilmesi bakımından üç farklı alt grupta toplanabilir.

2.3 Montaj Hatları Kavramı

Ürünü oluşturan elemanların öncelik sırasına uygun olarak belirlenmiş bir düzende birleştirilmesi işlemine montaj denir. Montaj işlemlerinin meydana getirildiği üretim hattına ise montaj hattı denir (Ervural, 2012). Montaj hatları, endüstrilerde seri

Üretim verimliliğinin artmasına yönelik kullanılan en önemli araçlardan biridir (Takcı, 2013).

Montaj hatları; bant veya konveyör sistemi çevresine ardışık istasyonların yerleştirilerek her bir bileşenin ilgili iş istasyonlarında nihaî ürünü meydana getirecek bağlantılarının yapıldığı araçlardır. Montaj hatları, toplam iş yükünün anlamlı iş parçalarına ayrılıp, bu parçalar üzerindeki işlemlerin işgücü ve donanımdan yararlanılarak bir hat boyunca transfer edildiğı üretim sistemleridir (Tanyaş ve Baskak, 2012).

Montaj hatları kavramı ilk olarak 1914 yılında Henry Ford tarafından “Model T” adı verilen araba modellerinin üretilmesi ile ortaya çıkmıştır. Bu sâyede her bir işçi, montaj hattı boyunca araba parçasının yalnızca bir bileşeninden sorumlu olmuş ve üretim için geçen süre çok büyük oranda azalmıştır. Böylelikle günümüzde çok daha karmaşık ürünlerin büyük miktarlarda ve seri biçimde üretilmesinin n açılmıştır. Montaj hatlarının en önemli amaçlarından birisi kesintisiz bir üretim sağlayarak işgücü verimliliğinin arttırılması ile işlerin dengeli bir biçimde istasyonlara paylaştırılmasını sağlamaktır (Altuntaş ve İşlier, 2010).

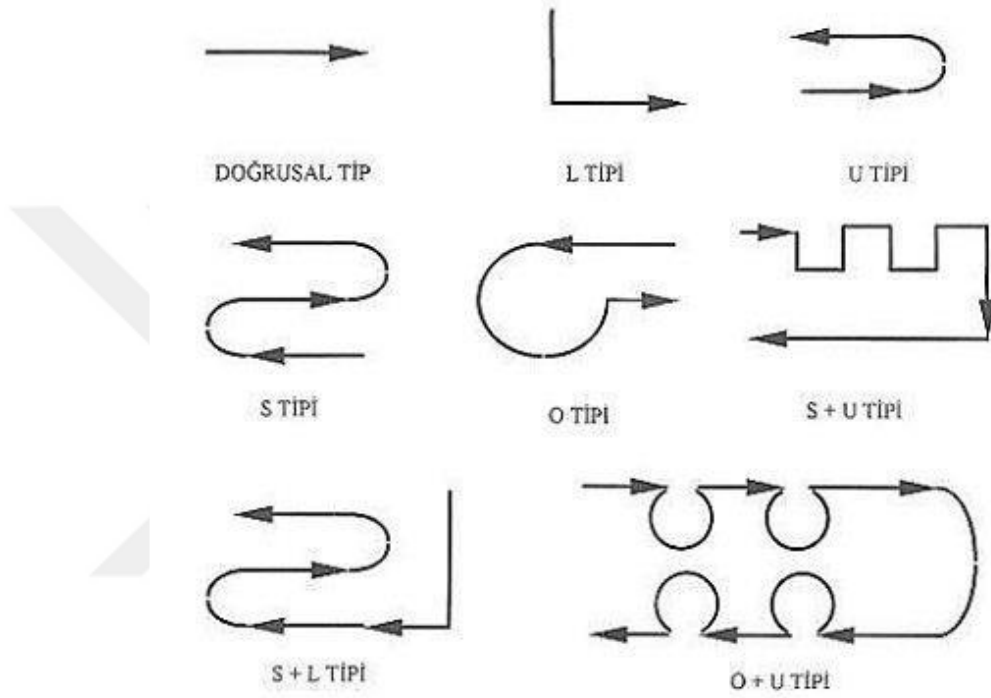
Montaj hatları; otomotiv, elektronik ve beyaz eşya endüstrisi olmak üzere birçok üretim sisteminin temelini oluşturmaktadır. rnek olarak çamaşır makinası üretimi yapan bir firma ele alınabilir. Çamaşır makinasının oluşturulmasında gerekli olan belli başlı ana parçalar; dış kasa gövde, krk, termostat, pompa, amortisörler, tıpalı hortum tutucu, ana kablo grupları, motor, kapasitör, terminal sacı olarak tanımlanabilir. Nihaî rn olan çamaşır makinasının oluşturulmasına yönelik tüm bu ana ve i parçaların bir hat üzerinde birleştirilmesi işleminin yapıldığı hatlar da bu çamaşır makinası üretimindeki montaj hatlarıdır.

2.4 Montaj Hatlarının Sınıflandırılması

2.4.1 Yerleşim tiplerine göre sınıflandırılma

Montaj hattı üzerinde bulunan istasyonların konumlarına göre montaj hatları düz(I), dairesel(O), L tipi, zigzaglı, U tipi, serpantin(S), rassal veya değişik açılı olarak sınıflandırılabilirler. Ayrıca şekil 2.3’de gösterildiğı üzere birleştirilmiş (kombine edilmiş) hat tipleri de endüstride kullanılmaktadır (Maynard, 1969).

En basit ve geleneksel montaj hatları, doğrusal tip montaj hatlarıdır. Bu hatlar genellikle iş sayısının az olması durumunda kullanılmaktadırlar. Süreçte çok fazla işin bulunması durumunda ise çoklukla Serpantin(S) tipi hatlar kullanılırlar. Ayrıca montaj hattı için dar bir alan olması veya düz hat tipine göre kullanılmayan (kayıp) alanın fazla kalması durumunda O tipi hatlar yeğlenmektedirler. Bu sâyede montaj hattının çok fazla yer kaplaması önlenerek, üretim alanında etkin bir yerleşim sağlanmaktadır.



Şekil 2.3 : Hat doğrultusuna göre sınıflandırılan montaj hatları (Maynard, 1969).

U tipi montaj hatları ise yeni üretim/montaj hatlarında çokça yeğlenen ve düz (I tipi) hatlara oranla başta işgücü verimliliği olmak üzere birçok üstünlüğü olduğu ifade edilen montaj hatlarıdır. Bu tip hatlar; düz, yâni doğrusal hat durumuna göre yerleşimde esneklik ve ürün çeşitliliğinin arttırılmasının gerektiği durumlarda sıklıkla kullanılmaktadır. Ayrıca U tipi hatlarda işçiler arasındaki etkileşim ile işgücü verimliliğinin arttırılması amaçlanmaktadır (Baskak, 2017).

2.4.2 Ürün çeşidi sayısına göre sınıflandırma

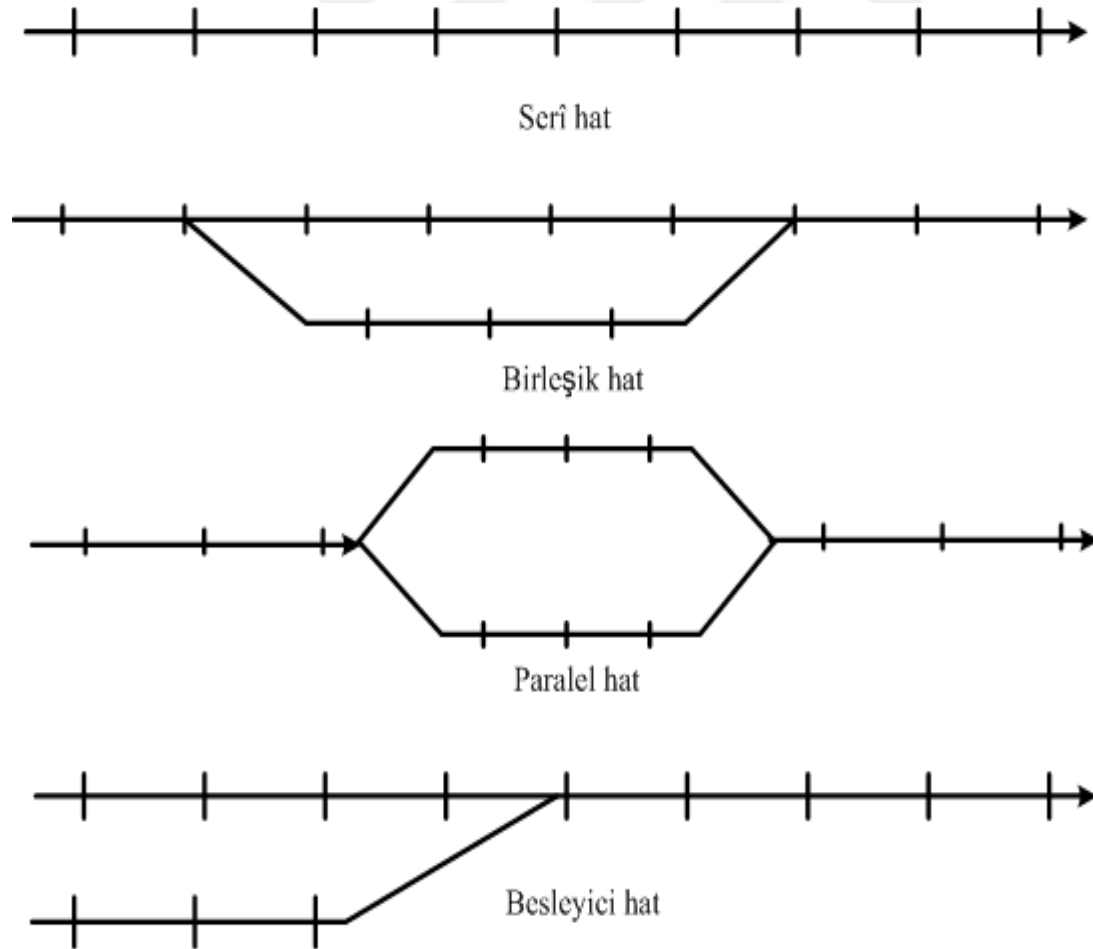
Montaj hatları, üzerinde üretilen ürünün çeşidine göre tek modelli, çok modelli ve karışık modelli olmak üzere üç farklı sınıfa ayrılırlar. Her bir problemin sınıflandırılması Bölüm 3.4.2.4’de ayrıntılı olarak anlatılmıştır.

2.4.3 İşlevlerine göre sınıflandırma

Montaj hatları; işlevleri bakımından seri, birleşik, paralel ve besleyici olmak üzere Şekil 2.4’de gösterildiği gibi sınıflandırılabilirler (Erkut ve Baskak, 1997).

Paralel montaj hatlarında, aynı veya benzer ürünler birbirlerine paralel olarak üretilirler. Böylelikle her bir montaj hattında değişik çevrim süreleri kullanılabilir. Ayrıca ortak alanların kullanılmasıyla hatların verimliliği artırılır (Çerçioğlu ve diğ, 2009).

Paralel montaj hatlarında her bir hattın üzerinde farklı bir ürün üretilir. Dolayısıyla paralel montaj hatları, farklı çevrim sürelerine sahip olabilirler. Ek olarak, çok hatlı istasyon nedeniyle çok daha etkin hat tasarımına olanak sağlar. Sonuç olarak paralel montaj hatları, ek mâlîyet getirmesine karşın üretim hızını arttırmada çok başarılıdır (Gökçen ve diğ, 2006). Bununla birlikte paralel montaj hatlarının dengelenmesi probleminin çözümleri karmaşıktır (Erkayman ve Gör, 2016).



Şekil 2.4 : İşlevlerine göre montaj hatları tipleri (Erkut ve Baskak, 1997).

3. MONTAJ HATLARININ DENGELENMESİ PROBLEMİNDE AMAÇ, TANIM, YÖNTEM VE KISITLAR

3.1 Montaj Hatları Dengelenmesi Kavramı

Üretim sistemindeki hammadde veya yarı ürünün, olabilecek en kısa sürede nihâî ürün hâline getirilerek sistemden ayrılması, ekonomik açıdan başarıyı etkileyen en önemli konudur. Üretim sistemi içindeki sürenin kısaltılması ise; insan, makina ve malzeme gibi parametrelerin sistem içindeki bekleme sürelerinin azaltılması ile olanaklıdır (Altuntaş ve İşlier, 2010). Dolayısıyla montaj hattı yönetimindeki birincil sorun, montaj hattı dengelemenin yapılması, yâni ardışık iş istasyonlarının görevlerinin gruplandırılarak düzenlenmesidir. Daha açık bir deyişle, belirli koşullar altında, hattaki âtıl (boş) zamanın en aza indirgenmesi amacıyla işlerin iş istasyonuna atanması işlemine montaj hattı dengeleme denir (Ağpak ve Gökçen, 2004).

Montaj hattı dengelenmesi çalışmaları, gereksinimi yüksek olan ürünlerin, verimli şekilde hızlı ve ucuz üretilmesi gereksiniminden doğmuştur (Eryürük ve diğ., 2014). Çünkü yüksek hacimli üretimlere yönelik kurulan montaj hatlarında en büyük sorun, kaliteden taviz vermeden düşük mâliyet ve hızlı üretimin sağlanmasına yönelik istasyonlar arasında iş öğelerinin dengeli dağıtılmasının sağlanmasıdır.

Montaj hattının etkin çalışabilmesi için, her bir iş istasyonundaki sürenin dengelenmesi gereksinimi oluşmaktadır. Bu sâyede montaj hattında geçen süre azaltılacak, üretim hızı yükselecek ve boş süre bırakılmayacak şekilde işlemler istasyonlara dağıtılacak, yâni montaj hattı dengelenmiş olacaktır. Bir diğ. deyişle, iyi dengelenmiş bir montaj hattı, her bir istasyondaki işçi ve/veya operatörün üretim süresince boşta kalan süresinin, sıfır veya sıfıra yakın olması durumudur. Dolayısıyla iyi dengelenmiş bir montaj hattında iş istasyonları arasındaki işlem süresi farkları toplamı en az olmalıdır. Dolayısıyla, montaj hatları dengelenirken, hat boyunca tüm iş istasyonlarında işin yapımı için gerekli olan süre eşit duruma dönüştürülmeye çalışılır (Tekin, 2005).

3.2 Montaj Hattı Dengelemenin Amaçları

Montaj hattı dengeleme problemi, en yüksek performans elde etmek üzere, iş istasyonlarındaki görevlerin, belirli bir çevrim süresi aşılmadan ve öncelik/önem ilişkileri gözetilerek istasyonlara tanımlanması problemi olarak ortaya çıkmaktadır. Böylelikle montaj hatlarında âtil hâlde bulunan sürenin kullanımına yönelik en iyi çözümün bulunması sağlanmakta ve montaj hatlarının verimliliği artmaktadır. Montaj hatlarının dengelenmesine yönelik belli başlı amaçlar ve hedefler ise, aşağıda maddeler hâlinde tanımlanmıştır:

- İş istasyonu sayısını en aza indirmek,
- Üretim mâliyetini düşürmek,
- Âtil süreleri iş istasyonlarına dengeli olarak dağıtmak,
- Çevrim süresini en aza indirmek,
- Montaj hattında düzenli bir malzeme akışı sağlamak,
- İnsan gücüne ve makinaya dayalı verimi en yüksek düzeye çıkarmak,
- Malzeme kullanımını en aza indirmek,
- Hâlihazırdaki kısıtları sağlamak,
- Hat dengeleme mâliyetini enazlamak.

Sözkonusu amaç ve hedeflerin tümünün aynı anda gerçekleştirilmesi, ancak ideal koşullar altında olanaklı olup, gerçek bir üretim hattında tümünün gerçekleşmesi çok zordur. Bu nedenle üreticinin ana amaçları (süre, mâliyet vb.) doğrultusunda içlerinden bir veya birkaçının en üst düzeye ulaştırılmasına yönelik montaj dengeleme çözümleri sunulmalıdır.

3.3 Montaj Hatlarının Dengelenmesi Problemine Yönelik Tanımlar

3.3.1 İş ögesi

Montaj hatlarındaki işler aslında ufak iş parçacıklarının bütününden oluşmaktadır. İş ögeleri ise bu anlamlı en küçük iş parçacıklarına verilen addır. Bir başka ifâde ile iş ögeleri, üretim süreci içerisindeki iş yükünün daha fazla alt parçaya bölünemeyen en

küçük parçalarıdır. İşin iş öğelerine ayrılmasının amacı ise, ölçülecek işte gözlem kolaylığı sağlamak ve elde edilen verileri daha etkin analiz etmektir.

İş öğesinin bir diğer tanımı ise, montajcılar arasında karışıklığa neden olmayacak şekilde, iki veya ikiden fazla işçi arasında paylaştırılmasına olanak bulunmayan en küçük iş birimi olarak tanımlanır (Baskak, 1998).

3.3.2 İş istasyonu

İş istasyonu, montaj hattı üzerinde belirlenmiş bir işin yapıldığı alanlar olarak tanımlanabilir. İşçiler iş istasyonlarında kendilerine tanımlanmış ve sorumlu oldukları işlemler üzerinde çalışırlar. İş istasyonlarındaki iş öğeleri, otomatik veya işgücüne dayalı olarak gerçekleştirilirler. Bir montaj hattından söz edilebilmesi için istasyon sayısının en az bir olması ve dengeleme çalışması sonucu belirlenen gerekli en az istasyon sayısından daha az sayıda istasyona sahip olmaması gerekir.

3.3.3 Süre

Montaj hatlarının dengelenmesinde süre kavramı, iş öğesi süresi, toplam iş süresi, iş istasyonu süresi, çevrim süresi ve ortalama iş istasyonu süresi olmak üzere beş farklı şekilde incelenmektedir.

Toplam iş süresi, üretilecek ürünün montaj hattı üzerinde montajı için gereken süresinin toplamı olarak ifade edilebilir. Ayrıca toplam iş süresi, en basit ifade ile denklem 3.1’de gösterildiği gibi işi oluşturan iş öğelerinin standart sürelerinin toplamı olarak da tanımlanabilir. Söz konusu ifâdede “N” montaj hattındaki iş öğesi sayısını, “t_i” i no.’lu iş öğesinin standart işlem süresini ve “IS” toplam iş süresini göstermektedir (Baskak, 2017).

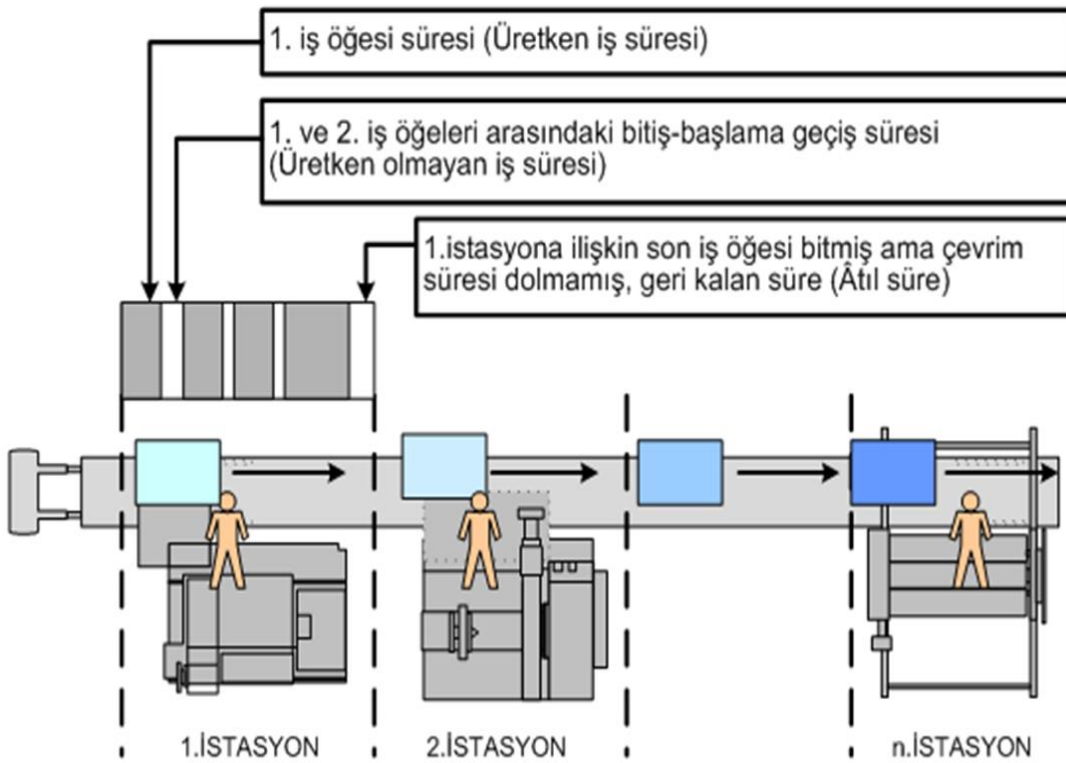
$$IS = \sum_{i=1}^N t_i \quad (3.1)$$

İş istasyonu süresi, belirli bir istasyondaki iş yükünün tamamlanması için gerekli olan süre olarak tanımlanır. Ayrıca, iş istasyonu süresi, yapılması gerekli olan iş öğelerinin standart sürelerinin toplamı olarak ifade edilebileceği için bağlı bulunduğu üretim hattındaki iş öğesi sürelerinin en büyüğünden küçük olmamalıdır. Bir başka tanıma göre iş istasyonu süresi, istasyona giren parçada uygulanması gereken iş öğesinin başlama ve bitiş anları arasındaki süre farkıdır (De Jong, 1957).

Çevrim süresi iki farklı biçimde ifâde edilebilmektedir. Buna göre ürünün bir montaj hattında kalabileceği en fazla süre çevrim süresi olarak tanımlanır. Bir başka ifâdeye göre ise çevrim süresi, iş istasyonundaki işçinin üzerine tanımlı ve yapılması gerekli işleri tamamlaması için gereken süredir. Çevrim süresi istenilen/gerçekleşmesi gereken ürün adedine göre denklem 3.2’de gösterildiği gibi hesaplanabilir. Bu denklemde “C” çevrim süresini, “T” kullanılabilir üretim süresini ve “ÜS” üretilmek istenen ürün sayısını ifâde etmektedir.

$$C = \frac{T}{\ddot{U}S} \quad (3.2)$$

Çevrim süresi, üretken ve üretken olmayan iş süresi ile âtıl süre olmak üzere üç grup sürenin toplamıdır. Bu ifâdelerden iş ögesi süresi üretken iş süresi olarak ifâde edilirken, iş ögeleri arasındaki geçiş süresi üretken olmayan iş süresi olarak tanımlanabilir. Eğer istasyona ilişkin son iş ögesinin bitmiş olması durumunda çevrim süresi dolmamışsa geri kalan süre âtıl süre olarak tanımlanır. Buna göre n istasyonlu bir montaj hattında çevrim sürelerinin alt süreleri Şekil 3.1’de gösterilmiştir (Baskak, 2017).



Şekil 3.1 : n istasyonlu bir montaj hattında çevrim sürelerinin alt süreleri (Baskak, 2017).

Ortalama iş istasyonu süresi (C^*) ise, toplam iş süresinin, dengeleme sonucu elde edilen iş istasyonu sayısına bölünmesi ile denklem 3.3’de gösterildiği şekilde elde edilir.

$$C^* = \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{n} \quad (3.3)$$

3.3.4 Denge kaybı

Denge kaybı; işlerin, işlemcilere veya istasyonlara düzgün şekilde dağıtılmamasından kaynaklı âtil süre olarak tanımlanabilir (Kilbridge ve Wester, 1961). Aynı zamanda işlerin dağılımının hangi ölçüde dengeli olduğunu gösteren bir ölçüttür (Kao, 1979).

Diğer bir deyişle denge kaybı, her istasyona yönelik birim üretim için ayrılan süre ile gerekli süre arasındaki farkın ayrılan süreye oranıdır (Baskak, 2017). Dolayısıyla denge kaybı denklem 3.4’de verildiği şekilde hesaplanabilir. Söz konusu denklemde “C” çevrim süresini, “ C^* ” ortalama iş istasyonu süresini, “n” istasyon sayısını ve “ t_i ” ise i. işin işlem süresini tanımlamaktadır. Denge kaybı genellikle sıfırdan büyük olmasına karşın, iyi dengelenmiş bir montaj hattında denge kaybısıfıra yakındır.

$$D(\%) = \left[\frac{C - C^*}{C} \right] * 100 = \left[\left(\frac{n * C - \sum_{i=1}^N t_i}{n * C} \right) \right] * 100 \quad (3.4)$$

Denge kaybı hesaplanırken dikkat edilmesi gereken bir nokta, en uzun süre ile çevrim süresi arasındaki sürenin hiçbir istasyon tarafından kullanılmayacak olmasıdır. Dolayısıyla tüm iş istasyonlarının süresinin çevrim süresinden kısa olması durumunda, çevrim süresi yerine en uzun iş istasyonu süresi dikkate alınmalıdır (Erkut ve Baskak, 1997).

3.3.5 Gerekli en az iş istasyonu sayısı

En kısa tanım ile gerekli iş istasyonu sayısı, iki farklı yaklaşımdan elde edilen sürenin en büyüğü olarak tanımlanır. İlk yaklaşıma göre iş öğelerinin her bir istasyona çevrim süresini bütünüyle veya en az biri dışında tümüyle

içerecek/dolduracak şekilde atanması durumunda gerekli en az iş istasyonu sayısı “ n_{enk} ”, denklem 3.5’de belirtildiği şekilde bulunur. Söz konusu denklem, toplam iş süresinin “ C ” çevrim süresine bölümünü ifade etmektedir. Aynı denklemde $[x]^+$, x veya x ’ten büyük en küçük tamsayı değerini göstermektedir.

$$n_{enk} = \left\lceil \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{C} \right\rceil^+ \quad (3.5)$$

İş istasyonu sayısının en az değerini etkileyen diğer yaklaşım ise, çevrim süresinin yarısından daha fazla süre gerektiren iki iş istasyonunun süre toplamının çevrim süresini aşması durumunda, söz konusu iki işin aynı istasyona atanamayacağına yöneliktir. Bu durumda iş öğeleri ayrı ayrı istasyonlarda bulunacaktır ve gerekli iş istasyonu sayısı “ $n_{olası}$ ”, çevrim süresinin yarısından daha büyük süreye sahip iş öğesi sayısının toplamı olacaktır. Bir başka ifade ile işlem süresi çevrim süresinin yarısından fazla olan iş öğesi sayısı, “ $n_{olası}$ ” olarak tanımlanmaktadır.

$$n_{olası} = \sum n_i ; [t_i > (C/2)] \quad (3.6)$$

Sonuç olarak montaj hattını dengelemek için gerekli en az iş istasyonu sayısı, denklem 3.7’de belirtildiği şekilde, her iki yaklaşım sonucu bulunan değerlerin en büyüğü olarak tanımlanır (Ignall, 1965).

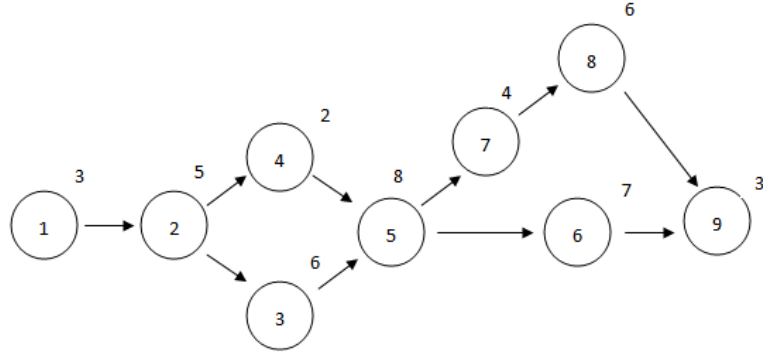
$$n_{enk} = \max [n_{enk}, n_{olası}] \quad (3.7)$$

3.3.6 Teknolojik öncelik diyagramı ve öncelik matrisi

Montaj hatlarında tanımlı görevlerden bazılarının, süreç gereği öncelikli olarak yapılması gerekebilir. Görevler arasındaki öncelik ilişkisinin grafiksel olarak dağılımının ifade edildiği diyagrama teknolojik öncelik diyagramı denir. Söz konusu diyagramda, çember ile ifade edilen iş öğeleri, oklar ile birbirine bağlanır ve okun yönü de işlemin sırasını gösterir. Diyagramda genellikle çemberin içerisindeki numaralar işlem sırasını, üstündeki sayılar ise iş öğesi süresini ifade eder.

Örneğin Şekil 3.2’de verilen teknolojik öncelik diyagramında 7 numaralı iş 5 numaralı işten sonra yapılacak olup, işlem süresi ise 4 ile ifade edilmiştir. Aynı

şekilde 8 numaralı iş 6 numaralı işten bağımsız olarak yapılacak olup, işlem süresi 6 ile ifade edilmiştir.



Şekil 3.2 : Örnek bir teknolojik öncelik diyagramı.

Öncelik matrisi ise teknolojik öncelik diyagramının üst üçgensel matrise dönüştürülmüş formudur (Dar-el ve Rubinovitch, 1979). Bir başka ifade ile görevler arasındaki ilişkinin matris formunda tanımlanmasıdır ve montaj hattındaki görevler arasındaki öncelik ilişkilerini ifade eder. Bu matriste satır sütunu öncül iş ögesini gösterirken, sözkonusu iş ögesinden sonra sürececek işler ise, ilgili sütun karşılığında (ilgili gözde) 1 değeri ile ifade edilir. Şekil 3.2’de örnek olarak verilen teknolojik öncelik diyagramının karşı gelen öncelik matris formu Çizelge 3.1’de gösterilmiştir (Baskak, 1998).

Çizelge 3.1 : Örnek teknolojik öncelik diyagramının öncelik matris formu.

		ARTÇIL ÖĞELER								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
ÖNCÜL ÖĞELER	1	-	1	1	1	1	1	1	1	1
	2		-	1	1	1	1	1	1	1
	3			-	0	1	1	1	1	1
	4				-	1	1	1	1	1
	5					-	1	1	1	1
	6						-	0	0	1
	7							-	1	1
	8								-	1
	9									-

3.3.7 Düzgünlük indeksi

Montaj hatlarındaki iş ögelerinin iş istasyonlarına düzgün ve orantılı işlem süreleri ile dağıtımını belirleyen bir indekstir ve denklem 3.8 ile ifade edilir. Denklemdeki “ t_{mak} ” iş istasyonu sürelerinin maksimumunu ifade etmektedir. Düzgünlük indeksinin (DI) küçük olması hattın iyi bir dengelemeye sahip olduğunu belirtir (Baskak, 2017). İyi dengelenmiş bir montaj hattında düzgünlük indeksi değeri sıfıra yakındır.

$$DI(\%) = \frac{\sqrt{\sum (t_{mak} - t_i)^2}}{n * C} * 100 \quad (3.8)$$

3.3.8 Esneklik oranı

Brosch ve Wiendall (1990)'agöre esneklik oranı bir ölçüt olup, montaj sürecinin öncelik yapısının belirlenmesine yönelik kullanılmaktadır. Denklem 3.9'da, “Y” öncelik matrisinde sıfır olan hücre sayısı ve “M” montaj hattındaki iş ögesi sayısı olmak üzere esneklik oranı formülü verilmiştir. Buna göre Çizelge 3.1 deki öncelik matrisinin esneklik oranı $E=(2*3)/(9*8) = 0,08$ 'dir.

$$E = \frac{Y}{[M * [(M - 1)]] / 2} = \frac{2 * Y}{M * [(M - 1)]} \quad (3.9)$$

3.3.9 Hat etkinliği

Hat etkinliği, denklem 3.1 ile hesaplanan toplam iş süresinin, dengeleme sonucunda montaj için gerekli süreye oranını ifâde eder. Dolayısıyla basit montaj hattında amaçlardan biri, hat etkinliğinin en yüksek değere yükseltilmesidir. Hat etkinliği ne kadar yüksek ise montaj hattının dengelenmesi o derece iyi yapılmıştır. Denklem 3.10'da hat etkinliğinin (HE) yüzde cinsinden sayısal denklemi gösterilmiştir.

$$HE(\%) = \left[\frac{\sum_{i=1}^N t_i}{n * C} \right] * 100 \quad (3.10)$$

3.3.10 Kuramsal etkinlik

Baskak (2017)'a göre kuramsal etkinlik (KE), hattın en az istasyon sayısı ile kurulması durumundaki etkinliği olarak tanımlanabilir ve denklem 3.11 ile ifâde edilir.

$$KE(\%) = \left[\frac{\sum_{i=1}^N t_i}{n_{enk} * C} \right] * 100 \quad (3.11)$$

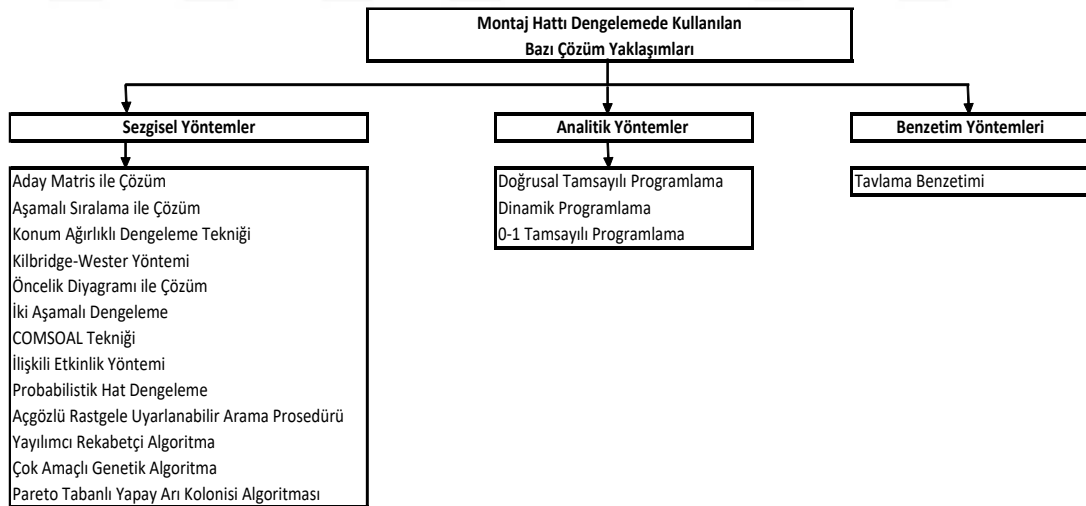
3.4 Montaj Hattı Dengeleme Yöntemlerinin Sınıflandırılması

Montaj hattı dengeleme yöntemleri; çözüm yaklaşımına göre, probleme göre ve işlem sürelerinin deterministik olup olmamasına göre olmak üzere üç ana başlık altında toplanabilir.

3.4.1 Çözüm yaklaşımına göre sınıflandırma

Montaj hattı dengeleme problemlerinin çözümüne yönelik pek çok yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemleri Şekil 3.3’de gösterildiği gibi sezgisel yöntemler, analitik yöntemler ve benzetim teknikleri olarak sınıflandırmak olanaklıdır.

Sezgisel çözüm yöntemleri ile en iyiye yakın yaklaşık çözümler elde edilirken, analitik çözüm yöntemleri ile en iyi çözümler elde edilir. Bunun yanı sıra analitik çözüm yöntemleri uzun işlem süreleri gerektirdikleri için büyük boyutlu problemler için kullanışlı değildir. Bu nedenle büyük boyutlu problemlerin çözümünde yaklaşık çözümü veren sezgisel çözüm yöntemleri yeğlenir. Sezgisel ve analitik yöntemlerin dışında daha karmaşık sistemlerin gözlem tekniği ile çözümlendiği simülasyon teknikleri de bulunmaktadır.



Şekil 3.3 : Montaj hattı dengeleme problemlerine yönelik çözüm yaklaşımları.

3.4.1.1 Sezgisel yöntemler

Sezgisel yöntemlerle problem çözümü elde edilirken birtakım varsayımlar yapılır ve belirli prosedürler izlenir. Montaj hattı dengeleme problemlerinin çözümü için geliştirilen sezgisel çözüm yöntemlerinin optimal çözüm verme garantileri yoktur. Literatürde varolan sezgisel yöntemlerin çoğu, optimal çözüme yakın çözüm verirler.

Analitik yöntemlere göre daha kısa sürede çözüm elde edilebildiği için bu tür yöntemler yeğlenir.

Bu zamana kadar sunulan sezgisel çözüm yöntemlerinin büyük bir kısmı, genellikle çevrim süresini sabit kabul ederek istasyon sayısının enazlanmasını amaçlayan BMHDP-1'in çözümüne yöneliktir. Bir kısmı ise istasyon sayısını sabit kabul ederek çevrim süresinin enazlanmasını amaçlayan BMHDP-2'nin çözümüne yöneliktir. Literatürde yer alan bâzı sezgisel çözüm yöntemleri aşağıda maddeler hâlinde verilmiştir:

- Aday matris ile çözüm (Salveson, 1955).
- Aşamalı sıralamalı çözüm (Jackson, 1956).
- Konum ağırlıklı dengeleme tekniği (Helgeson ve Birnie, 1961).
- Kilbridge-Wester yöntemi (Kilbridge ve Wester, 1961).
- Öncelik diyagramı ile çözüm (Hoffman, 1963).
- İki aşamalı dengeleme (Moddie ve Young, 1964).
- Comsoal tekniği (Arcus, 1966).
- İlişkili etkinlik yöntemi (Agrawal, 1985).
- Probabilistik hat dengeleme (El-Sayed ve Boucher, 1985).
- Açgözlü rastgele uyarlanabilir arama prosedürü (Greedy randomized adaptive search procedure) (Bautistas ve diğ, 2000).
- Yayılımcı rekabetçi algoritma (ICA: Imperialist Competitive Algorithm) (Bagher ve diğ, 2010).
- Çok amaçlı genetik algoritma (MOGA: Multi-Objective Genetic Algorithm -) (Adham ve Tahar, 2012).
- Pareto tabanlı yapay arı kolonisi algoritması (PBABC: Pareto Based Artificial Bee Colony Algorithm) (Ullah ve diğ, 2014).
- Evrim stratejisinin gruplandırılması (GES: Grouping Evolution Strategy) (Nejad ve diğ, 2018).

3.4.1.2 Analitik yöntemler

Bu yöntemler montaj hattı dengeleme problemlerinin çözümünde kullanılan Matematiksel Programlama yöntemleridir. Literatürde Optimizasyon Yöntemleri olarak da adlandırılır. Optimizasyon yöntemleri, kısıt ve amaç denklemlerinden oluşan ve en iyi çözüme ulaşmayı olanaklı kılan yaklaşımlardır.

Klasik optimizasyon yöntemleri ile küçük boyuttaki problemler için en iyi sonuçlar üretilebilmektedir. Ancak işlem sayısının fazla olduğu karmaşık problemlerde optimizasyon yöntemleri ile sonuca ulaşmak çok uzun süre alabilir. Bu tür durumlarda optimizasyon yöntemleri yerine sezgisel yöntemlerin kullanılması daha yaygındır. Bâzı analitik yöntemler aşağıdaki gibidir:

- Doğrusal tamsayılı programlama (Bowman, 1960).
- Dinamik programlama (Held ve diğ, 1963).
- 0-1 tamsayılı programlama (Talbot ve Patterson, 1984).

3.4.1.3 Benzetim yöntemleri

Benzetim, bilgisayar ortamında modellenen bir sistem üzerinde, çeşitli stratejileri değerlendirebilmek ve sistemin davranışını anlayabilmek amacıyla deneyler yürütülmesi işlemidir. Benzetim tekniği çok çeşitli alanlarda uygulanabilir. Örneğin; günlük yaşamda, ehliyet kurslarında şoför adaylarına direksiyon deneyimleri kazanabilmeleri için benzetim tekniği ile eğitimler verilmektedir. Benzetim tekniğinin yeğlenmesindeki birtakım nedenler aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Benzetim verilerinin gerçek yaşama kıyasla daha ucuza elde edilebilir olması,
- Karmaşık işletim sistemlerinin dinamiklerinin ayrıntılı olarak incelenebilir olması (Turner ve diğ, 2006),
- Karmaşık problemlerin çözümü için analitik çözüm yaklaşımlarının kısıtlı sayıda olması (Turner ve diğ, 2006),
- Modelin bir kez tasarlanması ardından farklı politika, parametre ve tasarımlar için sistemin birçok kez kullanılabilir olması (Cinemre,1997),
- Sistemi tanımlayan matematiksel yöntemlerin test edilmesinin olanaksız veya çok pahalı olabilmesi (Baskak, 1998).

Benzetim tekniğinin yeğlenmesine neden olan birtakım üstünlüklerin yanı sıra, bu tekniğin sahip olduğu birtakım sakıncalar da vardır. Bu sakıncalar ise aşağıda verilmiştir:

- Sistem modellemenin uzun sürmesi,
- Farklı sistem parametreleri grubu için modeli yeniden çalıştırma zorunluluğu,
- Benzetim modellerinin oluşturulmasının veya elde edilmesinin maddî bedelinin yüksek olması,
- Her benzetim modelinin bir diğerinden farklı olması ve bu nedenle model seçiminin çok zor olması(Baskak, 1998).

Analitik yöntemlerle optimum çözümler elde edilebilirken, bu çözümlerin gerçek yaşama aktarılması çok fazla varsayım ve uzun işlemler gerektirebilir. Bu nedenle benzetim tekniği ile elde edilen çözümlerin kullanılabilirliği daha yüksektir.

Bunların haricinde sözkonusu teknik yardımı ile ara stok düzeyleri belirlenebilir. Ayrıca paralel hatların kullanılması için de yararlanılan bir tekniktir.

Literatürde gerçekleştirilen montaj hattı dengeleme çalışmalarında genellikle Tavlama Benzetimi temelli simülasyon teknikleri kullanılmaktadır. Tavlama Benzetimi tekniği, 1983 yılında Kirkpatrick ve diğ. tarafından önerilmiş olup optimizasyon problemleri için iyi çözümler veren olasılıklı bir arama tekniğidir. Literatürde birçok araştırmacı, tavlama benzetimi temelli yeni çözüm algoritmalarını geliştirmişlerdir (Hwang ve diğ. (1996); Erel ve diğ.(2001); Pedro ve Ana(2002), Baykasoğlu (2006); Çakır ve diğ.(2011)).

3.4.2 Probleme göre sınıflandırma

Montaj hattı dengeleme yöntemlerinin probleme göre sınıflandırması, literatürde birçok alt başlık altında toplanmıştır. Bâzı olası problem tipleri, izleyen alt bölümlerde açıklanmıştır.

3.4.2.1 Amaç sayısına göre

Amaç sayılarına göre montaj hatları tek ve çok amaçlı olabilir. Literatürde de görüldüğü gibi bu amaçlar, montaj hattı verimliliğinin enbüyüklenmesi, iş istasyonu sayısının enküçüklenmesi, çevrim süresinin enküçüklenmesi, hat etkinliğinin enbüyüklenmesi vb. şekilde görülebilir.

3.4.2.2 Amaca göre

Montaj hattı dengeleme (MHD) problemleri amaçlarına göre dört ayrı alt grupta sınıflandırılabilir:

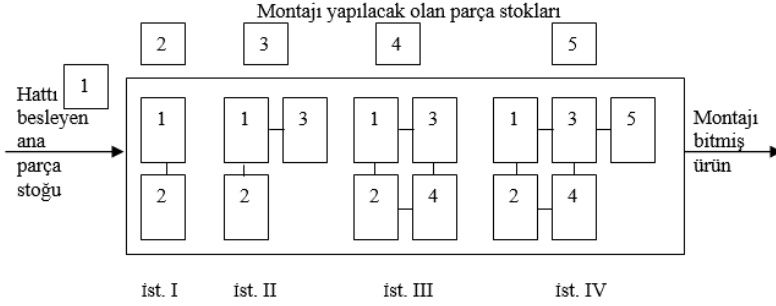
- MHD-1: Montaj Hattı Dengeleme Problemi Tip-1'in amacı çevrim süresinin belirli olduğu durum altında istasyon sayısının enküçüklenmesidir.
- MHD-2: Montaj Hattı Dengeleme Problemi Tip-2'in amacı istasyon sayısının belirli olduğu durumda çevrim süresinin enküçüklenmesidir.
- MHD-E: Montaj Hattı Dengeleme Problemi Tip-E'nin amacı, istasyon sayısı ve çevrim süresi eşzamanlı olarak enküçüklenirken, hat etkinliğinin enbüyüklenmesidir.
- MHD-F: Montaj Hattı Dengeleme Problemi Tip-F'nin amacı verilen istasyon sayısı ve çevrim süresi için uygun bir denge noktasının bulunmasıdır.

3.4.2.3 Ürün çeşidi sayısına göre

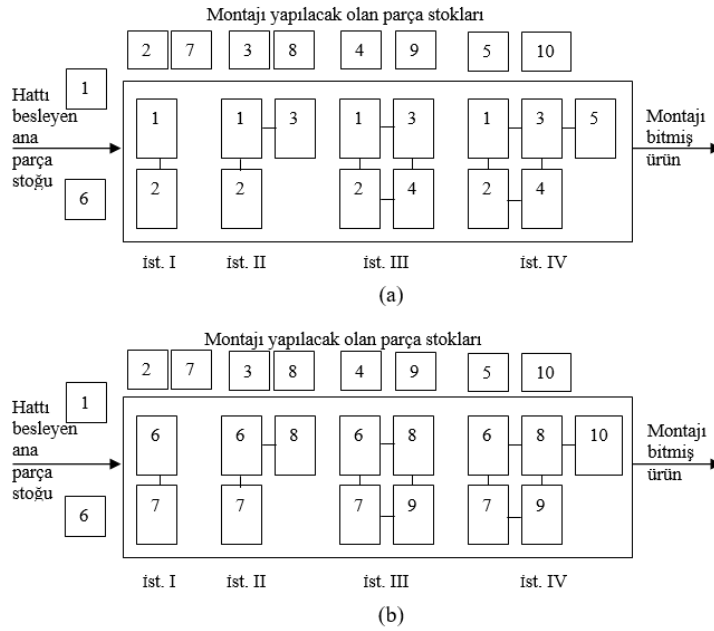
Ürün çeşidi sayısına göre problemin sınıflandırılması üç ayrı grupta yapılabilir:

- Tek Modelli Montaj Hatları: Tek tip bir model veya ürünün üretilebildiği ve Şekil 3.4'de şematik olarak verilen montaj hatlarıdır. Bu tip hatlar basit kurulumlu hatlar olmakla birlikte, farklı ürünlerin üretimine yönelik kolay uyum yeteneğine sahip değillerdir.
- Çok Modelli Montaj Hatları: Farklı ürünlerin veya aynı ürünün iki ya da daha çok benzer tipinin, farklı yığınlar hâlinde üretilebildiği ve Şekil 3.5'de gösterilen montaj hatlarıdır. Sözkonusu şekilde 1-2-3-4-5 no.'lu parçaların birleştirilmesiyle ayrı bir ürün, 6-7-8-9-10 no.'lu parçaların birleştirilmesiyle ayrı bir ürün oluşturulacağı gösterilmektedir. Çok modellenli montaj hatlarında yığınlar büyük ise tek modellenli montaj hatlarına, küçük ise karışık modellenli montaj hattına benzerlik gösterirler. Modellerin birbirine karıştırılmadığı bu hatlarda, bir ürünün üretimi tamamlandıktan sonra diğer ürünün üretimine geçilir.
- Karışık Modelli Montaj Hatları: İki veya daha fazla benzer ürünün veya bir ürünün değişik modellerinin aynı anda ve karışık olarak üretildiği ve Şekil 3.6'da şematik olarak verilen montaj hatlarıdır. Karışık modellenli hatların en önemli özelliklerinin başında, tamamlanmış çok sayıda ürün stoğu gerektirmemesidir. Ek

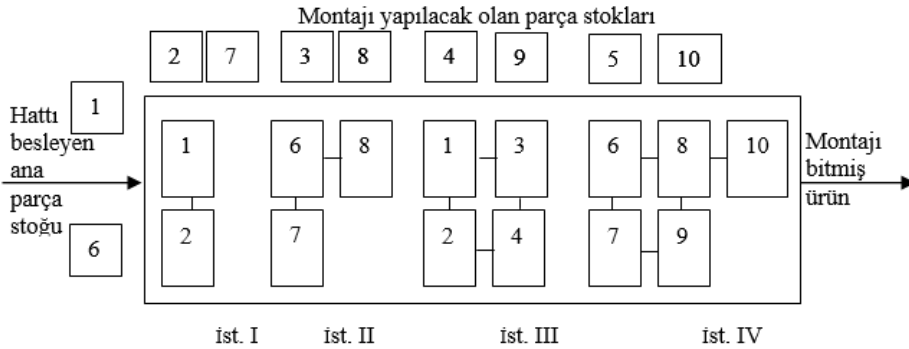
olarak, değişik ürünlerin üretiminin sürekli olmasından dolayı müşteri talebi sorunsuzca karşılanmaktadır. Buna karşın hat tasarımı ve ürün sıralaması probleminin çözümü oldukça zordur.



Şekil 3.4 : Tek modelli montaj hattı örneği.



Şekil 3.5 : Çok modelli bir montaj hattı örneği a) 1-2-3-4-5 no.'lu parçaların birleştirilmesi ile üretilen ürün modeli, b) 6-7-8-9-10 no.'lu parçaların birleştirilmesi ile üretilen ürün modeli (Tanyaş ve Baskak, 2012).



Şekil 3.6 : Karışık modelli bir montaj hattı örneği (Tanyaş ve Baskak, 2012).

3.4.2.4 İstasyondaki işçi sayısına göre

Montaj hatlarında bir istasyona bir ya da birden fazla işçi atanabilir veya tek bir işçi birden fazla istasyona atanabilir. Her iki durum için de birtakım sakıncalar vardır. Tek bir işçinin istasyon ya da istasyonlara atandığı durumlarda işlerin zamanında bitmemesi olasılığı oluşur. Birden fazla işçinin istasyon ya da istasyonlara atandığı durumlarda ise mâliyet artışları görülebilir.

3.4.2.5 Hattın durumuna göre

Hattın durumuna göre problemin sınıflandırılması iki ayrı grupta yapılabilir:

- Sabit Montaj Hatları: Bu tip montaj hatlarında parça transferi için bant veya konveyörler kullanılmaz, aktarım elle yapılır.
- Hareketli Montaj Hatları: Bu tip montaj hatlarında parça transferleri hareketli bantlarla veya konveyörlerle gerçekleştirilir.

3.4.2.6 Diğer sınıflandırmalar

Daha önce anlatılanların dışında değişik sınıflandırma düşünceleri de olabilir. Bunlardan bazıları aşağıda verilmiştir:

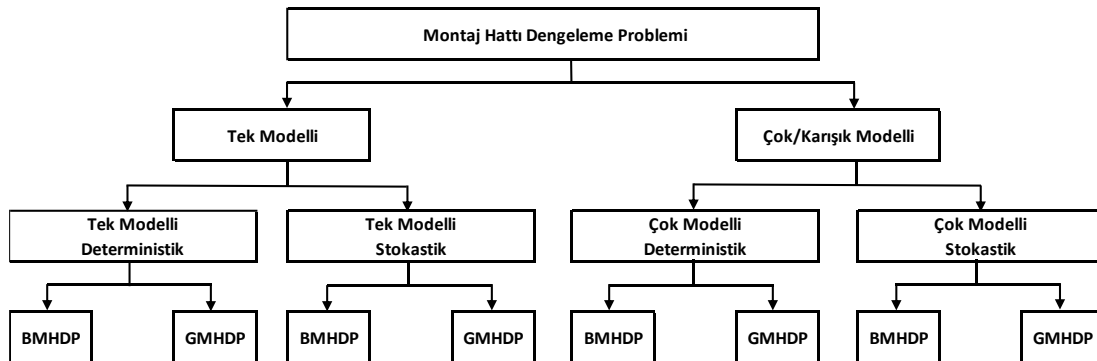
- İstasyon Durumuna Göre Sınıflandırma: İşlemler montaj hatlarında insanlı, otomatik veya karma şekilde yapılabilir.
- Kaynak Kısıtına Göre Sınıflandırma: Montaj hatları dengelenirken malzeme, işgücü, tezgâh, üretim alanı, istasyon, makina vb. kaynaklar kısıtlı olabilir.
- Malzeme İkâmesine Göre Sınıflandırma: İşlemler sırasında herhangi bir malzemenin yokluğu durumunda bu malzemenin yerine ikâme olarak bir başka malzeme kullanılabilir.
- Kusur Oranlarının Verilmesine Göre Sınıflandırma: Yarı ürün iş istasyonlarında işlenirken kusurlu parçalar ayıklanır. Ayıklanan bu parçaların oranının belirlenen bir sınır içinde kalmasının istendiği durumlar olabilir.
- Özel Problemlere Göre Sınıflandırma: Öğrenme eğrisi, mâliyet enküçükleme vb. gibi özel durum ve istekler olabilir.

3.4.3 İşlem sürelerinin deterministik olup olmaması durumuna göre sınıflandırma

Montaj hattı dengeleme problemleri işlem sürelerine göre, deterministik işlem süreli montaj hatları ve deterministik olmayan işlem süreli montaj hatları olmak üzere iki başlık altında toplanır.

- **Deterministik İşlem Süreli Montaj Hatları:** Deterministik işlem süreli montaj hatları, işlem sürelerinin değişken olmayıp sabit olduğu montaj hatlarıdır. Bu tip montaj hatlarında, ürünün üretilmesi için gerekli olan görevlerin süreleri her yinelemede aynı sürede gerçekleştirilmektedir. Deterministik işlem süreli montaj hatları, özellikle yüksek teknoloji içeren endüstrilerde sıklıkla görülmektedir.
- **Deterministik Olmayan İşlem Süreli Montaj Hatları:** Deterministik olmayan işlem süreli montaj hatlarında işlem sürelerinin, ortalaması ve standart sapması bilinen bir dağılıma uyduğu kabul edilir. Bir başka deyişle, bu tip montaj hatlarında işlem süreleri belirli bir olasılık dağılımına göre değişkenlik göstermektedir. Deterministik olmayan işlem süreli montaj hatları, stokastik işlem süreli montaj hatları olarak da tanımlanabilir. İşlem sürelerindeki değişiklik niteliksiz çalışanlardan, çalışanların motivasyon düşüklüğünden, eğitim ve iş bilgisi yetersizliğinden veya makina aksamlarından kaynaklanmaktadır (Rekiek ve Delchambre, 2006).

Bu bilgiler doğrultusunda montaj hattı dengeleme problemleri Şekil 3.7’de gösterildiği üzere işlem sürelerine göre; tek modelli deterministik, tek modelli stokastik, çok modelli deterministik ve çok modelli stokastik olmak üzere dört başlık altında toplanabilir. Her bir sınıf da kendi içinde Basit ve Genel Montaj Hattı Dengeleme Problemleri (BMHDP ve GMHDP) olmak üzere ikiye ayrılır.



Şekil 3.7 : Montaj hattı dengeleme problemlerinin sınıflandırılması.

3.5 Montaj Hatlarının Dengelenmesine Yönelik Kısıtlar

Montaj hatlarının dengelenmesi probleminin çözümüne yönelik süre, yer, konum, işlem önceliği, kullanılan yöntem vb. tarzda kısıtlamalar bulunabilmektedir. Bu kısıtlar montaj hattı dengelemede amaç fonksiyonunda etkili olurlar. Bir başka ifade ile montaj hattı dengelemede belirli kısıtlar altında optimum şekilde işleri iş istasyonuna atamak gerekir. Sözkonusu kısıtlar, literatürde birincil (Temel) ve ikincil (Yan) kısıtlar olmak üzere genellikle iki ana başlık altında toplanmıştır.

3.5.1 Birincil (Temel) kısıtlar

Birincil kısıtlar, çevrim süresi ve öncelik ilişkilerine yönelik kısıtlar olarak iki kısımdan oluşur.

Çevrim süresi; net üretim hedefi, brüt çalışma yüzdesi ve tolerans yüzdesinin bir fonksiyonu olarak düşünülebilir. Yâni çevrim süresi ürünün herhangi bir istasyonda işlem görebileceği en büyük süre değerine eşittir ve bu üç öğeye bağlı belirlenir. Dolayısıyla çevrim süresi, istasyona atanan iş öğelerinin toplam süresini aşamaz.

Öncelik ilişkilerine yönelik kısıtlar ise adından da anlaşılabilceği üzere bir istasyondaki iş öğesinin bitirilebilmesi için öncesinde yapılması gereken iş öğelerinin tamamlanmasına yöneliktir. Bir diğer ifade ile iş öğelerinin kendileri arasındaki öncelik ilişkileridir. Sözkonusu kısıtta, bir istasyondaki işin tamamlanabilmesi için belirli istasyonlardaki işlerin kesinlikle tamamlanmış olması şartı vardır. Dolayısıyla hat dengelemesi yapılırken, istasyonlara atanan iş öğelerinin öncelik ilişkileri kısıtına uyması zorunludur.

3.5.2 İkincil (Yan) kısıtlar

İkincil kısıtlar; konum, sabit donanım, istasyon yükü, aynı istasyona atanması ve atanmaması zorunlu iş öğeleri olmak üzere beş alt başlıkta toplanmıştır.

Genellikle büyük ölçekli ürünlerin (örneğin çamaşır makinası vb.) montajında konumsal kısıtlar meydana gelmektedir. Çünkü konumsal kısıtlar, montajı yapılan iş öğesinin konumu ile montajı yapacak kişi veya makinanın konumuna göre belirlenir. Sözkonusu kısıtlar ön-arka ve alt-üst konum kısıtı olarak iki bölümden oluşur.

Ön-arka kısıtlar, ürünün her iki yüzüne de işlem yapılacağı durumlarda meydana gelmektedir. Bu tip bir montajda bant akarken karşı tarafa geçmek olanaklı

olmayacağı için bantın her iki yüzünden aynı anda montaj işlemi yapılır. Dolayısıyla bu tip bir kısıtın yâni her iki taraftanda montaj yapılmasının zorunlu olduğu montaj hattı dengeleme problemlerinde, bandın her iki tarafında yapılacak işlerin birbirinden ayrılması gerekmektedir. Alt-üst konum kısıtı, montajı yapılacak ürünün belirli istasyonlar altından (ürünün yükseltilmesi gereklidir) veya ürünün ters-yan çevrilerek montajının yapılması durumunda ortaya çıkar. Bununla birlikte her istasyonda sözedilen işlemlerin, yâni ürünün ters-yan çevrilmesi veya altından montajının yapılmasının, gerek ekonomik gerekse verimlilik açısından uygun olmayacağı açıktır. Dolayısıyla bu tip konum kısıtlı işlemlerin belirli istasyonlarda toplanması montaj hattı dengelenmesinde önem arz etmektedir.

Makina vb. araçlar montaj hattında belirli bir konumda bulunmak zorundadırlar. Örneğin Şekil 3.8’de gösterilen ve montaj hattının cam toplama kısmında yer alan otomatik cam alma kolları hattın sonunda bulunmak zorundadır ve montaj hattı dengeleme işlemi sonunda aynı yerde kalmak zorundadır, yâni yeri değiştirilemez. Dolayısıyla montaj hatlarında sabit donanım yani donanım kısıtı ne kadar çok sayıda ise bu makinalarda yapılması gereken iş öğelerinin yerlerinin değiştirilebilirliği de o kadar az olmaktadır.



Şekil 3.8 : Montaj hattından örnek bir otomatik cam alma kolu (Url-1).

İstasyon yükü kısıtında, bâzı istasyonların toplam iş yükü süresinin çevrim süresinin tümünden daha az olması yeğlenebilir. Bunun nedeni, ilk birkaç istasyonda

oluşabilecek aksamaların hattın tümüne yayılmasını önlemektir. Ayrıca sözkonusu istasyonda bulunan işgücünün diğer hatlara kaydırılması zorunluluğu da bulunabilir. Örneğin yetersiz sayıda işçisi olan bir otomobil montaj hattının ilk istasyonunda far takan bir işçinin, montaj hattının sonunda araçların lastiklerini de monte etmesi istenebilir. Dolayısıyla ilk iş istasyonundaki yükün azaltılması gerekecek ve buradan arta kalan işgücü hattın sonuna kaydırılacaktır.

Aynı istasyona atanması gerekli olan iş öğeleri kısıtında, sözkonusu iş öğelerinin aynı veya birbirini izleyen iş istasyonlarına atanması gerekir. Örneğin özel bir alet/aygıt ile montaj hattındaki üründe iki test yapılması gerektiğini ve bu aletin/aygıtın her iki ucunun farklı ölçümleri yapabildiğini varsayalım. Bu durumda sözkonusu ölçümün tek bir işçi tarafından yapılması gerekliliği ortaya çıkacaktır. Dolayısıyla iki test, aslında tek bir test gibi düşünülebilir. Bir başka ifade ile iki farklı alt iş ögesi grubu, salt bir iş ögesi grubu olarak tanımlanabilir.

Bâzı iş öğelerinin aynı istasyonda yapılmamasının zorunlu veya yapılmasının riskli olduğu durumlarda, bu iş öğelerinin aynı istasyona atanması istenmez ve kısıt ortaya çıkar. Örneğin yanıcı bir gazın doldurulduğu iş istasyonuna veya komşu istasyonlara, patlamaya neden olacak montaj kaynağı uygulaması, iş ögesinin atanmaması gerekir. Aynı şekilde otomatik makinalar ile cam kesiminin yapıldığı ve istasyonun çevreden yalıtıldığı bir iş istasyonunda, insanlar tarafından yapılması gereken bir veya birkaç iş ögesinin güvenlik nedeniyle atanmaması gereklidir.

3.6 Sezgisel ve Analitik Dengeleme Yöntemlerine Yönelik Sayısal Örnekler

3.6.1 Konum ağırlıklı dengeleme tekniğine yönelik sayısal örnek

Montaj hattı dengeleme problemlerinin sezgisel çözüm yöntemlerinden biri olan konum ağırlıklı montaj hattı dengeleme yöntemi, Helgeson ve Birnie tarafından 1961 yılında geliştirilmiştir. Sözkonusu yönteme göre her iş ögesine kendinden sonra gelen iş öğelerinin toplam süresinin büyüklüğüne göre konum ağırlıkları atanmaktadır. Böylelikle konum ağırlığı büyük olan iş ögesi, atamada öncelik almaktadır (Eryürük ve diğ, 2014).

Konum ağırlıklı dengeleme tekniğinde izlenen adımlar ise özet olarak aşağıda maddeler hâlinde verilmiştir.

- 1) Her iş ögesinin konum ağırlıkları hesaplanır.
- 2) Her iş ögesinin bağlantılı olduğu (teknolojik öncelik diyagramına göre daha önce yapılması gereken) iş ögeleri belirlenir.
- 3) İş ögeleri, azalan konum ağırlıklarına göre sıralanır.
- 4) En yüksek konum ağırlıklı iş ögelerine öncelik verilerek iş ögeleri iş istasyonlarına atanır. Bu nedenle konum ağırlığı en yüksek olan iş ögesi yeni istasyona atanır.
- 5) İş istasyonunun kullanılmamış süresi hesaplanır.
- 6) Kalan (Henüz herhangi bir iş istasyonuna atanmamış) iş ögelerinden en yüksek konum ağırlıklı olanı seçilir. Bu iş ögesinin tüm öncül (bağlantılı olduğu) iş ögeleri daha önce herhangi bir iş istasyonuna atanmış ise ve bu iş ögesinin süresi, seçili istasyondaki boş süreyi aşmıyor ise işlem süresi, iş istasyonu süresine eklenir. Bir başka deyişle iş, seçilen istasyona atanır. Aksi durumda sonraki adıma geçilir.
- 7) Diğer iş ögeleri 6 numaralı adımda belirtilen şekilde kontrol edilir. Eğer istasyona eklemeye uygun başka bir iş ögesi yoksa, o iş istasyonu tamamlanmış kabul edilir. Sonraki iş istasyonlarını oluşturmak üzere 4 numaralı adım ile süreç yeniden başlatılır. Eğer tüm iş ögeleri iş istasyonlarına atanmış ise süreç tamamlanır.

Sözkonusu yöntemin daha iyi anlaşılabilmesi için Tanyaş ve Baskak (2017) tarafından sunulan sayısal bir örnek aşağıda ayrıntılı olarak verilmiştir. Örnekleme yapılan sayısal problemde yıllık üretimin, yıllık talebe eşit olduğu varsayılmıştır.

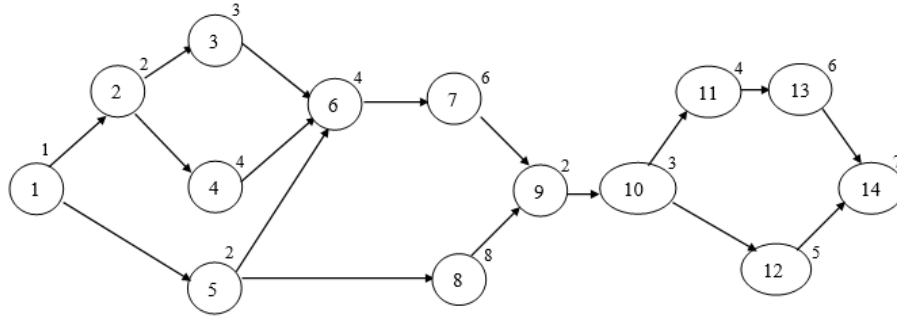
Problemde, üretimi yapılan ürüne ait yıllık talep miktarı 18.000 adettir. İşletmenin çalışma süresi günde 8 saat olup, yılın 300 günü üretim yapılmaktadır.

Sözkonusu montaj hattında tek tip ürün üretilmektedir ve toplamda ondört iş ögesi bulunmaktadır.

Her iş ögesine ait işlem süreleri ve öncül iş ögeleri de Çizelge 3.2’de gösterilmiştir. Problemin çözümü için ilk aşama olarak, Çizelge 3.2 yardımı ile Şekil 3.9’da yer alan teknolojik öncelik diyagramı oluşturulur.

Çizelge 3.2 : Her iş ögesinin azalan konum ağırlıklarına göre sıralanmış durumu.

İş Ögesi	İşlem Süresi (dk)	Öncül Öge(ler)
1	1	-
2	2	1
3	3	2
4	4	2
5	2	1
6	4	3-4-5
7	6	6
8	8	5
9	2	7-8
10	3	9
11	4	10
12	5	10
13	6	11
14	7	12-13



Şekil 3.9 : Konum ağırlıklı dengeleme tekniği ile çözümü yapılan teknolojik öncelik diyagramı.

Teknolojik öncelik diyagramının ardından çevrim süresi ve gerekli en az iş istasyonu sayısı hesaplanır. Çevrim süresi, denklem 3.2'nin kullanılması ile hesaplanmış ve aşağıda gösterilmiştir.

$$C = \frac{T}{\bar{ÜS}} = \frac{300 \text{ gün} * 8 \text{ saat} / \text{gün} * 60 \text{ dk} / \text{saat}}{18.000 \text{ a det}} = 8 \text{ dk} / \text{a det}$$

Gerekli en az iş istasyonu sayısı “ n_{enk} ” ise denklem 3.5, 3.6 ve 3.7 yardımı ile hesaplanabilir. Denklem 3.5’e göre n_{enk} , toplam iş süresinin (57), çevrim süresine (8) bölünmesi sonucu 8 olarak hesaplanır. Denklem 3.6’ya göre çevrim süresinin yarısını (4) aşan iş ögeleri ise (7,8,12,13,14) toplamda $n_{olası} = 5$ adettir. Denklem 3.7’ye göre gerekli en az iş istasyonu sayısı $n_{enaz} = \text{enb} [8, 5] = 8$ olarak elde edilir.

Çevrim süresi ve gerekli en az iş istasyonu sayısının hesaplanmasının ardından konum ağırlıkları çizelgesi oluşturulur. Çizelge 3.3’de her iş ögesinin ait olduğu satırın izlediği sütunlar için, sütunda yer alan iş ögesinin satırda belirtilen iş ögesinin ardından yapılması gerekmektedir. Satırlarda yer alan “+” ise sütunda yer alan iş

öğesinin, satırda yer alan iş öğesinin hemen ardından yapılmayacağını, ancak öncelik diyagramı nedeniyle satırdaki iş öğesi bitmeden de sütundaki iş öğesine başlanılamayacağını gösterir.

Çizelge 3.3 : Her iş öğesinin konum ağırlıkları

Öğesi No	Öğesi Süresi	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	Konum Ağırlığı
1	1		1	+	+	1	+	+	+	+	+	+	+	+	+	57
2	2			2	2		+	+		+	+	+	+	+	+	46
3	3						3	+		+	+	+	+	+	+	40
4	4						4	+		+	+	+	+	+	+	41
5	2						5	+	5	+	+	+	+	+	+	47
6	4							6		+	+	+	+	+	+	37
7	6									7	+	+	+	+	+	33
8	8									8	+	+	+	+	+	35
9	2										9	+	+	+	+	27
10	3											10	10	+	+	25
11	4													11	+	17
12	5														12	12
13	6														13	13
14	7															7

Çizelge 3.3’de yer alan konum ağırlıkları hesaplanırken de, ilgili satırda yer alan iş öğesine ait ilgili sütundaki iş öğesinin süresi, “+” bulunan sütunlardaki iş öğelerinin süreleri ve ilgili iş öğesinin süresi toplanır. 6 numaralı iş öğesi için konum ağırlığı 6, 7, 9, 10, 11, 12, 13 ve 14 numaralı iş öğelerinin süreleri toplamı olan $(4+6+2+3+4+5+6+7=)$ 37’ye eşittir.

Çizelge 3.3’de yer alan konum ağırlıklarının yukarıda belirtildiği şekilde hesaplanmasının ardından, konum ağırlıkları azalan sırada sıralanır. Bu sıralamanın ardından iş öğelerinin sırası, 1 - 5 - 2 - 4 - 3 - 6 - 8 - 7 - 9 - 10 - 11 - 13 - 12 - 14 şeklinde olmuştur.

Konum ağırlıklı dengeleme tekniğinin diğer bir adımı için azalan sırada yapılan iş öğesi sıralamasına göre, öncelikle (1) no.’lu iş öğesi [1] no.’lu iş istasyonuna atanır. Böylelikle iş istasyonunun toplam değeri 1 olur ve 5 numaralı adımda belirtildiği üzere geriye $(8-1=)$ 7 dakika zaman kalır. Ardından bir sonraki iş öğesine bakılarak [1] no.’lu iş istasyonuna atama yapıp yapılamayacağı adım 6 ve adım 7’de verilen esaslar çerçevesinde kontrol edilir. Sonraki iş öğesi olan (5) no.’lu iş öğesi kontrol edildiğinde, süresinin 2 dakika olduğu görülmektedir. Geriye 7 dak. kaldığı için (5) no.’lu iş öğesi [1] no.’lu iş istasyonuna atanır. Böylece geriye $(7-2=)$ 5 dakika zaman kalır. (5) no.’lu iş öğesinden bir sonraki iş öğesi olan (2) no.’lu iş öğesinde aynı şekilde [1] no.’lu iş istasyonuna atanır ve geriye $(5-2=)$ 3 dakika zaman kalır. Konum

ağırlığına göre (2) no.'lu işten sonra 4 no.'lu iş ögesi yer almaktadır. Ancak (4) no.'lu iş ögesinin süresi 4 dakika olup, kalan zamanı aşmaktadır. Bu nedenle [1] no.'lu istasyona atanamaz ve konum ağırlığına göre bir sonraki sırada yer alan (3) no.'lu iş ögesi kontrol edilir. (3) no.'lu iş ögesinin atanabilmesi için (2) no.'lu iş ögesinin atanmış olması gerektiği koşulu sağlandığı ve aynı zamanda (3) no.'lu iş ögesinin işlem süresi de 3 dakika olduğu için, (3) no.'lu iş ögesi de [1] no.'lu iş istasyonuna atanır. Böylece [1] no.'lu istasyona atanan iş ögeleri 1, 5, 2 ve 3 olur. Aynı hesaplama yöntemi ile diğer iş istasyonları için atamalar da Çizelge 3.4'de görüldüğü gibi yapılır.

Çizelge 3.4 : Örnek için dengeleme sonuçları

İstasyon Numarası	İş Ögesi No	Konum Ağırlığı	Öncül Öge/Ögeler	İşlem Süresi	Birikimli İşlem Süresi (X)	Atanmayan Süre (C-X)
1	1	57	-	1	1	7
	5	47	1	2	3	5
	2	46	1	2	5	3
	3	40	2	3	8	0
2	4	41	2	4	4	4
	6	37	3-4-5	4	8	0
3	8	35	5	8	8	0
4	7	33	6	6	6	2
	9	27	7-8	2	8	0
5	10	25	9	3	3	5
	11	17	10	4	7	1
6	13	13	11	6	6	2
7	12	12	10	5	5	3
8	14	7	12-13	7	7	1

Örnek problemin konum ağırlıklı dengeleme tekniği kullanılarak sezgisel yaklaşım ile çözümü sonucunda toplamda 8 istasyona atama yapılmıştır. Bu durum ($n \geq n_{enaz}$) koşuluna uygundur.

Hattın denge kaybı ise denklem 3.12 yardımıyla hesaplanmış ve aşağıda gösterilmiştir. Elde edilen denge kaybı sıfıra yakın olduğu için, montaj hattının iyi dengelenmiş olduğu söylenebilir.

$$D(\%) = \frac{C - C^*}{C} * 100 = \left[\frac{n * C - \sum_{i=1}^N t_i}{n * C} \right] * 100 = \left[\frac{(8 * 8 - 57)}{8 * 8} \right] * 100 = \%10,93 \quad (3.12)$$

Örnek problem için hat etkinliği (HE) ve kuramsal etkinlik (KE) değerleri ise sırasıyla denklem 3.13 ve denklem 3.14 yardımıyla aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$HE(\%) = \left[\frac{\sum_{i=1}^N t_i}{n * C} \right] * 100 = \left[\frac{57}{8 * 8} \right] * 100 = \%89,07 \quad (3.13)$$

$$KE(\%) = \left[\frac{\sum_{i=1}^N t_i}{n_{enk} * C} \right] * 100 = \left[\frac{57}{8 * 8} \right] * 100 = \%89,07 \quad (3.14)$$

Yapılan hesaplamalardan da görüleceği gibi hat etkinliği değeri ile kuramsal etkinlik değeri birbirine eşit olmaktadır. Böylece, ulaşılabilecek en büyük hat etkinliğine ulaşılmış olunur.

Ele alınan örnekte 8 dakikalık çevrim süresi, 300 işgünü olan bir yılda, vardiya başına 18.000 adet ürünün elde edilmesini temin etmektedir. Her iş istasyonuna bir işçi atanırsa, önerisi yapılan montaj hattı için toplamda 8 işçiye gereksinim olacaktır. Bu durumda, bir yılda toplamda (8*8*300=) 19.200 adam*saat çalışmaya karşılık gelir. Bu sürenin ise sadece (19.200*57/64=) 17.100 saatlik bölümü üretim ile geçecektir. Bu nedenle (19.200-17.100=) 2.100 saatlik süre boşa geçecektir. Buradan, işlem plânlamada salt toplam verimli sürenin değil, toplam üretim süresinin de gözönünde bulundurulması gerektiği sonucuna varılır.

3.6.2 Tamsayılı programlama ile dengeleme tekniğine yönelik sayısal örnek

Tamsayılı programlama algoritması 1984 yılında Talbot ve Patterson tarafından geliştirilmiştir. Geliştirilen bu yöntemle çözüme ulaşmada değişkenler, kısıtlar ve amaç fonksiyonundan yararlanılmaktadır. Büyük ölçekli problemlerin çözümü bu yöntem ile yapıldığı takdirde işlem sayısının arttığı görülmektedir ve artan işlem sayısı da çözüme ulaşmayı zorlaştırmaktadır. Küçük veya orta ölçekli problemlerin çözümlerinde dahi ayrıntılı hesaplar yapmak gerekmektedir.

0-1 Tamsayılı Programlama ile tek modelli montaj hattı dengeleme probleminin çözümü için gerekli olacak değişkenler şunlardır (Şahin ve Kahya, 2018):

t_i : i iş ögesinin işlem süresi ($i = 1, 2, \dots, N$)

E_i : i iş ögesinin atanabileceği ilk iş istasyonu(Denklem 3.12)

$$E_i = \left[\left(t_i + \sum_{j \in P_i} t_j \right) / C \right]^+ \quad (3.15)$$

L_i : i iş ögesinin atanabileceği son iş istasyonu (Denklem 3.13)

$$L_i = K + 1 - \left[\left(t_i + \sum_{j \in S_i} t_j \right) / C \right]^+ \quad (3.16)$$

K : Dengeleme sonunda gerekli olacağı tahmin edilen iş istasyonu sayısı

P_i : i iş ögesinden önce bitirilmiş olması gereken iş ögelerinin kümesi

S_i : i iş ögesinden sonra bitirilebilecek iş ögelerinin kümesi

W_k : k iş istasyonuna atanabilen tüm iş ögelerinin kümesi

$\|W_k\|$: W_k kümesinin üye sayısı

0-1 Tamsayı Programlama ile tek modelli montaj hattı dengeleme probleminin çözümü için gerekli olacak amaç fonksiyonu, denklem 3.17’de verilmiştir. Problemin amacı, istasyon sayısının enküçüklenmesi olarak öngörülmüştür. Amaç fonksiyonu oluşturulurken kullanılan A_k ise denklem 3.18’de tanımlanmıştır.

$$EnkZ = \sum_{k=1}^K A_k \quad (3.17)$$

$$A_k = \begin{cases} 1, & k \text{ iş istasyonuna en az bir iş ögesi atanmışsa} \\ 0, & \text{diğer durumda} \end{cases} \quad (3.18)$$

0-1 Tamsayı Programlama ile tek modelli montaj hattı dengeleme probleminin çözümüne yönelik atama kısıtları ise denklem 3.19 ve denklem 3.20’de tanımlanmıştır.

$$\sum_{k=E_i}^{L_i} V_{ik} = 1 \quad [i = 1, 2, \dots, N] \quad (3.19)$$

$$A_k = \begin{cases} 1, & i \text{ iş ögesi, } k \text{ iş istasyonuna atanmışsa} \\ 0, & \text{diğer durumda} \end{cases} \quad (3.20)$$

0-1 Tamsayı Programlama ile tek modelli montaj hattı dengeleme probleminin çözümüne yönelik öncelik, çevrim süresi, iş istasyonu ve 0-1 kısıtları ise sırası ile denklem 3.21, 3.22, 3.23 ve 3.24’de verilmiştir.

$$\sum_{k=E_a}^{L_a} (k * V_{ak}) - \sum_{k=E_b}^{L_b} (k * V_{bk}) \leq 0 \quad (3.21)$$

$$\sum_{i \in W_k} (t_i * V_{ik}) \leq C \quad [k = 1, 2, \dots, K] \quad (3.22)$$

$$\sum_{i \in W_k} (V_{ik} - \|W_k\| * A_k) \leq 0 \quad [k = 1, 2, \dots, K] \quad (3.23)$$

$$\begin{aligned} V_{ik} &= 0 \text{ veya } 1 \quad [i = 1, 2, \dots, N][k = 1, 2, \dots, K] \\ A_k &= 0 \text{ veya } 1 \quad [k = 1, 2, \dots, K] \end{aligned} \quad (3.24)$$

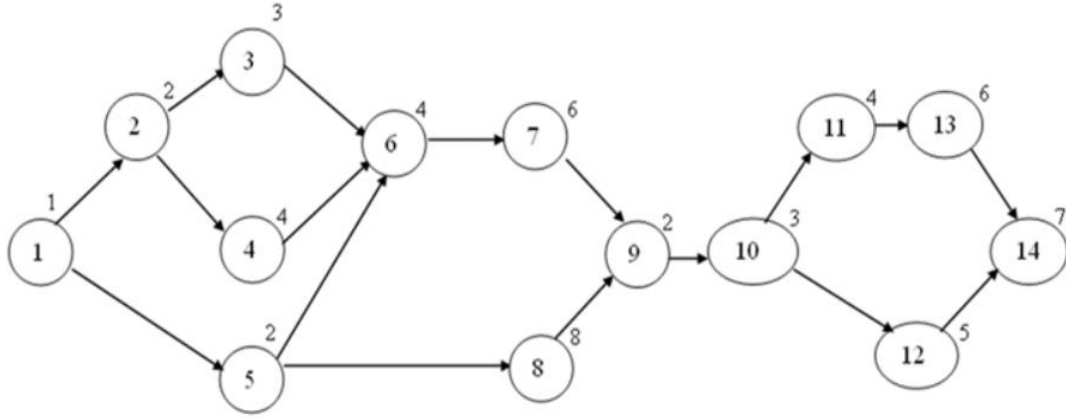
Sözkonusu yöntemin daha iyi anlaşılabilmesi için Tanyaş ve Baskak (2017) tarafından sunulan sayısal bir örnek ayrıntılı olarak verilmiştir. Bu amaçla ondört iş ögesinden oluşan ve iş öğeleri arasında öncelik ilişkisi bulunan tek modellenli bir montaj hattına ait iş öğelerinin işlem süreleri ve öncül öğeleri Çizelge 3.5’de özetlenmiştir.

Bu montaj hattına ait ürünün yıllık talebi 18.000 adet olup, 1 yılda 300 iş gününün olduğu ve günde 8 saat çalışıldığı varsayılmaktadır. Bu varsayımlar altında, sözkonusu tek modellenli montaj hattı için gerekli istasyon sayısının enküçüklenmesi amaçlanmıştır. Buna göre kullanılacak 0-1 tamsayılı programlama modelinin oluşumu aşağıda maddeler hâlinde sunulmuştur:

Çizelge 3.5 : İşlem süreleri ve öncül öğeler.

İş Ögesi	İşlem Süresi (dk)	Öncül Öge(ler)
1	1	-
2	2	1
3	3	2
4	4	2
5	2	1
6	4	3-4-5
7	6	6
8	8	5
9	2	7-8
10	3	9
11	4	10
12	5	10
13	6	11
14	7	12-13

- Öncelikle her iş ögesinin işlem sürelerinin ve öncül değerlerinin belirtildiği Şekil 3.10'dan yararlanarak iş ögelerine ait öncelik diyagramı oluşturulur. Oluşturulan öncelik diyagramında her iş ögesine ait işlem süresi, ilgili iş ögesine ait dairenin üzerinde belirtilmektedir.



Şekil 3.10 : 0-1 tamsayılı programlama dengeleme tekniği ile çözümü yapılan teknolojik öncelik diyagramı.

- Sonraki adımda çevrim süresi hesaplanır:

$$C = \frac{T}{\ddot{U}S} = \frac{(300 \text{ gün} * 8 \text{ saat} * 60 \text{ dk} / \text{saat})}{18.000 \text{ a det}} = 8 \text{ dk} / \text{a det}$$

- Dengeleme için gerek duyulan en az iş istasyonu sayısı aşağıdaki gibi hesaplanmış ve 8 değerine ulaşılmıştır. Montaj hattının dengelenmesi sonucunda gereksinim duyulacağı öngörülen iş istasyonu sayısının, n_{enaz} değerine eşit veya bu değerden büyük olması gerekmektedir. Bu problem için K değerini 10 varsayarak modeli oluşturalım.

$$n_{enaz} = Enb(n_{enk}; n_{olası})$$

$$n_{enk} = \left[\sum t_i / C \right]^+ = [57 / 8]^+ = 8$$

$$n_{olası} = t_i > (C / 2 = 8 / 2 = 4) = 5 \text{ (7, 8, 12, 13 ve 14)}$$

$$n_{enaz} = Enb(8; 5) = 8$$

- Amaç fonksiyonu oluşturulur:

$$EnkZ = \sum_{k=1}^{10} A_k = A_1 + A_2 + \dots + A_{10}$$

- Öncelik diyagramı yardımı ile her i iş ögesinden önce bitirilmiş olması gereken iş ögeleri kümesi (P_i) belirlenir:

$$P_1 = \emptyset$$

$$P_2 = P_5 = \{1\}$$

$$P_3 = P_4 = \{1, 2\}$$

$$P_6 = \{1, 2, 3, 4, 5\}$$

$$P_7 = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$$

$$P_8 = \{1, 5\}$$

$$P_9 = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8\}$$

$$P_{10} = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9\}$$

$$P_{11} = P_{12} = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10\}$$

$$P_{13} = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11\}$$

$$P_{14} = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13\}$$

- Öncelik diyagramı yardımı ile her i iş ögesinden sonra bitirilebilecek iş ögeleri kümesi (S_i) belirlenir:

$$S_1 = \{2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14\}$$

$$S_2 = \{3, 4, 6, 7, 9, 10, 11, 12, 13, 14\}$$

$$S_3 = S_4 = \{6, 7, 9, 10, 11, 12, 13, 14\}$$

$$S_5 = \{6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14\}$$

$$S_6 = \{7, 9, 10, 11, 12, 13, 14\}$$

$$S_7 = S_8 = \{9, 10, 11, 12, 13, 14\}$$

$$S_9 = \{10, 11, 12, 13, 14\}$$

$$S_{10} = \{11, 12, 13, 14\}$$

$$S_{11} = \{13, 14\}$$

$$S_{12} = S_{13} = \{14\}$$

$$S_{14} = \emptyset$$

- Bunların ardından, her i iş ögesinin atanabileceği son iş istasyonu (L_i) değerleri denklem 3.25 ile hesaplanır. Hesaplanan değerler aşağıda gösterilmiştir:

$$L_i = K + 1 - \left\lceil \left(t_i + \sum_{j \in S_i} t_j \right) / C \right\rceil^+ \quad (3.25)$$

$$L_1 = 11 - \left(\frac{57}{8}\right)^+ = 3, \quad L_2 = 11 - \left(\frac{46}{8}\right)^+ = 5,$$

$$L_5 = 11 - \left(\frac{47}{8}\right)^+ = 5, \quad L_6 = 11 - \left(\frac{37}{8}\right)^+ = 6,$$

$$L_9 = 11 - \left(\frac{27}{8}\right)^+ = 7, \quad L_{10} = 11 - \left(\frac{25}{8}\right)^+ = 7,$$

$$L_{13} = 11 - \left(\frac{13}{8}\right)^+ = 9, \quad L_{14} = 11 - \left(\frac{7}{8}\right)^+ = 10$$

$$L_3 = 11 - \left(\frac{40}{8}\right)^+ = 6, \quad L_4 = 11 - \left(\frac{41}{8}\right)^+ = 5,$$

$$L_7 = 11 - \left(\frac{33}{8}\right)^+ = 6, \quad L_8 = 11 - \left(\frac{35}{8}\right)^+ = 6,$$

$$L_{11} = 11 - \left(\frac{17}{8}\right)^+ = 8, \quad L_{12} = 11 - \left(\frac{12}{8}\right)^+ = 9,$$

- Sonraki adımda atama kısıtları belirlenir. Bu kısıtlar aşağıdaki gibidir:

$$V_{11} + V_{12} + V_{13} = 1$$

$$V_{21} + V_{22} + V_{23} + V_{24} + V_{25} = 1$$

$$V_{31} + V_{32} + V_{33} + V_{34} + V_{35} + V_{36} = 1$$

$$V_{41} + V_{42} + V_{43} + V_{44} + V_{45} = 1$$

$$V_{51} + V_{52} + V_{53} + V_{54} + V_{55} = 1$$

$$V_{62} + V_{63} + V_{64} + V_{65} + V_{66} = 1$$

$$V_{73} + V_{74} + V_{75} + V_{76} = 1$$

$$V_{82} + V_{83} + V_{84} + V_{85} + V_{86} = 1$$

$$V_{94} + V_{95} + V_{96} + V_{97} = 1$$

$$V_{10,5} + V_{10,6} + V_{10,7} = 1$$

$$V_{11,5} + V_{11,6} + V_{11,7} + V_{11,8} = 1$$

$$V_{12,5} + V_{12,6} + V_{12,7} + V_{12,8} + V_{12,9} = 1$$

$$V_{13,6} + V_{13,7} + V_{13,8} + V_{13,9} = 1$$

$$V_{14,8} + V_{14,9} + V_{14,10} = 1$$

- Sıra, öncelik kısıtlarını belirlemeye gelir. Hesaplanan değerler aşağıdaki gibidir:

$$\begin{aligned}
V_{11} + 2.V_{12} + 3.V_{13} - V_{21} - 2.V_{22} - 3.V_{23} - 4.V_{24} - 5.V_{25} &\leq 0 \\
V_{11} + 2.V_{12} + 3.V_{13} - V_{51} - 2.V_{52} - 3.V_{53} - 4.V_{54} - 5.V_{55} &\leq 0 \\
V_{21} + 2.V_{22} + 3.V_{23} + 4.V_{24} + 5.V_{25} - V_{31} - 2.V_{32} - 3.V_{33} - 4.V_{34} - 5.V_{35} - 6.V_{36} &\leq 0 \\
V_{21} + 2.V_{22} + 3.V_{23} + 4.V_{24} + 5.V_{25} - V_{41} - 2.V_{42} - 3.V_{43} - 4.V_{44} - 5.V_{45} &\leq 0 \\
V_{31} + 2.V_{32} + 3.V_{33} + 4.V_{34} + 5.V_{35} + 6.V_{36} - 2.V_{62} - 3.V_{63} - 4.V_{64} - 5.V_{65} - 6.V_{66} &\leq 0 \\
V_{41} + 2.V_{42} + 3.V_{43} + 4.V_{44} + 5.V_{45} - 2.V_{62} - 3.V_{63} - 4.V_{64} - 5.V_{65} - 6.V_{66} &\leq 0 \\
V_{51} + 2.V_{52} + 3.V_{53} + 4.V_{54} + 5.V_{55} - 2.V_{62} - 3.V_{63} - 4.V_{64} - 5.V_{65} - 6.V_{66} &\leq 0 \\
V_{51} + 2.V_{52} + 3.V_{53} + 4.V_{54} + 5.V_{55} - 2.V_{82} - 3.V_{83} - 4.V_{84} - 5.V_{85} - 6.V_{86} &\leq 0 \\
2.V_{62} + 3.V_{63} + 4.V_{64} + 5.V_{65} + 6.V_{66} - 3.V_{73} - 4.V_{74} - 5.V_{75} - 6.V_{76} &\leq 0 \\
3.V_{73} + 4.V_{74} + 5.V_{75} + 6.V_{76} - 4.V_{94} - 5.V_{95} - 6.V_{96} - 7.V_{97} &\leq 0 \\
2.V_{82} + 3.V_{83} + 4.V_{84} + 5.V_{85} + 6.V_{86} - 4.V_{94} - 5.V_{95} - 6.V_{96} - 7.V_{97} &\leq 0 \\
4.V_{94} + 5.V_{95} + 6.V_{96} + 7.V_{97} - 5.V_{10,5} - 6.V_{10,6} - 7.V_{10,7} &\leq 0 \\
5.V_{10,5} + 6.V_{10,6} + 7.V_{10,7} - 5.V_{11,5} - 6.V_{11,6} - 7.V_{11,7} - 8.V_{11,8} &\leq 0 \\
5.V_{10,5} + 6.V_{10,6} + 7.V_{10,7} - 5.V_{12,5} - 6.V_{12,6} - 7.V_{12,7} - 8.V_{12,8} - 9.V_{12,9} &\leq 0 \\
5.V_{11,5} + 6.V_{11,6} + 7.V_{11,7} + 8.V_{11,8} - 6.V_{13,6} - 7.V_{13,7} - 8.V_{13,8} - 9.V_{13,9} &\leq 0 \\
5.V_{12,5} + 6.V_{12,6} + 7.V_{12,7} + 8.V_{12,8} + 9.V_{12,9} - 8.V_{14,8} - 9.V_{14,9} - 10.V_{14,10} &\leq 0 \\
6.V_{13,6} + 7.V_{13,7} + 8.V_{13,8} + 9.V_{13,9} - 8.V_{14,8} - 9.V_{14,9} - 10.V_{14,10} &\leq 0
\end{aligned}$$

- Sonraki adımda çevrim süresi kısıtları aşağıdaki gibi oluşturulur:

$$\begin{aligned}
E_i \leq 1 \leq L_i &\Rightarrow W_1 = \{1, 2, 3, 4, 5\} \\
1.V_{11} + 2.V_{21} + 3.V_{31} + 4.V_{41} + 2.V_{51} &\leq 8 \\
E_i \leq 2 \leq L_i &\Rightarrow W_2 = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 8\} \\
1.V_{12} + 2.V_{22} + 3.V_{32} + 4.V_{42} + 2.V_{52} + 4.V_{62} + 8.V_{82} &\leq 8 \\
E_i \leq 3 \leq L_i &\Rightarrow W_3 = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8\} \\
1.V_{13} + 2.V_{23} + 3.V_{33} + 4.V_{43} + 2.V_{53} + 4.V_{63} + 6.V_{73} + 8.V_{83} &\leq 8 \\
E_i \leq 4 \leq L_i &\Rightarrow W_4 = \{2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9\} \\
2.V_{24} + 3.V_{34} + 4.V_{44} + 2.V_{54} + 4.V_{64} + 6.V_{74} + 8.V_{84} + 2.V_{94} &\leq 8 \\
E_i \leq 5 \leq L_i &\Rightarrow W_5 = \{2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12\} \\
2.V_{25} + 3.V_{35} + 4.V_{45} + 2.V_{55} + 4.V_{65} + 6.V_{75} + 8.V_{85} + 2.V_{95} + 3.V_{10,5} + 4.V_{11,5} + 5.V_{12,5} &\leq 8 \\
E_i \leq 6 \leq L_i &\Rightarrow W_6 = \{3, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13\} \\
3.V_{36} + 4.V_{66} + 6.V_{76} + 8.V_{86} + 2.V_{96} + 3.V_{10,6} + 4.V_{11,6} + 5.V_{12,6} + 6.V_{13,6} &\leq 8 \\
E_i \leq 7 \leq L_i &\Rightarrow W_7 = \{9, 10, 11, 12, 13\} \\
2.V_{97} + 3.V_{10,7} + 4.V_{11,7} + 5.V_{12,7} + 6.V_{13,7} &\leq 8 \\
E_i \leq 8 \leq L_i &\Rightarrow W_8 = \{11, 12, 13, 14\} \\
4.V_{11,8} + 5.V_{12,8} + 6.V_{13,8} + 7.V_{14,8} &\leq 8 \\
E_i \leq 9 \leq L_i &\Rightarrow W_9 = \{12, 13, 14\} \\
5.V_{12,9} + 6.V_{13,9} + 7.V_{14,9} &\leq 8 \\
E_i \leq 10 \leq L_i &\Rightarrow W_{10} = \{14\} \\
7.V_{14,10} &\leq 8
\end{aligned}$$

- Bundan sonraki adımda ilk önce, k iş istasyonuna atanabilen tüm iş öğelerinin kümesi olan W_k ve W_k kümesinin üye sayısı olan $\|W_k\|$ değerleri hesaplanır. Daha sonra iş istasyonlarına ilişkin sayısal kısıtlar belirlenir. Bu iki kısıt grubu, ardışık olarak aşağıdaki gibidir:

$$W_1 = \{1,2,3,4,5\}, \|W_1\| = 5$$

$$W_2 = \{1,2,3,4,5,6,8\}, \|W_2\| = 7$$

$$W_3 = \{1,2,3,4,5,6,7,8\}, \|W_3\| = 8$$

$$W_4 = \{2,3,4,5,6,7,8,9\}, \|W_4\| = 8$$

$$W_5 = \{2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12\}, \|W_5\| = 11$$

$$W_6 = \{3,6,7,8,9,10,11,12,13\}, \|W_6\| = 9$$

$$W_7 = \{9,10,11,12,13\}, \|W_7\| = 5$$

$$W_8 = \{11,12,13,14\}, \|W_8\| = 4$$

$$W_9 = \{12,13,14\}, \|W_9\| = 3$$

$$W_{10} = \{14\}, \|W_{10}\| = 1$$

$$V_{11} + V_{21} + V_{31} + V_{41} + V_{51} - 5.A_1 \leq 0$$

$$V_{12} + V_{22} + V_{32} + V_{42} + V_{52} + V_{62} + V_{82} - 7.A_2 \leq 0$$

$$V_{13} + V_{23} + V_{33} + V_{43} + V_{53} + V_{63} + V_{73} + V_{83} - 8.A_3 \leq 0$$

$$V_{24} + V_{34} + V_{44} + V_{54} + V_{64} + V_{74} + V_{84} + V_{94} - 8.A_4 \leq 0$$

$$V_{25} + V_{35} + V_{45} + V_{55} + V_{65} + V_{75} + V_{85} + V_{95} + V_{10,5} + V_{11,5} + V_{12,5} - 11.A_5 \leq 0$$

$$V_{36} + V_{66} + V_{76} + V_{86} + V_{96} + V_{10,6} + V_{11,6} + V_{12,6} + V_{13,6} - 9.A_6 \leq 0$$

$$V_{97} + V_{10,7} + V_{11,7} + V_{12,7} + V_{13,7} - 5.A_7 \leq 0$$

$$V_{11,8} + V_{12,8} + V_{13,8} + V_{14,8} - 4.A_8 \leq 0$$

$$V_{12,9} + V_{13,9} + V_{14,9} - 3.A_9 \leq 0$$

$$V_{14,10} - A_{10} \leq 0$$

- Son adımda 0-1 kısıtları, aşağıdaki gibi gösterilir:

$$V_{ik} = 0 \text{ veya } 1 [i = 1, 2, \dots, 14] [k = 1, 2, \dots, 10]$$

$$A_k = 0 \text{ veya } 1 [k = 1, 2, \dots, 10]$$



4. ERGONOMİK ETMENLER VE MONTAJ HATTI DENGEME

4.1 Ergonomi Bilimi ve Amacı

Yunancada, iş anlamına gelen “Ergo” ve kural anlamına gelen “Nomos” sözcüklerinden türemiş olan Ergonomi terimi, ilk kez 1857 yılında Wojciech Jastrzebowski tarafından kullanılmıştır.

Ergonomi, insan ve çalıştığı sistemin performansını düşünerek optimum tasarımı sağlamak amacıyla, insan, makina ve çevrenin birbirleriyle olan etkileşimlerini kuramsal ve uygulamalı ilkeler, veri ve yöntemleri ile gözönüne alan bir disiplindir (Koca ve diğ, 2001).

Dünyada Endüstri Devriminin başlamasıyla birlikte bireylerde sağlık, hastalık ve iş arasında bir ilişki olduğu düşüncesi ağırlık kazanmaya başlamıştır. Bu nedenle ergonomi alanında yapılan araştırmalara verilen önem artmıştır.

Yirminci yüzyılın başlarında ergonominin temel ilgi alanı, insanın işe olan uyumunun sağlanmasıydı. Bu nedenle yirminci yüzyılın başlarında ergonomi alanında çoğunlukla işçi seçimi, işçi sınıflandırması ve işçi eğitimi üzerine çalışmalar yapılmıştır. Günümüzde ise ergonominin temel ilgi alanı, insanın işe uyarlanması değil işin insana uyarlanmasıdır.

Endüstri Devriminden önce işin içeriğine göre işçinin işe yatkınlığı, cinsiyeti, yaşı ve fiziksel yapısı dikkate alınarak; işçi plânlaması ve yerleştirilmesi yapıp insanın işe uyumu sağlanmaktaydı. Endüstri Devriminden sonra ise işçiler için güvenlik önlemleri alınarak, müzik ve renk gibi psikolojik motivasyonlar sağlanarak ve çalışma zamanları düzenlenerek işin insana uyumu sağlanmıştır.

Montaj hatlarında çalışan işçilerin, atanan görevleri tamamlayabilmesi için uzun süreli olarak eğilmesi, çömelmesi veya uzanması gerekebilir. İşçilerin, bu tip kas gerilmelerine neden olan fiziksel faaliyetleri, montaj hatlarında yinelemeli olarak gerçekleştirmesi, birtakım sağlık sorunlarına yol açabilmektedir. Bu nedenle iş yükü işçiler ve istasyonlar arasında dağıtılırken, sözkonusu fiziksel faaliyetler de

gözönünde bulundurulmalı ve işçilerin zorlanma dereceleri eşit tutulmaya çalışılmalıdır. Böylelikle işçilerin fiziksel kapasiteleri ve yapılan iş arasında bir uyum sağlanmış olacaktır. Sağlanan bu uyum ile işçinin, işi zorlanarak yapmasının önüne geçilecek ve çalışma veriminde artış görülecektir. Dengeli bir dağılımın yapılamaması durumunda ise işçilerde, aşırı yüklenme sonucu kısa dönemde verimlilik ve işgücü kayıpları, uzun dönemde ise meslek hastalıkları ve kalıcı hasarlar oluşabilecektir.

Ergonomi bilimi, esas olarak işçinin sağlık açısından korunumunu sağlayarak olanaklı olan en az emek ve zorlayıcı fiziksel faaliyet ile en yüksek iş başarımını hedeflemektedir. Montaj hatlarındaki ergonomi çalışmalarının temel hedeflerinden biri de, çalışanların iş yapış sırasında mâruz kalacakları gerilmelere neden olacak duruş pozisyonlarını ortadan kaldıracak düzenlemeleri yapmaktır (Güner ve Hasgöl, 2011).

4.2 Ergonomiye Sistem Yaklaşımı

Ergonominin temel yapılarından biri “sistem” kavramıdır. Sistem, yöntem ve araçlar yardımıyla belli bir amaca ulaşmak için kurulu bir düzen veya dışarıdan girdileri alıp işleyen ve çıktı üreten bir süreç olarak da tanımlanabilir (Çoruh, 2018). Kısaca sistem, girdileri çıktılara dönüştüren faaliyetler bütünüdür. Bu durumda bir işletme, fabrika veya kuruluş, sistem olarak değerlendirilebilir.

Ergonomik açıdan bir sistem, belirli amaçlara ulaşabilmek için bir araya gelmiş, karşılıklı etkileşim içinde bulunan insan, makina ve diğer öğelerden oluşur. Ergonomide sistem yaklaşımı, amacın tanımlanarak analiz edilmesinde, amaca ulaşabilmek için gereksinimlerin saptanarak derecelendirilmesinde ve amaca etkin bir şekilde ulaşılmasını sağlayacak iyi eşgüdümlemiş bir sistemin kurulmasında çok önemli rol oynar (Bağış,2013).

Ergonomiye sistem yaklaşımı Şekil 4.1’de bir tablo hâlinde özetlenmiştir. Tabloya göre; çevre, operatör ve makinadan oluşan sistemin merkezinde operatör yer almaktadır. Bu sistemde operatör, sistem verisini algılar, algıladığı veriyi işler, işlediği veriyle karar verir ve makinayı sözlü olarak veya elle kontrol ederek sisteme yanıt olarak bir çıktı üretir. Bu çıktı üretilirken, yetenek, cinsiyet, yaş, motivasyon ve stres gibi operatörün performansını etkileyen pek çok etmen vardır.

Özetlenen sistem yaklaşımına göre çevre, işin gerçekleştirildiği ortamın yanısıra görevin/işin kendisini de içermektedir. Gerçekleştirilecek görevde işin dağılımı ve içeriği organizasyonlar tarafından belirlendiği için, organizasyonlar çevre kapsamında ele alınır. Sistem içerisinde operatör, iş arkadaşları ve yönetim gibi çeşitli kaynaklardan geri besleme alır. Bunun yanısıra fiziksel etmenlerde çevre kapsamında yer alır.

Şekil 4.1 : Ergonomiye sistem yaklaşımı (Bağış, 2013).

Bir diğer konu ise çevrenin performans gereksinimleriyle operatörün performans sınırları arasındaki uyumdur. Gereksinimlerin sınırlara görece baskın olduğu durumlarda sistemde kaza veya yaralanma gibi birtakım olumsuz sonuçlar doğabilir. Bu tip durumlar için daha güvenli çevre koşulları tasarlanmalıdır. Tam tersi durumda ise yüksek performans düzeylerine sahip olan operatörlerin, daha karmaşık işlerin olduğu iş istasyonlarına veya başka üretim ortamlarına kaydırılması daha doğru olacaktır.

Özetle sistemin amacı, operatöre ergonomik çalışma koşulları yaratarak, iyi bir tasarım elde etmek ve güvenli bir şekilde çalışmasını sağlayarak en yüksek iş performansına ulaştırmaktır.

4.3 Ergonomik Ölçütler

Ergonomik bir çalışma sisteminin beş temel koşulu vardır. Bunlar aşağıdaki gibidir:

- **Yapılabilirlik:** Eğer bir iş, çalışanın sağlığını tehdit edici unsurlar içermiyor ve biyolojik dengesini bozmuyorsa biyolojik yetenek sınırları içindedir. Biyolojik yetenek sınırları içindeki işler de “yapılabilir iş” olarak tanımlanır.
- **Dayanılabilirlik:** Bu ölçüt, ilk ölçüt olan yapılabilirlik ölçütünün zaman ile ilişkilendirilmiş şeklidir. Sistemin ergonomik bir çalışma sistemi olabilmesi, işin gerçekleştirilmesi, işçiden beklenen yetenek düzeyinin sürekli performans sınırları içinde olmasıyla olanaklıdır. Sürekli performans kavramı ise; sağlıklı bir işgörene, dinlenmek için ekstra bir süre vermeksizin gösterebileceği en yüksek performansı simgeler. Bu da 8 saatlik bir çalışma süresinden oluşur (Url-2).
- **Kabul Edilebilirlik:** Bu ölçüte göre, dayanılabilirlik sınırları içindeki koşulların toplumsal değer yargılarına uygun ve çalışanlar tarafından kabul edilebilir olması gerekir (Özgörmüş, 2007).
- **Hoşnutluk:** İşgören tarafından gerçekleştirilen bir işin psikolojik beklentilere uygun olmasıdır. Psikolojik beklentilere uygun bir iş, işgörende hoşnutluk duygusu uyandırır. İşgörende hoşnutluk duygusunu uyandıran en büyük etmen, işin kişisel yeteneklere uygunluğudur.
- **Gerçekleştirilebilirlik:** Ergonomik ölçütler arasında genelde gösterilmeyen ancak daha sonradan eklenen beşinci ölçüttür. Söz konusu ölçütte, hâlihazırdaki çalışma, çalışanın birey olarak gelişmesini sağlamalı ve çalışanın, yeteneklerinin tümünü işe yansıtmasını sağlayarak işgöreni tatmin etmelidir.

4.4 Ergonomik Uygulamaların Yararları

Yüksek verimliliği hedefleyen firmalar; işçi, makina ve donanım arasında üst düzey bir uyum sağlayarak, işçiler için çalışma koşullarını ergonomik temellere dayandırarak düzenlemektedir. Ergonomik temellere dayalı uygulamaların yapılması,

işçi, firma ve toplum açısından çok yönlü yararlar sağlamaktadır. Bu yararlar aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- **Ergonomi mâliyetleri azaltır:** Ergonomik uygulamalar ile sistem içerisindeki risk etmenlerinin önüne geçilip, doğrudan veya dolaylı olarak mâliyetler azaltılmış olur. Burada önlenemediği takdirde mâliyet yaratabilecek risk etmenlerine; meslek hastalıkları, iş kazaları ve işçi tazminatları örnek olarak verilebilir.
- **Ergonomi verimliliği artırır:** Çalışan içindaha iyi bir vücut duruşunun, daha az zorlanma derecesinin, daha az hareket gerekliliğinin ve daha uygun yükseklik ve erişimin sağlandığı ergonomik koşullar altındaki çalışma ortamları, sistemi daha verimli duruma getirmektedir.
- **Ergonomi kaliteyi yükseltir:** Uygun ergonomik koşulların sağlan(a)madığı çalışma alanları, çalışan için toplam iş yükünün artmasına ve çalışanın kendisini yorgun ve rahatsız hissetmesine yol açarak, yapılan işin fiziksel açıdan zorlayıcı olmasına neden olur. Yapılan işin çalışan açısından zorlayıcı duruma gelmesi hâlinde, çalışanlar sorumlu oldukları işi gerektiği gibi yerine getiremezler. Sonuç olarak, gerektiği şekilde yerine getirilemeyen işin kalitesi de yüksek olmayacaktır. Bir başka deyişle yüksek baskılama gücü gerektiren yüzey kaplama işinde yeteri kadar güç ile sıkıştırma yapılmaz ise hava kabarcıkları kalacak ve yetersiz kalitede ürün ortaya çıkacaktır.
- **Ergonomi çalışan bağlılığını artırır:** Bir firmanın, çalışanları için güvenli ve sağlıklı bir çalışma ortamı oluşturması, bireyler üzerinde bâzı olumlu sonuçlar doğurarak, onların firmaya olan bağlılıklarının artmasına neden olabilir. Çalışan devamsızlıklarının azalması ve çalışma motivasyonunun artması, söz konusu olumlu sonuçlara örnek olarak verilebilir.
- **Ergonomik çalışmalar güvenlik kültürünü oluşturur:** Ergonomi, firmaların, temel bir değer olarak çalışanları için güvenliğe ve sağlığa verdiği önemin en önemli göstergesidir. Ergonomik çalışmalar, çalışanları iş güvenliğine teşvik ederek güvenlik kültürünün oluşmasına neden olmaktadır.

Özetle, ergonomik uygulamalar sonucunda çalışma koşulları daha insancıllaşan, dolayısıyla çalışma kalitesi yükselen çalışanlar belli ölçüde güdüleneceğinden, işlerini daha hızlı yaparak, döngünün yeniden başlamasına yardımcı olurlar. Dolayısıyla ergonomi, iş ile işgören arasında olumlu bir zincirleme tepkime yaratarak,

sistem içinde yer alan tüm insanlara ve kurumlara önemli katkılar sağlamaktadır(Üçüncü, 2018).

4.5 İşyeri Düzenlemelerinde Ergonomik Yaklaşımlar

İşyeri düzeni ile iş kazalarının meydana gelmesi arasında ciddi bir ilişki bulunmaktadır. İşyerinin çalışma düzeni ve ortamının kötü olduğu durumlarda iş kazaları daha sık meydana gelir(Cankurt, 2007).

İşyeri düzenlemelerindeki ergonomik yaklaşımlar, ergonominin kullanıldığı alana göre çeşitli farklılıklar gösterir. Bu farklılıkları izleyen alt bölümlerde anlatılacağı şekilde beş başlık altında toplamak olanaklıdır.

4.5.1 Antropometrik açıdan işyeri düzenleme

Antropometri, insan vücudunun biçim, boyut, fiziksel yapıya bağlı hareketleri ve bunların limitleriyle, ölçülebilir kavramlara ulaşan bir bilim dalıdır(Doğan ve Altan, 2007).Vücut ölçüleri bilimi olarak da adlandırılan Antropometri, çalışma yeri tasarımının temelinio luşturmaktadır.

Birtakım araç ve gereçlerin, kullanıcı tarafındaki yaş ve cinsiyet kaynaklı boyut farklılıkları gözönünde bulundurularaktasarımlarının yapılabilmesi için antropometriden yararlanılır. Tasarımı yapılan bir araç veya gereç, farklı ülkelerde farklı oranlarda kullanılabilir uygunluğa sahiptir.

Antropometrikveri tipleri, statik ve dinamik olmak üzere iki farklı veritabanına sahiptir. Statik Antropometri, vücudun hareketsiz konumundaki fiziksel öğelerinin ölçümlendirilmesiyle ilgilenir. Dinamik Antropometri ise, insanı, devingen bir sistemolarak inceler, onun işlevsel niteliklerinin çevre içindeki erişim ölçülerini belirler (Doğan ve Altan, 2007).

4.5.2 Psikolojik açıdan işyeri düzenleme

Psikolojik açıdan ergonomik olarak tasarlanmış bir işyeri düzeni, çalışanın motivasyonunu arttırarak performansının yükselmesine yardımcı olur. Bununla birlikte çalışan, tekdüze bir çalışma ortamından çıkarak daha rahat çalışmakışullarında görevlerini yerine getirir. Bu nedenle, işyeri düzenlemeleri yapılırken, çalışanın psikolojisini olumlu yönde etkileyecek ergonomik yaklaşımlar gözönünde bulundurulmalıdır.

Bu yaklaşımlar arasındaki renk düzenlemeleri, çalışanın psikolojisi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Renklerin, insan üzerinde uyandırdığı fizyolojik ve psikolojik etkiler gözönüne alındığında, hareketlerimizi ve tepkilerimizi etkilediği ortaya konulmuştur. Renklerin insanlar üzerindeki etkileri insan-çevre etkileşimi bağlamında tasarım bilgisi içinde yer almakta ve farklı tasarım alanlarındaki uygulamalarda ergonomik bir veri olarak değerlendirilmektedir. İnsanın fiziksel ve psikolojik algılamaları ve insanın çevresiyle olan ilişkisinin insan performansına yansımaları düşünüldüğünde de renk olgusunu ergonomik bir etmen olarak değerlendirmek olanaklıdır (Sağocak, 2005).

Renklerin insanlar üzerindeki etkilerinden yararlanmak amacıyla işyerlerinde, çalışma yüzeyleri, iş ve makina parçaları gibi özel durumları ve araçları, tehlike arz eden durumları ve koruma yollarını belirlemek amacıyla renk düzenlemeleri yapılmaktadır. Bunların yanısıra işyerlerinde yapılan renk düzenlemelerinin bir diğer amacı da çalışan motivasyonunu yüksek tutmaktır. Doğru şekilde yapılan renk düzenlemeleri çalışan stresini azaltır, karamsarlığı önler ve algıyı yükseltir.

Çalışma psikolojisi açısından işyerlerinin ergonomik unsurlara göre düzenlenmesinde başvurulabilecek bir diğer unsur müziktir. İşyerlerinde dinlendirici bir müziğin dinlenmesi morali olumlu etkiler. Özellikle açık bürolarda 15'er dakikalık aralarla hafif tonda müzik yayını önerilebilir. Sürekli ve yüksek sesle çalınan müzik sesi rahatsızlık verebilir (Başpınar, 2012).

İş psikolojisine göre düzenleme yapmada, renk düzenlemeleri ve müzik yayınlarının yanısıra bitki ve çiçek yerleştirmede önemli rol oynar.

4.5.3 Fizyolojik açıdan işyeri düzenleme

Fizyolojik açıdan işyeri düzenlemenin amacı, çalışma yöntem ve koşullarının çalışana uydurulması ve çalışanın performansının daha iyi hâle getirilmesine yöneliktir. Bu amaca ulaşabilmek için öncelikle iki noktaya dikkat edilmesi gerekir.

- **Çalışanın etkilenmesi en aza indirilmeli:** Çalışanı fizyolojik olarak etkileyen unsurları, yorulma-dinlenme dengesi, kassal zorlanma, çalışma koşullarının insan vücuduna uydurulması ve duruş postürleri olarak sınıflandırabiliriz. Çalışan tarafından aynı performansın sürekli olarak sürdürülebilmesi için, hareket hızı ile dinlenme aralarının uyumu ayarlanmalıdır. Gerekli aralıklarla iş değişimi

yapılmalı ve dinlenme araları verilmelidir. Ağır işler daha kuvvetli kas gruplarına verilmelidir. Doğru duruş pozisyonu seçilmelidir.

- **Çevre etkileri ve koşulları çalışana uyumlu duruma getirilmeli:** Gürültü gibi uygun olmayan çalışma koşulları ek bir yüklenmeye, bu yüklenme de, çalışanlar üzerinde yorgunluk belirtilerinin oluşmasına neden olur. Örneğin ofis ortamı gibi, rahat görülen vezihinsel çalışmayı gerektiren ortamlarda dahi, hatalı uygulanan fiziksel çevre koşullarının, çalışanların sağlığını bozucu ve performansını azaltıcı birçok etkisi vardır. Bu nedenle tüm çalışma ortamlarında, iklim, aydınlatma ve gürültü gibi çevresel etmenlerin, çalışanlarla uyumlu duruma getirilmesi gerekir (Hacıosmanoğlu, 2013).

4.5.4 Bilgi tekniğine dayalı işyeri düzenleme

Belirli amaçlara ulaşabilmek için bir araya gelmiş insan, makina ve diğer öğelerden oluşan sistemde insan ve makina arasında karşılıklı bir etkileşim söz konusudur. Sistem içerisinde yer alan çalışan, makina göstergeleri tarafından verilen bilgiyi algılar ve algıladığı bilgiyi yorumlayarak değerlendirir. Çalışan, yapılan yorum sonrası, konu hakkındaki temel bilgilerini de kullanarak bir karar verir.

Bilgi tekniğine dayalı işyeri düzenlemelerinde, bilgi taşıyıcıları olarak bilinen bu makinaların düzenlenmesi en önemli unsurlardan biridir. Makinalar düzenlenirken kontrol ve göstergelerin tasarımı, çalışanı hataya yönlendirmemelidir. Örneğin, makina düğmeleri birbirine benzer bir şekilde tasarlanırsa, çalışan yanlış bir düğmeye basabilir. Bunu engelleyecek şekilde Poka Yoke vb. hata önleme sistemlerinden yararlanılabilir.

4.5.5 Güvenlik tekniğine dayalı işyeri düzenleme

Güvenlik tekniğine dayalı çalışma yeri düzenleme, kazadan korunmaya ve meslek hastalıklarını önlemeye yönelik tüm kuramsal ve pratik tasarım ilkelerinin gözönüne alındığı teknik önlemleri içermektedir. Bu teknik önlemler bir yandan iş güvenliğini arttırmayı amaçlarken, diğer yandan çalışanların sağlığının ve yaşamının korunmasına katkı sağlamış olur. Dolayısıyla ergonomide güvenliğe dayalı çalışma yeri düzenleme, iş sağlığı ve güvenliğinin en temel konularından birisidir (Hacıosmanoğlu, 2013).

Güvenlik teknikleri, doğrudan, dolaylı ve uyarıcı olmak üzere üç başlık altında toplanabilir. Doğrudan güvenlik tekniklerinde, tasarım önlemleri ile tehlike, oluşmadan önlenabilir. Dolaylı güvenlik tekniklerinde, potansiyel tehlike noktalarına koruyucu donanımlar yerleştirilerek, tehlikelere karşı çalışanların güvenliği sağlanır (Örneğin, kesici aletleri koruyucu içine almak). Uyarıcı güvenlik tekniklerinde ise potansiyel tehlike noktalarına uyarıcı tabelalar yerleştirilir ve hangi durumlarda tehlikesiz bir iş akışının sağlanabileceği gösterilir.

4.6 İş İle İlgili Risk Etmenleri

İşyerlerinde, işvereni maddî ve/veya manevî olarak kayba uğratarak iş kazası ve meslek hastalıklarına neden olan etmenlere risk etmenleri denir. Bu risk etmenleri aşağıdaki başlıklar altında toplanabilir (Özkılıç, 2005):

- **Fiziksel Risk Etmenleri:** Titreşim, ses, gürültü, yetersiz havalandırma, aşırı ısı, nem, hava hareketleri, yetersiz aydınlatma veya aşırı aydınlatma gibi etmenlerin işyerlerinde yarattığı risk etmenleridir.
- **Kimyasal Risk Etmenleri:** Zehirli gaz ve tozlar, radyasyona mârûz kalma, asitler ve/veya bazlar nedeniyle yanma, inert tozlar, fibrojenik tozlar, kanserojenik tozlar veya alerjik tozlar gibi etmenlerin işyerlerinde yarattığı risk etmenleridir.
- **Elektrikle Çalışma Nedeniyle Oluşan Risk Etmenleri:** Topraklaması yapılmamış tezgâhlar veya el aletleri, topraklamanın belli periyotlarla kontrolünün yapılmaması, elektrik ve aydınlatma tesisatının periyodik kontrolünün yaptırılmaması, yıpranmış ve hatalı onarılmış el aletleri, yetkisiz kişilerin müdahale etmek istemesi, kırık ve yıpranmış el aletleri, kişisel koruyucuların bulunmaması, zeminin yalıtılmaması veya yüksek gerilim ile çalışmada gerekli kurallara uyulmaması gibi etmenlerin işyerlerinde yarattığı risk etmenleridir.
- **Mekanik Risk Etmenleri:** Makina ve tezgâhın ezen, delen, kesen ve dönen operasyonlar için gerekli koruyucusunun bulunmaması, makina ve tezgâhı tehlike anında durduracak stop butonunun yada anahtarın bulunmaması, yetersiz ve uygun olmayan makina ve koruyucu donanım, yetersiz uyarı sistemleri, düzensiz ve dağınık işyeri ortamı veya makinaların, kaldırma aletlerinin, kazanların,

kompresörlerin vb. gerekli bakım ve periyodik kontrollerinin yapılmaması gibi etmenlerin işyerlerinde yarattığı risk etmenleridir.

- **Tehlikeli Yöntem ve İşlemler Nedeniyle Oluşan Risk Etmenleri:** Makina veya tezgâhlarda çalışırken koruyucu donanımın devre dışı bırakılması, kişisel koruyucuların kullanılmaması, aşırı yük kaldırma, gereken uyarı işaret ve yazılarının konulmamış olması, güvenlik kartı olmayan kimyasalla çalışma, çalışana eğitim verilmemesi, yeterli ikaz vermeden araçların çalıştırılması veya durdurulması, elektrik kesilmeden donanımın üzerinde onarım, onarım sırasında şalter veya beklenmedik bir harekete karşı güç düğmesinin emniyete alınmamış olması, yüksekte atlama, patlama tehlikesi olan yerlerde sigara içilmesi, yükleme ve boşaltma işlemlerinin uygun yöntemle yapılmaması veya malzemelerin, makinaların ve donanımın uygun yerleştirilmemesi gibi etmenlerin işyerlerinde yarattığı risk etmenleridir.
- **İşyeri Ortamından Kaynaklanan Risk Etmenleri:** İşyeri zemini, yetersiz geçitler, yetersiz çıkış yerleri, yetersiz iş alanı, düzensiz işyeri, merdivenlerde korkuluk olmaması, duşların ve tuvaletlerin çalışır durumda veya temiz olmaması gibi etmenlerin işyerlerinde yarattığı risk etmenleridir.
- **Psikolojik (Psikososyal) Risk Etmenleri:** İş hoşnutsuzluğu, tekdüze (monoton) iş, zaman baskısı, yetersiz denetçi ve iş arkadaşı desteği, yetersiz örgütsel etmenler (dinlenme molalarının yetersizliği vb.) gibi durumların işyerlerinde yarattığı risk etmenleridir (Özkılıç(2005); Çömez(2016)).

4.7 Ergonomik Risk Değerlendirme Yöntemleri

İşyerlerinde oluşan ergonomik risk etmenlerini belirlemek için literatürde çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Bu yöntemlerin her biri, kendi içinde belirli bir alanda bir diğer yöntemle göre daha başarılıdır. Geliştirilen tekniklerin birçoğu ise vücudun üst kısmında risk yaratan etmenlere ilişkindir. Bunun nedeni, karşılaşılan problemlerin genellikle boyun, omuz ve sırt bölgelerinde daha yoğun olarak görülmesidir.

İşyerlerindeki ergonomik risk değerlendirme yöntemleri için kullanılan farklı yaklaşımlar aşağıdaki gibi üç başlık altında sıralanabilir:

4.7.1 Öznel değerlendirmeler

Montaj hattında, bir işçinin gün boyu aynı işi yinelemeli olarak yapması nedeniyle meydana gelen ergonomik risk etmenlerinin bu yöntemde, anket, kontrol listeleri vb. bilgi toplama teknikleri ile çalışanların kişisel özellikleri, hissettikleri ağrılar ve çalışma duruşlarına ilişkin çeşitli bilgiler toplanır.

Bu yöntem, çeşitli avantaj ve dezavantajlara sahiptir. Yöntemin neredeyse tüm çalışma alanlarında uygulanabiliyor olması ve düşük mâlîyete sahip olması, yöntemin avantajlı yönlerine örnek olarak verilebilir. Mutlak doğru olarak ölçümünün bu yöntemle sağlanmasının kuşku oluşturma ve riskin fazla olduğu düşünülen durumlarda diğer yöntemlerin kullanılmasının daha ayrıntılı ve güvenilir oluşturma ise yöntemin dezavantajlarına örnek olarak verilebilir.

Literatürde öznel değerlendirme için pek çok yöntem vardır. Bu yöntemlerden bazıları; Cornell Kas İskelet Sistemi Rahatsızlığı Taraması (Cornell Musculoskeletal Discomfort Survey), İskandinav Kas-İskelet Sistemi Anketi (Nordic Musculoskeletal Questionnaire), Vücut Rahatsızlık Haritası (Body Discomfort Map) ve Hissedilen Çaba Derecesi (Rating of Perceived Exertion)'dir (Ayan,2015).

4.7.2 Gözleme dayalı yöntemler

Gözleme dayalı yöntemler, uygulayıcılar tarafından en çok kullanılan yöntemlerdir. Bu yöntemler, kendi içinde basit gözleme dayalı yöntemler ve gelişmiş gözleme dayalı yöntemler olmak üzere ikiye ayrılır. Basit gözleme dayalı yöntemler, dış yüklenmeyi değerlendirmekte olup vücudun belli bir bölümünün duruşu, çalışanın uyguladığı kuvvet ve yüklenme zamanı parametrelerini kullanmaktadır (Alıcı ve diğ., 2017). Gelişmiş gözleme dayalı yöntemler ise, yüksek derecede dinamik faaliyetlerdeki duruş değişiminin değerlendirilmesi amacıyla videoya dayalı geliştirilmiş tekniklerdir. Videoya veya bilgisayara kaydedilen veriler, sonradan özel yazılımlar aracılığıyla nesnel bir şekilde değerlendirilir. Belirlenmiş bir çalışma aralığında, çalışanların duruşlarının değişimleri, gerçek zamanlı olarak kayıt altına alınır ve böylece çeşitli eklem parçaları analiz edilir (Koç ve Testik, 2016).

Literatürde basit gözleme dayalı ve gelişmiş gözleme dayalı pek çok yöntem vardır. Basit gözleme dayalı yöntemlere, Amerika Ulusal İş Güvenliği ve Sağlığı Enstitüsü Yük Kaldırma Eşitliği (RNLE: Revised National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) Lifting Equation), Hızlı Üst Uzuv Değerlendirmesi (RULA:

Rapid Upper Limb Assesment), Meslekî Yinelemeli Hareketler İndeksi (OCRA: Occupational Repetitive Actions Index), Hızlı Tüm Vücut Değerlendirmesi (REBA: Rapid Entire Body Assessment) ve Hızlı Marûziyet Değerlendirme Yöntemi (QEC: Quick Exposure Check) örnek olarak verilebilir. Gelişmiş gözleme dayalı yöntemlere ise, 3D Match, TRAC, Ergo-Man, Sammie Cad, 3DSSPP, Jack Model, Human Builder Model, RAMSIS Model, SANTOS, ANYBODY ve The Visual Decision Platform (VDP) örnek olarak gösterilebilir.

4.7.3 Doğrudan ölçüm yöntemleri

Doğrudan ölçüm yöntemlerinde, açıölçer, optik araçlar, elektromiyografi, biyomekanik analiz araçları kullanılarak sensör teknolojisi ile çalışanın iş sırasındaki olumsuzluklara marûz kalma derecesi doğrudan ölçülür. Bu araçlar ile kas faaliyetleri, açısal sapmalar, uygulanan güçler ve vücut hareketleri ile ilgili ayrıntılı şekilde gerçek sayısal bilgiler elde edilir (Koç ve Testik, 2016). Bu yöntem daha kesin sonuçlar verebiliyor olmasına rağmen, yüksek bir yatırım gerektirir. Bu nedenle pahalı bir gözlem tekniği olması nedeniyle, yöntemingerçek iş yaşamında uygulanabilirliğini düşürmektedir. Doğrudan ölçüm yöntemlerine, The Lumbar Motion Monitor (LMM), Cyberglove ve Trunk Electromyography (EMG) örnek olarak verilebilir.

Bu üç yöntem için üstünlük sıralaması yapmak olanaklıdır. Doğrudan ölçüm yöntemi, gözleme dayalı yöntemlerden; gözleme dayalı yöntemler ise öznel değerlendirmelerden daha üstündür(Village ve diğ, 2008).

4.8 Gözleme Dayalı Yöntemlere Yönelik Sayısal Örnekler

4.8.1 Mesleki yinelemeli hareketler indeksi (OCRA) sayısal uygulaması

Montaj hattında, bir işçinin gün boyu aynı işi yinelemeli olarak yapması nedeniyle meydana gelen ergonomik risk etmenlerinin işçi üzerinde yarattığı birikimli etkiyi hesaplamak için OCRA (Occupational Repetitive Actions Index) yöntemi kullanılabilir.

OCRA yöntemiyle üst vücut hareketlerinin ergonomik incelemesi yapılır. El, bilek, dirsek ve omuz gibi tüm üst vücut elemanlarının çalışma duruşları ve hareketleri OCRA indeksi ile yorumlanmaktadır. OCRA indeksi, vücudun sağ ve sol tarafı için

ayrı ayrı hesaplanmaktadır. Sağ ve sol taraf için bulunan iki OCRA değerinden hangisi daha büyükse, o değer istasyonun OCRA değeri olarak belirlenmektedir. Daha büyük OCRA değeri, daha kötü ergonomik koşulları ifâde etmektedir.

OCRA indeksi hesaplamalarında, bir iş istasyonunda birden fazla iş gerçekleştirilmekteyse, gerçekleştirilen her iş için ayrı indeksler hesaplanmaz. Bir başka deyişle, tüm istasyon için tek bir OCRA indeksi hesaplanır. Böylece, işlerin birbiri üzerindeki birikimli etki gözardı edilmemiş olur.

OCRA yönteminin, kaldırma ve taşımaların yoğun olduğu montaj hatlarından ziyade, malzeme aktarmalarının otomasyona dayalı sistemlerle gerçekleştiği ve işçilerin bir konveyör çevresinde çalıştığı montaj hatlarındakullanılması daha uygundur.

OCRA indeksi; iş süresince gerçekleşen teknik hareket sıklığının (THS), önerilen sıklığa (ÖS) bölünmesi ile elde edilmekte olan bir oran olup,hesaplama şekli denklem 4.1 ile gösterilmiştir.

$$OCRA \text{ indeksi} = \frac{THS}{\text{ÖS}} \quad (4.1)$$

Denklemde yer alan teknik hareketler, bir işlemi gerçekleştirmek için yapılan; hareket ettirme, uzanma, alma, kavrama, tutma, bırakma, yürüme, kontrol etme, döndürme, itme, çekme, kesme, başlatma, sonlandırma, boyama, zımparalama ve çekiçle çakma gibi temel ve manüelhareketlerdir.

Teknik hareket sıklığı ise bir dakika içerisinde gerçekleştirilen teknik hareket sayısı olup denklem (4.2) ile formüle edilir.

$$TEKNIK \ HAREKET \ SIKLIĞI = \frac{\text{Bir Çevrimdeki Teknik Hareket Sayısı} * 60}{\text{Çevrim Süresi}} \quad (4.2)$$

Önerilen sıklık çarpanı (ÖSC) ise sabit sıklık çarpanı (SS), postür çarpanı (P), tekrarlılık çarpanı (T), kuvvet çarpanı (K), ek risk etmenleri çarpanı (ERF), yetersiz dinlenme periyodu çarpanı (DP) ve tekrarlı işlerin vardiyadaki süresi çarpanının (TİS) çarpılmasıyla elde edilmekte olup denklem 4.3 ile gösterilmiştir.

$$\text{ÖSC} = SS \times P \times T \times K \times ERF \times DP \times TIS \quad (4.3)$$

- **Sabit Sıklık Çarpanı:** Sabit bir değerdir ve dakikada 30 hareket olarak kabul edilir.
- **Postür Çarpanı:** Postür, işçinin teknik hareketleri yapmak için kullandığı vücut uzuvlarının (organlarının) pozisyonları ve hareketleridir. Postür çarpanı ise uygunsuz duruş ve hareketlerin çevrim süresindeki ağırlığına göre belirlenir ve 0-1 arasında bir değer alır. Uygunsuz duruş ve harekete mârûz kalma oranı arttıkça, postür çarpanının değeri sıfıra yaklaşır. Uygunsuzduruş ve hareketlerin analizini yaptıktan sonra, her bir uzuv için ayrı ayrı P değerleri bulunur. Bulunan değerlerin en küçüğü, OCRA indeksini hesaplamada kullanılacak P postür çarpanı olarak seçilir. Uygunsuz duruş ve hareketlerin çevrim süresindeki ağırlığına göre belirlenen postür çarpanı değerleri Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1 : Uygunsuz duruş ve hareketlerin çevrim süresindeki ağırlığına göre belirlenen postür çarpanı değerleri(Can, 2013).

Uygunsuz Duruş	Çevrim Süresi Yüzdesi			
	%1 - %24	%25 - %50	%51 - %80	> %80
Dirsekten döndürme ($\geq 60^0$)	1	0,7	0,6	0,5
Bileği içe veya dışa bükme ($\geq 45^0$)				
Elle kısıtırarak veya kenarından/sapından veya avuçla tutma				
Dirsekten döndürme veya bükme/uzanma ($\geq 60^0$)	1	1	0,7	0,5
Bileği yana dışa veya yana içe döndürme ($\geq 20^0$)				
Elle dar cismi kuvvetli tutma ($\leq 2\text{cm}$)				

- **Tekrarlılık Çarpanı:** Tekrarlılık, düşük ve yüksek olmak üzere iki tiptir. Bir işin düşük tekrarlılıkta kabul edilebilmesi için, çevrim süresinin 15 sn.’den büyük olması ya da aynı tip teknik hareketlerin, çevrim süresinin %50’sinden daha fazla yinelenmemesi gerekir. Bu tip bir durumda tekrarlılık çarpanı 1’e eşittir. Bunun dışındaki her durumda ise yüksek tekrarlılık olduğu söylenebilir ve tekrarlılık çarpanı 0,7 değerini alır.

- **Kuvvet Çarpanı:** Uygulanan kuvvetin, risk etmeni olarak OCRA indeksine etkisidir. Kuvvet çarpanı 0-1 arasında bir değer almakta olup, kuvvetin uygulanmasının gerekmediği işlerde 1 değerini alır. Çeşitli kuvvet uygulamaları için K kuvvet çarpanı değerleri Çizelge 4.2’de gösterilmiştir. Sözkonusutabloda yer alan değerlerkullanılıp enterpolasyon yapılarak, bu değerler arasındaki kuvvet uygulamaları için K değeri hesaplanır.

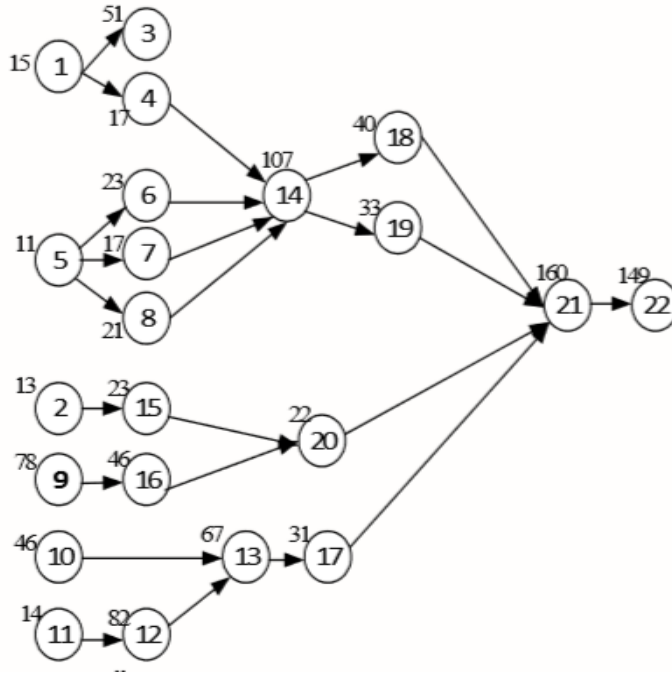
Çizelge 4.2 : Çeşitli kuvvet uygulamaları için K kuvvet çarpanı değerleri(Can, 2013).

Ortalama harcanan kuvvet (%)	5	10	20	30	40	≥ 50
Borg değeri	0,5	1	2	3	4	≥ 5
Değer	Çok çok zayıf	Çok zayıf	Zayıf	Orta	Biraz kuvvetli	Kuvvetli / Çok kuvvetli
Kuvvet çarpanı (F)	1	0,85	0,65	0,35	0,2	0,01

- **Ek Risk Etmenleri Çarpanı:** Ek risk etmenleri, titreşim yapan araç gereç kullanımı, hassas yerleştirme gereken durumlar (1-2 mm toleransla yerleştirilen cisimler), bâzı vücut bölgelerine yerel (lokal) olarak kuvvetli basınç uygulanması, yetersiz ya da aşırı sıcaklık, yetersiz ya da aşırı ışık, gürültü, tutma/kavrama gibi işlemler sırasında eldiven takılmasının gerekmesi, anî ve çok hızlı hareket edilmesi gereken durumlar, konveyör ya da makine nedeniyle çok yüksek hızda çalışmak zorunda olma ve çalışılan nesnenin keskin kenarlı olması gibi ortaya çıkma olasılığı olan durumlardan kaynaklı risk etmenleridir. Ek risk etmeni çarpanı, 0-1 arasında bir değer alır. İşin büyük çoğunluğunda yukarıda belirtilen durumlar oluşmuyorsa 1 değeri verilir.
- **Yetersiz Dinlenme Periyodu Çarpanı ve Yinelemeli İşlerin Vardiyadaki Süresi Çarpanı:** Bu çarpanların OCRA indeksine etkisi, yapılan işe göre değişiklik göstermez. Bu nedenle, sözkonusu çarpanlar tüm işler için sabit gibi kabul edilir. İdeal çalışma koşullarının sağlandığı durumlarda ise yetersiz dinlenme periyodu çarpanı 0,6 ve yinelemeli işlerin vardiyadaki süresi çarpanı 1 değerini alır.

Bir iş istasyonunun ergonomik anlamda yeterli olabilmesi için OCRA indeksi 2,2’den küçük olmalıdır. Bu indeks 2,2-3,5 değerleri arasında ise, iş istasyonu sarı bölgede olarak tanımlanır ve ergonomik olarak şartlı kabul edilir. OCRA indeksinin 3,5’ten büyük olduğu durumlarda ise iş istasyonu kırmızı bölgede olarak tanımlanır ve ergonomik risk düzeyi kabul edilemez demektir.

OCRA indeksinin sayısal uygulaması örneği, Can (2013) tarafından yapılan bir çalışmada ele alınmıştır. Buna göre ideal çalışma koşullarının sağlandığı ve aynı tip teknik hareketlerin çevrim süresinin %50'sinden daha fazla yinlendiği görülen montaj hattı için montaj hattı öncelik diyagramı Şekil 4.2'de gösterilmiştir. Daha önceki bölümlerde de belirtildiği gibi; diyagramda yer alan dairelerin içindeki rakamlar iş ögesi(işlem) numaralarını, dairelerin dışındaki rakamlar ise iş ögesi sürelerini ifade etmektedir.



Şekil 4.2 : OCRA sayısal uygulamasında kullanılan montaj diyagramı (Can, 2013).

Sözkonusu montaj hattı 7 istasyondan meydana gelmektedir. İstasyonlarda yapılan işler ise sırasıyla aşağıda verilmiştir. Probleme ait sağ vücut için geçerli olan OCRA parametreleri ise Çizelge 4.3'de gösterilmiştir.

- 1. istasyonda 1, 3, 4, 5, 6, 7 ve 8 no.'lu işler yapılmaktadır.
- 2. istasyonda 2, 9, 10 ve 11 no.'lu işler yapılmaktadır.
- 3. istasyonda 14 ve 18 no.'lu işler yapılmaktadır.
- 4. istasyonda 12 ve 13 no.'lu işler yapılmaktadır.
- 5. istasyonda 15, 16, 17, 19 ve 20 no.'lu işler yapılmaktadır.
- 6. istasyonda 21 no.'lu iş yapılmaktadır.
- 7. istasyonda 22 no.'lu iş yapılmaktadır.

Çizelge 4.3 : Sayısal uygulama ait OCRA parametreleri(Can, 2013).

İş No	Teknik Hareket Sayısı	P	Ortalama K (%)	ERF
1	14	1	10	1
2	12	1	10	1
3	8	0,7	5	1
4	12	1	5	1
5	6	1	20	0,95
6	11	1	5	1
7	11	1	5	1
8	11	1	5	0,95
9	14	0,6	15	0,95
10	11	0,7	10	0,95
11	12	1	10	1
12	25	0,7	5	1
13	23	1	5	1
14	14	0,6	5	1
15	26	1	5	1
16	26	1	5	1
17	14	1	5	1
18	16	1	5	1
19	25	1	5	1
20	28	1	5	1
21	38	0,5	5	1
22	33	0,5	5	1

Problemin OCRA indeksinin hesaplanması ise aşağıda maddeler hâlinde verilmiştir:

- Tüm durumlarda **SS** = 30 değerini alır.
- İdeal çalışma koşullarının sağlandığı durumlarda **DP** = 0,6 ve **TİS** = 1 değerlerini alır.
- Aynı tip teknik hareketlerin çevrim süresinin %50'sinden daha fazla yinlendiği durumlarda yüksek yineleme durumu görülür ve **T** = 0,7 değerini alır.
- 1. istasyon için hesaplama yapılırsa:

Toplam Teknik Hareket Sayısı = 14 + 8 + 12 + 6 + 11 + 11 + 11 = 73

İstasyon Süresi = 15 + 51 + 17 + 11 + 23 + 17 + 21 = 155

Teknik Hareket Sıklığı = 73*60 / 155 = 28,26

Postür Çarpanı: Çizelge 4.3'de yer alan postür çarpanı değerleri, 3. iş için hesaplanabilir. Bu durumda 3. işteki çalışma duruşu, el ile geniş bir cismi avuçla tutmadır. Bu iş istasyonu süresinin (51/155=) %33'ü boyunca bu pozisyonda çalışılmaktadır. Bu durumda Çizelge 4.1'e bakılarak ilgili postür çarpanının 0,7

olduğu bulunur. Geri kalan tüm işler için de aynı şekilde Çizelge4.1'den yararlanılarak ilgili postür değerleri bulunur. 1. istasyondaki tüm işlerin P değerleri sırasıyla 1, 0,7, 1, 1, 1, 1 ve 1'dir. İstasyonun P değeri ise, istasyondaki tüm işler içerisinde en küçük P çarpanına sahip olan işin değeridir. Bu durumda P = 0,7'dir.

Ek Risk Etmenleri Çarpanı: İstasyonun ERF değeri de en küçük ERF çarpanına sahip olan işin değeridir ve 1. istasyon için 0,95'dir.

Kuvvet Çarpanı: Öncelikle istasyonda harcanan ortalama kuvvet hesaplanır:

$$(15 / 155) * 10 + (51 / 155) * 5 + (17 / 155) * 5 + (11 / 155) * 20 + (23 / 155) * 5 + (17 / 155) * 5 + (21 / 155) * 5 \cong 7$$

Son olarak Çizelge4.2'den yararlanarak enterpolasyon yapılırsa,

$$F = 1 - (0,15/5)*2 = 0,94$$

olarak bulunur.

- **Önerilen Sıklık** = $SS * P * T * K * ERF * DP * TİS$
 $= 30 * 0,7 * 0,7 * 0,94 * 0,95 * 0,6 * 1 = 7,88$
- **OCRAİndeksi** = $28,26 / 7,88 = 3,60$

Elde edilen sonuca göre 1. istasyon kırmızı bölgede yer almaktadır ve ilgili istasyon ergonomik anlamda kabul edilemez. Bu nedenle istasyonda iyileştirmeler yapılması gerekmektedir. Diğer tüm istasyonlar için de aynı şekilde OCRA indeksleri hesaplanarak Çizelge 4.4elde edilir. Çizelgeden de anlaşılacağı üzere iki istasyon kırmızı bölgede yer almakta olup hattın dengelenerek ergonomik anlamda yeterli koşullara ulaştırılması gerekmektedir.

Çizelge 4.4 : Montaj hattı OCRA indeksleri (Can, 2013).

İst. No	İş	OCRA İndeksi	İst. Zamanı
1	1,3,4,5,6,7,8	3,6 (Kırmızı)	155
2	2,9,10,11	3.4 (Sarı)	151
3	14,18	1.6 (Yeşil)	147
4	12,13	2.2 (Sarı)	149
5	15,16,17,19,20	3.7 (Kırmızı)	155
6	21	2.3 (Sarı)	160
7	21	2.1 (Sarı)	149

4.8.2 Hızlı tüm vücut değerlendirmesi (REBA) sayısal uygulaması

REBA (Rapid Entire Body Assessment)yöntemi şu durumlarda kullanılır(Alıcı ve diğ, 2017):

- Çalışma sırasında tüm vücudun kullanıldığı durumlarda
- Çalışma duruşunun statik, dinamik, yinelemeli veya değişken olduğu durumlarda
- Yüklerin sıklıkla veya seyrek olarak elle taşındığı durumlarda
- İşyeri ve ekipman değişikliğinde
- Eğitimden önce veya sonra çalışanların risk alma algılarının gözlemlenmesi istendiği durumlarda

REBA yöntemi ile işçinin vücudunun hem sol hem de sağ tarafı aynı anda değerlendirilebilir. Bu yöntem ile işin gerçekleştirildiği anda gövdede, boyunda, bacaklarda, üst kollarda, alt kollarda ve bileklerde meydana gelen esnemelere ve bükülmelere bağlı olarak işçide oluşan marûziyetler, 1 ilâ 15 arasında değişen bir skorla derecelendirilir (Sağıroğlu ve diğ, 2015).

REBA skoru belirlenirken vücut; gövde, boyun ve bacaklardan oluşan A grubu ve üst kol, alt kol ve bileklerden oluşan B grubu olmak üzere iki ayrı grupta değerlendirilir. Bu vücut bölümlerine ait hareketler açılara ayrılır ve toplam puan hesaplanırken tüm vücut duruşlarının birleşik etkisi dikkate alınır (Felekoğlu ve Taşan, 2017).

REBA yönteminde, gövde, boyun ve bacakların puanları her biri için ayrı ayrı belirlenerek, bu puanlar toplu olarak Çizelge 4.5’de gösterilmiştir. Aynı şekilde üst kol, alt kol ve bileklerin puanları her biri için ayrı ayrı belirlenerek, bu puanlar da toplu olarak Çizelge 4.6’da gösterilmiştir.

Çizelge 4.5 : REBA yönteminde gövde, boyun ve bacak puanları (Sağıroğlu ve diğ, 2015).

Tablo A	Boyun												
	Bacaklar	1				2				3			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Gövde	1	1	2	3	4	1	2	3	5	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

Çizelge 4.6 : REBA yönteminde bilek, üst kol ve alt kol puanları (Sağıroğlu ve diğ, 2015).

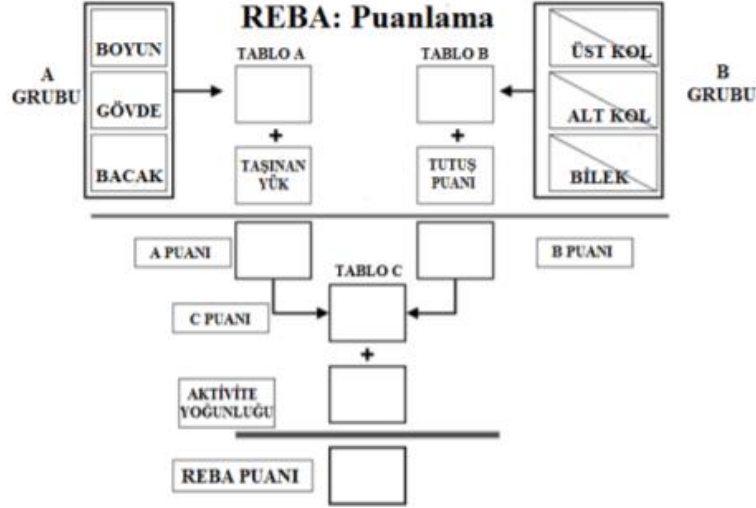
Tablo B	Alt Kol						
	Bilek	1			2		
		1	2	3	1	2	3
Üst Kol Puanı	1	1	2	2	1	2	3
	2	1	2	3	2	3	4
	3	3	4	5	4	5	5
	4	4	5	5	5	6	7
	5	6	7	8	7	8	8
	6	7	8	8	8	9	9

Çizelge 4.5’de yer alan puanların kombinasyonundan oluşan bir puan hesaplanır ve bu puana Taşınan Yük/Kuvvet puanı da eklenerek A puanı elde edilir. Aynı şekilde, Çizelge 4.6’da yer alan puanların kombinasyonundan oluşan bir puan hesaplanır ve bu puana da Tutuş puanı eklenerek B puanı elde edilir. A ve B puanlarının kombinasyonu ise Çizelge 4.7’de gösterildiği gibi bütünleştirilir.

Daha sonra ise, Çizelge 4.7 kullanılarak A ve B puanlarının kombinasyonundan oluşan C puanı elde edilir. C puanına da aktivite (faaliyet) yoğunluk puanının eklenmesiyle REBA skoru elde edilmiş olur. REBA skorunun hesaplanmasına yönelik algoritma Şekil 4.3’de verilmiştir.

Çizelge 4.7 : A ve B puanlarının kombinasyonundan C puanının elde edilmesi (Sağıroğlu ve diğ, 2015).

Puan A (Tablo A'dan alınan puan + kuvvet/yükleme puanı)	Tablo C											
	Puan B, (Tablo B'deki değer + tutuş skoru)											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
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	11	12	12	12	12	12	12	12
12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12



Şekil 4.3 : Hesaplanan puanlara göre REBA skortlama algoritması (Sağiroğlu ve diğ, 2015).

REBA skorunun elde edilmesinden sonra Çizelge 4.8’de verilen değerlendirme ölçeklerine göre hareket veya vücut duruşunun risk düzeyi saptanmış olacaktır.

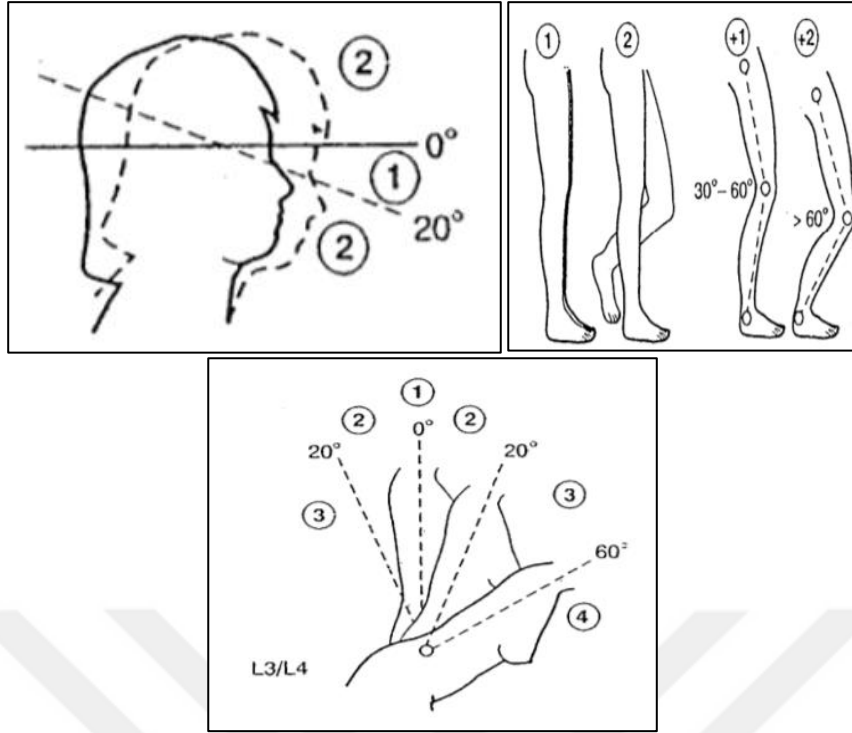
Çizelge 4.8 : A ve B puanlarının kombinasyonu (Sağiroğlu ve diğ, 2015).

Derece (Renk)	REBA Puanı	Risk Düzeyi	Aksiyon
0 (Yeşil)	1	İhmal Edilebilir	Gerekli değil
1 (Sarı)	2-3	Düşük	Gerekli olabilir
2 (Turuncu)	4-7	Orta	Gerekli
3 (Kırmızı)	8-10	Yüksek	Kısa zaman içerisinde gerekli
4 (Koyu Kırmızı)	11-15	Çok Yüksek	Hemen gerekli

Bölümün başında verilen Çizelge 4.5’de yer alan, REBA yönteminde gövde, boyun ve bacak puanları hesaplanırken, Çizelge 4.9 ve Şekil 4.4’ten yararlanılır. Yine bölümün başında verilen Çizelge 4.6’da yer alan, REBA yönteminde bilek, üst kol ve alt kol puanları hesaplanırken Çizelge 4.10 ve Şekil 4.5’den yararlanılır.

Çizelge 4.9 : REBA yönteminde gövde, boyun ve bacak puan hesaplama puanları(Sağiroğlu ve diğ, 2015).

	Hareket	Puan	Değişim Puanı
Boyun	0 ⁰ -20 ⁰ bükülme	1	Boyunda dönme varsa +1
	> 20 ⁰ bükülme	2	
	Esne	2	Boyunda yana eğilme varsa +1
Gövde	Dik Duruş	1	Gövde de dönme hareketi varsa +1 Gövde de yana eğilme hareketi varsa +1
	0 ⁰ -20 ⁰ bükülme	2	
	0 ⁰ -20 ⁰ esne		
	20 ⁰ -60 ⁰ bükülme	3	
	> 20 ⁰ esne	4	
> 60 ⁰ bükülme			
Bacak	İki bacak üzerine yük biniyorsa, yürürken veya otururken	1	Dizler 30 ⁰ - 60 ⁰ arasında bükülüyorsa +1
	Tek bacak üzerine yük biniyorsa veya dengesiz duruş varsa	2	Dizler 60 ⁰ den daha fazla bükülüyorsa +2

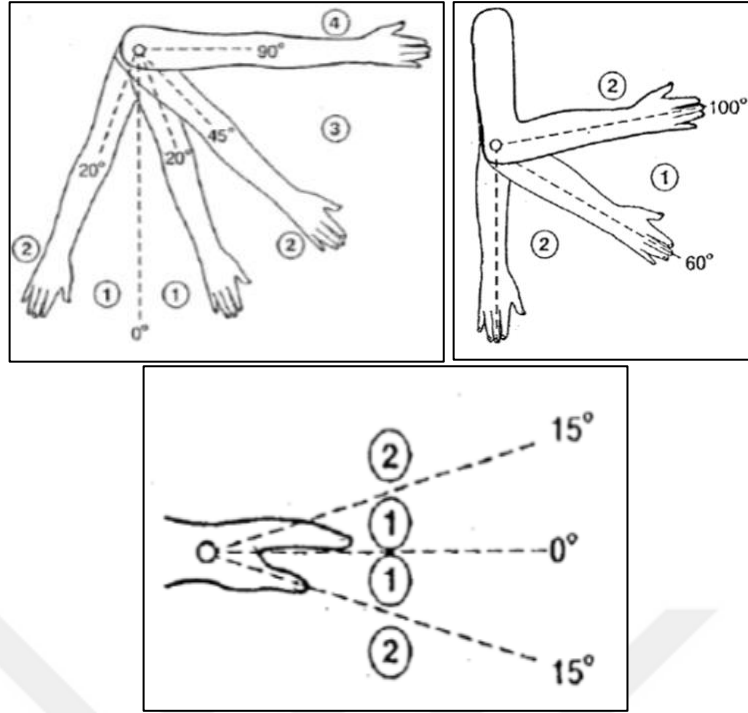


Şekil 4.4 : REBA yönteminde gövde, boyun ve bacak duruşları (Sağiroğlu ve diğ, 2015).

REBA puanının hesaplanmasına yönelik Çizelge 4.7’deki A ve B puanları bulunurken, taşınan yük ve kuvvet puanı, Çizelge 4.11’de verilen değerlere göre eklenir. Daha sonra A ve B puanlarının kombinasyonundan oluşan C puanından REBA skoru elde edilirken, Çizelge 4.12’deki aktivite yoğunluk puanı hesaplanır.

Çizelge 4.10 : REBA yönteminde bilek, üst kol ve alt kol puan hesaplama puanları (Sağiroğlu ve diğ, 2015).

	Hareket	Puan	Değişim Puanı
Bilek	0° -15° bükülme	1	Bilekler sağa sola bükülüyorsa +1
	0° -15° esneme		
	> 15° bükülme	2	Bilekler döndürülüyorsa +1
	> 15° esneme		
Üst Kol	0° -20° bükülme	1	Omuzlar yukarı kalkık çalışma varsa +1
	0° -20° esneme	2	Üst kolun hareketi engelleniyorsa +1
	20° -45° bükülme		
	> 20° esneme	3	Kollar destekleniyorsa veya yardımcı çalışma varsa -1
	45° -90° bükülme	4	
Alt Kol	> 90° bükülme	1	-
	60° -100° bükülme		
	< 60° bükülme		
	> 100° bükülme	2	



Şekil 4.5 : REBA yönteminde bilek, üst kol ve alt kol duruşları (Sağıroğlu ve diğ, 2015).

Çizelge 4.11 : Taşınan yük puanı ve tutuş puanı hesaplama tablosu (Sağıroğlu ve diğ, 2015).

Taşınan Yük Puanı		
Durum	Puan	Değişim Puanı
yük < 5 kg	0	Taşınan yükte sarsıntı veya ani taşıma varsa +1
5 kg < yük < 10 kg	1	
yük > 10 kg	2	
Tutuş Puanı		
Durum	Puan	Değişim Puanı
İlgili ekipmanların tutamaklarının uygun ve orta şiddette tutuş kuvveti	0	
El tutuşu kabul edilebilir. Fakat ideal değil, vücudun başka bir yeriyle destekleniyor.	1	
El tutuşu kabul edilemez. Ama mümkün (zayıf).	2	
Tutamak yoktur. Herhangi bir şekilde elle tutmak ya da vücutla tutmayı desteklemek mümkün değil.	3	

Çizelge 4.12 : Aktivite yoğunluğu puanı hesaplama tablosu (Sağıroğlu ve diğ, 2015).

Durum	Puan
Bir ya da birden fazla organ bir dakikadan fazla aynı konumda kalıyorsa	1
Yürümeden aynı konumda dakikada 4 kez ve fazla iş yapılıyorsa	1
Hızlı bir şekilde duruşta bir değişiklik oluluyorsa	1

REBA yöntemi kullanılarak ergonomik risk etmenlerinin analizi sayısal bir örnek ile aşağıda ifâde edilmiştir.

4.8.2.1 A puanının hesaplanması

Gözlemler sırasında işçinin sorumlu olduğu işi yerine getirirken çeşitli vücut pozisyonlarına karşılık çeşitli puanlar belirlenmiştir:

- Boyun kısmında 20 dereceden az bir bükülme ve yana eğilme olduğu saptanmıştır. Bu durumda, Çizelge 4.9 ve Şekil 4.4'den yararlanarak işçinin boyun puanı ($1 + 1 =$) 2 olarak hesaplanır ve değerlendirmeye alınır.
- Gövde kısmında 20 ilâ 45 derece arasında bir bükülme ve esneme olduğu saptanmıştır. Bu durumda, Çizelge 4.10 ve Şekil 4.5'den yararlanarak işçinin gövde puanı ($3 + 1 =$) 4 olarak hesaplanır ve değerlendirmeye alınır.
- Bacak kısmında tek bacak üzerine yük bindiği görülmüş ve bükülme saptanmamıştır. Bu durumda, Çizelge 4.9 ve Şekil 4.4'den yararlanarak işçinin bacak puanı 2 olarak hesaplanır ve değerlendirmeye alınır.

Yukarıdaki hesaplamalara göre Çizelge 4.5'de yer alan matris üzerinde boyun puanının 2, gövde puanının 4 ve bacak puanının 2 olduğu hücrelerin kesişiminden 6 puan elde edilir. Çizelge 4.11 yardımıyla da taşınan yük puanı 0 olarak saptanır. Bu iki puanın toplamı ise bize A puanını 6 olarak verir.

4.8.2.2 B puanının hesaplanması

Gözlemler sırasında işçinin sorumlu olduğu işi yerine getirirken çeşitli vücut pozisyonlarına karşılık çeşitli puanlar belirlenmiştir:

- Alt kol kısmında 60 dereceden az bir bükülme saptanmıştır. Böylece, Çizelge 4.10 ve Şekil 4.5'ten yararlanarak işçinin alt kol puanı 2 olarak hesaplanır ve değerlendirmeye alınır.
- Üst kol kısmında 20 ilâ 60 derece arasında bir bükülme ve omuzlarda yukarı kalkık çalışma olduğu saptanmıştır. Böylece, Çizelge 4.10 ve Şekil 4.5'den yararlanarak işçinin üst kol puanı ($2+1=$) 3 olarak hesaplanır ve değerlendirmeye alınır.

- Bilek kısmında 0 ilâ 15 derece arasında bir bükülme saptanmış ve esneme/dönme saptanmamıştır. Böylece, Çizelge 4.10 ve Şekil 4.5'ten yararlanarak işçinin bilek kol puanı 1 olarak hesaplanır ve değerlendirmeye alınır.

Yukarıdaki hesaplamalara göre Çizelge 4.6'da yer alan matris üzerinde alt kol puanının 2, üst kol puanının 3 ve bilek puanın 1 olduğu hücrelerin kesişiminden 4 puan elde edilir. Çizelge 4.11 yardımı ile de tutuş puanı 0 olarak saptanır. Bu iki puanın toplamı ise bize B puanını 4 olarak verir.

4.8.2.3 C puanının ve REBA skorunun hesaplanması

Yukarıdaki hesaplamalara göre A puanı 6 ve B puanı 4 olarak saptanmıştı. Bu puanların Çizelge 4.7'de yer alan matristeki kesişimlerinden C puanı 7 olarak elde edilir. Çizelge 4.12 yardımıyla da aktivite yoğunluğu puanı 1 olarak saptanır. Bu iki puanın toplamı ise bize REBA skorunu ($7+1=$) 8 olarak verir.

4.8.3 Hızlı üst uzuv değerlendirmesi (RULA) sayısal uygulaması

RULA yöntemi, bir işçinin genellikle çok fazla hareket etmeden ve oturarak gerçekleştirdiği işlerin değerlendirilmesinde kullanılan, ergonomik risk değerlendirme yöntemidir. Genellikle oturularak yapılan bu tür işlerde işçi çoğunlukla el, el bileği, dirsek ve omuz gibi üst uzuvlarını kullanır. Bu nedenle vücudun üst uzuvlarındaki baskı fazla iken; sırt, bel ve bacak gibi alt uzuvlarındaki baskı görece daha azdır.

RULA skoru belirlenirken vücut; üst kol, alt kol ve el bileklerinden oluşan A grubu ve boyun, gövde ve bacaklardan oluşan B grubu olmak üzere iki ayrı grupta değerlendirilmektedir. A ve B gruplarına ait vücut duruşlarının hareket açıları literatürde derecelendirilmektedir. Derecelendirme sonucuna göre elde edilen skorun artması, risk etmenlerinin etkisinin arttığını göstermektedir (Can, 2013).

Bu yöntem ile işin gerçekleştirildiği anda üst kol, alt kol, el bilekleri, boyun, gövde ve bacaklarda meydana gelen pozisyonlara bağlı olarak işçide oluşan mâruzîyetler 1 ile 7 arasında değişen bir skorla derecelendirilir. RULA yönteminde, üst kol, alt kol ve el bileklerinin puanları her biri için ayrı ayrı belirlenerek, bu puanların kombinasyonu Çizelge 4.13 ile gösterilir. Benzer şekilde boyun, gövde ve bacakların puanları her biri için ayrı ayrı belirlenerek, bu puanların kombinasyonu Çizelge 4.14'deki gibi gösterilir.

Çizelge 4.13 : Üst kol, alt kol ve el bileklerinin puanları (Can, 2013).

Bilek Duruşu Skoru									
Üst Kol	Alt Kol	1		2		3		4	
		Bilek Dönme		Bilek Dönme		Bilek Dönme		Bilek Dönme	
		1	2	1	2	1	2	1	2
1	1	1	2	2	2	2	3	3	3
	2	2	2	2	2	3	3	3	3
	3	2	3	3	3	3	3	4	4
2	1	2	3	3	3	3	4	4	4
	2	3	3	3	3	3	4	4	4
	3	3	4	4	4	4	4	5	5
3	1	3	3	3	4	4	4	5	5
	2	3	4	4	4	4	4	5	5
	3	4	4	4	4	4	5	5	5
4	1	4	4	4	4	4	5	5	5
	2	4	4	4	4	4	5	5	5
	3	4	4	4	5	5	5	6	6
5	1	5	5	5	5	5	6	6	7
	2	5	6	6	6	6	7	7	7
	3	6	6	6	7	7	7	7	8
6	1	7	7	7	7	7	8	8	9
	2	8	8	8	8	8	9	9	9
	3	9	9	9	9	9	9	9	9

Çizelge 4.14 : Boyun, gövde ve bacakların puanları (Can, 2013).

Boyun Duruşu Skoru	Gövde Duruşu Skoru											
	1		2		3		4		5		6	
	Bacaklar		Bacaklar		Bacaklar		Bacaklar		Bacaklar		Bacaklar	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
1	1	3	2	3	3	4	5	5	6	6	7	7
2	2	3	2	3	4	5	5	5	6	7	7	7
3	3	3	3	4	4	5	5	6	6	7	7	7
4	5	5	5	6	6	7	7	7	7	7	8	8
5	7	7	7	7	7	8	8	8	8	8	8	8
6	8	8	8	8	8	8	8	9	8	9	9	9

Çizelge 4.13’de yer alan puanların kombinasyonundan A puanı ve bu puana kas kullanımı ve yük puanları da eklenerek C puanı elde edilir. Aynı şekilde, Çizelge 4.14’de yer alan puanların kombinasyonundan B puanı ve bu puana kas kullanımı ve yük puanları eklenerek D puanı elde edilir.

C ve D puanlarının hesaplanmasında kullanılan kas kullanımı puanı, 1 dakikada 4 kereden fazla aynı hareketin yapılıp yapılmadığını belirlemektedir. Bu kapsamda, sergilenen duruş statik ise kas kullanım puanı olarak, A ve B puanlarına birer puan ekleme yapılmaktadır.

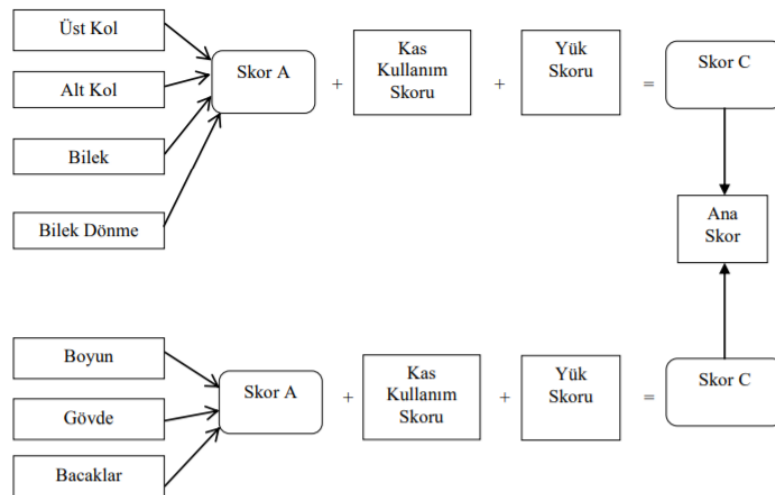
C ve D puanlarının hesaplanmasında kullanılan yük puanı ise, el aleti kullanıldığı durumlarda ya da bir ağırlıkla birlikte işlem yapılması gerektiği durumlarda ortaya çıkan zorlanmayı değerlendirmektedir. Mâruz kalınan yük ya da harcanan kuvvete göre yük puanı aralıkları aşağıda maddeler hâlinde verilmiştir:

- 2 kg. ya da daha az ise puan “0” dır.
- 2-10 kg. arasında ise puan”1” dir.
- 2-10 kg. arasında statik ya da yinelemeli ise puan “2” dir.
- Aralıklarla yüke mâruziyet ya da kuvvet harcanması sözkonusu ise ve yük 10 kg’dan fazla ise puan “2” dir.
- Yüke mâruziyet 10 kg’dan fazla ve statik ya da tekrarlıysa puan “3” dür.
- Eğer hızlı bir şekilde yüke mâruziyet ya da kuvvet harcanması sözkonusu ise puan “3”dür.

C ve D puanlarının yukarıdaki etmenler gözönünde bulundurularak hesaplanmasından sonra, Çizelge 4.15 kullanılarak C ve D puanlarının kombinasyonundan oluşan ana puan elde edilir. Elde edilen puanlara göre RULA skortlama algoritması özet olarak Şekil 4.6’da gösterilmiştir.

Çizelge 4.15 : C ve D puanlarının kombinasyonu (Can, 2013).

		Skor D (Boyun, Gövde, Bacak)						
		1	2	3	4	5	6	7+
S k o r C	1	1	2	3	3	4	5	5
	2	2	2	3	4	4	5	5
	3	3	3	3	4	5	5	6
	4	3	3	3	4	5	6	6
	5	4	4	4	5	6	7	7
	6	4	4	5	6	6	7	7
	7	5	5	6	6	7	7	7
	8	5	5	6	7	7	7	7



Şekil 4.6 : Elde edilen puanlara göre RULA skortlama algoritması (Can, 2013).

RULA skoru elde edildikten sonra ise Çizelge 4.16’da verilen değerlendirme ölçeklerine göre, alınacak aksiyona karar verilmiş olacaktır. Ayrıca Çizelge 4.13’de yer alan üst kol, alt kol ve bilek puanı bulunurken, Çizelge 4.17 ve Şekil 4.7’den yararlanılacaktır. Aynı şekilde Çizelge 4.14’de yer alan boyun, gövde ve bacak puanı bulunurken, Çizelge 4.18 ve Şekil 4.8’den yararlanılacaktır.

Çizelge 4.16 : RULA mâruzîyet puanı değerlendirme ölçekleri (Can, 2013).

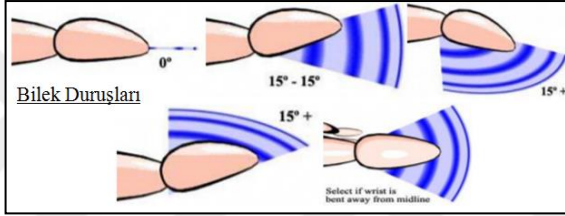
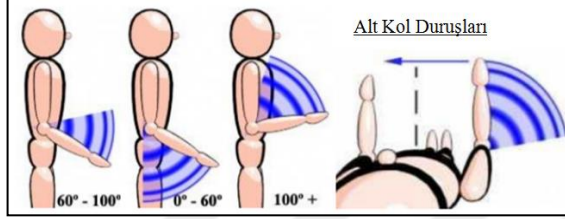
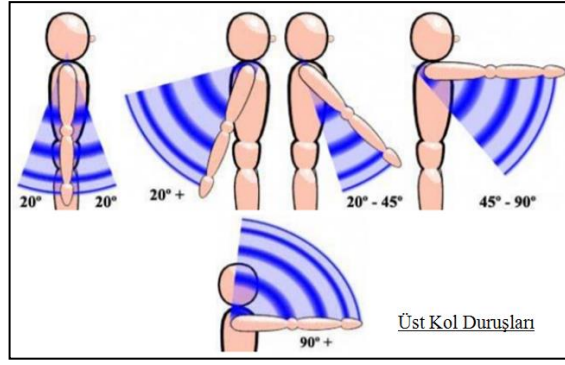
RULA Puanı	Aksiyon
1 - 2	Sergilenen çalışma duruşu kabul edilebilir bir duruştur. Söz konusu duruş, uzun süreler boyunca sergilenmemektedir. Dolayısıyla herhangi bir tehlike söz konusu değildir.
3 - 4	Çalışma duruşu üzerinde daha fazla araştırma yapmak gereklidir ve iyileştirme yönünde değişimler yapılmalıdır.
5 - 6	Gerekli iyileştirmeler en kısa zamanda yapılmalıdır.
7	İyileştirmeler hemen yapılmalıdır.

Çizelge 4.17 : RULA skoruna yönelik üst kol, alt kol ve bilek puanı hesaplama tablosu (Can, 2013).

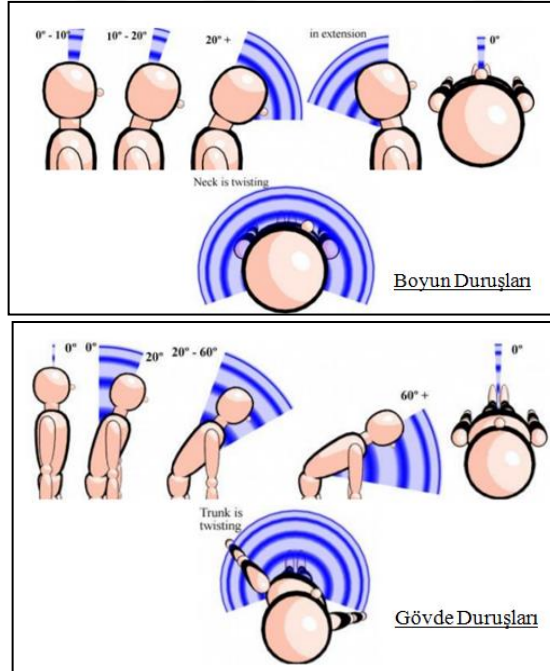
	Hareket	Puan	Değişim Puanı
Üst Kol	20° ekstansiyon hareketi ya da 20° fleksiyon hareketi	1	Duruş esnasında omuzlar yukarı doğru kalkmışsa +1 Üst kol abdüksiyondaysa +1 Operatör bir yere dayanarak çalışıyorsa ve kollardaki yük destekleniyorsa -1
	20° den fazla ekstansiyon hareketi ya da 20°-45° arasında fleksiyon hareketi	2	
	45°-90° arasında fleksiyon hareketi	3	
	90° den fazla fleksiyon hareketi	4	
Alt Kol	60°-100° arasında fleksiyondaysa	1	Vücutun orta bölgesinin hizasında çalışıyorsa ya da yanlara doğru açılıyorsa +1
	0°-60° arasında ekstansiyon veya 100° den fazla fleksiyondaysa	2	
Bilek (Hareket Alanı)	Nötral pozisyondaya	1	Yatay eksenden sağa ya da sola doğru eğilmişse +1
	15° ekstansiyondaysa ya da fleksiyondaysa	2	
	15° den fazla ekstansiyondaysa ya da fleksiyondaysa	3	
Bilek (Dönme Şekli)	Dönme alanının ortasına yaklaşmışsa	1	-
	En fazla dönebileceği alana yaklaşmış ya da sonundaysa	2	

Çizelge 4.18 : RULA skoruna yönelik boyun, gövde ve bacak puanı hesaplama tablosu (Can, 2013).

	Hareket	Puan	Değişim Puanı
Boyun	0° -10° arasında fleksiyondaysa	1	Boyun dönmüşse +1
	10° -20° arasında fleksiyondaysa	2	
	20° veya daha fazla fleksiyondaysa	3	Boyun yanlara doğru eğikse +1
	Ekstansiyondaysa	4	
Gövde	Oturarak ya da ayakta ve iyi desteklenmiş bir şekilde 90° açı yapan bir gövde duruşu söz konusuysa	1	Gövde dönmüşse +1
	0° -20° arasında fleksiyondaysa	2	
	20° -60° arasında fleksiyondaysa	3	Gövde yana doğru eğikse +1
	60° den daha fazla fleksiyondaysa	4	
Bacaklar	Bacaklar ve ayaklar iyi bir şekilde desteklenmiş ve otururken vücut ağırlığı iki bacağa/ayağa eşit dağılmışsa	1	-
	Vücut ağırlığı iki ayağa eşit olarak dağılmış ise ve pozisyon değişikliği için yer varsa	1	
	Bacaklar ve ayaklar desteklenmemiş ve ağırlık eşit dağılmamışsa	2	



Şekil 4.7 : RULA skorlamada üst kol, alt kol ve bilek duruşları (Can, 2013).



Şekil 4.8 : RULA skorlamada boyun ve gövde duruşları (Can, 2013).

RULA yöntemi kullanılarak ergonomik risk etmenlerinin analizi, sayısal bir örnek ile izleyen alt bölümde ifâde edilmiştir.

4.8.3.1 A puanının hesaplanması

Gözlemler sırasında işçinin sorumlu olduğu işi yerine getirirken çeşitli vücut pozisyonlarına karşılık çeşitli puanlar belirlenmiştir:

- Üst kol kısmında 20° ile 45° arasında bir açı saptanmıştır. Böylece, Çizelge 4.17 ve Şekil 4.7'den yararlanarak işçinin üst kol puanı 2 olarak değerlendirilir.
- Alt kol kısmında 100 dereceden fazla fleksiyon olduğu saptanmıştır. Böylece, Çizelge 4.17 ve Şekil 4.7'den yararlanarak işçinin alt kol puanı 2 olarak değerlendirilir.
- Bilek duruşunda 15 dereceden fazla fleksiyon ve ekstansiyon hareketi saptanmıştır. Çizelge 4.17 ve Şekil 4.7'den yararlanarak işçinin bilek duruşu puanı 3 olarak hesaplanır. Ayrıca bileğin, dönme alanının ortasında olduğu saptanmıştır. Bu durumda yine Çizelge 4.17 ve Şekil 4.7'den yararlanarak bilek dönme puanı 1 olarak değerlendirilir.

Yukarıdaki hesaplamalara göre Çizelge 4.13'de yer alan matris üzerinde üst kol puanının 2, alt kol puanının 2, bilek duruşu puanının 3 ve bilek dönme puanının 1 olduğu hücrelerin kesişiminden A puanı 3 olarak elde edilir. Yapılan iş, bir dakikadan uzun statik duruşa sahip olduğu için de A puanına 1 puan ekleme yapılarak C puanı 4 olarak değerlendirilir.

4.8.3.2 B puanının hesaplanması

Gözlemler sırasında işçinin sorumlu olduğu işi yerine getirirken çeşitli vücut pozisyonlarına karşılık çeşitli puanlar belirlenmiştir:

- Boyun kısmında 20 dereceden fazla fleksiyon saptanmıştır. Böylece, Çizelge 4.18 ve Şekil 4.8'den yararlanarak işçinin boyun puanı 3 olarak hesaplanır.
- Gövde kısmında 20° ilâ 60° arasında fleksiyon saptanmıştır. Böylece, Çizelge 4.18 ve Şekil 4.8'den yararlanarak işçinin gövde puanı 3 olarak değerlendirilir.
- Bacak kısmında desteklenmiş ve dengeli bir pozisyon saptanmamıştır. Böylece, Çizelge 4.18'den yararlanarak işçinin bacak puanı 1 olarak hesaplanır.

Yukarıdaki hesaplamalara göre Çizelge 4.14'de yer alan matris üzerinde boyun puanının 3, gövde puanının 3 ve bacak puanının 1 olduğu hücrelerin kesişiminden B

puanı 4 olarak elde edilir. Yapılan iş, bir dakikadan uzun statik duruşa sahip olduğu için de B puanına 1 puan ekleme yapılarak D puanı 5 olarak değerlendirilir.

4.8.3.3 C puanının ve RULA skorunun hesaplanması

Yapılan hesaplamalara göre örneğin C puanı 4 ve D puanı 5 olarak saptanmıştır. Bu puanların Çizelge 4.15’de yer alan matristeki kesişimlerinden ana skor olan RULA skoru 5 olarak elde edilir.





5. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Alt başlıklarda adı geçen çalışmalar örnek olarak seçilmiş bir grup çalışmadır. Bu çalışmaları içeren daha geniş bir grup bölüm sonunda bir tabloda özet hâlinde verilmiştir.

5.1 I tipi Montaj Hatlarının Dengelenmesine Yönelik Yapılan Çalışmalar

Montaj hatlarının dengelenmesi yaklaşımı ilk olarak Bryton tarafından 1954 yılında yüksek lisans tez çalışmasında ortaya atılmıştır. Bryton, iş istasyonlarının sayısının sabit tutulduğu varsayımıyla iş öğelerini iş istasyonları arasında değiştirerek denge kaybını enazlamayı ve iş istasyonlarının sürelerini eşitlemeyi amaçlamıştır.

Montaj hattı dengeleme problemleri ilk olarak 1954 yılında Helgeson tarafından formüle edilmiş olup, ilk bilimsel makale Salveson tarafından 1955 yılında yayımlanmıştır. Bu çalışmada iş istasyonlarındaki toplam boş süreyi enküçükleme amacıyla 0-1 tamsayılı programlama modeli geliştirilmiştir. 1954 yılından bu yana birçok araştırmacı, montaj hattı dengeleme problemlerinin çözümü için pek çok çözüm yöntemi geliştirmişlerdir.

Klein ve Scholl (1996), üretim oranını enbüyüklemek amacıyla basit montaj hattı dengeleme problemi tip-2'nin çözümü için Dal-Sınır yöntemini uygulamışlardır. Önerilen dal sınır yöntemi, yerel alt sınır yöntemi kullanılarak geliştirilmiştir.

Merengo ve diğ. (1999), karma modellenli montaj hatlarının bazı tipik problemlerini analiz etmişlerdir. Geliştirmiş oldukları sezgisel algoritma ile tamamlanamayan işlerin oranının enküçülenmesi ve böylece ara stokların azaltılması amaçlanmıştır.

Plans ve Corominas (1999), tek modellenli geleneksel bir montaj hattının verimliliğinin enbüyüklenmesini amaçlayan SALBP-E problemini ele almışlardır. Bu çalışmada, problemin çözümü için karma tamsayılı doğrusal programlama modeli önerilmiştir.

Bautista ve diğ. (2000), tek modellenli geleneksel montaj hatlarında iş istasyonu sayısını en aza indirmeyi ve en az sayıda iş istasyonu ile çevrim süresini enküçüklemeyi amaçlamışlardır. Problemin çözümünde bazı klasik sezgisel uygulamalardan elde

edilen Açgözlü rastgele uyarlanabilir arama prosedürü ve genetik algoritmalar önerilmiştir. Pedro ve Ana (2002), karışık modeli, paralel istasyonlu montaj hattı dengeleme problemi için benzetimli tavlama yaklaşımı temelli iki aşamalı sezgisel bir prosedür geliştirmiştir. Modelin ilk amacı, iş istasyonu sayısını enazlamak, ikinci amacı ise işleri iş istasyonlarına dengeli bir şekilde dağıtmaktır.

Ağpak ve Gökçen (2004), geleneksel tek modeli montaj hattı dengeleme probleminin çözümü için deterministik iş süreli 0-1 tamsayılı programlama modeli geliştirmişlerdir. Önerilen yaklaşımın amacı, montaj hattının en az sayıda istasyon ve kaynak ile dengelenmesini sağlamaktır. Baykasoğlu ve Dereli (2009), basit düz ve U tipi montaj hattı dengeleme problemlerinde iş istasyonu sayısını enazlamak amacıyla Karınca Kolonisi Optimizasyonu temelli sezgisel bir algoritma önermişlerdir.

Çakır ve diğ. (2011), paralel istasyonlu, tek modeli, stokastik montaj hattı dengeleme probleminin çok amaçlı optimizasyonu için benzetimli tavlama temelli yeni bir çözüm algoritması önermişlerdir. Adham ve Tahar (2012), montaj hattı dengeleme problemlerinin çözümü için Çok Amaçlı Modelleri (MOM) ve Genetik Algoritma Sistemini (GA) bir araya getirerek MOGA adlı Çok Amaçlı Genetik Algoritma önermişlerdir. Önerilen algoritma ile montaj hattının verimliliğini arttırmak ve istasyonlar arasındaki dengesizliği çözmek amaçlanmıştır.

Shwetank ve diğ. (2013), U tipi hat sistemleri ile düz hat sistemleri arasındaki iş gücü verimliliğini değerlendirmeye yönelik bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Problemin çözümünde U tipi montaj hattı için (CPM) kritik yol yöntemine dayalı sezgisel bir yaklaşım uygulanmıştır.

Zacharia ve Nearchou (2013), bulanık işlem süreli tek modeli montaj hattı dengeleme probleminde, hat etkinliğini enbüyüklemek amacıyla, Genetik Algoritma tabanlı bir meta-sezgisel yöntem geliştirmişlerdir. Ullah ve diğ. (2014), çok amaçlı, tek modeli bir montaj hattı dengeleme probleminin çözümü için Pareto tabanlı Yapay Arı Kolonisi algoritması önermişlerdir. Problemin amaçları; montaj hattının çevrim süresini enazlamak, iş istasyonlarındaki işlerin tamamlanma zamanının çevrim süresini aşmaması olasılığını enbüyüklemek ve montaj hattındaki farklı iş istasyonlarındaki iş yükü dağılımının düzgünlüğünü sağlamaktır.

Yapılan literatür taraması kapsamında I tipi montaj hattı dengeleme literatürü matrisi Çizelge 5.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 5.1 : I tipi montaj hattı dengeleme literatürü matrisi.

YIL	YAZAR	MODEL SAYISI		AMAÇ												ÇÖZÜM YÖNTEMİ		PARALEL İSTASYON DURUMU		İŞLEM SÜRESİ	
		TM	KM	ÜOEB	TİOEK	ASEK	MHVEB	İSEK	İİDD	ÇSEK	SSİMİA	DİEK	TMEK	İGV	HEEB	ANALİTİK	SEZGİSEL	E	H	D	S
1996	Klein ve Scholl	X		X												X			X	X	
1999	Merengo ve diğ.		X		X	X											X		X		X
1999	Plans ve Corominas	X					X									X			X	X	
2000	Bautista ve diğ.	X						X		X							X		X	X	
2000	Ponnambalam ve diğ.	X					X	X				X					X		X	X	
2002	Pedro ve Ana		X					X	X								X	X		X	
2004	Ağpak ve Gökçen	X									X					X			X	X	
2004	Simaria ve Vilarinho		X						X	X							X	X		X	
2005	Mosadegh ve ark.		X						X								X		X	X	
2006	Levitin ve diğ.	X		X					X	X							X		X	X	
2006	Gökçen ve diğ.	X						X									X	X		X	
2009	Baykasoğlu ve Dereli	X						X									X		X	X	
2011	Çakır ve diğ.	X										X	X				X	X			X
2011	Nourmohammadia ve Zandieh	X								X		X					X		X	X	
2011	Ayazi ve diğ.	X						X	X	X							X	X			X
2012	Sewell ve Jacobson	X						X									X		X	X	
2012	Adham ve Tahar		X				X		X								X		X	X	
2013	Shwetank ve diğ.	X												X			X		X	X	
2013	Zacharia ve Nearchou	X													X		X		X		X
2014	Ullah ve diğ.	X							X	X							X		X		X
Yapılan Çalışma Sayısı		15	5	2	1	1	3	7	7	6	1	3	1	1	1	3	17	5	15	15	5

5.2 U tipi Montaj Hatlarının Dengelenmesine Yönelik Yapılan Çalışmalar

Miltenburg ve Wijngaard (1994), basit U tipi montaj hattı dengeleme problemleriyle ilgili ilk önemli çalışmayı yapmışlardır. U tipi montaj hatlarının dengelenmesi için dinamik programlama yöntemi geliştirilmiştir. Problemde iş istasyonu sayısını enküçükmek amaçlanmıştır. Önerilen algoritma, 21 küçük boyutlu problem için uygulanmıştır. Uygulanan 21 problemin 19'unda U tipi montaj hattında geleneksel montaj hattıyla eşit sayıda iş istasyonu, 2'sinde U tipi montaj hattında geleneksel montaj hattına kıyasla 1 adet daha az sayıda iş istasyonu veren sonuçlara ulaşılmıştır. Algoritma, sınırlı büyüklüğe sahip problem kümeleri için başarılı sonuçlar vermektedir.

Miltenburg (1998), çok sayıda U tipi hattın meydana gelen dengeleme probleminin çözümü için bir dinamik programlama algoritması öne sürmüştür. Problemde iş istasyonu sayısını enküçükmek ve boş kalma süresini bir iş istasyonuna yoğunlaştırmak amaçlanmıştır. Bununla birlikte, iş öğelerinin U-tipi hatlara atanmalarının mâliyeti de dikkate alınmıştır. Geliştirilen algoritma, iş öğesi sayısının 22'den fazla olmadığı durumlarda ve öncelik diyagramı çok geniş olmayan çoklu U tipi hatlarda başarılı sonuçlar vermiştir. Önerilen dinamik programlama modeli, Lawler'ın I tipi hatlar için geliştirdiği yaklaşımın U tipi hatlara uyarlanması ile geliştirilmiştir.

Debora ve diğ. (1998), tek modellenli deterministik U tipi montaj hattı dengeleme problemini ele almışlardır. Problemin çözümü için toplam boş kalma süresini enazlamak ve iş istasyonları arasındaki iş yükünün dengelenmesini sağlamak amacıyla genetik algoritma (GA) yöntemi sunulmuştur. Böylelikle sözkonusu çalışma ile U tipi montaj hatları için ilk kez bir genetik algoritma çözümü geliştirilmiştir.

Önerilen algoritmanın testi için literatürde varolan 61 farklı problemten oluşan 12 ayrı problem kümesi kullanılmıştır. Elde edilen test sonuçlarına göre önerilen algoritma, 49 vakada önceki çalışmalarla aynı sonuçları elde etmiştir. Bununla birlikte 11 vakada daha üstün, 1 vakada ise daha kötü bir sonuca ulaşılmıştır.

Urban (1998), U tipi montaj hattı dengeleme probleminde iş istasyonu sayısını enazlamak için en iyi çözüme ulaşmada tamsayı programlama modeli geliştirmiştir.

Önerilen Tamsayı Programlama Modeli, Miltenburg ve Wijngaard (1994) test problemleri için çözülmüştür. Önerilen model, en çok 14 iş istasyonuna ve 45 iş ögesine kadar test edilmiştir. Çalışmada Urban tarafından hayalî öncelik diyagramı önerilmiştir. Böylelikle işler istasyonlara atanırken hattın başından ve sonundan atama yapılabilmektedir. Çalışmada dengelemenin, U-tipi montaj hatlarında düz montaj hatlarına göre daha az sayıda istasyon ile sağlanabildiği görülmüştür.

Scholl ve Klein (1999), U-tipi montaj hattı problemlerinin çözümü için ULINO (U-Line Optimizer) adında bir dal sınır algoritması önermişlerdir. ULINO, yazarların tek modelli düz MHD probleminin çözümü için 1997 yılında geliştirdikleri ve SALOME (Simple Assembly Line Balancing Optimization Method) adını verdikleri dal-sınır algoritmasının U tipi montaj hatları için geliştirilmiş hâlidir.

ULINO, tek modelli ve deterministik işlem süreli U tipi montaj hatlarının çözümünde kullanılmıştır. Önerilen yöntem, U tipi montaj hattı dengeleme problemlerinin UALBP-1, UALBP-2 ve UALBP-E olmak üzere farklı tipleri için ele alınmıştır. Deneysel sonuçlara göre bu prosedürün iyi bir performans gösterdiği ve U tipi montaj hatlarının, geleneksel hatlara kıyasla hat verimliliğini iyileştirdiği görülmektedir.

Miltenburg (2001), U tipi montaj hatlarında kurama ve uygulamaya yönelik çalışmaları değerlendiren bir makaleyi sunmuştur. Çalışmada toplamda 114 U-tipi montaj hattı incelenmiştir. İncelenen 114 hattın 9 tanesi Amerikan ve 105 tanesi Japon işletmelerine ait U-tipi hatlardır. Yapılan çalışma sonunda işletmelerde U tipi montaj hatlarının kullanılmasının, verimlilikte %76 oranında artışa, yarı ürün stoklarında %86 oranında düşüşe, üretim süresinde %75 oranında düşüşe ve hata oranlarında ise %83 oranında düşüşe neden olduğu ve başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür.

Ağpak ve diğ. (2002), stokastik iş süreli U tipi montaj hattı dengeleme problemleri için sezgisel bir prosedür önermişlerdir. Prosedürün amacı, en az sayıda iş istasyonu ile montaj hattının dengelenmesidir.

Önerilen prosedür geliştirilirken, 1966 yılında Arcus tarafından geleneksel, deterministik tek modelli hatlar için geliştirilen COMSOAL yönteminden yararlanılmıştır. Önerilen sezgisel yöntem 2 farklı problem üzerinde uygulanmış ve

COMSOAL sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Sonuçlara göre sezgisel prosedürün daha iyi sonuçlar verdiği saptanmıştır.

Liu ve diğ. (2005), tek modellenli stokastik montaj hattı Tip II problemini dengelemek için bir sezgisel algoritma önermişlerdir. Problemin amacı, belirli sayıdaki iş istasyonu ile çevrim süresini enazlamaktır. Bu amaçla üç aşamadan oluşan bir süreç izlenmiştir. Birinci aşamada işler alternatif olarak ileri ya da geri yönlü olacak şekilde iş istasyonlarına atanmıştır. İkinci aşamada işlerin iş istasyonları arasındaki değişimi ile düzgünlük sağlanmıştır. Üçüncü aşamada ise ikinci aşamadan elde edilen çevrim süresinin üst sınırı azaltılarak en az çevrim süresi elde edilmiştir.

Önerilen sezgisel algoritmanın performansı, Moodieve Young'ın algoritmasının literatürdeki bâzı problemlere uygulanarak değiştirilmiş olan versiyonu ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlara göre, önerilen modelin tek modellenli stokastik montaj hattı dengeleme problemi için çevrim süresini enazlamada başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür.

Gökçen ve Ağpak (2006), tek modellenli deterministik U-Tipi montaj hattı dengeleme probleminin çözümü için Tamsayılı Programlama Temelli Hedef Programlama modeli geliştirmişlerdir. Bu model, literatürde tek modellenli U-tipi montaj hatlarında çok amaçlı karar vermeye yönelik ilk çok ölçütlü karar verme yaklaşımıdır. Önerilen model geliştirilirken, Urban (1998) tarafından tek modellenli U-tipi montaj hatları için geliştirilen Tamsayılı Programlama modeli ile Deckro ve Rangachari (1990) tarafından yine tek modellenli U-tipi montaj hatları için geliştirilen Hedef Programlama modeli temel alınmıştır.

Önerilen modelin amacı, çevrim süresinin ve iş istasyonu sayısının enazlanması ve işlerin iş istasyonlarına dengeli dağılmasıdır. Geliştirilen hedef programlama, yaklaşımı çakışan hedefler nedeniyle “optimal” bir sonuç yerine “tatmin edici” bir sonuç elde etmeye çalıştığı için, U-Tipi montaj hattı dengeleme probleminin çözümünde daha gerçekçi bir yaklaşım olup, farklı alternatiflerin değerlendirilmesinde karar verici için daha fazla esneklik sağlar.

Zhang ve diğ. (2008), tek modellenli deterministik işlem süreli U tipi montaj hattı dengeleme problemleri için Karınca Kolonisi Optimizasyonu temelli sezgisel bir algoritma önermişlerdir. Önerilen algoritmanın performansı ölçmek amacıyla kapsamlı deneysel testler yapılmıştır. Önerilen algoritma ile problemde iş istasyonu

sayısını enazlamak amaçlanmıştır. Karınca Kolonisi Optimizasyonu temelli sezgisel; küçük, orta ve büyük boyutlu problemlerde test edilmiştir. Test sonuçlarına göre başarılı sonuçlar elde edildiği görülmüştür.

Kara ve Tekin (2009), karma modellenli U tipi montaj hatlarının dengelenmesi probleminin çözümü için karma tamsayılı doğrusal programlama modeli geliştirmişlerdir. Böylece karma modellenli U-tipi montaj hattı dengeleme problemleri için literatürdeki ilk karma tamsayılı programlama modeli sunulmuştur.

Önerilen model ile iş istasyonu sayısı enküçüklenmektedir. Geliştirilen algoritma örnek bir problem üzerinde varolan bir yaklaşımla test edilmiş ve başarılı sonuçlara ulaşılmıştır. Bu çalışmada, aynı zamanda geniş ölçekli karma modellenli U-tipi montaj hattı dengeleme problemlerini ele almak için COMSOAL algoritması temelli yeni bir sezgisel çözüm prosedürü önerilmiştir.

Önerilen sezgiselin performansı bir deneysel analiz ile değerlendirilmiştir. Deneysel sonuçlara göre önerilen sezgisel, %91,1'i için optimal çözümler elde etmiştir.

Khaw ve Ponnambalam (2009), 15 görev atama kuralı ve Karınca Kolonisi algoritmasının karmasından oluşan bir melez (hibrit) algoritma önermişlerdir. Önerilen bu melez algoritma ile U tipi ve I tipi montaj hattı dengeleme problemlerini çözmek amacıyla hat etkinliğini ve düzgünlük indeksini eniyilemek amaçlanmıştır.

Algoritma, tüm boyutlardaki montaj hattı dengeleme problemlerini çözmek için tasarlanmıştır. Melez algoritmanın performansı, literatürdeki bir benzetimli tavlama algoritması ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonuçlarına göre melez algoritmanın, problemlerin %50'sinden daha fazlasında daha üstün ya da eşit sonuçlar elde ederek daha iyi performans gösterdiği saptanmıştır.

Bagher ve diğ. (2010), stokastik U tipi montaj hattı dengeleme problemlerini çözmek için yeni bir melez algoritma önermişlerdir. Bu algoritma ile U-tipi montaj hatlarında iş istasyonu sayısının, her iş istasyonundaki boşta kalma süresinin ve her istasyonun tamamlanmama olasılığının enazlanması amaçlanmıştır.

Önerilen algoritma COMSOAL yaklaşımı ve görev ataması kuralı sezgiselinin bir karması olup ICA olarak adlandırılmıştır. ICA melez algoritmasının performansı, Baykasoğlu ve Özbakır (2007) tarafından önerilen genetik algoritmaya karşı ölçülmüştür.

Baykasoğlu ve Özbakır (2007) tarafından önerilen genetik algoritma, aynı amaçlara hizmet eden, daha önce önerilen en iyi algoritmadır. Sözkonusu karşılaştırma, literatürden alınan test problemleri üzerinde yapılmıştır.

Bu test problemleri ise 7,8,9 ve 11 görevli olan küçük boyutlu, 21,28 ve 30 görevli olan orta boyutlu ve 45 ve 70 görevli olan büyük boyutlu problemler olmak üzere 3 ayrı kategoride ele alınmıştır. Önerilen melez algoritma, genetik algoritmadan daha kısa hesaplama süresi içinde optimal çözümler bulmuş olup başarılı sonuçlar elde etmiştir.

Chutima ve Kid-Arn (2013), karma modellenli paralel iş istasyonlu U-tipi montaj hattı dengeleme problemi için parçacık sürü optimizasyonu temeline dayanan meta sezgisel bir yöntem geliştirmişlerdir. Önerilen model ile iş istasyonu sayısını enazlamak ve istasyonlar arası ve istasyon içi iş yükü dağılımının dengeli bir şekilde yapılması amaçlanmıştır.

Meta sezgiselin performansı, parçacık sürü optimizasyonu ile karşılaştırılmıştır. Başlangıçtaki çözümlerin çoğu, önerilen meta sezgisel ile zayıf olsa da yineleme sayısı arttıkça daha iyi çözümlere ulaşılmış ve önerilen meta sezgisel ile çoğu test problemi için daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.

Manavizadeh ve diğ. (2015), çok amaçlı karma modellenli U tipi montaj hatlarının dengelenmesi ve eş zamanlı olarak sıralanması problemine sezgisel bir çözüm geliştirmişlerdir. Geliştirilen sezgisel algoritma ile çevrim süresinin, firelerin ve fazla iş yükünün enazlanması amaçlanmıştır. Sözkonusu üç amaç, literatürde, bir arada ilk kez bu çalışmada incelenmiştir.

Geliştirilen algoritma, üç ürün modelinin, dört iş istasyonunun ve 10-16 görevin bulunduğu küçük ve beş ürün modelinin, altı iş istasyonunun ve 18-20 görevin bulunduğu büyük boyutlu problemlerde test edilmiştir.

İlk olarak, sonuçlar I tipi montaj hatları için bulunmuş ve ardından U tipi montaj hatları için test edilmiş ve sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonunda U tipi hatların kullanımı yeğlenmiştir ve geliştirilen sezgisel yöntem ile başarılı sonuçlar elde edildiği saptanmıştır.

Kucukkoc ve Zhang (2017), paralel istasyonlara sahip karma modellenli U tipi montaj hattı dengeleme problemlerini ele almışlardır. Ele aldıkları problemlerde amaç, iş

istasyonu sayısını enazlamak ve hat uzunluğunu en aza indirmektir. Bu amaçlarla sezgisel bir çözüm yaklaşımı önerilmiştir.

Toplamda 51 test vakası üzerinde yapılan deneysel test sonuçlarına ve istatistiksel analizlere göre, önerilen hat tasarımının daha az sayıda iş istasyonu gerektirdiği görülmüştür. Önerilen hat tasarımı, çözümlenen toplam vaka sayısının yarısından çoğunda iş istasyonlarının sayısını azaltmaya yardımcı olmuştur.

Tiacci (2017), stokastik iş süreli karışık modelli U tipi montaj hatlarının dengelenmesi için genetik algoritma yaklaşımı önermiştir. Önerilen genetik algoritma ile montaj hattı tasarım mâliyetinin enazlanması amaçlanmıştır.

Literatürden geniş bir örnek dizisi üzerine yapılan kapsamlı bir denemenin sonuçlarına göre başarılı sonuçlar elde edildiği görülmüştür. Ek olarak çalışmada, tampon ve paralel iş istasyonlarına sahip I tipi montaj hatları ile U tipi montaj hatlarının etkinliğini araştırmak amacıyla önerilen algoritmanın çözümleri ile karşılaştırmalar yapılmıştır.

Karşılaştırma sonuçlarına göre U tipi montaj hatlarının, tamponlu düz hatlara göre daha verimli olduğu görülmüştür. Görev sürelerinin dağılımına bağlı olarak ise tampon ve paralel iş istasyonlarına sahip I tipi montaj hatlarının daha verimli olduğu saptanmıştır.

Nejad ve diğ. (2018), çok amaçlı U tipi montaj hattı dengeleme problemlerini ele almış ve gruplamaya dayalı, GES adı verilen bir melez çözüm yöntemi geliştirmişlerdir. Melez yöntem ile iş istasyonlarının sayısının ve düzgünlük indeksinin enazlanması ve hat verimliliğinin enbüyüklenmesi hedeflenmiştir.

Önerilen çözüm yöntemi, Sıralı Pozisyonel Ağırlık Yöntemi ve COMSOAL algoritmasının geliştirilmiş şeklidir. Çözüm yönteminin performansı, literatürde varolan bâzı yöntemlerle karşılaştırılarak test edilmiştir.

Hesaplamalı sonuçlara göre önerilen yaklaşım ile büyük boyutlu problemlerin geniş bir kesiminde optimal çözümün elde edildiği görülmüş ve tüm test problemleri için aynı veya daha iyi sonuçlar sağladığı saptanmıştır.

Yapılan literatür taraması kapsamında U tipi montaj hattı dengeleme literatürü matrisi, Çizelge 5.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 5.2 : U tipi montaj hattı dengeleme literatürü matrisi

YIL	YAZAR	MODEL SAYISI		AMAÇ																		ÇÖZÜM YÖNTEMİ		PARALEL İSTASYON DURUMU		İŞLEM SÜRESİ		
		TM	KM	ÜOEB	TİOEK	ASEK	MHVEB	İSEK	İİDD	ÇSEK	SSİMİA	BKSBIY	KKEB	FEK	DİEK	TMEK	İGV	BKSEK	FİEK	HUEK	HEEB	K	ANALİTİK	SEZGİSEL	E	H	D	S
1994	Miltenburg ve Wijngaard	X						X															X			X	X	
1998	Miltenburg	X						X			X												X			X	X	
1998	Debora ve diğ.	X							X									X						X		X	X	
1998	Urban	X						X															X			X	X	
1999	Scholl ve Klein	X					X	X		X													X			X	X	
2001	Miltenburg	X	X																			X				X	X	
2001	Erel ve diğ.		X					X																X		X	X	
2002	Ağpak ve diğ.	X						X																X		X		X
2005	Liu ve diğ.	X								X														X		X		X
2005	Chiang ve Urban	X						X																X		X		X
2006	Gokcen ve Ağpak	X						X	X	X													X			X	X	
2008	Zhang ve diğ.	X						X																X		X	X	
2009	Khaw ve Ponnambalam	X												X							X			X		X	X	
2009	Kara ve Tekin		X					X															X	X		X	X	
2010	Bagher ve diğ.	X			X			X										X						X		X		X
2011	Özcan ve diğ.		X						X															X		X		X
2012	Rabbani ve diğ.		X					X													X		X	X		X	X	
2013	Avikal ve diğ.	X					X																	X		X	X	
2013	Chutima ve Kid-Arn		X					X	X															X	X			X
2014	Fattahi ve diğ.	X						X															X			X	X	
2014	Dong ve diğ.		X																X					X		X		X
2015	Küçükkoc ve Zhang	X										X								X				X	X			X
2015	Manavizadeh ve diğ.		X							X				X					X					X		X		X
2017	Tiacci		X												X				X					X	X			X
2017	Kucukkoc ve Zhang		X					X												X				X	X			X
2018	Nejad ve diğ.		X				X	X						X										X		X		X
Yapılan Çalışma Sayısı		16	11	0	1	0	3	16	4	4	0	1	1	1	2	1	0	2	2	1	2	1	8	19	4	22	15	11

5.3 Ergonomik Koşullar Altında Montaj Hattı Dengeleme Konusunda Yapılan Çalışmalar

Ergonomik risk etmenlerinin montaj hatlarının dengelenmesinde ve tasarımında büyük öneme sahip olmasına rağmen bu konuda yapılan akademik çalışmaların sayısı çok fazla değildir. Literatürde varolan birtakım çalışmalar, bu bölümde kısaca özetlenmiştir.

Gunther ve diğ. (1983), sanayideki mühendisler arasında bir anket çalışması gerçekleştirmişlerdir. Yapılan anket çalışmasının sonuçlarına göre montaj hattı dengeleme problemleri için oluşturulan amaç ve kısıtların, gerçek yaşam problemlerinin büyük bir çoğunluğu için yetersiz kaldığı görülmüştür. Bu çalışma ile, insan etmeninin montaj hattı dengeleme problemlerinde gözardı edilemeyecek bir etmen olduğu ilk kez vurgulanmıştır.

Bao ve diğ. (1997), Çin ve İsveç montaj hatlarında çalışanlar üzerindeki omuz ve boyun hastalıklarıyla ilgili bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada ergonomik iş istasyonlarının tasarımı ile omuz ve boyun hastalıkları arasındaki etkileşim incelenmiştir. İsveç montaj hattının daha iyi ergonomik iş istasyonu tasarımına sahip olduğu ve böylece çalışanların daha düzgün çalışma duruşları yansıttığı görülmüştür. Aynı zamanda İsveç montaj hattının üretimdeki düzensizliklerine karşı daha dengeli ve daha az hassas olduğu görülmüştür. Bu durumda İsveç montaj hattının Çin montaj hattı ile karşılaştırıldığında, montaj sırasındaki toplam boş kalma süresinin daha az olduğunun bir göstergesidir. Bu sonuçlara dayanarak ergonomik tasarımlı iş istasyonlarına sahip montaj hatlarında işçilerde mekanik mâruzîyetlerin daha az görüldüğü ve üretkenliğin yüksek olduğu saptanmıştır.

Lin ve diğ. (2001), yaptıkları çalışmada iş istasyonu ergonomisi ve ürün kalitesi arasındaki ilişkiyi ölçmüşlerdir. Montaj hattındaki kalite, her bir iş istasyonundaki hafta başına düşen kusur sayısına göre ölçülmüştür. Yapılan ölçümlere göre kalitenin, zaman baskısı ve postüral stres olmak üzere iki ergonomik etmenle doğrudan ilişkisi olduğu saptanmıştır. İş istasyonu tasarımında ergonomik koşulların iyileştirilmesinin, pozitif bir kalite etkisine sahip olduğu görülmüştür.

Moreau (2003), otomotiv sektöründe üretim yapan bir firmanın montaj hattında bazı ergonomik iyileştirmeler gerçekleştirmiş ve bu iyileştirmelerin verimliliğe olan

etkisini incelemiştir. İncelenen montaj hattında çalışan işçilerin yaş ortalaması 45 olup, işçiler 1995 yılından 1999 yılına kadar iki tip hat üzerinde çalışmışlardır. Yapılan ergonomik iyileştirmelerden sonra ürünün çevrim süresinin 2 dakika 30 saniyeden, 1 dakika 36 saniyeye düştüğü görülmüş ve verimlilikte %30 oranında bir artış saptanmıştır. Çevrim süresine ek olarak ise görülen rahatsızlıkların oranında aynı şekilde düşüş olduğu saptanmıştır.

Vieira ve Kumar (2004), çalışma duruşları hakkında yayın taraması gerçekleştirmişlerdir. Yayın taraması yapılırken literatürde konu hakkında az sayıda çalışma olduğuna dikkat çekilmiştir. Sözkonusu çalışmada maden işçileri, depolama çalışanları, boyacılar, mobilya imalatında çalışan işçiler, hemşireler, bilgisayar başında çalışanlar, endüstri çalışanları vb. çalışanların duruşlarını ele alan çalışmalar incelenmiştir. Yapılan incelemeye göre literatür referansları, meslek tanımları, ölçüm yapılan duruş açıklaması, duruş ölçüm yöntemleri, ölçüm sonuçları, sınırlama ve zayıflıkları ve önerileri içeren bir değerlendirme yapılmıştır. Yapılan değerlendirmeye göre uygun olmayan çalışma duruşlarının kas ve iskelette hasara, ağrıya ve kinematik bozukluklara neden olabileceği açıkça görülmüştür.

Yeow ve Sen (2006), montaj hatlarında ergonomik iyileştirmelerle verimliliği, kaliteyi ve geliri arttırırken mâliyeti azaltmayı amaçlamışlardır. Bu amaçlar doğrultusunda anket yoluyla ulaşılan öznel değerlendirme sonuçları, doğrudan gözlem ile edinilen sonuçlar ve arşiv verileri kullanılmıştır. Deney sonuçlarına göre mâliyette yaklaşık 1 milyon Amerikan doları azalış, işletme gelirinde 4,2 milyon Amerikan doları artış, aynı şekilde kalite ve verimlilikte de bir artış olduğu saptanmış olup başarılı sonuçlara ulaşıldığı saptanmıştır.

Longo ve diğ. (2006) 'nin makalesinde, ısıtıcı üretimi yapan bir firmada montaj hattının etkili tasarımıyla ilgili bir araştırma çalışmasının sonuçları sunulmaktadır. Çalışmada montaj hatlarında ergonomik analizler yapmak için simülasyon tekniği kullanılmıştır. Simülasyonun başlangıç noktası, tasarım aşamasında olan bir üretim sisteminin tesis yerleşimidir. İkinci aşama ise insan etmeni eklenerek montaj hattının tasarımının gerçekleştirilmesidir. Uygulanan simülasyon tekniklerinin sonucuna göre bacakların bükülmesi, elle yapılan kaldırma vb. gibi ergonomik riskler enazlanarak görev atamaları gerçekleştirilmiştir.

Battini ve diğ. (2007), ergonomi ve montaj hattı konfigürasyonlarının uygulamada birbirleriyle ne derece yakından ilişkili olduğunu göstermek için bu çalışmayı ele almışlardır. Sözkonusu çalışma çok işlevli duş kabinlerinin üretimi ve dağıtımında lider olan bir firma üzerinde gerçekleştirilmiştir. Gelişmiş simülasyon yazılımı ile gerçekleştirilen çalışmanın sonucunda montaj hattı verimliliğinde %15 oranında bir iyileşme görülürken işçilerin yorgunluk düzeylerinde ve işçi yaralanmalarında ise azalma saptanmıştır.

Otto ve Scholl (2011), otomotiv endüstrisinde faaliyet gösteren bir firmanın montaj hattını, ergonomik riskleri azaltarak yeniden dengelemişlerdir. Çalışmada ergonomik risk tahmin yöntemlerinin çoğu, doğrusal olmayan fonksiyonları içermesine rağmen, düşük ek hesaplama mâliyetleriyle montaj hattı dengeleme tekniklerine bütünleştirilebildiğini göstermektedir. Yapılan deneylere göre yeniden dengelenmenin, ergonomik risklerin önemli ölçüde azaltılmasına yardımcı olduğu kanıtlanmıştır. Örneklerin yarısında ek bir iş istasyonuna gerek olmadan, kabul edilebilir risk düzeyine sahip bir dengeleme yapılmıştır. İş istasyonu sayısında artışa gerek duyulan durumlarda ise, hat kapasitesinde yaklaşık %4'lük bir artış sağlanmıştır. Ek olarak deney sonuçlarına göre genel olarak her yeni iş istasyonunun ergonomik risklerin iyileşmesinde azalmaya neden olduğu görülmüştür.

Battini ve diğ. (2015), ergonomik koşullar altında montaj hattı dengeleme yaklaşımı üzerine çalışmışlardır. Yapılan çalışmada iki farklı yaklaşım sunulmuştur. Birinci yaklaşımda Pareto analizine dayanan, zaman ve enerji fonksiyonlarının bir arada incelendiği ve optimize edildiği iki amaçlı bir model uygulanmıştır. Burada çözüm tek bir optimum değildir. İkinci yaklaşımda ise kolay ve hızlı bir uygulamaya olanak sağlamak için tek amaç fonksiyonu ile harcanan enerji oranını dinlenme süresine dönüştürmek amacıyla alternatif bir yöntem önerilmiştir. Bu iki alternatif yöntem ile kısa vâdede salt üretkenlik sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda uzun vâdede işgücü tarafından da sürdürülebilir bir montaj hattı dengeleme süreci için başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

Polat ve diğ. (2016), mobilya sektöründe faaliyet gösteren bir firma çalışanlarının çalışma duruşlarını incelemişlerdir. Firma çalışanlarının hareketleri görüntü kayıtları ile incelenmiş ve riskli işler belirlenmiştir. Çalışma duruşlarını incelemeye REBA yöntemi kullanılmıştır. Analiz sonuçlarına göre üretim ve montaj hatlarında çalışanların ortalama %60'ının kas iskelet sistemi rahatsızlıkları açısından riskte

olduğu görölmüştür. Sözkonusu riskler için ergonomik iyileştirme önerilerinde bulunulmuştur.

Otto ve Battaia (2017), fiziksel ergonomik koşulları dikkate alarak montaj hattı dengeleme ve iş rotasyonu çizelgeleme için literatürdeki varolan optimizasyon yaklaşımlarını incelemişler ve önemli bulguları özetlemişlerdir. İncelenen makalelere göre çeşitli ergonomik risk tahmin yöntemlerinin, montaj hattı dengeleme ve iş rotasyonu çizelgeleme modellerine bütünleştirilebileceği görölmüştür. Varolan literatürde, önleyici yaklaşımların uygulama sorunları ele alınmıştır. Karşılaşılan en yaygın uygulama sorunları, parçaların geometrik boyutlarının ve ağırlıklarının belgelenmemesi gibi, gerek duyulan verilerin olmaması ve kalitesiz olmasıdır. Varolan çalışmalarda, ortalama ergonomik risklerin en aza indirilmesi, istasyonlar arasında ergonomik risk dağılımındaki varyansın en aza indirilmesigibi ergonomik amaç fonksiyonlarının incelendiği görölmüştür.

6. ENDÜSTRİYEL UYGULAMA

6.1 Amaç

Montaj hattında, ergonomik etmenler gözardı edilerek ve dikkate alınarak, gereksinim duyulan en az istasyon sayısının belirlendiği endüstriyel çalışma, Arçelik Çayirova Çamaşır Makinesi İşletmesi'nin gövde hattı üzerinde yapılmıştır.

Montaj hattı dengeleme problemin çözümü, yüksek düzey programlama dili olan, modelleme ve optimizasyon problemlerinin çözümünde kullanılan GAMS (General Algebraic Modeling System) ile yapılmıştır.

6.1.1 Firmanın tanıtımı

Beyaz eşya alanında üretim, pazarlama, satış ve satış sonrası müşteri hizmetleri faaliyetlerini Türkiye'de lider konumda yürüten Arçelik; Vehbi Koç ve Lütfi Doruk tarafından 1955 yılında İstanbul Söğütözü'nde kurulmuştur. Yıllık cirosu 7,4 milyar Türk Lirası olan Arçelik A.Ş.'nin çamaşır makinesi Türkiye pazar satış performansı, 2018 yılında, bir önceki yıla göre %23 azalarak 401.000 adet olmuştur (Url-3).

İlk çamaşır ve bulaşık makinalarını 1959 ve 1960 yıllarında üreten Arçelik A.Ş., 1968 yılında Çayirova tesislerine taşınmıştır. Montaj hattı ve genel görüntüleri Şekil 6.1 ve Şekil 6.2'de verilen Arçelik Çayirova çamaşır makinesi işletmeleri, son teknoloji çamaşır makinalarının üretimi, satışı ve dağıtımı ile ilgilenmektedir.



Şekil 6.1 : Arçelik Çayirova yerleşkesi.



Şekil 6.2 : Arçelik Çayirova çamaşır makinası fabrika ve montaj hattı görüntüleri.

Dünya genelinde yaklaşık 30.000 çalışanı olan Arçelik A.Ş.'nin ortaklık yapısında KOÇ grubu %57,2, Birla Grubu %17,6 hisseye sahip olup, şirketin %25,2'si ise halka açıktır.

Arçelik Anonim Şirketi ve bağlı ortaklıkları, dayanıklı tüketim ve tüketici elektroniği alanlarında üretim, pazarlama, satış ve satış sonrası müşteri hizmetlerin haricinde ihracat ve ithalat ile ilgili tüm ticarî ve endüstriyel faaliyetleri de yürütmektedir. Grup, Türkiye, Romanya, Rusya, Çin, Güney Afrika Cumhuriyeti, Tayland ve Pakistan'da aşağıda ayrıntıları bulunan toplam onsekiz fabrikada üretim faaliyetlerini gerçekleştirmektedir (Url-4):

- Buzdolabı İşletmesi – Eskişehir, Türkiye
- Pişirici Cihazlar İşletmesi – Bolu, Türkiye
- Bulaşık Makinası İşletmesi – Ankara, Türkiye
- Çamaşır Makinası İşletmesi – Çayirova/İstanbul, Türkiye
- Elektronik İşletmesi – Beylikdüzü/İstanbul, Türkiye
- Kompresör İşletmesi – Eskişehir, Türkiye
- Elektronik Motorları İşletmesi – Çerkezköy/Tekirdağ, Türkiye

- Çamaşır Kurutma Makinası İşletmesi – Çerkezköy, Tekirdağ, Türkiye
- Arctic Soğutucu Cihazlar İşletmesi – Gaeşti, Romanya
- Buzdolabı ve amaşır Makinası İşletmesi – Kirzhach, Rusya
- Buzdolabı İşletmesi – East London, G.Afrika
- Pişirici Cihazlar ve Kurutucu İşletmesi – Jacobs, G.Afrika
- Soğutucu Cihazlar İşletmesi – Ezakheni, Ladysmith, G.Afrika
- Buzdolabı İşletmesi – Tayland, Rayong
- Çamaşır Makinası ve Buzdolabı İşletmesi – Karaı, Pakistan
- Çamaşır Makinası İşletmesi – Changzou, Çin
- Pişirici Cihazlar ve Klima İşletmesi – Karaı, Pakistan

Dünya genelinde bünyesinde barındırdığı onsekiz fabrikada kendisine ait on markayla ürün ve hizmet sunmaktadır (Url-5). Bu markalar:

- Arçelik: Ev teknolojilerinin lider markası Arçelik, beyaz eşyadan elektroniğey, klimadan kombiye, küçük ev aletlerinden televizyona uzanan geniş bir yelpazede, teknoloji ve tasarımın buluştuğuy yenilikçi ürünleri ile tüketicilere hizmet vermektedir.
- Beko: 140 ülkede tüketicilere ulaşan Beko, Avrupa'nın toplam beyaz eşya pazarında ikinci ve solo beyaz eşya pazarının da lider markasıdır.
- Blomberg: 134 yıllık köklü Alman markası solo ve ankastre beyaz eşya ürün gamına sahiptir.
- Arctic: Romanya'nın en eski ve en tanınan markası olan Artic, beyaz eşya pazarının da lideridir.
- Grundig: 1945 yılından bu yana faaliyet gösteren Grundig, beyaz eşya, küçük ev aletleri, kişisel bakım ve ses sistemlerine uzanan geniş bir ürün gamına sahiptir.
- Altus: Dayanıklı tüketim gereksinimlerini ekonomik şekilde karşılayan bir markadır.

- Flavel: İngiltere ve İrlanda beyaz eşya pazarının en önemli markalarından biri olan Flavel, solo ve ankastre beyaz eşya ürün gamına sahiptir.
- Elektribregenz: 125 yıllık geçmişe sahip köklü bir Avusturya markasıdır.
- Leisure: İngiltere solo pişiriciler pazarının geleneksel markası Leisure, tüketicilere klasik ve çağdaş çizgilerle tasarlanmış gazlı ve/veya elektrikli kuzineler ile ankastre ürünler sunmaktadır.
- Defy: Güney Afrika ev aletleri pazarının lider markasıdır.
- Dawlance: Pakistan ev aletleri pazarının lider markasıdır.

6.1.2 Yazılım tanıtımı

GAMS (The General Algebraic Modeling System) matematiksel programlama ve optimizasyon için tasarlanan yüksek düzeyli bir modelleme sistemidir. Modelleme sisteminin içinde dil derleyicisi ve yüksek performanslı bütünleşik çözücüler yer almaktadır. Program, karmaşık ve büyük ölçeklere sahip doğrusal, doğrusal olmayan ve karma tamsayılı optimizasyon problemlerinin çözümü için tasarlanmıştır.

Bu tez çalışmasının uygulama aşamasında, Arçelik A.Ş. firmasının çamaşır makinası gövde grubu montaj hattı, ergonomik koşullar altında 0-1 Tamsayılı Programlama modeli ile dengelenirken, GAMS optimizasyon yazılımı ve CPLEX çözücüsü kullanılarak sonuçlar elde edilmiştir.

6.1.3 İş öğeleri tanıtımı

Montaj hattı dengeleme çalışmasının yapıldığı gövde grubu montaj hattına ait 51 iş öğesi, işlem süreleri ve REBA skorları Çizelge 6.1’de verilmiştir.

6.1.4 Teknolojik öncelik diyagramı

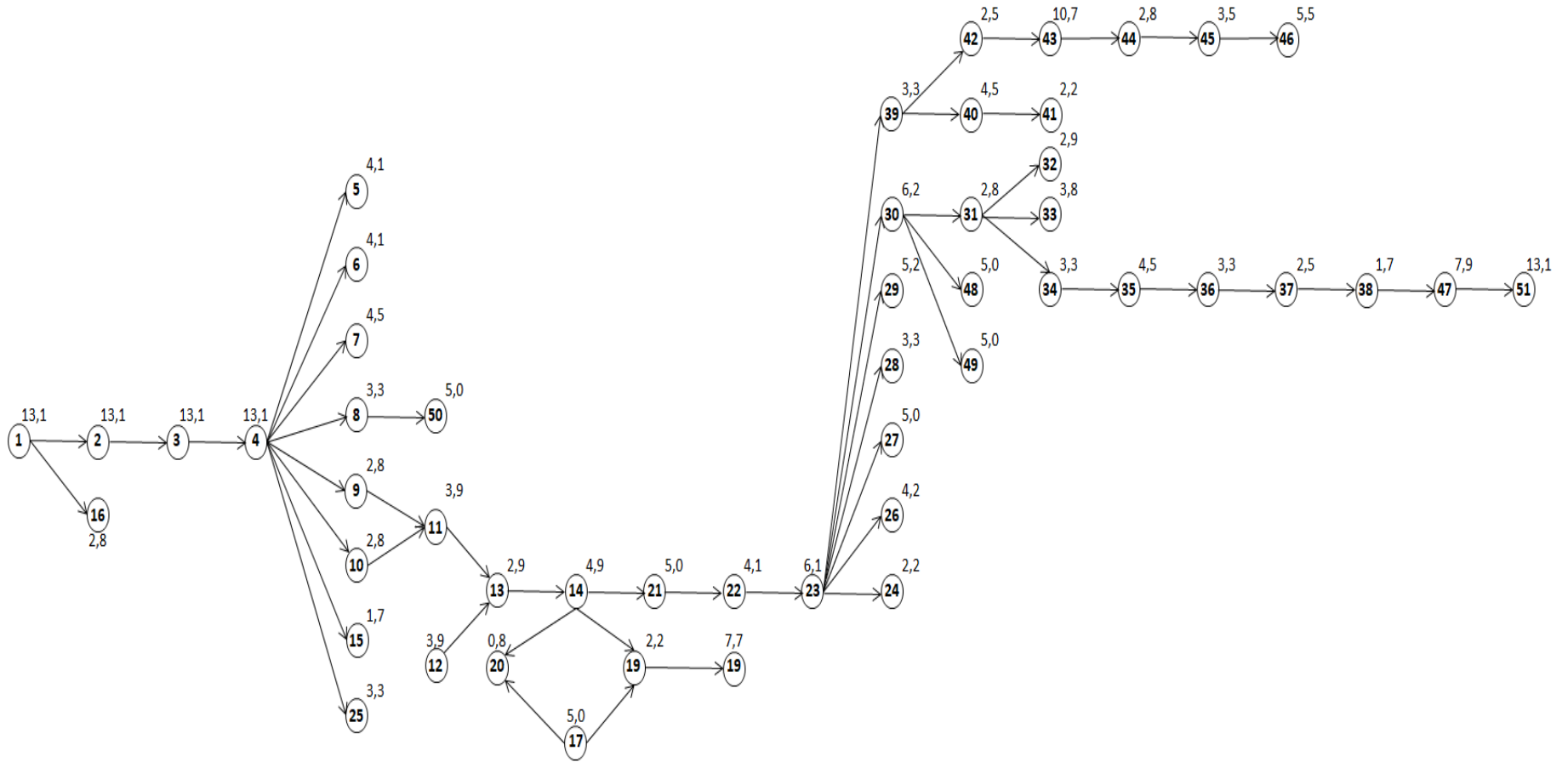
Çamaşır makinası gövde grubu montaj hattında yer alan 51 iş öğesi için teknolojik öncelik diyagramı, öncüllük ve ardıllık ilişkileri gözönüne alınarak Şekil 6.3’de gösterilmiştir.

6.1.5 Öncelik matrisi

Çamaşır makinası gövde grubu montaj hattında yer alan 51 iş öğesine ait öncelik matrisi Çizelge 6.2’de verilmiştir.

Çizelge 6.1 : İş öğeleri ve işlem süreleri.

İş Öğesi Numarası	İş Öğesi Tanımı	İş Öğesi Süresi	Reba Skoru
1	Ön duvar & Arka kapak koyma	13,1	0
2	Gövde koyma	13,1	0
3	Ayarlı ayak sıkma	13,1	0
4	Keçe yapıştırıcı sıkma	13,1	0
5	Sağ yan duvar izolasyon keçesini yapıştır	4,1	3
6	Sol yan duvar izolasyon keçesini yapıştır	4,1	3
7	1 adet kılçık kelepçeyi gövdenin arka tarafına tak (ÜST)	4,5	4
8	2 adet yay tutucusunu gövdeye tak	3,3	5
9	1.amortisör braketine folyo yerleştir	2,8	3
10	2.amortisör braketine folyo yerleştir	2,8	3
11	2 adet amortisörü gövdedeki yerine tak	3,9	4
12	Amortisör pimlerini kır	3,9	4
13	2 adet amortisör pimini amortisörlere tak	2,9	4
14	2 adet amortisör pimini aparat yardımı ile çık	4,9	5
15	Tipalı hortum tutucuyu gövdedeki yerine tak	1,7	4
16	Ön duvara 2 adet plastik taşıyıcı montajını yap.	2,8	4
17	Pompa tahliye hortumunu 1 adet kelepçe ile pompaya tuttur(siyah)	5,0	3
18	Pompayı snap-fit yerine oturt	2,2	6
19	Pompa grubunu 3 adet PT vida ile gövdeye sabitle	7,7	4
20	Pompa tahliye hortumunu tekmelek deliğinden geçir	0,8	3
21	Pompa grubunu boşaltma hortumu ile grupla	5,0	5
22	Boşaltma hortumunu gövde deliğinden geçir	4,1	3
23	Ana kablo grubunu gövdeye as dübelli tutucuyu gövde arkasına tuttur	6,1	4
24	Pompaya 1 adet soket tak	2,2	3
25	Alt denge straforunu al, palete yerleştir	3,3	4
26	2 dübelli tutucuya gövde arkasındaki yerine tak	5,2	4
27	3 adet a-raymond tutucuyu gövdedeki yerine tak	5,0	5
28	1 adet kablo bağı gövde arkasına tak	3,3	2
29	Fiş tutucuyu ve hortum tutucuyu yerine tak	5,2	3
30	Şebeke kablosunu tutuculara tuttur gövdedeki yerine oturt	6,2	4
31	Terminal sacını gövdedeki yerine oturt	2,8	4
32	1 adet topraklama kablo soketini terminal sacına tak	2,9	3
33	Terminal sacını 1 adet vida ile sabitle	3,8	3
34	Terminal sacını 2.vida ile sabitle	3,3	3
35	Parazit filtresini al, 1 adet soket tak	4,5	4
36	Parazit filtresini gövdeye tak	3,3	5
37	Parazit filtresi somununu 2-3 diş tuttur	2,5	4
38	Elektrikli sıkıcı ile kapasitörü gövdeye sabitle	1,7	6
39	Boşaltma hortumunu çekerek deliğine snap-fit tuttur	3,3	4
40	Boş. Hort.ve kablo gr.gövde içine kılçık kelepçe ile bağla	4,5	3
41	Şebeke kablosunu boşaltma hortum arasına sıkıştır	2,2	4
42	Motor kartını barkod ukuyucuya okut.	2,5	2
43	Motor kartına 4 adet soket montajı yap	10,7	4
44	Motor kablosunu 1 adet dübelli tutucu ile gövdeye sabitle (alt)	2,8	3
45	Motor kartını gövde içine, boşaltma hortumunu kart tutucuya yerleştir(Boş gövde)	3,5	3
46	Motor kartını 2 adet PT vida ile gövdeye sabitle	5,5	4
47	Parazit filtresine 2 Terminal sacına 2 soket tak	7,9	4
48	Nüveyi kablo bağı ile tuttur	5,0	2
49	Şebeke kablosuna nüve montajı	5,0	3
50	2 adet yayı gövdeye tak	5,0	4
51	Nakliye emniyet takma	13,1	0



Şekil 6.3 : Gövde grubu iş öğelerinin teknolojik öncelik diyagramı

Çizelge 6.2 : Gövde grubu iş öğeleri

Ardıl İş Öğeleri

6.2 0-1 Tamsayılı Programlama Modeli ve GAMS ile Montaj Hattı Dengeleme

6.2.1 İş öğelerine ait REBA skorları dikkate alınmadan montaj hattının dengelenmesi

Montaj hattı dengeleme probleminin ilk aşaması olarak, iş öğelerine ait REBA skorları dikkate alınmadan, iş istasyonu sayısını enazlamak amacıyla gövde grubu montaj hattının dengelenmesi yapılmıştır.

GAMS programı yardımıyla yapılan dengeleme sonuçları Çizelge 6.3’de verilmiştir. Çizelgede yer alan çözüm incelendiğinde gerekli iş istasyonu sayısının 18 olarak belirlendiği ve çevrim süresinin sağlandığı görülmektedir.

Elde edilen çözüm ile her istasyona ait REBA skorları de hesaplanmış olup, bir sonraki adımda belirlediğimiz 13 hedef değerini aşan, 7 iş istasyonu olduğu görülmektedir. Bu iş istasyonları; 5, 6, 7, 11, 12, 16 ve 18 numaralı iş istasyonlarıdır.

Elde edilen bu çözüm, belirlenen performans ölçütlerine göre Bölüm 6.3’de irdelenmiştir.

Çizelge 6.3 : REBA skorları dikkate alınmadan gövde grubu montaj hattının dengeleme sonuçları

İş İstasyonu Numarası	İş Öğesi Numarası	İş İstasyonu Süresi	REBA Skoru
1	1	13,1	0
2	2	13,1	0
3	3	13,1	0
4	4	13,1	0
5	9, 10, 11, 12	13,4	14
6	5, 7, 15, 17	15,3	14
7	13, 14, 18, 21	15,0	20
8	20, 22, 23, 28	14,3	12
9	30, 31, 48	14,0	10
10	24, 29, 39, 40	15,2	13
11	32, 34, 35, 36	14,0	15
12	26, 27, 37, 38	14,4	19
13	19, 49	12,7	7
14	33, 42, 47	14,2	9
15	51	13,1	0
16	8, 25, 41, 50	13,8	17
17	6, 43	14,8	7
18	16, 44, 45, 46	14,6	14

6.2.2 İş öğelerine ait REBA skorları dikkate alınarak montaj hattının dengelenmesi

Montaj hattı dengeleme probleminin ikinci aşaması olarak, iş öğelerine ait REBA skorları dikkate alınarak, iş istasyonu sayısını enküçüklemek amacıyla gövde grubu montaj hattının dengelenmesi yapılmıştır.

GAMS programı yardımıyla yapılan dengeleme sonuçları Çizelge 6.4’de verilmiştir. Çizelgede yer alan çözüm incelendiğinde, gerekli iş istasyonu sayısının yine 18 olarak belirlendiği ve çevrim süresinin sağlandığı görülmektedir.

Elde edilen çözüm ile her iş istasyonuna ait REBA skorları de hesaplanmış olup, belirlediğimiz 13 hedef değerini aşan iş istasyonu olmadığı görülmektedir. Böylelikle iş istasyonlarında zorluk derecesi açısından aşırı yüklenmelerin önüne geçilmiştir.

Söz konusu 13 hedef değeri REBA skorlarının ortalamasına göre belirlenmiştir. Ortalama REBA skoru hesaplanırken sıfır değerine sahip, otomasyonlara ait iş öğeleri ihmâl edilmiştir. Bir başka deyişle; 1, 2, 3, 4 ve 51 numaralı iş öğelerinin dışındaki tüm iş öğelerinin REBA skorlarının ortalaması hesaplanmıştır. Böylece ortalama REBA skoru $(171/13=)$ 13,15 olarak hesaplanmış ve hedef değer 13 olarak belirlenmiştir.

Elde edilen bu çözüm, belirlenen performans ölçütlerine göre Bölüm 6.3’de irdelenmiştir.

Çizelge 6.4 : REBA skorları dikkate alınarak gövde grubu montaj hattının dengeleme sonuçları

İş İstasyonu Numarası	İş Öğesi Numarası	İş İstasyonu Süresi	REBA Skoru
1	1	13,1	0
2	2	13,1	0
3	3	13,1	0
4	4, 15	14,8	4
5	6, 9, 10, 12	13,6	13
6	5, 11, 13	10,9	11
7	14, 21, 22	14,0	13
8	23, 30, 31	15,1	12
9	32, 33, 34, 35	14,5	13
10	36, 39, 42, 48	14,1	13
11	17, 25, 28, 37	14,1	13
12	29, 38, 47	14,8	13
13	7, 8, 50	12,8	13
14	18, 51	15,3	6
15	26, 27, 40	14,7	12
16	16, 20, 43	14,3	11
17	24, 44, 45, 46	14,0	13
18	19, 41, 49	14,9	11

6.3 Performans Ölçütleri

GAMS programında çalıştırılan model için üç adet performans ölçütü tanımlanmıştır. Bu performans ölçütleri sırasıyla; zaman performansı ölçütü, REBA performansı ölçütü ve toplam performans ölçütüdür.

6.3.1 Zaman performansı ölçütü

İlk ölçüt zaman performansı olup literatürde dengeleme gecikmesi olarak ifade edilmektedir. Söz konusu ölçüt, Denklem 6.1’de verildiği üzere, varolan çevrim süresinden sapmaların toplamının çevrim süresi ile toplam iş istasyonu sayısının çarpımlarına bölünmesiyle hesaplanmaktadır. Denklemde “C” hattın çevrim süresini (sn), “S_i” i. iş istasyonu süresini ve “n” istasyon sayısını göstermektedir.

$$\text{Zaman Performansı} = \frac{\sum |C - S_i|}{C * n} \quad (6.1)$$

Montaj hattı dengeleme probleminin ilk aşaması olan iş öğelerine ait REBA skorlarının dikkate alınmadığı montaj hattı dengeleme sonucunun zaman performansı denklem 6.1 yardımı ile aşağıdaki gibi hesaplanmıştır:

$$\text{Zaman Performansı} = \frac{|13,1 - 15,4| + |13,1 - 15,4| + \dots + |14,8 - 15,4| + |14,6 - 15,4|}{15,4 * 18} = \%9,38$$

Montaj hattı dengeleme probleminin ikinci aşaması olarak, iş öğelerine ait REBA skorlarının dikkate alındığı montaj hattı dengeleme sonucunun zaman performansı da denklem 6.1 yardımı ile aşağıdaki gibi hesaplanmıştır:

$$\text{Zaman Performansı} = \frac{|13,1 - 15,4| + |13,1 - 15,4| + \dots + |14,0 - 15,4| + |14,9 - 15,4|}{15,4 * 18} = \%9,38$$

Elde edilen sonuçlara göre her iki montaj hattı dengeleme sonucunda zaman performansı ölçütü açısından benzer olduğu görülmektedir.

6.3.2 REBA performansı ölçütü

İkinci ölçüt REBA performansıdır. Bu performans ölçütü, montaj hattı dengelemesi sonucunda yapılan atamalara göre iş istasyonlarına ait ergonomik risk düzeyleri arasındaki dengesizliğin bir ölçütüdür. Söz konusu ölçüt, Denklem 6.2’de verildiği

üzere, her bir iş istasyonuna ait REBA skorunun hedef değerden sapmalarının toplamının hedef değer ile toplam iş istasyonu sayısının çarpımlarına bölünmesiyle hesaplanmaktadır. Denklemden yer alan $REBA_{hedef}$, hedef REBA skorunu ifade etmekte olup, bölüm 6.2.2’de belirtildiği üzere 13’dür. Denklemden, $REBA_i$ olarak ifade edilen değer i. iş istasyonuna ait REBA skorunu ve “n” ise istasyon sayısını göstermektedir.

$$REBA \text{ Performansı} = \frac{\sum |REBA_{hedef} - REBA_i|}{REBA_{hedef} * n} \quad (6.2)$$

Montaj hattı dengeleme probleminin ilk aşaması olan iş öğelerine ait REBA skorlarının dikkate alınmadığı montaj hattı dengeleme sonucunun REBA performansı, denklem 6.2 yardımı ile aşağıdaki gibi hesaplanmıştır:

$$REBA \text{ Performansı} = \frac{|0 - 13| + |0 - 13| + \dots + |7 - 13| + |14 - 13|}{13 * 18} = \%45,73$$

Montaj hattı dengeleme probleminin ikinci aşaması olarak, iş öğelerine ait REBA skorlarının dikkate alındığı montaj hattı dengeleme sonucunun REBA performansı da, denklem 6.2 yardımı ile aşağıdaki gibi hesaplanmıştır:

$$REBA \text{ Performansı} = \frac{|0 - 13| + |0 - 13| + \dots + |13 - 13| + |11 - 13|}{13 * 18} = \%26,92$$

Elde edilen sonuçlara göre, iş öğelerine ait REBA skorlarının dikkate alındığı durumdaki atama sonuçlarında REBA performansında iyileşme olduğu görülmüştür.

6.3.3 Toplam performans ölçütü

Üçüncü ölçüt, toplam performans ölçütü olup, zaman performans ölçütü ve REBA performans ölçütünün ortalamasını ifade etmektedir. Söz konusu ölçüt, denklem 6.3’de verildiği üzere, zaman performansı ve REBA performansı toplamının ikiye bölünmesiyle hesaplanmaktadır.

$$\text{Toplam Performans} = (\text{Zaman performansı} + \text{REBA performansı})/2 \quad (6.3)$$

Montaj hattı dengeleme probleminin ilk aşaması olan iş öğelerine ait REBA skorlarının dikkate alınmadığı montaj hattı dengeleme sonucunun toplam performansı, denklem 6.3 yardımı ile aşağıdaki gibi hesaplanmıştır:

$$\text{Toplam Performans} = (0,0938 * 0,5) + (0,4573 * 0,5) = \%27,55$$

Montaj hattı dengeleme probleminin ikinci aşaması olarak, iş öğelerine ait REBA skorlarının dikkate alındığı montaj hattı dengeleme sonucunun toplam performansı da, denklem 6.3 yardımı ile aşağıdaki gibi hesaplanmıştır:

$$\text{Toplam Performans} = (0,0938 * 0,5) + (0,2692 * 0,5) = \%18,15$$

Elde edilen sonuçlara göre iş öğelerine ait REBA skorlarının dikkate alındığı durumdaki atama sonuçlarında toplan performansta iyileşme olduğu görülmüştür.

Söz konusu üç performans ölçütüne ilişkin sonuçlar Çizelge 6.5’de özetlenmiştir.

Çizelge 6.5 : Performans ölçütleri

	REBA Kısıtsız Çözüm	REBA Kısıtlı Çözüm
Zaman Performansı	9,38%	9,38%
REBA Performansı	45,73%	26,92%
Toplam Performans	27,55%	18,15%

6.4 Atamalar Sonrası Montaj Hattı Durum Analizi

51 iş öğeli montaj hattı GAMS programında hem REBA skorları gözardı edilerek hem de REBA skorları dikkate alınarak dengelenmiştir. Her iki durum için de yapılan montaj hattı dengeleme sonuçlarına göre gerekli iş istasyonu sayısı 18 olarak hesaplanmıştır. Bununla birlikte dengelenmesi yapılan montaj hattının çevrim süresi 15,4 saniyedir. Bu bilgiler dahilinde dengelenmesi yapılan montaj hattı için denge kaybı denklem, esneklik oranı ve hat etkinliği sırasıyla denklem 3.4, 3.9 ve 3.10 yardımı ile aşağıda hesaplanmıştır.

$$\text{Denge Kaybı} = \frac{(18 * 15,4) - 251,2}{18 * 15,4} * 100 = \%9,38$$

$$\text{Esneklik Oranı} = \frac{2 * 742}{51 * 50} = 5,81$$

$$\text{Hat Etkinliği} = \frac{251,2}{18 * 15,4} * 100 = \%90,62$$

6.5 Duyarlılık Analizi

REBA skorları dikkate alınarak yapılan montaj hattı dengelemesinde çevrim süresi ve belirlenen REBA limiti değiştirilerek duyarlılık analizi yapılmıştır.

İlk aşama olarak sitemin çevrim süresi 15,4 saniye yerine 18,4 saniye olarak alınmış ve montaj hattı tekrar dengelenmiştir. GAMS programı yardımıyla yapılan montaj hattı dengelemesi sonucunda gerekli iş istasyonu sayısının 18'den 16'ya düştüğü görülmüştür. Elde edilen bu çözüme ait veriler Çizelge 6.6'da gösterilmiştir.

Çizelge 6.6 : REBA skorlarının dikkate alındığı ve çevrim süresin arttırıldığı gövde grubu montaj hattının dengeleme sonuçları

İş İstasyonu Numarası	İş Ögesi Numarası	İş İstasyonu Süresi	REBA Skoru
1	1, 12	17	4
2	-	-	-
3	2, 17	18,1	3
4	-	-	-
5	3, 16	15,9	4
6	4, 8, 15	18,1	9
7	6, 9, 10, 50	14,7	13
8	7, 11, 13	11,3	12
9	5, 14, 21	14,0	13
10	22, 23, 28, 39	16,8	13
11	30, 31, 34, 42	14,8	13
12	35, 36, 37	10,3	13
13	38, 40, 47	14,1	13
14	24, 26, 29, 33	16,4	13
15	18, 20, 41, 51	18,3	13
16	25, 43, 44	16,8	11
17	32, 45, 48, 49	16,4	11
18	19, 27, 46	18,2	13

İkinci aşamada 13 olarak belirlenen hedef REBA limiti 18 olarak alınmış ve montaj hattı tekrar dengelenmiştir. GAMS programı yardımıyla yapılan montaj hattı dengelemesi sonucunda REBA limiti üzerinde yapılan bu değişiklik ile gerekli iş istasyonu sayısında bir değişiklik görülmemekle birlikte iş istasyonu sürelerinin çevrim süresine yaklaştığı görülmüştür. Bununla birlikte iş istasyonlarına ait toplam REBA skorlarının bir önceki montaj hattına göre dengesiz olduğu görülmüştür. Elde edilen bu çözüme ait veriler Çizelge 6.7'de gösterilmiştir.

Çizelge 6.7 : REBA skorlarının dikkate alındığı ve REBA limitinin artırıldığı gövde grubu montaj hattının dengeleme sonuçları

İş İstasyonu Numarası	İş Ögesi Numarası	İş İstasyonu Süresi	REBA Skoru
1	1	13,1	0
2	2	13,1	0
3	3	13,1	0
4	4, 15	14,8	4
5	9, 10, 11, 12	13,4	14
6	6, 7, 8, 13	14,8	16
7	14, 17, 21	14,9	13
8	22, 23, 27	15,2	12
9	20, 30, 31, 48	14,8	13
10	18, 39, 40, 49	15,0	16
11	24, 34, 35, 50	15,0	14
12	19, 26, 42	15,4	10
13	29, 36, 37, 48	12,7	18
14	28, 32, 47	14,1	9
15	51	13,1	0
16	41, 43	10,7	8
17	5, 16, 25, 44	13,0	14
18	33, 45, 46	12,8	10

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

7.1 Sonuçlar

Günümüz koşullarında tüketime olan talebi arzın karşılayabilmesi için kitle üretimine yönelmek kaçınılmazdır. Buda ancak işgücünün etkin dağıtılması ile olanaklıdır. Belirli bir ürünü oluşturmak için akış hattı boyunca insan ve/veya makina yardımı ile ürünün parçalarının birleştirilmesi amacıyla montaj hatları oluşturulmaktadır. Montaj hatlarının dengelenmesi, işletmenin mâliyeti açısından büyük önem arz etmektedir. Bu nedenle, literatürde montaj hatlarının dengelenmesi kavramı ile ilgili birçok çalışma vardır.

Literatür incelendiğinde montaj hatlarının dengelenmesi kavramında insan etmeninin pek az çalışmada dikkate alındığı görülmüştür. İnsan etmeni denilince ilk sırada yer alan ergonomik koşullar, iş öğelerinin insan fizyolojisinin uygunluğuna göre iş istasyonlarına atanmasını sağlamaktadır. Söz konusu kısıt gözönüne alınmadan yapılan çalışmalarda hattın dengelenmesi gerçek koşulları içermediği için etkin olmamakla birlikte, atama yapılan bâzı iş istasyonlarında, ergonomik risk düzeyinin de yüksek olmasına neden olmaktadır.

Yapılan çalışmada, sistemin ergonomik koşullara uygunluğu, literatürde kabul görmüş ergonomik risk değerlendirme yöntemlerinden biri olan REBA yöntemiyle incelenmiştir.

Bu amaçla üretim faaliyetinin sürdüğü bir fabrikada yer alan montaj hattında, ergonomik koşullar gözardı edilerek ve dikkate alınarak karşılaştırmalı sayısal uygulama gerçekleştirilmiştir. Bunun için Arçelik Çayirova Çamaşır Makinası işletmesindeki gövde grubu montaj hattından, iş öğeleri süresi ve işlerin öncelikleri ile birlikte her iş için REBA skorları elde edilmiştir.

Arçelik A.Ş.'de gövde grubu montaj hattında GAMS programı yardımıyla montaj hattı dengelemesi yapılmıştır. Montaj hattı dengelemesi sırasında ilk aşama olarak; istasyon kısıtı, çevrim süresi kısıtı, atama kısıtı ve öncelik ilişkileri kısıtı ile ergonomik risk etmenleri dikkate alınmadan montaj hattı dengelemesi yapılmıştır.

İkinci aşama olarak ise modele zorluk derecesi kısıtı eklenerek ergonomik risk etmenleri dikkate alınarak montaj hattı dengelemesi yapılmıştır.

Montaj hattı dengeleme probleminin çözümleri Intel® Core™ i5-7200U CPU @ 2.5GHz – 2.70GHz işlemcili ve 12.0 GB RAM yüklü bilgisayarda gerçekleştirilmiştir. İlk aşamanın çözümü yaklaşık olarak 0,8sn sürmüştür. İkinci aşama yâni zorluk kısıtı dahil hâlde montaj hattı dengelemesi problem çözümü ise yaklaşık 11,74sn olarak ölçülmüştür.

Yapılan montaj hattı dengeleme işlemlerinin sonucunda gerçekleşen atamalara göre 51 iş ögesi, toplamda 18 iş istasyonuna atanmıştır. Yapılan atamalar sonucunda çevrim süresini aşan iş istasyonu görülmemiştir. Montaj hattının zaman performansı, her iki durum için de %9,38 olarak hesaplanmıştır.

Montaj hattının REBA performansı ise REBA skorlarının dikkate alınmadığı ilk durum için %45,73 ve REBA skorlarının dikkate alındığı ikinci durum için ise %26,92 olarak hesaplanmış olup, performansta artış gözlemlenmiştir. Bu iki performans ölçütünden yola çıkarak hesaplanan toplam performans ölçütü de, REBA skorlarının dikkate alınmadığı ilk durum için %27,55 ve REBA skorlarının dikkate alındığı ikinci durum için ise %18,15 olarak hesaplanmış olup, performansta artış olduğu gözlemlenmiştir.

7.2 Öneriler

Yapılan bu tez çalışmasında ergonomik etmenler dikkate alınarak bir montaj hattının dengelenmesi irdelenmiş ve Arçelik Çayirova Çamaşır Makinası işletmesindeki gövde grubu montaj hattına ait gerçek veriler kullanılarak bir fabrika uygulaması yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar gerek gerçek verileri içerdiği, gerekse sıklıkla gözardı edilen insan etmenini dikkate aldığı için hâlihazırda bu alanda yapılacak birçok çalışma için referans oluşturacaktır. Bununla birlikte bu çalışma, aşağıda maddeler hâlinde verilen öneriler ile daha geniş alanda kullanıma sahip olacaktır.

- Çalışmada, yapılan işlerin zorluk dereceleri REBA yöntemi ile belirlenmiştir. Daha sonraki çalışmalarda, yapılan işlerin zorluk dereceleri sezgisel yaklaşımlar ile hesaplanabilir.
- REBA yönteminin yanısıra RULA ya da OCRA gibi çeşitli yöntemler kullanılarak karşılaştırmalı analizler yapılabilir.

- İş ögesi sayısının çok daha fazla olduğu problemler için de, montaj hattı dengelemede sezgisel yaklaşımlarla hesaplamalar yapılabilir.
- Montaj hattı dengeleme işlemi sırasında paralel iş istasyonları eklenerek işçilerin ergonomik açıdan iş yüklerinin azaltılması ya da dengelenmesi sağlanabilir.
- Çalışmada sistemin salt gövde grubu montaj hattı grubu üzerinde dengeleme yapılmış olup, tüm sistem üzerinde inceleme yapılabilir.
- Sistem yalnızca iş istasyonu sayısını enazlama amacıyla değil, aynı zamanda çevrim süresini de enazlamak ve/veya hat etkinliğini arttırmak gibi birden fazla amaçla dengelenebilir.
- Kısıtların artması ile bilgisayar çözüm süresi uzayacaktır. Bu nedenle kısıtların arttırılmasına paralel olarak çok daha gelişmiş işlemcilerle sahip bilgisayarlar ile montaj hattı dengeleme problem çözümü gerçekleştirilmelidir.



KAYNAKLAR

- Acar, N. (1983). Üretim planlama yöntem ve uygulamaları. Ankara: MPM Yayınları.
- Adham, A. A. J. ve Tahar, R. B. M. (2012). Enhancing efficiency of automobile assembly line using the fuzzy logical and multi-objective genetic algorithm, *IEEE World Congress on Computational Intelligence*, Brisbane, Australia : June 10-15.
- Agpak, K., Gökçen, H., Saray, N. N. ve Özel S. (2002). A Heuristic for single model U-line assembly line balancing with stochastic task time, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 17 (4), 115-124.
- Agpak, K. ve Gökçen, H. (2005). Assembly line balancing: Two resource constrained cases, *International Journal of Production Economy*, 96 (2005), 129-140.
- Agrawal, P. K. (1985). The related activity concept in assembly line balancing, *International Journal of Production Research*, 23, 403-421.
- Alıcı, H., Ulusu H. A. ve Gündüz, T. (2017). Mobilya sektöründe pnömatik zımbalama ve vidalama işlerinin ergonomik risk değerlendirmesi, *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 32 (4), 211-226.
- Altuntaş, S. ve İşlier, A. A. (2010). Birliktelik kısıtları altında montaj hattı dengeleme problemi için bir çözüm yaklaşımı önerisi ve bir işletmede uygulama, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 16 (1), 29-44.
- Arcus, A. L. (1966). COMSOAL: A computer method of sequencing operations for assembly lines, *International Journal of Production Research*, 4, 259-277.
- Ayan, B. (2015). *Montaj hattında ergonomik risk unsurlarının incelenmesi: Otomotiv sektörüne yönelik bir uygulama*. (Uzmanlık Tezi). T.C. Çalışma Ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı Çalışma Ve Sosyal Güvenlik Eğitim Ve Araştırma Merkezi, Ankara.
- Ayazi, S., Hajizadehb, A. E., Nooshabadic, M. R., Jalaiea, H. ve Moradi, Y. (2011). Multi objective assembly line balancing using genetic algorithm, *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 2, 863-872.
- Bagher, M., Zandieh, M ve Farsijani H. (2010). Abalancing of stochastic U-type assembly lines: an imperialist competitive algorithm, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 54, 271-285.

- Bağış, A.** (2013) Ergonomi ders notları. İstanbul
- Bao, S., Winkel, J., Mathiassen, S. E. ve Shahnava, H.** (1997). Interactive effect of ergonomics and production engineering on shoulder-neck exposure - A case study of assembly work in China and Sweden, *International Journal of Industrial Ergonomics*, 20(1997), 75-85.
- Baskak, M.** (1998). Çok modelli/ürünlü montaj hatlarının dengelenmesi için yeni bir model ve çözüm yöntemi. (Doktora tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Baskak, M.** (2017). Üretim hatlarında modelleme ders notları. İstanbul
- Başpınar, N. Ö.** (2012). Büro yönetiminde planlama, *Anadolu Üniversitesi Yayınları*, 2516, 67-100.
- Baykasoğlu, A.** (2006). Multi-rule multi-objective simulated annealing algorithm for stright and U type assembly line balancing problems, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 17(2), 217-232.
- Baykasoğlu, A. ve Dereli, T.** (2009). Simple and u-type assembly line balancing by using an ant colony based algorithm, *Mathematical and Computational Applications*, 14 (1), 1-12.
- Battini, D., Faccio, M., Persona, A. ve Sgarbossa, F.** (2007). Linking ergonomics evaluation and assembly system design problem in a new integrated procedure, *19th International Conference on Production Research*, Valparaíso, Chile : July 29-August 2.
- Battini, D., Delorme, X., Dolgui, A. ve Sgarbossa, F.** (2015). Assembly line balancing with ergonomics paradigms: two alternative methods, *15th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing*, Ottawa, Canada : May 11-13.
- Bautista, J., Suarez, R., Mateo, M. ve Companys, R.** (2000). Local search heuristics for the assembly line balancing problem with incompatibilities between task, *International Conference on Robotics & Automation*, San Francisco, CA, USA : April 2000.
- Bowman, E. H.** (1960). Assembly line balancing by lineer programming, *Operations Research*, 8 (3), 385-389.
- Brosch, A. ve Wiendahl, H. P.** (1990). Simultaneous assembly: Shortening production time, *Industrial Management and Data Systems*, 90 (4), 6-12.
- Bryton, B.** (1954). *Balancing of a Continuous Production*. (Yüksek lisans tezi). Northwestern University, Evanston, IL.
- Cakir, B., Altıparmak, F. ve Dengiz, B.** (2011). Multi-objective optimization of a stochastic assembly line balancireto based artificial bee colony algorithm for multi objective single model assembly line balancing ng: A hybrid simulated annealing algorithm, *Computers & Industrial Engineering*, 60 (2011), 376-384.
- Camkurt, M. Z.** (2007). İşyeri çalışma sistemi ve işyeri fiziksel etmenlerinin iş kazaları üzerindeki etkisi, *TÜHİS İş Hukuku Ve İktisat Dergisi*, 20 (6), 80-106.

- Can, G. F.**(2013). *Rula yönteminin görüntü işleme tekniği ile geliştirilmesi*. (Doktora tezi). Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- Çerçioğlu, H., Özcan, U., Gökçen, H. ve Toklu, B.** (2009). Paralel montaj hatı dengeleme problemleri için bir tavlama benzetimi yaklaşımı, *Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 24 (2), 331-341.
- Chiang, W. C. ve Urban, T. L.** (2005). The stochastic U-line balancing problem: A heuristic procedure, *European Journal of Operational Research*, 175(3), 1767-1781.
- Chutima, P. ve Kid-Arn, S.** (2013). The Psonk: Particle swarm optimization with negative knowledge for multi-objective u-shaped assembly lines balancing with parallel workstations, *Journal of Advanced Manufacturing Systems* , 12(1), 15-41.
- Cinemre, N.** (1997). Yöneylem Araştırması. İstanbul : Evrim Basım Yayım Dağıtım.
- Çoruh, M.** (2018). İşletmelerde bilişim sistemleri yönetimi. e-Kitap Projesi.
- Çömez, S.** (2016). *Ergonomik kısıtlar altında tavlama benzetimi ile montaj hattı dengeleme ve bir şirket uygulaması*. (Bitirme Çalışması). İstanbul Teknik Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, İstanbul.
- Dar-el, E. M. ve Rubinovitch, M.** (1979). Multiple solution technique for balancing single model assembly lines, *Management Science*, 25 (11), 1105-1114.
- Debora, A. A. ve Roger, L. W.** (1998). Applying genetic algorithms to the U-shaped assembly line balancing problem, *IEEE International Conference on Evolutionary Computation Proceedings*, Anchorage, Alaska : May 4-5.
- De Jong, J. R.** (1957). The effects of increasing skill on cycle time and its consequences for time standards, *Ergonomics*, 1 (1), 51-60.
- Doğan, A ve Skallı Ü. S.** (2016). Bulanık işlem zamanlı geleneksel montaj hattı dengeleme problemi için yeni bir yaklaşım: Savunma sanayii uygulaması, *Kırıkkale Üniversitesi Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, 8(1), 31-50.
- Doğan, C ve Altan O.** (2007). Kamusal alanda oturma eylemi ve ergonomik ilkeler, *Yıldız Teknik Üniversitesi Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 2 (3), 159-166.
- Dong, J., Zhang, L., Xiao, T. ve Mao, H.** (2014). Balancing and sequencing of stochastic mixed-model assembly U-lines to minimise the expectation of work overload time, *International Journal of Production Research*, 52 (24), 7529-7548.
- El-Sayed, E. A. ve Boucher, T. O.** (1985). Analysis and control of production systems : Prentice Hall.
- Erel, E., Sabuncuoğlu, I ve Aksu, B. A.** (2001). Balancing of U-Type assembly systems using simulated annealing, *International Journal of Production Research*, 39(13), 3003-3015.
- Erkayman, B. ve Gör, M., S.** (2016). Paralel hastane görüntüleme merkezlerinde hizmet kalitesinin artırılmasına yönelik bir hat dengeleme yaklaşımı,

- Erkut, H. ve Baskak, M.** (1997). Tesis tasarımı. İstanbul: İrfan Yayıncılık.
- Ervural, B.** (2012). *Tedarik zinciri tasarımı ve montaj hattı dengeleme entegrasyonuna sezgisel bir yaklaşım*. (Yüksek lisans tezi). Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Eryürük, S. H., Kalaoğlu, F.veBaskak, M.** (2014). Assembly line balancing in a ready to wear company producing skirt, *Journal of Textiles and Engineer*,21(96), 20-26.
- Fattahi, A., Elaoud, S., Azer, E. S. ve Turkay, M.** (2014). A novel integer programming formulation with logic cuts for the U-shaped assembly line balancing problem, *Computers & International Journal of Production Research*,52(5), 1318-1333.
- Felekoğlu, B.ve Taşan, S. Ö.** (2017). İş ile ilgili kas iskelet sistemi rahatsızlıklarına yönelik ergonomik risk değerlendirme: Reaktif/proaktif bütünleşik bir sistematik yaklaşım, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 32(3), 777-793.
- Gökçen, H. ve Agpak, K.** (2006). A goal programming approach to simple U-line balancing problem, *European Journal of Operational Research*, 171(2), 577-585.
- Gökçen, H., Agpak, K ve Benzer, R.** (2006). Balancing of parallel ssembly lines, *International Journal of Production Economics*, 103, 600-609.
- Gökşen, Y.** (2003). Geleneksel üretimden esnek üretime: Karşılaştırmalı bir inceleme, *Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 5 (4), 32-48.
- Gunther, R. E., Johnson, G.D. ve Peterson, R. S.** (1983). The Currently practised formulation for the assembly line balance problem, *Journal of Operations problem*, 3(4), 209-221.
- Güner, B. ve Hasgöl, S.** (2011). Montaj işçilerinde görülen fiziksel rahatsızlıklar ve risk etmenleri üzerine bir çalışma, 11. *Ulusal Ergonomi Kongresi*, Eskişehir, Türkiye.
- Haciosmanoğlu, S.** (2013). *Türkiye’de antropometrik verilere göre kalıpcılık ve plastik enjeksiyon sektöründe ergonomik işyeri tasarımı*. (Uzmanlık Tezi). T.C. Çalışma Ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı İş sağlığı Ve Güvenliği Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Held, M., Karp, R. M. ve Shareshian, R.** (1963). Assembly line balancing dynamic programming with precedence constraints, *Operations Research*, 52 (11), 442-459.
- Helgeson, W. B. ve Birnie, D. P.** (1961). Assembly line balancing using the ranked positional weight technique, *The Journal of Industrial Engineering*, 12, 394-398.
- Hoffman, T. R.** (1963). Assembly line balancing with a precedence matrix, *Management Science*, 9, 551-562.

- Hwang, H., Sun, J. U. ve Yoon, T** (1996). U-line balancing with simulated annealing, *Proceedings of the First Asia-Pacific Decision Sciences Institute Conference*, Hong Kong
- Ignall, E. J.** (1965). A review of assembly line balancing, *Journal of Industrial Engineering*, 16 (4), 244-254.
- Işın, F. B.** (2018). İşletme ders notları. Ankara.
- Jackson, J. R.** (1956). A computing procedure for a line balancing problem, *Management Science*, 2, 261-272.
- Kao, E. P. C.** (1979). A preference order dynamic program for stochastic assembly line balancing, *Management Science*, 22 (11), 1097-1104.
- Kara, Y. ve Tekin M.** (2009). A mixed integer linear programming formulation for optimal balancing of mixed-model U-lines, *International Journal of Production Research*, 47(15), 4201-4233.
- Kazan, H. ve Günlük H.** (2006). Esnek üretim sisteminde modüler imalatın işletmeler ve müşteriler açısından önemi üzerine bir araştırma, *Verimlilik Dergisi*, 1.
- Khaw, C. L. E. ve Ponnambalam, S. G.** (2009). Multi-Rule Multi-Objective ant colony optimization for straight and U-type assembly line balancing problem, *5th Annual IEEE Annual Conference on Automation Science and Engineering*, Bangalore, India : August 22-25.
- Koca, B., Akın, G. ve Gültekin, T.** (2001). Ergonomik tasarımlarda el antropometrisi ve veri analizi, *8. Ulusal Ergonomi Kongresi*, İzmir, Türkiye.
- Koç, S. ve Testik, Ö. M.** (2016). Mobilya sektöründe yaşanan kas-iskelet sistemi risklerinin farklı değerlendirme metotları ile incelenmesi ve minimizasyonu, *TMMOB Makina Mühendisleri Odası Endüstri Mühendisliği Dergisi*, 27 (2), 2-27.
- Kilbridge, M. ve Wester, L.** (1961). The balance delay problem, *Management Science*, 8 (1), 69-84.
- Klein, R. ve Scholl, A.** (1996). Maximizing the production rate in simple assembly line balancing - A branch and bound balancing, *European Journal of Operational Research*, 91 (1996), 367-385.
- Kobu, B.** (1979). Üretim Yönetimi. İstanbul : İşletme İktisadi Enstitüsü Yayınları.
- Kuçükkoç, I. ve Zhang D.Z.** (2015). Balancing of parallel U-shaped assembly lines, *Computers & Operations Research*, 64, 233-244.
- Kuçükkoç, I. ve Zhang D.Z.** (2017). Balancing of mixed-model parallel U-shaped assembly lines considering model sequences, *International Journal of Production Research*, 55 (20), 5958-5975.
- Kumar, S. A. ve Suresh, N.** (2008). production and operation management. India : New Age International Limited Publishers.
- Levitin, G., Rubinovitz, J. ve Shnits, B.** (2006). A genetic algorithm for robotic assembly line balancing, *European Journal of Operational Research*, 168, 811-825.

- Lin, L. B., Drury, C. G. ve Kim, S. W.** (2001). Ergonomics and quality in paced assembly lines, *The Human Factors and Ergonomics in Manufacturing*, 11 (4), 377-382.
- Liu, S. B., Ong, H. L. ve Huang, H. C.** (2005). A Bidirectional Heuristic for Stochastic Assembly Line Balancing type II Problem, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2005(25), 71-77.
- Longo, F., Mirabelli, G. ve Papoff, E.** (2006). Effective design of an assembly line using modelling & simulation, *Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference*, Monterey, USA : December 3-6.
- Manavizadeh, N., Rabbani, M. ve Radmehr F.** (2015). A new multi-objective approach in order to balancing and sequencing U-shaped mixed model assembly line problem: a proposed heuristic algorithm, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015 (79), 415-425.
- Maynard, H. B.** (1969). Industrial engineering handbook. Newyork : Mc GrawHill Company.
- Merengo, C., Nava, F. ve Pozzetti, A.** (1999). Balancing and sequencing manual mixed-model assembly lines, *International Journal of Production Research*, 37 (1999), 2835-2860.
- Miltenburg, J. ve Wijngaad, J.** (1994). The U-line balancing problem, *Management Science*, 40(10), 1378-1388.
- Miltenburg, J.** (1998). Balancing U-lines in a multiple U-line facility, *Management European Journal of Operational Research*, 109(1), 1-23.
- Miltenburg, J.** (2001). U-shaped production lines: A Review of Theory and practice, *Management International Journal of Production Economics*, 70(2001), 201-214.
- Moreau, M.** (2003). Corporate ergonomics programme at automobiles Peugeot-Sochaux, *Applied Ergonomics*, 34(2003), 29-34.
- Moreau, S. B., Ong, H. L. ve Huang H. C.** (2005). A Bidirectional Heuristic for Stochastic Assembly Line Balancing type II Problem, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2005 (25), 71-77.
- Mosadegh, H., Zandieh, M. ve Ghomi, S.** (2012). Simultaneous solving of balancing and sequencing problems with station-dependent assembly times for mixed-model assembly lines, *Applied Soft Computing*, 12, 1359-1370.
- Nejad, M. G., Kashan, A. H. ve Shavarani, A. M.** (2018). A novel competitive hybrid approach based on grouping evolution strategy algorithm for solving U-shaped assembly line balancing problems, *Production Engineering*, 12 (2018), 555-556.
- Nourmohammadia, A. ve Zandieh, M.** (2011). Assembly line balancing by a new multiobjective differential evolution algorithm based on TOPSIS, *International Journal of Production Research*, 49(10), 2833-2855.

- Otto, A. ve Scholl, A.** (2011). Incorporating ergonomics risks into assembly line balancing, *European Journal of operation Research*, , 212(2011), 277-286.
- Otto, A. ve Battaia, O.** (2017). Reducing physical ergonomics risks at assembly lines by line balancing and job rotation: A survey, *Computers & Industrial Engineering*, 111, 467-480.
- Polat, O., Mutlu, Ö., Çakanel, H., Doğan, O., Özçetin, E. ve Şen, E.** (2016). Bir mobilya fabrikasında çalışan işçilerin çalışma duruşlarının reba yöntemi ile analizili, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 5, 263-268.
- Özcan, U., Kellegöz, T ve Toklu, B.** (2011). A genetic algorithm for the stochastic mixed-model U-line balancing and sequencing problem, *International Journal of Production Research*, 49 (6), 1065-1626.
- Özgörmüş, E.** (2007). *Ergonomik koşullar altında montaj hattı dengeleme*. (Yüksek lisans tezi). Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü, Denizli.
- Özkılıç, Ö.** (2005). İş Sağlığı Ve Güvenliği, Yönetim Sistemleri Ve Risk Değerlendirme Metodolojileri. Ankara : Çalışma Ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı Yayınları.
- Longo, F., Mirabelli, G. ve Papoff, E.** (2006). Effective design of an assembly line using modelling & simulation, *Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference*, Monterey, USA : December 3-6.
- Pedro, M. V. ve Ana S. S.** (2002). A two-stage heuristic method for balancing mixed-model assembly lines with parallel workstations, *International Journal of Production Research*, 40 (6), 1405-1420.
- Pekmezci, T. ve Demirelli, C.** (2005). Esnek üretim sistemleri: Esnek üretim sistemlerinin tekstil işletmelerinde uygulanabilirliği üzerine bir araştırma, *Cumhuriyet Üniversitesi İktisadi Ve İdari Bilimler Dergisi*, 6 (1), 131-146.
- Plans, J. ve Corominas, A.** (1999). Local search heuristics for the assembly line balancing problem with incompatibilities between task, *International Symposium on Symposium on Assembly and Task Planning*, Porto, Portugal: July 1999.
- Papadopoulos, H. T. ve Heavey, C.** (1996). Queueing theory in manufacturing systems analysis and design: A classification of models for production and transfer lines, *European Journal of Operational Research*, 92 (1), 1-27.
- Ponnambalam, S. G., Aravindan, P., Naidu, G. ve Mogileeswar, G.** (2000). Multi objective genetic algorithm for solving assembly line balancing problem, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 16 (5), 341-352.
- Rabbani, M., Kazemi, S. M. ve Manavizadeh, N.** (2012). Mixed model U-line balancing type-1 problem: A new approach, *Journal of Manufacturing System*, 31 (2), 131-138.
- Rekiek, B. ve Delchambre, A.** (2006). Assembly Line. Springer Series in Advanced Manufacturing.

- Sağıroğlu, H., Çoşkun, M. B. ve Erginel, N.** (2015). REBA ile bir üretim hattındaki iş istasyonlarının ergonomik risk analizi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Ve Tasarım Dergisi*, 3(3), 339-345.
- Sağocak, M. D.** (2005). Ergonomik tasarımda renk, *Trakya Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Dergisi*, 6 (1), 77-83.
- Salveson, M. E.** (1955). The assembly line balancing problem, *The Journal of Industrial Engineering*, 6 (3), 18-25.
- Scholl, A. ve Klein R.** (1999). ULINO: Optimally balancing U-shaped JIT assembly lines, *International Journal of Production Research*, 37 (4), 721-736.
- Sewell, E. C. ve Jacobson, S. H.** (2012). A branch, bound, and remember algorithm for the simple assembly line balancing problem, *INFORMS Journal on Computing*, 24 (3), 433-442.
- Shwetank, A., Jain, R., Mishra, P. K. ve Yadav, H. C.** (2013). A heuristic approach for U shaped assembly line balancing to improve labour productivity, *Computers & Industrial Engineering, Computational Applications*, 64 (4), 895-901.
- Simaria, A. S. ve Vilarinho, P. M.** (2004). A genetic algorithm-based approach to the mixed-model assembly line balancing problem of type II, *Computer & Industrial Engineering*, 47, 391-407.
- Şahin, B. N. ve KahyaE.** (2018). Hedef programlama modeli ile ergonomik kısıtlar altında montaj hattı dengelenmesi, *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 6(2018), 188-196.
- Takcı, E.** (2013). *Bir imalat işletmesinde simülasyon yardımıyla süreç iyileştirme uygulaması: Kayseri gürkar tekstil örneği.* (Yüksek lisans tezi). Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Nevşehir.
- Talbot, F. B. ve Patterson, J. H.** (1984). An integer programming algorithm with network cuts for solving the assembly line balancing problem, *Management Science*, 30, 85-99.
- Tanyaş, M. ve Baskak, M.** (2012). Üretim planlama ve kontrol. İstanbul : İrfan Yayıncılık.
- Tekin, M.** (2005). Üretim yönetimi. Konya : Arı Ofset Matbaacılık.
- Tiacci, L.** (2017). Mixed-model U-shaped assembly lines: Balancing and comparing with straight lines with buffers and parallel workstations, *Journal of Manufacturing Systems*, 45, 286-305.
- Turner, W. C., Mize, J. H., Case, K. E. ve Nazemtz, J. W.** (2006). Sistem Mühendisliğine Giriş. İstanbul : Değişim Yayıncılık.
- Ullah, S., Zailin, G., Weiqi, L., Chaoyong, Z. ve Baoxia, W.** (2014). Pareto based artificial bee colony algorithm for multi objective sibgle model assembly line balancing with uncertain task times, *Computers & Industrial Engineering*, 76 (2014), 1-15.
- Urban, T. L.** (1998). Optimal balancing of U-shaped assembly lines, *Management Science*, 44(5), 738-741.

- Üçüncü, K.** (2018). Ergonomi ve iş etüdü ders notları. Trabzon
- Üreten, S.** (2006). Üretim / İşlemler yönetimi. Ankara: Gazi Kitabevi.
- Village, J., Trask, C., Luong, N., Chow, Y., Johnson, P., Koehoorn ve Teschke, K.** (2009). Developmet and evaluation of an observational back-exposure sampling tool (Back-EST) for work-related back injury risk factors, *Applied Ergonomics*, 40 (3), 538-544.
- Vieira, E. R. ve Kumar, S.** (2004). A Working Postures: A literature review, *Journal of Occupational Rehabilitation*, 14 (2), 143-159.
- Yeow, P. H. P. ve Sen R. N.** (2006). A Productivity and quality improvements, revebue increment and rejection cost reduction in the manual component insertion lines through the application of ergonomics, *International Journal of Industrial Ergonomics*, 36(2006), 367-377.
- Zacharia, P. ve Nearchou, A. C.** (2013). A meta-heuristic algorithm for the fuzzy assembly line balancing type-E problem, *Computers & Operations Research*, 40 (2013), 3033-3044.
- Zhang, Z., Cheng W., Cheng, Y. ve Liang, J.** (2008). A novel ant colony algorithm for U-shaped line balancing problem, *Fourth International Conference on Natural Computation*, Shandong, China : October 18-20.
- Url-1** <<http://www.aa.com.tr/tr/sirkethaberleri/finans/sisecam-italya-da-ikinciduzcam-uretim-tesisini-satin-aldi/645268>>, erişim tarihi 11.11.2018.
- Url-2** <<http://www.tyih.gov.tr/Eklenti/2692,ergonomik-risketmenleripdf.pdf?0elet.polimi.it/>>, erişim tarihi 8.12.2018.
- Url-3** <<http://www.arcelikas.com/UserFiles/file/Arcelik%202018%204%C3%87%20Finansal%20Sonu%C3%A7lar%20Sunumu.pdf>>, erişim tarihi 8.12.2018.



ÖZGEÇMİŞ

**VESİKALIK
FOTO**

Ad-Soyad : Keriman Gizem GÖRGÜLÜ

Doğum Tarihi ve Yeri : 1993 - Muğla

E-posta : gozkahya@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2015, İstanbul Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2016 yılından beri ŞİŞECAM'da çalışmaktadır.