

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**U TİPİ MONTAJ HATLARINDA  
ERGONOMİK KOŞULLARI DİKKATE ALARAK DENGELEME**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Emre ÇELİK**

**Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Endüstri Mühendisliği Programı**

**OCAK 2012**



**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**U TİPİ MONTAJ HATLARINDA  
ERGONOMİK KOŞULLARI DİKKATE ALARAK DENGELEME**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Emre ÇELİK  
(507081110)**

**Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Endüstri Mühendisliği Programı**

**Tez Danışmanı: Y. Doç. Dr. Murat BASKAK**

**OCAK 2012**



İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 507081110 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Emre ÇELİK**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**U-TİPİ MONTAJ HATLARINDA ERGONOMİK KOŞULLARI DİKKATE ALARAK DENGEME**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

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

**Jüri Üyeleri :**       **Prof. Dr. Fethi ÇALIŞIR**     .....  
İstanbul Teknik Üniversitesi

**Y. Doç. Dr. Bahadır GÜLSÜN**     .....  
Yıldız Teknik Üniversitesi

**Teslim Tarihi :**       **19 Aralık 2011**  
**Savunma Tarihi :**    **23 Ocak 2012**



## ÖNSÖZ

Dünyada her geçen gün insan nüfusunun artması ve dolayısıyla ihtiyaçların artması nedeniyle ürün talebi de artmaktadır. Gereksinimleri karşılayabilmek için yeni ürün çeşitleri ortaya çıktıkça ve ürün gereksinimi arttıkça üretim kaynaklarının kısıtlı olduğu ve kaynakların verimli kullanılması gerekliliği önem arz etmiştir. Bu nedenle insanoğlu kaynakların daha verimli kullanılması için araştırmaya ve üretim yöntemlerini daha verimli duruma getirecek çözümler geliştirmek için çok sayıda çalışma yapmıştır.

Üretim talebinin artmasıyla seri üretim hatları için bir gereksinim olarak 20. yüzyılın ikinci çeyreğinde ortaya çıkan montaj hatları, karmaşık yapılı ürünlerin üretiminde kaynakların daha verimli kullanılmasını sağlamıştır. Montaj hatlarının üretim sistemlerinde yaygınlaşması hatlarda kullanılan makina ve işçilerin daha verimli kullanılması için çalışmalar yapılmasını gerektirmiştir.

Montaj hatları konusunda yapılan çalışmaların büyük bir kısmını, görevlerin istasyonlar arasında bekleme süresini en aza indiren ve dolayısıyla çevrim süresini en aza indiren hat dengeleme çalışmaları oluşturmuştur.

Bu tez çalışmasında, Tam Zamanında Üretim felsefesinin gereksinimi olan U-tipi montaj hatlarında, Bulanık Mantık yaklaşımı ve Hedef Programlama yardımıyla, işçilerin yorulmasını da dikkate alan bir hat dengeleme çalışması yapılmıştır.

Çalışmalarım esnasında beni yönlendiren ve yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen değerli danışman hocam Sayın Y. Doç. Dr. Murat BASKAK'a, tez yazımında yardımlarını esirgemeyen nişanlım Pınar GÜLTEKİN'e ve bu süreçte beni destekleyen annem Nermin ÇELİK'e ve babam Hasan ÇELİK'e teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Ocak 2012

Emre ÇELİK  
Endüstri Mühendisi





## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER .....	vii
KISALTMALAR .....	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
SEMBOL LİSTESİ .....	xvii
ÖZET.....	xix
SUMMARY .....	xxi
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
<b>2. ÜRETİM VE ÜRETİM SİSTEMLERİ .....</b>	<b>3</b>
2.1 Üretim.....	3
2.2 Üretim Sistemlerinin Sınıflandırılması .....	5
2.2.1 Ürün cinsine göre sınıflandırma.....	5
2.2.2 Üretim yöntemine göre sınıflandırma .....	6
2.2.2.1 Birincil üretim yöntemi .....	6
2.2.2.2 Sentetik üretim yöntemi .....	6
2.2.2.3 Analitik üretim yöntemi .....	6
2.2.2.4 Fabrikasyon üretim yöntemi .....	6
2.2.2.5 Montajla üretim yöntemi.....	6
2.2.3 Üretim sürecine göre sınıflandırma.....	7
2.2.3.1 Akış tipi üretim .....	7
2.2.3.2 Sipariş tipi üretim.....	7
2.2.3.3 Sabit konumlu atölye.....	9
2.2.4 Ürün miktarına ve çeşidine göre sınıflandırma.....	9
2.2.4.1 Proses tipi üretim .....	10
2.2.4.2 Parti üretimi.....	10
2.2.4.3 Proje tipi üretim .....	10
2.2.4.4 Kitle üretimi .....	10
2.3 Çağdaş Üretim Sistemleri.....	12
2.3.1 Hücresel üretim sistemi (Grup teknolojisi).....	12
2.3.2 Bilgisayarla bütünleşik üretim sistemleri.....	13
2.3.3 Tam zamanında üretim sistemi .....	13
<b>3. MONTAJ VE MONTAJ HATTI Dengeleme.....</b>	<b>15</b>
3.1 Montaj .....	15
3.2 Montaj Hattı Dengeleme Problemi .....	17
3.3 Montaj Hattı Dengeleme Probleminde Genel Tanımlar.....	18
3.4 Montaj Hattı Dengelemedeki Kısıtlar .....	19
3.4.1 Ana kısıtlar .....	19
3.4.1.1 Çevrim süresi kısıtı .....	19
3.4.1.2 Öncelik ilişkisi kısıtı .....	19
3.4.2 Yan kısıtlar .....	20
3.4.2.1 Konum kısıtı.....	20

3.4.2.2 Sabit makina ve donanım kısıtı .....	20
3.4.2.3 İstasyon yükü.....	20
3.4.2.4 Aynı istasyona atanması veya atanmaması istenen işler kısıtı .....	21
3.5 Montaj Hattı Dengeleme Probleminin Sınıflandırılması.....	21
3.5.1 Model sayısına göre montaj hatlar .....	21
3.5.1.1 Tek modellenli montaj hattı .....	21
3.5.1.2 Karışık modellenli montaj hattı.....	22
3.5.1.3 Çok modellenli montaj hattı.....	22
3.5.2 Hat kontrol yapısına göre montaj hatları.....	22
3.5.2.1 Gecikmeli montaj hatları .....	22
3.5.2.2 Gecikmesiz montaj hatları.....	23
3.5.3 Kurulum sıklığına göre montaj hatları .....	24
3.5.3.1 İlk kez dengelemeli montaj hatları .....	24
3.5.3.2 Yeniden dengelemeli montaj hatları .....	24
3.5.4 Otomasyon düzeyine göre montaj hatları.....	25
3.5.4.1 manuel montaj hatları.....	25
3.5.4.2 otomatik montaj hatları .....	27
3.5.5 Yerleşim şekline göre montaj hatları .....	27
3.5.5.1 Düz (I tipi) montaj hatları.....	28
3.5.5.2 U tipi montaj hatları .....	28
3.6 Hattın İşleyişine Göre Montaj Hatları .....	32
3.6.1 Banttan alınabilir birimler .....	33
3.6.2 Bant üzerinde sabit birimler .....	33
<b>4. BULANIK MANTIK VE BULANIK HEDEF PROGRAMLAMA .....</b>	<b>35</b>
4.1 Bulanık Mantık.....	35
4.2 Bulanık Sistemlerin Gelişimi .....	36
4.3 Bulanık Mantık İlkeleri .....	38
4.4 Bulanık Kümelerde Temel Kavramlar .....	41
4.4.1 Üyelik fonksiyonu .....	41
4.4.2 Bulanık kümelerin yüksekliği .....	41
4.4.3 $\alpha$ Kesiti.....	42
4.5 Bulanık Kümelerde Kesişim, Birleşim Ve Tümleme.....	42
4.5.1 Bulanık kümelerde birleşim .....	42
4.5.2 Bulanık kümelerde kesişim .....	43
4.5.3 Bulanık kümelerde tümleme .....	44
4.6 Bulanık ve Olasılık .....	44
4.7 Bulanık Çözümleme .....	45
4.8 Bulanık Mantık Denetleyicilerinin Üstün Ve Zayıf Yanları .....	46
4.9 Bulanık Kümelerde Temel İşlemler .....	46
4.9.1 İşaret değiştirme .....	47
4.9.2 Toplama.....	48
4.9.3 Çıkarma .....	48
4.9.4 Bölme .....	48
4.9.5 Çarpma .....	48
4.10 Bulanık Ortamda Karar Verme .....	49
4.11 Hedef Programlama.....	50
4.11.1 Karar değişkenleri .....	51
4.11.2 Sistem kısıtları.....	51
4.11.3 Hedef kısıtları.....	51
4.11.4 Amaç fonksiyonu .....	51

4.11.5 Birleşik Amaç (Başarı) Fonksiyonu.....	52
4.12 Bulanık Hedef Programlama .....	53
<b>5. RULA YÖNTEMİ.....</b>	<b>55</b>
5.1 Rula Yönteminin Tanımı.....	55
5.2 RULA Yöntemi İle İlgili Yapılan Çalışmalar .....	56
5.3 RULA Yönteminin Evreleri .....	56
5.3.1 Evre 1: Vücut duruş şeklinin gözlemlenmesi .....	56
5.3.2 Evre 2: Vücut bölümleri skorlarının gruplandırılması .....	60
5.3.2.1 Kas kullanımı ve uygulanan kuvvet skorları.....	62
5.3.3 Evre 3: Genel skorun bulunması.....	63
<b>6. BULANIK HEDEF PROGRAMLAMA İLE BASİT U TİPİ MONTAJ HATTI DENGELEME .....</b>	<b>65</b>
6.1 Matematiksel Model.....	65
6.2 Kısıtlar .....	66
6.2.1 Atama kısıtı .....	67
6.2.2 Çevrim süresi kısıtı .....	68
6.2.3 Öncelik ilişkileri kısıtı.....	69
6.2.4 İş istasyonu kısıtı.....	69
6.3 Ergonomik Koşullar Altında U Tipi Montaj Hattı Dengeleme.....	70
6.4 İkili Bulanık Hedef Programlama İle Basit U Tipi Montaj Hattı Dengeleme..	71
6.4.1 Bulanık çevrim süresi hedefi.....	71
6.4.2 Bulanık istasyon sayısı hedefi.....	72
6.4.3 Bulanık Zorluk Derecesi Hedefi .....	73
<b>7. BASİT U-TİPİ MONTAJ HATTI DENGELEMESİ İÇİN UYGULAMA ....</b>	<b>75</b>
7.1 Problem Tanımı.....	75
7.2 Kısıtlar .....	81
7.2.1 Atama kısıtları.....	81
7.2.2 Çevrim süresi kısıtları .....	81
7.2.3 Öncelik kısıtları.....	83
7.2.4 İstasyon kısıtları .....	84
7.2.5 Zorluk derecesi kısıtı.....	85
7.3 Çözüm Sonucu .....	87
<b>8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....</b>	<b>89</b>
8.1 Sonuçlar.....	89
8.2 Öneriler.....	89
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>91</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>95</b>



## **KISALTMALAR**

<b>ABD</b>	: Amerika Birleşik Devletleri
<b>BUMHDP</b>	: Basit U-Tipi Montaj Hattı Dengeleme Problemi
<b>HP</b>	: Hedef Programlama
<b>RULA</b>	: Rapid Upper Limb Assessment
<b>TZÜ</b>	: Tam Zamanında Üretim



## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa

Çizelge 3.1 : Montaj hattı çeşitleri.....	21
Çizelge 4.1 : Klasik mantık-bulanık mantık arasındaki temel farklılıklar.....	39
Çizelge 4.2 : Klasik ve bulanık mantık denetleyicilerin karşılaştırılması .....	46
Çizelge 5.1 : A grubu skor tablosu .....	61
Çizelge 5.2 : B grubu skor tablosu.....	61
Çizelge 5.3 : C ve D skorlarının bileşke skor tablosu (C tablosu).....	63
Çizelge 7.1 : Montaj operasyonları ve süreleri .....	77
Çizelge 7.2 : A grubu puanları.....	78
Çizelge 7.3 : B grubu puanları .....	78
Çizelge 7.4 : Görevlerin A grubu skorları .....	79
Çizelge 7.5 : C skoru tablosu .....	79
Çizelge 7.6 : Görevlerin B grubu skorları .....	80
Çizelge 7.7 : D skoru tablosu.....	80
Çizelge 7.8 : Genel skorlar .....	80
Çizelge 7.9 : Sonuçlar .....	87





## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 2.1 : Genel bir üretim sistemi (Acar, 2000).....	4
Şekil 2.2 : Üretim yönetimi etkinlikleri (Baskak, 1991). ....	4
Şekil 2.3 : Akış tipi atölye sistemi (Taşıyıcı, 2004). ....	7
Şekil 2.4 : Sipariş tipi atölye sistemi (Taşıyıcı, 2004). ....	8
Şekil 2.5 : Sabit konumlu atölye sistemi (Taşıyıcı, 2004). ....	9
Şekil 2.6 : Kitle üretim sistemleri (Wild, 1971). ....	11
Şekil 2.7 : Montaj hattı örneği. ....	12
Şekil 3.1 : Öncelik diyagramı. ....	19
Şekil 3.2 : Gecikmeli montaj hattı. ....	23
Şekil 3.3 : Gecikmesiz montaj hattı örneği ....	23
Şekil 3.4 : Kuş kafesi yerleşimi ....	27
Şekil 3.5 : U tipi montaj hattı-3 işçi ve 10 makinalı (Günay ve diğ., 2004) ....	29
Şekil 3.6 : Shojinka ve alt dalları.....	30
Şekil 3.7 : Montaj hattı tasarımları (Aksoy, 1997) ....	31
Şekil 3.8 : İşlevsel montaj hatları ....	32
Şekil 4.1 : Üyelik fonksiyonlarıyla tanımlanan hız bulanık kümeleri ....	40
Şekil 4.2 : SOĞUK ve SICAK bulanık kümelerinin üyelik fonksiyonları ....	41
Şekil 4.3 : A ve B bulanık kümeleri ....	42
Şekil 4.4 : A ve B bulanık kümelerinin birleşimi ....	42
Şekil 4.5 : A ve B bulanık kümelerinin kesişimi ....	44
Şekil 4.6 : A bulanık kümesinin tümleyeni ....	44
Şekil 4.7 : Üçgensel bir bulanık sayının üyelik fonksiyonu ....	47
Şekil 5.1 : A grubu vücut bölümlerinin duruş şekline göre puanları (McAtamney ve Corlett, 1993) ....	57
Şekil 5.2 : B grubu vücut bölümlerinin duruş şekline göre puanları (McAtamney ve Corlett, 1993) ....	59
Şekil 5.3 : RULA skor kağıdı ....	60
Şekil 6.1 : Öncelik diyagramı ....	67
Şekil 6.2 : Örnek hayalî öncelik diyagramı (a) ve onun gerçek öncelik diyagramı (b) ....	68
Şekil 7.1 : Çevrim süresi üyelik fonksiyonu.....	76
Şekil 7.2 : İş istasyonu üyelik fonksiyonu.....	76
Şekil 7.3 : Zaman ağırlıklı zorluk derecesi üyelik fonksiyonu.....	77
Şekil 7.4 : Öncelik diyagramı ....	78



## SEMBOL LİSTESİ

$C_{\min}$	: Çevrim süresinin alt sınırı
$C_{\max}$	: Çevrim süresinin üst sınırı
$t_i$	: $i$ görevi işlem süresi
$W_{\min}$	: İstasyon sayısının alt sınırı
$W_{\max}$	: İstasyon sayısının üst sınırı
$M_{\min}$	: En düşük istasyon sayısı
$M_{\max}$	: En yüksek istasyon sayısı, $M_{\max} \geq W_{\max}$
$F_{\min}$	: Zorluk derecesi alt sınırı
$F_{\max}$	: Zorluk derecesi üst sınırı
$n$	: Toplam görev sayısı
$m$	: İstasyon sayısı
$g_k$	: $k$ hedefi değeri
$H^0$	: Çevrim süresi hedefinin doğrusallaştırma parametresi
$K^0$	: İstasyon sayısı hedefinin doğrusallaştırma parametresi
$V^0$	: Zorluk derecesi hedefinin doğrusallaştırma parametresi
$a^-$	: Zorluk derecesi hedefinin altında gerçekleşen değer
$a^+$	: Zorluk derecesi hedefinin üstünde gerçekleşen değer
$d^-$	: İstasyon sayısı hedefinin altında gerçekleşen değer
$d^+$	: İstasyon sayısı hedefinin üstünde gerçekleşen değer
$e^-$	: Çevrim süresi hedefinin altında gerçekleşen değer
$e^+$	: Çevrim süresi hedefinin üstünde gerçekleşen değer



## U TİPİ MONTAJ HATLARINDA ERGONOMİK KOŞULLARI DİKKATE ALARAK DENGELEME

### ÖZET

Günümüz dünyasında her geçen gün tüketim artmaktadır. Bu tüketimi karşılayabilmek için hızlı ve ucuz üretim yapmak, rekabet koşullarında büyük önem arz etmektedir. Bu nedenle serî üretim sistemlerinin en önemli öğelerinden biri olan montaj hatlarının hızlı ve mâliyeti az olacak şekilde çalışmasının önemi günden güne artmaktadır.

Çalışmada ilk olarak üretim sistemleri anlatılmıştır. Daha sonrasında montaj hattı çeşitleri ayrıntılı bir şekilde ele alınmıştır. I-tipi (düz) montaj hatları ve U-tipi montaj hatları arasındaki farklardan sözedilmiştir. U-tipi montaj hatlarının gerçek yaşamdaki üstünlüklerinden sözedilmiştir.

Son yıllarda Tam Zamanında Üretim anlayışının öneminin giderek benimsenmesi, bu üretim felsefesine en uygun montaj hattı şekli olan U-tipi montaj hattı uygulamalarının işletmelerde yaygınlaşmasına yol açmıştır. Bu çalışmada da montaj hattı çeşitleri anlatılmış ve basit U-tipi montaj hattı dengeleme problemi ele alınmıştır.

Literatürde daha önce basit U-tipi montaj hattı dengeleme konusu üzerine birçok çalışma yapılmıştır; ancak hat dengelemesi sırasında istasyon sayısı ve çevrim süresi kısıtları ele alınırken, ergonomik etmenler gözardı edilmiştir. Dolayısıyla hat dengeleme çözümlerinde istasyonlar arası bekleme süreleri ve istasyon sayısı en aza indirilirken, istasyonların her birinde ergonomik yönden farklı iş yükleri ortaya çıkmıştır. Bu durum bâzı istasyonlarda işçilerin fazla yorulmasına ve hattın kararsızlığına yol açmıştır.

Bu çalışmada basit U-tipi montaj hattı dengeleme problemi ele alınırken ergonomik etmenler de dikkate alınmıştır. “Rapid Upper Limb Assessment” yöntemi yardımıyla, yapılan işlerin zorluk dereceleri hesaplanmış ve kısıtlar oluşturulmuştur. Bulanık mantık anlayışıyla ele alınan hat dengeleme problemi, hedef programlama yöntemiyle çözülmüştür. Çevrim süresi ve istasyon sayısı eşzamanlı olarak en aza indirilirken, istasyonlardaki iş yükleri de eşit olarak dağıtılmaya çalışılmıştır. Bulanık mantık yaklaşımından ötürü çevrim süresi, istasyon sayısı ve istasyonlardaki zorluk dereceleri için alt ve üst sınırlar ifâde edilmiştir. Problemin çözümünde sonuçların bu aralıkta olması için gerekli kısıtlar kullanılmıştır. Hedef programlama yöntemiyle çözümün bu alt düzeylerden (en uygun düzeyi) sapmasının enküçüklenmesi amaçlanmıştır. Problemin çözümünde LINGO 13.0 paket programından yararlanılmıştır. Çözümünden çıkan sonuçlar şöyledir:

- İstasyonlar arası bekleme süreleri en fazla bir saniye olmuştur.
- İstasyon sayıları için belirlenen alt ve üst sınırları arasında bir değer yakalanmıştır.
- İstasyonlardaki iş zorluk dereceleri birbirine çok yakın olmuştur.

Bu çalışmada çevrim zamanı kısıtlarına, iş istasyonu kısıtlarına ve istasyonlardaki zorluk derecesi kısıtlarına gore hat dengeleme çalışması yapılmıştır. Sonraki çalışmalarda istasyondaki işlerin monotonluk düzeyinin de hesaba katılması önerilir.

## **U-TYPE ASSEMBLY LINE BALANCING PROBLEM CONSIDERING ERGONOMICS**

### **SUMMARY**

In today's world, consumption is growing day by day. To supply this fast growing consumption, fast and cheap production is so important to exist in competing conditions. For this reason, it is so important to have cheaply and fastly working assembly lines, which is one of most significant part of mass production.

An assembly line is a process in which parts are sequentially added to make a product. Assembly lines are built up from workers, tools and machines, and parts which are going to be assembled. The motion of workers is minimized to decrease cycle times and worker fatigue. All parts are handled by conveyor belts or vehicles such as fork lift. Each worker is distributed to the assembly line (to the workstations).

One of the important issues for setting up of an assembly line is assigning the work pieces to be performed at each individual workstation. This process is so complicated that there are cycle time restrictions and technological constraints. In addition, there is a precedence relationship that a task can not be performed before its predecessor is finished. These relationships are defined by a precedence diagram in assembly line balancing problems.

Assembly lines are firstly mentioned in a thesis by Benjamin Bryton. His purpose was to decrease the cycle time by balancing the workstation process times. However, he assumed that the number of workstations is constant. After this study, Modie and Young had done a study by a computerized system. Until now, several studies on assembly line balancing field have been made. Today, there are so many types of assembly lines suiting the companies' requirements.

Firstly, production systems have been explained in this study. Production sources, production inputs and outputs, production management activities, classification of production systems is mentioned. Production is classified based on product type, method of production, process of production and product quantity.

Today, factories use modern production systems which are explained in this study including cell production type, computerized production systems and Just in Time production. While mentioning about Just in Time production mentality, the importance of U-type assembly lines is examined. In the last years, the need of Just in Time production is raised. In consequence, U-type assembly lines are increasingly implemented in the factories, day by day.

Recently, U-type layouts have been utilized in many production lines instead of the traditional straight-line assembly layouts in consequence of the increasing use of just-in-time production principles.

The distinguishing characteristic of a U-shaped assembly line is that its entrance and exit are at the same position. The entrance side of a U-shaped assembly line is called

as front of the line and the exit side is called as back of the line. Tasks are placed at front or back of the U-shaped assembly lines based on their assignment types that are explained as assigned from original precedence diagram or phantom precedence diagram.

Two attempts can be considered in addition to the precedence relations between the work pieces as the minimization of the number of workstations for a given cycle time and the minimization of the cycle time for a given number of workstations.

Simple assembly line balancing problems can be solved with some of the heuristics, based on the implementation of priority decisions to assign the work pieces to the workstations. The decisions consider such aspects as the operation time of the work pieces, the number of work pieces after an assigned one, the constraints on the minimum number of workstations to assign work pieces or even a mixture of these goals. The rules are used to success a sequenced list with the contained work pieces, so in each assignment decision the most appropriate task (in accordance with the chosen decision) can be chosen. A traditional line arranges the stations and the tasks that include them sequentially along a straight line. In a U-shaped line, work pieces are assigned around a U shape line and are allocated into stations that can cross from one side of the line to the other. The assignment of the work pieces to the stations on a U-line assembly line uses the geometry of the line to keep the return and crossover distances as small as possible. Therefore, total traveling distance of the workers and in consequence the travel time is less on a U-shaped line.

The U-shaped line permits more possibilities on how to assign work pieces to workstations; the number of work stations needed for a U-shaped assembly line is never more than the number of work stations needed for the traditional straight line. It is always less than or equal to the work stations needed for the traditional straight line. The reason for this situation is that in the I-type assembly line balancing problem, for a given workstation, the set of possible assignable tasks is illustrated by those tasks whose predecessors have already been assigned to workstations, at the same time as in the U-shaped line problem the set of assignable work pieces is determined by all those tasks whose successors or predecessors have already been assigned.

The simple assembly line balancing problem is characterized by balancing of straight and single model assembly lines. The U-shaped assembly line version of simple assembly line balancing is referred as single-model U-line balancing. The simple assembly line balancing was first formulated by Salveson and has been extensively studied by many researchers until now.

The problem is thought in Fuzzy Logic approach and the solution is made by Goal Programming method. The term “Fuzzy Logic” is created by Lotfi Zadeh. A fuzzy subset  $X$  of a set  $A$  is characterized by assigning to each element  $a$  of  $A$  the degree of membership of  $a$  in  $X$  (e.g.,  $A$  is a group of cars,  $X$  the fuzzy set of cars with diesel engines in  $A$ ).

In existing literature for Goal Programming formulation of assembly line balancing problems, goals are accurately defined. That is, the formulations assume that the assembly line manager is able to accurately determine goal values for assembly line efficiency. However, in real world applications, it is not easy to determine these values precisely, because the assembly line systems do not work in a deterministic manner. Unfavorably, inaccurate target levels are generally defined for these values such as “somewhat smaller than”, “substantially larger than” or “approximately



equal to” the vague goal. Therefore, if the imprecise target levels are determined for each objective, the assembly line balancing problem is transformed to binary fuzzy goal programming.

In literature, several studies about the simple U-type assembly line balancing problems have been made. Workstation constraints and cycle time constraints have been taken into consideration in these studies. However, ergonomic conditions have been missed. Therefore, in assembly line balancing solutions, different workloads had occurred in the workstations while balancing cycle time and decreasing workstation number. This situation causes straining some workers much more than the other workers, so the cycle times may deviate. Because of the cycle time deviations, the assembly line system becomes unstable.

In this study, ergonomic factors are taken into consideration while solving the simple U-type assembly line balancing problem. By the help of Rapid Upper Limb Assessment method, difficulty levels of the work pieces are computed and difficulty constraints of all of the work stations are generated, one by one.

Cycle time and workstation number are synchronously minimized while the workloads are being distributed smoothly to all of the workstations. Upper and lower boundaries of cycle time, workstation number and difficulty levels of workstations are defined to make the computations in Fuzzy Logic approach. The solution results are aimed to be between the lower and upper limits. The results are also aimed to be close to the lower limits as the lower limits are the global optimum levels in the mathematical model. When the cycle time gets lower, the assembly line works faster. Similarly, when the number of workstations decreases, number of operators and the equipment, which is needed, also decrease. Goal Programming method is used to decrease the deviations from the lower limits. The objective function was to decrease the deviations from determined cycle time, workstation number and difficulty level.

LINGO 13.0 software is used for the solution of the problem. According to the results, it is seen that:

- The waiting times (idle times) between the workstations are at most 1 second.
- The number of workstation is between the lower and upper limits.
- Workloads are distributed smoothly to the workstations.

This study has handled with cycle time constraints, workstation constraints and difficulty level constraints for the simple U-type assembly lines. It is advised that the works’ monotony will have to be taken into consideration in the future to make more accurate balancing of the lines.



## 1. GİRİŞ

Üretim talebinin yıldan yıla artmasıyla ilk kez 20. yüzyılın başlarında A.B.D.'de Ford firması tarafından kullanılan montaj hatları, rekabet koşullarının zorlaşmasıyla birlikte ürünün zamanında teslim edilmesi, kaliteli olması ve aynı zamanda ucuz olması için serî üretim sistemlerinin bir parçası olmuştur.

İşlenmiş yarı ürünler ve yardımcı montaj malzemelerin bir araya getirilmesiyle birlikte ürünlerin montajı yapılmış olur. Montaj hatları, bir hat boyunca dizilmiş işçiler ve montaj donanımlarından oluşur. Gereksinime ve kısıtlara göre hattın yerleşimi ve şekli değişir. Montaj sürecinde iş parçalarına bölünür ve bu iş parçaları istasyonlarda yapılır. Hattın bir ucundan montajına başlanan ürün, hat boyunca her istasyonda çeşitli işlemler görür ve hattı son ürün olarak terkeder.

Günümüzdeki rekabet ortamında firmaların ayakta kalabilmesi için, varolan kapasitelerini en iyi şekilde değerlendirmeleri gerekmektedir. Montaj hatlarının dengelenmesiyle birlikte iş istasyonlarındaki boşta bekleme süreleri en aza indirilir, dolayısıyla çevrim süresi de en az düzeye çekilir. Bir ürünün montajında yapılması gereken iş parçalarının çeşitli istasyonlara belirli kısıtlar altında atanması problemine “montaj hattı dengeleme problemi” denir.

Son yıllarda artan rekabet koşullarıyla ortaya çıkan ve giderek yaygınlaşan tam zamanında üretim felsefesiyle U-tipi montaj hattı yerleşimi de giderek yaygınlaşmaktadır. Bu çalışmada, ikinci bölümde üretim sistemleri ve tam zamanında üretimden sözedilmiştir. Üçüncü bölümde montaj hattı çeşitleri ve montaj hattı dengeleme probleminden sözedilmiştir. Dördüncü bölümde montaj hattı dengeleme uygulamasında kullanılan bulanık mantık ve hedef programlama kavramlarından sözedilmiştir. Beşinci bölümde, ergonomik koşulları değerlendiren RULA (Rapid Upper Limb Assessment) yönteminden sözedilmiştir. Altıncı ve yedinci bölümlerde problemin tanımı, kısıtları ve uygulanmasından sözedilmiştir.



## 2. ÜRETİM VE ÜRETİM SİSTEMLERİ

### 2.1 Üretim

Üretim, doğa tarafından giderilmeyen insan gereksinimlerini karşılamak için, ekonomik değeri olan ürün ve hizmetin, insanlar tarafından yapılmasıdır. Üretimin mühendisler ve ekonomistler tarafından tanımlanan iki farklı tanımı vardır. Mühendisler, “fiziksel bir varlık üzerinde onun değerini arttıracak bir değişiklik yapmayı veya hammadde ya da yarı ürünleri kullanılabilir bir ürüne dönüştürmeyi” üretim olarak tanımlarlar (Elwoods, 1992). Ekonomistler tarafından yapılan üretimin tanımı ise “yarar yaratmak” şeklinde ifade edilebilir. Üretimin diğer bir tanımı ise şudur: Sonsuz insan gereksinimini karşılamak için yeni bir fiziksel varlık ya da hizmet ile sonuçlanan “yarar yaratmak amacıyla girişilen” faaliyetler bütünüdür.

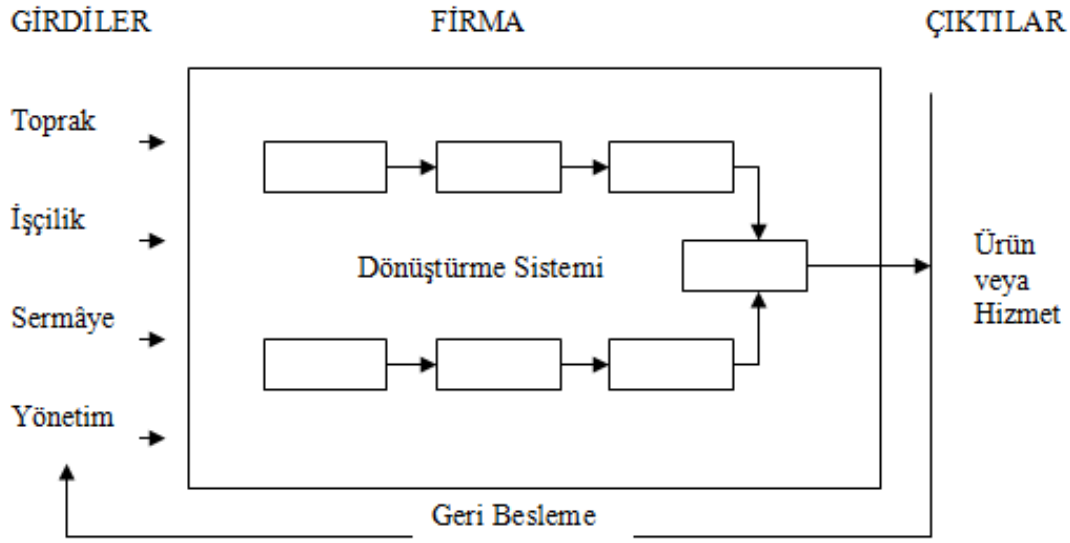
Üretimin amacına ulaşabilmesi için üretim koşulları ve kaynaklarının istenen çerçevede bir araya getirilmesi ve işletilmesi gerekir. Üretim kaynakları en genel itibarıyla şunlardan oluşur (Baskak, 1991):

- Toprak veya hammadde kaynakları
- İşçilik ve insangücü kaynakları
- Sermaye

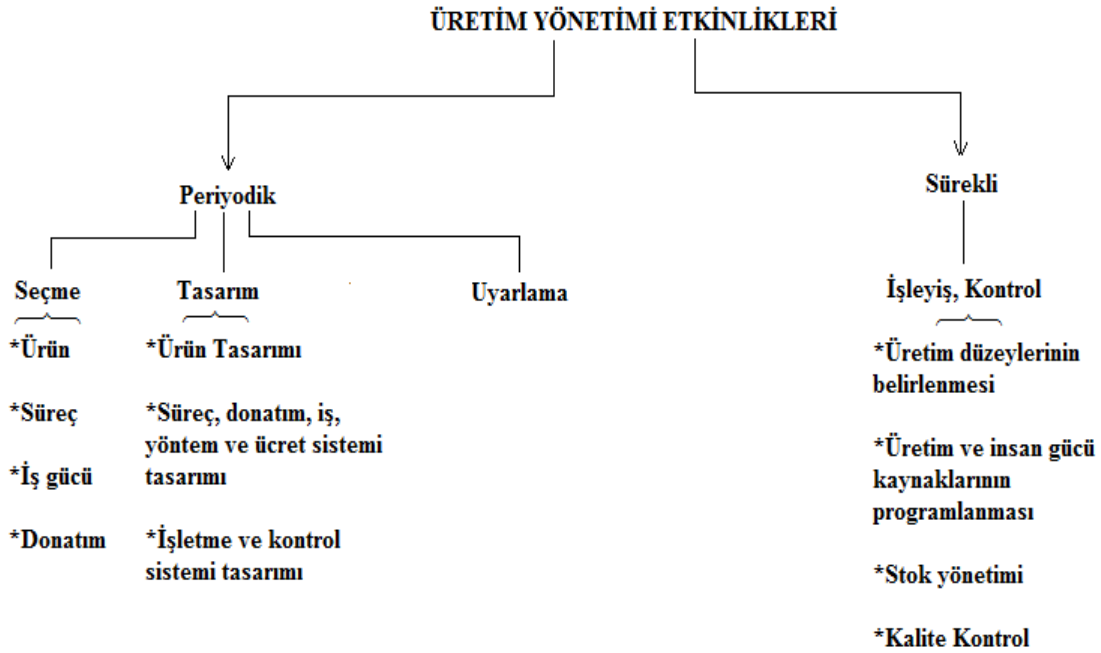
Üretim sonucunda çıktı olarak hizmet ve/veya ürün elde edilir. İnsanların sonsuz gereksinimi ve kaynakların kısıtlı olması nedeniyle, teknoloji gelişimi, üretim sistemlerinin karmaşıklaşması ve kısıtlı üretim kaynaklarının verimli kullanılması gereğinin sonucu olarak yönetim ögesi de üretim kaynaklarına dahil olmuştur.

Genellikle bir üretim sistemi, üretim kaynaklarının ürün ve/veya hizmete dönüşmesi için gereken tüm süreçleri içerir. Şekil 2.1’de genel bir üretim sistemi gösterilmektedir. Şekil 2.2’de ise bir üretim sisteminin tasarımı, kontrolü ve yönetimi şematik olarak gösterilmektedir. Üretim sistemine girdi olarak katılan başlıca üretim kaynakları (hammadde, işçilik ve sermaye), üretim süreçleri sonucunda ürün veya

hizmet hâline dönüştürülür. Yönetim ögesi ise bu faaliyetlerin düzenlenmesini ve yürütülmesini sağlar.



Şekil 2.1 : Genel bir üretim sistemi (Acar,2000).



Şekil 2.2 : Üretim yönetimi etkinlikleri (Baskak, 1991).

Üretim sistemlerinde yönetim, işletme politikaları doğrultusunda şu öğeleri en uygun biçimde gerçekleştirmeyi amaçlamaktadır:

- Çıktı miktarı
- Mâliyetler (malzeme, emek, dağıtım, stok vb.)

- Kullanım (malzeme, varolan ekipman, işgücü)
- Kalite ve ürün güvenilirliği
- Zamanında teslim etme
- Yatırımlar
- Ürün değişimine uyum yeteneği, esnekliği
- Değişen talebe bağlı olarak ortaya çıkan miktar değişimine uyum ve esneklik

Üretim yönetimi etkinlikleri arasında periyodik olarak ürün seçimi, süreçlerin belirlenmesi, işgücü gereksiniminin belirlenmesi ve gerekli donanımın belirlenmesi gibi işlevler yer almaktadır. Ürün tasarımı, üretim tipinin ve düzeylerinin belirlenmesi, üretim ve insangücü kaynaklarının plânlanması, stok yönetimi ve kalite kontrol, üretim yönetimi etkinliklerinin en başında gelenleridir.

## **2.2 Üretim Sistemlerinin Sınıflandırılması**

Üretim sistemleri; ürün cinsine göre, üretim yöntemine göre, ürün miktarına göre, ürüne uygulanan stok politikasına göre veya üretim sürecine göre sınıflandırılabilir.

### **2.2.1 Ürün cinsine göre sınıflandırma**

Üretim sistemleri ürün cinslerine göre şu şekilde sınıflandırılabilir:

- Kömür üretimi
- Demir çelik üretimi
- Kimyasal maddeler üretimi
- Elektronik ürünler üretimi
- Tekstil ürünleri üretimi
- Elektriksel araç-gereç üretimi
- Takım tezgâhları üretimi
- Lastik üretimi
- Çimento üretimi
- Metal eşya üretimi

## **2.2.2 Üretim yöntemine göre sınıflandırma**

Ürünün oluşturulması sırasında kullanılan yöntemlere göre sınıflandırma şu şekilde yapılır:

### **2.2.2.1 Birincil üretim yöntemi**

Doğada varolan hammaddelerin işlenmesi veya kullanılması için üretilme yöntemidir. Birincil üretim yöntemiyle üretilen ürünlere örnek olarak demir, bakır, boksit ve diğer madenlerin çıkartılması ile kömür ve petrol üretimi gösterilebilir.

### **2.2.2.2 Sentetik üretim yöntemi**

Birincil (primer) üretim yöntemiyle çıkartılan temel hammaddelerin bazıları, birtakım işlemlerle yeni ürünlere dönüştürülür. Bu yöntemle üretilen ürünlere örnek olarak sentetik kauçuk, alaşımlı çelik, plastik, cam vb. ürünleri gösterilebilir.

### **2.2.2.3 Analitik üretim yöntemi**

Birincil üretim yöntemiyle çıkartılan temel hammaddelerin bazıları, daha sonra birtakım ayırıcı işlemlerle parçalanıp işlenerek çeşitli ürünlere dönüştürülür. Analitik üretim yöntemiyle üretilen ürünlere örnek olarak şeker pancarından şeker üretimini, ham petrolden benzin, mazot, fuel-oil üretimini, boksitten alüminyum üretimi gösterilebilir.

### **2.2.2.4 Fabrikasyon üretim yöntemi**

Temel hammaddelerin veya diğer hammaddelerin şekil vermesi sonucunda yeni ürünlerin elde edilmesi yöntemidir. Fabrikasyon üretim yönteminde kullanılan şekil verme yöntemlerine örnek olarak döküm, tornalama, presle kesme vb. yöntemler gösterilebilir.

### **2.2.2.5 Montajla üretim yöntemi**

Çeşitli hammadde, yarı ürün ve parçaları ürün ağacında belirtilenlere göre bir araya getirerek karmaşık bir ürün elde etme yöntemidir. Montaj üretim yöntemiyle üretilen ürünlere örnek olarak traktör, beyaz eşya ürünleri, otomobil, otobüs gibi ürünler gösterilebilir.

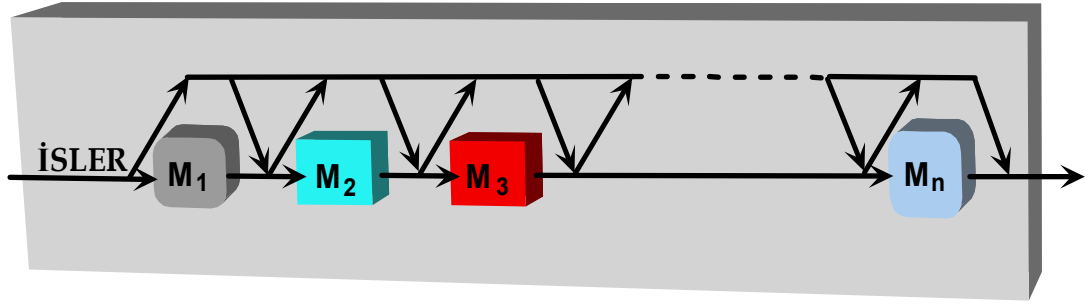


### 2.2.3 Üretim sürecine göre sınıflandırma

Üretim sürecine göre atölyeler üçe ayrılmaktadır: Sipariş Tipi Atölye, Akış Tipi Atölye ve Sabit Konumlu Atölye Sistemleridir.

#### 2.2.3.1 Akış tipi üretim

Sisteme giren birimler artarda aynı sıradaki etkinlikler ile üretilirler. Bir yandan hammadde ve yarı ürün olarak alınan malzemeler, işlemleri tamamlandıktan sonra ürün durumuna gelmiş olarak hattan ayrılır. Üretim sırasında her tezgâhın işlemi için belirlenen bir süre vardır. Bu sayede duraklama ve ara bekleme süreleri oldukça azdır. İşlem süreleri arasındaki farklardan dolayı hat üretiminde boş bekleme, gecikmeler ve ara depolardaki yığılmalar oluşabilir. Üretim hattı dengelenmesi ile işlem süreleri arasındaki farklar ve bekleme süreleri giderilmektedir. Sistemin genel yapısı Şekil 2.3’de şematize edilmiştir.



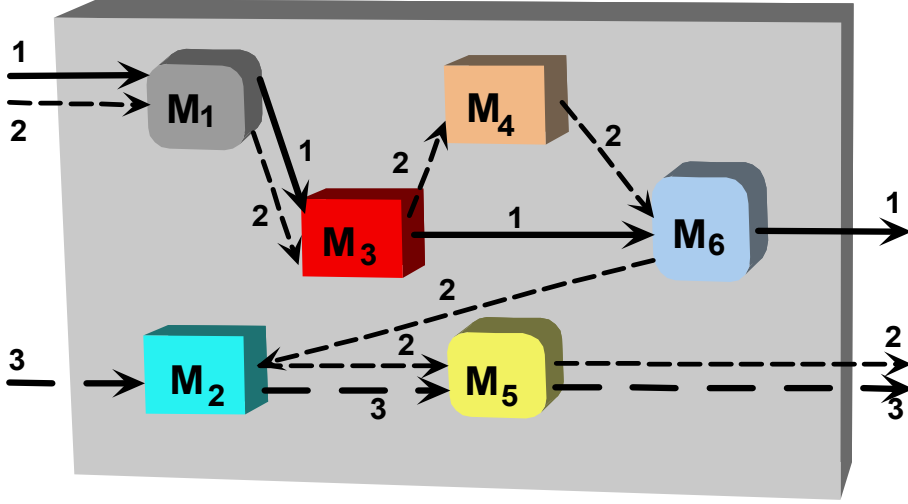
Şekil 2.3 : Akış tipi atölye sistemi (Taşyıcı, 2004).

#### 2.2.3.2 Sipariş tipi üretim

Üretim sistemleri arasında en eski ve en çok kullanılanıdır. Bu sistemler atölye tipi üretim sistemi olarak da adlandırılır. Genel amaçlı takım tezgâhları kullanılır. İşlevsel düzenleme olarak adlandırılan, aynı işlemlerli tezgâhların gruplanarak belirli alanlarda toplanması ile tezgâhların yerleştirilmesi sağlanır. Bu özellikleri nedeniyle bu üretim sistemi “işleme göre yerleştirme” durumuna da örnek verilebilir. Tezgâhlardan bazı durumlarda karma gruplar da oluşturulabilir. Sisteme alınan siparişler, üretime önce seçenek makinalardan boş olana koyularak, boş yer yoksa kuyruğa alınarak üretime dahil edilir.

Sipariş tipi üretim sisteminde makinalarda bulunan etkinlik esnekliği sayesinde makina sürelerinde yüksek verimliliğe ulaşılmasını sağlar. Ancak bu çeşit üretimler, iş akışını karmaşık bir duruma sokmaktadır. İş akışının karmaşık olmasının da süreç

içi stokların artması, üretim süresinin artması, kalite düzeyinin düşmesi, sipariş kayıplarının oluşması gibi negatif etkileri bulunmaktadır (Şekil 2.4).



Şekil 2.4 : Sipariş tipi atölye sistemi (Taşyıcı, 2004).

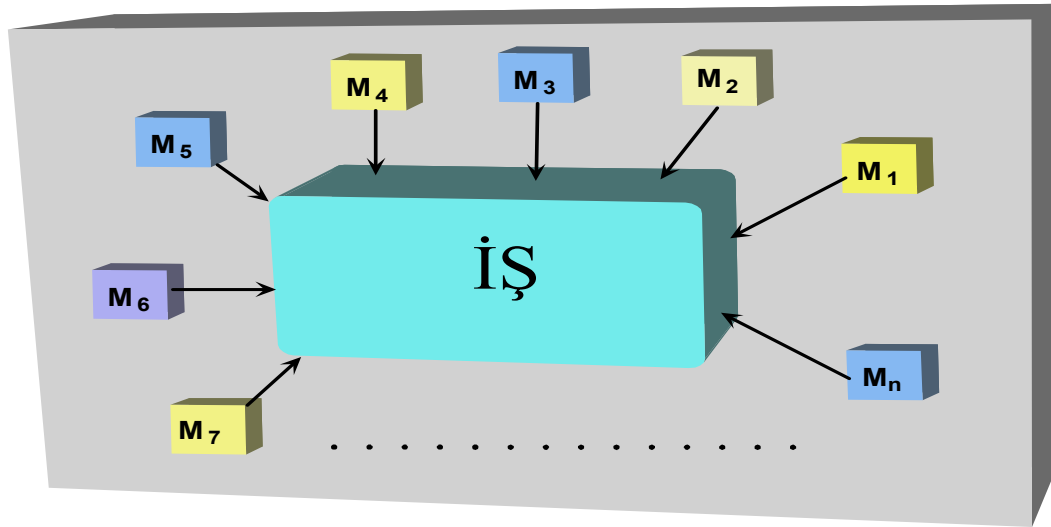
Sipariş tipi üretim sisteminin geleneksel yerleşim düzeni olan işlevsel düzenlemede karşılaşılan sorunlar aşağıdaki gibidir:

1. Tüm üretim etkinliklerini tamamlamak için parçaların çoğu birden fazla bölümü dolaşmak zorundadır. Bu sayede bölüm formeni, tüm parçanın üretiminden sorumlu olmamaktadır. Bu da daha uzun üretim süresine ve kalite düzeyinin düşmesine neden olur.
2. Atölyede, bir önceki etkinliği tamamlanmış bir parça, aynı anda çeşitli parçalar ele alındığından bitişik bir makinalara hemen yüklenememektedir. Bu nedenle her parça için bir bekleme süresi oluşmaktadır.
3. Parçaların üretim aşamalarında tanımlanabilmesi zordur. Bu nedenle ara depolarda stoklanması gerekir. Bu stoklama işlemi, ek olarak malzeme taşınması gereksinimini doğurmaktadır.
4. Çok sayıda parçanın işlevselliklerine göre makinalara yönlendirilmesi üretimin etkinliğini düşürür ve de kontrol sistemi kurulmasını engeller. Bu nedenle üretim sürelerinin uzaması ve ürünün nihai müşteriye teslim sürelerinde sorun yaşanması olasıdır.
5. Makinalarda çok çeşitli işlerin yüklenmesi ve her iş için oluşacak hazırlık süresi gözönüne alındığında, toplam hazırlık süresi fazladır.

6. Uzun hazırlık süreleri, her çeşit üründen üretilen miktarın azalmasına yol açar, bu da süreç içi stok mâliyetine neden olur.
7. Uzun tasarlama sürelerinde çeşitli nedenlerden dolayı güvenlik stokları tükenirse, tükenen parçaların yeniden üretilmesi uzun hazırlık süreleri yüzünden gecikir.
8. İşlemciler çok çeşitli ürün üretmek zorunda olduğundan çalışmalarındaki verim düşer.

### 2.2.3.3 Sabit konumlu atölye

Bu atölye tiplerinde ürün, üretim süresi boyunca sabit konumlandırılır. Üretim için gerekli olan her türlü üretim etmeni ürünün yanına getirilir ve üretim bu noktada gerçekleştirilir. Gemi ve uçak gibi büyük araçlar, köprü, tünel gibi inşaat işleri bu tür atölye tipine örnektir. Şekil 2.5’de sisteme ait örnek yapı verilmiştir.



Şekil 2.5 : Sabit konumlu atölye sistemi (Taşıyıcı, 2004).

Birçok işletmede tek tip üretimi görmek zordur. Üretimin tümü düşünüldüğünde belirli parçalar için farklı atölye tipi üretim gözlenebilir. Uçak gibi ürünler buna örnek olarak verilebilir. Bu ürünlerin parçalarının bir kısmı sipariş tipi ya da akış tipi üretim ile üretildikten sonra, elde edilen parçalar sabit konumlu atölye sistemi kullanılarak bir araya getirilir.

### 2.2.4 Ürün miktarına ve çeşidine göre sınıflandırma

Üretim, ürün miktarına ve çeşidine göre şu şekilde sınıflandırılabilir:

- Proses tipi üretim

- Parti Üretimi
- Kitle Üretimi
- Proje tipi üretim

#### **2.2.4.1 Proses tipi üretim**

Üretim sürecine dahil edilen malzemenin akışkan olduğu üretim tipidir. Bu tip üretim sistemleri genelde kimyasal ürünlerin üretiminde yeğlenir. Genellikle üretim miktarı çok, ancak çeşit azdır. Ürünler stok için üretilir.

#### **2.2.4.2 Parti üretimi**

Bu tip üretimlerde ürün çeşitliliği fazla, üretilen miktarlar ise düşüktür. Her partide bir tek çeşit ürün üretilir. Zaman, işçilik ve makinaların hazırlık süresi gibi birçok kısıtın olduğu bu üretim şeklinde, üretim plânlamanın gerekliliği ve ciddiyeti önem arzeder.

#### **2.2.4.3 Proje tipi üretim**

Bu üretim çeşidinde ürün genelde sabit bir alanda durur. Gerekli hammadde, donanım ve gereçler, ürünün bulunduğu yere taşınır. Tüm iş akışının merkezinde ürün yer alır. Az miktarlarda ve müşteriye özel üretim sözkonusudur. Gemi ve uçak üretimleri, köprü ve inşaat işleri, proje tipi üretime örnek olarak verilebilir.

#### **2.2.4.4 Kitle üretimi**

Üretim miktarının büyük olduğu, aynı çeşit ürünlerin üretildiği üretim şeklidir. Beyaz eşya, otomotiv sektörü örnek olarak sayılabilir. Bu üretim çeşidinde üretimin hızlı ve çok sayıda olması istenir. Üretim hatlarına konulan makina ve tezgâhlar özel amaçlıdır. Verimlilik için üretim hatlarının iyi dengelenmesi gerekmektedir. Ayrıca, ara stok miktarının optimum değerinde olması, hat tezgâhlarının bakımlı ve güvenilir olması gerekir.

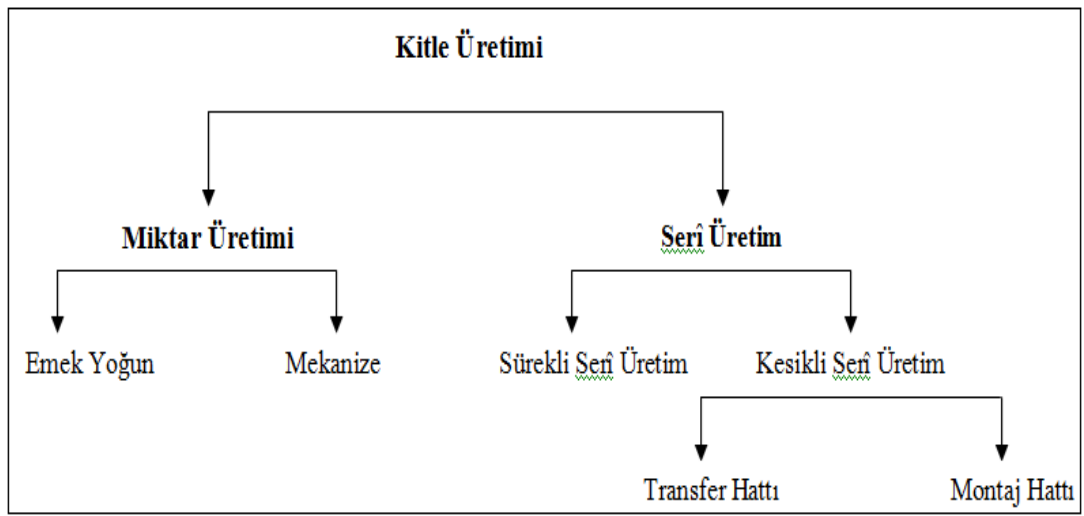
18. yüzyıl sonlarına doğru mekanik üretim yöntemlerinin gelişmesine de neden olan kitle üretim sistemlerinin doğuşu, daha sonra kitle üretiminin bir teknoloji gelişimi hâline gelmesiyle sonuçlanmıştır.

Kitle üretimi terimi iki değişik üretim teknolojisini içerir. Bunlar;

a) Miktar üretimi

b) Seri üretim

olarak karşımıza çıkarlar (Şekil 2.6.). Kitle üretiminde ürün yapısının karmaşıklığı arttıkça, akış tipi üretim sistemlerine geçilir. Fazla karmaşık olmayan, yapısal olarak basit ürünlerin büyük miktarlardaki üretimi için ise miktar üretimi uygundur. Karmaşık ürünlerin ana özelliği, ürün akışı olan değişik bir kitle üretimi teknolojisiyle üretimleri gerçekleştirilebilmekte olmasıdır (Acar ve Eştaş, 1986).

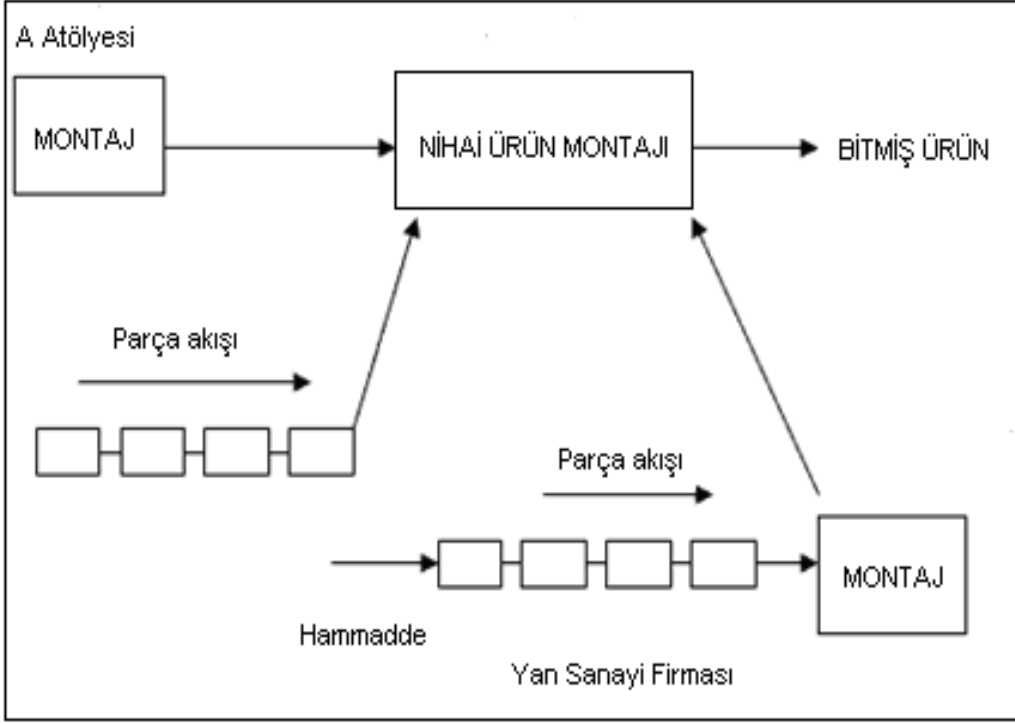


**Şekil 2.6 :** Kitle üretim sistemleri (Wild, 1971).

Kesikli seri üretim (akış hatları), transfer hatları ve montaj hatları olmak üzere iki sınıfa ayrılır. Transfer hatları, otomatik îmalat makina serilerinin oluşturduğu üretim hatları olarak bilinirler. Bu sistemler büyük ve karmaşık makinalardan oluşur. Bu hatlarda malzeme bir hat boyunca otomatik olarak transfer edilip işlenir. Serî durumda bulunan iş istasyonlarından oluşan akış hatlarında, çeşitli âletlerle donatılmış işçi bulunduran hatta ise montaj hattı denir. Bu hatlarda malzeme, işgücüne dayalı olarak işlenir ve transfer edilir. Düzenli iş akışı sağlanmış bir montaj hattında işgücünden en yüksek verim elde edilebilir. Bunun yanısıra montaj için kullanılan ürünlerin belirli standartların üzerinde olması gerekir.

20.yy.'ın ilk çeyreğinde montaj hatları ilk kez Ford firmasında kullanılmaya başlanmıştır. Bunun beraberinde getirdiği en önemli iyileştirmeler, üretimin süresinin kısaltılıp mâliyetinin düşürülmesi, hatta taşınan malzemenin etkinleştirilmesi ve birbirinin yerine kullanılabilen parçaların üretilmesi olarak sayılabilir. Gelişen

teknolojiler sayesinde, günümüzde montaj hatları motor, ev aletleri, beyaz eşya gibi birçok parçanın birleştirilmesi ile oluşturulan büyük birimlerin üretimlerinde kullanılmaktadır. Ürün, tüm istasyonları ziyaret ederek hat boyunca ilerler, parçaların sırayla takılmasından sonra montajı tamamlanmış olarak hattı terk eder. Şekil 2.7’de örnek bir montaj hattı şeması verilmiştir.



Şekil 2.7 : Montaj hattı örneği.

Montaj hatları Bölüm 3’te ayrıntılı bir şekilde ele alınacaktır.

## 2.3 Çağdaş Üretim Sistemleri

### 2.3.1 Hücresel üretim sistemi (grup teknolojisi)

Hücresel üretim sisteminde, üretim alanı, belirlenmiş parça gruplarına yönelik oluşturulmuş makina gruplarına ya da hücrelerine ayrılmıştır. Bu hücreler, genel olarak bir ya da iki makinadan oluşur. Süreçlerin işlevsel olarak düzenlenmesi sayesinde iş akışı basitleştirilmiştir. Hücresel üretim ile kazanılacak yararlar; hazırlık sürelerinin azaltılması, malzeme taşımalarının azaltılması, nitelikli işgücüne duyulan gereksinimin azalması gibidir.

### **2.3.2 Bilgisayarla bütünleşik üretim sistemleri**

İmalat hatlarında sayısal kontrollü tezgâhların (CNC tezgahları) kullanılmasıyla, tüm üretim işlevlerinin bilgisayar ile bütünleştirilmesi olanaklı olmuştur. Bugün, ürün tasarımı, geliştirilmesi, üretim plânlama ve kontrol işlevi gibi üretimin pek çok aşamasında bilgisayar destekli sistemler geliştirilmiş ve bilgisayarla bütünleşik üretim sistemleri kurulmuştur. Kullanılan modüllerin başlıcaları; CAD, CAM, CAE, ERP vb. olarak sayılabilir (Tanyaş ve Baskak, 2006).

### **2.3.3 Tam zamanında üretim sistemi**

Tam zamanında üretimde (TZÜ) amaçlanan, israfı sürekli olarak azaltarak süreçleri ve yordamları (prosedürleri) en iyi hâline getirmektir. Üretimi gerçekleştirilen ürüne müşteri açısından hiç bir değer katmayan her adım ise israf olarak kabul edilir. Bu doğrultuda, malzeme taşıma, süreç içi stoklar, gecikmeler, aşırı evrak işleri israf olarak sayılır (Everett ve Ronald, 1992). TZÜ’de kullanılan bâzı teknikler; hazırlık sürelerinin azaltılması, kanban, hücreli üretim, hat durdurma ve grup teknolojisi olarak sayılabilir. TZÜ; tedarikçiler, nakliye, kalite, iletişim ve çizelgelemeyi de dikkate alır (Bedworth ve Bailey, 1987).

TZÜ’nün önemli bir parçası olan çekme sistemine göre, her iş istasyonu, gereksinim duyduğu malzemeyi bir önceki istasyondan çeker. Son istasyonun siparişten haberdar olması ile üretim süreci başlar. Malzeme gereksinim bilgisi son istasyondan ilk istasyona doğru ilerlerken, malzemeler ilk istasyondan son istasyona doğru ilerler. Bilgi akışı için kanbanlar kullanılır (Everett ve Ronald, 1992).





### **3. MONTAJ VE MONTAJ HATTI DENGELEME**

#### **3.1 Montaj**

Malzemelerin bir hat boyunca işgücü yardımıyla ya da otomatik olarak transfer edilmeleri ve parça üzerindeki işlemlerin de bir hat boyunca sıralı iş istasyonlarında yapılması, montaj hatlarını tanımlamaktadır. Bir üretim montaj hattı, serî durumda bulunan iş istasyonlarından oluşur. Bu istasyonlar, bir ya da daha fazla makinadan ya da daha fazla sayıda işçiden oluşur. Montaj hatları, günümüz endüstrisinde önemli bir yer tutan kitle üretim yöntemlerinden birisidir. Üretim hızının yükseltilmesi, sağlıklı bir tasarım yapılması ve işletmenin ekonomik açıdan önüne çıkan sorunlarına çözüm getirmesi açısından yararlı olduğundan dolayı, montaj hattı dengeleme konusu, günümüz endüstrisinde büyük önem taşımaktadır.

Montaj hatlarını dengeleme konusunu ilk kez 1954'te Benjamin Bryton, tezinde ele almıştır. Bryton iş istasyonlarının sayısının sabit olduğu varsayımıyla, iş parçalarının bu birimler arasında gidip gelmeleriyle, denge gecikmelerini en az düzeye indirmeyi ve iş istasyonlarının süreleri arasındaki farkı en aza indirmeyi amaçlamıştır. Aynı amacı daha sonra 1964'te Moddie ve Young, bir bilgisayar çalışmasında gerçekleştirmeye çalışmıştır.

Montaj hatları ilk kez 20. yy. başlarında Ford motor fabrikalarında kullanılmıştır. Tek tek büyük birimlerin, örneğin motor, motorlu taşıt araçları, beyaz eşya, ev âletleri gibi ürünlerin büyük miktarlarda üretimi için montaj hatları tasarlanır. Bir montaj hattı kurulurken genellikle ekonomik yapıyı sağlayan düşünceler ön plânda tutulmalıdır. Böyle bir aşamada incelenmesi gereken birçok etmen vardır. Bunların içinde kullanım düzeyleri konusu farklı bir önem taşır. Örneğin mekanik tesislerin ağırlıkta olduğu bir sistem söz konusu ise; akış hattı, sistem veya süreç tipi yerleşim düzeni arasında bir karar vermek gerekir (Uzmen, 1990).

Bir veya birden fazla ürünün montajı için tasarım yapılırken, üretim hattındaki iş istasyonlarına ilişkin toplam operasyon sürelerinin dengelenmesi problemi ortaya çıkar. Buradaki hedef, kurulan montaj hattındaki iş istasyonlarının boş bekleme

sürelerini en aza indirerek verimliliği yükseltmek için; üretim süreci içerisindeki her bir montaj elemanına, montaj hattında çok az boş süre bırakılacak veya hiç bekleme süresi bırakılmayacak şekilde iş yükünün istasyonlara dağıtılması, yani varolan kısıtlar dahilinde iş istasyonları arasındaki toplam işlem süreleri farkının enküçülenmesidir. Problemin bu kısmında, sürekli üretim yapan sistemlerin yerleşim şekillerinin tasarımında hat dengeleme problemi ortaya çıkar. Gerçek yaşamda hat dengeleme problemleri, çeşitli kapasiteye sahip üretim alanlarında ve üretim hızlarında çalışıldığında, hatta oluşabilecek ve iş istasyonlarının verimlilik düzeyini etkileyebilecek en önemli etkenlerden biri olan atıl durumdaki kaynakların en alt düzeyde tutulması için en uygun çözümün bulunmasıdır.

Ürün oluşumu sırasında yapılması gereken işlerin, montaj istasyonlarına , kayıp zamanları en aza indirecek şekilde atanması olayına; bir başka tanımla iş öğelerinin, iş duraklarına özgülmesine, “montaj hattı dengeleme” veya daha basit olarak “hat dengeleme” adı verilir. (Baskak, 1991)

Montaj hatlarında, üretimin düzgün bir şekilde yapılabilmesi idealini bozan birtakım problemler ortaya çıkmaktadır. Konuyla ilgili Endüstri Mühendisliği ve Yöneylem Araştırması literatüründe karşılaşılan yüzlerce araştırmanın ortak amacı, bu tür problemlerin ortadan kaldırılmasına yönelik yöntemlerin oluşturulma çabasıdır.

Montaj hatlarının tasarımındaki ana amaçlardan biri, her iş istasyonuna eşit yükte iş dağıtımını yapabilmektir. Montaj hattında yer alan iş istasyonlarının her birinin doluluk düzeyi, operatörlerin verimliliğini enbüyükleyecek şekilde olmalıdır; yâni, istasyonlara en uygun miktarda iş yükü verilmesi gerekmektedir. Bu amaçla hat dengeleme yapılmaktadır. Dengenin sağlanamadığı bir durumda bâzı istasyonlarda diğerlerinden daha fazla iş yükü olacağı için, verimlilikte düşüşlerin olması ve birtakım kayıpların ortaya çıkması kaçınılmazdır.

Montaj hatlarında kullanılacak işgücünün mâliyeti, özel amaçlı tezgâhlarda çalışacak işgücünün mâliyetinden daha düşük olacaktır. Bu işgücünün eğitim gereksinimi de fazla olmayacağından, gerek işe alma ve gerek işte yer değiştirme konusunda fazlaca bir sorun ile karşılaşmaz (Acar ve diğ., 1986).

Montaj hattı dengelemedeki amaçlar birbirlerine ters düştüğü için, hepsini bir arada en uygun duruma getirmek, çoğu zaman olanaklı olmayabilir. Hat dengelemede temel hedef, bu çelişkilerin gözönünde bulundurularak en uygun çözüme

ulaşılmasıdır. Bu hedefleri düşünürken, montaj mâliyetinin de en küçük düzeye getirilmesi unutulmamalıdır. Montaj hattı dengelemeyi etkileyen temel etmenlerden ve kısıtlardan bâzıları şunlardır:

- Mühendislik spesifikasyonları
- Montaj yapım aşamasında izlenen rota
- Kullanılan makinaların veya aletlerin teknolojik özellikleri, montaj hattı dengelemede yerleşim açısından önemlidir. Bâzı aletlerin montaj hattında birden çok istasyonda kullanılması gerekebilir. Bu durumda bu makinalar veya aletler birbirine yakın duracak şekilde, iş istasyonları sıralanır ve yerleştirilir.

### 3.2 Montaj Hattı Dengeleme Problemi

Montaj hattı genelde taşıma bandı ya da mekanik malzeme taşıma takımı boyunca sıralanmış iş istasyonlarından oluşur. Montajı yapılacak üründe yapılacak tüm işin parçalara ayrılması gerekir. Herhangi bir iş parçasının yapılması için belirli bir süreye, ekipmana veya makinaya ve o işi yapacak düzeyde yeteneği bulunan işçiye gereksinim vardır.

Herhangi bir montaj hattı dengeleme problemi, yapılacak işlerin, öncelik ilişkileri de dikkate alınarak hat üzerindeki iş istasyonlarına atanması olarak tanımlanabilir. Sabit bir çevrim süresi belirlendiğinde, iş istasyonlarında yapılacak işlerin toplam süreleri bu çevrim süresini geçmemek koşuluyla işler istasyonlara atanırsa, bu montaj hattı dengeleme çözümü uygulanabilir.

Montaj hattı dengeleme sırasında alınan kararların uzun vâdeli etkileri olabileceğinden, problemin çözümünde hedeflenen amaçlar, şirketin stratejik hedeflerini koruyacak şekilde seçilmelidir. Ekonomik açıdan bakıldığında kar ve zarar ile ilintili amaçlar dikkate alınmalıdır. Ancak, bir işletmedeki montaj hattını aylarca ya da yıllarca işletmenin kâr ve zararını ölçebilmek çok zor ve karmaşıktır. Bunun için hattın en yüksek derecede yararlanmayı amaçlamak, ekonomik açıdan en geçerli hedeftir. Hat verimliliği ile ölçülen bu amaç şöyle formüle edilebilir:

$$E = t_{top}/m.c \quad (m=\text{istasyon sayısı, } c=\text{çevrim süresi, } t_{top} = \text{iş sürelerinin toplamı})$$

Montaj hattı dengelemesiyle gerçekleştirilmek istenen amaçlar şunlardır:

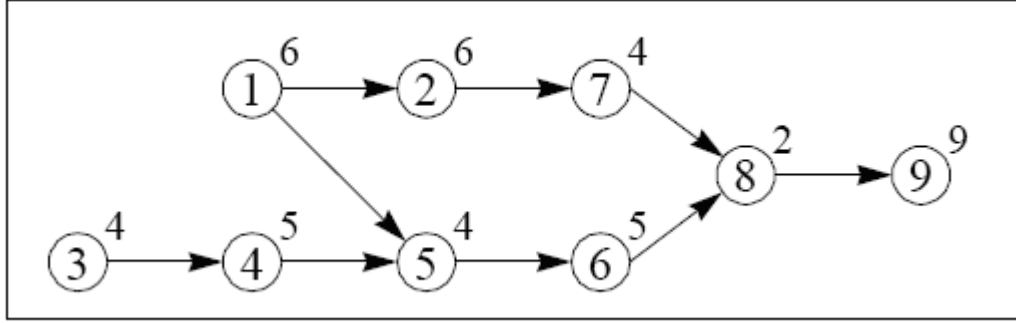
- Kullanılan malzemenin düzenli bir biçimde akışını sağlamak

- Makinaları en verimli biçimde kullanmak
- Çalışanların verimliliğini olabildiğince yüksek bir değere getirmek
- İşlemlerin en kısa sürede yapılmasını sağlamak
- İşlemler için en az miktarda malzeme kullanmak
- Çevrim süresine uygun olarak oluşturulacak istasyonların sayısını enküçükleme
- Âtıl sürelerin olabildiğince küçük miktarlarda olmasını sağlamak
- Hat dengeleme mâliyetini en az düzeyde tutmak
- Denge kayıplarını, iş istasyonları arasında olabildiğince düzgün şekilde dağıtmak  
(Kesintürk ve diğ., 2006)

### 3.3 Montaj Hattı Dengeleme Probleminde Genel Tanımlar

Tüm montaj hattı dengeleme problemlerinde karşımıza çıkan ve adı sık sık duyulan bazı tanımlar vardır. Bunların içinde akış süresi, çevrim süresi, öncelik diyagramı, toplam iş yükü ve verimlilik ölçüsü gibi sayısal ifâdeler veren kavramların yanısıra iş ögesi, iş istasyonu, denge kaybı, teknolojik öncelik diyagramı gibi kavramlar da bulunmaktadır. Montaj hattında akış süresi, bir ürün montajının başlangıcından tamamlanmasına kadar geçen süreye denir. Çevrim süresi, montaj hattındaki tüm iş istasyonları içinde harcanan en yüksek süreye denir. Diğer bir ifâdeyle ise bir istasyonda yapılması gereken işlemlerin tamamlanabilmesi için ürünün o istasyonda kalabileceği en uzun süredir. Toplam iş yükü, montaj hattında bir ürünün montajının tamamlanabilmesi için yapılması gereken işlerin toplam süresidir. Öncelik diyagramı, montaj hattında yapılacak işleri öncüllük ve ardıllık ilişkileri içinde tanımlayan diyagrama denir. Hangi işin hangi işten sonra veya önce yapılacağını ya da bir işin yapılabilmesi için hangi işin veya işlerin yapılması gerektiğini belirten diyagramdır. Kısacası işlerin hangi sıra ile yapılacağını belirten diyagramdır. Şekil 3.1’de çemberlerin içinde yapılacak işin numarası ve çemberlerin sağ üst köşesinde o işin yapılması için gereken işlem süresi yer almaktadır. Okların sağ tarafında kalan işler ardıl işlerdir. Yâni Şekil 3.1’e göre 2 numaralı iş 7 numaralı işten önce yapılmalı ve 6 numaralı iş 5 numaralı işten sonra yapılmalıdır. Montaj hattı dengelemesi yapıldıktan sonra ise hattın ne kadar verimli çalıştığını, yâni hattın ne kadar dengede olduğunu ölçmek için verimlilik ölçümü yapılır. Toplam iş yükünün

iş istasyonu sayısı ile çevrim süresinin çarpımına oranı sonucunda verimlilik değeri bulunur. Buradaki amaç, iş istasyonları arasında beklemlerin ve istasyonlardaki boş zamanların ne ölçüde olduğunu bulmaktır. İş istasyonlarındaki beklemler ve boş zamanlar ne kadar az ise hat o kadar dengededir demektir.



Şekil 3.1 : Öncelik diyagramı.

### 3.4 Montaj Hattı Dengelemedeki Kısıtlar

Montaj hattı dengeleme problemlerindeki kısıtları, ana kısıtlar ve yan kısıtlar olmak üzere ikiye ayırabiliriz. Ana kısıtları, çevrim süresi kısıtı ve öncelik ilişkisi kısıtı oluşturur. Yan kısıtları ise konum kısıtı, sabit makina ve donanım kısıtı, istasyon yükü kısıtı ve aynı istasyona atanması istenen veya istenmeyen işler kısıtları oluşturur.

#### 3.4.1 Ana kısıtlar

Montaj hattı dengelemesi yapılırken karşılaşılabilecek ana kısıtlar, çevrim süresi ve öncelik ilişkisi kısıtlarıdır.

##### 3.4.1.1 Çevrim süresi kısıtı

Belirlenmiş net üretim hedefi, toplam çalışma süresi ve tolerans zamanı yâni öngörülemeyen ve kontrol edilemeyen nedenlerden kaynaklanan kayıp süreler ve önceden belirtilmiş bekleme süreleri, çevrim süresi kısıtını belirler. Bir iş istasyonuna atanan tüm işlerin toplam süresinin, çevrim süresini aşmaması kısıtıdır.

##### 3.4.1.2 Öncelik ilişkisi kısıtı

Montajdaki operasyonların sırasını belirten ilişkiye öncelik ilişkisi denir. Bir işin başlaması için ondan önce gelen işin veya işlerin bitirilmesi gerekliliği kısıtına “öncelik ilişkisi” kısıtı denir.

### **3.4.2 Yan kısıtlar**

Montaj hattı dengeleme problemlerinde karşılaşılabilecek yan kısıtlar konum kısıtı, sabit makina ve donanım kısıtı, iş istasyonu yükü ve iş atama kısıtlarıdır.

#### **3.4.2.1 Konum kısıtı**

Konum kısıtlarıyla genelde, büyük boyutlardaki ürünlerin montajlarında karşılaşılr. İşçilerin banttaki konumlarıyla, montajı yapılan ürünün konumu arasındaki ilişkiyi ifade eder. Ön-arka konum kısıtı ve üst-alt konum kısıtı olmak üzere ikiye ayrılır.

Bantın iki tarafından birinde iş yapılması gerektiğinde ön-arka konum kısıtı ortaya çıkar. Hattın karşısına geçmenin zor olduğu durumlarda iş, iki işçi tarafından aynı anda yapılır. Montaj hattını dengelemede işlerin hattın ön veya arka tarafında yapılması gerekliliği kısıtı ortaya çıkar.

Alt-üst konum kısıtı ise yapılacak işin, iş parçasının altında veya üstünde yapılması gerektiği durumlarda ortaya çıkar. Hattın bir bölümünde, iş parçasının ters döndürülmesi veya işçinin başının üstüne yükseltilmesi gerekebilir. Her istasyonda ürünü ters çevirecek veya operatörün başının üstüne yükseltecek takımın-aparatın bulunması olanaklı olmayacağından dolayı, bu tür işlerin belirli istasyonlarda ardarda sıralanması gerekliliğinden doğan üst-alt konum kısıtı ortaya çıkacaktır.

#### **3.4.2.2 Sabit makina ve donanım kısıtı**

Makina ve test araçları gibi bazı donanımların yerleri değiştirilemez. Böyle durumlarda bu makina ve donanımların olduğu istasyonlardaki işlerin kesinlikle yapılması gerekir. Dolayısıyla iş öğelerinin yerlerinin değiştirilmesi bu kısıt yüzünden zorlaşır.

#### **3.4.2.3 İstasyon yükü**

Montaj hattının başındaki istasyonlarda meydana gelebilecek aksamalar, hattın geri kalanındaki tüm istasyonları etkilediğinden dolayı, bu istasyonlardaki aksamaların önüne geçilmeye çalışılır. Bunun için bu istasyonlardaki çevrim süresi, hattın çevrim süresinden az tutulur ve böylece aradaki süre farkından dolayı ortaya çıkabilecek aksamalar için tolerans süresi oluşur. Hattın başındaki istasyonlara, hat çevrim süresinden daha az süre vermek ve işleri ona göre atamak için istasyon yükü kısıtı belirlenir.

### 3.4.2.4 Aynı istasyona atanması veya atanmaması istenen işler kısıtı

Özel bir takım-aparatla yapılması gereken birden fazla işin aynı istasyona atanması istenebilir. Böylece başka bir istasyonda aynı özel takım-aparatın kullanılmasına gerek kalmayacaktır. Bu tür durumlarda, bu iş parçaları tek bir iş parçası gibi düşünülerek aynı istasyona atanabilir.

Yüksek derecede fiziksel güç gereken iş parçalarının, iş yükünün istasyonlar arasında ergonomik açıdan dengelenmesi için farklı iş istasyonlarına atanması gerekir. Bu tür durumlarda aynı istasyona atanmaması istenen işler kısıtı ortaya çıkar.

### 3.5 Montaj Hattı Dengeleme Probleminin Sınıflandırılması

Literatüre baktığımızda montaj hatları çok değişik şekillerde incelenmiştir. Montaj hatlarını farklı kategorilerde sınıflandırmak olanaklıdır. Değişik tipteki montaj hatlarının kullanılmasının önemli amaçlarından birisi, üretilecek ürüne olan kitle talebini karşılamaktır. Çizelge 3.1’de montaj hatlarının farklı kategorilere göre sınıflandırılması bulunmaktadır.

Çizelge 3.1 : Montaj hattı çeşitleri.

HAT ÇEŞİTLERİ			
<b>Model Sayısına Göre</b>	Tek Modelli	Karışık Modelli	Çok Modelli
<b>Hat Kontrol Yapısına Göre</b>	Gecikmeli	Gecikmesiz	
<b>Kurulum Sıklığına Göre</b>	İlk Zaman Kurulumlu	Yeniden Kurulumlu	
<b>Otomasyon Seviyesine Göre</b>	Manüel Hat	Otomatik Hat	
<b>Yerleşim Şekline göre</b>	I Tipi	U Tipi	

#### 3.5.1 Model sayısına göre montaj hatları

Model sayısına göre montaj hattı dengeleme problemleri; tek modelli montaj hattı, karışık modelli montaj hattı ve çok modelli montaj hattı olmak üzere üçe ayrılır.

##### 3.5.1.1 Tek modelli montaj hattı

Tek tip ürünün üretildiği hatlardır. İlerlemiş teknoloji sayesinde artık montaj hatlarındaki kurulum süreleri otomatik sistemler sayesinde önemsenmeyecek

derecede kısa olmaktadır. Eğer bir montaj hattında birden fazla sayıda ürün üretiliyorsa ve işlem sürelerinde de kurulum süreleri önemszenmeyecek ölçüde değişim yaratıyorsa, bu tür hatlar da tek modelli hatlar gibi varsayılabılır.

### **3.5.1.2 Karışık modelli montaj hattı**

Eğer bir montaj hattında birden fazla benzer tipteki ürün modeli karışık olarak üretiliyorsa, bu tür montaj hatları karışık modelli montaj hatlarıdır. Karışık modelli üretimin en önemli yararı, müşteri isteğini karşılamak üzere değişik modellerin sürekli olarak üretilmesi ve büyük bitmiş ürün stoklarını gerektirmemesidir. Ancak farklı modeller aynı anda üretildiği için bu tür hatlarda modellerin farklı işlem sürelerinden dolayı doğan dezavantajlı yönler azımsanamayacak kadar çoktur. Karışık modelli hatlarda gözlenen temel olumsuzluk, modellerin değişikliğinden kaynaklanan farklı iş parçalarının eşit olmayan operasyon sürelerinin oluşması, boş bekleyen istasyon sürelerine ve yarı bitmiş ürün stoklarına neden olmasıdır. Bu tip montaj hatlarında oldukça karmaşık tasarım ve işlem sorunları sözkonusudur.

### **3.5.1.3 Çok modelli montaj hattı**

Değişik model veya ürünlerin üretildiği hatlardır. Üretim ayrı ayrı partiler hâlinde ve değişik zamanlarda yapılır. Belirli bir zamanda bir model parti hâlinde üretilir ve arkadan diğer modellerin üretimine geçilir. Modeller hiç bir zaman birbirlerine karıştırılmazlar.

## **3.5.2 Hat kontrol yapısına göre montaj hatları**

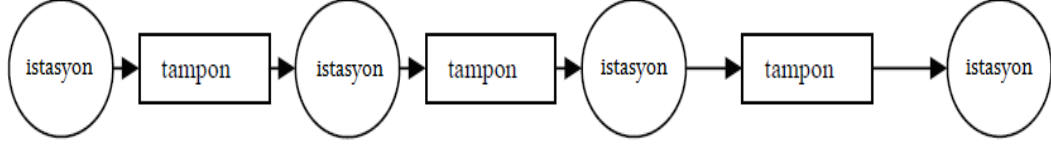
Hat kontrol yapısına göre montaj hatlarını gecikmeli ve gecikmesiz montaj hatları olmak üzere iki türe ayırabiliriz.

### **3.5.2.1 Gecikmeli montaj hatları**

Gecikmeli montaj hatlarında gerek görüldüğü takdirde iş istasyonlarındaki sürelerin çevrim süresini aşmasına olanak tanınmaktadır. Bu tür hatlarda çevrim süresinden fazla süreye sahip olan iş istasyonlarının önlerinde ara stoklar oluşmaktadır. Şekil 3.2, gecikmeli hattı göstermektedir. Bu ara stoklara “tampon stok” da denilmektedir. Tampon stoklarındaki kapasite sınırından dolayı, eğer tampon doluysa istasyon tıkanır. Bu durumda tampon stoğunda yer açılana kadar istasyon boş durumda bekler. Başka bir olumsuz durum ise tampon stoğunda işlenecek malzemenin



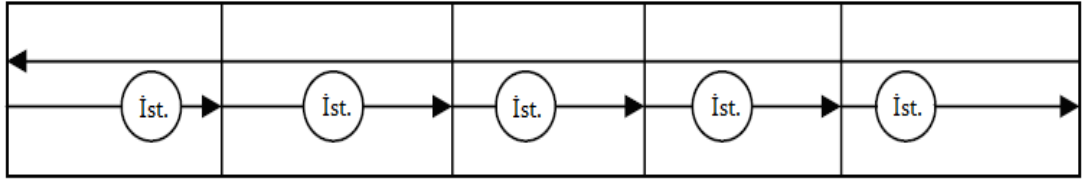
bulunmamasıdır. Tampona işlenecek malzeme gelene kadar istasyon boş bir şekilde bekler. Bu duruma “istasyon açlığı” da denilmektedir. Literatürde, gecikmeli montaj hatlarıyla ilgili birçok yayında ideal tampon stok miktarı bulunmaya çalışılmıştır.



Şekil 3.2 : Gecikmeli montaj hattı.

### 3.5.2.2 Gecikmesiz montaj hatları

Gecikmesiz montaj hatlarında her bir istasyona eşit süre verilmektedir. Bu süre çevrim süresi kadardır. Bu çevrim süresi sonunda bir istasyondan bir sonrakine geçildiği varsayılır. Şekil 3.3’de gecikmesiz montaj hattı görülmektedir. Şekilden de anlaşıldığı gibi gecikmeli hatlarda karşılaşılan istasyonlar arası tampon stok bölgeleri bulunmamaktadır.



Şekil 3.3 : Gecikmesiz montaj hattı örneği.

Gecikmesiz montaj hatlarında bir çevrim süresi belirlenerek, tüm istasyonların bu çevrim süresi kısıtına uyacak şekilde hat dengelenmesi yapılır. İstasyonlar arasındaki malzeme akışını konveyörler ya da hareketli bantlar sağlar. İşlem görece iş parçaları, bir istasyondan diğer istasyona kesik kesik ya da sabit hızla aktarılır. Her iki şekilde de iş istasyonlarına eşit miktarda süre verilir. İstasyonda bant üzerinde hareket eden iş parçasıyla birlikte operatör de eşit hızla hareket eder, gerekli işlemleri sırasıyla yapar, işi bitince yeniden istasyonun başlangıç noktasına geri döner.

Gerçek yaşamda karşılaştığımız problemlerde, insan etkisinden dolayı işlem süreleri genellikle stokastik yapıda olur. Bu nedenle dengenin doğru bir şekilde sağlanabilmesi amacıyla gecikmeli montaj hatlarını tasarlamak daha mantıklı olmaktadır. Böylece insan etmeninden kaynaklanan işlem süresi değişiklikleri tolere edilebilir. Hareketli bantlarda iş parçalarının aktarımındaki gecikmenin önüne geçilmesi her zaman olanaklı olmadığından dolayı, işlerin zamanında

tamamlanamama olasılığı da dikkate alınması gereken bir konudur. Bu konu üzerinde de literatürde pek çok çalışma yapılmıştır (Becker ve Scholl 2006).

### **3.5.3 Kurulum sıklığına göre montaj hatları**

Montaj hattı dengeleme problemleri, kurulum sıklığına göre iki kola ayrılır. Bunlar, ilk kez kurulumlu montaj hatları ve yeniden kurulumlu montaj hatlarıdır.

#### **3.5.3.1 İlk kez dengelemeli montaj hatları**

Bir montaj hattının kurulacağı ilk zamanda üretim sistemine ilişkin veriler ve mâliyetler tam olarak belirlenemediği için montajı yapılacak ürüne göre hattın kurulumu problemi ortaya çıkmaktadır. Bu durumda yapılacak ilk iş, üretilecek ürüne ait bir iş akış diyagramı çıkarmak ve buna göre öncelik ilişkileri diyagramını belirlemektir. Daha sonra değişik üretim seçenekleri belirlenir ve değerlendirilir. Kullanılacak değişik makinaların ve farklı işgücüne sahip işçilerin farklı görevlere ve istasyonlara atanmasından sonra mâliyet hesaplanır, mâliyeti enküçükleyecek montaj hattı kurulumu yapılır.

#### **3.5.3.2 Yeniden dengelemeli montaj hatları**

Gerçek yaşamda montaj hattı problemi, değişen müşteri talepleri ve/veya alınan ekipman ve makinalardan dolayı montaj hattının yeniden kurulmasına ve dengelenmesine gereksinim duyar. Yeniden dengeleme gereksinimi; yeni makina, yeni işgücü, yeni ürün ve yeni yöntem olmak üzere dört temel etmenden ötürü ortaya çıkmaktadır. Yeniden dengeleme yapılırken, montaj hattı zaten kurulmuş hâlde olduğu için amaç, istasyon sayısını enküçüklemeden çok, varolan iş istasyonlarıyla çevrim süresini enküçükleyerek birim zamandaki üretim miktarını arttırmak ve mâliyeti azaltmaktır. Çevrim süresini enküçüklerken iş yükünü istasyonlara olabildiğince eşit dağıtmak önemlidir. Makinaların istasyonlara doğru bir şekilde yerleştirilmesi de bir diğer önemli konudur. Çünkü özellikle ağır sanayide, bir makinanın bir istasyona yerleştirildikten sonra yeniden yerinin değiştirilmesi zor olduğu kadar, mâliyet de yaratan bir durumdur. Ayrıca yeni bir makina alınması düşünülürken makinanın alım mâliyeti ve getireceği katma değer bir bütün olarak değerlendirilmeli ve bu etmenler gözönünde bulundurularak hattın dengelemesine karar verilmelidir. Bu etmenleri dikkate alan çalışmalar son yıllarda yoğunlaşmış durumdadır.

### **3.5.4 Otomasyon düzeyine göre montaj hatları**

Montaj hatları, otomasyon düzeyine göre manuel ve otomatik olmak üzere iki şekilde incelenebilir.

#### **3.5.4.1 Manuel montaj hatları**

Manuel (insanlı) montaj sistemleri iki çeşittir. Bunlar ‘Tek İstasyonlu’ ve ‘Çok İstasyonlu’ olarak adlandırılır.

Tek İstasyonlu montaj sistemlerinde çoğunlukla karışık yapılı ancak kısıtlı adetlerle ürünler üretilir. Boyutları büyük olan ürünlerin üretilmesinde bu sistem kullanılır. Bu sâyede ürün, üretim süreci boyunca taşınmaz. Uçakların ve deniz taşıtlarının üretimi bu tür montajlara örnek olarak gösterilebilir.

Çok istasyonlu montaj sistemlerinde ise yapılacak işlemler, birden fazla istasyonda gerçekleştirilmesi için alt işlemlere bölünür. Çok istasyonlu manuel montaj hatlarında, her istasyonda ilgili işlerin belirli bir kısmı tamamlanır ve kalan işin gerçekleştirilmesi için yarı ürün bir sonraki istasyona aktarılır. İstasyonlarda çalışan işçiler, aynı işi sürekli yaptığından dolayı, belirli bir süre sonra yaptığı işte uzmanlaşır ve de işi daha kaliteli ve hızlı gerçekleştirebilirler.

Günümüzde, gelişen teknolojinin etkisiyle manuel montaj hatlarından, yavaş yavaş, robotların kullanıldığı otomatik montaj hatlarına geçilse de hâlâ pek çok işletmede manuel montaj hattı tipi kullanılmaktadır. İstasyonlara dağıtılan iş yükü, bir veya birden çok işçi tarafından yapılır. Manuel hatlar, özellikle otomatik montaj hatlarında zarar görebilecek hassas veya kırılabilir parça üreten işletmeler tarafından yeğlenmektedir. Ayrıca işgücü mâliyetlerinin, otomatik montaj hatlarında kullanılan makinaların mâliyetlerine kıyasla daha düşük olduğu durumlarda manuel hatlar yeğlenmektedir.

Manuel hatlarda montaj hattı dengeleme çalışmaları yapılırken dikkat edilmesi gereken en önemli konu, montajda çalışan işçilerin işgücü performanslarındaki değişimleri dikkate alan stokastik yapıdaki işlem süreleridir. İşçilerin motivasyonu, iş çevresindeki çalışma koşulları, fiziksel ya da zihinsel olarak stres içinde olmaları, performanslarını önemli ölçüde etkiler ve aynı işi yapma süreleri değişkenlik gösterir, sabit bir işlem süresi olmaz. Özellikle manuel hatlarda işçiler sık yinelenen

işlerle karşılaşma durumundadırlar. Bu durum, çalışanlarda tekdüzelik etkisine yol açmakta ve önemli bir zayıflık yaratmaktadır.

Çalışanın iş deneyimi, manuel hatlarda işgücünü etkileyen bir diğer etmendir. Montaj hattında çalışan işçiler, zamanla deneyim kazanırlar ve bu da yaptıkları işe daha hızlı çalışma olarak yansır. Bunun sonucunda işlem sürelerinde kısalma gözlenir. Hat dengeleme yapılırken, işçilerin deneyim edinme etkisini de dikkate alan süreler üzerinden çalışma yapılmalıdır.

Hattın yerleşim şeklinin, manuel montaj hatlarını dengeleme çalışmalarında önemli bir yeri vardır. Çünkü istasyonlar arasında yardımlaşmaya izin veren U tipi hatlarda, işçilerin diğer görevleri de yerine getirebilecek nitelikli işçiler olması ve istasyonların olabildiğince birbirine yakın olması istenmekte, bu da problemi daha karmaşık duruma getirmektedir. U tipi montaj hattı yerleşiminin bir diğer üstün yanı ise, talepte oluşabilecek bir değişikliğe uyum sağlamak için hatta çalışması gereken işçi sayısının arttırılıp azaltılması konusunda sağladığı esnekliktir. Bu esnekliğin sağlanabilmesi durumuna, Japoncada “Shojinka” denmektedir. Bu esneklik, U şeklinde bir iş istasyonunda çalışan işçilere yeni işçiler eklemek veya çıkarmak sûretiyle kolayca gerçekleştirilebilir. Çalışmanın ilerleyen bölümlerinde Shojinka kavramı daha ayrıntılı bir şekilde anlatılacaktır.

Manuel hatlarda kaçınılması gereken yerleşim şekilleri de vardır. Bunlar şu şekilde sınıflandırılabilir:

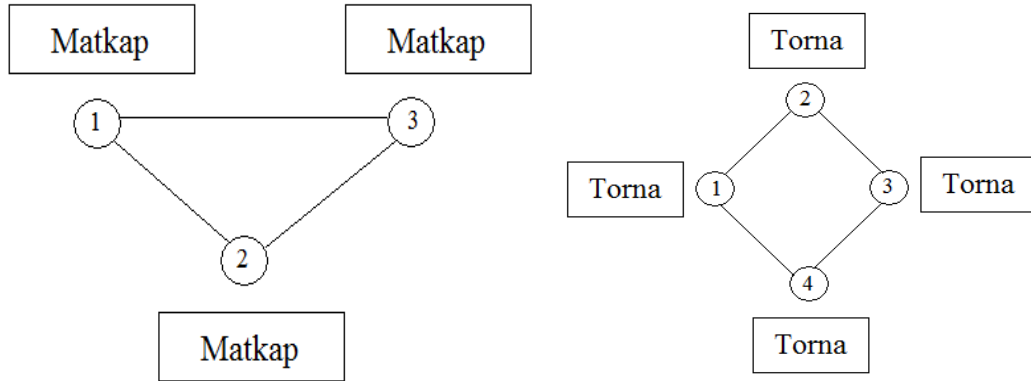
- Kuş kafesi yerleşimi
- Ayrılmış ada yerleşimi
- Düz yerleşim

Kuş kafesi yerleşimi, bir işçinin tek tip makinaya atandığı en basit yerleşim tipidir. Şekil 3.4, bir işçinin kuş kafesi yerleşimindeki iş rotasını göstermektedir.

Kuş kafesi yerleşiminde çalışanda monotonluk etkisi oluşur. Bu etki sonucunda ise performansta azalmalar gözlenir.

Ayrılmış ada yerleşiminde ise makina yerleşimi, parçanın işlem göreceği sıraya göre yapılır. Bu tip yerleşimler, çok çeşitli üretim tiplerine ve talepte ortaya çıkan değişimlere uygun değildir. Düz yerleşim tipi ise, makinaların düz bir sırada yerleştirildiği şekildir. Bu yerleşim tipinde ise işçinin yürüme mesafesi artmaktadır.

Bunun sonucunda ortaya çıkan zaman kayıpları, yalın üretim felsefeli sistemlerde istenmeyen bir durumdur.



Şekil 3.4 : Kuş kafesi yerleşimi (Atasagun, 2010).

#### 3.5.4.2 Otomatik montaj hatları

Bu tip montaj hatlarında, istasyonlardaki işler ve istasyonlar arasındaki aktarımlar otomatik olarak gerçekleşmektedir. Mekanik ve mekanik olmayan şeklinde olmak üzere iki tip istasyonlar arası aktarım vardır. Mekanik aktarımlı hatlarda iş parçaları, istasyonlarda ve istasyonlar arasında hareketli konveyörler ve buna benzer hareketli sistemler yardımıyla transfer edilir. Mekanik olmayan hatlarda ise iş parçaları, istasyonlarda ve istasyonlar arasında insan gücüyle transfer edilir.

Otomasyon hatları ilk olarak, çalışma ortamının tehlikeli olduğu, çalışan üzerinde ciddi sağlık sorunlarına yol açan montaj hatlarında kullanılmıştır. Önceleri otomotiv sektöründe kullanılan otomatik montaj hatları, daha sonra birçok ürünün montajı için tasarlanmıştır. Özellikle insangücüyle montajı zor olan ürünler için ve işgücü mâliyetinin yüksek olduğu durumlar için montaj hattı kurulumlarında otomasyon hatları ve robotlar kullanılmaktadır. Manuel hatlarda işgücü performansındaki değişikliklerden dolayı oluşan stokastik yapıdaki işlem süreleri, otomatik hatlarda işlem sürelerindeki değişikliklerin çok az olması nedeniyle daha deterministik yapıdadır. Bu nedenle manuel hatlarda oluşan gecikme ve boşta bekleme süreleri, otomatik hatlarda daha az görülmektedir.

#### 3.5.5 Yerleşim şekline göre montaj hatları

İşletmedeki donanım ve iş istasyonlarının yerleşim biçimi, hat tipindeki üretimleri etkileyen önemli bir etmendir. Hattın bulunduğu yer ve üretilecek ürünün özellikleri,

hattın alacağı şekli belirler. Yerleşim şekline göre montaj hatları, tarihte ilk önce düz (I tipi) montaj hatları olarak tasarlanmıştır. Daha sonra yalın üretim ve tam zamanında üretim felsefelerinin ortaya çıkmasıyla U tipi montaj hatları geliştirilmiştir.

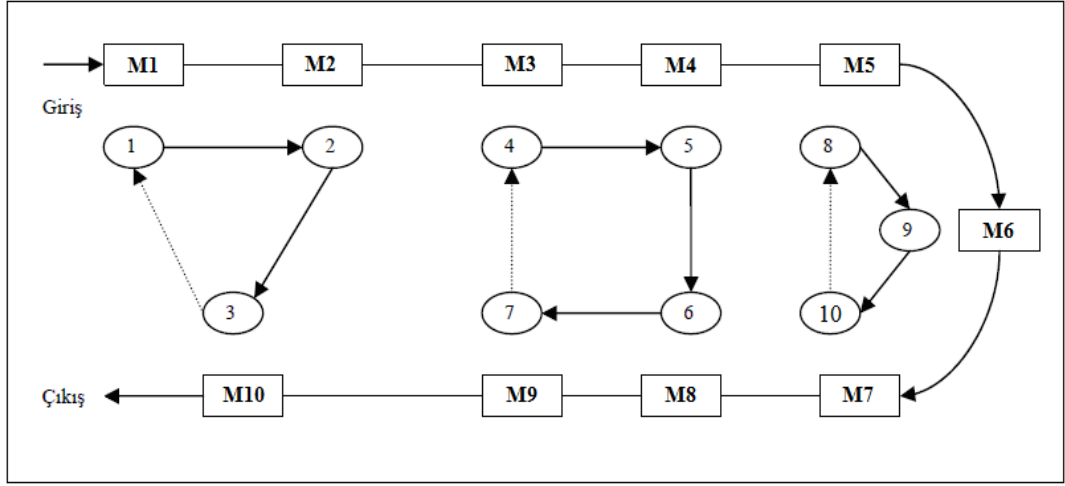
### **3.5.5.1 Düz (I-tipi) montaj hatları**

I tipi montaj hatları, bir doğru boyunca birbiri ardına sıralanmış iş istasyonlarından oluşan montaj hatlarıdır. Üretim sistemlerinde montaj hatları ilk olarak düz montaj hatları olarak ortaya çıkmıştır. Montajı yapılacak ürün ilk istasyondan girer ve son istasyondan montajı bitmiş bir şekilde çıkar. Düz hatların birtakım üstün yanları olduğu gibi sakıncaları da vardır. İş akışının daha hızlı olması ve kolay olması, düz montaj hatlarının üstün yanları arasında gösterilebilir. Çok yer kaplaması ve işçilerin birbirleriyle olan iletişim olanağının az olması ise sakıncaları arasında gösterilebilir.

### **3.5.5.2 U tipi montaj hatları**

Geleneksel hatlardan farklı olarak U tipi montaj hatlarında yerleşim U şeklindedir. **Şekil 3.5**'de örnek U tipi montaj hattı gösterilmektedir. İşçiler numaralarla gösterilmiştir. Son yıllarda yalın üretim ve tam zamanında üretim (Just In Time) felsefesinin ortaya çıkmasının bir sonucu olarak pek çok yeni montaj hattı modeli ileri sürülmüştür. Bu bağlamda, U tipi montaj hattı yerleşimi, ilk olarak Toyota fabrikalarında tam zamanında üretim kavramının uygulanması için gerekli duruma gelmiştir. Firma, farklı özelliklere sahip aynı türden çeşitli otomobiller üretmektedir ve her bir araba için talep, sürekli dalgalanma göstermektedir. Bu nedenle, tesiste bulunan her bir atölyedeki iş yükü sürekli olarak değişkenlik göstermektedir. Talepte oluşan değişimlere uyum sağlamak için atölyedeki işçi sayısı esnekliğinin sağlanması, U tipi yerleşim ile olanaklı olmuştur. Bu yerleşimde, her bir işçinin sorumlu olduğu iş sırası kolaylıkla genişletilip daraltılabilmektedir.

Talep değişikliklerine uyum sağlamak için bir iş istasyonundaki çalışan işçi sayısında esneklik kazanmaya “Shojinka” denilmektedir. Toyota Üretim Sisteminde Shojinka, talep değiştiğinde bir iş istasyonundaki işçi sayısını da buna uygun olarak değiştirmek anlamına gelir. Shojinka'nın en önemli özelliği, işçi sayısını, talepteki değişikliğe bağlı olarak değiştirmektir.

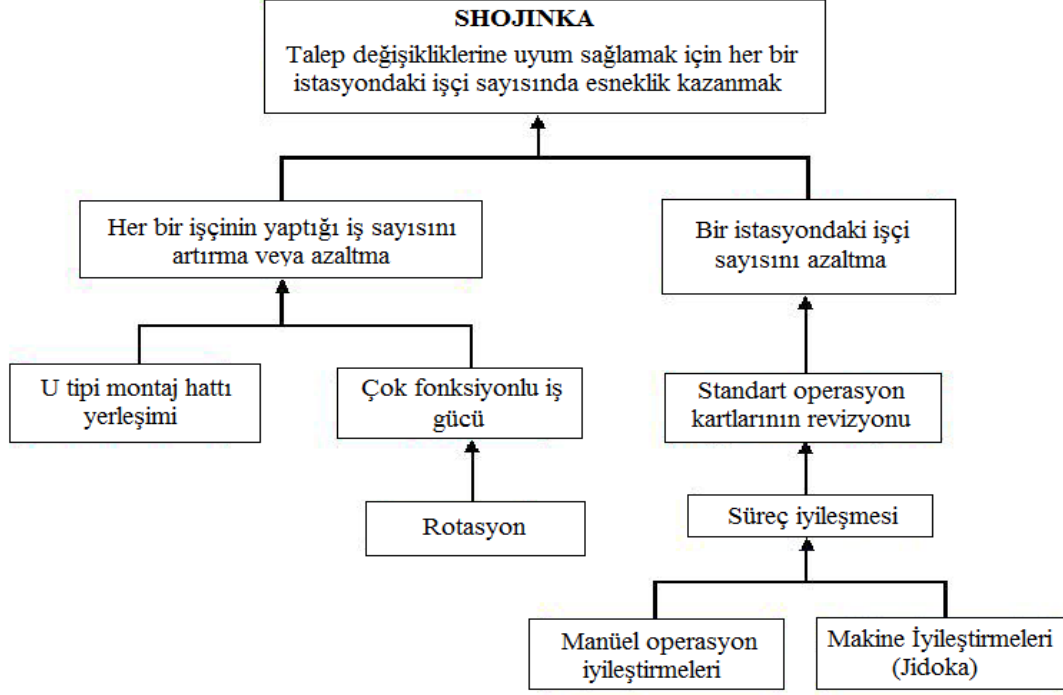


**Şekil 3.5 :** U tipi montaj hattı-3 işçi ve 10 makinalı (Günay ve diğ., 2004).

Örneğin; bir ürünün üretildiği hatta 10 kişi çalışıyorsa, bu hattın kapasitesi %80'e düşmesi gerektiği zaman hatta çalışan işçi sayısı ( $10 \cdot 0,80 = 8$ )'e düşürülmeli, hattın kapasitesi %20 artması gerektiği zaman ise işçi sayısı ( $10 \cdot \%20 = 2$ ) artarak 12'ye yükseltilmelidir.

Shojinka için en uygun montaj hattı yerleşimi U tipi montaj hatlarıdır. Bu yerleşim şekliyle her bir işçinin sorumlu olacağı iş sayısı çok kolay bir şekilde artırılıp azaltılabilir. Ancak, bu şekilde bir yerleşim, çok fonksiyonlu işçiler bulundurmaya gerektirir. Bununla birlikte standart operasyon kartlarında yapılacak yeniden gözden geçirmeler ve geliştirmeler sayesinde, talep değişikliği olduğunda, ilgili istasyonda en uygun işçi sayısı ile çalışma olanağı sağlanacaktır. Şekil 3.6'da Shojinka kavramını gösteren U-tipi Şekil 3.7'de ise Shojinka kavramındaki süreçler gösterilmiştir.

U-tipi montaj hatlarının Shojinka kavramına uygun olmasının nedeni, bu tip hatların yerleşim şekillerinden ortaya çıkan durumdan kaynaklanmaktadır. İşçilerin birbirine yakın olması ve kolayca haberleşebilmesi sayesinde bütün işçiler hatta yapılan işler hakkında bilgi sahibi olabilmekte ve herhangi bir aksaklıkta birbirlerinin yerini alabilmektedirler. Bunun sonucu olarak hattaki işçi sayısı talebe göre değiştirilse bile hattaki işlerde aksama yaşanmamaktadır. Bugün birçok fabrika, günümüzdeki rekabet koşullarında ayakta kalabilmek için maliyetleri azaltma yönünde iyileştirmeler yaparken, Shojinka gibi kavramların öneminin gün geçtikçe artmasına sebep olmaktadır.



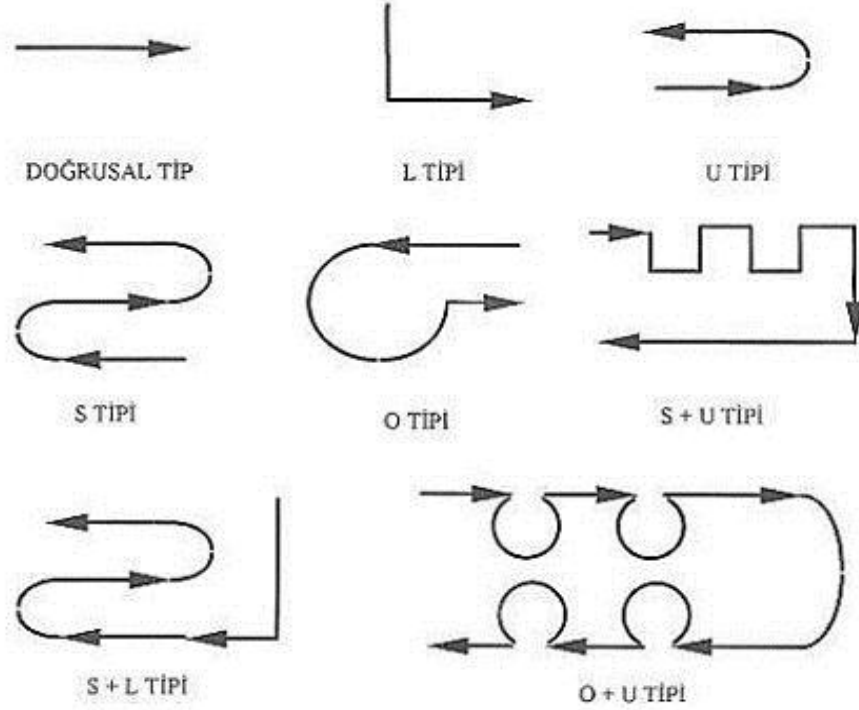
**Şekil 3.6 :** Shojinka ve alt dalları.

Düz montaj hatlarıyla kıyaslandığında, U tipi montaj hatlarının çok önemli üstünlükleri sözkonusudur. Bunları maddeler hâlinde şu şekilde özetleyebiliriz:

1. U tipi montaj hatlarında işçiler, hattın hem ön tarafında hem de arka tarafında iş yapabilirler. Bu durumun sonucunda işçiler, farklı işleri yapabilen çok fonksiyonlu işçilik niteliği kazanırlar.
2. U tipi montaj hatları, talepte oluşan değişimlerde, düz montaj hatlarına göre daha esnek yapıdadır. Talepte artma veya azalma olduğu zaman, çalışan sayısı da kolaylıkla arttırılabilir ya da azaltılabilir.
3. U tipi montaj hatlarında, hattın geometrik yapısından dolayı, işçiler arasındaki iletişim, düz montaj hatlarına göre daha yüksek düzeydedir. Herhangi bir aksaklıkta, işçiler arası yardımlaşma daha kolay bir duruma gelmektedir.
4. U tipi montaj hatları, istasyon sayısını azaltmaya yönelik montaj hattı dengeleme problemlerinde daha elverişlidir. Bir ürünün montajı için gereken istasyon sayısı, aynı ürünün düz hatlarda montajı için gereken istasyon sayısına eşittir veya daha küçüktür.



Montaj hatları, yatay ve dikey olarak yerleştirilebildikleri gibi düz, dairesel, oval, yılankavi, zikzak, rassal veya değişik açılı olarak da tasarlanabilirler (Maynard, 1969). Şekil 3.7’de bazı montaj hatlarının yerleşim şekilleri gösterilmektedir.



Şekil 3.7 : Montaj hattı tasarımları (Aksoy, 1997).

Bâzı durumlarda doğrusal hatlar, üretim hatlarının yerleşiminde yeğlenir. Bunun nedenleri aşağıdaki gibidir:

1. Kolayca yerleşim yapılabilir.
2. Basit ve sistematik bir yapıya sahiptir.
3. Konveyör sistemlerinin uygulanabilirliğinin artmasını sağlar ve bu sâyede mâliyetlerinin düşmesi sağlanır.
4. Köşelerde oluşabilecek transfer zorlukları ortadan kalkar.

Bâzı özel durumlar, değişik şekillerde montaj hatlarının kullanımını gerekli kılar. Bunun nedenleri aşağıdaki gibidir:

1. Uzun bir hat kullanımı gerekli ise ve varolan alana düz bir hat olarak konulduğunda sığmıyorsa veya düz bir hat olarak yerleştirildiğinde kalan alan gereğinden büyük ve kullanıma elverişsiz bir hâl alıyorsa, bu durumda dairesel ya da U tipi hatlar yeğlenir.

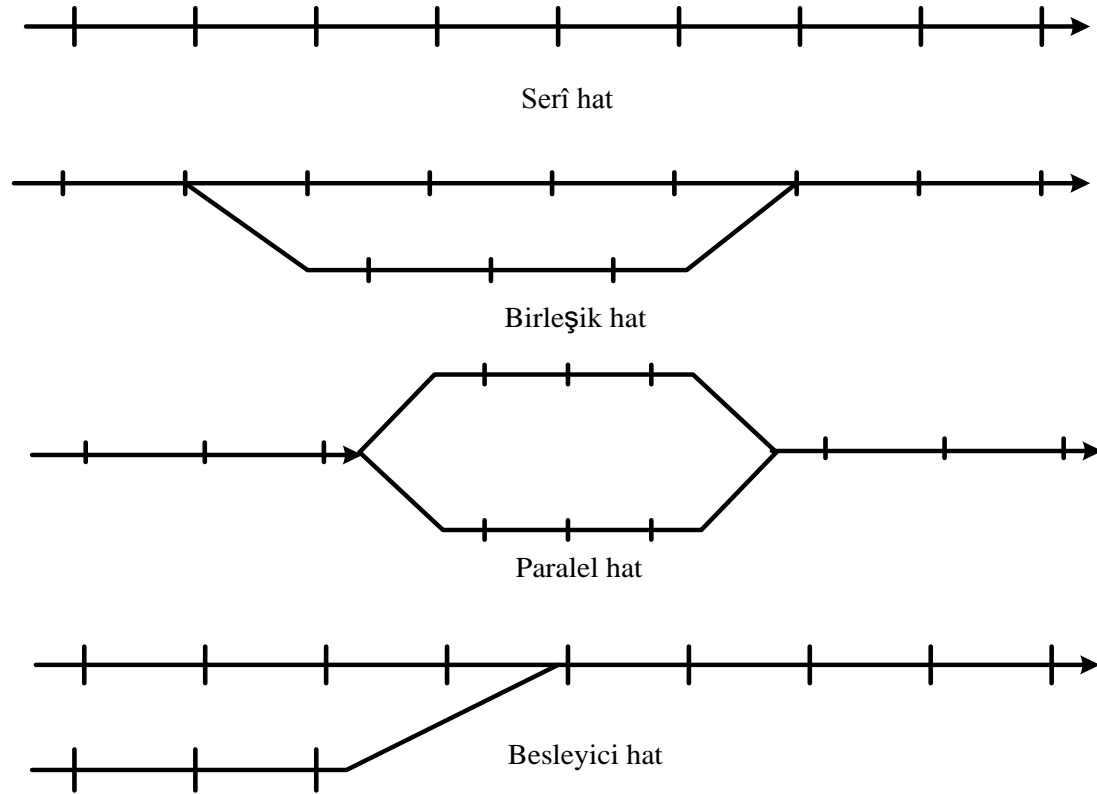
2. Bir operatörü aynı hat üzerinde birden fazla işlem için görevlendirmek istenirse, yılankavi veya U şeklinde hat kullanılır.

3. Mâliyeti yüksek bir makinaya birbirinden ayrık iki operasyon yaptırılması gerekiyorsa, U şeklindeki hatlar yeğlenir.

4. Varolan alan, şekil ve kapasite olarak uygun değilse ve çok bitişik düzenlemeler gerekiyorsa düz hat dışında kalan uygun bir hat yeğlenir.

5. Hava, elektrik gibi tesisat bağlantıları, aynı kaynaktan çıkıp birden fazla istasyona bağlanmalıysa, U tipi montaj hatları kullanılır.

Üretilecek ürünün özelliklerine göre serî, bileşik, paralel ve besleyici montaj hattı tipleri olmak üzere dört tip işlevsel montaj hattı sınıflandırması yapılabilir (Şekil 3.8).



Şekil 3.8 : İşlevsel montaj hatları.

### 3.6 Hattın İşleyişine göre Montaj Hatları

Karmaşık üretim hatları, hattın işleyiş özelliklerine göre; mekanik olmayan hatlar ve hareketli bant hatları olmak üzere iki ana sınıfta gruplandırılır.

Mekanik olmayan hatlarda malzeme transferi için gerekli bant veya konveyörler kullanılmaz. Bu üretim hatlarında yapılan transferler için genellikle insan gücü söz konusudur. Bu tür hatların uygulanmasındaki en büyük amaç, istasyonlar arası güvenlik stoklarının oluşturulması, istasyonların boş kalma ve bloke edilmesi olasılığının azaltılması ve bekleme sürelerinin en aza indirilmesidir. Hat boyunca malzeme ve ürün aktarımlarının, hareketli bant veya konveyörlerle gerçekleştirildiği hareketli bant hatları, kendi aralarında iki gruba ayrılırlar:

### **3.6.1 Banttan alınabilir birimler**

Bu tip hatlarda, istasyonlara verilen tolerans süreleri çok önemlidir. İş parçasının hattın alınması için gerekli süre, tolerans süresi olarak adlandırılır.

### **3.6.2 Bant üzerinde sabit birimler**

Bu tip hatlarda, iş akışı düzenlidir ve çevrim süresinde değişkenlik gözlenir. Hattın özelliğinden dolayı işçiler, montaj yapabilmek için yukarı ya da aşağı uzanmak veya parçalar ile birlikte hat üzerinde ilerlemek zorunda kalırlar. Bu hatlarda iş parçalarının istasyonlar arasında akışını sağlamak amacıyla, görsel, işitsel sinyallerden yararlanılır.



## 4. BULANIK MANTIK VE BULANIK HEDEF PROGRAMLAMA

Bu bölümde, çalışmada kullanılan bulanık mantık ve bulanık mantığın doğrusal programlama hâline nasıl dönüştürüldüğü üzerine bilgiler verilecektir. Bulanık hedef programlama modellerinde kullanılan yaklaşımlara da ayrıntılı olarak yer verilecektir.

### 4.1 Bulanık Mantık

İlk kez 1965 yılında Azerbaycanlı bir bilim adamı olan Prof. Lotfi A. Zadeh tarafından “Fuzzy Logic” olarak ortaya atılmıştır. Türkçede ise “bulanık mantık” ifâdesiyle yer almıştır.

1965 yılında Lotfi A. Zadeh’in bu konuyla ilgili bir makalesinin yayımlanmasından sonra belirsizlik içinde yer alan sistemlerin incelenmesi yeni bir boyut kazanmıştır. Bulanık mantık için, matematiğin gerçek dünyaya uygulanması denilebilir. Çünkü gerçek dünyada her an değişen durumlarda değişik sonuçlar çıkabilir. Bu matematiksel temel, bulanık mantık kümeler kuramı ve buna dayanan bulanık mantıktır. Bulanık mantığın genel özellikleri, Zadeh tarafından şu şekilde ifâde edilmiştir (Elmas, 2007):

- Bulanık mantıkta, kesin değerlere dayanan düşünme yerine, yaklaşık düşünme mantığı kullanılır.
- Bulanık mantıkta her şey  $[0,1]$  aralığında belirli bir derece ile gösterilir.
- Bulanık mantıkta bilgi büyük, küçük, çok az gibi dilsel ifâdeler şeklindedir.
- Bulanık çıkarım işlemi dilsel ifâdeler arasında tanımlanan kurallar ile yapılır.
- Her mantıksal sistem, bulanık olarak ifâde edilebilir.
- Bulanık mantık matematiksel modeli, çok zor elde edilen karmaşık sistemler için çok uygundur.

## 4.2 Bulanık Sistemlerin Gelişimi

Geçmişten bugüne özellikle A.B.D., Japonya ve Almanya'da yaklaşık olarak 1.000'den fazla ticarî ve endüstriyel bulanık sistem çalışması yapılmıştır. Günümüzde de ticarî ve endüstriyel uygulamalarda bulanık mantığın kullanımı önemli ölçüde artmıştır. Bulanık mantık kavramının ilk uygulaması 1974 yılında Mamdani tarafından yapılmıştır. Mamdani ve arkadaşları tarafından bulanık mantığın, denetim sistemlerine ilk kez uygulanmasından sonra (Mamdani ve diğ., 1974), bu alanda çok önemli yol alınmaya başlanmıştır. Hattâ denetim sistemleri bulanık mantığın en fazla uygulandığı alan olarak günümüzde önem arz etmektedir. Mamdani, bir buhar makinasının bulanık denetimini gerçekleştirmiştir. 1980 yılında ise bir Hollanda şirketi, bulanık mantık denetimini çimento fırınlarında kullanmıştır. 1983 yılında su arıtma alanları için kimyasal püskürtme aleti üzerinde Fuji elektrik şirketi, bulanık mantık denetleyici sistemini kurmuştur. İkinci IFSA kongresinde (1987) ilk bulanık mantık denetleyicileri sergilenmiştir. Burada 1984 yılından itibaren Omron şirketinin 700'den fazla yapmış olduğu bulanık mantık sistemi gösterilmiştir.

Bulanık mantık uygulamasının ilk ürünleri 1990 yılında tüketicilere arz edilmiştir. Bu ürünler arasında bulanık denetimli çamaşır makinası da vardır. Bu makina; çamaşırın cinsine, kirliliğine, miktarına göre ayarlamalar yaparak uygun çamaşır yıkama programlarını seçebilmektedir.

Başka bir örnek vermek gerekirse, otomobillerdeki yakıt püskürtme ve ateşleme sistemlerinde bulanık mantık denetleyicilerini görebiliriz. Ayrıca evlerde sıkça kullanılmakta olan televizyonlarda, elektrik süpürgelerinde ve buzdolaplarında bulanık mantık denetimleri kullanılmaktadır. Bugün pek çok elektrikli aletin üretiminde, örneğin robotik, otomasyon, akıllı denetim, izleme sistemleri, ticarî elektronik ürünler, bilgi depolama ve yeniden çağırma, uzman sistemler ve bilgi tabanlı sistemler gibi sistemlerde, bulanık mantık temeline dayanan sistemler kullanılmaktadır (Altaş, 1999).

Klasik denetim sistemlerindeki tersine, sistemlerin matematiksel modeline gerek duymadan, salt istenilen çıktıyı verecek şekilde girdiye uygulanan işaret ayarlandığından, bulanık denetimin işlemi, uzman birinin o sistemi denetlemesine benzer. Yâni bulanık mantık ve bulanık küme işlemleri kullanılarak makinaların

insanlar gibi kararlar vermesi sağlanabilmektedir. Bulanık mantık, doğrusal ve doğrusal olmayan sistemlerin denetiminde kullanılan seçenek bir yaklaşım olarak ait olduğu yeri almıştır. Gerçek yaşamdaki sistemlerin hemen hiç biri doğrusal değildir. Alışılabilen tasarım yöntemleri doğrusallaştırma yaparken farklı yöntemler kullanılırlar. Örneğin; doğrusal, parçalı doğrusal ve el altı tabloları kullanarak karmaşıklık, mâliyet ve sistem performansını olumsuz yönde etkileyen etmenler giderilmeye çalışılır. Doğrusal yaklaşım teknikleri aslında basittir, ancak denetim sisteminin performansı üzerinde olumsuz etkileri vardır. Parçalı doğrusallaştırma tekniği daha iyi işler, ancak uygulanması daha zordur. Çünkü genellikle birkaç doğrusal denetleyici tasarımı gerektirir (Altaş, 1999).

Gerçek yaşamda ortaya çıkan olaylara daha yakın olduğundan, bulanık mantık, doğrusal olmayan denetimler için bir seçenek olarak ortaya çıkmıştır. Sistemlerin doğrusal olmayan özellikleri; kurallar, üyelik fonksiyonları ve sonuca varma işlemi ile temsil edilmektedir. Bulanık mantık düşüncesinin uygulamaya konulmasıyla sistem performansı artar, işletim basitleşir ve finansal giderler azalır. Gerçek yaşama daha yakın olan, daha doğal bir kural dayanağı kullanılarak, doğrusal olmayan denetim, klasik yöntemlere göre daha iyi biçimde gerçekleştirilebilir. Bu durumda sistem performansı çok iyi bir şekilde iyileştirilip daha etkili ve hassas bir denetim elde edilebilir.

Karmaşık durumlar ve stokastik yapıda olan büyüklükler, bulanık sayılar olarak da adlandırılabilen ve bulanık kümeleri karakterize eden üyelik fonksiyonları ile ifade edilirler. Bulanık sayılar, yine bulanık bir durumda insan düşünce ve karar verme sürecine benzer önerme ve kural güdüm işlemlerine tâbi tutularak yine bulanık bir sonuca varılır. Örneğin insan bir problemle karşılaştığında, bu problemi çözerken kafasındaki bilgi birikimlerini kullanır ve bu bilgiler ışığında sonuca gider. Aynı şekilde, bulanık mantık kurallarına göre işlem yapan bir sistem de, kendisine daha önceden öğretilen bilgileri kullanarak, yeni durum hakkında bir sonuca varır.

Bulanık mantıkla çalışan sistemlerde denetim kurallarının anlatımı çoğunlukla kolay ve basittir. Genelde bulanık mantık denetleyiciler daha az kurala gereksinim duymakta ve daha yüksek düzeyde performans gerçekleştirmektedirler.

Problemin analiz edilmesi ve modellenmesi, kümelerin ve bunlar arasındaki mantıksal ilişkilerin tanımlanması, varolan verilerin bulanık verilere dönüştürülmesi,

bulanık mantığın aşamalarını oluşturmaktadır. İlk olarak varolan problemde bulanık mantık yaklaşımının uygulanıp uygulanamayacağına karar verilir. Eğer uygulama yapılacak sistemde değişkenler bulanık olarak ifade edilebiliyorsa veya matematik açıdan çözümü karmaşık bir yapıyla karşılaşıyorsa bulanık mantık yaklaşımı kullanılabilir.

Bulanık küme mantığı kullanılarak, bulanık modelleme tasarımı gerçekleştirilebilir. Bulanık küme kavramı ya da bulanık mantığın tek başına özel bir sistem için oluşturulan uygulaması, aslında literatürde “Boolean” olarak adlandırılan mantıktan ya da olasılık mantığının uygulamasından çok farklı değildir. Bulanık işlemcilerin daha genel bir adı, “yaklaşık düşünme” olarak verilmektedir. Yaklaşık düşünme, yaklaşık neden olma, yaklaşık sonuçlandırma anlamlarını taşıyan bu tanımlama, bulanık küme kuramını temsil eden bir ifadedir. Ancak bulanık mantık daha çok kabul gören bir addır. Yaklaşık düşünme kavramı, bulanık mantık ve bulanık küme kuramı ile desteklendiğinde bulanık düşünme kavramını ortaya çıkarır. Yaklaşık düşünme, genellikle günlük yaşamda kullandığımız bazı sözlerle uygulanır. Örneğin biraz fazla, azıcık soğuk, oldukça yaşlı vb. tanımlamalar yaparken kullanılan biraz, azıcık, oldukça gibi terimler, birer yaklaşık ya da bulanık düşünceyi tanımlamaktadırlar. Fazla, soğuk ve yaşlı sözleri ise birer bulanık ifadedir ve bulanık kümelerle temsil edilip, bulanık mantık işlemlerine tâbi tutulabilirler.

Kısacası bulanık mantık kuramı, makinalara insanların öznel verilerini işleyebilme ve onların deneyimleri ve sezgilerinden yararlanarak çalışabilme yeteneği kazandırmaktır.

### **4.3 Bulanık Mantık İlkeleri**

Bulanık mantık uygulanacak sistemde, her bir giriş ve çıkış değişkenleri için üyelik fonksiyonu tanımlanmalıdır. Sistemin davranış biçimine ve sistemi tasarlayanın seçimlerine bağlı olarak, üyelik fonksiyonu sayısı belirlenir. Klasik Boolean mantık tabanlı küme kuramında, belli bir nesne veya değişken, verilen kümenin ya üyesidir (mantık 1) ya da değildir (mantık 0). Yâni bir eleman birden fazla kümenin elemanı olamaz. Bu, bulanık küme kuramına dayanan bir matematiksel disiplindir. Konular doğruluk ya da yanlışlık açısından ele alınır. Bir ifade tümüyle yanlış ise sıfır değerini alır, tümüyle doğru ise 1 değerini alır. Eğer ifadenin bulanık mantık açısından değeri 0,4 ise o ifade %40 doğru, %60 yanlıştır. Yâni bulanık mantık



tabanlı bulanık küme kuramında, belli bir nesne veya değişken, verilen bir kümenin belirli bir üyelik derecesine sahiptir. Bu üyelik derecesi 0 ile 1 aralığında herhangi bir yerde olabilmektedir. Bu özellik, bulanık mantığın kesin olmayan durumlarla ilgilenmesine izin vermektedir.

Genel anlamda karar verme süreçlerinde belirsizlik durumunun ne şekilde öngörüleceği ve hangi yaklaşımla karar süreçlerinin bir parçası hâline getirilebileceği yolunda çalışmalar yapılmıştır ve bu çalışmaların sonunda, bulanık mantık yaklaşım düşüncesi ortaya çıkmıştır. Geleneksel mantıkla bulanık mantık arasındaki farklar özetle açıklanacak olursa (Ural, 2006):

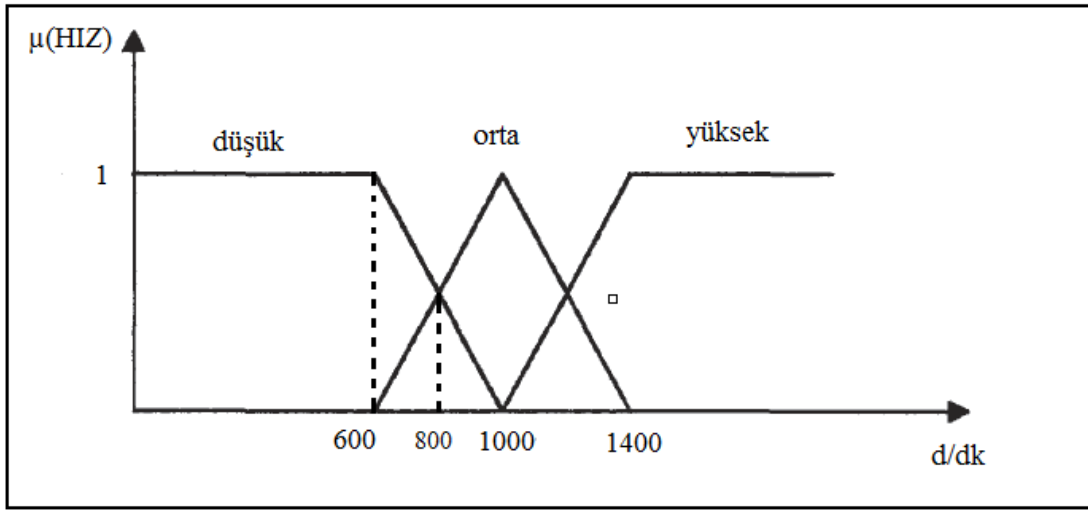
- 1) Bulanık mantıkta kesin doğru ve kesin yanlış gibi kesin ifâdeler yer almaz, geleneksel mantık ise; kesin doğru ve kesin yanlışlara dayanır. Yâni, mutlak doğru ve mutlak yanlış arasındaki geçişlere izin vermez.
- 2) Bulanık mantık, karar verme sürecini kolaylaştıran esnek bir yapıya sahiptir. Bu anlamda insan düşünce sistemiyle örtüşür. Geleneksel mantık ise; katı sınırlara sahip olan bir sistemdir. Karmaşık bir yapıda olan insan düşünce sistemiyle örtüşmez.
- 3) Geleneksel mantık birçok gerçek yaşam problemlerine çözüm getiremeyebilir, ancak bulanık mantık yaşamın her alanında kullanıma uygundur.
- 4) Bulanık mantıkta belirsiz ifâdeler matematiksel değişkenlere dönüştürülebilirken geleneksel mantıkta belirsizliğe yer yoktur.

Klasik mantık ile bulanık mantık arasındaki temel farklılıklar Çizelge 4.1’de gösterilmiştir.

**Çizelge 4.1 :** Klasik mantık-bulanık mantık arasındaki temel farklılıklar.

<b>Klasik Mantık</b>	<b>Bulanık Mantık</b>
A <u>veya</u> A Değil	A <u>ve</u> A Değil
Kesin	Kısmî
Hepsi veya Hiç biri	Belirli Derecelerde
0 veya 1	0 ve 1 Arasında Süreklilik
İkili Birimler	Bulanık Birimler

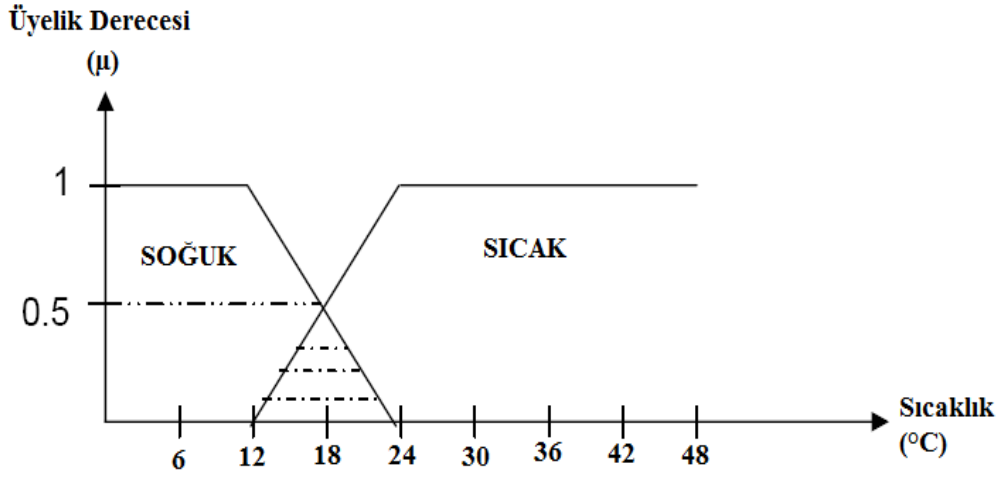
Bir bulanık değişken, günlük yaşamda kullandığımız sözcüklerle ifade edilebilir. Örneğin Şekil 4.1.'de bir makinanın hızı “düşük”, “orta” ya da “yüksek” olarak ifade edilmektedir. Burada her bir bulanık alt küme, üçgen tipi üyelik fonksiyonları ile tanımlanmıştır. Üyelik fonksiyonunun şekli aynı zamanda eğri şeklinde veya yamuk da olabilmektedir. Bu tiplerdeki üyelik fonksiyonları, simetrik veya asimetrik bir yapıya sahip olabilmektedir. Örneğe göre eğer hız 600 d/dk'nın altında ise, bu tümüyle “düşük” kümesine aittir, buna karşılık 800 d/dk için bu %50 ( $\mu=0,5$ ) oranında “düşük” kümeye, %50 ( $\mu=0,5$ ) oranında “orta” kümeye ait olmaktadır.



**Şekil 4.1 :** Üyelik fonksiyonlarıyla tanımlanan hız bulanık kümeleri.

Boolean mantıkta 0'dan 1'e geçiş anı olmasına rağmen, Şekil 4.1'de de görüldüğü gibi bulanık mantıkta böyle bir durum sözkonusu olmamaktadır. Bulanık küme terminolojisinde, bir değişkenin alması olası tüm değerler evrensel küme olarak adlandırılmakta ve bu, üyelik fonksiyonları ile tanımlanan tüm bulanık kümeleri içermektedir.

Şekil 4.2'de ise sıcak ve soğuk havayı belirten ve karar vericinin kuralına bağlı olarak kurulmuş bulanık mantık fonksiyonları gösterilmektedir. 0°C ve 24°C arası “SOĞUK” kümesine üyedirler. Bu kümede 0°C ve 12°C arasındaki sıcaklıkların üyelik dereceleri 1'dir. 12°C ve 24°C arasındaki sıcaklıkların “SOĞUK” kümesine ait üyelik dereceleri ise 1 ile 0 arasında değerler almaktadır. Burada karar verici 6°C'yi çok soğuk, 15°C'yi biraz soğuk ve 20°C'yi az soğuk olarak değerlendirmiştir. “SICAK” kümesinde ise 36°C'yi çok sıcak, 20°C'yi biraz sıcak ve 14°C'yi az sıcak olarak değerlendirilmiştir. 12°C ve 24°C arasındaki sıcaklıklar hem “SOĞUK” hem de “SICAK” kümelerine üyedirler.



Şekil 4.2 : SOĞUK ve SICAK bulanık kümelerinin üyelik fonksiyonları.

#### 4.4 Bulanık Kümelerde Temel Kavramlar

Bulanık kümelerin temel kavramları olarak üyelik fonksiyonları, bulanık kümelerin yüksekliği ve  $\alpha$  kesiti olarak gösterilebilir.

##### 4.4.1 Üyelik fonksiyonu

$X$  bir küme olsun.  $X \neq \emptyset$ ,  $X$ 'de tanımlı bulanık bir  $A$  kümesinin üyelik fonksiyonu  $A : X \rightarrow [0,1]$  şeklinde ifade edilir.  $\forall x \in X$  için  $x$ 'in üyelik fonksiyonu  $A(x)$  ya da  $\mu_A$  olarak gösterilebilir.

$X$  kümesi, sürekli olmayan ya da sınırlı bir küme olursa  $A$  kümesi denklem 4.1 ile ifade edilebilir:

$$A = \left\{ \frac{\mu_A(x_1)}{x_1} + \frac{\mu_A(x_2)}{x_2} + \dots + \frac{\mu_A(x_m)}{x_m} \right\} = \left\{ \sum_{i=x_i} \mu_A(x_i) \right\}, i = (1, 2, \dots, m) \quad (4.1)$$

$X$  kümesi sürekli olan ya da sınırsız bir küme olursa bu kez  $A$  kümesi aşağıdaki gibi gösterilebilir:

$$A = \left\{ \int \frac{\mu_A(x)}{x} \right\} \quad (4.2)$$

##### 4.4.2 Bulanık kümelerin yüksekliği

Bir bulanık kümenin yüksekliği, o kümenin en büyük üyelik derecesine denir.  $X$  kümesinde tanımlı bulanık bir  $A$  kümesinin yüksekliği şu şekilde gösterilebilir:

$$h(A) = \sup_{x \in X} A(x) \quad (4.3)$$

#### 4.4.3 $\alpha$ Kesiti

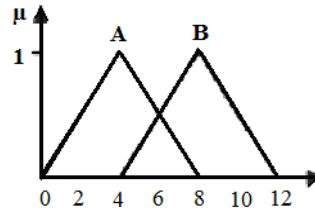
A kümesi X'de tanımlı bulanık bir küme ve  $\alpha \in [0,1]$  olsun.  $\alpha$  kesiti  ${}^\alpha A$  şeklinde ve güçlü  $\alpha$  kesiti  ${}^{\alpha+} A$  şeklinde ifade edilsin.  $\alpha$  kesiti ve güçlü  $\alpha$  kesiti denklem 4.4 ve 4.5'teki gibi ifade edilebilir (Güner, 2005):

$${}^\alpha A = \{x \mid A(x) \geq \alpha\} \quad (4.4)$$

$${}^{\alpha+} A = \{x \mid A(x) > \alpha\} \quad (4.5)$$

#### 4.5 Bulanık Kümelerde Kesişim, Birleşim ve Tümlleme

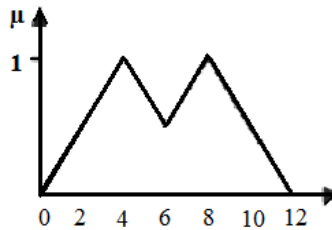
Boolean mantığın temel özellikleri, bulanık küme kuramında da geçerlidir ve Şekil 4.3'deki durum dikkate alınarak bulanık kümelerdeki birleşim, kesişim ve tümlleme anlatılmaktadır:



Şekil 4.3 : A ve B bulanık kümeleri.

##### 4.5.1 Bulanık kümelerde birleşim

X adlı evrensel küme üzerinde tanımlanan A ve B kümeleri verilsin.  $A \cup B$  de aynı zamanda X'in bir bulanık kümesidir ve Şekil 4.4'de gösterilen fonksiyon A ve B bulanık kümelerinin birleşiminden ortaya çıkan bulanık kümenin üyelik derecelerini gösterir.



Şekil 4.4 : A ve B bulanık kümelerinin birleşimi.

$$\mu_{A \cup B}(x) = \text{Max}[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (4.6)$$

Burada  $x$ ,  $X$  evrensel kümesinin herhangi bir elemanıdır.  $A \cup B$  bulanık kümesi şu şekilde de ifade edilebilir:

$$f: [0,1] \times [0,1] \rightarrow [0,1]$$

$A \cup B$  bulanık kümesinin aksiyomları şu şekildedir:

- Aksiyom 1:  $f(0,0) = 0$  ve  $f(1,1) = f(1,0) = f(0,1) = 1$
- Aksiyom 2:  $k = \mu_A(x)$  ve  $t = \mu_B(x)$  ise  $f(k,t) = f(t,k)$  olmalıdır.
- Aksiyom 3:  $k = \mu_A(x)$ ,  $t = \mu_B(x)$ ,  $r = \mu_C(x)$ ,  $u = \mu_D(x)$  ve  $k > r$  ve  $t > u$  ise  $f(k,t) > f(r,u)$  olmalıdır.
- Aksiyom 4:  $x \in X$ ,  $k = \mu_A(x)$ ,  $t = \mu_B(x)$ ,  $r = \mu_C(x)$  ise  $f(f(k, t), u) = f(k, f(t, u))$  olmalıdır.

#### 4.5.2 Bulanık kümelerde kesişim

$X$  evrensel kümesinin bulanık iki  $A$  ve  $B$  kümelerinin kesişimi  $A \cap B$  şeklinde ifade edilir. Üyelik fonksiyonu denklem 4.7'de ifade edilmiştir.

$$\mu_{A \cap B}(x) = \text{Min}[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (4.7)$$

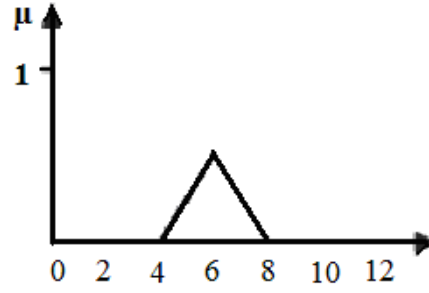
$A \cap B$  bulanık kümesi şu şekilde de ifade edilebilir:

$$f: [0,1] \times [0,1] \rightarrow [0,1]$$

$A \cap B$  bulanık kümesinin aksiyomları şu şekildedir:

- Aksiyom 1:  $f(1,1) = 1$  ve  $f(0,0) = f(1,0) = f(0,1) = 0$  olmalıdır.
- Aksiyom 2:  $k = \mu_A(x)$  ve  $t = \mu_B(x)$  ise  $f(k,t) = f(t,k)$  olmalıdır.
- Aksiyom 3:  $k = \mu_A(x)$ ,  $t = \mu_B(x)$ ,  $r = \mu_C(x)$ ,  $u = \mu_D(x)$  ve  $k > r$  ve  $t > u$  ise  $f(k,t) > f(r,u)$  olmalıdır.
- Aksiyom 4:  $x \in X$ ,  $k = \mu_A(x)$ ,  $t = \mu_B(x)$ ,  $r = \mu_C(x)$  ise  $f(f(k, t), u) = f(k, f(t, u))$  olmalıdır.

Şekil 4.5'de  $A$  ve  $B$  bulanık kümelerinin kesişiminden ortaya çıkan bulanık kümenin üyelik dereceleri gösterilmektedir.



Şekil 4.5 : A ve B bulanık kümelerinin kesişimi.

#### 4.5.3 Bulanık kümelerde tümlenme

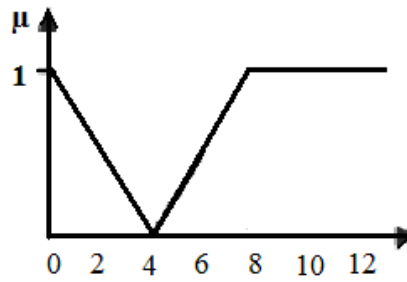
X evrensel kümesinde verilen bir A bulanık kümesinin tümleneni  $A^{-1}$  ile ifade edilir. Aksiyomları şu şekildedir:

- Aksiyom 1:  $f(0) = 1$  ve  $f(1) = 0$  olmalıdır.
- Aksiyom 2: X evrensel bir küme, A bulanık bir küme ve  $(x,y \in X)$ ,  $k = \mu_A(x)$ ,  $t = \mu_A(y)$  ise  $(\forall k, t \in [0,1])$  için  $k > t$  oluyorsa  $f(k) < f(t)$  olmalıdır.

Üyelik fonksiyonu şu şekilde yazılır:

$$\mu_{A^{-1}} = 1 - \mu_A(x) \quad (4.8)$$

Şekil 4.6'da A bulanık kümesini tümlen bulanık kümenin üyelik dereceleri gösterilmektedir.



Şekil 4.6 : A bulanık kümesinin tümleneni.

#### 4.6 Bulanıklık Ve Olasılık

Bulanıklık kavramı ile olasılık kavramlarının her ikisi de belirsizlik ifade ederler; ancak bulanıklığın olasılıktan en önemli farkı, saptanabilir belirsizliği ifade

etmesidir. İçi sıvı dolu bir tencerede bu durumu örnelemek için aşağıdaki ifâdeler uygundur:

- Tencerenin içindeki sıvı %25 oranla sudur.
- Tencerenin içindeki sıvı %50 olasılıkla sudur.

Yukarıdaki ifâdelerden ilki bulanıklığı, ikincisi olasılığı göstermektedir. İlk ifâde de %25 oranla tencerenin içindeki sıvının su olduğu anlatılmaktadır. İkinci ifâdede ise, tencerenin içindeki sıvının tümünün su olabileceği ya da tümünün sudan farklı bir sıvı olabileceği anlatılmaktadır.

Bulanıklık ve rastgelelik arasında da yapısal açıdan farklılıklar vardır. Rastgele sistemlerde alınan değer, herhangi bir şeye bağlı olmadan rastgele belirleniyor iken, bulanık sistemlerde alınan değer, karar vericinin tercihlerine ve deneyimlerine göre ve de bir giriş değişkenine göre belirlenir. Bununla birlikte her iki sistemde de sonuç değerleri  $[0,1]$  kesin olmayan değerlerdir.

#### **4.7 Bulanık Çözümleme**

Alışıl gelmiş mantıkta, kesin ve net olarak verilen önermelerden sonuç çıkarmaya çözümleme denmektedir. Çözümleme, önermelerin birbiri ile tam olarak uyduğu koşullarda yapılabilir. Aşağıdaki önermeler ve bunlardan elde edilen çözümleme, klasik mantığa örnek olarak gösterilebilir:

- Önerme 1: Balıklar suda yaşar.
- Önerme 2: Balina bir tür balıktır.
- Çözümleme: Balina suda yaşar.

Bulanık sistemlerde girdi değişkenleri “az, sıcak, düşük” gibi dilsel ifâdelerden oluştuğundan dolayı, bu girdiler hakkında sonuca varmak “EĞER...O HALDE (IF...THEN)” gibi kuralların kullanılması ile olanaklıdır. Burada anlatılanı şu şekilde açıklayabiliriz:

- Karar vericinin davranış biçimi: “Yolda viraj yoksa arabayı çok hızlı kullanabilirim.”
- Önerme: “Yolda biraz viraj var.”

- Karar vericinin çıkarımı: “ ‘Eğer’ bu yolda biraz viraj varsa, ‘o halde’ arabayı biraz hızlı kullanabilirim.”

Bu örnekte de görüleceği gibi önermenin, karar vericinin davranış biçiminden biraz farklı olması, bulanık çözümlemede “EĞER...O HALDE” kuralının kullanımıyla bir sorun ortaya çıkmamaktadır.

#### 4.8 Bulanık Mantık Denetleyicilerinin Üstün Ve Zayıf Yanları

Bulanık mantık yaklaşımının klasik mantık yaklaşımlarına göre birtakım üstün ve eksik/sakıncalı yanları bulunmaktadır. Klasik mantık denetleyicileri ile bulanık mantık denetleyicileri arasındaki karşılaştırma, Çizelge 4.2’de verilmiştir.

**Çizelge 4.2 :** Klasik ve bulanık mantık denetleyicilerin karşılaştırılması.

<b>Klasik Mantık Denetleyicisi</b>	<b>Bulanık Mantık Denetleyicisi</b>
Kontrol sisteminin matematiksel modeliyle çalışırlar.	Kontrol için karar vericinin deneyimlerine gereksinim duyulur.
Karmaşık sistemlerde klasik mantık denetleyicileri de karmaşık bir yapıya sahip olacağından dolayı, uygulaması ekonomik değildir.	Süreç ölçümlerinde esnek bir yapıya sahiptir. Hızlı ve uygulamaya geçirilmesi ekonomiktir.
Süreçteki değişkenler deterministik yapıda olmalıdır.	Kesin olmayan, stokastik verilerle çalışabilir.

#### 4.9 Bulanık Kümelerde Temel İşlemler

Bulanık kümelerde yer alan bulanık sayılar “yaklaşık 3”, “5’ten küçük ve yaklaşık”, “aşağı yukarı 8” gibi ifâdelere karşılık gelir. Bulanık kümelerin alt kümeleri de bu sayılardan oluşmuştur. Bulanık sayılarla aritmetik işlemler yapılamamaktadır. Matematiksel işlemlerin yapılabilmesi, bu bulanık sayılar için bâzı kısıtlamaların tanımlanması sonucunda olanaklıdır.

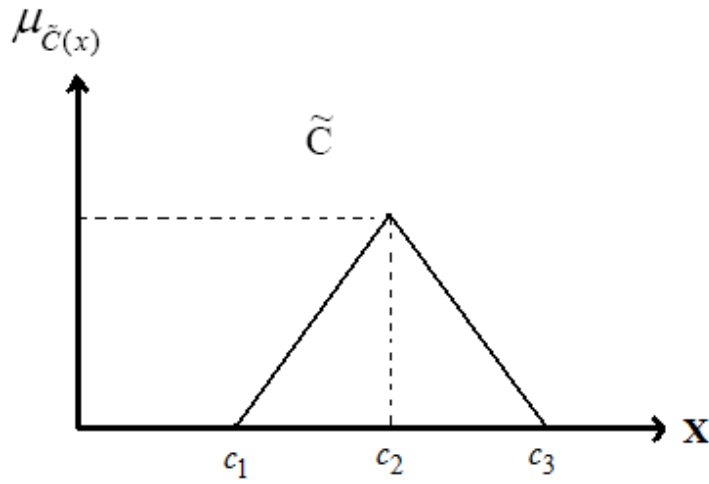
Genellikle pratik uygulamalarda üçgen ve yamuk olmak üzere iki bulanık sayı kullanılır. A’yı üçgensel bulanık bir sayı olarak kabul edersek,  $(a_1, a_2, a_3)$  şeklinde parametrelerle ifâde edilebilir.

A bir üçgensel bulanık sayı ise buna ait üyelik fonksiyonu, denklem 4.9’daki gibi tanımlanabilir.



$$\mu_A = \begin{cases} 0, & x < a_1 \\ \frac{x-a_1}{a_2-a_1}, & a_1 \leq x \leq a_2 \\ \frac{a_3-x}{a_3-a_2}, & a_2 \leq x \leq a_3 \\ 0, & x > a_3 \end{cases} \quad (4.9)$$

Üçgensel bulanık sayıların üyelik fonksiyonu Şekil 4.7’de gösterilmektedir.



Şekil 4.7 : Üçgensel bir bulanık sayının üyelik fonksiyonu.

$\tilde{B}$  ve  $\tilde{C}$  olarak adlandırılan iki üçgensel bulanık sayı olsun. Bu iki üçgensel bulanık sayı ile yapılan bazı aritmetik işlemler (toplama, çıkarma, çarpma ve bölme) aşağıdaki gibi örneklendirilebilir:

$$\tilde{C} = (c_1, c_2, c_3) \quad (4.10)$$

$$\tilde{B} = (b_1, b_2, b_3) \quad (4.11)$$

#### 4.9.1 İşaret değiştirme

Denklem 4.12’de herhangi bulanık bir sayının -1 ile çarpılarak işaret değiştirilmesi gösterilmektedir.

$$-(\tilde{B}) = -(b_1, b_2, b_3) = (-b_3, -b_2, -b_1) \quad (4.12)$$

#### 4.9.2 Toplama

Denklem 4.13 iki bulanık sayının toplanması işlemini ve denklem 4.14 de bulanık bir sayının herhangi bir “t” sabit sayısı ile toplanmasını göstermektedir.

$$\tilde{C}(+) \tilde{B} = (c_1, c_2, c_3) (+) (b_1, b_2, b_3) = (c_1 + b_1, c_2 + b_2, c_3 + b_3) \quad (4.13)$$

$$t + (b_1, b_2, b_3) = (t + b_1, t + b_2, t + b_3) \quad (4.14)$$

#### 4.9.3 Çıkarma

Denklem 4.15 iki bulanık sayının çıkarma işlemini ve denklem 4.16 da herhangi bulanık bir sayı ile k sabit sayısı arasındaki çıkarma işlemini göstermektedir.

$$\tilde{C}(-) \tilde{B} = (c_1, c_2, c_3) (-) (b_1, b_2, b_3) = (c_1 - b_1, c_2 - b_2, c_3 - b_3) \quad (4.15)$$

$$t - (c_1, c_2, c_3) = (t - c_1, t - c_2, t - c_3) \quad (4.16)$$

#### 4.9.4 Bölme

Denklem 4.17 iki bulanık sayının bölme işlemini ve denklem 4.18 de herhangi bulanık bir sayı ile k sabit sayısı arasındaki bölme işlemini göstermektedir.

$$\tilde{C}(\div) \tilde{B} = (c_1, c_2, c_3) (\div) (b_1, b_2, b_3) = (c_1 \div b_1, c_2 \div b_2, c_3 \div b_3) \quad (4.17)$$

$$t \div (b_1, b_2, b_3) = (t \div b_1, t \div b_2, t \div b_3) \quad (4.18)$$

#### 4.9.5 Çarpma

Denklem 4.19 iki bulanık sayının çarpma işlemini ve denklem 4.20 de herhangi bulanık bir sayı ile k sabit sayısı arasındaki çarpma işlemini göstermektedir.

$$\tilde{C}(\times) \tilde{B} = (c_1, c_2, c_3) (\times) (b_1, b_2, b_3) = (c_1 \times b_1, c_2 \times b_2, c_3 \times b_3) \quad (4.19)$$

$$t \times (c_1, c_2, c_3) = (t \times c_1, t \times c_2, t \times c_3) \quad (4.20)$$

#### 4.10 Bulanık Ortamda Karar Verme

Karar, “bir amacın veya çok sayıda amaçların elde edilebilmesi için varolan çok sayıda seçenek arasında bilinçli olarak yapılan bir seçimdir” biçiminde tanımlanmaktadır (Yılmaz, 1995). Diğer bir tanım ise “karar vermek, bilgiyi işleme ve yeğleme sanatıdır” şeklinde ifade edilmektedir (Bağırkan, 1983). Başka bir tanım ise “karar verme, en basit şekliyle çeşitli seçenekler arasında optimum faaliyetlerin seçimidir” şeklinde ifade edilmektedir (Timur, 1990).

Geleneksel karar verme problemi altı bileşenden oluşur. Bu bileşenler, sırasıyla karar verici, amaç, karar ölçütü, seçenekler, olaylar ve sonuç olarak ifade edilebilir. Karar verme sürecindeki temel yapı, çeşitli seçenekleri değerlendirerek seçim yapmak ve problemlerin çözülmesine katkıda bulunmak olduğuna göre ilk öncelik, varılmak istenen amaçların belirlenmesidir. Burada, amaç bileşeni bir enbüyükleme veya enküçükleme işlemi olarak yorumlanabilir. Yarar, kâr, gelir ve mâliyet fonksiyonları ise karar ölçütlerini oluşturur. Evrensel bir küme, seçenekler kümesi olarak kabul edilebilir. Evrensel kümenin hangi elemanlarının karar probleminin çözümü olarak kabul edilip edilemeyeceğini ifade eden kısıtlayıcı koşullar ise olayları belirler. Bu bakış açısından, varolan durumu veya kısıtlayıcı koşulları dikkate alarak, karar vericinin belirlediği amaç veya hedef doğrultusunda ilerleme çabası, karar problemlerinin özünü oluşturur.

Bulanık bir ortamda karar verme problemi de, yukarıda ele alınan bileşenlerle açıklanabilir. Burada, sözkonusu bileşenlerden karar verici ve seçenekler kümesinde (evrensel küme) herhangi bir bulanıklık olmadığı kabul edilmiştir. Karar verici, amaç fonksiyonu için ulaşmak istediği erişim düzeyini bulanık olarak belirleyebilir. Ayrıca, karar ölçütünü gösteren fonksiyonun (kâr, mâliyet vb.) parametre değerleri bulanık sayılarla tanımlanabilir. Birbirini tamamlayan amaç ve karar ölçütü bileşenleri, bulanık bir hedef olarak ele alınabilir.

Geleneksel karar verme problemlerinin ortak noktaları, konu olan sistemde ya da kavramda belirlilik bulunmasıdır. Karar verirken dikkate aldığımız kıstaslar ve değerlendirilecek durum, kesin ifadelerle belirlenir. Bulanık ortamda karar vermek durumunda kalındığında, belirsizlik vardır ve problemin konusu olan sistem ya da kavramda kesinlik yoktur. Bu nedenle karar vermek ve problemi çözmek için bulanık mantık ve bulanık mantığa ait matematiksel işlemlerden yararlanır.

Bulanık ortamda karar vermenin özellikleri şöyledir (Kaymak ve Sousa, 2003):

- Bulanık ortamda karar verebilmek için, seçeneklerin oluşturduğu evrensel kümede bulanıklığın sözkonusu olması gerekli değildir.
- Bulanık ortamda karar verirken, amaca hangi düzeyde ulaşılacak istendiği belirli bir şekilde ifade edilmeyebilir. Örneğin amaç şöyle olabilir: “birim mâliyetlerimiz 5 TL’den az olmalıdır”.
- Karar ölçütündeki parametrelerde bulanıklık sözkonusu olabilir. Örneğin, ölçütlerden biri şöyle olabilir: “birim başına harcanan işgücü miktarı yaklaşık 1 adam/saat olmalıdır”.
- Bulanık bir karar, karar verici tarafından belirlenen hedefler ve kısıtlayıcıların uzlaştırılmasıyla ortaya çıkan bulanık bir kümedir ve bu küme  $D$  veya  $D_{\mu}$  üyelik fonksiyonu ile ifade edilmektedir. Yâni, bulanık karar kümesi kısaca “Karar; hedeflerin ve kısıtların kesişimidir.” şeklinde ifade edilebilir (Ural, 2006).

#### 4.11 Hedef Programlama

Hedef Programlama (HP), çok sayıda hedef veya amacın bulunduğu doğrusal programlama problemlerine uygulanabilen bir tekniktir. Doğrudan amaçları optimize eden doğrusal programlamanın aksine HP, hedef değerler ve gerçekleşmiş sonuçlar arasındaki sapmaları enazlayarak, çatışan amaçları yönetmek amacıyla kullanılır (Leung ve diğ, 2001). Doğrusal programlama problemlerinde amaç fonksiyonu, birim açısından TL, kâr, verimlilik, mâliyet vb. gibi yalnız bir ölçükle ölçülebildiğinden, çok boyutlu bir ölçek kümesi ile ifade edilebilen çok amaçlı bir doğrusal programlama problemini yazmak olanaklı değildir (Halaç, 1992). Bu nedenle, çok amaçlı problemlerin çözümünde Hedef Programlamaya gereksinim duyulmuştur. Hedef programlamanın mantığında temel olarak, doğrusal programlamadan bâzı farklılıklar vardır: Hedef programlama, salt amaçların niteliklerini değil, bunların karşılaştırılmalarını ve hedeflerini de bildirir. Enbüyükleme ya da enküçükleme problemlerinden farklı olarak, belirlenen hedeflerden en az sapmalı çözümü bulmaya yöneliktir.

Hedef Programlamanın ilk çıkışı, 1955 yılında Charnes ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmaya dayanır (Charnes ve diğ, 1955). Gerçek yaşama uygulanabilirliği bakımından çok etkin bir teknik olan hedef programlama, günümüzde üretim

plânlama, işgücü plânlama, akademik kaynak tahsisi, finansal plânlama, bütçeleme, nakliye, performans tahmini gibi birçok alanda en yaygın şekilde kullanılan çok ölçütlü karar verme tekniklerinden biri hâline gelmiştir. Öyle ki Jones ve arkadaşlarının 115 makaleyi inceleyerek yaptıkları çalışmada, kullanılan çok amaçlı karar verme tekniklerinin %7'sini hedef programlamanın oluşturduğu gösterilmiştir (Jones v.d., 2002).

Hedef programlamada hedef değerlerinin belirlenmesi için öncelikle problem doğrusal programlama modeli şeklinde ifade edilir. Bu modelden hareketle, hedef programlama modelinde amaç fonksiyonu, her bir kısıtlayıcı için belirlenen hedeften oluşacak sapmaları enküçüklemeye yönelik oluşturulur. Bir hedef programlama modelini oluşturabilecek beş bileşen şunlardır (Girginer ve Kaygısız, 2009):

#### **4.11.1 Karar değişkenleri**

Hedef programlamada problemin karar değişkenlerini, karar vericinin belirlemek istediği bilinmeyenler oluşturur.

#### **4.11.2 Sistem kısıtları**

Doğrusal programlamadaki kısıtlarla aynı anlamı taşırlar. Bunlar kesin olan ve değişmelerine izin verilmeyen kısıtlardır. Çözümler bu kısıtlar çerçevesinde bulunur. Sistem kısıtları, doğrusal programlamada olduğu gibi formüle edilirler ve öncelikle bu kısıtların gerçekleştirilmesine çalışılır.

#### **4.11.3 Hedef kısıtları**

Ulaşılmak istenen amaç değerlerini gösteren fonksiyonlara denir. Bu kısıtlar, sistem kısıtları kadar kesin ve değişmez değildir. Hedef kısıtlarını gerçekleştirme süreci, sistem kısıtları gerçekleştirildikten sonra başlar. Gerçekleşen başarı ile hedeflenen başarı arasındaki fark “sapma” olarak adlandırılır. Sapmanın değeri sıfıra ne kadar yakınsa hedef de o kadar başarılıdır. Hedefin üzerinde bir başarı sağlanmışsa pozitif sapma; hedefe ulaşılamamışsa negatif sapma ortaya çıkar.

#### **4.11.4 Amaç fonksiyonu**

Belirlenen herhangi bir hedeften oluşabilecek sapmaları enküçükleyen fonksiyona, “amaç fonksiyonu” denir.

**4.11.5 Birleşik amaç (başarı) fonksiyonu:** Tüm amaç fonksiyonlarının belirli bir öncelik ilişkisi ve/veya ağırlığa göre toplam biçiminde yazılmasıyla oluşturulan fonksiyona birleşik amaç fonksiyonu denir. Bu fonksiyonun oluşturulmasındaki ana hedef, çok amaçlı bir modeli, tek amaçlı bir modele dönüştürmektir. Hedeflerden olabilecek istenmeyen sapmaların toplamını enküçükmek, başarı fonksiyonlarının temel amacıdır.

Montaj hattı dengeleme problemlerinde en önemli hedefler, çevrim süresini ve istasyon sayısını enküçükmektir. Bu hedefler birbirleriyle çelişen ve aynı anda başarılması gereken hedeflerdir. Karar verici açısından hedef programlama, birbirleriyle çelişen ve aynı anda başarılması gereken hedefleri gerçekleştirmek için çözüm üreten önemli bir tekniktir. Günümüzde hâlâ hedef programlama, çok ölçütlü ve çok amaçlı karar verme problemlerinde en sık kullanılan tekniklerdendir. Şu şekilde formüle edilebilir (Charnes ve Cooper, 1961):

Hedefler:  $g_k$ , ( $k=1,2,\dots,n$ )

Amaç Fonksiyonu:  $\text{Enk} \sum_{k=1}^n (d_k^+ - d_k^-)$

Kısıtlar:

$$f_k(x) - g_k = d_k^+ - d_k^-, \quad k=1,2,\dots,n, \quad x \in F, \quad (F \text{ olurlu bir küme})$$

$$d_k^+, d_k^- \geq 0;$$

$d_k^+ \cdot d_k^- = 0$  (Bu kısıt, aynı denkleme ait iki sapma değişkeninin ( $d_k^+$  ve  $d_k^-$ ) aynı anda pozitif değer alamayacağını ifade etmektedir)

$f_k(x)$ , hedef  $g_k$ 'dan yüksek çıkıyorsa aradaki fark  $d_k^+$  ile gösterilir.  $f_k(x)$ , hedef  $g_k$ 'dan düşük çıkıyorsa aradaki fark  $d_k^-$  ile gösterilir.  $d_k^+$  pozitif yöndeki sapması ve  $d_k^-$  negatif yöndeki sapması şu şekilde gösterilebilir:

$$d_k^+ = \text{maks}(0, f_k(x) - g_k) \quad (4.21)$$

$$d_k^- = \text{maks}(0, g_k - f_k(x)) \quad (4.22)$$

#### 4.12 Bulanık Hedef Programlama

Bulanık hedef programlama, bulanık küme kuramının, hedef programlama üzerinde uygulanmasıdır. Bulanık hedef programlama modeli, karar vericilere, hedeflerini  $g_k$  hedef değeri civarında,  $g_k$  hedef değerinin biraz aşağısında veya yukarısında gibi tanımlamalarına olanak tanır. Bu kavram, montaj hatlarında hedeflenen ve tam ve kesin olarak tanımlanması zor olan montaj hattı dengeleme amaçlarının yapısına oldukça uygundur.

Bulanık hedef programlama modeli, hedeflerin öncelik yapısına göre iki şekilde ele alınabilir. Bunlardan ilki, tüm hedeflerin eşit tercih önceliğinde yer aldığı bulanık hedef programlama modelidir. Bu model yapısında hedeflerin tercih önceliği eşit olduğu için tüm hedefler eşzamanlı olarak doyurulmaya çalışılır. İkincisi ise, farklı tercih öncelikli bulanık hedef programlama modelidir. Bu tip modelde, karar vericinin hedeflere ilişkin tercih yapısını dikkate alan bir çözümün belirlenmesi amaçlanır. Burada, hedeflere ilişkin hiyerarşik bir yapının karar verici tarafından ortaya konması ve bir anlamda da sözkonusu hedeflerin en önemliden daha az önemliye doğru sıralanması gerekir. Bu çalışmada ilk tip ele alınmıştır yâni tüm hedefler aynı öncelik derecesine sahiptir ya da diğer bir deyişle tüm hedefler eşzamanlı olarak doyurulmaya çalışılmıştır.

Bulanık hedef programlamada  $x$  çözüm kümesi şu şekilde elde edilir:

$g_k$  : k hedefinin istenen değeri

$$f_k(x) \geq g_k \text{ veya } f_k(x) \leq g_k \quad k=1,2,\dots,n \quad x \in F \text{ (F olurlu bir kümedir.)}$$

$f_k(x) \geq g_k$  denklemi, k bulanık hedefinin, istenen  $g_k$  değerinden yaklaşık olarak büyük veya eşit olduğunu ifade etmektedir.  $f_k(x) \leq g_k$ , k bulanık hedefinin istenen  $g_k$  değerinden yaklaşık olarak küçük veya eşit olduğunu ifade etmektedir. Zimmermann'ın yaklaşımı yardımıyla bulanık hedef programlama şu şekilde formüle edilebilir (Zimmermann, 1978):

Amaç Fonksiyonu:  $\text{Enb } \lambda$

$$\text{Kısıtlar: } \lambda - \mu_k(f_k(x)) \leq 0, \quad k=1,2,\dots,n \quad x \in F \text{ (F olurlu bir küme)}$$

$\lambda$  değişkeni, bulanık amaç ve bulanık kısıtlayıcıların çözüm vektörü  $x$  tarafından eşzamanlı doyurulma derecesini göstermektedir (Özkan 2003).  $\mu_k(f_k(x))$ , k

hedefinin üyelik fonksiyonunu ifade etmektedir. Denklem 4.24, k hedefinin üyelik fonksiyonunu göstermektedir.

$$\mu_k(f_k(x)) = \begin{cases} 1 & f_k(x) \geq g_k \\ \frac{f_k(x) - l_k}{g_k - l_k} & l_k \leq f_k(x) \leq g_k \\ 0 & f_k(x) \leq l_k \end{cases} \quad (4.23)$$

$$\mu_k(f_k(x)) = \begin{cases} 1 & f_k(x) \leq g_k \\ \frac{u_k - f_k(x)}{u_k - g_k} & g_k \leq f_k(x) \leq u_k \\ 0 & f_k(x) \geq u_k \end{cases} \quad (4.24)$$

' $l_k$ ' k hedefinin alt limiti, ' $u_k$ ' ise k hedefinin üst limitidir. Ayrıntılı analiz ve örnekler Narasimhan ve Zimmermann'ın yaptıkları çalışmalarda bulunabilir. Chang, yapmış olduğu bir çalışmada ikili bulanık hedef programlama için bir yöntem geliştirmiştir. Chang'ın yönteminin matematiksel ifadesi şu şekildedir:

$$f_k(x) \cdot b_k \geq g_k \cdot b_k \text{ veya } f_k(x) \cdot b_k \leq g_k \cdot b_k, k=1,2,\dots,n$$

$$x \in F \text{ (F olurlu bir küme), } b_k \in R_k(x), k=1,2,\dots,n$$

' $R_k(x)$ ' k hedefinin kaynak kısıtlarının fonksiyonu ve ' $b_k$ ' k hedefinin ikili karar değişkenidir. Chang bu problemi çözmek için şu şekilde bir model geliştirmiştir:

$$\text{Amaç fonksiyonu: Enk. } d_k^-, k=1,2,\dots,n$$

$$\text{Kısıtlar: } L_k f_k(x) b_k - L_k^o b_k + d_k^- - d_k^+ = 1, k=1,2,\dots,n \text{ ve } f_k(x) \geq g_k$$

$$I_k^o b_k - I_k f_k(x) b_k + d_k^- - d_k^+ = 1, k=1,2,\dots,n \text{ ve } f_k(x) \leq g_k$$

$$b_k \in R_k(x), k=1,2,\dots,n$$

$$L_k = \frac{1}{g_k - l_k}, L_k^o = L_k l_k, I_k = \frac{1}{u_k - g_k} \text{ ve } I_k^o = I_k u_k$$



## 5. RULA YÖNTEMİ

### 5.1 Rula Yönteminin Tanımı

RULA, “Rapid Upper Limb Assesment” İngilizce sözcüklerinin kısaltılmasıdır. Bu yöntem, çalışma sırasında veya sonrasında oluşan ve kol ve bacaklarda görülen hastalıkların oluşabilme risklerini belirlemek için geliştirilmiştir. Diğer bir deyişle, çalışan bir kişinin iş yaparken vücudunun duruş şekli, uyguladığı kuvvet ve kas hareketleri belirlenerek, yapılan işin kol ve bacaklarda hastalık oluşturabilme riskini sezgisel olarak bulmak amacıyla geliştirilen bir yöntemdir.

Rula yöntemi, risk etmenlerine mâruz kalabilmeyi ölçmek için vücut duruş şekillerinin diyagramlarını ve 3 adet skor tablosunu kullanmaktadır. Yöntemde, risk oluşturabilecek etmenler olarak, daha önce Mcphee'nin açıkladığı etmenler soruşturulmaktadır. Bu etmenler, aşağıdaki gibidir (McPhee, 1987):

- Hareketlerin sayısı
- Statik kas hareketi
- Uygulanan kuvvet
- İş ekipmanları ve eşyalarının neden olduğu vücut duruş şekilleri
- Ara verilmeden çalışılan zaman

Bunlara ek olarak, bâzı etmenlerin kişiden kişiye değişebileceği de belirtilmiştir. Bunlar; gereksiz olarak harcanan statik kas kuvvetleri, hareketlerin hızları ve yerinde oluşu, çalışırken verilen araların sıklığı ve süreleri, çalışanın yaşı ve cinsiyeti, deneyimi gibi etmenlerdir.

RULA yöntemi, şu açılardan yararlı olabilir (McPhee, 1987):

- Çalışanların işten kaynaklanan hastalıklara maruz kalabilme risklerini görüntülemeye yardımcı olur.

- Çalışırken vücudun duruş şekline kaynaklanan kas eforunu, harcanan gücü, yinelemeli ve statik iş yapıldığını ve yapılan işin kas yorgunluğuna neden olabileceğini belirlemeye yardımcı olur.

## **5.2 RULA Yöntemi İle İlgili Yapılan Çalışmalar**

Literatüre bakıldığında, çalışırken harcanan kuvvetin, vücudun duruş şeklinin ve vücut hareketlerinin insanın fiziksel kapasitesini ne şekilde etkilediğini bulmaya yardımcı olmak üzere birçok yöntem geliştirilmiştir. Çalışanların kas ve iskelet sistemine ilişkin şikâyetlerini belirlemek üzere anketler yaygın olarak kullanılmıştır. Kemmlert ve Kilbom (1986) sordukları soruların ışığında, operatörlerin rapor ettiği bazı vücut rahatsızlıkları ve risk etmenleri arasında neden-sonuç ilişkisi kurmuşlardır. Drury (1987) ise çalışma sırasında harcanacak gücü, yapılacak hareketlerin frekanslarını ve vücut duruş şekillerini belirlemek için iş parçacıklarının analizlerinin ne derece kullanışlı olduğu üzerine çalışma yapmıştır.

## **5.3 RULA Yönteminin Evreleri**

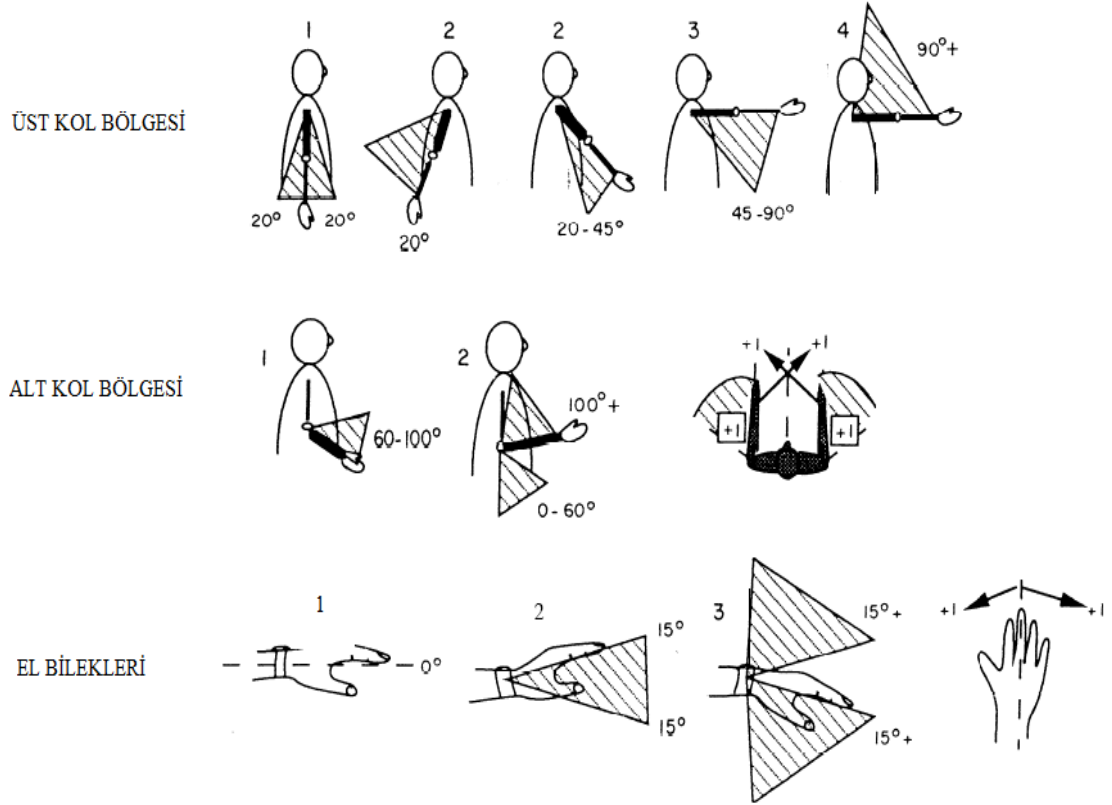
RULA yönteminin oluşturulması üç evrede incelenebilir. Birincisi, çalışma sırasındaki vücut duruş şeklinin gözlemlenme evresidir. Bu evrede vücudun her bir bölgesi için duruş şekli skor tablosuna göre bir skor bulunur. İkinci evrede, bulunan bu skorlar vücudun değişik bölgelerine göre gruplandırılır. Üçüncü evrede ise genel skor bulunur ve bu skora karşı alınacak karar listesi oluşturulur.

### **5.3.1 Evre 1: Vücut duruş şeklinin gözlemlenmesi**

RULA yönteminde vücut duruş şeklini gözlemlerken, kolaylık olması bakımından vücut iki gruba ayrılmıştır. Bunlar A ve B gruplarıdır. A grubunda üst kol, alt kol ve el bilekleri yer alırken, B grubunda boyun, gövde ve bacaklar yer almaktadır. Konu ile ilgili literatürden elde edilen bilgilere dayalı olarak A ve B gruplarında yer alan vücudun her bir bölümünün hareket alanları kesitlere ayrılmıştır. Bu kesitler numaralandırılmıştır ve böylece risk derecesi sayısal olarak ifade edilmiştir. Örneğin, bir ön kol hareketi 1 numaralı hareket alanı kesiti içinde yer alıyorsa, bu hareket, risk derecesi en düşük ön kol hareketidir. Aynı şekilde eğer bir vücut organının hareketi daha yüksek bir sayıyla numaralandırılmış hareket alanı kesiti içinde yer alıyorsa, bu hareket de o kadar risklidir.

Şekil 5.1, A grubundaki vücut bölümlerinin çalışma sırasındaki aldıkları konumlara (pozisyonlara) göre skorlandırılmasını göstermektedir. Üst kol hareket alanlarının kesitleri Tichauer (1966), Chaffin (1973), Herberts ve diğ. (1980), Hagberg (1981), Schuldt ve diğerlerinin (1987) yapmış oldukları çalışmalar baz alınarak belirlenmiştir. Kesitler şu şekilde puanlandırılmıştır:

- 20°'ye kadar olan ön kol hareketleri için 1 puan verilmiştir.
- 20°-45° arasındaki ön kol hareketleri için 2 puan verilmiştir.
- 45°-90° arasındaki ön kol hareketleri için 3 puan verilmiştir.
- 90°'den büyük ön kol hareketleri için 4 puan verilmiştir.



**Şekil 5.1 :** A grubu vücut bölümlerinin duruş şekline göre puanları (McAtamney ve Corlett, 1993).

Eğer hareket sırasında omuz normalinden yüksekte duruyorsa, yukarıda verilen puanlara 1 puan daha eklenmesi gerekmektedir. Buna ek olarak üst kolda çekilme varsa 1 puan daha eklenmesi gerekmektedir. Eğer hareket sırasında bir yerden destek alınıyorsa bu sefer puanlardan 1 puan çıkarılması gerekmektedir.

Alt kol hareket alanlarının kesitleri, Grandjean ve Tichauer'in yapmış oldukları çalışmalar temel alınarak belirlenmiştir. Kesitler şu şekilde puanlandırılmıştır:

1.  $60^{\circ}$ - $100^{\circ}$  arası hareketler için 1 puan verilmiştir.
2.  $60^{\circ}$ 'den küçük ve  $100^{\circ}$ 'den büyük hareketler için 2 puan verilmiştir.

Eğer alt kol hareketleri vücudun orta çizgisinin içine doğru ya da dışına doğru gerçekleşiyorsa, yukarıda verilen puanlara 1 puan eklenmesi gerekmektedir.

Bilek hareketi alanlarının kesitleri şu şekilde puanlandırılmıştır (McAtamney ve Corlett, 1993):

- a) Bilek normal pozisyondayken 1 puan verilmiştir.
- b)  $0^{\circ}$ - $15^{\circ}$ 'lik açılar arasında hareket ediyorsa 2 puan verilmiştir.
- c)  $15^{\circ}$ 'den fazla açılarla hareket ediyorsa 3 puan verilmiştir.

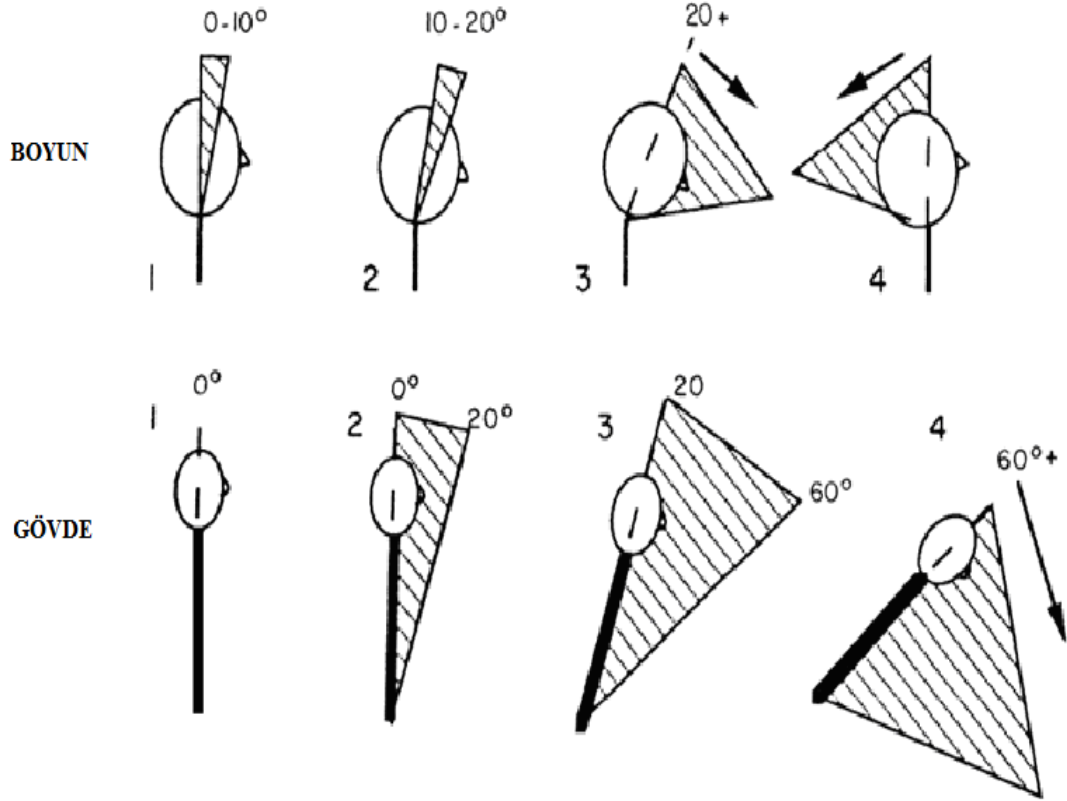
Bileğin bükülerek hareket edildiği durumlarda ise kesitlere Tichauer'in (1966) çalışması temel alınarak puanlar verilmiştir:

- Bilek çok az burkuluyor veya bükülüyorsa 1 puan verilmiştir.
- Bilek burkulma ve bükülme hareketinin sınırına yakın bir şekilde çalışılıyorsa 2 puan verilmiştir.

Şekil 5.2, B grubundaki vücut bölümlerinin çalışma sırasındaki aldıkları konumlara göre skorlandırılmasını göstermektedir. Boyun bölgesinin hareket alanlarının kesitleri Chaffin (1973) ve Killbom ve diğerlerinin (1986) yapmış oldukları çalışmalar temel alınarak oluşturulmuştur. Kesitler şu şekilde puanlandırılmıştır:

- $0^{\circ}$ - $10^{\circ}$ 'ler arası öne eğilmeler durumunda 1 puan.
- $10^{\circ}$ - $20^{\circ}$ 'ler arası öne eğilmeler durumuna 2 puan.
- $20^{\circ}$ 'den fazla durumlara 3 puan.
- Boynun arkaya doğru hareket ettiği durumlara ise 4 puan.

Eğer bu durumlara ek olarak boyun sağa veya sola döndürülerek iş yapılıyorsa, bu puanlara 1 puan daha eklenmesi gerekmektedir.



**Şekil 5.2 :** B grubu vücut bölümlerinin duruş şekline göre puanları (McAtamney ve Corlett, 1993).

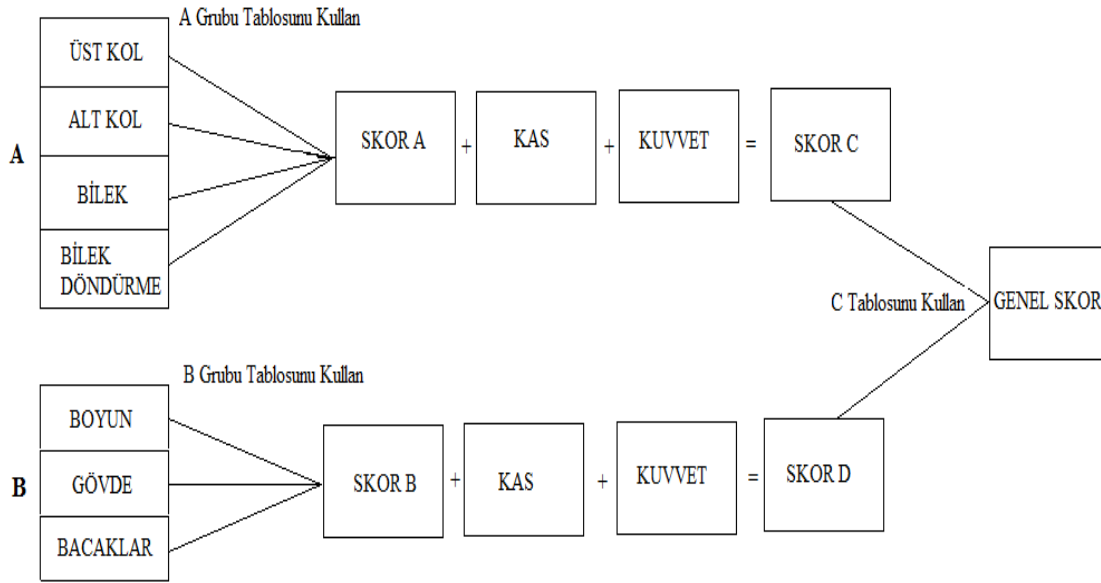
Gövdenin hareket alanlarının kesitleri Drury (1987) ve Grandjean ve diğerlerinin (1983) yapmış oldukları çalışmalar baz alınarak belirlenmiştir. Puanlar şu şekilde verilmiştir:

- Otururken ve de gövde ile kalça eklemi  $90^\circ$ 'lik açıya ve daha fazla açıya sahipse 1 puan verilmiştir.
- $0^\circ$ - $20^\circ$  arasında eğilme oluyorsa 2 puan verilmiştir.
- $20^\circ$ - $60^\circ$  arasında eğilme oluyorsa 3 puan verilmiştir.
- $60^\circ$  fazlası eğilme oluyorsa 4 puan verilmiştir.

Bu durumlara ek olarak, eğer gövde omurga ekseninde dönüyorsa, bu puanlara 1 puan eklenmesi gerekmektedir. Bacak hareket alanlarının kesitleri ise şu şekilde puanlandırılmıştır:

- Bacak ve ayaklara ağırlık eşit şekilde dağılıyorsa 1 puan verilmiştir.
- Bacak ve ayaklara ağırlık eşit şekilde dağılmıyorsa 2 puan.

A grubu için belirlenen puanlar tablosuna bakılarak, işçinin A grubunda bulunan vücut bölümleri için bir skor belirlenir. Bu skorlar, RULA skor kağıdının sol tarafındaki A bölümüne yazılır. Aynı şekilde, işçinin B grubunda bulunan vücut bölümleri için bir skor belirlenir ve bu skorlar RULA skor kağıdının sol tarafındaki B bölümüne yazılır. Bu skorlara, kas kullanımı ve harcanan kuvvete göre belirlenen puanlar eklenerek skor C ve skor D bulunur. Daha sonra genel skor tablosunda C ve D skorlarına göre genel skor bulunur. Şekil 5.3 puanlama sürecini göstermektedir.



Şekil 5.3 : RULA skor kağıdı.

### 5.3.2 Evre 2: Vücut bölümleri skorlarının gruplandırılması

A grubundaki vücut bölümlerine ait skorlar bulunduktan sonra bu skorlar yardımıyla, Çizelge 5.1.'e bakılarak A grubunun birleşik skoru bulunur. Aynı şekilde, B grubundaki vücut bölümlerine ait skorlar bulunduktan sonra Çizelge 5.2'ye bakılarak, B grubunun birleşik skoru bulunur. Daha sonra bu skorlar RULA skor kağıdındaki A ve B bölümlerine yazılır.

Çizelge 5.1 ve Çizelge 5.2'deki puanlamalar, daha önce ergonomi alanında yapılan birçok çalışmanın değerlendirilmesi sonucunda yapılmıştır. Dolayısıyla RULA metodu çalışmayı yapan McAtamney ve Corlett'in kendi deneyimlerine göre karar vermelerinden daha çok bilimsel bir çalışma sonucunda ortaya çıkmıştır. A ve B grubu skor tabloları risk derecesine göre 1'den 9'a kadar puanlandırılmıştır.

Çizelge 5.1: A grubu skor tablosu (McAtamney ve Corlett, 1993).

ÜST KOL	ALT KOL	BİLEK HAREKETİ							
		1		2		3		4	
		Bilek Dönmesi		Bilek Dönmesi		Bilek Dönmesi		Bilek Dönmesi	
		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	4	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 5.2 : B grubu skor tablosu (McAtamney ve Corlett, 1993).

GÖVDE	BACAKLAR	BOYUN					
		1	2	3	4	5	6
1	1	1	2	3	5	7	8
	2	3	3	3	5	7	8
2	1	2	2	3	5	7	8
	2	3	3	4	6	7	8
3	1	3	4	4	6	7	8
	2	4	5	5	7	8	8
4	1	5	5	5	7	8	8
	2	5	5	6	7	8	9
5	1	6	6	6	7	8	9
	2	6	7	7	7	8	9
6	1	7	7	7	8	8	9
	2	7	7	7	8	8	9

### 5.3.2.1 Kas kullanımı ve uygulanan kuvvet skorları

Salt vücut duruş şekline bakarak, yapılan işin zorluğunu anlamak güç olur. Vücut duruş şekline göre belirlenen skora ek olarak çalışırken uygulanan kuvvet ve kas kullanımını da dikkate almak yoluyla, yapılan işin kas ve iskelet sistemine yüklediği zorluğu bulmak daha anlamlı olur. RULA yönteminde de, uygulanan kuvvet ve kas kullanımına göre skorlar belirlenmiştir. Bu skorlar, hem A hem de B grubundaki vücut bölümlerine göre belirlenip, RULA skor kâğıdındaki uygun yerlere yazılır. A grubu tablosu ve B grubu tablosuna bakılarak belirlenen skora, kuvvet ve kas kullanımı skorları da eklenir.

$$\text{Skor A} + \text{Kas Kullanımı Skoru} + \text{Uygulanan Kuvvet Skoru} = \text{Skor C} \quad (5.1)$$

$$\text{Skor B} + \text{Kas Kullanımı Skoru} + \text{Uygulanan Kuvvet Skoru} = \text{Skor D} \quad (5.2)$$

Grandjean ve diğerlerinin (1983) yapmış olduğu çalışmaya göre kas ve iskelet sisteminde herhangi bir rahatsızlığa neden olmayacak statik iş yüklenmesi 3 kategoriye ayrılmıştır. Eğer yüksek düzeyde kuvvet uygulanarak iş yapılıyorsa, statik kas hareketinin 10 saniyenin altında olması gerekmektedir. Orta düzeyde kuvvet uygulanarak iş yapılıyorsa, statik kas hareketinin 1 dakikanın altında olması gerekmektedir. Düşük düzeyde kuvvet uygulanarak iş yapılıyorsa, statik kas hareketinin 4 dakikanın altında olması gerekmektedir. Grandjean'ın yapmış olduğu bu çalışma RULA yönteminde genelleştirilmiştir ve 1 dakikadan uzun süren kas hareketleri için A veya B skoruna 1 puan eklenmesi öngörülmüştür. Uygulanan kuvvetlere göre skor A veya skor B'ye eklenecek puanlar şu şekilde belirlenmiştir:

- Uygulanan kuvvet 2 kg'a eşit veya altındaysa ve bu iş aralıklı olarak yapılıyorsa sıfır puan,
- Uygulanan kuvvet 2-10 kg arasındaysa ve bu iş aralıklı olarak yapılıyorsa 1 puan,
- Uygulanan kuvvet 2-10 kg arasındaysa ve bu iş statik olarak ya da yinelemeli olarak (dakikada 4 kereden fazla) yapılıyorsa 2 puan,
- Uygulanan kuvvet 10 kg'dan fazlaysa ve bu iş aralıklı olarak yapılıyorsa 2 puan,
- Uygulanan kuvvet 10 kg'dan fazlaysa ve bu iş statik olarak ya da yinelemeli olarak yapılıyorsa 3 puan,



- Herhangi şiddetteki kuvvet anî olarak uygulanıyor veya çabuk bir şekilde iş yapılıyorsa 3 puan verilmiştir.

Bu puanlar da eklendikten sonra bulunan skorlar RULA skor kâğıdındaki C skoru ve D skoru bölümlerine yazılır.

### 5.3.3 Evre 3: Genel skorun bulunması ve alınacak karar listesinin oluşturulması

RULA yönteminin 3. evresinde, bulunan C ve D skorlarının birleşik skorları bulunur ve buna genel skor adı verilir. Genel skor 1'den 7'ye kadar derecelendirilmiştir. Çizelge 5.3'te C ve D skorlarının bileşke skor tablosu gösterilmiştir.

**Çizelge 5.3 : C ve D skorlarının bileşke skor tablosu (C tablosu).**

		SKOR D						
		1	2	3	4	5	6	7
SKOR C	1	1	2	3	3	4	5	5
	2	2	2	3	4	4	5	5
	3	3	3	3	4	4	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

1 puan en düşük risk olasılığını, 7 puan ise en yüksek risk olasılığını ifâde etmektedir. Genel skorun sonucunun 1 veya 2 çıkması, o işin uzun süre yinelenerek yapılmaması durumunda ergonomik açıdan kabul edilebilir bir sonuçtur. Genel skorun 3 veya 4 çıkması, çalışma sırasında çalışanın vücut duruş şeklinin literatürdeki kabul edilebilir düzeyin dışında olduğunu ya da vücut duruş şeklinin bu sınırlar içinde yer alıp yinelemeli hareketlerin (1 dakikada 4 kereden fazla) yapıldığını ve fazla güç harcanmasının gerekmediğini ifâde eder. Bu durumda yapılan işin daha iyi analiz edilmesi ve belki de birtakım değişikliklerin yapılması gerekebilir. Genel skorun 5 veya 6 çıkması, çalışma sırasında, çalışanın vücut duruş şeklinin literatürdeki kabul edilebilir sınırlar dahilinde olmadığını ve aynı zamanda o işin yinelemeli olarak ya da fazla güç harcanarak yapıldığını ifâde eder. Böyle durumlarda yapılan işin çok geçmeden gözden geçirilmesi ve de kısa dönemde değişikliklerin yapılması gerekmektedir. Uzun dönemde ise mâruz kalınabilecek risk düzeyinin düşürülmesi plânlanabilir. Genel skorun 7 çıkması, çalışanın kendi

kapasitesinin sınırlarında çalışıyor olduğunu ya da sınırlarını zorlayarak ve aşırı güç harcayarak çalıştığını ifade etmektedir. Böyle durumlarda âcilen, yapılan işin gözden geçirilip değişikliklerin yapılması gerekmektedir.

## 6. BULANIK HEDEF PROGRAMLAMA KULLANILARAK, BASİT U TİPİ MONTAJ HATTI DENGELEME

### 6.1 Matematiksel Model

Problemin matematiksel modelinde kullanılan semboller ve tanımları şu şekildedir:

$i, r, s$ : Görev

$j$ : İstasyon

Modeldeki küme ve parametrelerin sembolleri ve tanımları şu şekildedir:

$C_{\min}$ : Çevrim süresinin alt sınırı

$C_{\max}$ : Çevrim süresinin üst sınırı

$W_{\min}$ : İstasyon sayısının alt sınırı

$W_{\max}$ : İstasyon sayısının üst sınırı

$M_{\min}$ : En düşük istasyon sayısı

$M_{\max}$ : En yüksek istasyon sayısı,  $M_{\max} \geq W_{\max}$

$F_{\min}$ : Zorluk derecesi alt sınırı

$F_{\max}$ : Zorluk derecesi üst sınırı

$n$ : Toplam görev sayısı

$m$ : İstasyon sayısı

$H^0$ : Çevrim süresi hedefinin doğrusallaştırma parametresi

$K^0$ : İstasyon sayısı hedefinin doğrusallaştırma parametresi

$V^0$ : Zorluk derecesi hedefinin doğrusallaştırma parametresi

$I$ : Görev kümesi;  $i= 1,2,\dots,n$

$J$ : İstasyon kümesi;  $j= 1,2,\dots,n$

$S$ : Öncelik ilişkileri kümesi

$(r, s) \in S$  öncelik ilişkisi: r, s'den bir önce yapılacak görev

Modeldeki değişkenlerin sembolleri ve tanımları ise şu şekildedir:

$x_{ij}$ : Görev i, j istasyonuna gerçek öncelik diyagramından atanıyorsa ' $x_{ij}$ ' 1'e eşittir. Atanmıyorsa sıfıra eşittir.

$y_{ij}$ : Görev i, j istasyonuna hayalî öncelik diyagramından atanıyorsa ' $y_{ij}$ ' 1'e eşittir. Atanmıyorsa sıfıra eşittir.

$t_i$ : i görevi işlem süresi

$O_j$ : Herhangi bir görev j istasyonuna gerçek öncelik diyagramından atanıyorsa ' $O_j$ ' 1'e eşittir. Atanmıyorsa sıfıra eşittir.

$P_j$ : Herhangi bir görev j istasyonuna hayali öncelik diyagramından atanıyorsa ' $P_j$ ' 1'e eşittir. Atanmıyorsa sıfıra eşittir.

$Z_j$ : j istasyonuna atanan görevler salt gerçek öncelik diyagramından atanıyorsa ' $Z_j$ ' 1'e eşittir. Atanmıyorsa sıfıra eşittir.

$S_j$ : j istasyonuna atanan görevler hem gerçek hem de hayalî öncelik diyagramından atanıyorsa ' $S_j$ ' 1'e eşittir. Atanmıyorsa sıfıra eşittir.

$a^-$ : Zorluk derecesi hedefinin altında gerçekleşen değer

$a^+$ : Zorluk derecesi hedefinin üstünde gerçekleşen değer

$d^-$ : İstasyon sayısı hedefinin altında gerçekleşen değer

$d^+$ : İstasyon sayısı hedefinin üstünde gerçekleşen değer

$e^-$ : Çevrim süresi hedefinin altında gerçekleşen değer

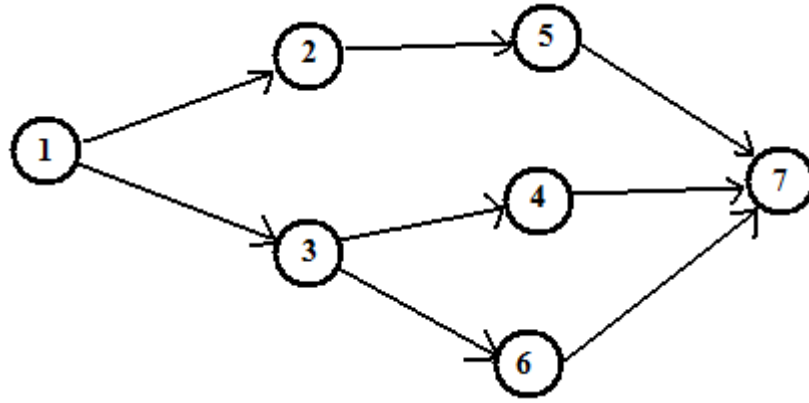
$e^+$ : Çevrim süresi hedefinin üstünde gerçekleşen değer

## 6.2 Kısıtlar

Basit U-tipi montaj hattı dengeleme problemlerinde (BUMHDP) kullanılan kısıtlar; atama kısıtları, çevrim süresi kısıtları, öncelik ilişkileri kısıtları ve iş istasyonu kısıtlarıdır. Çevrim süresi ve iş istasyonu sayısı bu tip dengeleme problemlerinin başlıca amaçlarıdır.

### 6.2.1 Atama kısıtı

Basit I tipi montaj hatlarında, bir iş ögesinin bir iş istasyonuna atanabilmesi için öncelik diyagramında kendisinden önce gelen işlerin atanmış olması gerekmektedir. Örneğin, Şekil 6.1'deki öncelik diyagramına göre, hattaki yapılacak ilk işin 1 numaralı iş olduğu ve bu işin ilk istasyona atanması gerektiği görülmektedir. 6 numaralı iş atanacaksa ve atama sırası hattaki ikinci istasyondaysa, 3 numaralı işin 1. ya da 2. istasyona atanmış olması gerekmektedir. Ayrıca 7 numaralı işin de son istasyona atanmış olması gerekmektedir. İşler öncelik diyagramında ileriye doğru gidilerek atanır.

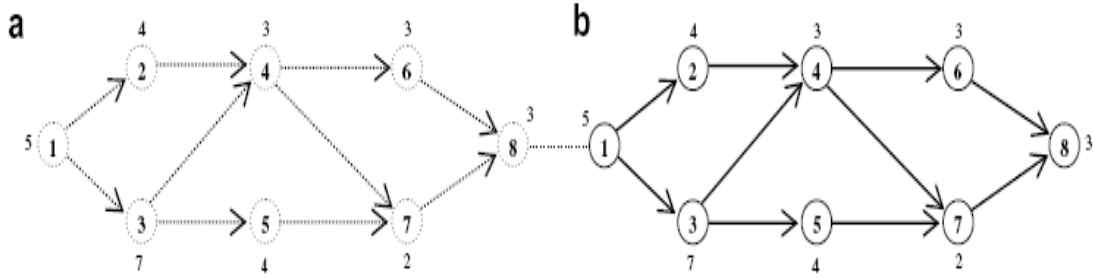


Şekil 6.1 : Öncelik diyagramı.

U tipi montaj hatlarında ise bir iş, tüm öncülleri veya ardıkları önceki istasyonlara atandıktan sonra bir istasyona atanabilir. Bu durum U tipi montaj hatlarının şekli nedeniyle kaynaklanmaktadır. U tipi montaj hatlarını I tipi montaj hatlarından ayıran bu yön düşüncesi, işlerin öncelik diyagramında hem ileriye hem de geriye doğru atanabilmesine olanak sağlar. Dolayısıyla, öncelik diyagramındaki ilk ve son yapılacak görevler, U tipi montaj hatlarında aynı istasyona atanabilir; ancak I tipi montaj hatlarında ilk ve son yapılacak işler, aynı istasyona atanamazlar. U tipi montaj hatlarında bu şekilde bir görev ataması gerçekleştirebilmek için Urban, hayalî öncelik diyagramı kavramını önermiştir. Hayalî öncelik diyagramı, gerçek öncelik diyagramına iliştilerle yapılan diyagramdır. İşlerin ileriye doğru atanması, gerçek öncelik diyagramından; geriye doğru atanması ise hayalî öncelik diyagramından gerçekleştirilir.

Herhangi bir görev bir istasyona gerçek veya hayalî öncelik diyagramı kullanılarak salt bir kez atanabilir. Eğer bir görev bir istasyona gerçek öncelik diyagramı kullanılarak atanıyorsa, bu görev hattın ön tarafında konumlandırılır; ancak bir görev

bir istasyona hayalî öncelik diyagramı kullanılarak atanıyorsa bu görev, hattın arka tarafında konumlandırılır. Şekil 6.2 hayali ve gerçek öncelik diyagramlarını göstermektedir.



**Şekil 6.2 :** Örnek hayalî öncelik diyagramı (a) ve onun gerçek öncelik diyagramı (b).

Problemin model kurma aşamasında Urban'ın hayalî öncelik diyagramı kavramı ve bazı kısıtları kullanılmıştır. Urban'ın (1998) atama kısıtları ve öncelik ilişkileri kısıtları modelde kullanılmıştır. Ayrıca, Chang'ın (2007) ikili bulanık hedef programlama için geliştirdiği kısıtlar da kullanılmıştır.

Montaj hattı dengeleme problemlerinde görevler, bölünemeyen en küçük iş parçaları olarak tanımlandıklarından dolayı, her bir görev salt bir tane iş istasyonuna atanabilir. Eğer görev  $i$  istasyon  $j$ 'ye orijinal öncelik diyagramından atanıyorsa o zaman  $x_{ij}$  1'e eşit olur. Eğer görev  $i$  istasyon  $j$ 'ye hayalî öncelik diyagramından atanıyorsa bu sefer  $y_{ij}$  1'e eşit olur. Unutulmamalıdır ki  $x_{ij}$  ve  $y_{ij}$  aynı anda 1'e eşit olamazlar.

$$\sum_{j=1}^{M_{maks}} (x_{ij} + y_{ij}) = 1 \quad \forall i \in I \quad i=1,2,\dots,n \quad (6.1)$$

### 6.2.2 Çevrim süresi kısıtı

Çevrim süresi kısıtını modelde kullanmak, bir istasyona atanan görevlerin tamamlanabilmesi için geçen sürenin montaj hattı çevrim süresini geçemeyeceğini belirtmek açısından gereklidir. Çevrim süresi kısıtı şu şekilde ifade edilebilir:

$$\sum_{i=1}^n t_i (x_{ij} + y_{ij}) \leq C \quad \forall j \in J \quad j=1,2,\dots,M_{max} \quad (6.2)$$

### 6.2.3 Öncelik ilişkileri kısıtı

Görevler arasındaki öncelik ilişkilerini ifâde edebilmek için öncelik ilişkileri kısıtlarını modelde kullanmak gereklidir. Bu kısıtlara göre, bir görevin bir iş istasyonuna atanabilmesi için o görevin öncüllerinin veya ardıllarının bir istasyona atanmış olması gereklidir. Bu çalışmada Urban'ın çalışmasında kullanılan kısıtlar kullanılmıştır. Kısıtlar şu şekildedir:

$$\sum_{j=1}^{M_{maks}} (M_{maks} - j + 1)(x_{rj} - x_{sj}) \geq 0 \quad \forall (r, s) \in S \quad (6.3)$$

$$\sum_{j=1}^{M_{maks}} (M_{maks} - j + 1)(y_{sj} - y_{rj}) \geq 0 \quad \forall (r, s) \in S \quad (6.4)$$

### 6.2.4 İş istasyonu kısıtı

İşlerin herhangi bir istasyona gerçek mi ya da hayalî öncelik diyagramından mı atandığını belirlemek üzere Kara ve diğ.'nin (2009) geliştirdikleri iş istasyonu kısıtları modelde kullanılmıştır. Herhangi bir görev, j istasyonuna gerçek öncelik diyagramından atanıyorsa  $O_j$  ve  $Z_j$  değişkenleri 1'e eşit olur. Eğer herhangi bir görev j istasyonuna hayalî öncelik diyagramından atanıyorsa o zaman  $P_j$  ve  $Z_j$  1'e eşit olur. Eğer görevler j istasyonuna hem gerçek hem de hayalî öncelik diyagramından atanıyorsa o zaman  $S_j$  değişkeni 1'e eşit ancak  $Z_j$  değişkeni ise sifıra eşit olur.

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} - nO_j \geq 1 - n \quad \forall j \in J \quad (6.5)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} - nO_j \leq 0 \quad \forall j \in J \quad (6.6)$$

$$\sum_{i=1}^n y_{ij} - nP_j \geq 1 - n \quad \forall j \in J \quad (6.7)$$

$$\sum_{i=1}^n y_{ij} - nP_j \leq 0 \quad \forall j \in J \quad (6.8)$$

$$O_j + P_j - 2S_j - Z_j = 0 \quad \forall j \in J \quad (6.9)$$

$$\sum_{j=1}^{M_{maks}} Z_j + S_j \leq W_{\min} \quad \forall j \in J \quad (6.10)$$

### 6.3 Ergonomik Koşullar Altında U Tipi Montaj Hattı Dengeleme

Montaj hattı dengeleme problemlerinde genelde öncelikli hedefler, istasyon sayısını enküçüklemek ve çevrim süresini enküçüklemektir. Bu çalışmada montaj hattına ergonomik açıdan bakılarak işçilerin zorlanmaları da dikkate alınmıştır. Bu sâyede montaj hattındaki istasyonların iş yüklerinin birbirlerine yakın olması ve işçilere verilen iş yükleri arasındaki dengesizliğin ortadan kaldırılması amaçlanmıştır. İşlerin zorluk dereceleri RULA yöntemiyle belirlenmiştir. İşçilerin niteliklerine (yaş, cinsiyet vb.), işletme koşullarına ve üretim yapısına bakılarak istasyonlardaki işçilerin çalışabileceği düzeydeki zorluk derecesi sınırı belirlenerek, istasyonlardaki iş yükünün bu zorluk derecesini geçmemesi amaçlanmıştır. Zorluk derecesi kısıtı şu şekildedir:

$$\sum_i f_i(x_{ij} + y_{ij}) \leq F_j \quad (6.11)$$

$f_i$ : i görevinin zorluk derecesi

$F_j$  : j istasyonundaki işçilerin çalışabileceği zorluk derecesi sınırı

Bu kısıtlar doğrultusunda BUMHDP'nin çözümü için gerekli olan model şu şekildedir:

Amaç Fonksiyonu:  $Enk. \sum_{j=1}^{m_{maks}} q_j$

Kısıtlar:

$$\sum_{j=1}^{M_{maks}} (x_{ij} + y_{ij}) = 1 \quad \forall i \in I \quad i=1,2,\dots,n \quad (6.12)$$

$$\sum_{i=1}^n t_i(x_{ij} + y_{ij}) \leq C \quad \forall j \in J \quad j=1,2,\dots,M_{maks} \quad (6.13)$$

$$\sum_{j=1}^{M_{maks}} (M_{maks} - j + 1)(x_{rj} - x_{sj}) \geq 0 \quad \forall (r, s) \in S \quad (6.14)$$

$$\sum_{j=1}^{M_{maks}} (M_{maks} - j + 1)(y_{sj} - y_{rj}) \geq 0 \quad \forall (r, s) \in S \quad (6.15)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} - nO_j \geq 1 - n \quad \forall j \in J \quad (6.16)$$



$$\sum_{i=1}^n x_{ij} - nO_j \leq 0 \quad \forall j \in J \quad (6.17)$$

$$\sum_{i=1}^n y_{ij} - nP_j \geq 1 - n \quad \forall j \in J \quad (6.18)$$

$$\sum_{i=1}^n y_{ij} - nP_j \leq 0 \quad \forall j \in J \quad (6.19)$$

$$O_j + P_j - 2S_j - Z_j = 0 \quad \forall j \in J \quad (6.20)$$

$$\sum_{j=1}^{M_{\max}} Z_j + S_j \leq W_{\min} \quad \forall j \in J \quad (6.21)$$

$$\sum_i f_i(x_{ij} + y_{ij}) \leq F_j \quad (6.22)$$

#### 6.4 İkili Bulanık Hedef Programlama İle Basit U Tipi Montaj Hattı Dengeleme

Gerçek yaşamda deterministik olarak belirlenmesi zor olan ya da diğer bir deyişle bulanık olarak ifade edilebilecek modeldeki kısıtlar; istasyon sayısı kısıtı, çevrim süresi kısıtı ve zorluk derecesi kısıtıdır. Bu kısıtlar, bulanık hedef kısıtlarına dönüştürülmüştür.

##### 6.4.1 Bulanık çevrim süresi hedefi

Çevrim süresi genelde deterministik olarak algılansa da, bu çalışmada bulanık olarak ele alınacaktır. Bulanık çevrim süresi demek, kesin olarak belli olmayan ya da esnek çevrim süresi demektir. Çalışmada dikkate alınan zorluk derecesinin istasyonlar arasında dengeli dağıtılabilmesi için çevrim süresine bu esnekliğin verilmesi gerekmektedir. Bulanık çevrim süresi kısıtı şu şekilde yazılabilir:

$$\sum_{i=1}^n t_i(x_{ij} + y_{ij}) \leq C_{\min} \quad (6.23)$$

İstenilen çevrim süresinin alt sınırına ulaşıldığında üyelik fonksiyonu  $\mu_C(x)=1$  değerini alacaktır. Çevrim süresi, istenilen çevrim süresinin üst sınırını aştığı takdirde ise üyelik fonksiyonu  $\mu_C(x)=0$  değerini alacaktır. Çevrim süresinin üyelik fonksiyonu ise şu şekildedir:

$$\mu_C(x) = \begin{cases} 0 & \text{eğer } (Cx)_i > C_{maks} \\ 1 - \frac{(Cx)_i - C_{\min}}{C_{maks} - C_{\min}} & \text{eğer } C_{\min} \leq (Cx)_i \leq C_{maks} \\ 1 & \text{eğer } (Cx)_i < C_{\min} \end{cases} \quad (6.24)$$

Çevrim süresinin üyelik fonksiyonunda yer alan ‘(Cx)<sub>i</sub>’, gerçekleşen çevrim süresini ifade etmektedir. Bulanık hedef programlama yönteminde Chang’ın (2007) geliştirdiği formüle göre çevrim süresi kısıtı şu şekilde yazılabilir:

$$H^o - H \left( \sum_{i=1}^n t_i (x_{ij} + y_{ij}) \right) + e^- - e^+ = 1 \quad \forall j \in J \quad (6.25)$$

$$H = \frac{1}{C_{maks} - C_{\min}} \quad \text{ve} \quad H^o = H \times C_{maks} \quad (6.26)$$

#### 6.4.2 Bulanık istasyon sayısı hedefi

Çevrim süresinin bulanık olarak ele alındığı durumlarda istasyon sayısının da bulanık olarak ele alınması gerekir. Böylece çevrim süresine verilen esneklik, istasyon sayısına da verilmiş olur. Bulanık istasyon sayısı kısıtı şu şekilde yazılabilir:

$$\sum_{j=1}^{M_{maks}} Z_j + S_j \lesssim W_{\min} \quad (6.27)$$

İstenilen istasyon sayısının alt sınırına ulaşıldığında üyelik fonksiyonu  $\mu_W(x)=1$  değerini alacaktır. İstasyon sayısı değeri, istenilen istasyon sayısı üst sınırını aştığı takdirde ise üyelik fonksiyonu  $\mu_W(x)=0$  değerini alacaktır. İstasyon sayısının üyelik fonksiyonu şu şekildedir:

$$\mu_W(x) = \begin{cases} 0 & \text{eğer } (Wx)_j > W_{maks} \\ 1 - \frac{(Wx)_j - W_{\min}}{W_{maks} - W_{\min}} & \text{eğer } W_{\min} \leq (Wx)_j \leq W_{maks} \\ 1 & \text{eğer } (Wx)_j < W_{\min} \end{cases} \quad (6.28)$$

İstasyon sayısının üyelik fonksiyonunda yer alan ‘(Wx)<sub>j</sub>’ gerçekleşen istasyon sayısını ifade etmektedir. Bulanık hedef programlama yönteminde Chang’ın (2007) geliştirdiği kısıta göre istasyon sayısı kısıtı şu şekilde yazılabilir:

$$K^o - K \left( \sum_{j=1}^{M_{maks}} Z_j + S_j \right) + d^- - d^+ = 1 \quad (6.29)$$

$$K = \frac{1}{W_{maks} - W_{min}} \quad \text{ve} \quad K^o = KW_{maks} \quad (6.30)$$

### 6.4.3 Bulanık zorluk derecesi hedefi

Bu çalışmada montaj hattı dengelemesi yapılırken ergonomik koşulların da dikkate alınması benimsenmiştir. Zorluk derecesi gerçek yaşamda deterministik olarak ifade edilemeyeceği için bulanık olarak ele alınmıştır. Bulanık zorluk derecesi kısıtı şu şekilde yazılabilir:

$$\sum_i f_i(x_{ij} + y_{ij}) \lesseqgtr F_j \quad (6.31)$$

İstenilen zorluk derecesinin alt sınırına ulaşıldığında üyelik fonksiyonu  $\mu_F(x)=1$  değerini alacaktır. İstasyondaki zorluk derecesi, istenilen zorluk derecesinin üst sınırını aştığı takdirde ise üyelik fonksiyonu  $\mu_F(x)=0$  değerini alacaktır. Zorluk derecesinin üyelik fonksiyonu şu şekildedir:

$$\mu_F(x) = \begin{cases} 0 & \text{eğer } (Fx)_j > F_{maks} \\ 1 - \frac{(Fx)_j - F_{min}}{F_{maks} - F_{min}} & \text{eğer } F_{min} \leq (Fx)_j \leq F_{maks} \\ 1 & \text{eğer } (Fx)_j < F_{min} \end{cases} \quad (6.32)$$

Zorluk derecesinin üyelik fonksiyonunda yer alan ' $(Fx)_j$ ', j istasyonunda gerçekleşen zorluk derecesini ifade etmektedir. Bulanık hedef programlama yönteminde Chang'ın (2007) geliştirdiği kısıta göre zorluk derecesi kısıtı şu şekilde yazılabilir:

$$V^o - V \left( \sum_{i=1}^n f_i(x_{ij} + y_{ij}) \right) + a^- - a^+ = 1, \quad \forall j \in J \quad (6.33)$$

$$V = \frac{1}{F_{maks} - F_{min}} \quad \text{ve} \quad V^o = V \times F_{maks} \quad (6.34)$$

Bu kısıtlarla birlikte model şu şekildedir:

Amaç Fonksiyonu: Enk.  $a^- + d^- + e^-$

Kısıtlar:

$$\sum_{j=1}^{M_{maks}} (x_{ij} + y_{ij}) = 1 \quad \forall i \in I \quad i=1,2,\dots,n$$

$$H^o - H\left(\sum_{i=1}^n t_i(x_{ij} + y_{ij})\right) + e^- - e^+ = 1 \quad \forall j \in J$$

$$\sum_{j=1}^{M_{maks}} (M_{maks} - j + 1)(x_{rj} - x_{sj}) \geq 0 \quad \forall (r, s) \in S$$

$$\sum_{j=1}^{M_{maks}} (M_{maks} - j + 1)(y_{sj} - y_{rj}) \geq 0 \quad \forall (r, s) \in S$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} - nO_j \geq 1 - n \quad \forall j \in J$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} - nO_j \leq 0 \quad \forall j \in J$$

$$\sum_{i=1}^n y_{ij} - nP_j \geq 1 - n \quad \forall j \in J$$

$$\sum_{i=1}^n y_{ij} - nP_j \leq 0 \quad \forall j \in J$$

$$H^o - H\left(\sum_{i=1}^n t_i(x_{ij} + y_{ij})\right) + e^- - e^+ = 1$$

$$K^o - K\left(\sum_{j=1}^{M_{maks}} Z_j + S_j\right) + d^- - d^+ = 1$$

$$V^o - V\left(\sum_{i=1}^n f_i(x_{ij} + y_{ij})\right) + a^- - a^+ = 1$$

## 7. BASİT U TİPİ MONTAJ HATTI DENGELEMESİ İÇİN UYGULAMA

### 7.1 Problem Tanımı

Bu çalışmada ergonomik etmenleri de gözönünde bulundurarak kurulan bulanık hedef programlama modeli, Chang'ın geliştirdiği formüllerle doğrusallaştırılmış ve ortaya çıkan model LINGO 13.0 paket programı ile çözülmüştür.

Problemde araba yedek parçası üreten bir fabrikada salıncak montaj hattı dikkate alınmıştır.

Problemde hat dengelemede kullanılmak istenen istasyon sayısı hedefi en az 4, en fazla 6; ortaya çıkan gereksinimler doğrultusunda hedeflenen çevrim süresi en az 16 saniye, en çok 20 saniye ve bir istasyondaki iş yüklerinin zorluk derecesi saniyede ortalama en fazla 5, en az 3 olarak istenmiştir.

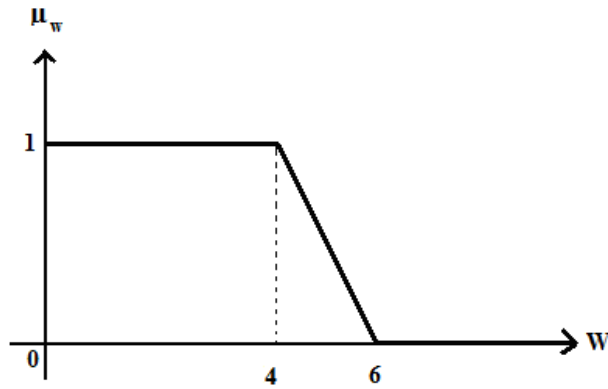
Bu problemin çözümünde ergonomik etmenler dikkate alınırken RULA yöntemi uygulanmıştır. Çalışma sırasındaki vücudun değişik bölgelerinin duruş şekillerine göre çizelge hazırlanmıştır ve bu çizelgedeki değerlerden matris tablosu hazırlanmıştır. Problemde belirlenen istasyon sayısının, çevrim süresinin ve zorluk derecesinin üyelik fonksiyonları izleyen şekillerde gösterilmiştir. Şekil 7.1'de çevrim süresinin üyelik fonksiyonu gösterilmiştir. Çevrim süresi 16 saniyeye eşit ve 16 saniyeden düşük iken üyelik fonksiyonu 1 değerini, 16 saniye ile 20 saniye arasındayken üyelik fonksiyonu 1 ile 0 arasındaki değerleri, 20 saniyeden fazla sürelerde ise üyelik fonksiyonu sıfır değerini almıştır.

Şekil 7.2 iş istasyonu sayısına göre değerlendirilmiş bulanık küme üyelik fonksiyonunu göstermektedir. Buna göre, iş istasyonu sayısı 4 ve 4'ten küçük değerlerde bulunursa üyelik fonksiyonu 1 değerini, 4 ile 6 arasında ise üyelik fonksiyonu 1 ile 0 arasındaki değerleri, istasyon sayısı 6'dan büyükse üyelik fonksiyonu 0 değerini almıştır.



Şekil 7.1 : Çevrim süresi üyelik fonksiyonu.

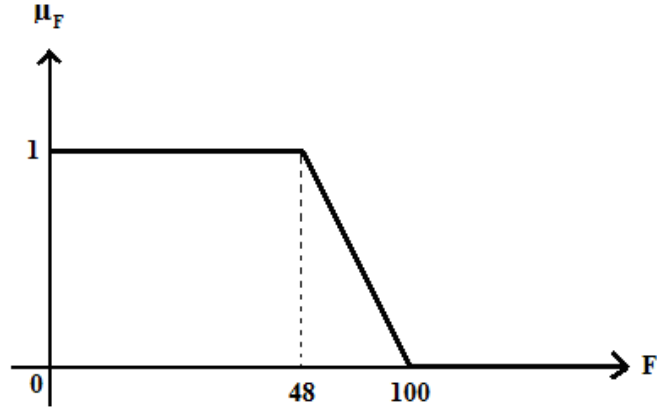
$$\mu_C = \begin{cases} 1 & \text{eğer } C \leq C_{\min} \\ \frac{C_{\max} - C}{C_{\max} - C_{\min}} & \text{eğer } C_{\min} \leq C \leq C_{\max} \\ 0 & \text{eğer } C \geq C_{\max} \end{cases} \quad (7.1)$$



Şekil 7.2 : İş istasyonu üyelik fonksiyonu.

$$\mu_W = \begin{cases} 1 & \text{eğer } W \leq W_{\min} \\ \frac{W_{\max} - W}{W_{\max} - W_{\min}} & \text{eğer } W_{\min} \leq W \leq W_{\max} \\ 0 & \text{eğer } W \geq W_{\max} \end{cases} \quad (7.2)$$

Şekil 7.3’de zorluk derecesi üyelik fonksiyonu gösterilmiştir. Zorluk derecesi saniyede en düşük 3 olarak istendiğinden dolayı, en düşük işlem süresine sahip istasyonda, yâni 16 saniyede 48 birim zorluk derecesi meydana gelir. Aynı şekilde zorluk derecesi saniyede en fazla 5 olarak istendiğinden dolayı en büyük işlem süresine sahip istasyonda, yâni 20 saniyede 100 birim zorluk derecesi oluşur.



Şekil 7.3 : Zaman ağırlıklı zorluk derecesi üyelik fonksiyonu.

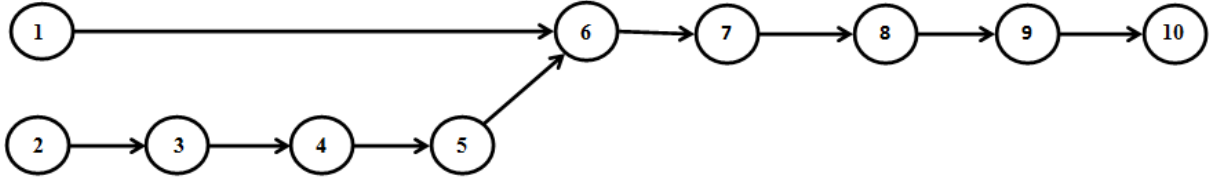
$$\mu_F = \begin{cases} 1 & \text{eğer } F \leq F_{\min} \\ \frac{F_{\max} - F}{F_{\max} - F_{\min}} & \text{eğer } F_{\min} \leq F \leq F_{\max} \\ 0 & \text{eğer } F \geq F_{\max} \end{cases} \quad (7.3)$$

İş istasyonlarında gerçekleştirilecek görevler ve iş süreleri Çizelge 7.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 7.1 : Montaj operasyonları ve süreleri.

Yapılan İş	Süresi
1. Gövdeye Burç Çakılması	6 saniye
2. Mafsala plastik yatağın çakılması	6 saniye
3. Plastik yataklı mafsalmın gövdeye çakılması	9 saniye
4. Sıvama	7 saniye
5. Mafsal topunun sıkılık kontrolü	8 saniye
6. Rotilin perçinlenmesi	10 saniye
7. Toz lastiğinin takılması	12 saniye
8. Somun takılması	5 saniye
9. Poşetleme	9 saniye
10. Kutulama	10 saniye

İşlerin öncelik diyagramı Şekil 7.4'te gösterilmiştir. Bu diyagrama göre 1 ve 2 numaralı işler birbirinden bağımsızdır ve diğer bütün iş parçalarının öncülleri ve ardılları bulunmaktadır.



Şekil 7.4 : Öncelik diyagramı.

Montajda işçilerin çalışma sırasındaki RULA yöntemine göre A ve B grubundaki vücut bölümleri için belirlenen skorlar, Çizelge 7.2 ve Çizelge 7.3’de gösterilmiştir.

Çizelge 7.2 : A grubu puanları.

Görev	Üst Kol Hareketi	Alt Kol Hareketi	El Bilekleri	Bilek Burkulmaları
Gövdeye Burç Çakılması	3	1	2	1
Mafsala plastik yatağın çakılması	2	1	2	1
Plastik yataklı mafsalin gövdeye çakılması	1	3	2	1
Sıvama	2	1	2	1
Mafsal topunun sıkılık kontrolü	3	2	4	2
Rotilin perçinlenmesi	3	1	3	1
Toz lastiğinin takılması	2	2	3	2
Somun takılması	1	1	3	2
Poşetleme	1	2	1	1
Kutulama	2	2	2	1

Çizelge 7.3 : B grubu puanları.

Görev	Boyun	Gövde	Bacak
Gövdeye Burç Çakılması	1	2	1
Mafsala plastik yatağın çakılması	2	1	1
Plastik yataklı mafsalin gövdeye çakılması	3	1	1
Sıvama	2	2	1
Mafsal topunun sıkılık kontrolü	2	2	1
Rotilin perçinlenmesi	2	2	1
Toz lastiğinin takılması	3	1	1
Somun takılması	2	2	1
Poşetleme	1	2	1
Kutulama	2	3	1

A grubundaki skordardan tek bir skor elde edebilmek için 5. bölümde gösterilen A grubu skor tablosuna bakmak gerekmektedir. Bunun sonucunda montajdaki her bir görevin skoru Çizelge 7.4’deki gibi gerçekleşir.



**Çizelge 7.4 : Görevlerin A grubu skorları.**

Görev	Skor A
Gövdeye Burç Çakılması	4
Mafsala plastik yatağın çakılması	3
Plastik yataklı mafsalin gövdeye çakılması	3
Sivama	3
Mafsal topunun sıkılık kontrolü	5
Rotilin perçinlenmesi	4
Toz lastiğinin takılması	4
Somun takılması	3
Poşetleme	2
Kutulama	3

A grubundaki skordardan C skorunu oluşturmak için RULA yönteminde kas çalışma şekline göre ve uygulanan kuvvetlere göre belirlenen puanlar eklenmelidir. Bunun sonucunda Çizelge 7.5’deki durum elde edilir.

**Çizelge 7.5 : C skoru tablosu.**

Görev	Skor C
Gövdeye Burç Çakılması	5
Mafsala plastik yatağın çakılması	4
Plastik yataklı mafsalin gövdeye çakılması	5
Sivama	4
Mafsal topunun sıkılık kontrolü	6
Rotilin perçinlenmesi	5
Toz lastiğinin takılması	5
Somun takılması	4
Poşetleme	3
Kutulama	4

B grubundaki skordardan tek bir skor elde edebilmek için 5. bölümde gösterilen B grubu skor tablosuna bakmak gerekmektedir. Bunun sonucunda montajdaki her bir görevin skoru Çizelge 7.6’deki şekilde gerçekleşir.

B grubundaki skordardan D skorunu oluşturmak için RULA yönteminde kas çalışma şekline göre ve uygulanan kuvvetlere göre belirlenen puanlar eklenmelidir. Bunun sonucunda ortaya çıkan durum ise Çizelge 7.7’deki gibidir.

**Çizelge 7.6 : Görevlerin B grubu skorları.**

Görev	Skor B
Gövdeye Burç Çakılması	2
Mafsala plastik yatağın çakılması	2
Plastik yataklı mafsalin gövdeye çakılması	3
Sivama	2
Mafsal topunun sıkılık kontrolü	2
Rotilin perçinlenmesi	2
Toz lastiğinin takılması	3
Somun takılması	2
Poşetleme	2
Kutulama	4

**Çizelge 7.7 : D skoru tablosu.**

Görev	Skor D
Gövdeye Burç Çakılması	3
Mafsala plastik yatağın çakılması	3
Plastik yataklı mafsalin gövdeye çakılması	4
Sivama	3
Mafsal topunun sıkılık kontrolü	3
Rotilin perçinlenmesi	3
Toz lastiğinin takılması	4
Somun takılması	3
Poşetleme	3
Kutulama	5

C ve D skorlarını kullanarak, RULA yöntemindeki genel skor tablosuna bakılarak genel skor sonuçları her bir görev için Çizelge 7.8'deki gibi bulunur.

**Çizelge 7.8 : Genel skorlar.**

Görev	Genel Skor
Gövdeye Burç Çakılması	4
Mafsala plastik yatağın çakılması	3
Plastik yataklı mafsalin gövdeye çakılması	5
Sivama	3
Mafsal topunun sıkılık kontrolü	5
Rotilin perçinlenmesi	4
Toz lastiğinin takılması	5
Somun takılması	3
Poşetleme	3
Kutulama	5

## 7.2 Kısıtlar

Problemin matematiksel modellemesinde atama kısıtları, çevrim süresi kısıtları, yapılacak işin öncelik kısıtları, istasyon kısıtları ve RULA yöntemine göre her bir görev için belirlenen zorluk derecesi kısıtları kullanılmıştır.

### 7.2.1 Atama kısıtları

Bir görevin herhangi bir istasyona gerçek öncelik diyagramından ya da hayali öncelik diyagramından atandığını belirleyen kısıtlar aşağıdaki gibi olur:

$$x_{11} + x_{12} + \dots + x_{16} + y_{11} + y_{12} + \dots + y_{16} = 1$$

$$x_{21} + x_{22} + \dots + x_{26} + y_{21} + y_{22} + \dots + y_{26} = 1$$

$$x_{31} + x_{32} + \dots + x_{36} + y_{31} + y_{32} + \dots + y_{36} = 1$$

$$x_{41} + x_{42} + \dots + x_{46} + y_{41} + y_{42} + \dots + y_{46} = 1$$

$$x_{51} + x_{52} + \dots + x_{56} + y_{51} + y_{52} + \dots + y_{56} = 1$$

$$x_{61} + x_{62} + \dots + x_{66} + y_{61} + y_{62} + \dots + y_{66} = 1$$

$$x_{71} + x_{72} + \dots + x_{76} + y_{71} + y_{72} + \dots + y_{76} = 1$$

$$x_{81} + x_{82} + \dots + x_{86} + y_{81} + y_{82} + \dots + y_{86} = 1$$

$$x_{91} + x_{92} + \dots + x_{96} + y_{91} + y_{92} + \dots + y_{96} = 1$$

$$x_{10,1} + x_{10,2} + \dots + x_{10,6} + y_{10,1} + y_{10,2} + \dots + y_{10,6} = 1$$

### 7.2.2 Çevrim süresi kısıtları

Problemde belirlenen en yüksek çevrim süresi 20 ve en düşük çevrim süresi 16 olduğundan dolayı  $H^o = 5$  ve  $H = \frac{1}{4}$  olarak bulunur. Çevrim süresi kısıtları şu şekilde gösterilebilir:

$$H^o - H \left( \sum_{i=1}^n t_i (x_{ij} + y_{ij}) \right) + e^- - f_j^+ = 1$$

$$5 - \frac{1}{4}(6x_{11}) - \frac{1}{4}(6x_{21}) - \frac{1}{4}(9x_{31}) - \frac{1}{4}(7x_{41}) - \frac{1}{4}(8x_{51}) - \frac{1}{4}(10x_{61}) - \frac{1}{4}(12x_{71}) - \frac{1}{4}(5x_{81}) - \frac{1}{4}(9x_{91}) - \frac{1}{4}(10x_{10,1}) - \frac{1}{4}(6y_{11}) - \frac{1}{4}(6y_{21}) - \frac{1}{4}(9y_{31}) - \frac{1}{4}(7y_{41}) - \frac{1}{4}(8y_{51}) - \frac{1}{4}(10y_{61}) - \frac{1}{4}(12y_{71}) - \frac{1}{4}(5y_{81}) - \frac{1}{4}(9y_{91}) - \frac{1}{4}(10y_{10,1}) + e^- - e^+ = 1$$

$$5 - \frac{1}{4}(6x_{12}) - \frac{1}{4}(6x_{22}) - \frac{1}{4}(9x_{32}) - \frac{1}{4}(7x_{42}) - \frac{1}{4}(8x_{52}) - \frac{1}{4}(10x_{62}) - \frac{1}{4}(12x_{72}) - \frac{1}{4}(5x_{82}) - \frac{1}{4}(9x_{92}) - \frac{1}{4}(10x_{10,2}) - \frac{1}{4}(6y_{12}) - \frac{1}{4}(6y_{22}) - \frac{1}{4}(9y_{32}) - \frac{1}{4}(7y_{42}) - \frac{1}{4}(8y_{52}) - \frac{1}{4}(10y_{62}) - \frac{1}{4}(12y_{72}) - \frac{1}{4}(5y_{82}) - \frac{1}{4}(9y_{92}) - \frac{1}{4}(10y_{10,2}) + e^- - e^+ = 1$$

$$5 - \frac{1}{4}(6x_{13}) - \frac{1}{4}(6x_{23}) - \frac{1}{4}(9x_{33}) - \frac{1}{4}(7x_{43}) - \frac{1}{4}(8x_{53}) - \frac{1}{4}(10x_{63}) - \frac{1}{4}(12x_{73}) - \frac{1}{4}(5x_{83}) - \frac{1}{4}(9x_{93}) - \frac{1}{4}(10x_{10,3}) - \frac{1}{4}(6y_{13}) - \frac{1}{4}(6y_{23}) - \frac{1}{4}(9y_{33}) - \frac{1}{4}(7y_{43}) - \frac{1}{4}(8y_{53}) - \frac{1}{4}(10y_{63}) - \frac{1}{4}(12y_{73}) - \frac{1}{4}(5y_{83}) - \frac{1}{4}(9y_{93}) - \frac{1}{4}(10y_{10,3}) + e^- - e^+ = 1$$

$$5 - \frac{1}{4}(6x_{14}) - \frac{1}{4}(6x_{24}) - \frac{1}{4}(9x_{34}) - \frac{1}{4}(7x_{44}) - \frac{1}{4}(8x_{54}) - \frac{1}{4}(10x_{64}) - \frac{1}{4}(12x_{74}) - \frac{1}{4}(5x_{84}) - \frac{1}{4}(9x_{94}) - \frac{1}{4}(10x_{10,4}) - \frac{1}{4}(6y_{14}) - \frac{1}{4}(6y_{24}) - \frac{1}{4}(9y_{34}) - \frac{1}{4}(7y_{44}) - \frac{1}{4}(8y_{54}) - \frac{1}{4}(10y_{64}) - \frac{1}{4}(12y_{74}) - \frac{1}{4}(5y_{84}) - \frac{1}{4}(9y_{94}) - \frac{1}{4}(10y_{10,4}) + e^- - e^+ = 1$$

$$5 - \frac{1}{4}(6x_{15}) - \frac{1}{4}(6x_{25}) - \frac{1}{4}(9x_{35}) - \frac{1}{4}(7x_{45}) - \frac{1}{4}(8x_{55}) - \frac{1}{4}(10x_{65}) - \frac{1}{4}(12x_{75}) - \frac{1}{4}(5x_{85}) - \frac{1}{4}(9x_{95}) - \frac{1}{4}(10x_{10,5}) - \frac{1}{4}(6y_{15}) - \frac{1}{4}(6y_{25}) - \frac{1}{4}(9y_{35}) - \frac{1}{4}(7y_{45}) - \frac{1}{4}(8y_{55}) - \frac{1}{4}(10y_{65}) - \frac{1}{4}(12y_{75}) - \frac{1}{4}(5y_{85}) - \frac{1}{4}(9y_{95}) - \frac{1}{4}(10y_{10,5}) + e^- - e^+ = 1$$

$$\begin{aligned}
& 5 - \frac{1}{4}(6x_{16}) - \frac{1}{4}(6x_{26}) - \frac{1}{4}(9x_{36}) - \frac{1}{4}(7x_{46}) - \frac{1}{4}(8x_{56}) - \frac{1}{4}(10x_{66}) - \frac{1}{4}(12x_{76}) - \frac{1}{4}(5x_{86}) - \\
& \frac{1}{4}(9x_{96}) - \frac{1}{4}(10x_{10,6}) - \frac{1}{4}(6y_{16}) - \frac{1}{4}(6y_{26}) - \frac{1}{4}(9y_{36}) - \frac{1}{4}(7y_{46}) - \frac{1}{4}(8y_{56}) - \frac{1}{4}(10y_{66}) - \\
& \frac{1}{4}(12y_{76}) - \frac{1}{4}(5y_{86}) - \frac{1}{4}(9y_{96}) - \frac{1}{4}(10y_{10,6}) + e^- - e^+ = 1
\end{aligned}$$

### 7.2.3 Öncelik kısıtları

Modele göre en fazla 6 iş istasyonu olan hattın yapılacak işler arasındaki öncelik ilişkilerine göre oluşturulan kısıtları şöyledir:

$$\begin{aligned}
6x_{11} - 6x_{61} + 5x_{12} - 5x_{62} + \dots + x_{16} - x_{66} &\geq 0 \\
6x_{21} - 6x_{31} + 5x_{22} - 5x_{32} + \dots + x_{26} - x_{36} &\geq 0 \\
6x_{31} - 6x_{41} + 5x_{32} - 5x_{42} + \dots + x_{36} - x_{46} &\geq 0 \\
6x_{41} - 6x_{51} + 5x_{42} - 5x_{52} + \dots + x_{46} - x_{56} &\geq 0 \\
6x_{51} - 6x_{61} + 5x_{52} - 5x_{62} + \dots + x_{56} - x_{66} &\geq 0 \\
6x_{61} - 6x_{71} + 5x_{62} - 5x_{72} + \dots + x_{66} - x_{76} &\geq 0 \\
6x_{71} - 6x_{81} + 5x_{72} - 5x_{82} + \dots + x_{76} - x_{86} &\geq 0 \\
6x_{81} - 6x_{91} + 5x_{82} - 5x_{92} + \dots + x_{86} - x_{96} &\geq 0 \\
6x_{91} - 6x_{10,1} + 5x_{92} - 5x_{10,2} + \dots + x_{96} - x_{10,6} &\geq 0 \\
-6y_{11} + 6y_{61} - 6y_{12} + 6y_{62} - \dots - y_{16} + y_{66} &\geq 0 \\
-6y_{21} + 6y_{31} - 6y_{22} + 6y_{32} - \dots - y_{26} + y_{36} &\geq 0 \\
-6y_{31} + 6y_{41} - 6y_{32} + 6y_{42} - \dots - y_{36} + y_{46} &\geq 0 \\
-6y_{41} + 6y_{51} - 6y_{42} + 6y_{52} - \dots - y_{46} + y_{56} &\geq 0 \\
-6y_{51} + 6y_{61} - 6y_{52} + 6y_{62} - \dots - y_{56} + y_{66} &\geq 0 \\
-6y_{61} + 6y_{71} - 6y_{62} + 6y_{72} - \dots - y_{66} + y_{76} &\geq 0 \\
-6y_{71} + 6y_{81} - 6y_{72} + 6y_{82} - \dots - y_{76} + y_{86} &\geq 0
\end{aligned}$$

$$-6y_{81} + 6y_{91} - 6y_{82} + 6y_{92} - \dots - y_{86} + y_{96} \geq 0$$

$$-6y_{91} + 6y_{10,1} - 6y_{92} + 6y_{10,2} - \dots - y_{96} + y_{10,6} \geq 0$$

#### 7.2.4 İstasyon kısıtları

En fazla 6 en az 4 iş istasyonlu montaj hattında, işlerin gerçek öncelik diyagramı ve hayalî öncelik diyagramından atanmalarını belirleyen kısıtlar şu şekildedir:

$$x_{11} + x_{21} + \dots + x_{10,1} - 10O_1 \geq -9$$

$$x_{12} + x_{22} + \dots + x_{10,2} - 10O_2 \geq -9$$

$$x_{13} + x_{23} + \dots + x_{10,3} - 10O_3 \geq -9$$

$$x_{14} + x_{24} + \dots + x_{10,4} - 10O_4 \geq -9$$

$$x_{15} + x_{25} + \dots + x_{10,5} - 10O_5 \geq -9$$

$$x_{16} + x_{26} + \dots + x_{10,6} - 10O_6 \geq -9$$

$$x_{11} + x_{21} + \dots + x_{10,1} - 10O_1 \leq 0$$

$$x_{12} + x_{22} + \dots + x_{10,2} - 10O_2 \leq 0$$

$$x_{13} + x_{23} + \dots + x_{10,3} - 10O_3 \leq 0$$

$$x_{14} + x_{24} + \dots + x_{10,4} - 10O_4 \leq 0$$

$$x_{15} + x_{25} + \dots + x_{10,5} - 10O_5 \leq 0$$

$$x_{16} + x_{26} + \dots + x_{10,6} - 10O_6 \leq 0$$

$$y_{11} + y_{21} + \dots + y_{10,1} - 10P_1 \geq -9$$

$$y_{12} + y_{22} + \dots + y_{10,2} - 10P_2 \geq -9$$

$$y_{13} + y_{23} + \dots + y_{10,3} - 10P_3 \geq -9$$

$$y_{14} + y_{24} + \dots + y_{10,4} - 10P_4 \geq -9$$

$$y_{15} + y_{25} + \dots + y_{10,5} - 10P_5 \geq -9$$

$$y_{16} + y_{26} + \dots + y_{10,6} - 10P_6 \geq -9$$

$$y_{11} + y_{21} + \dots + y_{10,1} - 10P_1 \leq 0$$

$$y_{12} + y_{22} + \dots + y_{10,2} - 10P_2 \leq 0$$

$$y_{13} + y_{23} + \dots + y_{10,3} - 10P_3 \leq 0$$

$$y_{14} + y_{24} + \dots + y_{10,4} - 10P_4 \leq 0$$

$$y_{15} + y_{25} + \dots + y_{10,5} - 10P_5 \leq 0$$

$$y_{16} + y_{26} + \dots + y_{10,6} - 10P_6 \leq 0$$

$$O_1 + P_1 - Z_1 - 2S_1 = 0$$

$$O_2 + P_2 - Z_2 - 2S_2 = 0$$

$$O_3 + P_3 - Z_3 - 2S_3 = 0$$

$$O_4 + P_4 - Z_4 - 2S_4 = 0$$

$$O_5 + P_5 - Z_5 - 2S_5 = 0$$

$$O_6 + P_6 - Z_6 - 2S_6 = 0$$

$$3 - \frac{1}{2}(Z_1 + S_1) - \frac{1}{2}(Z_2 + S_2) - \frac{1}{2}(Z_3 + S_3) - \frac{1}{2}(Z_4 + S_4) - \frac{1}{2}(Z_5 + S_5) - \frac{1}{2}(Z_6 + S_6) +$$

$$d^- - d^+ = 1$$

### 7.2.5 Zorluk derecesi kısıtı

Probleme göre bir istasyondaki zaman ağırlıklı zorluk derecesi en fazla 100, en az 48 olduğundan dolayı  $V$  ve  $V^o$  şu değerleri alır:

$$V = \frac{1}{52} \text{ ve } V^o = \frac{100}{52} = \frac{25}{13}$$

$$V^o - V \left( \sum_{i=1}^n f_i(x_{ij} + y_{ij}) \right) + a^- - a^+ = 1$$

$$V = \frac{1}{F_{maks} - F_{min}} \text{ ve } V^o = V \times F_{maks}$$

$$\begin{aligned} & \frac{25}{13} - \frac{1}{52} (24 x_{11}) - \frac{1}{52} (18 x_{21}) - \frac{1}{52} (45 x_{31}) - \frac{1}{52} (21 x_{41}) - \frac{1}{52} (40 x_{51}) - \frac{1}{52} (40 x_{61}) - \\ & \frac{1}{52} (60 x_{71}) - \frac{1}{52} (15 x_{81}) - \frac{1}{52} (27 x_{91}) - \frac{1}{52} (50 x_{10,1}) - \frac{1}{52} (24 y_{11}) - \frac{1}{52} (18 y_{21}) - \\ & \frac{1}{52} (45 y_{31}) - \frac{1}{52} (21 y_{41}) - \frac{1}{52} (40 y_{51}) - \frac{1}{52} (40 y_{61}) - \frac{1}{52} (60 y_{71}) - \frac{1}{52} (15 y_{81}) - \\ & \frac{1}{52} (27 y_{91}) - \frac{1}{52} (50 y_{10,1}) + a^- - a^+ = 1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{25}{13} - \frac{1}{52} (24 x_{12}) - \frac{1}{52} (18 x_{22}) - \frac{1}{52} (45 x_{32}) - \frac{1}{52} (21 x_{42}) - \frac{1}{52} (40 x_{52}) - \frac{1}{52} (40 x_{62}) - \\ & \frac{1}{52} (60 x_{72}) - \frac{1}{52} (15 x_{82}) - \frac{1}{52} (27 x_{92}) - \frac{1}{52} (50 x_{10,2}) - \frac{1}{52} (24 y_{12}) - \frac{1}{52} (18 y_{22}) - \\ & \frac{1}{52} (45 y_{32}) - \frac{1}{52} (21 y_{42}) - \frac{1}{52} (40 y_{52}) - \frac{1}{52} (40 y_{62}) - \frac{1}{52} (60 y_{72}) - \frac{1}{52} (15 y_{82}) - \\ & \frac{1}{52} (27 y_{92}) - \frac{1}{52} (50 y_{10,2}) + a^- - a^+ = 1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{25}{13} - \frac{1}{52} (24 x_{13}) - \frac{1}{52} (18 x_{23}) - \frac{1}{52} (45 x_{33}) - \frac{1}{52} (21 x_{43}) - \frac{1}{52} (40 x_{53}) - \frac{1}{52} (40 x_{63}) - \\ & \frac{1}{52} (60 x_{73}) - \frac{1}{52} (15 x_{83}) - \frac{1}{52} (27 x_{93}) - \frac{1}{52} (50 x_{10,3}) - \frac{1}{52} (24 y_{13}) - \frac{1}{52} (18 y_{23}) - \\ & \frac{1}{52} (45 y_{33}) - \frac{1}{52} (21 y_{43}) - \frac{1}{52} (40 y_{53}) - \frac{1}{52} (40 y_{63}) - \frac{1}{52} (60 y_{73}) - \frac{1}{52} (15 y_{83}) - \\ & \frac{1}{52} (27 y_{93}) - \frac{1}{52} (50 y_{10,3}) + a^- - a^+ = 1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{25}{13} - \frac{1}{52} (24 x_{14}) - \frac{1}{52} (18 x_{24}) - \frac{1}{52} (45 x_{34}) - \frac{1}{52} (21 x_{44}) - \frac{1}{52} (40 x_{54}) - \frac{1}{52} (40 x_{64}) - \\ & \frac{1}{52} (60 x_{74}) - \frac{1}{52} (15 x_{84}) - \frac{1}{52} (27 x_{94}) - \frac{1}{52} (50 x_{10,4}) - \frac{1}{52} (24 y_{14}) - \frac{1}{52} (18 y_{24}) - \\ & \frac{1}{52} (45 y_{34}) - \frac{1}{52} (21 y_{44}) - \frac{1}{52} (40 y_{54}) - \frac{1}{52} (40 y_{64}) - \frac{1}{52} (60 y_{74}) - \frac{1}{52} (15 y_{84}) - \\ & \frac{1}{52} (27 y_{94}) - \frac{1}{52} (50 y_{10,4}) + a^- - a^+ = 1 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
& \frac{25}{13} - \frac{1}{52} (24 x_{15}) - \frac{1}{52} (18 x_{25}) - \frac{1}{52} (45 x_{35}) - \frac{1}{52} (21 x_{45}) - \frac{1}{52} (40 x_{55}) - \frac{1}{52} (40 x_{65}) - \\
& \frac{1}{52} (60 x_{75}) - \frac{1}{52} (15 x_{85}) - \frac{1}{52} (27 x_{95}) - \frac{1}{52} (50 x_{10,5}) - \frac{1}{52} (24 y_{15}) - \frac{1}{52} (18 y_{25}) - \\
& \frac{1}{52} (45 y_{35}) - \frac{1}{52} (21 y_{45}) - \frac{1}{52} (40 y_{55}) - \frac{1}{52} (40 y_{65}) - \frac{1}{52} (60 y_{75}) - \frac{1}{52} (15 y_{85}) - \\
& \frac{1}{52} (27 y_{95}) - \frac{1}{52} (50 y_{10,5}) + a^- - a^+ = 1 \\
& \frac{25}{13} - \frac{1}{52} (24 x_{16}) - \frac{1}{52} (18 x_{26}) - \frac{1}{52} (45 x_{36}) - \frac{1}{52} (21 x_{46}) - \frac{1}{52} (40 x_{56}) - \frac{1}{52} (40 x_{66}) - \\
& \frac{1}{52} (60 x_{76}) - \frac{1}{52} (15 x_{86}) - \frac{1}{52} (27 x_{96}) - \frac{1}{52} (50 x_{10,6}) - \frac{1}{52} (24 y_{16}) - \frac{1}{52} (18 y_{26}) - \\
& \frac{1}{52} (45 y_{36}) - \frac{1}{52} (21 y_{46}) - \frac{1}{52} (40 y_{56}) - \frac{1}{52} (40 y_{66}) - \frac{1}{52} (60 y_{76}) - \frac{1}{52} (15 y_{86}) - \\
& \frac{1}{52} (27 y_{96}) - \frac{1}{52} (50 y_{10,6}) + a^- - a^+ = 1
\end{aligned}$$

### 7.3 Çözüm Sonucu

Problemdeki matematiksel model LINGO 13.0 programıyla çözülmüş ve sonuçlar Çizelge 7.9'da gösterilmiştir.

**Çizelge 7.9 : Sonuçlar.**

	Gerçek Öncelik Diyagramından Atanan Görevler	Hayali Öncelik Diyagramından Atanan Görevler	İstasyon Süresi	Zaman Ağırlıklı Zorluk Derecesi	Birim Saniyedeki Zorluk Derecesi
İstasyon 1	2	10	16	68	4,25
İstasyon 2	3,4		16	68	4,25
İstasyon 3	5	9	17	67	3,94
İstasyon 4	1,6		16	64	4
İstasyon 5	7	8	17	75	4,41

En düşük 4, en fazla 6 istasyona izin verilen problemin çözümü sonucunda 5 istasyon yeterli gelmiştir. En az 16 saniye, en fazla 20 saniye olması istenen çevrim süresi 17 saniye olarak bulunmuş ve istasyonlar arası bekleme süresi en fazla 1 saniye olarak bulunmuştur. Yapılan işlerin zorluk derecesi ise iş istasyonları arasında dengeli bir şekilde dağılmıştır.



## **8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER**

### **8.1 Sonuçlar**

Gün geçtikçe giderek daha zor koşulların ortaya çıktığı rekabetçi ortamda şirketlerin ayakta durabilmeleri için kaynaklarını en etkin şekilde kullanması oldukça önemlidir. Montaj hatları, üretimde mâliyetlerin düşürülmesi için üzerinde çalışma yapılması gereken en önemli üretim sistemleridir. Dolayısıyla, kurulumu oldukça pahalı olan montaj hatlarının en başta etkin bir şekilde düzenlenmesi gerekmektedir.

Literatürde, montaj hattı dengeleme problemleri üzerine birçok çalışmanın yapılmış olmasıyla birlikte insan etmenini dikkate alan çalışmaların sayısı da oldukça azdır. Bu çalışmada, BUMHDP ergonomik koşullar da gözönünde bulundurularak bulanık mantık yaklaşımı ve hedef programlama yöntemiyle çözülmüştür.

Çalışmada bulanık mantık yaklaşımının benimsenmesinin nedeni gerçek yaşamda deterministik değerlerin elde edilmesinin güç olması ve bulanık mantığın karar verme sürecini kolaylaştıran esnek bir yapıya sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Bulanık mantıkta belirsiz ifâdeler matematiksel değişkenlere dönüştürülebilir. Bu çalışmada yapılan işin zorluk derecesi, çevrim süresi ve istasyon sayısı kısıtlarıyla birlikte ele alınıp, her istasyona dengeli bir şekilde dağıtılmıştır. Problemden bulanık mantıkla sayısallaştırılan belirsiz ifâdeler, Charnes ve Cooper'ın (1961) geliştirdiği formülle hedef programlama modeline, Zimmermann'ın (1978) yaklaşımıyla bulanık hedef programlamaya dönüştürülmüş ve Chang'ın (2007) geliştirdiği yöntemle doğrusallaştırılıp LINGO paket programı yardımıyla çözülmüştür.

Çalışmanın sonucu olarak, istasyonlar arası bekleme süresi en aza indirilmiş ve istasyonlara yük dağılımı dengeli bir şekilde yapılmıştır.

### **8.2 Öneriler**

Bu çalışmada basit U-tipi montaj hattı dengeleme problemleri ele alınmış olup, bundan sonraki çalışmalarda çok modelli montaj hatları için dengeleme çalışmaları yapılabilir. Çalışmada RULA yöntemiyle vücut duruş şekillerine göre yapılan işlerin

zorlukları belirlenmiştir. Bundan sonraki çalışmalarda yapılan işin risk düzeyi ve tekdüzelik (monotonluk) düzeyi de RULA yöntemine benzer sezgisel yaklaşımlarla hesaplanabilir. Böylece ergonomik düşünce kapsamı genişletilmiş olacaktır.

## KAYNAKLAR

- Acar, N.** (2000). Üretim Plânlama Yöntem ve Uygulamaları, MPM Yayınları, No:280, Ankara.
- Acar, N. ve Eştaş, S.** (1986). Kesikli Seri Üretim Sistemlerinde Plânlama ve Kontrol Çalışmaları, Milli Produktivite Merkezi Yayınları, No:309, Ankara, 2. Basım.
- Aksoy, E.** (1997). Montaj Hattı Dengelemede Çok Kriterli Karar Verme Yöntemlerinin Kullanılması, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.Ü. İşletme Fakültesi, İstanbul.
- Altaş, İ.** (1999). Bulanık Mantık : Bulanıklılık Kavramı, Enerji, Elektrik, Elektromekanik-3e, Sayı 62, Sayfalar:80-85, Bileşim Yayıncılık A.Ş., İstanbul
- Bağırkan, Ş.** (1983). Karar Verme, Der Yayınları, İstanbul
- Baskak, M.** (1991). Montaj Hatlarının Dengelenmesinde Çok Amaçlı Bir Yaklaşım, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- Becker, C. ve Scholl, A.** (2006). A Survey on Problems and Methods in Generalized Assembly Line Balancing, *European Journal of Operational Research*, 694-715.
- Bedworth, D.D. ve Bailey, J.E.,** (1987). Integrated Production Control Systems, John Wiley and Sons Inc., Singapore.
- Chaffin, D.B.** (1973). Localized muscle fatigue definition and measurement, *J Occup Med* Cilt 15, 346-354
- Chang, C.T.** (2007). Binary fuzzy goal programming, *European Journal of Operational Research* 180, Cilt 1, 29-37.
- Charnes, A. ve Cooper, W.W.** (1961). Management Model and Industrial Application of Linear Programming, Cilt 1, Wiley, New York
- Drury, C.** (1987). A biomechanical evaluation of the repetitive motion injury potential of industrial jobs, *Semin Occup Med*, Basım 2 Cilt 1, 41-47
- Elmas, Ç.** (2007). Yapay Zeka Uygulamaları, Cilt 1, Bölüm 7: Bulanık Mantık, 185-199, Seçkin Yayıncılık
- Elwoods, B.,** (1965). Modern Production Management, John Willey and Sons, Inc.
- Everett, E.A. ve Ronald J.E.** (1992). Production and Operations Management, Prentice Hall Inc.,New Jersey.
- Ghosh, D., Sharma, D.K. ve Mattison, D.M.** (2005). Goal Programming Formulation in Nutrient Management for Rice Production in West Bengal”, *International Journal of Production Economics* 95, 1-7.

- Girginer, N. ve Kaygısız, Z.** (2009). Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi, 10(1), Sayfa 218-219
- Grandjean, E., Hunting, W. ve Piderman, M.** (1983). Workstation Design: Preferred Settings and Their Effects, Human Factors, Cilt 25, 161-175
- Günay, K., Çetin, D. ve Baykoç, F.** (2004). Montaj Hattı Dengelemede Geleneksel ve U Tipi Hatların Karşılaştırılması ve Bir Uygulama Çalışması Teknoloji, Cilt 7, Sayı 3, 351-359
- Güner, H.** (2005). Bulanık AHP ve Bir İşletme için Tedarikçi Seçimi Problemine Uygulanması, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli, 130s
- Hagberg, M.** (1981). Electromyographic signs of shoulder muscular fatigue in two elevated arm positions, Am. J. Phys. Med., Cilt 60, 111-121
- Halaç, O.** (1992). Kantitatif Karar Verme Teknikleri, 3. Basım, İstanbul.
- Herberts, P., Kadefors, R. ve Broman, H.** (1980). Arm positioning in manual tasks: An electromyographic study of muscle fatigue, Ergonomics, Cilt 23, 655-665
- Jones, D. F., Mirrazavi, S.K. ve Tamiz, M.** (2002). Multi-Objective Meta Heuristics: An Overview of the Current State-Of-The Art, European Journal of Operational Research, 137(1), 1–9.
- Kara, Y., Paksoy, T. ve Chang, C.T.** (2009). Binary fuzzy goal programming approach to single model stragihit and U-shaped assembly line balancing, European Journal of Operational Research, 195, 335-347.
- Kaymak, U. ve Sousa, J.M.** (2001). Weighted Constraints in Fuzzy Optimization, ERIM Report Series Research in Management, ERS-2001-19-LIS, 21p
- Kemmlert, K. ve Kilbom, A.** (1986). Method for the identification of musculoskeletal stress factors which may have injurious effects, National Board of Occupational Safety and Health. Research Department, Work Physiology Unit, Solna. Sweden
- Keskintürk, T. ve Küçük, B.** (2006). Karışık Modelli Montaj Hatlarının Genetik Algoritma Kullanılarak Dengelenmesi, İstanbul Üniversitesi İşletme Fakültesi, İstanbul
- Kilbom, A., Persson, I. ve Jonsson, B.G.** (1986). Disorders of the cervicobrachial region among workers in the electronics industry, Industrial Ergonomics, Cilt 1, 37-47
- Leung, Stephen, C. H., Yue, W.U. ve Lai, K. K.** (2001). Multi-Site Aggregate Production Planning with Multiple Objectives: A Goal Programming Approach, Production Planning & Control, 14(5), 425– 436.
- Mamdani, E. H.** (1974). Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant, Proc. Iee, 1585-1588
- Maynard, H.B.** (1969). Industrial Engineering Handbook, Mc GrawHill Company, Newyork.

- McAtamney, L. ve Corlett, E.N.** (1993). RULA: A Survey Method for the Investigation of Work-Related Upper Limb Disorders, *Applied Ergonomics*, Nottingham, 91-99
- McPhee, B.J.** (1987). Work-related musculoskeletal disorders of the neck and upper extremities in workers engaged in light, highly repetitive work, *Workrelated Musculoskeletal Disorders*, Bonn, 244-258
- Özkan, M.** (2003). Bulanık Hedef Programlama, Ekin Kitabevi, Bursa
- Schuldt, K., Ekholm, J., Harms-Ringdahl, K., Arborelius, U.P. ve Nemeth, G.** (1987). "Influence of sitting postures on neck and shoulder EMG during arm-hand work movements, *Clin Biomech*, Cilt 2, 126-139
- Tamiz, M. ve Jones, D.F.** (1996). An Overview of Current Solution Methods and Modelling Practices, *Goal Programming, Multi-Objective Programming and Goal Programming: Theories and Applications*, Springer-Verlag, Germany, 198-211.
- Tanyaş M. ve Baskak, M.** (2006). Üretim Plânlama ve Kontrol, İrfan Yayımcılık, İstanbul.
- Taşıyıcı, G.** (2004). Tek modelli Montaj Hattı Dengeleme Problemlerinin Çözülmesi için Çok Amaçlı Genetik Algoritma Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- Tichauer, E.R.** (1966). Some Aspects of Stress on Forearm and Hand in Industry, *J. Occup Med*, Cilt 8, pp 63-71
- Timur, H.** (1990). Yönetimde Karar Verme ve Problem Çözme, Hacettepe Üniversitesi, İİBF Dergisi, C:8, S:2, Ankara
- Ural, G.F.** (2006). Bulanık Doğrusal Programlama Kullanılarak Bir Sanayi Kuruluşunda Üretim Planlama Çalışmasının Gerçekleştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Kocaeli, 144s
- Urban, T.L.** (1998) Optimal Balancing of U-Shaped Assembly Lines, *Management Science*, 738–741.
- Uzmen, M.** (1990). Montaj Hattı Dengeleme, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Yılmaz, Z.** (1995). Yatırım Proje Analizi ve Yönetimi, Uludağ Üniversitesi, Güçlendirme Vakfı, Yayın No: 35
- Zimmermann, H.J.** (1978). Fuzzy Programming and Linear Programming with Several Objective Functions, *Fuzzy Sets and Systems*, 45–55.
- Atasagun, Y.** (2010). U-Tipi Yerleşim ve Shojinka, Sunum, Selçuk Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Bölümü, Adres: <http://www.yalindusunce.com/en/publishes/ver-bankasi/64-u-tipi-yerleim-a-shojinka.html>





## **ÖZGEÇMİŞ**

**Ad Soyad:** Emre Çelik  
**Doğum Yeri ve Tarihi:** KONYA-1985  
**E-Posta:** chelik332@yahoo.com  
**Lisans:** Marmara Üniversitesi - Endüstri Mühendisliği  
(2008)