

7357

TEK MODEL MONTAJ HATTI DENGELEME  
METOTLARI VE BİR UYGULAMA

YÜKSEK LİSANS TEZİ  
(ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ)

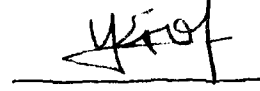
Hadi GÖKÇEN

Mayıs 1989

**Y. G.**  
**Yükseköğretim Kurula**  
**Dokümantasyon Merkezi**

GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.



Danışman

Doç. Dr. Yalçın EROL

Sınav Jürisi

Başkan : Doç. Dr. Fevzi KUTAY



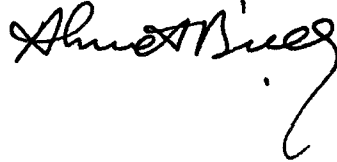
Üye : Doç. Dr. Yalçın EROL



Üye : Yrd. Doç. Dr. Orhan TÜRKBEY



Bu Tez Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Esaslarına uygundur.



TEK-MODEL MONTAJ HATTI DENGELEME  
METOTLARI VE BİR UYGULAMA  
(Yüksek Lisans Tezi)

Hadi GÖKÇEN  
GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
Mayıs 1989

ÖZ

Montaj üretimi yapan Sanayilerimiz için büyük problemler teşkil eden boş zamanın yok edilmesi, onun getirdiği maliyet külfetinden kurtulmak ve üretimin daha düzenli bir şekilde akışını temin etmek, montaj hattı dengeleme metotları ile mümkündür. İşte bu problemlere ışık tutabilmek amacıyla, bu tezde, değişik problem durumlarına göre, tek model montaj hattı dengeleme metotlarından seçilen 15 metot incelenmiş ve değerlendirilmeleri yapılmıştır. Metotların değerlendirilmeleri neticesinde uygulamaya uygun etkin bir metot seçilmiş ve Römork Montaj üretiminin gerçekleştirildiği hat üzerinde uygulanmıştır.

SINGLE MODEL ASSEMBLY LINE BALANCING  
METHODS AND AN APPLICATION

(M. Sc. Thesis)

Hadi GÖKÇEN  
GAZI UNIVERSITY  
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY  
April 1989

ABSTRACT

Elimination of Idle time in respect to the work items having more serious problems on the part of our Industries which have been conducting assembly production, and further becoming free and harmless from the financial burden resulted there of, as well as securing and executting perfect flow of assembly production more efficient than that of made before can be attained and made possible only by application and implementation of Assembly Line Balancing methods. For the purpose of setting forth effective elucidations and clarifications in solving the foregoing discrepancies and problems in the present thesis 15 different methods selected amongst the single model Assembly Line Balancing methods in reference to various alternative problematic circumstances, and as such have been examined and evaluated accordingly. As a result of these evaluations obtained, an effective and efficient method has been selected which suits best implementation and then such method has been implemented ant tried on a line where production of trailer assembly work being carried out.

## TEŞEKKÜR

Tez çalışmamın başından sonuna kadar benden hiçbir yardımı esirgemeyen ve değerli görüşleriyle beni yönlendiren tez Hocam Sayın Doç. Dr. Yalçın EROL'a şükranlarımı sunarken, çalışmama gösterdiği hoşgörü ve anlayışla yardımcı olan Sayın Hocam Doç. Dr. Fevzi KUTAY'a ve bölümdeki bütün hocalarıma, ayrıca çalışmam boyunca kendisinden büyük moral ve destek gördüğüm Eşim Songül GÖKÇEN'e teşekkürü bir borç bilirim.

## SEMBOLLER

<u>Sembol</u>	<u>:</u>	<u>Anlamı</u>
$f_b$		Parça besleme hızı (Parça/dk)
$V_b$		Şeridin hareket hızı (metre/dk)
$S_p$		Parçalar arası mesafe (m/parça)
$T_t$		Tolerans süresi (iki parça arasında geçen süre veya operatörün bir parçayı işleyebilmesi için verilen süre (dk)
$L_s$		İş istasyonu uzunluğu (m)
$W$		İşçi sayısı (Hat için)
$Q$		Tek bir birim üzerinde yapılması gerekli bütün işlemlerin yapılabilmesi için gerekli standart süre
$q$		Programlanmış üretim hızı
$C$		Çevrim süresi
$I$		İş elemanı sayısı
$K$		İş istasyonu sayısı
$I_k$		k. iş istasyonundaki iş elemanları sayısı
$i=1 \dots I$		$I$ Sayıda iş elemanından oluşan dizi
$k=1 \dots K$		$K$ sayıda istasyondan oluşan dizi
$h=1 \dots I_k$		k. iş istasyonundaki iş elemanları dizisi
$t$		Çalışma saatleri zamanı ölçüsü 1.2.... $T'$
$t_i$		i. iş elemanı için harcanan süre
$t_{max}$		Maksimum işlem zamanı
$S_k$		k. istasyondaki elemanları tamamlamak için gerekli süre (k. istasyonun istasyon zamanı)

$S_{max}$	Maksimum istasyon zamanı
$S_{min}$	Minimum istasyon zamanı
$S$	İstasyon zamanı
$d_k$	k. istasyondaki çevrim başına atıl zaman
$d$	Sistemin etkin olmama durumunu ölçen oran
$e$	Etkinlik
$K^*$	En iyi istasyon sayısı
$C^*$	En iyi çevrim zamanı
$X_{OS}$	Dengelenmiş bir hatta istasyonlar arası optimum güvenlik stok kapasitesi
$C_s$	İstasyon sayısına bağlı olarak değişen bir sabit $C_s=0.39$ 4 istasyon için $C_s=0.43$ 6 istasyon için
$C_z$	Tesislerin boş kalmasının birim zaman maliyeti
$C_{et}$	Birim zamanda envanter taşıma maliyeti
$T(K,C)$	İş istasyonu sayısı ve çevrim zamanına göre toplam maliyet
$k_1, k_2, k_3$	Maliyet katsayıları
$ P $	Matris haline getirilen öncelik diyagramı
$P_{ij}$	i. satır j. sütun $ P $ matris elemanı
$ S $	Çözüm matrisi
$S_{ij}$	i. satır j. sütun çözüm matris elemanı
$ B $	Aday matris
$b_{ij}$	i. satır j. sütun aday matris elemanı
$d_j$	j. sütun için atıl zaman
$R$	Çözümünden çıkan ve giren elemanlar arasındaki fark

PA	Pozisyon ağırlığı
$t_j$	i. den sonra gelen eleman zamanı
P	Öncelik matrisi
F	Takipçi (Successor) matris
SI	Düzensizlik indeksi
$F_{ratio}$	Esneklik oranı
$C(i)$	i düğümündeki iş elemanları
$t[C(i)]$	i.düğümdeki iş elemanlarının zamanlarının toplamı
$w_i$	Eleman listesindeki i. iş elemanı
$M_i$	$w_i$ 'nin performans kısıtlamaları
$w_{kh}$	k. istasyondaki h. iş elemanı
$t_{kh}$	$w_{kh}$ için iş elemanı zamanı
$T_k = \sum t_{kh}$	k. istasyonun istasyon zamanı ( $=S_k$ )
$T = \sum t_i$	Toplam iş yükü
$m_k$	k. istasyonda çalışanların sayısı
$m_{kmax}$	k. istasyonda maksimum çalışanların sayısı
l	Aşama sıra sayısı $l=1 \dots m_{kmax}$
$R'$	Atanmamış iş elemanlarının kümesi
$w_a$	Atanmamış iş elemanları $w_a \in R$
$m = \sum m_k$	Hattaki toplam işçi sayısı
$C_u$	Çevrim zamanı üst limiti
$m_{kh}$	$w_{kh}$ daki işçilerin sayısı
$T_k(l)$	l. aşamadaki k istasyonunun zamanı
$Rt_{kh}$	$m_{kh}$ ile $w_{kh}$ in yokluk (shortage) zamanı
$Rt_{ki}$	Minimum $Rt_{kh}$ değeri
$w_k$	k. istasyondaki işgücü
$Rt_{kl}$	max $Rt_{kh}$ değeri

$H_t$	Yardım zamanı
$r$	Hesaplanan standart sapma çarpanı (tablodan bulunur)
$u_i$	Eleman zaman ortalaması
$\sigma_i^2$	Eleman zaman varyansı
$L_m$	Birim zamanda her işçinin işçilik maliyeti
$\sigma_s$	İstasyon zamanının standart sapması
$P_c$	Olasılık güvenlik seviyesi
$CV$	Değişim katsayısı
$f$	Eski grub ortalamasının, yeni eleman ortalamasına oranı
$E(TC)$	Bir birim beklenen toplam maliyet
$L_m^{TK}$	Birim işçilik maliyeti
$J_G$	G görevinin hatdışı (off-line) maliyeti
$\Sigma J_G^P[G]$	Beklenen birim noksan maliyet

## TABLolarIN LİSTESİ

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
Tablo 1. Öncelik ve Pozisyon Ağırlıkları	43
Tablo 2. Sezgisel Çözümlerin Oluşturulması	65
Tablo 3. Random Atama Sezgiselinin Kullanımı	66
Tablo 4. Eleman Zaman Ortalama ve Varyansları	103
Tablo 5. P matrisi	104
Tablo 6. F matrisi	104
Tablo 7. İstasyon Elemanları ve Zamanları	110
Tablo 8. Düzenlenmiş İstasyon Elemanları ve Zamanları	112

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 1. Kitle üretimi sistemleri	2
Şekil 2. Çok model montaj hattı	9
Şekil 3. Karışık model montaj hattı	11
Şekil 4. İstasyon zamanının bileşenleri	16
Şekil 5. İşlem sürelerinin dağılımı	17
Şekil 6. İstasyonlararası stok durumu	19
Şekil 7. Çevrim zamanı ve istasyon sayısı ilişkileri	23
Şekil 8. 10 elemanlı öncelik diyagramı	28
Şekil 9. Öncelik diyagramının sıralı sütunlar halinde gösterimi	40
Şekil 10. Sıralanmış pozisyonlu ağırlık metodu akış şeması	46
Şekil 11. P matrisi	50
Şekil 12. F matrisi	50
Şekil 13. Enbüyük küme akış şeması	60
Şekil 14. 11 elemanlı öncelik diyagramı	65
Şekil 15. Karmaşık şebeke	67
Şekil 16. PAM 1. kısım akış şeması	73
Şekil 17. PAM 2. kısım akış şeması	74
Şekil 18. Değişkenlik içinde çevrim zamanı ve ortalama eleman zamanı	80

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 19. Paralel istasyonlar ile darboğaz elemanın parçalanması	93
Şekil 20. Römork üretim hattının öncelik şeması	102



## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZ .....	iii
ABSTRACT .....	iv
TEŞEKKÜR .....	v
SEMBOLLER .....	vi
TABLolarIN LİSTESİ .....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ .....	xi
İÇİNDEKİLER .....	xiii
GİRİŞ .....	xv
BÖLÜM 1	
MONTAJ HATTI VE Dengeleme kavramları	
1.1. Giriş .....	1
1.2. Montaj Hattının Üretimdeki Yeri .....	2
1.3. Üretim Akış Hatları .....	3
1.3.1. Otomatik Hatlar .....	3
1.3.2. Montaj Hatları .....	4
1.4. Montaj Hattı Dengeleme Çalışmaları .....	11
1.5. Hat Tasarımında Yarımamül İstifleri ve İşgücü .....	17
1.6. Montaj Hattı Dengelemesinin Formüle Edilmesi .....	20
BÖLÜM 2	
MONTAJ HATTI Dengeleme METOTLARI	
2.1. Montaj Hattı Dengeleme Metodlarının Gelişimi .....	25
2.2. Tek-Model Montaj Hattı Dengeleme Metotları .....	27
2.2.1. Bryton Sezgisel Metodu .....	28

	<u>Sayfa</u>
2.2.2. Salveson Metodu .....	32
2.2.3. Jackson'un Basamak Hesaplama Metodu.	34
2.2.4. Enbüyük Aday Metodu (LCR) .....	38
2.2.5. Kılbridge ve Wester Metodu .....	39
2.2.6. Sıralanmış Pozisyonlu Ağırlık Metodu (RPW) .....	42
2.2.7. Bilgisayar Destekli Montaj Hattı Dengeleme (COMSOAL) Metodu .....	45
2.2.8. Moodie –Young Metodu .....	49
2.2.9. Höffman'ın Öncelik Matrisi Metodu...	53
2.2.10. Kritik Yol Sezgisel Metodu .....	56
2.2.11. En Büyük Küme Metodu (LSR) .....	58
2.2.12. Sezgisel Şebeke Metodu .....	62
2.2.13. Paralel Atama Metodu (PAM) .....	68
2.2.14. Doğrusal Programlama Yaklaşımı ....	75
2.2.15. Değişir Eleman Zamanlı Montaj Hattı Dengeleme .....	78
2.2.16. Diğer Montaj Hattı Dengeleme Metot- ları .....	89
2.3. Metotların Karşılaştırılması ve Değerlen- dirilmesi .....	95
BÖLÜM 3	
MONTAJ HATTI DENGELEME UYGULAMA ÇALIŞMASI	
3.1. Sistemin Tanımı .....	99
3.2. Seçilen Metodun Uygulanması .....	100
BÖLÜM 4	
SONUÇLAR VE TARTIŞMA .....	114
KAYNAKLAR .....	116
ÖZGEÇMİŞ .....	121

## G İ R İ Ő

Montaj hatlarında bir mamulun montajı, birçok parça bileşen ve alt montajın biraraya getirilmesi ve bunların üzerinde bir takım işlemlerin uygulanmasıyla gerçekleştirilir. İşlemleri yapacak olanlar, hat boyunca sıralanmış olan işçi grupları veya diğer bir deyimle istasyonlarıdır.

Mamüle göre yerleştirmede, oldukça kısa bir zamanda geniş hacimde üretim yapılmakta ise de; üretim hattı bir kere kurulduktan sonra, bu tür yerleştirmede, işleme göre yerleştirmede pek o kadar önemli olmayan bazı problemler ortaya çıkar. Bu gayet karışık problemlerden birisi de hat dengeleme problemi ki, buna işlemlerin ve istasyonların eşit zamanlar ve istenilen üretim oranını karşılamak için gerekli zamanlar bakımından dengeleme problemi de diyebiliriz.

Montaj hattında meydana gelen bu problemlere çözüm getirmekteki amaç, elemanlar arasında bulunan öncelik ve bölge kısıt şartlarını sağlayacak, her istasyondaki toplam işyükü zamanı, verilen çevrim zamanından büyük olmayacak ve montaj hattındaki istasyon sayısı minimum kılınacak şekilde, iş elemanlarını iş istasyonlarına tahsis etmektir. Elemanların istasyonlara eşit olarak tahsis edilmesi neticesinde boş zamanın, (herne kadar pratikte tamamen yok edilmesi mümkün olmasa da) minimum seviyeye indirilmesi mümkün olabilecektir.

Montaj hatları tip olarak, karışık model, tek model ve çok modellenli hatlar olmak üzere 3 kısma ayrılmışlardır. Her bir model için farklı dengeleme metotlarından bahsedilebilir.

Montaj hatlarında en az kayıp ve geçikmeyi temin edecek uygun hat dengeleme çözümlerini bulabilmek için geliştirilen tek model montaj hattı dengeleme metotlarının incelenmesi ve değerlendirilmesi tezin konusunu oluşturmaktadır.

## BÖLÜM I

### MONTAJ HATTI VE DENGELEME KAVRAMLARI

#### 1.1. Giriş

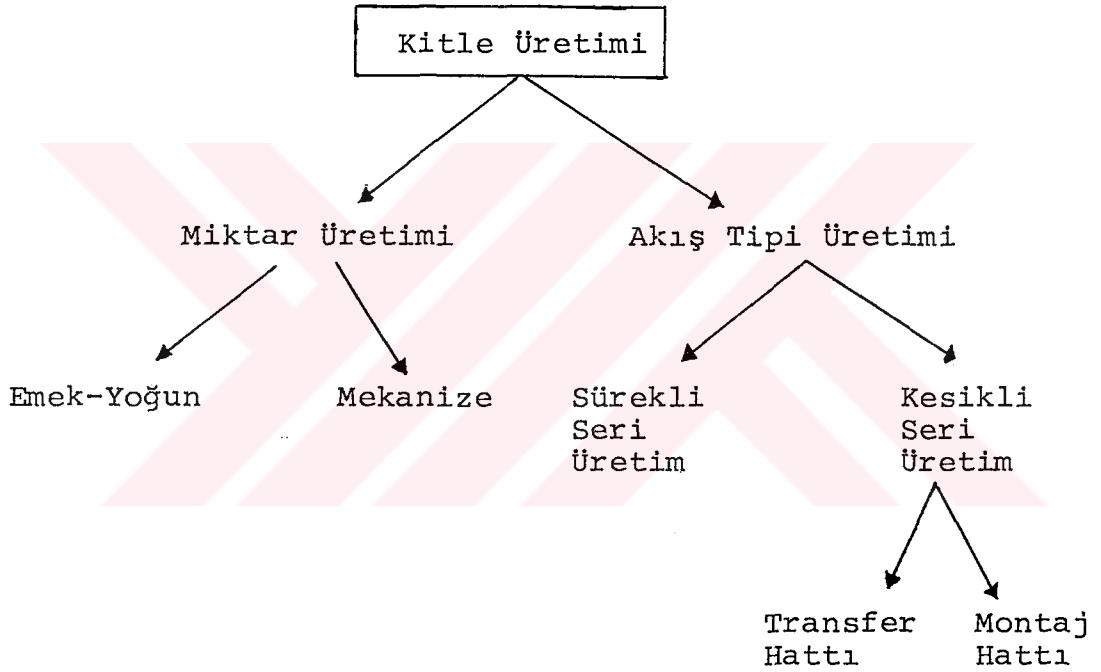
Mamule göre fabrika düzenlemesi, genellikle sürekli üretim tipine sahip sistemlerde uygulanır. Bu düzenleme işleminde amaç, üretim hattında yapılmakta olan işlerde zaman kaybını ortadan kaldırmak ya da asgari seviyeye indirmektir. Bu amacın elde edilmesi, hattın dengelenmesi ile mümkün olur. Burada hat dengelemeden kasıt; bu tür dengeleme problemlerinin genellikle Montaj Hatlarında ortaya çıkmasından dolayı montaj hatlarının dengelenmesidir.

İmalat işletmelerinin bazılarında, üretim işlemi bir hat halinde yapılır. Sürekli üretim tipi olarak adlandırılan bu tür üretim tipinde, hammadde ya da yarı-mamül bir noktadan girmekte ve bir takım işlemlere tabi tutulduktan sonra, mamül hale dönüşmüş olarak üretim sürecini terketmektedir. Mamül elde edilinceye kadar yapılan operasyonlar, bir üretim hattı (ya da montaj hattı) teşkil ederler. Bu üretim hattında genellikle birtakım aksamalar olur. İşte bu aksamaların giderilmesi, hattın dengelenmesiyle büyük ölçüde sağlanabilir. Üretim hattının temel özelliği; Belirli bir iş elemanının bir iş istasyonundan başka iş istasyonuna

aktarılarak işin sürekli bir biçimde yapılmasıdır, Sürekli veya kitle tipi üretim sistemlerinde, sistemden maksimum fayda, hattın dengesiyle sağlanır (1).

## 1.2. Montaj Hattının Üretimdeki Yeri

Kitle üretimi, bilindiği üzere seri ve kesikli üretim arasında bir üretim şeklidir. Kitle üretimi akış ve miktar üretimi olmak üzere iki kısma ayrılır.



Şekil 1. Kitle üretimi sistemleri

Özellikle karmaşık birimlerin üretilmeleri için en uygun sistem olan akış tipi sistemlerde, ürün yapılarına uygun olarak değişik tez. gah ve üretim tesisleri yer alır. Üretim, akış kuralına uygun olarak, ürünün bir seri üretim tesisinden sürekli akışıyla gerçekleştirilir. Fazla karmaşık olmayan, yapısal olarak basit ürün-

lerin büyük miktarlardaki üretimi için miktar üretimi uygundur.

Akış tipi seri üretimde temel belirleyici unsur, ürünlerin bir işlem biriminden diğerine transferidir. Bu üretim birimleri arasındaki ürün transferi, ürün akışı olarak adlandırılır (2).

Sürekli seri üretimde işlenen hammadde ve ürünler doğal yapıları itibariyle kendiliğinden akarlar (Örn: Kimyasal ürünlerin üretimi).

Kesikli- Seri üretimde son ürün, birbirlerini takip eden iş istasyonlarındaki işlemlerin yapılmasıyla oluşturulur. Montaj hattı da kesikli- seri üretim sisteminin alt kolu olarak yer almaktadır (3).

### 1.3. Üretim Akış Hatları

Akış hatları, otomatik ve otomatik olmayan hatlar olarak iki kısma ayrılırlar. Otomatik olmayan hatlar montaj hatları olarak da bilinirler.

Montaj hattı dengeleme problemi genellikle otomatik olmayan veya yarı otomatik üretim hatlarında sözkonusudur.

#### 1.3.1. Otomatik Hatlar (Transfer Hatları)

Büyük ve karmaşık makinalardan oluşan üretim hattıdır. Bu hatlar düz (in-line) ya da devirli (Rotary) tiplerinde olabilir. Ürün ya da malzemelerin bir yerden başka bir yere nakli işgücü ile değil, otomatik hareket

ve transfer yöntemiyle sağlanmaktadır. Böylece transfer hatları, transfer aletleri ile birbirine bağlanmış otomatik imalat makina serilerinin oluşturduğu üretim hatlarıdır (4).

Bu tezde, otomatik montaj hatlarının dengelenme konusu incelenmeyecektir.

### 1.3.2. Montaj Hatları

Otomatik olmayan üretim hatlarında işlerin büyük bir kısmı elle yapılır. Bu nedenle, iş hacmi küçük iş parçalarına ayrılabilir. Bu tür hatlarda iş akışı iki şekilde sağlanır.

1) Mekanik taşıyıcı olmayan hatlarda iş akışı bir istasyondan diğerine elle aktarılır. Bu tür hatlarda iş akışı dengesizdir, istasyonlar arasında stok bulundurmak gerekir; Çünkü bir istasyon kendinden önce gelen istasyondan parça beklemek zorunda kalabilir. Bazen de kendinden sonra gelen istasyon işini bitiremediği için bloklaşma olabilir.

2) Parçalar bir istasyondan diğerine şeritlerle (götürücülerle) taşınırlar. Bu durumda da bazı problemler olabilir; İşçi parça bekleyebilir veya bir istasyon meşgul olduğunda gelen parça, işlenmeden geçebilir ve böylece üretim hattından yarı işlenmiş parçalar çıkabilir. Götürücü kullanılan hatlarda üretim hızını en iyi şekilde kontrol edebilmek için parçaların giriş (besleme) hızını ayarlamak gerekir.

Buna göre, besleme hızını kontrol edebilmek için, işlem görecekt parçaları şerit üzerinde sabit zaman aralıklarıyla koymak gerekir. Böylece, parçalar şerit üzerinde arttıkça, iş istasyonundaki operatöre, herbir işi yapabilmesi için sabit ve belirli bir süre toleransı tanınmış olur. Eğer bu süre iyi ayarlanmazsa operatör boş bekler ya da parçalar işlenmeden istasyonu geçerler.

Besleme hızı iki faktöre bağlıdır.

i) Şeridin hızı,  $V_b$

ii) Parçalar arasındaki mesafe,  $S_p$

Tolerans süresi de iki faktöre bağlıdır.

i) İşin hızına (operatörün çalışma hızına)

ii) İş istasyonu uzunluğuna

Yukarıdaki ifadeler çerçevesinde aşağıdaki formüller yazılabilir.

$$f_b = V_b / S_p \quad (1.1)$$

$$T_t = L_s / V_b \quad (1.2)$$

Genellikle tolerans süresinin büyük olması arzu edilir. Böylece işçinin işi yapması için gereken sürenin değişken olmasından doğan problem çözülmüş olur (5).

Montaj hattı sistemlerinde, istasyonlar birbirlerine bağımlıdır. Her iş istasyonunda ürünü tamamlayıcı tezgah ve işgücü bulunur. Her ürün için gerekli işyükü, montaj hattındaki toplam işyükü, iş istasyonlarına eşit olarak bölünür (6).

Montaj hatlarının kurulabilmesi için bir takım önşartlar vardır. İlk olarak kitle bir talebin olması gerekir. Kitle talep, sadece talep düzeyini değil, aynı zamanda da talebin sürekliliğini vurgular. Bununla birlikte bazı durumlarda sürekli olmayan ancak yüksek düzeylerdeki talebi karşılayabilmek için de montaj hattı kurulabilir. Ancak uygulamada bu gibi durumlara pek sık rastlanmaz. Ayrıca montaj hattı sisteminin sürekli olarak işletilmeleri, aynı zamanda gerekli girdilerin (malzeme, yarımamül) istenilen yerde ve zamanda büyük ölçüde bulunmasına bağlıdır. Üretilecek ürünün yapısı da (uygunluğu) montaj hattı sistemleri için önemli bir önşarttır (4).

Montaj hattı düzenlenirken şu prensiplerin en uygun uyumuna dikkat edilir.

1. İşgücü Prensibi: Montaj hatlarında ne kadarlık bir işgücüne ihtiyaç vardır, bunlar nerelerde, ne kadar bulundurulacaklardır? Sorularına cevap aranır.

2. İş Akımı Prensibi: İşlemler belli bir iş akışını sağlamalıdır.

3. Minimum Hareket Uzaklığı: Montaj hattı üzerinde, taşıma mesafeleri, darboğaz ve depolama açısından minimum uzaklıkta olmalıdır.

4. Sabit Yok Prensibi: İşlemler son aşamaya kadar aynı rota üzerinde hareket etmelidir.

5. İşlemlerin Aynı Anda Sürdürülmesi: Montaj işlemleri, ilk istasyondan son istasyona kadar aynı anda yapılır.

6. Parçaların Değişebilirliği: Montaj işlemi sırasında bazı parçalar işlem sürekliliğini bozmadan değiştirilebilir.

7. Birim İşlem Prensipleri: Ürün üzerinde her işlem, en küçük işlem birimlerine ayrılmıştır.

8. Minimum İşlem Süresi: Montaj işlemi, mümkün olan minimum sürede bitirilmelidir. Burada işlem süreleri sabit olduğundan minimizasyon atıl zaman üzerinde yapılır (7).

Montaj hatları tek, çok ve karışık model hatlar olmak üzere sınıflandırılabilir.

Tek modellenli hatlar, basit montaj hatları olarak da isimlendirilirler ve bu tür hatlarda tek bir ürün çeşidi üretilir. Tezde de sadece basit model Montaj hatları için geliştirilen teknikler incelenecektir.

Karmaşık modellenli hatlar, karışık ve çok modellenli hatlar şeklinde ayrılmaktadırlar.

a. Çok Modellenli Hatlar

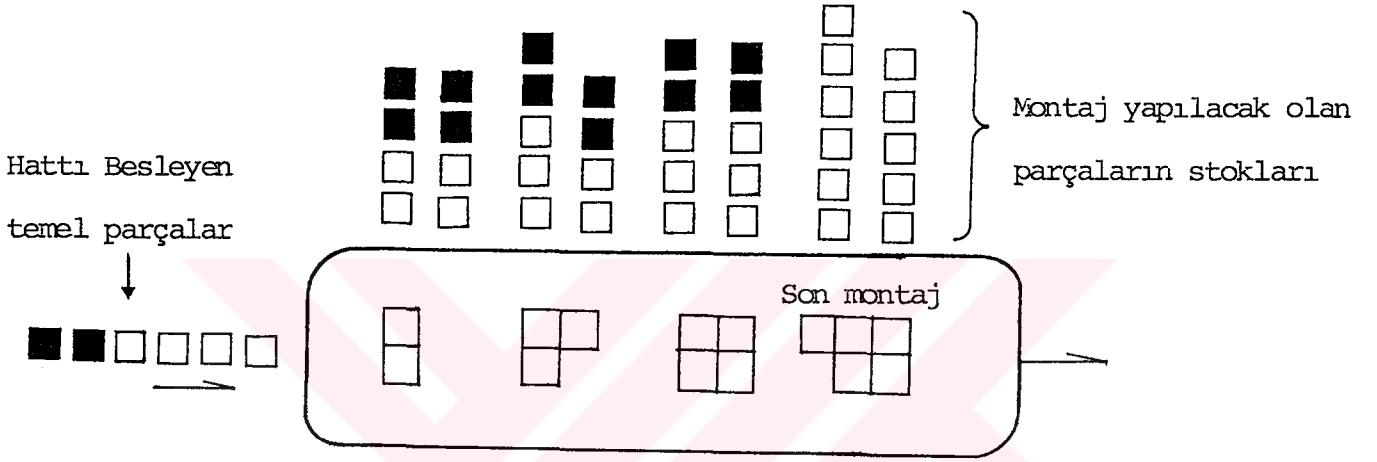
Çok modellenli hatta, değişik modeller üretilir. Değişik modellerin üretimi ayrı ayrı kabileler halinde ve değişik zamanlarda yapılır. Belirli bir zamanda bir model parti halinde imal edilir, arkadan diğer modellerle-

re geçilir. Modeller birbirlerine hiçbir zaman karıştırılmazlar. Modeller farklı ürünler ya da aynı ürünün farklı modelleri olabilirler. Her iki durumda da ürünler aynı olmayan fakat benzer üretim ihtiyaçları gösterirler. Pratikte montaj hattı tek bir model için hazırlanır. Daha sonra ikinci, üçüncü vb. modellerin parti üretimi için hatta gerekli düzeltmeler yapılır. Bu nedenle problem, farklı montaj hattı tasarımı problemlerinin bir bileşeni olarak düşünülebilir (8).

Farklı ürünlerin parti üretimleri için optimal imalat sıralaması, açıktır ki montaj hattı hazırlama maliyetlerinden direkt etkilenecektir. Hat hazırlama maliyeti, değişen makina ve aletlerin maliyeti, ayarlama maliyeti, makina ve işgücünün boş zamanlarının maliyetinin toplamı olarak düşünülebilir. Bu durumda problem, belirli bir zaman aralığında, toplam hazırlama maliyetini enazlayan parti üretim sıralamasını bulmak şeklinde tanımlanabilir. Parti üretim sıralamasının bu tür problemlerde önem kazanmasının nedeni, hazırlama maliyetlerinin genellikle sabit olmayıp değişken bir nitelik taşımasıdır.

Hazırlık maliyetleri önce gelen model ve önce geleni izleyen modellerin yapısı ile büyük ölçüde ilgilidir. Dolayısıyla partiler halinde yapılacak modellerin, verilen bir zaman periyodu içindeki toplam hazırlık maliyetlerini en aza indiren üretim sırasının tesbiti

önemlidir. Sıralamada basit, aynı zamanda da etkili bir LP (Linear Programming) tekniği olan MACAR metodu kullanılır (9).



Şekil 2. Çok model montaj hattı.

#### b. Karışık Modelli Hatlar

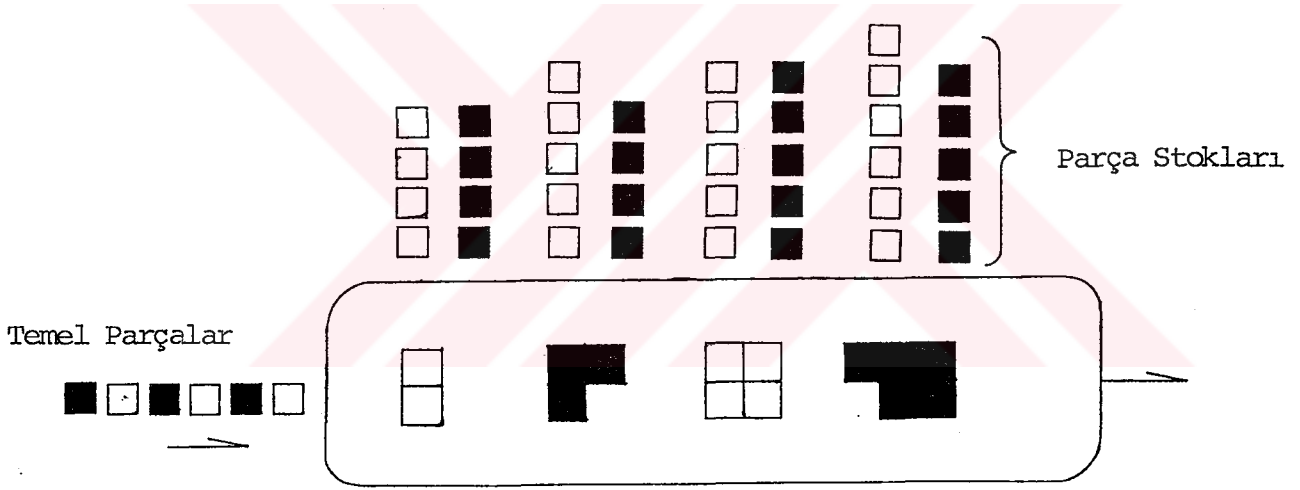
Bu tip montaj hattında değişik modeller aynı anda ve karışık olarak üretilirler. Karışık modelli üretimin en önemli faydası, müşteri isteğini karşılamak üzere değişik modellerin sürekli olarak üretilmesi ve büyük bitmiş mamül stoklarına ihtiyaç duyulmamasıdır. Modellerin değişik işlem zamanlarından doğan zararlı yönleri ise; iş akışının muntazam olmaması, dolayısıyla daha fazla istasyon boş zamanları, yarı bitmiş mamüllerden oluşan yığınlardır. Bu çeşit montaj hattının tasarımı ve çalıştırma problemi çok güçtür ve bu amaçla uygun

analitik metodlara hemen hiç raslanmamaktadır. Ancak bazı yaklaşımlar teklif edilmiştir (8).

Karışık model montaj hatları için hat dengeleme problemi, bazı tek-model dengeleme problemleri şeklinde düşünülebilir. Başka bir deyişle, her model ayrı olarak gözönüne alınıp, toplam işyükü, iş istasyonları arasında olabildiğince eşit olarak dağıtılabilir. Örneğin A ve B gibi iki benzer model için bir montaj hattının kurulduğu varsayalım. A modelinin iş elemanları, bu modelin montajı sırasında denge kaybı en az olacak şekilde iş istasyonlarına dağıtılır. Aynı durum B modelinin iş elemanları için de sözkonusudur. Bu uygulama, modellerin üretimi benzerlik gösterdiğinde sık sık kullanılan ve bir ölçüde yeterli bir metottur. Burada üretim benzerliği denildiğinde anlatılmak istenen, benzer iş elemanlarının, benzer bir sıra ile yapılmasıdır. Bu durumda her iş istasyonundaki işçiler, hangi model olursa olsun, aynı tip işi yapmaktadır. Buna karşılık benzer olmayan modellerin üretildiği durumlarda, yukarıda açıklanan şekilde her model için birbirinden bağımsız hat dengeleme yapmak, farklı iş elemanlarının, dolayısıyla farklı yetenek ve eğitim gibi iş ihtiyaçlarının istasyonlara dağıtılması demektir. Böyle durumlarda dengeleme, benzer iş elemanlarının aynı istasyonlara ya da aynı grup istasyonlara hangi modelin üretildiğine bakılmaksızın dağıtılması şeklinde gerçekleştirilir. Atama işleri çevrim zamanına göre değil, toplam zamana göre ayarlanır (4).

Karmaşık montaj hatları konusunda Kılbridge-Wester (1964) tarafından Ford fabrikasında 9 farklı motor üretimindeki çalışmalarına, Thomopolous'un (1970) ve Don Deutsch (1971) 'un çalışmalarına raslamak mümkündür.

Don Deutsch'un stokastik karışık model hatlar için sunduğu BABALB tekniğinin bu konuda yapılan önemli çalışmalardan olduğu söylenebilir. Metot (10) nolu referansta Computer Programı ile birlikte incelenmiştir.



Şekil 3. Karışık model montaj hattı.

#### 1.4. Montaj Hattı Dengeleme Çalışmaları

Montaj hattı dengeleme problemleri, daha çok işyerinin ürüne göre düzenlendiği sistemlerde ortaya çıkar. Ürüne göre yerleştirmede temel fikir, mantıksal iş istasyonları serilerini, bina alanını etkin kullanacak biçimde, birbirleriyle ilişkilendirmektir. Montaj hat-

larının yerleştirilmesinde hat aşamaları arasında geçici depolama yerlerinin de gözönüne alınması zorunludur. Hatlar arasında yığılmalar oluyorsa, yani iş istasyonlarının çalışma hızları farklı ise beklemeler, kuyruklar oluşacak demektir. Eğer ana stok yerleri dolmuş ise, bloklaşma ya da kilitlenme olayı oluşur ve ara depolara iş gönderen makinalar üretimi keser. Üretim kesilme işlemi geriye doğru giderek tüm makinaların durması sonucunu doğurur. Bu nedenle ürüne göre yerleştirme düzeninde en önemli problemlerden birisi montaj hattının dengelenmesi problemidir (11).

Montaj hattı dengelemesi, iş istasyonlarını, yapacakları işi en iyileyecek biçimde görevlendirmektir. Montaj hattı tam dengelenirse üretim akışı geçikmesiz olur ve iş istasyonları eşit miktarda iş yaparlar (12).

Montaj hattının maliyetinin minimum olması istenir. Dengeleme işleminde hesaba katılan faktörler içinde maliyete etkisi olan tek değişken, işgücü ve dolayısıyla iş istasyonu sayısıdır. Şu halde montaj hatlarını dengeleme çalışmalarının amacı; Elementer işler arasında bulunan öncelik şartlarını sağlayacak her istasyondaki toplam işyükü süresi, verilen çevrim zamanından büyük olmayacak ve montaj hattındaki istasyon sayısı minimum kılınacak şekilde iş elemanlarının iş istasyonlarına tahsisidir (13). Böylece denge kaybı minimum hattın etkinliği maksimum olacaktır.

Montaj hattı dengelemesi çalışmalarında gerekli bilgiler şunlardır.

- i) İstenilen üretim hızı
- ii) İş elemanları ve bunların zaman standartları
- iii) İş sıraları ya da öncelikleri
- iv) Mevcut kısıtlar (5).

İşlemlerin iş istasyonlarına atanmasının planlanması, çeşitli kısıtları gündeme getirir. Bunlar süre kısıtları, bölgeleme kısıtları ve öncelik kısıtlarıdır. Bu gibi kısıtların oluşu, pratikte tam bir hat dengelemesini güçleştirir ve hatta imkansız kılar. Bu nedenle hat dengelenmesinde belirli bir miktar dengeleme kaybı bulunması kaçınılmazdır (4).

Montaj hattı dengelemesi konusunda, sık sık karşımıza çıkacak olan bir takım hat terimleri vardır. Bu terimlerin önemli olanlarından bazıları aşağıda kısaca açıklanmıştır.

1) İş İstasyonu: Üretim hattında yerine getirilmesi öngörülen toplam iş miktarının bir kısmının yerine getirildiği yerdir. Üretim hattındaki (Montaj hattı) iş istasyonları genellikle bir operatör tarafından çalıştırılır. Birden fazla operatörün çalışması da mümkündür. İş istasyonlarında mamülün elde edilmesiyle ilgili değişik tür ve nitelikte birden fazla sayıda iş elemanı yapılır.

2) İş Elemanı: Montaj hattında yerine getirilmesi gereken toplam iş miktarının, rasyonel bir şekilde bölünmüş bir kısmıdır. Örneğin otomobil üretiminde belirli bir iş istasyonunda, motordaki bir parçanın anahtarla sıkıştırılması, toplam iş miktarının bir elemanıdır. İş elemanı öyle bir iş parçasıdır ki, iki veya daha fazla operatör arasında bölüştürülemez.

3) Minimum Rasyonel İş Elemanı: Bölünmez nitelikteki bir iş elemanıdır. Örneğin; minimum rasyonel iş elemanı şu hareketleri öngörebilir; Bir aletin elde edilmesi, tutulması, sıkıştırılma işleminde kullanılması, aletin yerine geri konulması. Bu hareketlerin tamamı bir iş elemanını meydana getirir ve bu iş elemanının bölünmesi mümkün olmaz (1).

4) İşlem Zamanı: Uygun bir işin yapılabilmesi için gereken zamandır ve  $t_i$  ile sembolize edilir.

5) Toplam İş Miktarı: Montaj hattında yapılan toplam iş miktarıdır. Toplam iş miktarı, iş istasyonlarına dağıtılarak yapılır. Toplam iş miktarının yapılabilmesi için gerekli süre, toplam iş süresi olarak adlandırılır ve toplam işlem zamanı  $T$  ile gösterilir  $T = \sum t_i$

6) Servis Zamanı: (İstasyon Zamanı); Bir iş istasyonuna atanan işler için gerçek kullanılan zamandır ve  $S$  ile gösterilir ve kesinlikle  $t_{max} \leq S \leq C$  şartı sağlanmalıdır (9).

7) Çevrim Zamanı (Cycle Time): Ürün üzerinde belirli operasyonların yapılabilmesi için her istasyona ayrılan zamandır. Çevrim zamanı, mamül üretiminin yüzde yüz etkinlikle bir iş istasyonundan bir başka iş istasyonuna geçtiği durumlarda, her iş istasyonunda geçen süre olarak da ifade edilebilir. Bir başka deyişle, çevrim zamanı, standart bir akış temposuyla birbirini izleyen iş istasyonları arasında geçen süredir. Bu süre, genellikle maksimum işlem süresi ( $t_{max}$ ) olarak ifade edilir ve C ile sembolize edilir.

8) Denge Geçikme Süresi: Üretim hattındaki toplam iş miktarının iş istasyonuna kötü bir şekilde dağıtılması, bazı iş istasyonlarındaki operatörlerin boş kalmasına neden olur. Operatörlerin boş kalması, aylak bir süreyi ortaya çıkarır. Bu da denge kaybı (Balance Delay) veya denge geçikme süresi olarak ifade edilir. Bu aylak süre, montaj hattının dengesizliğinin de bir ölçü olarak kullanılır. Uygulamada operatörler boş durmazlar. Aylak süre genellikle, daha düşük bir tempoyla çalışma sonunda doğar. Denge geçikme süresi, genellikle her istasyonda birim üretim için ayrılan toplam zaman ile gerekli zaman arasındaki farktır. Eğer istasyon zamanı ile çevrim zamanı eşit ise denge kaybı sıfırdır. Denge geçikmesi  $d$  ile sembolize edilir.

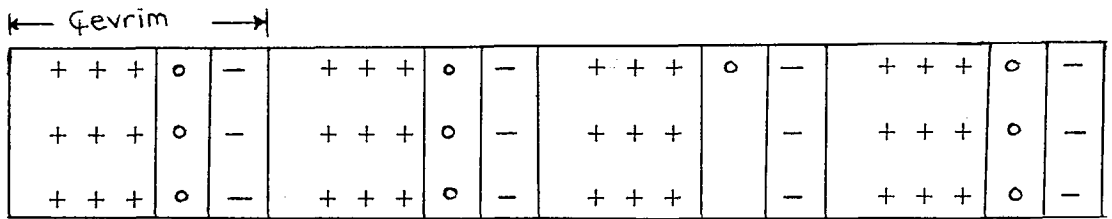
9) Bölgeleme Kısıtı: Çeşitli nedenlerden dolayı bir takım işleri diğerlerinden ayırma zorunluluğudur. Bu kısıt iki şekilde incelenebilir.

a) Pozitif Alan Kısıtlamaları: Belirli iş parçalarının bir yerde veya bir istasyonda yapılması zorunluluğudur. Bütün boyama işlemleri, özel yarı kapalı bir istasyon gerektirdiği için bir yerde yapılmalıdır.

b) Negatif Alan Kısıtlamaları: İş elemanlarının birbirlerinden uzaklaştırılmaları zorunluluğudur. Kalite kontrol vb. dikkat ve ince ayar isteyen işler, ağır ve sarsıntı yapan işlerden uzak tutulmalıdır. Bu kısıtlamalar dengeleme yapılırken ya da son aşamada dikkate alınabilir (1).

10) Öncelik Kısıtı: İşlemlerin yapılabilme sırasıdır. Öncelik ilişkileri genelde bir grafik olarak gösterilir. "Öncelik Diyagramları (Precedence Diagram)" ismini alan bu grafikler PERT/CPM tekniklerinde kullanılan ok diyagramları ile aynı özellikleri taşırlar (13).

Montaj Hattı terimlerinden bazıları arasındaki ilişkiler aşağıda şekil halinde gösterilmiştir.



İstasyon 1 —\*— İstasyon 2 —\*— İstasyon 3 —\*— İstasyon 4 —\*

△<sup>+</sup>: Servis zamanı

△<sup>o</sup>: İşlem Rayları (Üretken olmayan iş zamanı)

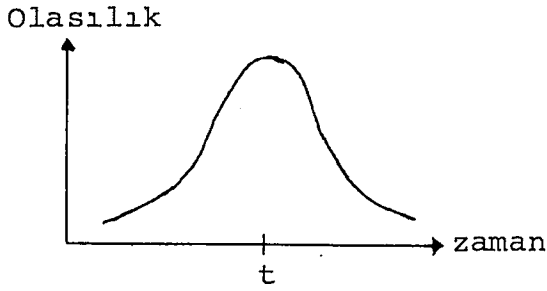
△<sup>-</sup>: Dengenin kaybı

Şekil 4. İstasyon zamanının bileşenleri.

Not olarak toplam işyükünün, toplam üretken iş ile, toplam üretken olmayan iş toplamı olarak tarifi verilebilir (8).

1.5. Hat Tasarımında Yarımamül İstifleri ve İşgücü  
Montaj hattı tasarımında, işgücü ve yarımamül istiflerinin önemi oldukça fazladır.

Dengelemede genelde işlem zamanları, standart zaman olarak sabit bir değer şeklinde alınır. Alınacak bütün tedbirlere rağmen işlem zamanlarının sabit olması mümkün değildir. Örneğin; hatta hatalı malzeme veya parçanın gelmesi, normal tempoda çalışan bir işçinin montaj işlemini tamamlamasını geciktirir. İşçi elindeki aletini düşürebilir veya dikkatini dağıtabilir. Bu ve benzer nedenlerden dolayı işlem süresi artar. İşlem sürelerinin normal olarak bir dağılım gösterdiği ileri sürülmektedir (14).



Şekil 5. İşlem sürelerinin dağılımı

Açıktır ki, sabit standart zamanlara göre bir montaj hattı tasarlanırsa, işçi işini zamanında tamamlayabildiği gibi, bazı durumlarda da bunu gerçekleştire-

remeyecektir. Buna "Rijit Tempo" denir. Bu durumda mamül kısmen tamamlanmış olarak ilerleyecek ve neticede reddedilecektir. Bu olay sistem kaybı olarak tanımlanır. Sistem kaybı, reddedilen mamüller ile atıl işgücü zamanlarının meydana gelmesiyle oluşur.

İşçilerin değişken işlem zamanları göstermelerinden doğan sistem kaybı, işlerin iş istasyonlarına uygun bir şekilde dağıtılmamalarından doğan denge kaybından daha önemli kabul edilebilir. Sistem kaybını ortadan kaldırmak için çeşitli yollar vardır. Birinci olarak çevrim zamanı artırılabilir. (Ancak çevrim zamanının artırılması sonucu işçinin elindeki işi bitirip, boş beklemesine neden olacağından sistem kaybı önlenemeyebilir. Bu yöntem çoğu zaman eksik işlerin maliyetinin yüksek olduğu durumlarda kullanılabilir). İkinci olarak hat üzerindeki katı bağımlılık kaldırılabilir. (Bantların tolerans verilerek ayarlanması). Ayrıca aşağıda bahsedileceği üzere emniyet stoku bulundurulabilir. Ancak bu pahalı bir yoldur (9).

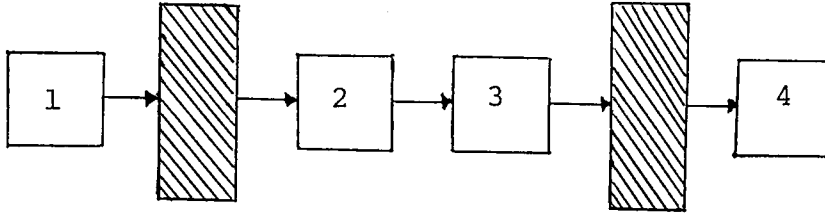
Genel olarak herhangi bir montaj hattı için gerekli işçi sayısı şöyle hesaplanabilir.

$$W = Q \cdot q / C \quad (1.3)$$

Yalnız hattın mutlak şekilde dengelenmiş olduğu varsayımı vardır.

Montaj hattı tasarımında güvenlik stok düzeyleri ve yerlerinin tesbitinin belirlenmesi önemli bir problem teşkil etmektedir.

Her üretim hattında (imalat/montaj) hammadde veya yarımamülü işleyerek bir sonraki birime ileten istasyonlar serisi yer alır. Bu üretim hattında, aynı zamanda malzemeyi belirli bir süre için tutan ve daha sonraki istasyonlara ileten güvenlik stokları da yer alabilir. Bu güvenlik stokları düzenli olarak her iki istasyonda yer alabildiği gibi düzensiz aralıklarla da yerleştirilebilir (5).



Şekil 6. İstasyonlararası stok durumu

İstasyonlararası güvenlik stokları, bir istasyondaki aksama ve geçikmelerin hemen diğer istasyonlara da aksetmemesi için kullanılır. Bazı durumlarda stoklanacak mamüllerin boyutları önemli problemler yaratır. Örneğin; motorlu taşıt araçları üretiminde en son montaj hattında ara stok kullanımı imkansızdır.

Güvenlik stoğu konusunda önemli bir nokta optimal stok düzeyinin tesbitidir. Bu konuda bir takım varsayımlar yapılmış ancak bir yaklaşım geliştirilememiştir. Ancak H.H. YOUNG'un geliştirdiği model, işlem zamanları normal dağılıma uyan hatlar için tutarlı sonuçlar vermektedir. Bu modelde ayrıca üretim hattının kalıcı durum (Steady State) şartlarında çalıştığı varsayılmakta ve optimum güvenlik stok kapasitesi şu formüle hesaplanmaktadır (4).

$$X_{Os} = \frac{C_s \cdot C_z \cdot \sigma^{0.61}}{C_{et}} \quad (1.4)$$

#### 1.6. Montaj Hattı Dengelemesinin Formüle Edilmesi

Montaj hattının dengelenmesinde temel bir takım hesaplamalar mevcuttur. Bu hesaplamalar, kısa bir takım açıklamalarla aşağıda incelenmiştir.

Hatta, kuramsal olarak çevrim zamanı (Cycle Time) hesaplanırken, mevcut zaman ve o zaman içerisindeki talep miktarı gözönüne alınır.

$$C = T'/q \quad (1.5)$$

Çevrim zamanının en büyük işlem zamanından büyük ya da eşit olması ve toplam iş yüküne eşit ya da ondan küçük olma zorunluluğu vardır.

$$t_{\max} \leq C \leq \sum t_i \quad (1.6)$$

Bir montaj hattı için mümkün olabilen asgari istasyon sayısı, eleman zamanlarının toplamının çevrim zamanına bölümüne eşit ya da ondan büyük olan n tamsayısının içerisindeki en küçük pozitif tamsayıdır. Diğer bir deyişle, eleman zamanlarının toplamı çevrim zamanına bölünür ve bundan büyük ilk tamsayı, en iyi durumdaki mümkün olan istasyon sayısıdır.

$$K_{\min} = \min \left\{ \text{tamsayılar } \left| n \geq \frac{\sum t_i}{C} \right. \right\} \quad (1.7)$$

$K_{min}$  bulunduğu zaman meydana gelen özel dengeye minimal denge adı verilir. Minimal denge, şayet bazı şartlar mevcutsa, sözkonusu problemin en mükemmel çözümüdür. Ancak pratik te minimal denge durumuna pek nadir rastlanır.

Örneğin  $i$  elemandan  $n$  tanesinin zamanı çevrim zamanının yarısından fazla ise\*

$$K_{fiz} = \{n(i) \mid t_i > \frac{C}{2}\} \quad (1.8)$$

olup, dolayısıyla fizibil (mümkün) istasyonların asgari sayısı  $K_{fiz}$  olarak gösterilmiştir ve aralarındaki maksimum değer pratikteki istasyon sayısıdır.

$$K = \max (K_{min}, K_{fiz})$$

Hattın etkinliği ise şöyle bulunur (15).

$$e = \frac{\sum t_i}{KC} \quad (1.9)$$

Öte yandan  $k$ . istasyonuna verilen süre  $S_k$  ile ifade edildiğinde hat dengelemesindeki amaç

$$\text{Min } \sum (C - S_k) \text{ bütün } k \quad S_k \leq C \quad (1.10)$$

olacaktır.

---

\* Burada kullanılan  $1/2$  durumu basit bir şekilde gösterilmek içindir. Eleman zamanlarının çevrim zamanına göre büyüklük derecesine göre,  $C/2$  yerine  $C/3$  veya  $C/4$  kullanılabilir.

Bu amaç K ya da C nin minimize edilmesi ya da KC' nin minimizasyonu ile gerçekleştirilebilir. Aynı şekilde bu amaç toplam boş zaman (Total Idle Time)  $\sum d_k$  nin minimize edilmesiyle elde edilebilir.

Buna göre tam bir dengenin olduğu bir hatta (Aylak süre yok) her zaman  $S_A = S_B = S_C \dots S_n = C$  eşitliği vardır. Böylece,

$$\sum_i t_i / K = S_k + d_k \quad (1.11)$$

eşitliğinde  $d_k = 0$  olmaktadır.

Tam dengenin olmadığı durumlarda, üretim sisteminin etkin olmama durumu

$$d = 100 (KC - \sum t_i) / KC \quad (1.12)$$

$$(KC - \sum_i t_i) / KC = (d_1 + d_2 + \dots + d_k) / KC \quad (1.13)$$

şeklindedir (15).

Bu açıklamalardan sonra, üretim hattının dengelemesinin amacı daha açık bir biçimde şöyle formüle edilebilir.

$$\min Z = \sum_{k=1}^K d_k \quad (1.14)$$

$$\min Z = \sum_{k=1}^K (C - S_k) = \sum_{k=1}^K C - \sum_{k=1}^K S_k \quad (1.15)$$

$$Z_{\min} = \min KC - \underbrace{\sum_{k=1}^K t_i}_{\text{sabit}} \quad (1.16)$$

Yukarıdaki formülde yer alan sabit kısım dikkate alınmaz ise montaj hattının dengelenmesi aşağıdaki yoldan herhangi birisi izlenerek gerçekleştirilebilir.

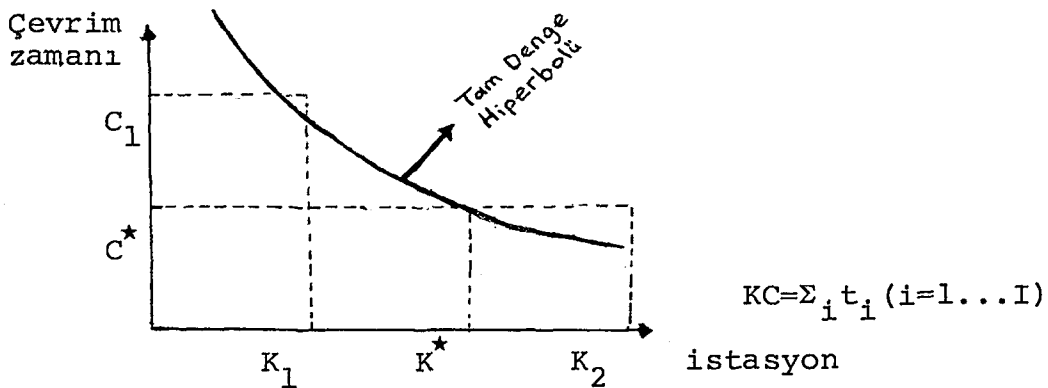
- i) Şayet C belirli ise (verilmişse) K'yi minimize et
- ii) Şayet K belirli ise (verilmişse) C'yi minimize et (1).

Hat dengeleme problemleri için boş zamanın (Idle Time) minimizasyonu, denge kaybının en azlanması, istasyon sayısının minimizasyonu, yükün istasyonlara eşit dağıtımı ve kısıtların sağlanmasının amaç fonksiyonlar olduğu daha önce belirtilmişti. Bu amaçlar arasındaki çelişki aşağıda verilen hat dengeleme maliyet fonksiyonu ile açıklanabilir.

$$T(K,C) = k_1(KC - \sum t_i) + k_2(C - C^*) + k_3(K - K^*) \quad (1.17)$$

= Atıl Kapasite Maliyeti + Düşük Prodüktivite Maliyeti + Fazla işgücü Maliyeti (6)

Bu ilişkiler, aşağıdaki şekilden daha iyi anlaşıl-  
maktadır.



Şekil 7. Çevrim zamanı ve istasyon sayısı ilişkileri.

Şekile göre  $C^*$  zamanına karşılık, gerekli istasyon sayısı  $K^*$  olmalıdır.  $K_2$  değeri  $K^*$  dan büyük ilk tam sayı ise  $K_2 C^* > \sum_i t_i$  olur ve düşük kapasite kullanımı (boş işgücü maliyeti vb) oluşur. Diğer taraftan  $K_1 \cong K_2 - 1$  şeklinde istasyon sayısı tesbit edilirse,  $\sum_i t_i > K_1 C^*$  olacağından bu mümkün değildir. Toplam gerekli süre, toplam ayrılan süreden büyük olur. Bu durumda uygun alternatif  $K_1 C_1$  dir. ( $C_1$  çevrim zamanı ve  $K_1$  sayıda istasyon kullanılmalıdır) ki bu durumda da  $\frac{1}{C^*} - \frac{1}{C_1}$  şeklinde düşük prodüktivite maliyeti söz konusudur.

Netice olarak, hat tasarımı ve dengeleme problemlerinin çözümü, değişik iş istasyonu sayısı ve çevrim zamanlarının birbirleriyle mukayese edilmesi sonucu bulunur (16).

## BÖLÜM 2

### MONTAJ HATTI Dengeleme Metotları

#### 2.1. Montaj Hattı Dengeleme Metotlarının Gelişimi

Montaj hatlarının dengelenmesi, çok önemli bir sanayii problemi olmasına karşılık bu konuda yapılan çalışmalar pek eskiye dayanmamaktadır. Yakın zamanda, istasyon sayısının ve toplam atıl zamanın minimum olması bakımından daha iyi bir dengenin elde edilmesi için (istasyonlarda paralellik çalışmaları, stok ve işgücü atamaları dahil.) montaj hattı dengeleme problemi üzerine önemli çalışmalar yapılmış ve birtakım önemli metotlar geliştirilmiştir. Bu metotlar kesin ve sezgisel (Heuristic) olmak üzere ikiye ayrılabilir. Sezgisel metotlar, optimal çözümü garantilememekle birlikte, belirli kısıtlar altında, nispi olarak en geçerli ve iyi çözümleri daha az bir hesaplama ile sağlamaktadırlar. Günümüzde, pratikte karşılaşılan problemlerin genelde büyük ölçekli olması, sezgisel metotların kullanılmasının daha iyi sonuçlar vereceğini ortaya çıkarmıştır. Örneğin 50 iş elemanı ve 100 öncelik ilişkisi bulunan bir hatta  $50!/2^{100} \approx 2.3 \times 10^{34}$  adet fizibil sıralama mümkündür. Bu sıralamalar içinden minimum maliyetli sıralamanın seçimi matematiksel programlama metotları ile pek fazla mümkün değildir.

Montaj hatlarının dengelenmesi problemlerine ilk analitik yaklaşım Bryton [1954] ve ilk formülasyon Salveson [1955] tarafından geliştirilmiştir. Daha sonra birçok araştırmacının bu konuda çalışmasını görmek mümkündür.

Jackson [1956] , Mitchell [1957] , Burgeson ve Dalun [1958] , Bowman [1960] , Tonge [1960] , White [1961] , Kılbridge ve Wester [1961] , Helgeson ve Birnie [1961] , Arcus [1962] , Hoffman [1963] , Klein [1963] , Held ve diğerleri [1963] , Gutjahr ve Nemhausser [1964] , Mukherjee ve Basu [1964] , Ignall [1965] , Freeman [1967] , Buxey [1974] , Pinto [1975] , Bennett [1976] , Dannenbring, Khumawala ve Peter A. Pinto [1978] , Raouf ve Tsui [1980] , Akagi, Osaki ve Kikuchi [1981] , Shtub [1984] , P.K. Agrawal [1985] , Wilson [1986] , Baybars [1986] , gibi araştırmacılar yaptıkları tek model montaj hattı dengeleme çalışmalarının tümünde, eleman zamanlarını deterministik olarak kabul etmişlerdir.

Mansoor [1964] , Moodie ve Young [1965] , Mansoor ve Tuvia [1966] , Brennecke [1968] , Reeve [1968] , Ransing ve Downing [1970] , Rao [1971] , Dar-el [1975] tarafından geliştirilen metotlar, eleman işlem zamanının değişir olduğu ve işlem zamanlarının normal bir dağılıma uyduğu varsayımını yapmışlardır. Yine Raouf ve Tsui [1981] 'nin stokastik eleman zamanlı dengeleme çalışması da oldukça önemlidir.

Kottas ve Lau [1973,76,81], normal eleman zaman de-  
ğişimleri gösteren ölçülmüş bir montaj hattının denge-  
lenmesi için maliyet düşüncesine dayanan yeni bir sezgi-  
sel metot geliştirmişlerdir.

Yapılan bütün bu çalışmalar, tek-model hatların ( hatta tek bir ürün üretilmesi) dengelenmesine yönelik-  
tir. Ve çalışmaların amacı, hat üzerinde denge kaybını  
enazlayacak şekilde iş elemanlarını iş istasyonlarına  
atamak olmuştur.

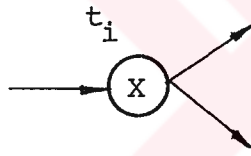
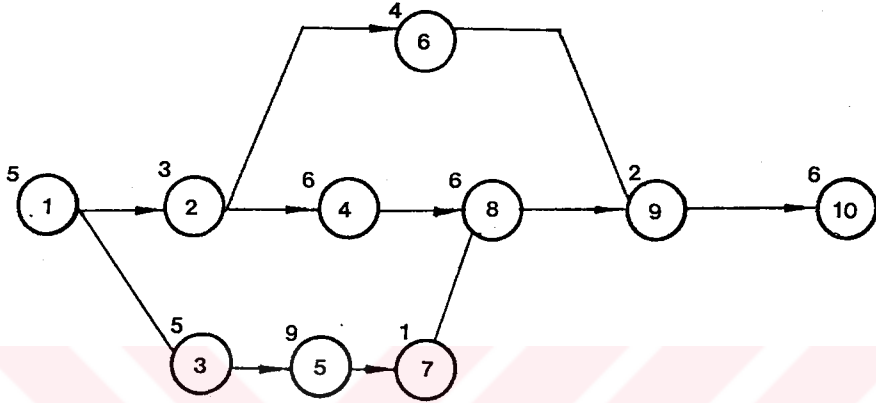
Karmaşık (Mixed) montaj hatlarının dengelenmesi  
konusunda pek fazla bir çalışma yapılmamıştır. Bu konu-  
da Thomopoulos [1970], DonDeutsch [1971], ve Macaskill  
[1972] 'un çalışmalarına raslamak mümkündür.

## 2.2. Tek Model Montaj Hattı Dengeleme Metotları

Hat dengeleme üzerine yapılan çalışmaların büyük  
bir kısmı tek model yani hatta birtek ürünün üretilmesi  
durumunu içine almaktadır. Bu konuda oldukça fazla me-  
tot olduğu da söylenebilir.

Deterministik ve stokastik işlem zamanı ihtiva  
eden tek model hat dengeleme metotlarından seçilen önem-  
li bir takım metotların incelenerek değerlendirilmesi  
bu tezin de genel amacını oluşturmaktadır.

Metotları incelemeye geçmeden evvel, bütün metot-  
ların işleyebilmesi için kesin olarak tesbit edilmesi  
ya da verilmesi gereken öncelik diyagramını temsili ola-  
rak küçük bir örnek halinde vermek istiyorum.



$t_i$ : Standart eleman zaman değeri (Değişir eleman zamanıyla hesaplama da eleman üzerinde varyans ve ortalama değerleri bulunur.)

X: Eleman (işlem) No

Şekil 8, 10 elemanlı öncelik diyagramı

### 2.2.1. Bryton Sezgisel Metodu

Bryton [1954], iş istasyonları sayısını sabit kabul ederek, çevrim zamanını asgariye indirmek suretiyle, toplam boş zamanı en aza indiren ve çözüme sistemli bir şekilde ulaşan bir yaklaşım önermiştir. Burada çevrim zamanı, en uzun istasyon zamanı olarak alınmıştır. Me-ot yerel minimumu bulmakta (belirli sayıda iş istasyonu için en iyi çözüm vermektedir) fakat mutlak minimumu sistemli bir şekilde aramamaktadır.

Fabrikaların çoğunda, birkaç mamülün montajından sorumlu bulunan bir montaj bölümü vardır. Bölüm, hangi mamül programlanmışsa, onun montajını yapmak üzere belli sayıda işçi ve işyeri veya istasyona sahiptir. Üretim programına bağlı olarak, bu işçiler bir mamülden diğerine geçecekler ancak işçi veya istasyonların sayısı sabit kalacaktır. Bryton'un bu yaklaşımı bütün montajcılara iş sağlayacak ve boş zamanı topyekün asgariye indirecektir.

Metot, bir yakınlaşma metodudur. Metot her basamakta çözüme biraz daha yaklaşmaktadır. Bu ise orijinal mümkün çözüm, son cevaba ne kadar yakınsa, o kadar az hesaplama olacak demektir. Demekki analize, analistin kendi sağduyusunun varabileceği en iyi çözümle başlanmalıdır.

Hesaplama

$$S_k \leq C \quad k=1 \dots K \quad (2.1)$$

$$\sum_{i=1}^I t_i = \sum_{k=1}^K S_k \leq K.C \quad (2.2)$$

şartı kesin olarak sağlanmalıdır.

Çözüm şu şekilde özetlenebilir.

1) Gerekli bilgilerin temini (öncelik diyağramı, eleman zamanları, istenilen üretim hızı)

2)  $C$ ,  $K_{\min}$ ,  $C_{\min}$  ön hesaplamaları yapılır.

Bilgisayarla çözüm için öncelik diyagramı bir mat-  
rix haline sokulur.  $|P| = P(i,j)$

$i,j$  den önce geliyorsa  $P_{ij} = 1$

$i,j$  sırasız (veya  $i=j$ )  $P_{ij} = 0$

$i,j$  den sonra geliyorsa  $P_{ij} = 2$

3) Sağ duyu yardımıyla en iyi çözüm için ilk düzen-  
leme yapılıyor. Bilgisayara kolayca uygulanabilmesi  
için ilk düzenleme (mümkün çözüm),  $|S|$  çözüm matrixi  
şeklinde gösterilebilir. Çözümde;

$i,j$  den önce geliyorsa  $S_{ij} = 1$

$i,j$  sırasız (veya  $i=j$ )  $S_{ij} = 0$

$i,j$  den sonra geliyorsa  $S_{ij} = 2$

Her yeni düzenlemede ayrı bir  $|S|$  çözüm matrixi  
hazırlanır.

4) Mümkün çözüm tablosunda istasyonlara işler atan-  
dıktan sonra tablodan minimum ve maksimum  $S_k$  değerleri  
belirlenir.

5) İşlemlerin yerleri birbiriyle değiştirilir.

$$\max d_k = \max S_k - \min S_k \quad (2.3)$$

Elé alınan istasyonlar arasında herbiri ayrı istas-  
yondan gelen ve aralarındaki fark  $d_k/2$  ye en yakın olan  
birçift eleman seçilir. Herhangi bir istasyonda sıfır  
bir eleman sayılabilir ki, bu, farkı  $d_k$  nın yarısına  
yaklaştırmak için bir veya daha fazla elemanın değiş-  
tirilebilmesi demektir. Öncelik şartlarını bozmadan bu

özelliğe sahip elemanlar birbirini ile değiştirilir. Hiç bir yer değiştirme, iki istasyon arasındaki farkı azaltmıyorsa ikinci derecede asgari olan  $S_k$  değeri seçilir ve bu mak  $S_k$ 'ya göre incelenir. Yine değişme olmazsa 5a'ya geçilir.

5a) Hiçbir değişme olmadıysa, bu yerel optimumdur. Şayet bu yerel optimum, problemin en iyi çözümü gibi görünüyorsa ikinci en büyük değer seçilir ve min  $S_k$  ile karşılaştırılır. Şayet bu yerel optimum yeterli bir çözüm değilse 5b'ye geçilir.

5b) Yerel optimum yeterli değilse, büyük bir eleman mak  $S_k$  dan kaldırılabilir, veya bütün gruptaki en büyük eleman çıkarılabilir. Bu elemanı yeni bir istasyona daimi olarak tahsis ettikten sonra 4 adım ile metoda yeniden başlanır.

6) Toplam boş zaman  $\sum_{k=1}^K d_k$  sabit hale gelinceye kadar  $S_k$  değerlerinin seçimi ve değiştirme işlemleri tekrarlanır.

Metotta, bilgisayar ile sıra kontrolü yapmak mümkündür.  $|P|$  ilk matrisinden, yerdeğiştiren elemanın matris sırası alınarak önerilen çözüm matrisi  $|S|$  deki bunun karşılığı olan sıraya eklenir. Şayet toplamda 3 sayısı varsa, öncelik şartlarına aykırı bir durum var demektir.

Çözüm metodu, yerel optimum noktasına varılincaya kadar daha iyi çözümlere doğru ilerlemektedir. Bu nokta-

dä, çözümü daha iyi şekle sokmak için subjektif bir yargıya varmak gerekmektedir. Bu ise, bu metodun en büyük yetersizliğidir. Ama yine de bu metot, yerine göre oldukça değerli bir metottur (15).

### 2.2.2. Salveson Metodu

Salveson [1955], çevrim zamanını sabit kabul ederek iş istasyon sayısını hesaplayan bir metot önermiştir. Bu metot elemanların öncelik şartlarına uygun değişik eleman bileşimlerinin (Kombinasyonların) seçilmesi, hat üzerindeki boş zamanların birisinin montaj sırası olarak ve elemanların değişik düzenlemelerinden birisinin istasyon olarak seçilmesi şeklinde tanımlanabilir.

Metot, Aday matris  $|B|$  nın hazırlanması, mümkün dengenin seçilmesi ve optimallik testi olmak üzere üç aşamadan oluşmaktadır.

1) Elemanların çeşitli istasyonlara atanmasına, öncelik ve zaman tahditlerine uygun olarak imkan verecek muhtemel kombinasyonları birleştiren bir aday matris hazırlanır.  $|B| = b_{ij}$

Matrisin en üst satırında (j), oluşturulan kombinasyonların sayısı, hemen altındaki satırda atıl zamanlar ( $d_j$ ) ve sol dikey kısımda da işlem (eleman) numaraları (i) yer alır.

Her aday veya sütun için atıl zamanlar şöyle hesaplanır.

$$d_j = C - \sum_i b_{ij} \times t_i \quad (2.4)$$

Aday matris sıfır ve birlerden oluşur. Eğer  $i$  elemanı  $j$ . sütuna verilmişse (Belirli bir kombinasyona giren işlemlere karşılık gelen kolon ve satır kesişme noktasına) 1 rakamı, aksihalde 0 rakamı yazılır. Aday matrisi elemanların çevrim zamanı ve öncelik kısıtlamaları dahilinde bütün değişik kombinasyonları içine alır. Buna göre her sütun, bir istasyon olmaya "ADAY"dır.

2) Mümkün dengenin seçilmesi işlemi şu aşamalardan oluşur.

a) Aday matristeki en az boş zamana sahip kombinasyon seçilir. (Minimum  $b_j$  kombinasyon sütunu). Eşitlik durumunda, en az boş zamana sahip değerler arasından tesadüfi olarak seçim yapılır.

b) Bu kombinasyondaki sütun verileri ( $b_j$ ), aday matrisle aynı özellikte olan çözüm matrisine kaydedilir.

c) En az  $d_j$  lere sahip kombinasyonları kullanarak, çözüm matrisi,  $b_j$  sütunları ile doldurulur.

d) Her sırada sadece tek bir rakam bulununcaya kadar aşama c tekrar edilir.

3) Bu aşamada optimal dengenin bulunmasına çalışılır. Bu nedenle önce mümkün çözüm için toplam boş zaman hesap edilir ve herbir boş zaman çevrim zamanı ile mukayese edilir.

Eğer  $\sum d_j \geq C$  ise daha iyi bir çözüm var demektir. Bu nedenle, bazı aday elemanlar, yerlerine başka elemanlar koyulmak üzere çözümden çıkarılırlar. Çıkan ile

yerlerine konulan elemanlar arasındaki boş zaman farkı hesaplanır. Bu farka R dersek;

$$R = \sum d_{j\text{çık}} - \sum d_{j\text{gir}} \quad (2.5)$$

$d_{j\text{çık}}$ , çözümden çıkarılan adaylardaki  $d_j$ 'ler ve  $d_{j\text{gir}}$ , çözüme giren adaylardaki  $d_j$ 'lerdir.

$R \leq 0$  ise, eski çözüm, öneriler çözümden daha iyidir.

$R > 0$  ise eski çözüm optimal olmayıp, daha iyi bir çözüm bulunabilir demektir.

Eğer  $\sum d_j < C$  ise denenmekte olan çözüm optimal kabul edilebilir. Fakat çok sayıda işlemi olan sistemlerde, bütün kombinasyonların denenmesi zaruretinden dolayı, bu kriter realize edilir olmayabilir. Dolayısıyla prosedür optimum dengeyi sağlayacak bir metod temin edemez (17,15).

### 2.2.3. JACKSON'un Basamak Hesaplama Metodu

Jackson [1956], çözüm ilerlerken, daha az değerli olan farklı çözümleri, sistemli bir şekilde elimine etmek kaydıyla, hat dengeleme hesaplarını basitleştirmiştir. Bu metotla, bir denge sağlanıncaya kadar birbirini takip eden bütün işlem kombinasyonları ile iş istasyonları incelenerek verilen çevrim zamanı içinde minimum sayıda iş istasyonu elde edilir. Ayrıca öncelik kısıtları ve ilgili sınırlama altında istasyonların boş zamanı en aza indirilir.

Metot eleman sayısının az olması durumunda oldukça başarılı neticeler verir. Eleman sayısı arttığı nisbette bütün kombinasyonların tesbit ve incenmesinde büyük zorluklar meydana gelmekte ve metodun başarılı olmama ihtimalini artırmaktadır. Metot sezgisel bir metot olmayıp, kullanıldığında bulunan denge optimaldir.

Jackson'un metodunun kompütürde kullanılması, benzer kombinasyonların eleminasyonu ve prosedürün kontrolü bakımından zordur. Metod prosedür ile optimize edilir.

Genel durum için basamak basamak hesaplama kaide-leri şu şekilde özetlenebilir.

Kapsadığı her  $X^{(i)}$ 'nin, bir eleman dizisi olduğu ifade edilsin

$\{X(1) \dots, X(n-1)\}$

Serisi verilmiş olarak  $\{X(1) \dots X(n-1)\}$ 'den bir sonraki tahsisler grubu, aşağıdaki eleman dizileri grubudur.

I. Hat dengeleme probleminin öncelik diyagramından  $\{X(1) \dots X(n-1)\}$  serisi içindeki bütün işlemleri ve bu elemanlarla başlayan bütün sıra belirtici çizgiler çıkarılır.

II. Basamak I deki diyagram üzerinde, elemanların aşağıdaki şartlara uyan bütün X dizileri sıralanır.

II.a- Şayet belirli bir eleman X'in içinde ise, kendisinden bu elemana gelen bir sıra belirtici çizgi bulunan bütün elemanlar da X'in içinde olacaktır.

II.b- X'deki elemanlar için toplam iş yapma süresi, çevrim zamanının üst sınırından daha yüksek olmayacaktır.

II.c- IIa ve IIb'yi bozmadan X'e hiçbir işlem katılamaz.

III. Üzeri henüz çizilmemiş listede bir diğer Y dizisi bulunan X dizilerinin üzeri şu şartlara uygun şekilde sıra ile çizilir.

III.a- X'de, Y'de bulunmayan bir X elemanı bulunacak.

III.b- X'de bulunmayıp, Y'de bulunan bir y elemanı için işi tamamlama süresi en az X'inki kadar olacak ve sıra belirtici çizgilerin y den herhangi bir elemanına direkt giden sıra belirtici çizgi bulunacak ve Z'ye de X'den bir sıra belirtici çizgi gidecektir.

Basamak III uyarınca, daha fazla dizinin üzeri çizilemediğinde yukarıda anlatılan etap sona ermiştir. Dikkat edilirse, bir istasyona verilen dizilerle ilgili olarak abc ve acb'nin aynı olmasının aksine, burada kullanılan { } işareti dizilerin sıralı serilerini göstermektedir. "{ }"den bir sonraki tahsisler grubu" etap'ın II ve III üncü basamaklarının orijinal sıra

izleme diyagramına uygulanması ile elde edilen diziler grubu demektir. Diğer bir deyişle, etap ilk defa kullanıldığından istasyon 1'e yapılması mümkün olan tahsisler grubu ile sonuçlanacaktır.

Şimdi de hat dengeleme metodunun kendisini özetleyelim. Biraz önce açıklanan etap, bu metodun önemli bir basamağıdır. Metod Basamak I ile başlamakta ve eleman dizileri serisinden, bir sonraki tahsisler grubunun seride bulunmayan bütün elemanların dizilerinden oluşma durumunun ilk olarak ortaya çıkması ile sona ermektedir. Bu noktada, hat dengeleme probleminin çözümü, serilerin dizilerinin sıra ile istasyonlara, geri kalan elemanların, serideki son dizinin tahsis edildiği istasyon dan hemen sonra gelen istasyona tahsis edilmesi suretiyle elde edilebilir.

Basamak I-A: Etap'ı kullanarak { }'den bir sonraki tahsisler grubu bulunur.

Basamak I-B:  $X(1)$  basamak I-A'da elde edilen grupta bulunmak üzere, tek bir eleman dizinin  $\{X(1)\}$  serisinin listesi olan liste 1 yazılır.

Basamak n-A:  $n \geq 2$ . liste  $(n-1)$ 'deki eleman dizilerinin her  $\{X(1), \dots, X(n-1)\}$  serisi için, etap'ı kullanarak  $\{X(1), \dots, X(n-1)\}$  serisinden bir sonraki tahsisler grubu bulunur.

Basamak n-B:  $\{X(1), \dots, X(n-1)\}$  liste  $(n-1)$ 'de ve  $X(n)$ ,  $\{X(1), \dots, X(n-1)\}$ 'den bir sonraki tahsisler grubunda bulunacak şekilde  $\{X(1), \dots, X(n-1), X(n)\}$  serilerinin listesi olan n-B yazılır.

Basamak n-C: Liste n-B den, herhangi bir  $X(i)$ 'de bulunan her eleman keza  $Y(j)$ 'de de bulunacak  $[Y(j)$  de bulunupta hiçbir  $X(i)$ 'de olmayan işlemler bulunabilir] şeklinde, karşılığında henüz üzeri çizilmemiş listede bir diğer  $\{Y(1), \dots, Y(n)\}$  serisi bulunan  $\{X(1), \dots, X(n)\}$  serilerinin üzerini sıra ile çizmek kaydıyla liste n elde edilir. Basamak n-C kullanılarak artık daha fazla serinin üzeri çizilemediğinde basamak n tamamlanmış olur (18).

#### 2.2.4. En Büyük Aday Metodu (LCR)

Bu kolay metod Moodie ve Young [1965] tarafından geliştirilmiş olup, metoda göre iş elemanları, iş istasyonlarına aşağıdaki iterasyonlar izlenerek atanırlar.

a) Bütün iş elemanları büyükten küçüğe doğru sıralanır.

b) İş elemanlarını 1. istasyona atamak için listenin başından başlanır ve ilk uygun olan iş kümesi 1. istasyona atanır. Burada uygunluk, öncelik kısıtlamaları ve kümedeki iş elemanları sürelerinin toplamının  $(\sum t_i)$ , çevrim zamanından küçük olması kısıtını karşılamasıdır.

c) İş elemanları, herbir iş istasyonuna, çevrim zamanını aşmamak kaydıyla atamaya devam edilir. Gerekirse tablonun başına dönülebilir.

d) a ve b basamağına bütün iş elemanları bitinceye kadar diğer istasyonlara da atama yapılarak devam edilir (5).

#### 2.2.5. KILBRIDGE ve WESTER Metodu

Kilbridge ve Wester [1961] tarafından geliştirilen bu metod, birçok dengeleme problemlerinin çözümünde kullanılmıştır.

Metotta, önce iş elemanları birbirlerini izleme durumuna göre değişik sütunlarda toplanmakta ve ondan sonra çevrim zamanı hesaplanmaktadır. Diğer bir deyişle bu yaklaşımda iş istasyonu sayısı (K) ve çevrim zamanı (C) değişkendir (19).

İşlemlerin ya da iş elemanlarının öncelik ilişkileri tesbit edildikten sonra, ilk aşamada bir gruplama yapılarak hemen başlaması gereken işlemler belirlenir. Bu gruptaki işlemlerin tamamlanmasından sonra başlama durumunda olan işlemler ikinci grubu oluştururlar. Grupların oluşturulmasından sonra, gruplara giren işlemler bir tabloda gösterilir. Ve bir işlemin bir başka işlemle yer ve grup değiştirip değiştiremeyeceği araştırılır ve tabloda belirtilir.

Metodun uygulanabilmesi için bazı şartlar gereklidir.



Bu arada işlemlerin yapılacağı tablo da 1. sütun, sütun numarasını, (2). sütun işlem no'sunu, (3). sütun işlemlerin transfer durumunu, (4). sütun işlem sürelerini, (5). sütun, her sütun için (I,II ..... ) işlem sürelerini, (6), sütun da kümülatif sürelere aittir. İterasyonlar bu tabloda gerçekleştirilir.

2) (6) nolu sütunda, çevrim zamanına eşit değer varsa seçilir. Yoksa, çevrim zamanına en yakın değer seçilir.

3) Seçilen bu değer ile çevrim zamanının farkı alınır. İkinci ana sütun (istasyon) da bu farka eşit eleman aranır. Eğer varsa 1. istasyon elemanları belirlenmiştir. Yoksa, bu farka en yakın eleman ya da elemanlar ilave edilerek 1. istasyon kapatılır.

4) Kümülatif zamanlar sütunundan (6), daha önce seçilmemiş, çevrim zamanından büyük olan en küçük kümülatif süre seçilir.

5) Seçilen bu sürenin çevrim zamanına eşit veya yakın olmasının sağlanabilmesi için transfer durumları da gözönüne alınarak gerekli kaydırmalar yapılır. İkinci istasyon da kapatıldığında bir sonraki istasyon için yukarıdaki ilgili işlemler tekrarlanır (20).

Metotda, çevrim zamanı hesap edilirken, evvela iş istasyon sayısı (K) tamsayı olarak kabul edilmektedir. Daha sonra, toplam eleman zamanının ( $\sum t_i$ ) asal sayıları yazılarak değişik kombinasyonlar elde edilir.

Bu kombinasyonlardan (1.6) kısıtını sağlayan çevrim zamanları "uygun çevrim zamanları" olarak seçilmektedir. Her çevrim zamanı için de bir istasyon sayısı tesbit edilir.

$$\text{Örneğin; } \Sigma t_i = 48 \quad t_{\max} = 10 \text{ ise}$$

$$C_1 = 2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 3 = 48 \quad K_1 = \frac{\Sigma t_i}{C_1} = 1$$

$$C_2 = 2 \times 2 \times 2 \times 3 = 24 \quad K_2 = 2$$

$$C_3 = 2 \times 2 \times 2 \times 2 = 16 \quad K_3 = 3$$

$$C_4 = 2 \times 2 \times 3 = 12 \quad K_4 = 4 \quad \text{dir.}$$

$$10 \leq C \leq 48$$

Optimal iş istasyonu için rasgele bir C değeri seçilir. Eğer iyi netice vermezse, bütün C'ler tek tek denecektir (4).

Metot da, enbüyük aday metodunda olduğu gibi öncelik kısıtlarını, iş elemanlarını istasyonlara atarken dikkate almamız gerekmez. Çünkü sütunlara göre sıralama yapıldığı için bu iş otomatik olarak yapılmış olur.

Yine bu metotun bilgisayar ile çözümü oldukça zordur. (Biraz geniş ölçekli sistemler için) (5).

#### 2.2.6. Sıralanmış Pozisyonlu Ağırlık Metodu (RPW)

Kılbridge - Wester ve enbüyük aday metodu (LCR) nin birleştirilmesi ve geliştirilmesi ile bu metot Helgeson ve Birnie [1961] tarafından elde edilmiştir.

Metot da, herbir iş elemanı için sıralanmış bir pozisyon ağırlığı hesaplanır ve bu ağırlığa göre iş istasyonlarına atamalar yapılır.

Bir iş elemanın pozisyon ağırlığı, iş elemanın kendi süresi ile birlikte kendinden sonraki iş elemanlarının sürelerinin toplanması ile bulunur.

$$PA = t_i + \sum t_j \quad (2.6)$$

Şekil 8'deki öncelik diyagramı dikkate alınarak PA'ların hesabı aşağıdaki tabloda verilmiştir (4).

Tablo 1. Öncelik ve pozisyon ağırlıkları

		Eleman										
No	$t_i$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	PA
1	5	.	1	1	+	+	+	+	+	+	+	
2	3		.		1		1		+	+	+	
3	5			.		1		+	+	+	+	
4	6				.				1	+	+	
5	9					.		1	+	+	+	
6	4						.			1	+	
7	1							.	1	+	+	
8	6								.	1	+	
9	2									.	1	
10	6										.	

(+): İlgili satırın direkt atamalardan sonraki hattı

(1): İlgili satırdaki elemandan hemen sonra gelen eleman

(.) Elemanın kendisi

Metodun uygulanması için şu adımlar takip edilir.

i) Bütün iş elemanları için pozisyon ağırlıkları tesbit edilir.

ii) En büyük pozisyon ağırlıklı değerden başlayarak, iş elemanları listelenir.  $t_i$  değerleri ve önce gelen elemanlar da listeye yazılır.

iii) İş elemanları, ağırlıklarına göre (enbüyük ağırlık ilk tahsis edilir) istasyonlara tahsis edilir. Atama yaparken, öncelik kısıtları ve çevrim zamanını geçmeme şartı gözönüne alınmalıdır.

Eğer herhangi bir iş istasyonunda eleman tahsisinden sonra, ilave bir zaman kalıyorsa, bir sonraki sıralanmış eleman bu işe, bu elemandaki fazla zamanı aşmayacak şekilde tahsis edilir. Eğer aşıyorsa o iş atlanılarak bir sonraki iş deneneir.

Metod ile (RPW) önce verilen çevrim süresi için gerekli minimum istasyon sayısı bulunmakta, sonradan aynı istasyon sayısını koruyarak denge kaybını en aza indirmek için çevrim zamanı uygun şekilde kısaltılmaktadır. Diğer bir deyişle hattın hızı artırılmaktadır.

RPW metodu ile hem öncelik sıraları, hem de işlere ait kısıtlar göz önüne alınabilir. Metot, diğer sezgisel yöntemlere göre daha çabuk kabul edilebilir ve iyi çözümler veren hızlı fakat yaklaşık bir metottur.

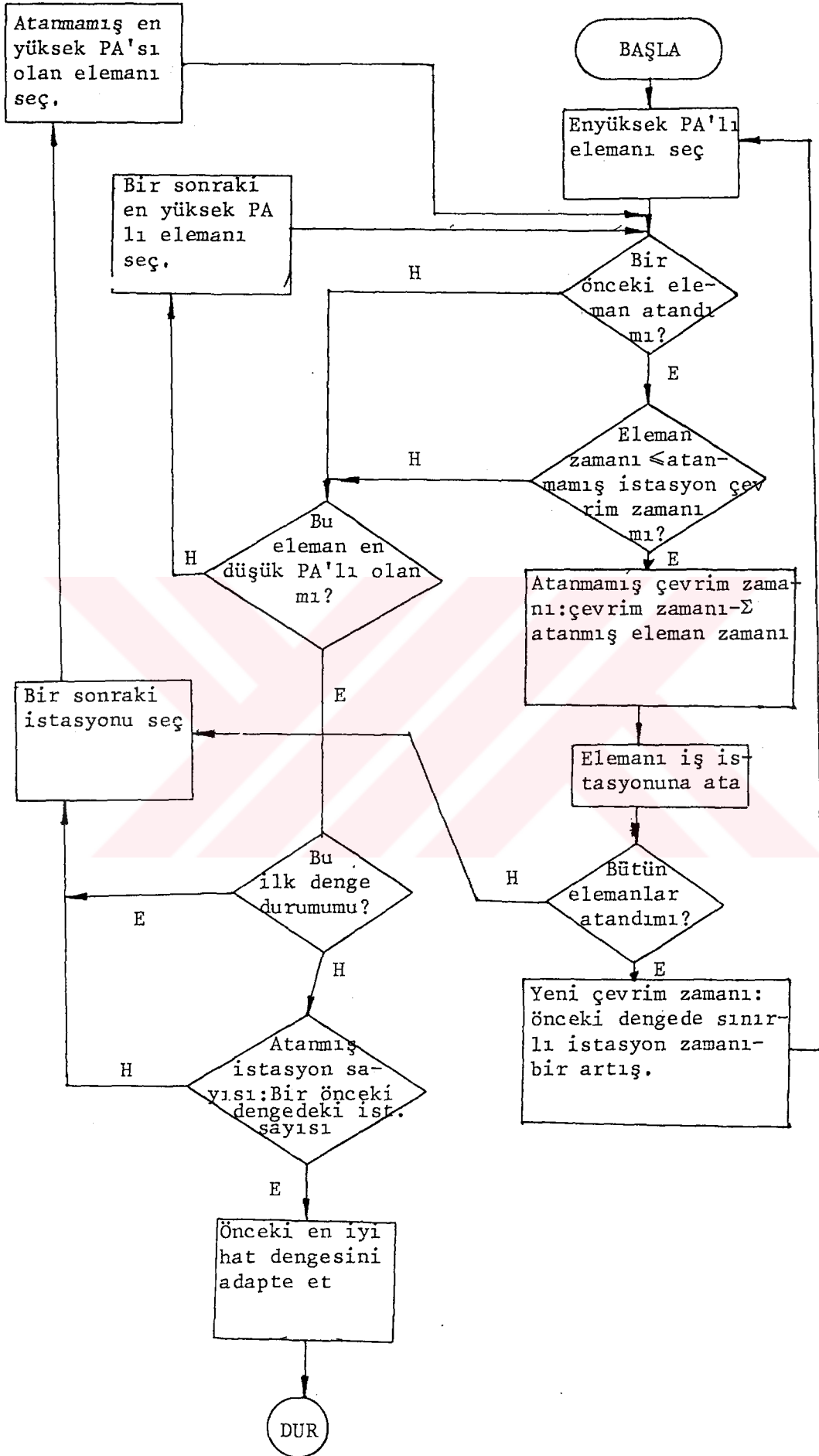
Metodun bir sakıncası, ağırlıkların, işlemlerin ilk tahsis sırasını tesbit etmekte kullanılmasıdır. Oysa bazı durumlarda öncelik sırasını ve diğer kısıtları bozmadan daha yüksek verimler elde etmek mümkün olabilir. Bunun için istasyonları teşkil eden elemanlar, önce hem yüksek pozisyon ağırlıklı olanları, hem de süresi en fazla olanlara (olabilirlik şartlarını bozmadan) yer verilerek yapılabilir. Böylece metot ile bulunan bir çözümü yeniden geriye dönüp geliştirmek mümkündür.

İlgili akış şeması şekil 10'da verilmiştir (21).

#### 2.2.7. Bilgisayar Destekli Montaj Hattı Dengeleme (COMSOAL) Metodu

Diğer dengeleme metotlarını çok sayıda iş elemanları bulunan dengeleme problemlerine uygulamak ve elle çözüm bulmaya çalışmak oldukça acemice bir iştir. Bu yolla çözüm bulmak oldukça güç ve imkansız olduğu için bilgisayar destekli yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemlerden en önemlisi diyebileceğimiz metod COMSOAL (Computer Method of sequencing for Assembly Lines: Montaj Hatları için Bilgisayar sıralama metodu) olup 1966 da Arcus'unda yer aldığı Chrysler şirketi araştırma grubu tarafından geliştirilmiştir.

COMSOAL, veri örnekleme için bir sayısal bilgisayar kullanır ve benzetim tekniğini kullanarak, mümkün montaj hattı denge sistemlerini oluşturur.



Şekil . 10 Sıralanmış pozisyonlu ağırlık metodu akış şeması

Metod şu aşamalardan oluşur.

i) iş elemanları ilk sütunda, hemen önce gelen iş eleman sayısı da ikinci sütunda olmak üzere bir liste hazırlanır (A listesi)

ii) A listesinden, kendisinden önce hiçbir elemana olmayan iş elemanları alınır ve diğer bir liste hazırlanır (B listesi); B listesi A listesinin ikinci sütunda, karşısına sıfır gelen elemanlardan oluşan bir listedir.

iii) evrim zamanını geşmemek şartı ile B listesinden rasgele bir iş elemanı alınarak ilk iş istasyonuna atanır.

iv) iii. basamakta seçilen elemanlar A ve B listesinden çıkarılır ve her iki liste yeniden düzenlenerek B'ye alınabilecek elemanların A listesinde belirlenmesi sağlanır.

v) evrim zamanını geşmemek kaydı ile B'den tekrar bir eleman alınır ve iş istasyonuna atanır.

vi) iv ve v. basamak, bütün iş elemanları bitirilinceye kadar tekrar edilir.

Elde edilen çözümler bilgisayar belleğinde saklanır ve yeni bir çözüm bulunur. Yeni zm B listesinden "Rasgele" eleman seçimi ile elde edilir ve eski çözümle karşılaştırılır. Dengeleme gecikmesi daha az olan çözüm seçilerek bellekte eskisi yerine saklanır. Bu işleme devam edilerek önceden belirlenen bir kriter sağ-

lanınca durdurulur. (veya işlem istenen sayıda tekrarlanır.) Bu amaç için iki kriter kullanılabilir.

1. Dügüm sayısı belirlenir ve bu sayıda seçeneğe bakıp en iyisi seçildikten sonra durdurulur.

2. Ardışık iki çözüm için dengeleme gecikmeleri arasındaki fark, belirlenen bir değerin altına düşünce işlem durdurulur.

Açıklanan metot daha sonra Arcus tarafından geliştirilmiş ve C listesi adı verilen bir liste ilave edilmiştir. Bu liste, standart zamanları sözkonusu istasyonun çevrim zamanını geçmeyen iş elemanlarını içermektedir. Ve elemanlar rasgele seçilmektedirler. Daha sonra bu yöntem, rasgele seçme yerine yanlı ya da ağırlıklı örnekleme ile elemanları C listesinden seçme şeklinde geliştirilmiştir.

Comsoal'dan başka diğer bilgisayar destekli dengeleme yöntemleri şunlardır.

- CALB (Computer Assembly Line Balancing - Bilgisayarla montaj hattı dengeleme) 1968 de Illinois teknoloji Enstitüsünde geliştirilmiştir.

- GALS (Generalized Assembly Line Simulatör-Genel maksatlı Montaj Hattı Benzetimi).

- ALPACA (Assembly Line Planning And Control Activity-Montaj hattı planlama ve kontrol faaliyeti.) (5,22).

Son olarak sıralamış olan bilgisayar destekli hat dengeleme metodu (ALPACA) ayrıntılı olarak (23) nolu referanstadır.

#### 2.2.8. Moodie-Young Metodu

Moodie ve Young [1965] hem işlem zamanlarında varyasyon olduğu zaman, hem de sabit eleman zamanları için dengeleme yapma imkanını veren 2 safhalı bir dengeleme işlemi ortaya koymuşlardır. Bu metotta, değişebilir elemanlar için istatistiki bağımsız normal dağılım zamanlı işlemler farzedilmiştir. Bağımsızlık ve normallik faraziyeleri Moodie-Young'ın topladığı empirik (tecrübeye dayanan) veriler ve daha önce bu konuda yapılan operatör zamanları ile ilgili araştırmaların sonuçları ile haklı kılınmaktadır. İki safhalı bir dengelemenin genellikle optimum bir denge sağlamasına ilaveten işlem; değişebilir zaman verilerinin dahil edilmesine ve kompüter çözümüne imkan vermektedir (14).

Metodun I. safhası işlemlerin 1 nolu istasyondan en son istasyona kadar "Enbüyük Aday Metoduna göre" birbirini takip eden istasyonlara tahsisini kapsamaktadır. Enbüyük aday, maksimum işlem zamanlı bir sonraki işlemdir. Burada adayın, bütün öncelik tahditlerine uygun olması gereğine dikkat etmek gerekir. Moodle ve Young, aday tahsislerini kolaşlaştırmak için öncelik (Predecessor) P ve takipçi (Successor) F matrislerini geliştirmişlerdir. P matrisi bir önceki operasyonların, operasyon

sıralarını sıra hanesinde göstermektedir. F matrisi ise bir sonraki operasyonları takip eden operasyon numaralarını sıralamaktadır.

Şekil 8'deki öncelik diyagramı dikkate alınarak P ve F matrislerinin oluşumu aşağıda gösterilmiştir.

İşlem No      Bir önceki işlemler

1	0	0
2	1	0
3	1	0
4	2	0
5	3	0
6	2	0
7	5	0
8	4	7
9	8	6
10	9	0

Şekil 11. P Matrisi

İşlem No      Bir sonraki işlemler

1	2	3
2	4	6
3	5	0
4	8	0
5	7	0
6	9	0
7	8	0
8	9	0
9	10	0
10	0	0

Şekil 12. F Matrisi

P ve F matrisi oluşturulduktan sonra, işleme şu aşamalarla devam edilir.

#### 1. SAFHA

1) P matris sırasında hepsi sıfır olan satırlardan biri seçilir. Aynı özellikte birden fazla sıfırlı satır varsa, eleman zamanı enbüyük olan satır seçilir.

2)  $i$ 'de tahsis edilen (seçilen) işlemlere karşılık gelen  $F$  matrisi sırasındaki işlem numaraları belirtilir.

3)  $F$  matrisinde not edilen işlem numaralarındaki satırlara,  $P$  matrisinde sıfır yazılır.

4) Bütün işlemler (elemanlar) istasyonlara tahsis edilinceye kadar bu işlemlere devam edilir. ( $P$  matrisinde bütün satırlar sıfır ise problem çözülmüştür.)

Neticede  $\sum d_i < C$  şartını sağlayan sonuç bulunmalıdır. Bulunamıyor ise çevrim zamanı adım adım artırılarak, minimum istasyon sayısı ile denge bulununcaya kadar yukarıdaki iterasyonlar ile çözüme devam edilir (21).

## 2. SAFHA

Birinci safhanın sonunda olduğu gibi işlemler istasyonlara dağıtılır. Fakat toplam boş zaman istasyonlara eşit bir şekilde dağıtılmaz. Moodie ve Young bunun için boş zaman dağıtımını içeren bir işlem geliştirdiler.

1) HEDEF =  $(S_{\max} - S_{\min}) / 2$  değeri hesaplanır.

2)  $S_{\max}$ 'da hedef değeri iki kat daha azdır ve bu değer minimum zamanlı istasyona aktarımı yapılabilir.

3)  $S_{\max}$ 'dan  $S_{\min}$ 'e aktarılan bu gibi elemanların oluşturduğu  $S_{\max}$ 'daki azalma ve  $S_{\min}$ 'deki artma HEDEF değerinden iki kez daha küçüktür.

4) Elemanların devamlı aktarılması, aktarılan elemanın kendisi ve hedef değeri arasındaki farkın çok küçük olmasını sağlar.

5) Eğer  $S_{\max}$  ve  $S_{\min}$  arasında muhtemel aktarma ve değiştirme yapılamıyorsa, aktarmalar aşağıdaki dizilerde, sıralı istasyonlar arasında denenir.

1 ile  $n(n-1)$ ,  $(n-2)$  ....., 3,2

2 ile  $n$ ,  $(n-1)$ ,  $n(n-2)$  .., 3

$n$ , en büyük boş zamanlı,  $n$ . sıralı dizidir. Bu sıralamalar arasındaki aktarım,  $(n-1)$  ile  $n$  sıralı istasyonları arasında son karşılaştırma yapılıncaya kadar devam eder.

6) Eğer, değiştirme ve aktarma hala mümkün olmuyorsa, istasyonlar arası aktarmaların yapılmasının çevrim zamanını bozmayacak bir kısıt olduğuna güvenilerek hedef değerine göre yüklenen kısıt bırakılır.

Büyük montaj hattı dengeleme problemlerinin çözümü için, Moodie ve Young kompüter programlama kullanımını önermişlerdir. Bu konuda akış diyagramlarına dayanan bir çalışmaları vardır (41).

Moodie ve Young ayrıca Literatüre Düzgünlük İndeksi kavramını koymuşlardır (Smoothness Index). Bu index hattın düzgünlüğünü ifade etmek için kullanılır.

$$SI = \sqrt{\sum (S_{\max} - S_k)^2} \quad (2.8)$$

Bu indeksin 0 ya da 0'a yakın olması, hat üzerinde iyi bir dengenin sağlanmış olduğunu gösterir (21).

### 2.2.9. HOFFMAN'ın Öncelik Matrisi Metodu

1963 yılında geliştirilmiş olan metod, deterministik eleman zamanlarını dikkate alan ve genelde optimum sonuç veren bir metottur.

Metotta kullanılan öncelik matrisi sıfır ve ver bir'lerden oluşmaktadır.

Her istasyondaki elemanlar kombine hale getirilerek meydana getirilen toplam eleman zamanlarının, çevrim zamanına eşit olması ile tam denge oluşmaktadır.

Bu genellikle pek mümkün olmaz. Bu durumda,

(Toplam Boş Zaman/Toplam Eleman Zamanı) denge etkinliğinin bir ölçütü olarak kullanılabilir.

Elemanları gruplamada iki sınırlama sözkonusudur.

i) Bazı elemanlar diğerlerinden önce yapılabilirliktir.

ii) Herbir istasyondaki eleman zamanları toplamı, çevrim zamanından küçük ya da eşit olmalıdır.

Metotda en az boş zaman sağlayan eleman bileşiminin seçimi çok önemlidir.

Sütunlar ve arka arkaya gelen eleman numaraları ile sıralar aynı sırada etiketlenir. Matrix girişleri aşağıdaki gibidir.

i) Eğer j sütun elemanları, i. satırın elemanlarından hemen sonra geliyorsa, j. sütunu ile i. satırın keşistiği yere 1 koyulur.

ii) Diğer girişler sıfırdır.

Not:  $1 \gg 3$  (1 önce gelir 3 den) ve  $1 \gg 3 \gg 4$  ise sadece 1'e giriş yapılır. Satır 1 ve sütun 4'de giriş yoktur.

Metotda, bütün fizibil permütasyonlar oluşturulur ve matrisin herbir sütunu toplanır. Bu toplamlar matrisin alt satırına değişik şekilde birleştirilir. Ve oluşturulan yeni satıra "KOD NUMBER" adı verilir. Daha sonra, matrisin köşegeni keyfi bir değer ile (D) etiketlenir.

İlk kod numarası  $K_1$ , tamsayılardan ibarettir ( $\alpha$ ). ve en az bir satır elemanı sıfırdır. Sütundaki elemanların başı  $K_1$ 'de sıfırdır; Fizibil permütasyonların listesinde ilk pozisyon için adaydırlar. Ve sadece aday olabilen elemanlarda onlardır.

Metod şu şekilde işler:

- 1) Kod numaraları içinde sıfır olan elemanı ara
- 2) Sıfırın bulunduğu sütuna karşılık gelen elemanı seç
- 3) Bu elemanın zamanını kalan çevrim zamanından çıkar.
- 4) Sonuç pozitif ise 5. adıma git
- 4a) Sonuç negatif ise 6. adıma git
- 5) Elemana karşılık gelen satırı, kod numarası satırından çıkar ve elde edilen satırı yani kod numarası olarak kullan ve 6'ya git

6) 1. adıma dön ve yeni bir eleman seç. Bütün sütunlar (iş elemanları) gözden geçirilinceye kadar 1-6 adımlarını terarla. Sonra 7'ye git

7) Kalan çevrim zamanını (boş zaman), önce oluşturulmuş kombinasyonun boş zamanından çıkar.

8) Eğer sonuç sıfır veya negatifse 9. adıma git

8a) Eğer pozitifse, son olarak oluşturulan kombinasyon, bu istasyona tahsis edilen iş elemanları setini gösterir.

9) Bir önceki kod numarası matrisine dön ve 1. adımda daha önce seçilen elemanın hemen sağındaki elemanı seçerek yukarıdaki adımları, ilk kod matrisinin (sütununun) son sütununun tesbiti yapıncaya kadar tekrarla. 8. adımda elde edilen son kombinasyon, bu istasyon için max işlem zamanlı kombinasyondur.

10) Tahsis edilmiş iş elemanlarının tekrar kullanılmasını önlemek amacıyla, son olarak bulunan kod numarası matrisini kullanmaya başla

11) Yukarıdaki adımları, bütün iş elemanlarının atamalarının sağlanmasına kadar tekrarla. Bu durumda kod numarası matrisinin bütün elemanları negatif olmalıdır.

Bu metotla, her istasyon için minimum atıl zamanların bulunması, teorik minimuma yakın iyi bir dengeleme sonucu verebilir. Yalnız problem boyutunun oldukça küçük olması gereklidir (24).

## 2.2.10. Kritik Yol Sezgisel Metodu

E.A.El-Sayed ve A.Raouf CL. Tsui [1980] tarafından geliştirilen bu sezgisel metot, farklı koşullarda tutarlı ve olumlu sonuçlar elde etmektedir. Metodun temeli, iş elemanlarına öncelikler atanması ve iş istasyonlarına atama yapılırken öncelikli elemanların seçilmesi esasına dayanır. Metot belirli bir çevrim zamanı için minimum istasyon sayısını hesaplar (4).

Metot iki kısımdan oluşmaktadır.

1) Kritik yolun ve iş elemanlarına öncelik atanmasının tesbiti

a) En az iki aşamada tamamlanan herbir uç elemanı için verilen problemin kritik yolu belirlenir.

Kritik yoldaki kritik iş elemanlarına öncelik atanır.

2) Kendilerinden hemen sonra gelen elemanların zaman değerlerinin toplamı, çevrim zamanına eşit ya da daha büyük olan iş elemanlarına öncelik atanır. (Bu işlem yapılırken F matrisi ele alınır ve yukarıdaki açıklamaya uyan satırlar tesbit edilir ve o sıranın elemanlarına öncelik atanır).

3) Kritik bir elemanın direkt önceli (önünde gelen) ve başka bir kritik elemanında takipçisi (arkasında olan) olan ve kümülatif toplamı, çevrim zamanından büyük olan iş elemanlarına öncelik atanır. Bunun için de P matrisinde kritik elemanlardan hemen önce gelen

ve çevrim zamanından büyük ya da eşit elemanlar tesbit edilir.

4) Kritik elemanların doğrudan önünde gelen ve aralarında en küçük eleman zamanı değerine sahip elemanlara öncelik atanır. Bunu yaparken P matrisinde kritik elemanlar tesbit edilip, ortalama eleman zamanı en küçük olan sırayı oluşturan elemanlara öncelik atanır.

İkinci aşamada iş elemanları iş istasyonlarına "Enbüyük Aday Kuralı" ile atanırlar. Kurala göre önce birinci aşamada öncelik atanmış olan iş elemanları, azalan eleman zamanlarına göre istasyonlara atanırlar. Daha sonra aynı şekilde önceliksiz elemanlar atanır.

İkinci kısımda uygulanan algoritma aşağıdaki gibidir.

1) P matrisinden satırları hep sıfır olan bütün elemanlar işaretlenir bunlara "sağlanabilir (uygun)" elemanlar denilir.

2) Uygun elemanlardan öncelikli ve önceliksiz iş elemaları ayrılarak eleman zamanlarına göre dizilirler. Bunu yaparken evvela öncelikli iş elemanları ele alınır. Bunlar atandıktan sonra, önceliksiz iş elemanları uygun iş istasyonlarına atanırlar.

3) F matrisinde, bir iş istasyonuna atanmış iş elemanının sırasında bulunan diğer iş elemanları tesbit edilir. Tesbit edilen bu iş elemanlarının P matrisindeki sıraları ele alınır ve atanmış iş elemanı ye-

rine sıfır konur. Eğer bu işlemle o satır tamamen sıfırlı sıra haline geliyorsa karşı gelen iş elemanları "uygun eleman" olur.

4) Bundan sonra, 2. adıma dönülerek bütün elemanlar 2 ve 3 adımları tekrar edilerek atanırlar (25).

#### 2.2.11. Enbüyük Küme Metodu (LSR)

P.K. Agrawal 1985'de sunduğu bir makalede iş atamaları için yeni bir kaideden bahsetmektedir. Kural, dalların kümülatif toplanması esasına dayanır. Her mümkün işlemlerin zamanı, çevrim zamanına eşit ise işçinin boş zamanı da sıfırdır. İşlem, işçi boş zamanı sıfır ya da sıfırdan küçük olana kadar devam eder. İstenilen atama yapılmış ise ilk işçi kapatılır. Diğer bir işçi devreye sokulur. Tamamlanan operasyonlar öncelik diyagramından çıkarılır. Kalan operasyonlar yeniden şemalanır ve tekrar hebbirinin ayrı ayrı kümülatif zamanları hesaplanır. Eleminasyon, operasyonun sonuna kadar (denge sağlanıncaya kadar) devam eder.

Neticede bütün operasyonlar istasyonlara atanmıştır. (İşçilere taksim edilmiştir).Elde edilen atama optimal netice verir .

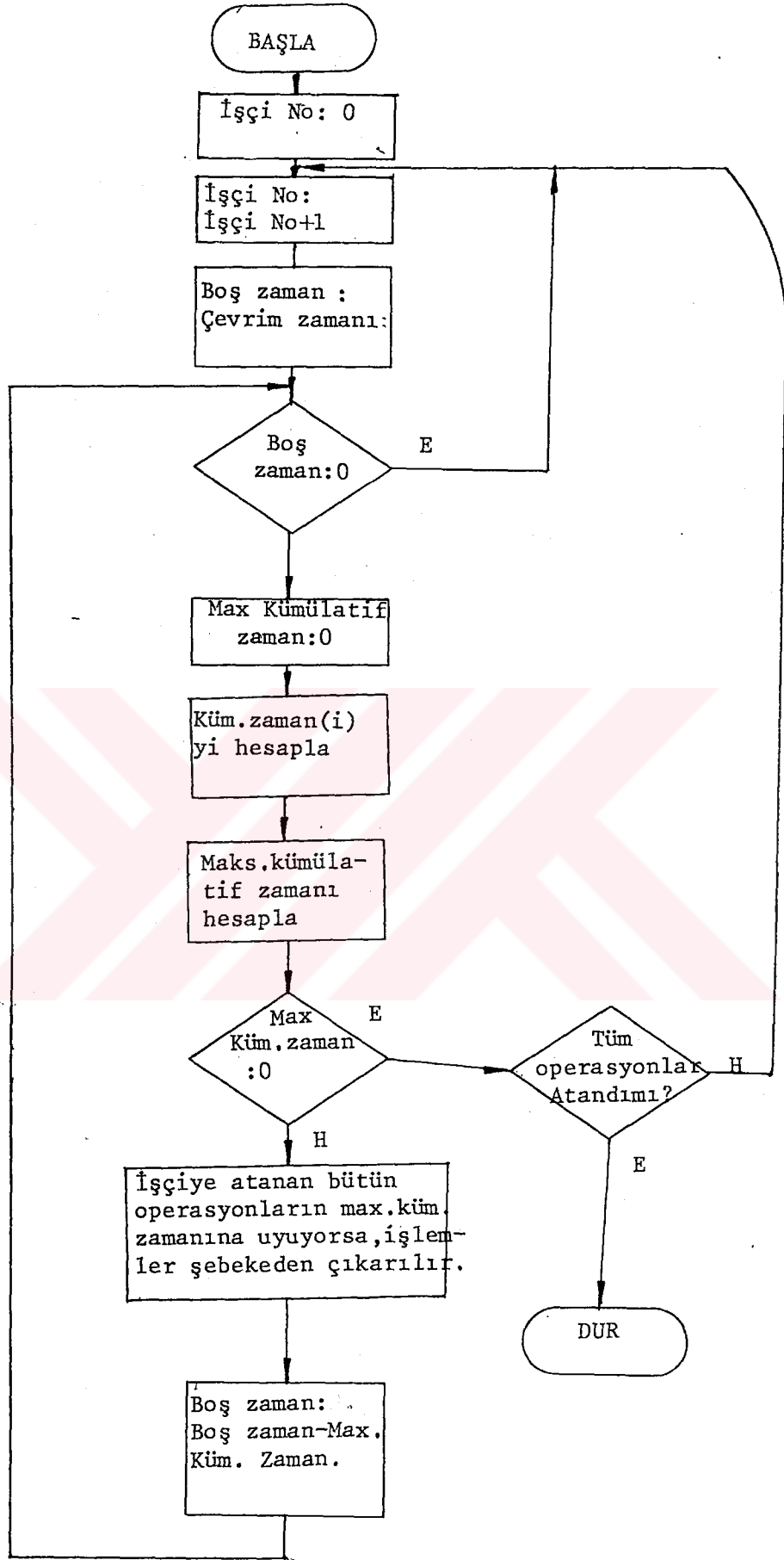
$$\begin{aligned} \text{i İş Elemanı İçin} \\ \text{Kümülatif Zaman} = C_i = \text{İşlem Zamanı (i)} + \sum_{j \in S} \text{İşlem Zamanı (j)} \end{aligned} \quad (2.9)$$

$$\begin{aligned} \text{Maksimum Kümülatif} \\ \text{Zaman} = M = \max_{i \in I} [C_i \leq \text{Boş Zaman}] \end{aligned} \quad (2.10)$$

Metodun Algoritması 13 aşamadan oluşur.

- 1) Bütün işlemlerin kümülatif zamanını hesaplanır ( $C_i$ )
- 2) Çevrim zamanından küçük, maksimum kümülatif zamanı hesaplanır.
- 3) İşçiye tahsis edilen bütün işler, maksimum kümülatif zamanı tamamlıyorsa, öncelik diyagramından çıkarılır.
- 4) Maksimum kümülatif zaman, çevrim zamanından çıkarılarak atıl zaman elde edilir.
- 5) Eğer boş zaman sıfıra eşit ise 13. adıma gidilir.
- 6) Geriye kalan bütün iş elemanları için  $C_i$  kümülatif zaman değeri hesaplanır.
- 7) Boş zamandan küçük, maksimum kümülatif zaman bulunur.
- 8) Eğer maksimum kümülatif zaman sıfıra eşitse 12. adıma gidilir.
- 9) İşçiye tahsis edilen işler, maksimum kümülatif zamanına uyuyor ise öncelik diyagramından çıkarılır.
- 10) Boş zamandan, maksimum kümülatif zamanı çıkarılarak kalan boş zamanı bulunur.
- 11) 5. adıma git
- 12) Bütün operasyonlar atanmış ise DUR
- 13) İşçileri tamamen ata, 1. adamı git ve sonraki işçiler için taksimata başla.

Algoritmanın akış şeması Şekil 13'de verilmiştir.



Şekil . 13 En büyük küme akış şeması

İşçilerin işe atanmalarından sonra, hat düzenleyicisi sıralama (İşçilerin hattaki pozisyonları) hakkında karar verir.

Sıralama seçimi, gerçek boyutta problem için olaganüstü fazladır. Dizayner, esnekliği, hat dizaynının geliştirilmesinde kullanabilir.

Esneklik kullanımında bir takım objektifler verilmiştir.

i) Eğer yaklaşabilmeye mücade edilirse, birden fazla işçi istasyonda aynı montajdaki işe atanabilir. Örneğin bir işçi otomobil önyayını yerleştirirken, diğer işçi de aynı anda arka yayları yerleştirir. Bu da hattın uzunluğunu azaltabilecektir.

ii) Eğer yeniden denge durumu oluşmuşsa, esneklik ufak teçhizat yerdeğişiminde kullanılabilir. Böylece alan sınırlamalarından kurtulmak mümkündür ki bu durum denge kalitesine etki eder.

iii) Eğer ortak teçhizat ve servise iki işçi gerekiyorsa (Yani; aynı teçhizatı iki işçinin kullanması gerekiyorsa) herbir işçiye yakın iş atamaları yapılır. Bu durum dan dolayı montaj hattındaki yatırım da azalır.

İşçilerin ardışıklığının esnekliğinde, hat dizaynındaki güçlü bir şekillendirme, hat denge çözümünde kesin değer sağlayacaktır.

Öncelik diyagramında fizibil ardışıklıkların (sıralamaların) sayısının hesabı oldukça zor iştir. DAR-EL

(1975) Basit esneklik ölçüsünü F-oranı diye isimlendirmiştir ve

$$F_{\text{RATIO}} = \frac{\text{Bağımsız Çiftler}}{\text{Toplam Çiftler}}$$

şekilde tanımlamıştır.

Hat dengeleme çözümleriyle atanan işçilerin sıralamasında bu oran esnekliği ifade eder.

Metot genelde RPW metodu ile eşit netice verir. Yalnız LSR kompütür zamanı RPW metodundan biraz daha fazladır. 3 kez 44 elemanlı hatta yapılan dengeleme çalışmaları neticesinde, boş zaman oranları, toplam boş zamanlar, çevrim zamanlarının her iki metotda da aynı olduğu izlenmiştir. Yalnızca F oranında farklılıklar gözlenir. RPW metodunda,  $F_{\text{ratio}}$  0'a daha yakın olduğundan esnekliği azdır ve genelde ikinci bir sıralama düzenlemesine imkan vermez (26).

#### 2.2.12. Sezgisel Şebeke Metodu

Dannenbring, Khumawala ve Peter A.Pinto [1978] verdikleri makalede; montaj hatlarının dengelenmesi için yeni bir sezgisel metottan bahsetmektedirler. Metotta oluşturulan şebekeye basit sezgisel kurallar uygulanır. Metot için basit montaj hatları dengeleme kaidelerinin herbiri geçerlidir.

$$Z_{\text{min boş zaman}} = KC^* - \sum_i t(i) \quad (2.11)$$

Yukarıdaki eşitliğe ilaveten, bütün görevlerin tamamlanmış olması, bütün iş elemanlarının istasyonlara atanabilmeleri, herbir istasyonun iş kapasitesinin çevrim zamanını aşmaması ve önce gelme şartları kısıt olarak sağlanabilmelidir.

Tek model montaj hattı dengeleme (SMALB) problemlerinde (2.11) ifadesindeki  $\Sigma t(i)$  devamlı olarak bilindiğinden ya  $K^*$ , ya da  $C$  minimize edilir.

Sezgisel şebeke metodu, Gutjhar ve Nemhauser [1964] tarafından geliştirilen algoritmadan türetilmiştir.

$C(i)$  ve  $t[C(i)]$  gösterimleri, sırası ile  $i$  düğümündeki iş elemanlarını ve onların zamanlarının toplamını ifade eder.

$$C(o) = \emptyset \quad t[C(o)] = 0 \quad (2.12)$$

$$C(r) = I \quad t[C(r)] = \sum_j t_j \quad (2.13)$$

Eğer  $C(i) \in C(j)$  ve

$$t[C(j)] - t[C(i)] \leq C \quad \text{dir.} \quad (2.14)$$

Şebekede direkt ark.  $(i, j)$  şeklinde tanımlanır. Ayrıca ark  $C(j)$  deki bütün görevlerin bir istasyona atanmasını uygun kılar.



Yukarıdaki şebekede o-r arasındaki yollarda, iş istasyonlarına uygun tahsisler arasında birebir uygunluk vardır.

SMALB probleminde çözümün bulunması, şebekenin en kısa yolunun bulunmasına eşittir. Uygun düğümlere uygulanan sezgisel metotlar ile çözümün niteliği artırılabilir. Sezgisel şebeke için SMALB problemlerinin bütün dengeleme metotları kullanılabilir.

Her bir sezgisel metot, bir çözüm elde etmek için kullanılır. Bu çözüm direkt şebekedeki düğümlerin setine eşittir.

Düğümlerin setleri, karmaşık şebeke şeklinde birleştirilebilir. Sonra herbir sezgisel bağımsız bir şekilde başlı başına uygulanır. Burada en kısa yolun mümkün çözümü ve ilave edilen arkların gözönüne alınmasıyla en iyi sonuç elde edilir.

İlk sezgisel metot uygulandığında bir  $i$  görevli problem için toplam  $i + 1$  düğüm bulunur. Bütün sezgisel kaideler için başlangıç ve bitiş düğümleri ortak olduğundan dolayı toplam  $i-1$  düğüm bulunur. Eğer proseste  $n$  sezgisel metot uygulanıyor ise karmaşık şebekede toplam

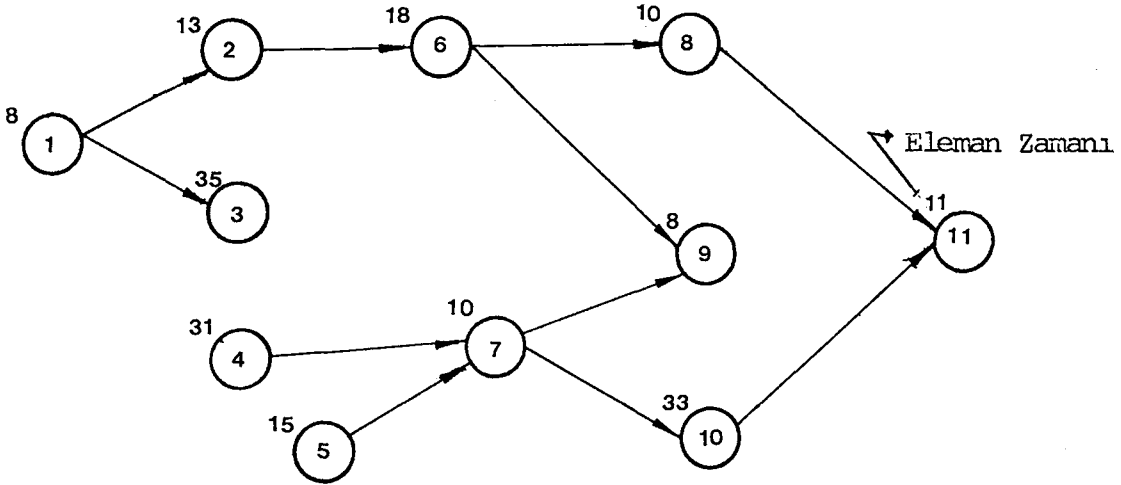
$$[(n-1)(i-1) + (i+1)] = n(i-1) + 2 \quad (2.15)$$

düğüm olduğu bulunmuştur.

Proses oluşturma esnasında eş düğümlerin eliminasyonu ile karmaşık şebekedeki düğümlerin sayısında bir azaltma yapılabilir.

Netice itibariyle  $t[C(j)] - t[C(i)] \leq C$  neticeleri tesbit edilir ve istasyonlar belirlenir.

Metodun işleyişini basit bir örnekle vermek istiyorum;



Şekil 14. 11 elemanlı öncelik diyagramı

Çevrim Zamanı = 50

Çözüm için 3 değişik sezgisel kullanılmıştır ve herbirleriyle elde edilen istasyon atama çözümleri aşağıdadır.

Tablo 2. Sezgisel çözümlerin oluşturulması

Çözüm No	Kullanılan Sezgisel Metotlar	GÖREV ATAMALARI
1	C(i)	1, 2, 6, 8    4,5    3,7    9,10    11
	t[C(i)]	→ 49    46    45    41    11
2	Enbüyük görev zamanı C(i)	1,3    4,5    2,6,7,9    10,8    11
	t[C(i)]	43    46    49    43    11
3	Random C(i)	1,3    5,2,6    8,4    7,9    10,11
	t[C(i)]	43    46    41    18    44

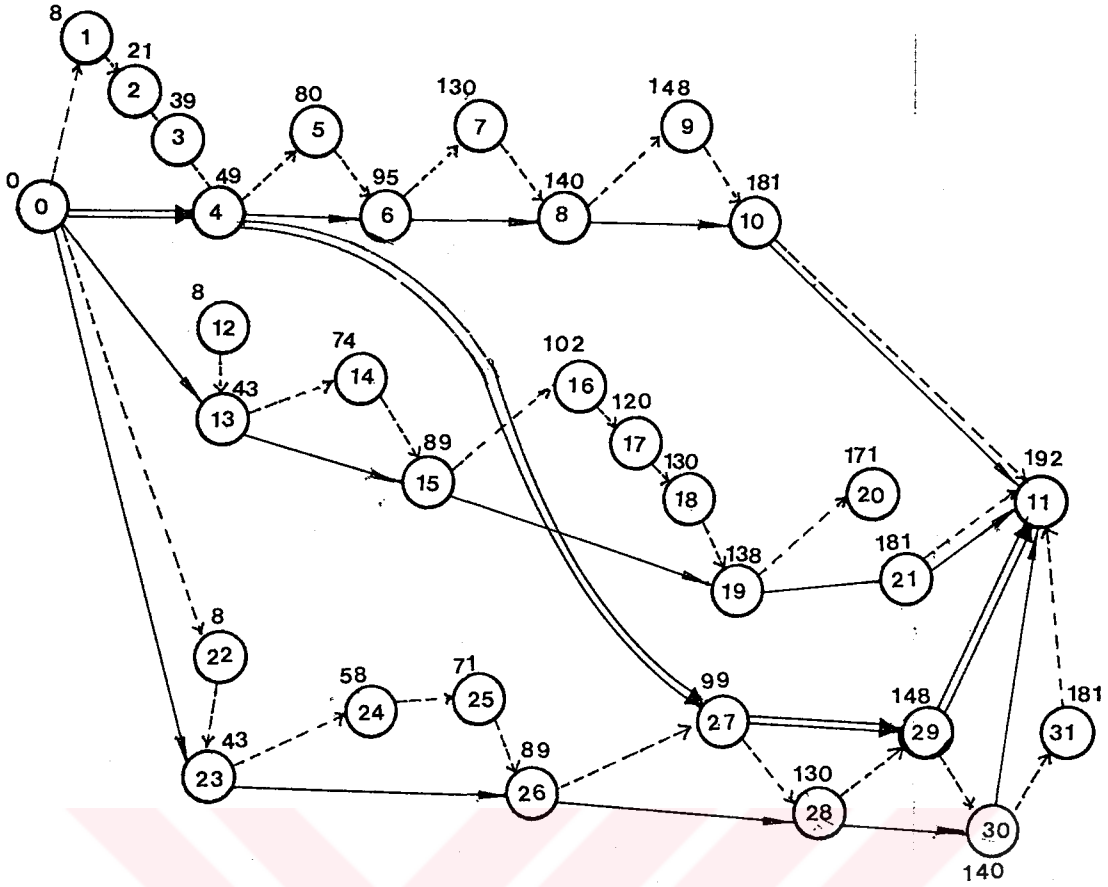
.....: Karmaşık networkte en kısa yola karşılık gelen istasyon atamaları.

Tablo 3. Random Atama Sezgiselinin Kullanımı

Düğüm No (i)	G Ö R E V L E R	t[C(i)]
0	0	0
1	1	8
2	1,2	21 1
3	1,2,6	39
4	1,2,6,8	<u>49</u>
5	1,2,6,8,4	80 2
6	1,2,6,8,4,5	<u>95</u>
7	1,2,6,8,4,5,3	130
8	1,2,6,8,4,5,3,7	<u>140</u> 3
9	1,2,6,8,4,5,3,7,9	148
10	1,2,6,8,4,5,3,7,9,10	<u>181</u> 4
11	1,2,6,8,4,5,3,7,9,10,11	<u>192</u> 5

diğer sezgisellere göre de yukarıdaki tablo oluşturulur. Buna göre karmaşık şebeke oluşturulur. Karmaşık şebekede 0 ve 11 düğümü hepsinde ortaktır.

Oluşturulan şebekede en uygun yol düğümleri ile istasyon,



Şekil 15. Karmaşık Şebeke

Atamaları yapılabilir. Çözüm geriye dönüşlü olarak sondan başa doğru yapılır. Ark uzunluğunun arzu edilen çevrim zamanına eşit ya da küçük olması zorunluluğu vardır.

Dolayısıyla ilk ark (0,4), ikinci ark (4,27), üçüncü ark (27,29) ve 4. ark (29,11) dir.

- |                       |                           |
|-----------------------|---------------------------|
| 4. istasyon görevleri | $C(11)-C(29) = \{10,11\}$ |
| 3. " "                | $C(29)-C(27) = \{4,7,9\}$ |
| 2. " "                | $C(27)-C(4) = \{3,5\}$    |
| 1. " "                | $C(4)-C(0) = \{1,2,6,8\}$ |

şeklinde elde edilen istasyon atamaları optimaldir (27).

Sezgisel şebeke, literatürde görünen değişik problemlerde bilgisayar ile test edilmiştir.

### 2.2.13. Paralel Atama Metodu (PAM)

Metodun bulunduğu makale, Akagi, Osaki ve Kikuchi tarafından 1981'de Uluslararası Üretim Yönetimi konferansında sunulmuştur.

PAM (Parallel Assignment Method) ile herbir istasyon için iş elemanları ve işçi sayılarının en iyi kombinasyonu sağlanabilir. Dolayısıyla denge etkinliği de maksimumdur. Metot'ta her iş istasyonunda birden fazla işçinin bulunmasına müsaade edilebilir. İşçilerin tümünün eşit performansta çalıştığı varsayılmıştır. Bir iş istasyonuna birden fazla işçinin atanması ile üretim oranı artırılır. Böylece çevrim zamanı da azalır. Metot genellikle yüksek üretim oranı elde etmek için kullanılır.

PAM 2 safhadan oluşmaktadır. 1. safha da iş elemanları iş istasyonlarına atanır. İki veya daha fazla işçi bir istasyona atanabilir. 2. safha da, iş elemanları, herbir istasyondaki işçilere tahsis edilirler. İş elemanı bölünmez minimum iş parçası olduğundan, işçilerin herbiri küçük iş elemanlarını işlerler.

Ana prosedür, k. iş istasyonuna iş elemanlarının atanmasıdır. İlk durumda atanabilir iş elemanlarının biri seçilir ve atanan iş elemanları zamanlarının toplamı, üst zaman sınırına (ki çevrim zamanı üst limiti  $C_u = 1/Z$ ; Z: üretim oranı) eşit olana kadar atanır. İkinci durumda iş elemanları  $2xC_u$ , sonraki durumda  $3xC_u$ 'ya

kadar atanır. İşçilerin sayısının en iyi bileşeni ve iş elemanları seçilir ve k. istasyona verilir. Prosedür iş elemanları atanana kadar tekrarlanır. Bu durumda atanmış iş elemanlarına ileri ve geriye seçim metotları kullanılabilir. İleri seçimde, diyagramın başından sonuna doğru öncelik ilişkileri ve iş elemanlarına bakılır. Geriye seçim metodu, sonra gelme ilişkilerinde kullanılır ve diyagrama sondan başa doğru bakılır.

İleri ve geriye doğru her bir seçim için aşağıdaki 4 kaideler kullanılabilir.

- i) En büyük aday (Moodie ve Young)
- ii) En küçük aday
- iii) RPW (Helgeson Birnie)
- iv) Random (Arcus)

PAM 1'in aşamaları aşağıda sıralanmıştır.

- 1) Başlangıç data kümesi  $R' = \{w_i, i=1 \dots i\}$  ve  $k=0$
- 2)  $k=k+1$  ve  $l=0$  3. adıma geç
- 3)  $l=l+1$ ,  $I_k(l)=0$  ve  $T_k(l)=0$  4. adıma geç
- 4) k. istasyonda 1. aşamadaki atanabilir iş elemanlarını seç ( $w_a$ )

4.1)  $w_a \in R'$

4.2)  $\{w_a \mid t_a < l \times C_u - T_k(l)\}$  boş zamanların sınırları ile atanabilir iş elemanları

4.3)  $\{w_a \mid (M_a = M_{kh}(l), h=1 \dots I_k(l) \cup (M_a = \emptyset))\}$ , performans kısıtlamalarıyla atanabilir iş elemanları

Eğer  $\{w_a\}$  seçilebilirse 5'e aksi halde 7'ye git

5) Atanabilir iş elemanları setinden  $\{w_a\}$  bir iş elemanı seç.

6) Seçilmiş iş elemanı, 1. üst zaman limiti ile k. istasyona atanır ve şu hesaplamalar yapılır.

$$I_k(l) = I_k(l) + 1, \quad h=1 \dots I_k(l), \quad w_{kh}(l) = w_a, \quad t_{kh}(l) = t_a,$$

$$T_k(l) = T_k(l) + t_a \quad \text{ve} \quad R' = R' - \{w_a\} \quad 4. \text{ adıma dön}$$

7) 1. sınır ile atanmış iş elemanlarını yeniden yerleştir.

$R' = R' + \{w_{kh}(l), \quad h=1 \dots I_k(l)\}$ , Eğer  $l < m_{kmax}$  ise 3. adıma dön. Eğer  $l \geq m_{kmax}$  ise 7. adıma git.

8) k. istasyondaki iş elemanları ve işçilerin sayısının en mümkün kombinasyonunu seç. En iyi mümkün aşama  $l_0$  ise

$T_k(l)/(l \times C_u)$  da  $l_0$  kullanılır ve ilgili hesaplamalar şöyle olur.

$$m_k = l_0, \quad I_k = I_k(l_0), \quad T_k = T_k(l_0), \quad w_{kh} = w_{kh}(l_0), \quad t_{kh} = t_{kh}(l_0)$$

$$h=1 \dots I_k(l_0) \quad \text{ve} \quad R' = R' - \{w_{kh} \quad h=1 \dots I_k\}$$

Eğer  $R' \neq \emptyset$  ise 2. adıma dön,  $R' = \emptyset$  ise bir sonraki adıma geç

9) Dengeyi hesapla ve PAM I safhasını durdur.

$$K=k, \quad C = \max \{T_k/m_k\} \quad \text{ve} \quad e = T/(\sum m_k \cdot C) = T/\pi \times C$$

PAM I. safha ile elde edilen  $m_k$  işçili k istasyonu farzedelim ve iş elemanları seti  $\{w_{kh}, \quad h=1 \dots I_k\}$  ni ele alalım.

Paralel atanmış iş elemanlarını  $m_k$  işçi yaptığında her bir  $m_k$  zamanlı işçinin iş yükü  $m_k X C$  kadardır. Böyle bir sonuç üretim hattındaki iş bölümünün değerini azaltır. Sıralamada, iş elemanları her bir işçiye atanarak en büyük işlem zamanı azaltılır.

Safhada önce işçilerin herbiri bir iş istasyonuna atanır. Sonra boş kalan işçinin diğer meşgul işçilere ayırdığı zaman (Yardım Zamanı) hesaplanır.

PAM 2 aşamaları da aşağıda sıralanmıştır.

10) k. istasyonun başlangıç data kümesi

$$m_{kh} = 0, R_{t_{kh}} = t_{kh} \quad h=1 \dots I_k \quad \text{11. adıma git}$$

11) En büyük yokluk (Shortage) zamanına sahip  $w_{kl}$ 'yi seç ve  $w_{kl}$  ye bir tek işçi ata.

$$R_{t_{kl}} = \max \{R_{t_{kh}}, h=1 \dots I_k\} = M_{kl} = m_{kl} + 1 \text{ ve}$$

$$R_{t_{kl}} = R_{t_{kl}} - C \quad l \in \{1 \dots I_k\} \quad \text{12. adıma git}$$

12) Eğer  $\sum m_{kh} < m_k$  ise 11. adıma dön.

Eğer  $\sum m_{kh} = m_k$  ise işçilerin herbiri iş elemanlarının birine atanmıştır.

$R_{t_{kh}} > 0$  ise  $w_{kh}$ 'ın yardım zamanına ihtiyacı vardır.

$R_{t_{kh}} < 0$  ise işçilerden biri boş zamanlı  $w_{kh}$ 'ye atanır.

$R_{t_{kh}}$  değeriyle yardım zamanı  $H_{t_{ki \rightarrow kl}}$  ye karar verilir.

13) Enbüyük yokluk zamanına sahip  $w_{kl}$ 'yi seç.

$$Rt_{kl} = \max \{Rt_{kh}, h=1 \dots I_k\}$$

Eğer  $Rt_{kl} > 0$  ise sonraki adıma geç.

Eğer  $Rt_{kl} \leq 0$  ise PAM 2. safha işlemini durdur. Zira yardıma ihtiyacı olan hiçbir eleman kalmamıştır.

14) Enküçük yokluk zamanlı  $w_{ki}$ 'yi seç.

$$Rt_{ki} = \min \{Rt_{kh}, h=1 \dots I_k\} \quad i \in \{1 \dots I_k\}$$

bu aşamada  $w_{ki}$  enbüyük boş zamandır.

Eğer  $|Rt_{ki}| \geq Rt_{kl}$  ise 15. adıma git

Eğer  $|Rt_{ki}| < Rt_{kl}$  ise 16. adıma git

15)  $Ht_{ki \rightarrow kl} = Rt_{kl}$   $Rt_{ki} = Rt_{ki} + Rt_{kl}$  ve  $Rt_{kl} = 0$  13. adıma dön

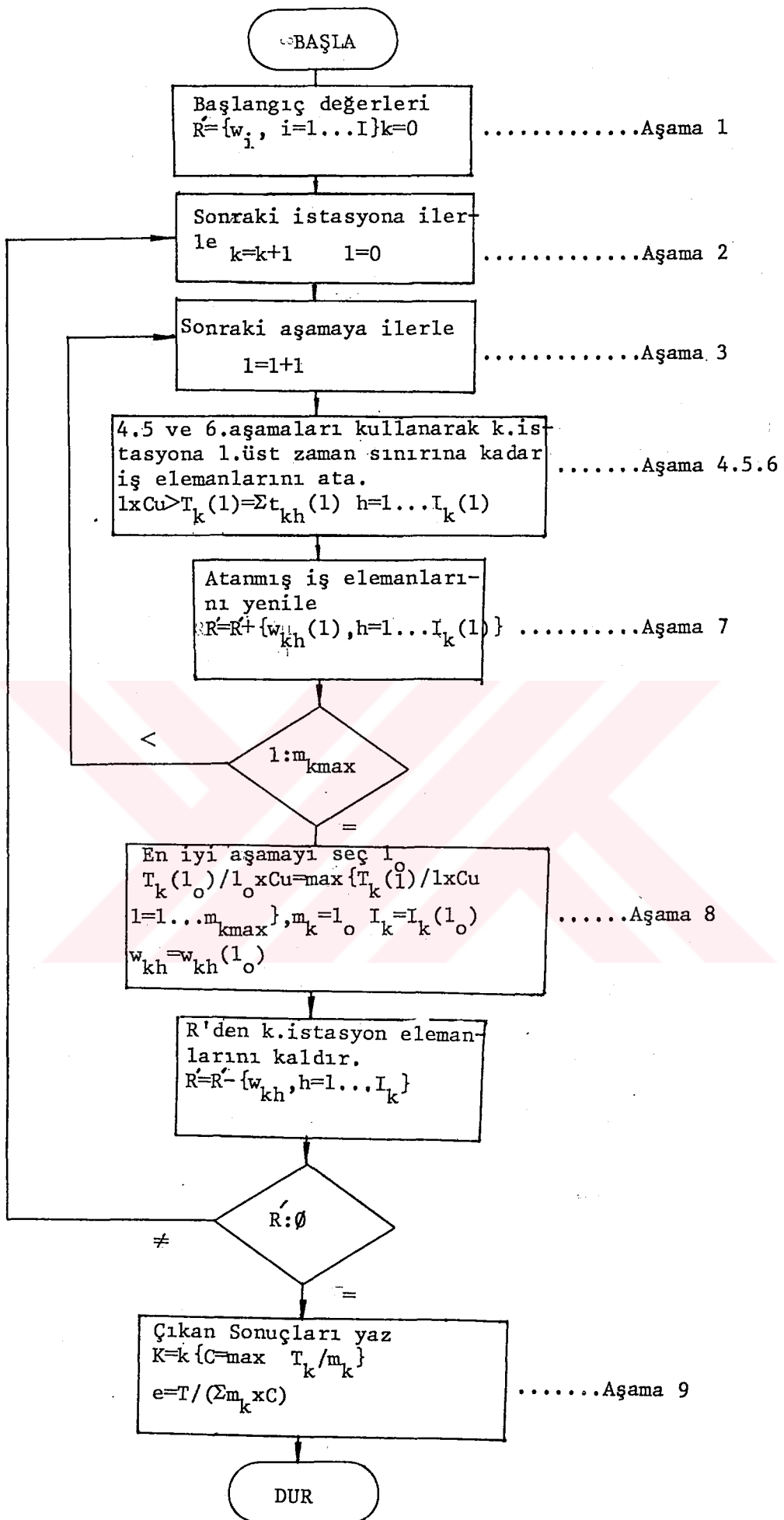
16)  $Ht_{ki \rightarrow kl} = |Rt_{ki}|$  ve  $Rt_{kl} = Rt_{ki} + Rt_{kl}$   $Rt_{ki} = 0$  13. adıma dön.

$Ht_{ki \rightarrow kl}$  = Yukarıdaki metotla kulurmuş her bir çevrim, yardım zamanıdır. Bunun anlamı, işçilerin herbiri  $w_{ki}$ 'ye atanır fakat  $w_{kl}$  de de çalışabilir.

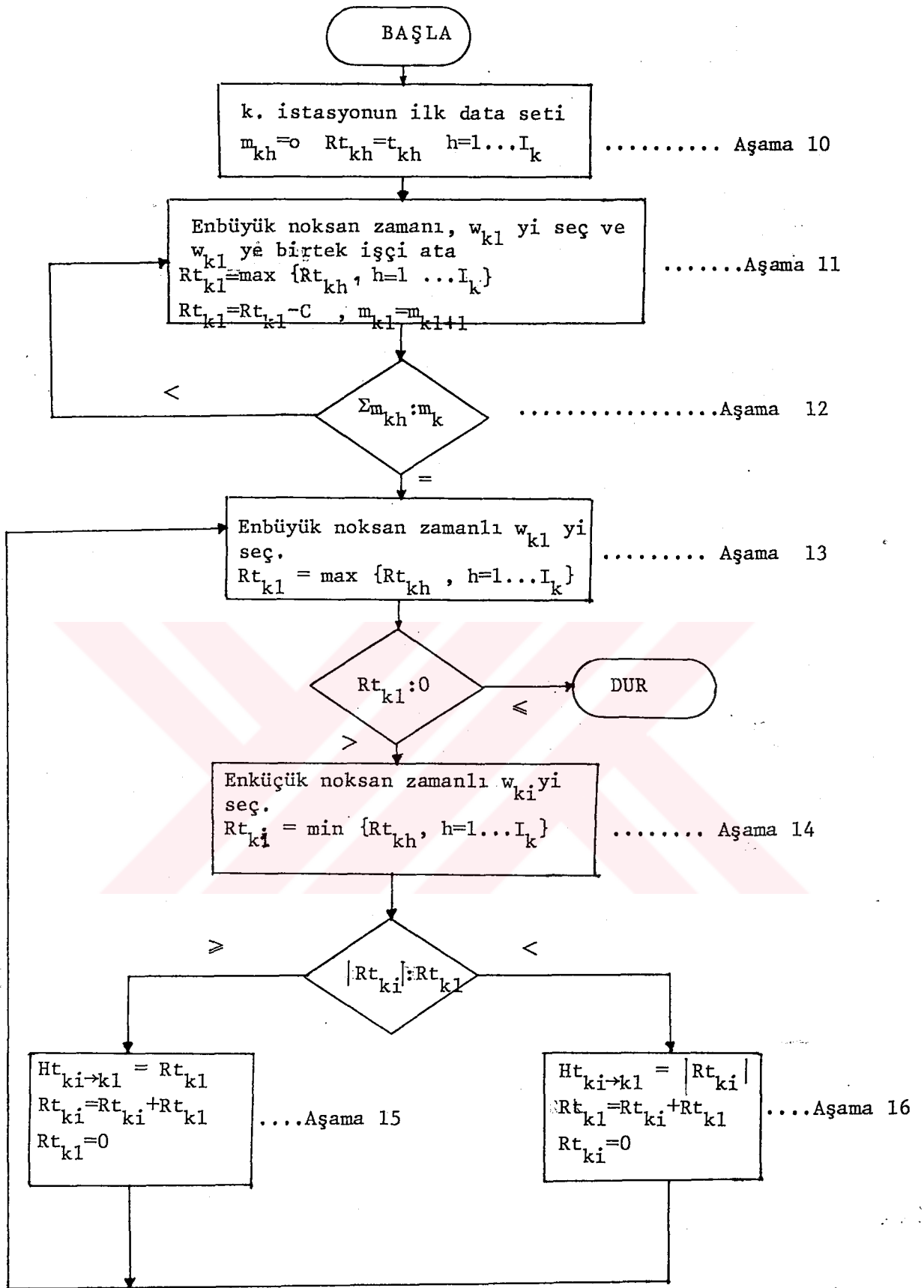
L çevrim esnasında işçi önce  $w_{kl}$ 'yi sonra  $w_{ki}$ 'yi yapar.

$$L = \lceil t_{kl} / Ht_{ki \rightarrow kl} \rceil$$

PAM 2. safha bütün istasyonlara uygulanabilir. Fakat tek işçili veya tek iş elemanlı istasyonlara uygulanmasına gerek yoktur. Metotla ilgili akış şemaları Şekil 16 ve Şekil 17'de verilmiştir (28).



Şekil . 16 PAM I. kısım akış seması



Şekil . 17 PAM II. kısım akış şeması

#### 2.2.14. Doğrusal Programlama Yaklaşımı

Montaj hatlarının dengelenmesinde Doğrusal programlama yaklaşımı Bowman [1960] tarafından geliştirilmiştir. Yaklaşım, problemi doğrusal programlama (L.P) modeli biçiminde formüle etmekte ve daha sonra optimal sonuca ulaşmaktadır.

Bowman'ın formülasyonu aşağıda verilmiştir.

##### Kısıtlar

a) İş istasyonuna fazla yüklenme mümkün değildir. Her zaman  $S_k \leq C$  şartı vardır ve her k istasyonu için aşağıdaki sınırlayıcı şart geçerlidir.

$$\sum_k t_i X_{ik} \leq C \quad (2.16)$$

$$X_{ik} = \begin{cases} 0, & \text{Eğer } i \text{ işi } k. \text{ istasyona atanmamış ise} \\ 1, & \text{Eğer } i \text{ işi } k. \text{ istasyona atanmışsa} \end{cases}$$

b) Bütün işlerin tamamlanması gerekir.

$$\sum_k X_{ik} = X_{i1} + X_{i2} + \dots + X_{ik} = 0 \quad (2.17)$$

Eğer bölgeleme kısıtı var ise eşitlik 1'e eşitlenir.

c) Birbirini izleme şartı

$$X_{ik} \leq \sum_{k=1}^K X_{i-1,k} \quad (2.18)$$

d)  $X_{ik} > 0$  ve işlemlerin istasyonlararası paylaşılabilmesidir.

$$X_{ik} = 0 \text{ veya } 1 \quad (2.19)$$

### Amaç Fonksiyon

Amaç toplam iş istasyonu sayısını minimize etmektir. Optimal iş istasyonu sayısı  $K = \sum t_i / C$  şeklinde bulunmakta idi. Pratikteki nedenlerden dolayı gerekli istasyon sayısı optimal istasyon sayısından fazla olabilir. Bu durumda olabilecek en fazla istasyon sayısının üst sınırı olarak ifade edilmesi gerekir. İstasyon sayısının artmasıyla beraber  $k+1$  den  $k+R$  ye kadar bu artışın getirdiği artan maliyet söz konusudur. Bu maliyet artışları  $A, B, Z$  ile gösterilir ( $A > B \dots > Z$ ) (4).

$$Z_{\min} = A X_{h,k} + B X_{h,k+1} + \dots + Z X_{h,k+R} \quad (2.20)$$

Bowman tarafından sunulan bu ilk matematiksel yaklaşımın, büyük çaptaki dengeleme problemlerinde uygulanabilme imkanı hemen hiç yoktur. Zira problemin boyutu (hem değişken, hem de denklem sayısı bakımından) dikkate alınan işlem (operasyon) sayısı ile çabuk artar. Bu sebepten, LP ile problemin incelenmesi, pratikten ziyade, yer ve imkan bakımından akademik bir önem taşır (21). Doğrusal programlama ile problem çözmeyi arzu edenler açısından Bowman ve onun modeli üzerindeki White [29]'ın çalışmaları tavsiye edilir.

Daha sonra doğrusal tamsayılı programlama ile yapılan birçok çalışmaya raslamak mümkündür.

Patterson ve Albract [30] hat dengeleme için 0-1 tam sayılı programlama formülasyonu geliştirmiştir. İl-

ker Baybars karışık tam sayılı programlama ile tek model montaj hatlarının dengelenmesi üzerine yeni bir formülasyon geliştirmiştir.

İstasyonların çok elemanlı olması durumundaki montaj hattı dengeleme problemlerinin çözümü için de J.M. Wilson tamsayılı programlamanın kullanılabilirliğini göstermiştir. İstasyonlara elemanların ve çalışanların atanmasını içine alan problem serileri Shtub tarafından incelenmiştir.

Problem, iş istasyonlarının çok insanlı olması, elemanların ve çalışanların tahsis edilmesi ve bu yolla toplam maliyetinin minimize edilmesiyle ilgilidir.

Eğer bir iş  $w_k$  ekip hacmi ile (crew size) k istasyonuna atandığında her bir işin  $i \in I$  tamamlanması için gerekli zaman  $t_i(w_k)$  dir. Tanımlaması tamsayılı programlama ile yapılan, Shtub tarafından verilen formülasyon şöyledir.

$$Z_{ikl} = \begin{cases} 1, & \text{Eğer } l \text{ grup hacmiyle } k \text{ istasyonuna } i \text{ görevi} \\ & \text{atanmışsa} \\ 0, & \text{Aksi halde} \end{cases}$$

$$\text{Min} \quad \sum_{k=1}^K w_k \quad \text{hat boyunca toplam işgücünün minimizasyonu} \quad (2.21)$$

#### Kısıtlar

$$\sum_{l \in w_i} l Z_{ikl} \leq w_k \quad (2.22)$$

Bütün  $i \in I$  için  $k=1 \dots K$ , her bir istasyondaki grup büyüklüğü (crew size), istasyona atanan bütün elemanların yapılması için yeteri kadar büyük ölçüde olmalıdır,

$$2) \sum_{i \in I} \sum_{l \in W_i} t_i(l) Z_{ikl} \leq C \quad (2.23)$$

bütün  $k=1 \dots K$  için her bir K istasyonundaki çevrim zaman kısıtlamaları

$$3) \sum_{l \in W_i} \sum_{k=1}^K Z_{ikl} = 1 \quad (2.24)$$

$i \in I$ ,  $k=1 \dots K$  her bir eleman (iş) yalnız bir istasyona atanır ve her istasyon için yalnız bir işgücü hacmi kullanılır.

$$4) \sum_{l \in W_i} Z_{ikl} \leq \sum_{t=1}^k \sum_{l \in W_j} Z_{itl} \quad (2.25)$$

öncelik kısıtı  $l \in I$ ,  $k=1 \dots K$

ve  $w_k \geq 0$   $k=1 \dots K$

olmak üzere pozitiflik şartı mevcuttur (31).

### 2.2.15. Değişir Eleman Zamanlı Montaj Hattı

#### Dengeleme

Şimdiye kadar açıklanan metotların hepsi, iş eleman zamanlarının belirli (deterministik) olduğu varsayımını yapmışlardır.

Üretim hattında insanlar çalışır, fakat bu insanlar iş periyodu boyunca tam olarak çok nadiren aynı hızda çalışırlar. Bazen hiç çalışmazlar. Bundan başka her

farklı iki kişinin çalışma hızı aynı değildir. Böylece insan değişkenliği sistemi karmaşıklaştırır ve montaj hattı dengeleme problemini deterministik bir problem olmaktan çıkarıp, işletme mühendisleriyle atelye yöneticilerinin üstesinden gelmesi gereken bir stokastik problemi haline sokar.

Yani pratikte eleman zamanları rastgele değişkenlerdir. Bu nedenle iş yüklemelerini kapasitenin altında tutmakta fayda vardır. Böylelikle eleman zamanlarındaki rastgele değişimlere karşı bir güven faktörü elde olunacağı gibi, işçiye dinlenme ve ritm değiştirme imkanı da sağlanır (32).

Montaj hattı problemi değişik eleman zamanları altında çözen ve Moodie-Young [23], Mansoor, Brennecke, Ransing ve Downing, Rao, Reeve tarafından geliştirilen metotlar, eleman zamanlarının normal olarak dağılmış olduğu varsayımını yapmışlardır (33).

Moodie ve Young'un çalışmaları bu konudaki ilk çalışmalar olarak kabul edilebilir. Metoda göre normal varsayım, işlem varyanslarının istasyon varyanslarına ilave edilebilmelerine imkan vermektedir. Aynı zamanda herbir normal tesadüfi değişkenin toplamının dağılımı da normal bir dağılımı takip eder. Bu da standart normal dağılım altındaki alanın tablolar kullanarak belirli bir zamanda bir istasyonun tamamlanma olasılığıyla ilgili hipotezin tek taraflı olarak denenmesine im-

kan verir.  $S_k$  arzu edilen güven seviyesindeki tamamlanma yönünden istasyon zamanını temsil eder ise,

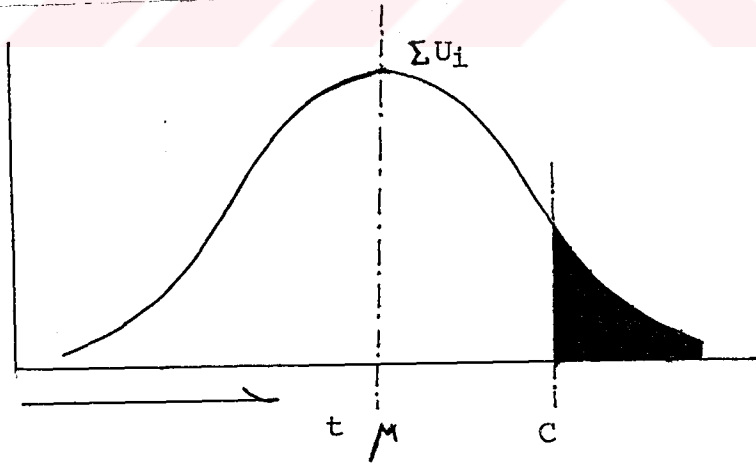
$$S_k = \sum_i u_i + r \sqrt{\sum_i \sigma_i^2} \quad (2.26)$$

Değişkenliği, bağımsız normal işlem zamanlarından ayrı olarak düşünmenin neticesi olarak daha önceki Moodie ve Young'un incelenen metodun da safha 1 ve safha 2'nin optimizasyon amacı şöyledir.

$$\text{Min } \sum_{k=1}^K [C - (\sum_i u_i + r \sqrt{\sum_i \sigma_i^2})] \quad (2.27)$$

Sabit veri kriteri yerine değişebilir veri kriterinin konması ile prosedür aynı kalmakta ve formül şöyle ifade edilebilmektedir (21).

$$\text{Min } \sum_k (C - \sum_i u_i) \quad (2.28)$$



Şekil 18. Değişkenlik içinde çevrim zamanı ve ortalama eleman zamanı.

Bu konuda yapılan önemli çalışmalardan birisi Roouf Tsui'ye aittir. Geliştirilen metodun ana özelliği, elemanlara öncelik atanmasıdır ve istasyonlara elemanların atanması sırasında öncelikli elemanlar, önceliği olmayan elemanlara tercih edilirler. Metot, bilinen ya da bilinmeyen simetrik dağılımlardan eleman zamanlarını alır, bir istasyon içindeki değişimleri minimize eder ve herbir istasyon zamanı, yönetim tarafından belirlenen olasılık güvenlik seviyelerini aşmayacak şekilde, elemanların istasyonlara atanmasına izin verir.

Literatürlerden görülebilir ki, eleman zamanlarının normal olarak dağılması mutlak olarak gerekli değildir. Sphicas ve Silverman (34), belli eleman zamanı dağılım sınıfları için Stokastik formülasyonun, deterministik yaklaşıma eşdeğer olduğunu göstermişlerdir. Montaj hattı dengeleme problemleri üzerine yapılan çalışmalara ilişkin bir inceleme Ignall ve Kılbridge ile Wester tarafından verilmiştir. Mevcut metotların incelenmesiyle, araştırmacılardan hiçbirisinin, elemanlar iş istasyonlarına atanırlarken istasyon zamanlarındaki değişimleri minimize etmeyi düşünmedikleri görülür.

Raouf ve Tsui, Omar'ın geliştirdiği yaklaşıma dayalı yeni bir sezgisel metot geliştirmiştir. Yeni metot istasyon zamanlarındaki değişimleri minimize etmek ve herhangi bir simetrik dağılımdan gelen eleman zamanlarını kabul etmek için uygundur.

## Değişim Katsayısı

Bir dağılımın değişim katsayısı (CV), standart sapmanın ortalamaya oranı olarak tanımlanır. Brady ve Drury; elemanlar arasında hiçbir karşılıklı korelasyon olmadığını varsayarak, bir elemanlar grubuna, yeni bir eleman eklenirse, yeni elemanın  $CV^2$  sinin, eski grubun  $CV^2$  sinin  $(1 + 2xf)$  katından daha küçük olması halinde yeni grubun değişim katsayısının eski grubunkinden daha küçük olacağını gösterdiler. Parantez içindeki  $f$ , eski grubun ortalamasının yeni elemanın ortalamasına oranıdır.

Bu kavramı, montaj hattı dengeleme metoduna dahil ederek, istasyon zamanları değişiminin azaltılması mümkündür. Atama için sağlanabilir elemanlardan oluşan listeden, istasyon zamanının çevrim zamanını geçmesine yol açmaması ve istasyon zamanının çevrim zamanını aşması olasılığının önceden belirlenmiş bir değer sınırları iç inde kalması şartıyla, mevcut istasyona yerleştirilebilen bir elemanlar kümesi seçilir. Bu elemanlar kümesinden eldeki istasyona dahil edilmesi Brady ve Drury teoremini gerçekleyecek şekilde bir elemanlar alt kümesi seçilir. Alt kümedeki elemanlar arasından en küçük CV değerine sahip olan eleman, mevcut istasyona ilave edilmek üzere seçilir. Bu yolla, iş istasyonuna bir elemanın eklenmesinin, istasyon zamanındaki değişimi azaltacağı temin edilmiş olur. Böylece, istasyon zamanının, çevrim zamanını geçmesi olasılığı azal-

tılır. Neticede de hattın genel olarak çalışması iyileştirilecektir.

### CHEBYSHEV'in Eşitsizliği

Elemansal zamanın tam olarak normal bir dağılım gösterdiğine ilişkin açık deliller olmadığı için, eleman zamanları ile istasyon zamanları üzerinde yapılan normallik varsayımı Chebyshev eşitsizliği kullanılarak yumuşatılabilir.

Eğer X, ortalaması  $\mu$  ve varyansı  $\sigma^2$  olan rasgele bir değişken ise pozitif herhangi bir  $y$  sayısı için aşağıdaki eşitsizlik geçerlik kazanır.

$$P(|X-\mu| \geq y\sigma) \leq 1/y^2 \quad (2.29)$$

Eleman zamanları arasında bağımsızlık olduğunu varsayarsak ve istasyon zamanını (S), C ortalamalı simetrik dağılıma sahip rasgele bir değişken olarak düşünersek, Chebyshev'in eşitsizliğine göre şu denklemi elde ederiz.

$$P(|S-C| \geq y\sigma_s) \leq 1/y^2 \quad (2.30)$$

Biz sadece  $(S-C) \geq 0$  olduğu durumla ilgilendiğimizden son eşitsizlik şöyle yazılabilir.

$$P[(S-C) \geq y\sigma_s] \leq 1/2y^2 \quad (2.31)$$

Yukarıdaki (2.31) eşitliği basit olarak (S-C) nin  $y\sigma_s$  değerini aşması olasılığının daima  $1/2y^2$  den küçük ya da buna eşit olduğunu gösteriyor. İstasyon zamanının ortalama ve standart sapması biliniyorsa, herbir opera-

törün verilen görevi önceden belirlenmiş bir C değeri içinde yapılabilmeleri olasılığı hesaplamak mümkündür.

Eğer bize bir istasyon zamanının verilen çevrim zamanını aşması olasılığını gösteren belli bir olasılık güvenlik seviyesi, örneğin  $P_c$  verilirse bu durumda aşağıdaki ifadede  $y$  değerini hesaplayabiliriz.

$$y = \sqrt{\frac{1}{2P_c}} \quad (2.32)$$

Eleman zamanları arasında hiçbir karşılıklı ilişki olmadığını varsayarsak (2.33)'den faydalanarak istasyon zamanını bulabiliriz.

$$S_k = \sum_i u_i + y \sqrt{(\sum_i \sigma_i^2)} \quad (2.33)$$

Değişir eleman zamanlarının incelenmesinde, teklif edilen düşünce biçimleri Omar'ın metoduyla birleştirilecektir. Deterministik eleman zamanı için metoda ilişkin tam açıklama ile kompütür programı (25) nolu referansta bulunabilir.

Bir çevrim zamanının, karşılıklı ilişkisiz eleman zamanlarının ve bir öncelik diyagramının verildiği varsayılır.

Metot iki kısımdan oluşur. I. kısım kritik yolun ve iş elemanlarına öncelik atanmasının tesbit edilmesidir. İlk kısım (2.2.10) da incelenen deterministik kritik yol sezgisel metodunun ilk kısmı ile aynıdır.

Eleman değerlerini tahmini değişkenler olarak işleme tabi tutmak için, değişim katsayısı (CV) ve Chebysev'in eēitsizlięi, yukarıda genel olarak belirtildiği gibi sezgisel metoda dahil edilirler. evrim zamanlarına ek olarak, ortalama eleman zamanları ile öncelik diyagramı, eleman zaman varyansı ve maksimum olasılık güvenlik seviyelerinin de verildiği varsayılmaktadır.

Metodun 2. kısmında elemanlar "Enkk CV ncelik kuralı" ile montaj hattı boyunca birbirini takip eden iş istasyonlarına atanırlar. Bu ilk önce istasyonun değişim katsayısında en düşük artışa yol açan elemanları ve aynı Şekilde izleyen, önceliği olmayan elemanları gözönüne almayı gerektirir. Metodun 2.kısımındaki adımlar sıralanmıştır.

1) p matrisinden sıraları hep sıfır olan bütün elemanlar işaretlenir. Bunlara "sağlanabilir (uygun)" elemanlar denilir.

2) Uygun elemanlardan, öncelikli ve nceliksiz elemanlar, sırasıyla önceliği olanlar ve olmayanlara ait olan listeye yerleştirilir.

3) 2. adımda elde edilen öncelik listesinden, bir öncelikli elemanlar kümesi oluşturulur. Kümedeki herbir eleman aşağıdaki iki Şartı sağlar.

a) Elemanın istasyona dahil edilmesi, istasyon zamanının çevrim zamanını aşmasına neden olmayacaktır.

b) Sonuç olarak ortaya çıkan istasyon zamanının, çevrim zamanını aşması olasılığı, önceden belirlenmiş bir değerden daha küçük kalacak veya bu değere eşit olacaktır.

4) 3. adımda elde edilen kümeden, Brady ve Drury teoremini gerçekleyen elemanlardan oluşan bir elemanlar alt kümesi oluşturulur.

5) Eğer bu alt küme boş ise, 3. ve 4. adım önceliği olmayan elemanlara ait liste de (önceliksizlik) yer alan elemanlar için tekrar edilirler. Aksi halde bu alt kümeden, istasyonun değişim katsayısında en küçük artıma neden olanlar hali hazırdaki istasyona atanırlar. Önceliği olmayan elemanlardan oluşan alt küme de boş ise Brady ve Drury teoremi atlanır.

Bu durumda, istasyona atanan elemanların seçimi, öncelikli elemanlar için tercih hakkı kullanılarak istasyon CV'sinde en küçük artıma neden olanlara dayanarak yapılır.

6) F matrisinde atanmış elemanın satırındaki elemanlar işaretlenir. Henüz işaretlenmemiş bulunan elemanlar tarafından belirtilen, R matrisinin tekabül eden satırlarındaki atanmış eleman yerine bir sıfır konur. Bir sıfırın konması P matrisindeki satırın tamamen sıfır olmasına yol açıyorsa, buna karşı gelen eleman uygun bir eleman olur.

7) Elemanlar, 2-6 adımlarına göre öncelik ve önceliksiz listeleri boş oluncaya kadar atanırlar. Bu duruma ulaşıldığında problem çözülmüş olur.

#### Bölgelere Ayırma Kısıtlamaları

Elemanların istasyonlarda gruplandırılmaları sırasında ileri sürülen öncelik şartlarından başka, üretim imkanlarının genel yapısı nedeniyle, bölgelere ayırma kısıtlamaları da montaj hatlarında yaygın bir durumdur. Örnek olarak; işlerin, operatörün taşıyıcı bandın karşı tarafına geçmesini gerektirdiği durumlarda, ürünün ön ve arka yüzünde yapılacak olan bu işlerin bir operatöre atanmamasıdır.

Bölgelere ayırma kısıtlamalarına ve buna ilaveten deterministik ve değişken eleman zaman değerleri için bir çözüm bulmak amacıyla sezgisel metotta değişiklikler yapılır. Uygun elemanları öncelik (Priority) ve önceliksizlik (Non-Priority) listelerine yerleştirmek yerine, bunları şimdi aşağıdaki 4 listeden birisine koyacağız.

1) Sadece hali hazırdaki bölgeye yerleştirilebilen elemanları içeren öncelikli bölge listesi

2) Sadece hali hazırdaki (Current) bölgeye yerleştirilebilen elemanları içeren önceliksiz bölge listesi

3) Hali hazırdaki bölgeye ya da başka bölgelere yerleştirilebilen elemanları içeren öncelik listesi

4) Hali hazırdaki bölgeye ya da başka bölgelere yerleştirilebilen elemanları içeren önceliksizlik listesi

Öncelikli bölge (Priority Zone) listesinin en yüksek önceliği, önceliksizlik listesinin ise en düşük önceliği vardır.

Birçok araştırmacı bölgelere ayırmada karşılaşılan sınırlamalardan söz etmiştir. Fakat montaj hattı dengeleme, bölge sınırlamaları problemini kendi teklif ettikleri yöntemleri kullanarak, özellikle değişken eleman zamanları için çözmemişlerdir (33).

Stokastik elemanlı montaj hattı dengeleme prosedüründe Kottas ve Lau (1976) normal dağılmış eleman zamanlı hattın toplam maliyet değeri için bir maliyet modeli sunmuşlardır. Aynı şahısların (1981) hat dizaynı için maliyet minimizasyonu çalışmalarına raslamak mümkündür. (İşgücü ve noksan maliyet)

Kotkas - Lau herbirim için ümit edilen maliyeti şu şekilde formüle etmişlerdir.

$$E(TC) = L_m T.K + \sum J_G P [G] \text{ dir.} \quad (2.34)$$

İstasyonların çok insanlı ve görev zamanlarının değişir olduğu montaj hatlarının dizaynında üç faktör etkilidir.

i) İşçilik maliyeti; hattaki işçilerin toplam sayısı ile ilişkilidir.

ii) Noksan maliyet; herbir iş istasyonuna işçiler ve görevlerin atanmasıyla ilişkilidir.

iii) Tesis yerleşim ve proses içi stok maliyeti; Hat boyunca kullanılan iş istasyonlarının sayısı ile ilişkilidir (35).

#### 2.2.16. Diğer Montaj Hattı Dengeleme Metotları

Şu ana kadar stokastik ve deterministik eleman zamanlı basit montaj hattı dengeleme üzerine birçok temel metod incelenmiştir. Bu konuda daha birçok metoda raslamak mümkündür.

##### LBHA-1 Algoritması

Metot I. BAYBARS tarafından geliştirilmiş, basit montaj hatlarına uygulanan, tam ve yeterli çözüm metodudur.

Metotda  $N=(V,A)$  ibaresi, verilen problemin ağ üstünlüğünü ifade eder.  $V$  verteks (düğüm noktası) kümesini ve  $A$  ise ark kümesini ifade eder.  $V$  elemanları görev  $i$  ile ilgili olarak  $V_i$  tarafından tanımlanır ve  $A$  elemanları, görevlerin işlemine başlanılmasından önce görev  $r$ 'nin tamamlanması için teknolojik özelliklerini kapsayan öncelik ilişkisine uygun olan  $(V_r, V_s)$  ile olmak üzere bir sıra takip eden çiftler  $(V_i, V_j)$  tarafından belirtilirler.

Metot 5 Safhadan Oluşmaktadır.

1. safha da mümkünse bazı düğüm noktalarının atılması suretiyle problem hafifletilir. Bu ilk adım görevlerin uzun olanlarını tanımlamak içindir-uzunluk durumu işlem süreçlerine göre verilen çevrim zamanıyla ilgilidir. İlk önce belirgin durum  $= V_{d,1} = \{i \in I \mid t_i + t_{\min} < C\}$  olursa açıkça  $V_{d,1}$  kümesinin her elemanı ayrı ayrı bir istasyon teşkil edecektir, ve öncelik ilişkisi ihlal edilmediği sürece bu tür görevler, bunun verilme safhasında veya diğer çözüm usulleri tatbiki esnasında, aktif olarak dikkate alınmaya ihtiyacı göstermezler. İlgili düğüm noktalarının öncelikli ağıdan çıkarılması ilk ve önemsiz redüksiyon tipinin elde edilmesini sağlar. Öncelikli ağıdan bir düğüm noktası  $r$  çıkarılırsa, herhangi bir müteakip  $r$  de olduğu gibi aynı istasyona  $r$ 'den önce gelebilecek birim tatbik edilmemelidir.

2. Safha, karşılıklı olarak esas görev kararlarını tanımlar.

3. Safhada imkan dahilinde problem küçük problemlere ayrılır.

4. Safhada aynı istasyona verilmesi muhtemel görevlerin topluluğu belirlenir.

Nihayet son safhada indirilmiş şebeke/problem için muhtelif sezgisel metotlar kullanılmak suretiyle bir çözüm aranır (36).

### Mansoor Tarafından Geliştirilen Metot

Mansoor, RPW metodundan hareketle basit montaj hatları için farklı bir metot geliştirmiştir. Mümkün istasyon sayısı ve çıktı verimlilik kapasitesi arasındaki bağıntıyı incelemiştir.

Çıktı verimliliği, verilen  $K$  ve  $t_i$  için  $1/C$  ile orantılıdır. Gevşek birimler, tam dengelemenin mümkün olmadığı durumlarda istasyonlara atanan noksan zaman birimleridir. Zaten çıktı verimliliği ve gevşek birimler (Slack Unit) kavramlarını standart bilimsel terimlerle Mansoor eklemiştir.

Mansoor'un tesbit ettiği maksimum istasyon sayısı şöyle bulunur.

$$K_{\max} = \frac{T}{t_{\max}} \quad (2.35)$$

Burada  $K_{\max}$  değeri, tam sayı çıkmaz ise, virgülden sonraki sayı dikkate alınmadan bir üst tamsayıya tamamlanır. Çevrim zamanı şu bağıntıyı verir.

$$C = T/K = P + \frac{\alpha}{K} \quad (2.36)$$

$\alpha$ : kalan

$\alpha = 0$  ise tam dengeleme mümkündür

$\alpha \neq 0$  ise tam dengeleme mümkün değildir.  $C$  bir üst değere (tamsayılı değerine) ulaşır (37).

### MALB Metodu

Büyük tek model montaj hattı dengeleme problemleri genel çözümleri için Malb metodu E.M.Dar-el (Mansoor) tarafından 1964 yılında geliştirilmiştir. Metot optimal arama kaidesine dayanır. En ideal sonuçlar büyük montaj hattı dengeleme problemlerinin sıralaması ile yapılan kontrollerden elde edilir.

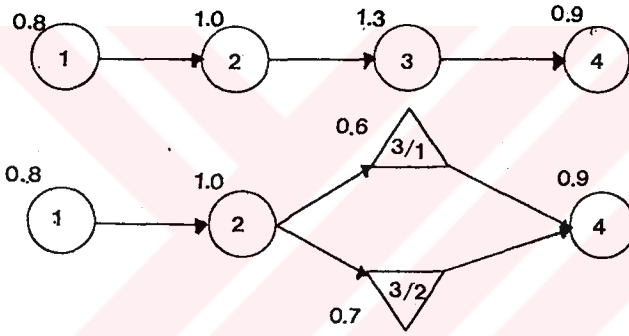
Malb metodu, değişken sayısının büyük olduğu ve geniş mesafeli olarak kurulan, montaj hattı dengeleme problemlerinin çoğunda dengeleme etkinliğine yol gösterir. MALB, mevcut montaj hatlarının tekrar dengelenmesi, bölgeleme kısıtları, işçi performans seviyeleri değişkenliği ve işlem zamanı değişkenliğini incelemek için kolaylıkla uygun hale getirilebilir. MALB, optimum arama teknikleri olarak bilinen birkaç sezgisel kurala geliştirilen başarılı bir algoritmadır (38).

### Dal-Sınır Metodu

Dal-sınır (Branch and Bound) metodu, istasyonların paralelliği ile ilgilidir. İstasyonların paralelliği kavramı ise şu şekilde açıklanabilir.

Her iş kısmi bir istasyona atanır. Aynı iş için iki istasyon birden kullanılamaz. Paralellik, spesifik bir işin birden fazla istasyonda yapılabilmesidir. Paralel durum, iş elemanlarının farklı istasyonlarda paralel yapılabilmesi için ilave edilen değerlerin maliyetini gözönüne alır (41).

Çevrim zamanı 1'dk ve toplam işyükü 4 dk olan bir dengeleme probleminde minimum iş istasyonu sayısı  $K=4$  olmalıdır. Bunu sağlayabilmek için Şekil 19'da görüldüğü gibi 1.3 dk'lık işlem süresi ile 3 nolu istasyon darboğaz teşkil etmektedir. Fakat bu işlem ikiye bölünerek paralel iki istasyonda yapılırsa, dengeleme gecikmesi minimum düzeyde tutulur. Bölünen elemanın ayrı istasyonlarda yapılması zorunludur ve her iş bağımsızdır (5).



△ X; Paralel görevler

Şekil 19. Paralel istasyonlar ile darboğaz görevin Parçalanması

Paralel montaj hattı dengelemede asıl problem, hat toplam maliyetinin minimizasyonu için paralel hale getirilecek elemanların seçimidir. Bu maliyetler düzenli işçilik maliyeti, istenilen üretim oranını karşılayabilmek için gerekli fazla mesai maliyeti (overtime) ve paralel görevler için ilave değerlerin maliyetidir.

Dağ-sınır metodu ile; hangi elemanların paralel hale getirilmesi maliyet açısından en uygundur sorusuna

cevap verilebilir. Metot ile hat dengeleme problemi için çözüm arayacaklar metodun işleyiş detaylarını aynı referansta bulabilirler (39).

Bütün bu metotlardan başka Freeman ve Jucker (1967), istasyonlarda çoğu zaman birden fazla işçi olması durumunun, hattaki toplam boş zamanı azalttığını ileri sürmüşlerdir. Buxey, iki veya daha fazla eş istasyon kullanılabilirdiğini ve büyük elemanların gerekli çevrim zamanına uyabilir olduğu varsayımını yapmıştır. Shtub ise (1982) deterministik eleman zamanlı iş istasyonlarında çok insanın olması problemini ele almıştır.

Hat boyunca işçilerin toplam sayısı ve iş istasyonlarının sayısı, toplam sistem maliyetini oluşturan iki önemli faktördür. İş istasyonlarının sayısı kullanıldığında tesis yerleşim ve proses içi stok maliyeti oluşur. Hat boyunca işçilerin sayısı, işçilik maliyetini oluşturur. Amaç toplam maliyetin minimizasyonudur. Hattın dizaynında, hattın durumunu nokta serileri gösterir. İşgücü-iş istasyonu mümkün kombinasyonu ile benzer noktalardan oluşan bir nokta serileri, hattın etkin sınırını oluştururlar.

Makul büyüklükteki problemler için etkin sınır (Efficient frontier) bulmada tamsayı programlama büyük zaman gerektirir. Bu nedenle Shtub, Branch—Estimate diye bilinen bir algoritma geliştirmiştir (35).

### 2,3. Metotların Karşılaştırılması ve Değerlendirilmesi

Buraya kadar incelenen metotların kısa bir değerlendirmesini vermek istiyorum.

Salveson'un ve Basamak hesaplama metodu, küçük ölçekli problemlerin elle hesabında başarılıdır. Operasyon sayısı arttığı oranda bütün kombinasyonların tesbit ve analizi, metodun başarılı olmama ihtimalini artıracaktır (15).

Hoffman'ın metodu, her istasyon için minimum boş zamanların bulunması, teorik minimuma yakın iyi bir dengeleme verebilir. Fakat arka arkaya gelen istasyonların max olarak yüklenmesi yolu ile optimal çözüm garantilemez. Metot küçük boyutlu problemlerde kullanılır (24).

Kılbridge - Wester metodu, basit ve hızlı bir metottur. İyi çözümler elde edebilmek için kişisel beceriyi gerektirir. Metodun bilgisayar çözümü biraz büyük ölçekli problemlerde oldukça zordur.

RPW metodu, enbüyük aday metodu ( LCR ) ve Kılbridge - Wester metotlarının geliştirilmesi sonucunda elde edilmiştir. Metot ile bulunan bir çözümü yeniden geriye doğru dönüp geliştirmek mümkündür. Metot hızlı fakat yaklaşık bir metottur (5).

Enbüyük küme metodu (LSR), RPW ile eşit sonuçlar verir. Yalnız LSR kompütür zamanı, RPW'den daha fazladır. 3 kez 44 elemanlı hatta yapılan çalışma sonucu,

Toplam boş zaman ve çevrim zamanlarının her iki metotta da aynı olduğu izlenmiştir. Yalnızca F oranında farklılıklar görülür. RPW metodunda F oranı 0'a daha yakın olduğundan esnekliği azdır ve genelde ikinci bir sıralama düzenlemesine imkan vermez (26).

Moodie – Young metodu, değişik eleman zamanları ve sabit eleman zamanları için dengeleme yapmaya imkan vermektedir. Metot sezgisel bir metottur. El ile değerlendirmenin yapılabilmesi ve işlerin istasyonlara eşit dağıtılmasını temin eder (14).

COMSOAL metodu, büyük ölçekli problemler için etkin sonuçlar verir. COMSOAL deneme metodudur. Metot Chrysler işletmesine uygulamış ve 1000 işi olan 200 istasyonlu bir hatta kullanılmış ve sıfır boş zamanla bilinen en iyi çözüm elde edilmiştir. Yine metot 111 eleman için 999 kez işletilmiş ve 56 sn gibi az bir kompüter zamanı gerektirmiştir (12).

Kritik yol metodu, orta büyüklükteki montaj hatlarının dengelenmesinde optimum sonuç verir. Az bir kompüter zamanı gerektirir. Problem boyutu büyüdükçe fazla işlem ve kompüter zamanı gerektirir (4).

MALB metodu, büyük ölçekli problemlerde iyi sonuçlar verir. COMSOAL ve 10 SP sezgisel metotlarından (Helgeson-Birnie tarafından sunulmuş, tekgeçiş esasına dayanan metotların 10'unun yer aldığı tekniktir. Bu 10 teknik Helgeson – Birnie Modie – Young ve Mukherjee –

Basu tarafından geliştirilen metotların birleştirilmesinden oluşur. Metotta iş elemanlarının sıralanması için farklı sıralama sistemlerinin kullanılmasıyla elde edilen 10 çözümün en iyisi seçilir.) iyi sonuçlar verdiği, COMSOAL'ında 10 SP den daha iyi neticeler verdiği görülmüştür (40).

PAM metodu, yüksek üretim oranı elde etmek için ideal bir metottur. Metot ile herbir istasyon için iş elemanları ile işçi sayılarının en iyi bileşimi sağlanabilir (28).

Raouf ve Tsui'nin değişik eleman zamanlı metodu, istasyon zamanı değişiminin minimizasyonunu temin eder. Çözüme iş elemanlarının eleman zaman dağılımlarını dikkate alarak varır. Metot Hoffman ve RPW'da daha iyi sonuçlar vermiştir. Farklı olasılık güvenlik seviyelerinde Moodie-Young'ın değişir eleman zamanları metoduyla yaklaşık eşit sonuçlar vermiştir (33).

Bütün dengeleme metotları, belirli şartlar altında optimal ya da optimale yakın neticeler verirler. Bu nedenle herhangi bir metot için problem özellikleri belirlemeden en iyi metottur demek güçtür. Fakat birçok örnek problemler için denenmiş ve iyi sonuçlar sağlamış etkili metotlardan sözedilebilir.

Dengelemede ele alınan probleme en uygun modelin seçilerek uygulanması çok önemlidir.

Hat dengeleme problemleri için etkin neticeler sağlayan, önemli şu metotları söyleyebiliriz. Raouf-Tsui ve Sayed in Kritik yol sezgisel metodu, stokastik eleman zamanlı dengeleme metodu, Moodie Young'un değişir eleman zaman metodu, enbüyük küme metodu ve büyük tek model montaj hatları için MALB Metodudur. Uygulamada gerçek sistemi temsil eden metotlar, eleman zamanlarındaki değişkenlikleri gözönüne alan metotlardır ki bunlar Moodie ve Young ile Raouf ve Tsui tarafından geliştirilen değişir eleman zamanlı dengeleme metotlarıdır.

## BÖLÜM 3

### MONTAJ HATTI DENGELEME UYGULAMA ÇALIŞMASI

#### 3.1. Sistemin Tanımı

Çalışma, tarım kredi kooperatiflerine bağlı tarım makinaları fabrikasında, 4 ton kapasiteli, ahşap kasalı 2D-S4 tipi çift dingilli römork üzerinde yapılmıştır. Bunun yanı sıra fabrika da daha değişik tarım makinaları da üretilmektedir. Bütün bu üretimler aynı anda farklı yerlerde değil, aynı hatta daha önceden hazırlanan programa göre yapılmaktadır. Fabrika siparişe göre üretimini gerçekleştirmekte olup, sipariş sayısı planlama döneminde küçük sapmalarla tahmin edilebilmektedir. Yani ürünlere olan talebin büyük bir kısmı belirlidir. Fabrikada bir üretimden başka bir ürütime geçiş yöneticilerin subjektif kararlarıyla gerçekleşmektedir.

Römork montajındaki kompleler, başka departmanlarda farklı işçilerce yapılmakta ve hazır durumda hatta iletilmektedir. Çalışmada sadece bu komplelerin montajlarıyla ilgilenilecektir. Ürünün geniş hacimli olması nedeniyle yarımamül stok durumu sözkonusu değildir.

İncelenen 4 ton'luk römork üretimi tipik bir montaj hattında gerçekleşmemektedir. Planlama departmanının programına göre Yıllık 1360 Adet römork üretimi ya-

ni yaklaşık günde 4 adet'lik üretim yeterli olmaktadır. Fakat 4 adet/gün römork üretimi için hergün hat çalışmamakta ve hat çalıştığında da tam gün römork üretimi yapılmaktadır. Şu anda hat'tın çalıştığı günlerde 9 adet/gün römork üretilmekte ve hat sistemli bir şekilde işlemektedir. Römork üretimine tahsis edilen zamanda 11 adet römork üretilirse (fazla maliyet getirmeden veya mevcut imkanlarla) siparişler programa göre daha düzenli karşılanabilecektir. Yönetim hattın yeniden düzenlenmesi ve en optimal şekilde 11 adet/gün römork üretimini temin edecek dengelemeyi istemektedir.

Amaç, oluşturulacak istasyonlara elemanların sistemli bir şekilde tahsisi, boş zamanların minimizasyonu ve istasyon sayısının mümkün olan en az sayıda tesbitidir ve dolayısıyla dengelemenin pozitif etkilerini görebilmektir.

### 3.2. Seçilen Metodun Uygulanması

Daha önce, montaj hattı dengeleme metotlarından en etkili olanlarını tesbit etmiştik. Hat dengeleme metotlarının uygulanabilirliğini göstermek amacıyla etkili sezgisel metotlardan birisi olan Moodie ve Young'un değişken eleman zamanlarını dikkate alan metodu yukarıda sözünü ettiğimiz römork üretimine uygulanacaktır.

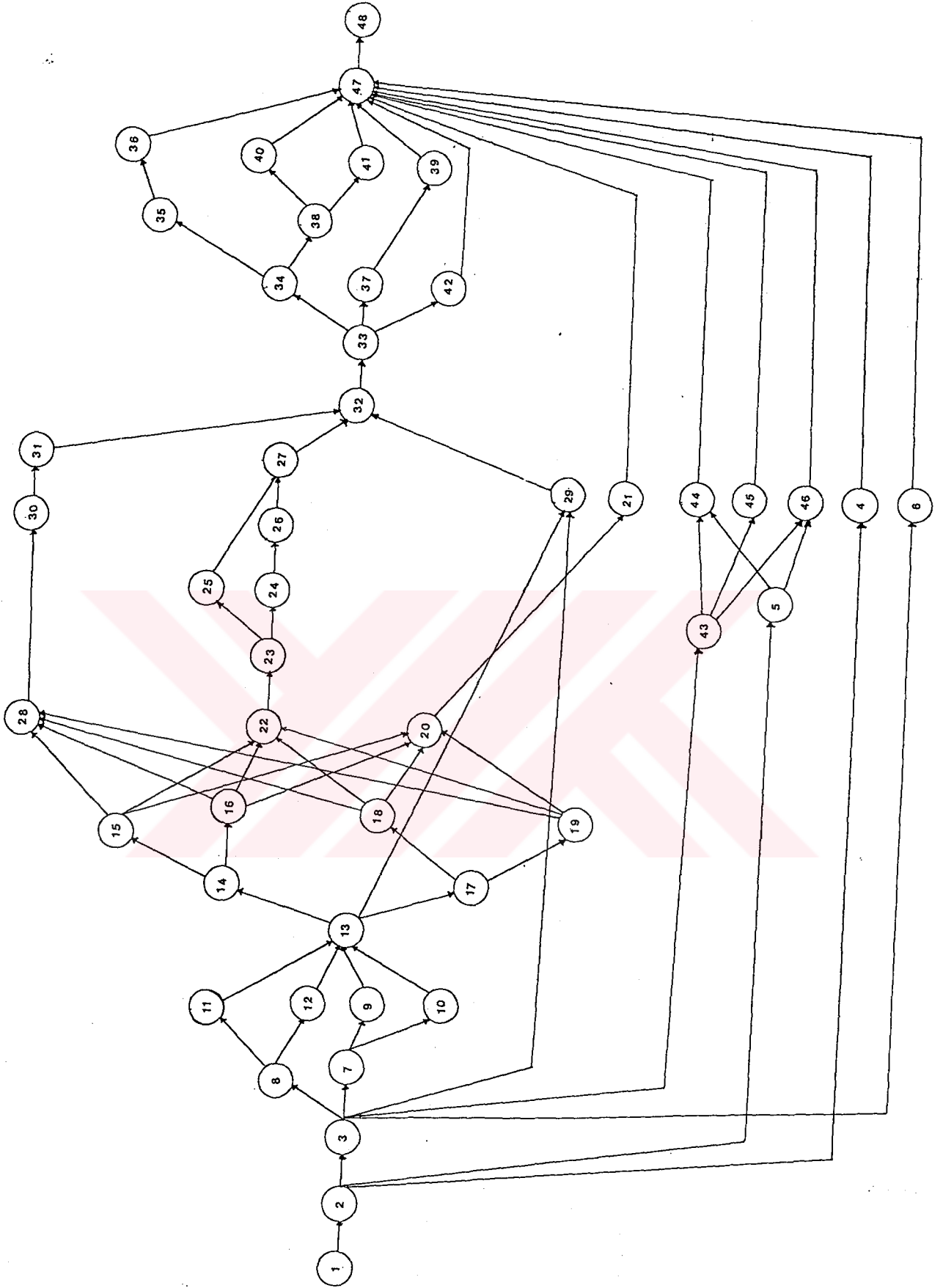
(2.2.15)'in ilk kısmında incelenen bu metotta eleman zamanların normal olarak dağıldığı varsayımı yapılmıştır. Üretim hattındaki insanların değişkenlikleri

ile sistemin karmaşık hale getirilmesi neticesinde, bu metot ile çözüme gitmek, gerçek sistemi temsil etmesi açısından en mantıklı yoldur.

Çalışma da, Moodie ve Young'un bu metodunu uygularken Raouf ve Tsui tarafından geliştirilen ve yine (2.2.15)'te incelenen metodundan da büyük ölçüde faydalanılmıştır. Yani kritik yolun tesbit edilmesi ve öncelikli elemanların tesbit edilmesi, "en küçük CV öncelik kuralı" ile de öncelikli elemanları dikkate alarak istasyonlara eleman atamalarının yapılması Moodie ve Yuung'un değişir eleman zamanlı metodunun 1. safhasını oluşturacak ve daha sonra metodun 2. safhası devreye girecektir. (Moodie ve Young'un bu metodunun aşamaları (2.2.8) de incelenen deterministik eleman zamanlı metod ile aynıdır.)

Dengeleme işlemine geçmeden evvel, bir takım verilerin önceden tesbit ya da temin edilmesi gereklidir. Önce işin elemanlara ayrılması ve öncelik ilişkilerini ifade eden bir öncelik şemasının çizilmesi ve eleman standart zamanlarının tesbit edilmesi gerekir. (Problem değişken eleman zamanlarını dikkate alan bir metotla çözülecekse ortalama eleman zamanlarının ve varyanslarının hesaplanması gereklidir. Metot için veri oluşturacak bu değerler Tablo 4'de verilmiştir).

Yine metodun uygulanabilmesi için P ve F dual matrisinin oluşturulması gereklidir. P matrisi ele alınan



Şekil . 20 Römork üretim hattının öncelik şeması

Tablo 4. İşlem Zaman Ortalamaları ve Varyansları

Eln. No	Elemanın Tanımı	Ort.Zaman U <sub>i</sub> (dk)	$\sigma_i$
1	U demirlerini hatta yerleştir.	3.19	0.35
2	Ön ve Arka tamponları Yerleştir Kaynat	7.15	0.34
3	Ara köşebet demirleri Montesi	25.30	0.28
4	Ayak basma demirini montesi	1.12	0.19
5	Lamba başlama Sacının montesi	4.52	0.18
6	Tırnak demirlerini kaynat	6.14	0.38
7	Döner komplemin hazırlanıp şaseye kaynatılması	22.10	0.94
8	Arka düzen başlama	17.41	0.60
9	Ön sol makas başla	12.20	0.53
10	Ön Sağ makas başla	10.14	0.56
11	Arka sol makas başla	12.31	0.66
12	Arka Sağ makas başla	11.10	0.66
13	Römork'un ters çevrilmesi	5.10	0.36
14	Ön dingil Yerleştirme	6.16	0.31
15	Ön Sağ Makas U civatalarının Yerleştirilip Sıkılması	13.02	0.69
16	Ön Sol Makas U civatalarının yerleştirilip sıkılması	13.22	0.58
17	Arka dingil yerleştirme	5.17	0.34
18	Arka Sağ Makas U civatalarını Yerleştir ve sık	12.20	0.52
19	Arka Sol Makas U civatalarını Yerleştir ve sık	12.54	0.47
20	Ok yerleştirme ve bağlantı	15.13	0.56
21	Fren çubuğu bağlantısı	8.58	0.28
22	Şasi tahtalarının dizilmesi	19.17	0.53
23	Sacın Yerleştirilmesi	13.47	0.60
24	Saç Puntalama	7.06	0.32
25	Civata Yerlerinin Delinmesi	10.02	0.60
26	Sacın kaynatılması (Şasi'ye)	22.15	0.96
27	Civataların takılıp sıkılması	15.13	0.44
28	Baba Yuvalarını Şasiye kaynat	13.54	0.80
29	Menteşe Yuvalarının Montesi	9.28	0.44
30	Babaların Yerleştirilmesi	5.58	0.28
31	Baba üzerine kilit Yuvalarını monte et	10.21	0.48
32	Kapakları tak	25.56	0.98
33	Kapak üstü kilit yuvaları monte ve kilitleme	15.04	0.64
34	Ön kapağa köşebet demir kaynatılması	3.58	0.32
35	Ön kapağa köşebet için delme	6.11	0.38
36	Köşebetin civatalanıp sıkılması	6.04	0.36
37	Takım kutusunun montesi	4.43	0.49
38	Ayak basacağıının montesi	4.32	0.33
39	Takım kutusunun altına köşebet kaynat	4.24	0.39
40	Destek çubuk demir kaynatma	2.18	0.33
41	Üçgen destek demir kaynatma	3.18	0.35
42	Kasaya reflektör tak	3.07	0.38
43	Şasi boyunca kablo başla	8.21	0.67
44	Sağ arka lambanın takılması	12.42	0.74
45	Sol arka lambanın takılması	12.56	0.78
46	Fiş Priz takılması	12.07	0.83
47	Kontrol	16.14	0.41
48	İlerletme (Boyahane)	7.28	0.71

TABLO 5. P Matrisi

İş	Bir Önceki İşlemler										
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	9	10	11	12	0	0	0	0	0	0	0
14	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	15	16	18	19	0	0	0	0	0	0	0
21	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	15	16	18	19	0	0	0	0	0	0	0
23	22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26	24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27	25	26	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28	15	16	18	19	0	0	0	0	0	0	0
29	3	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
32	27	29	31	0	0	0	0	0	0	0	0
33	32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
34	33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
35	34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
36	35	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
37	33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
38	34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
39	37	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
40	38	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
41	38	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
42	33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
43	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
44	5	43	0	0	0	0	0	0	0	0	0
45	43	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
46	5	43	0	0	0	0	0	0	0	0	0
47	4	6	21	36	39	40	41	42	44	45	46
48	47	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tablo 6. F Matrisi

İş	Bir Sonraki İşlemler							
1	2	0	0	0	0	0	0	
2	3	4	5	0	0	0	0	
3	6	7	8	29	43	0	0	
4	47	0	0	0	0	0	0	
5	44	46	0	0	0	0	0	
6	47	0	0	0	0	0	0	
7	9	10	0	0	0	0	0	
8	11	12	0	0	0	0	0	
9	13	0	0	0	0	0	0	
10	13	0	0	0	0	0	0	
11	13	0	0	0	0	0	0	
12	13	0	0	0	0	0	0	
13	14	17	29	0	0	0	0	
14	15	16	0	0	0	0	0	
15	20	22	28	0	0	0	0	
16	20	22	28	0	0	0	0	
17	18	19	0	0	0	0	0	
18	20	22	28	0	0	0	0	
19	20	22	28	0	0	0	0	
20	21	0	0	0	0	0	0	
21	47	0	0	0	0	0	0	
22	23	0	0	0	0	0	0	
23	24	25	0	0	0	0	0	
24	26	0	0	0	0	0	0	
25	27	0	0	0	0	0	0	
26	27	0	0	0	0	0	0	
27	32	0	0	0	0	0	0	
28	30	0	0	0	0	0	0	
29	32	0	0	0	0	0	0	
30	31	0	0	0	0	0	0	
31	32	0	0	0	0	0	0	
32	33	0	0	0	0	0	0	
33	34	37	42	0	0	0	0	
34	35	38	0	0	0	0	0	
35	36	0	0	0	0	0	0	
36	47	0	0	0	0	0	0	
37	39	0	0	0	0	0	0	
38	40	41	0	0	0	0	0	
39	47	0	0	0	0	0	0	
40	47	0	0	0	0	0	0	
41	47	0	0	0	0	0	0	
42	47	0	0	0	0	0	0	
43	44	45	46	0	0	0	0	
44	47	0	0	0	0	0	0	
45	47	0	0	0	0	0	0	
46	47	0	0	0	0	0	0	
47	48	0	0	0	0	0	0	
48	0	0	0	0	0	0	0	

işin bir adım öncesinde yapılması gerekli işleri (Precedence Matrix), F matrisi de (Successor matrix) bir adım sonraki yapılacak işleri içeren tablolarıdır. Bu matrisler Tablo 5 ve Tablo 6'da verilmiştir. Problemin ilk safhası bu matrisler yardımıyla çözülecektir. Çözümün her adımı ayrıntılı olarak verilmeyecek, sadece başlangıç çözümü ile istasyon atama sonuçları verilecektir.

Hat 48 iş elemanından oluşmaktadır. Günlük çalışma zamanı; 60 dk X 8 saat = 480 dk olup, arzu edilen üretim hızı 11 adet/gün = q olduğundan

$$\text{Çevrim Zamanı} = \frac{T'}{q} = \frac{480}{11} = 43,63^* \text{ dk}$$

Yani hat'tan her 43.63 dk'da bir römork çıkmalıdır. Bu arada istasyon zamanının, (Normal dağılım şemasını dikkate alarak) %95 güvenilirlikle çevrim zamanını geçmeden tamamlanmasını istiyoruz.

$$\alpha = 0.05, 1-\alpha = 0.95$$

Normal dağılım tablosundan (1- $\alpha$ )'ya karşılık gelen Z değeri 1.65'dir.

Öncelikli elemanlar, Raouf ve Tsui'nin (2.2.10)'un a,b,c,d,e aşamalarına göre (Raouf ve Tsui'nin stokastik eleman zamanlı metodun ilk kısmı, (2.2.10) daki metotla aynıdır). tesbit edilir.

Kritik yolun tesbit edilmesiyle öncelikli elemanlarımız.

\*Virgülden sonraki rakamlar yüzde olarak ifade edilmiştir.

1,2,3,7,9,13,14,15,16,18,19,22,23,24,26,27,32,33,  
34,35,36,47,48 dir.

Elemanların, istasyonlara atanması sırasında bu elemanlara önceliklerin verilmesi, problemin çözüm mesafesini kısaltır.

Metodun 1. safhası gereği P matrisinde tamamı sıfır olan satıra sahip eleman ile çözüme başlanır ve "enküçük CV öncelik kuralı" ile uygun elemanlar tesbit edilir.

"Enküçük CV kuralı" ile eleman atamaları şöyle olur.

1 Nolu eleman alternatifsiz olarak 1. istasyona atanır. 2 nolu eleman da 1. istasyona atanır. 2. elemanın atanması ile 3,4 ve 5 nolu elemanlar uygun hale gelir.

1. ve 2 nolu elemanın  $CV^2$  si

$$CV^2 = \left( \frac{\sqrt{0.35 + 0,34}}{3.19 + 7,15} \right)^2 = (0.0803)^2 = 0.0064 \text{ dür.}$$

(1+2f) istasyon  $CV^2$  hesabı:

3 Nolu Eleman için;

$$f = \frac{10.34}{25.30} = 0.4086$$

$$(2f+1) = 1.8173$$

$$(0.0064 \times 1.8173) = 0.0116$$

4 Nolu Eleman için;

$$f = \frac{10.34}{1.12} = 9.2321$$

$$(2f+1) = 19.4642$$

$$(0.0064 \times 19.4642) = 0.1245$$

5 Nolu Eleman için;

$$f = \frac{10.34}{4.52} = 2.2876$$

$$(2f+1) = 5.5752$$

$$(0.0064 \times 5.5752) = 0.0356$$

Eleman	(1+2f) ist CV <sup>2</sup>
3	0.0116 *
4	0.1245
5	0.0356

Minimum (1+2f) ist CV<sup>2</sup> li eleman öncelik durumu da gözönüne alınarak 1 nolu istasyona verilir. İstasyona her eleman ilave edildiğinde

$$S_k = \sum_i u_i + r \sqrt{\sum_i \sigma_i^2}$$

Hesaplaması yapılır.

$$S_1 = 35.64 + 1.65 \sqrt{0.97} = 38.23$$

Görüldüğü üzere istasyona çevrim zamanını geçmeyecek şekilde eleman ilave etme imkanı vardır. Şu anda uygun elemanlarımız

4,5,6,7,8,29,43 dür.

Bu durumda çevrim zamanını geçmemesi açısından, öncelikli olmamasına karşılık 4 ve 5 nolu elemanlar 1 nolu istasyona verilebilir.

$$S_1 = 41.28 + 1.65 \sqrt{1.34} = 43.19 \text{ (1,2,3,4,5 nolu elemanlar)}$$

Başka bir iş elemanının atanabilmesi durumunda çevrim zamanı kısıtı ihlal edileceğinden 1 nolu istasyon kapatılır.

Yeni ~~Uygun~~ elemanlarımız

6,7,8,29,43

Eleman	CV
6	0.0100
7	0.0019*
8	0.0020
29	0.0051
43	0.0099

$$6 \text{ için } CV^2 = \left( \frac{\sqrt{0.38}}{6.14} \right)^2 = 0.0100$$

$$7 \text{ için } CV^2 = \left( \frac{\sqrt{0.94}}{22.10} \right)^2 = 0.0019$$

7 nolu eleman minimum  $CV^2$  ye sahip olduğundan 2 nolu istasyona atanır. 7 nolu elemanın atanmasıyla 9 ve 10 nolu elemanlar uygun hale gelir. Yani yeni uygun elemanlarımız

6,8,9,10,29,43

6 için  $(1+2f)$  ist  $CV^2$  hesabı

$$f = \frac{22.10}{6.14} = 3.5993$$

$$(2f+1) = 8.1986$$

$$(0.0019 \times 8.1986) = 0.0155$$

Aynı şekilde diğer elemanlar için bulunan değerler aşağıdaki tabloya aktarılmıştır.

Eleman	$(1+2f) \text{ ist. CV}^2_{si}$
6	0.0155
8	0.0067*
9	0.0087
10	0.0101
29	0.0109
43	0.0121

Minimum değer 8 nolu elemana aittir. Yani 8 nolu eleman da 2 nolu istasyona atanır.

$$ST_2 = 39.51 + 1.65 \sqrt{1.54} = 41.55$$

Uygun elemanlardan

6,43,29,9,10,11,12

Elemanlarının herhangi birisinin 2 nolu istasyona ilavesi, istasyon zamanının çevrim zamanını geçmesine neden olacağından 2 nolu istasyonda kapatılır.

İstasyon zamanının oluşturulmasında değişim katsayısı (CV) nin devreye girmesi, istasyon değişiminin minimum olmasını temin eder. Ve yine uygulanan bu metotta gerektiği durumlarda sezgisel olarak karar verilebilir.

Öncelikli elemanlar ve istasyonlararası alan kısıtlamaları (Aynı istasyonda yapılmaması gerekli işler ki bu uygulama da böyle bir kısıtlama sözkonusu değildir) da dikkate alınarak yukarıdaki işlemlere son istasyona kadar devam eder,

Yukarıdaki işlemler neticesinde oluşturulan istasyonlar aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Tablo 7. İstasyon elemanları ve zamanları

İstasyon No	Elemanlar	İstasyon Zamanı	Boş Zaman
1	1,2,3,4,5	43,19	0,44
2	7,8	41,55	2,08
3	6,9,10,11	43,12	0,51
4	12,13,14,29,43	42,42	1,21
5	15,16,45	41,16	2,47
6	17,18,19	31,81	11,82
7	22,23,24	41,68	1,95
8	26,28,30	43,61	0,02
9	20,44,46	42,02	1,61
10	25,27,31	37,39	6,24
11	32,33	42,70	0,93
12	21,34,35,37,38,39,40,41	39,41	4,22
13	36,42,47,48	34,78	8,85

$$S_k = \sum t_i \text{ ve } \sum d_k = \sum d_i$$

$$\sum S_k = 524,84 \quad \sum d_k = 42,35$$

Hattın düzgünlük indeksi

$$SI = \sqrt{\sum_{k=1}^{13} (43.61 - S_k)^2} = \sqrt{292.65} = 17.10$$

Metodun 1. devre işlemleri (Elemanların istasyonlara atanması) neticesinde bulmuş olduğumuz sonuçların aşağıdaki şartı sağlama zorunluluğu vardır.

$$\sum_i d_i < C$$

$$42.35 < 43.63$$

Metodun 2. safhasında boş zamanın, istasyonlararası mümkün olduğu kadar eşit olarak dağıtılması işlemi yapılır. Bu dağıtım istasyonlar açısından mümkün olmayabilir.

2. safha gereğince mümkün boş zaman dağıtımları yapılmış olup, ilgili tablo aşağıdadır.

Tablo 8. Düzenlenmiş İstasyon elemanları ve Zamanları

İstasyon No	Elemanlar	İstasyon Zamanı	Boş Zaman
1	1,2,3,5	41,92	1,71
2	7,8	41,55	2,08
3	9.10.11	36,83	6,8
4	12,13,14,29,43	42,42	1,21
5	15,16,45	41,16	2,47
6	6,17,18,19	38,20	5,43
7	22,23,24	41,68	1,95
8	26,28,30	43,61	0,02
9	20,44,46	42,02	1,61
10	25,27,31	37,39	6,24
11	32,33	42,70	0,93
12	21,34,35,37,38,39,41	37,06	6,57
13	4,36,40,42,47,48	38,37	5,26

Yeni hattın düzgünlük indeksi

$$SI = \sqrt{\frac{13}{\sum_{k=1} (43.61 - S_k)^2}} = \sqrt{205.95} = 14.35$$

Ve istasyon atamaları tamamlanmıştır. 2. safhada, 1. safhada elde edilen SI değerinden daha az bir değer elde edilerek hattın düzgünlüğü imkanlar dahilinde iyileştirilmiştir.

Hattın etkinliği

$$e = \frac{\sum t_i}{K.C} = \frac{524.84}{13 \times 43.63} = 0,925 = \%92,5$$

Hattın boş zamanı

$$d = \frac{(KC - \sum t_i)}{K.C} = \frac{(567.19 - 524.84)}{567.19} = 0,0746 = \%7,5$$

İşî daha fazla elemanlarına ayırmak kaydı ile boş zamanı daha da azaltmak mümkündür. Neticede elde edilecek eleman adedi büyük boyütlara ulaşacağı için, büyük hesaplama külfetini de beraberinde getirecektir.

## BÖLÜM 4

### SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Montaj üretiminde hammadde ve yarı mamul parçalar, ardarda dizilmiş iş istasyonlarında işlenerek, hattın sonundan tamamlanmış olarak çıkarlar. Montaj hattının denetlenmesindeki amaç, çok değişkenli işlemler dizisinin en uygun şekilde biraraya getirilerek, üretilen mamulde istenilen niteliklere dokunulmadan işlem zamanının en aza indirilmesi ve aynı zamanda boş zamanın minimizasyonudur. Bunlar, istasyon sayısının minimum yapılmasıyla mümkün olur. Dengelemede, istasyon sayısının en aza indirilmesi neticesinde yatırım maliyetlerinin de minimuma indirilmesi (Kaynakların en azlanması) amaçlanır. Dengeleme işleminin bir takım hat kısıtlarının (Öncelik, çevrim zamanı ve bölge kısıtı) dikkate alınarak gerçekleştirilmesi zorunludur.

Çalışmada, montaj ve transfer hatlarından oluşan akış hatları incelenmiş ve sadece montaj hatlarının dengelenmesiyle ilgili problemlere yönelik metotlar incelenmiştir. Bu inceleme yapılırken tek model, çok model ve karışık model montaj hatlarından sadece tek model (Tek ürün) montaj hattı dengeleme metotları ayrı ayrı incelenmiş ve metotların kısa bir değerlendirilmesi yapılmıştır. Bu metotların incelenmesindeki amaç, montaj sanayimizin önemli problemi haline gelen hat dengeleme probleminin çözümünü temin edecek birçok metot verilerek, sistemde adapte etme imkanının sağlanmasıdır.

Metotlar; sezgisel ve analitik metotlar olarak ayrılmışlardır. Sezgisel metotlar en iyi çözümü garantilemez ancak çok daha az bir hesaplama ile geçerli ve en iyiye yakın çözümler verirler. Analitik metotlar, uygulamada karşılaşılan problemlerin büyük ölçekli olmaları nedeniyle kullanışlı değildir. Zira değişken adedinin fazlalaşması bir takım hesaplama güçlüklerini de beraberinde getirir.

Hem analitik, hemde sezgisel montaj hattı dengeleme metotlarının büyük bir kısmında önemli bir sakıncalı durum

vardır. Tezde incelenen metotlardan iki metot hariç hepsinde eleman zamanlarının(Servis zamanlarının) değişmediği ve belirli olduğu varsayımları yapılmıştır. Pratikte ise, rastgele değişken olarak görülen servis zamanlarının sabit olduğu durumlar sayılıdır. Ayrıca, pratikteki işlem zamanlarının(Eleman zamanları) sürekli değişken (Dinamik) bir özellik arzetmelerinden dolayı, işlem zamanlarındaki değişiklikleri dikkate alan metotlar, sabit işlem zamanlı metotlardan, pratiğe uygulanması ve pratiği temsil etmesi açısından daha iyi sonuç verirler. Bu nedenle, bilhassa değişen eleman zamanlarını dikkate alan metotlar önemle incelenmiştir. Bu konuda Moodie ve Young ile Raouf Tsui'nin eleman zamanlarındaki değişiklikleri dikkate alınan metotları, incelenen montaj hattı dengeleme metotları arasında, eleman zamanlarının bu durumunu dikkate alan en etkin metotlardan olduğu söylenebilir. Bu nedenle tezin uygulamasının yer aldığı dördüncü bölümde römork üretiminin gerçekleştirildiği montaj hattının dengelenmesine çalışılırken Moodie ve Young ile Raouf ve Tsui'nin yukarıda sözü edilen etkin metotları kullanılmıştır.

Uygulama çalışmasında Moodie ve Young'ın normal dağılım varsayımı kullanılmıştır. Çözümün birinci kısmında Raouf ve Tsui'nin değişir işlem zaman metodu ile istasyon zamanlarındaki değişikliğin minimum olmasını temin edecek, eleman ataması yapılmış, ikinci kısımda da yeni bir düzenleme ile iş elemanları, istasyon zamanları arasındaki farkı azaltacak şekilde transfer edilmiştir.

Neticede, %7.5 boş zaman, %92.5 etkinlik ve toplam 13 istasyon ile hat dengelenmiştir. Meydana gelen boş zamanların, istasyonlara eşit şekilde dağıtımının yapılmasıyla da düzgünlük indeks değeri düşürülmüş ve hattın sürekliliği temin edilmiştir.

## KAYNAKLAR

1. Özgen, H., Üretim Yönetimi, Ankara 1987.
2. Wild, R., Production Operations Management, Holt, Rinehart Winston, Great Britain, 1979.
3. Nişancı, İ., Üretim Planlaması ve Kontrolü, Ankara, 1984.
4. Acar, N., Estaş, S., Kesikli Seri Üretim Sistemlerinde Planlama ve Kontrol Çalışmaları, MPM Endüstri Şubesi No. 309, Ankara, 1984.
5. Savsar, M., Üretim Sistemleri Analizi, Anadolu Üni. MMF Yayın No. 59, Eskişehir, 1984.
6. Dağlı, C., Nişancı, İ., Benli, Ö., Üretim Planlaması ve Kontrolü Seminer Notları, SEGEM Yayın No. 83, Ankara, 1981.
7. Monfared, A.N., Montaj Hatlarının Dengelenmesi, Master Tezi, G.Ü. Sosyal Bilimler Enstitüsü İşletme Bölümü, 1985.
8. Wild, R., Mass Production Management, John Wiley and Sons, Bradford, (1972).
9. Özkaya, G., Üretim Planlama ve Kontrol, İ.T.Ü. Makina Fakültesi-Ofset Atölyesi, İstanbul, 1981.
10. Bedworth, D., Bailey, E.J., Integrated Production Control Systems, John Wiley and Sons, 1982.

11. Aslan, D.A., Üretim Planlama, İzmir, 1985.
12. Buffa, E.S., Temel Üretim Yönetimi, Çeviri: A. Sezgin, AİTİA İşlt. Fak., Ankara, 1981.
13. Candan, Ü., "Montaj Hatlarının Dengelenmesi Yöntemleri", İ.Ü. İşletme Fakültesi Dergisi, 4, 191, (1975)
14. Moodie, C.L., Young, H.H., "A Heuristic Method of Assembly Line Balancing for Assumption of Constant or Variable Work Element Times", Journal of Industrial Engineering, 15,73 (1964).
15. Moore, J.M., Fabrika Projesi ve Yerleşme Planı, Çeviri: E. Yülek, R. Cezzar, Makina Mühendisleri Odası Yayın No. 92, Ankara, 1975.
16. Starr, M.K., Englewood, C., System Management of Operations, N.J., Prentice-Hall, 1971.
17. Salveson, M.E., "The Assembly Line Balancing Problem", Journal of Industrial Engineering, 6,18 (1955).
18. Jackson, J.R. "A Computer Procedure for a Line Balancing Problem.", Management Science, 2,261, (1956).
19. Claude Mc Millan, Jr., Mathematical Programming, John Wiley ve Sons, Üni. of Colorado, 1970.
20. Kilbridge, M.D. ve L.Wester, "Heuristic Line Balancing-A case", Journal of Industrial Engineering, 13,139 (1962)

21. Ruddell Reed, Jr., Fabrika Yerinin Seçimi Yerleşme Düzeni ve Bakımı, Çeviri: MPM Endüstri Şubesi, No. 53, Ankara, 1967.
22. Arcus, A.L., "COMSOAL-A Computer Method of Sequencing for assembly Lin'es", International Journal of Production Research, 4,259, (1966).
23. Lorenz, J.D., "The Alpaca Line Balancing System", Comput.and Indus. Engng, 6,155, (1982).
24. Hoffmann, T.R., "Assembly Line Balancing With a Precedence Matrix", Management Science, 9,551,(1963).
25. Raouf, E.A. El-Sayed and Tsui, C.L., " new heuristic approach to assembly line balancing", Computational and Industrial Engineering, 4, 223, (1980).
26. Agrawal, P.K., "The related activity concept in assembly line balancing", International Jorunal of Production Reseachr, 23,403, (1985).
27. Pinto, P.A., Dannenbring, D.G., Khumawala, B.M., "A Heuristic Networt Procedure for the Assembly Line Balancing Problem", Naval Research Logistics Quarterly, 25,299, (1978).
28. Akagi, F., Osaki, H., Kikuchi, S., "A Methot for Assembly Line balancing with more than one worker in each station", International Journal of Produc-tion Research, 21,755, (1983).

29. White, W.W., "Comments on a Paper by Bowman", Operations Research, 9, 274, (1961).
30. Patterson, J.H., Albracht, J.J., "Assembly Line Balancing: Zero-one programming with fibonacci search", Operations Research, 23,166,(1975).
31. Wilson, J.M., "Formulation of a problem involving assembly Lines with multiple manning of work stations", International Journal of Production Research, 24, 59, (1986).
32. Aslan, D., Üretim Planlama ve Kontrol, Ders notları, E.Ü. Makina Falütesi Endüstri Müh. Bölümü, İzmir, 1981.
33. Raouf, A., Tsui, C.L., "A new Method for Assembly Line balancing having stochastic work elements", Computational and Industrial Engineering, 6,131, (1982).
34. Sphicas, G.P., Silverman, F.N. "Deterministic equivalents for stochastic assembly line balancing", AIIE Trans, 8, 280, (1976).
35. Shtub, A., "The effect of incomplection cost on line balancing with multiple manning of work stations", International Journal of Production Re Search, 22, 235, (1984).
36. Baybars, İ., "An efficient heuristic method of the simple assembly line balancing problem", International Journal of Production Research, 24,149, (1986).

37. Ferhatoğlu, O., Assembly Line Balancing: A Review of Line Balancing Techniques, Master thesis, METÜ, 1970.
38. Dar-el E.M. (Mansoor), "MALB-A Heuristic Technique for Balancing Large Single-Model Assembly Lines", AIIE Transactions., 5, 343, (1973).
39. Pinto, P., Dannenbring, D.G., Khumawala, B.M., "A branch and bound algorithm for assembly line balancing with paralleling", International Journal of Production Research, 13, 183, (1975).
40. Talbot, F.B., Patterson, J.H., Gehrlein, W.V., "A Comparative Evaluation of Heuristic Line Balancing Techniques", Management Science, 32, 430, (1986).
41. Ergun, M., Hat Dengeleme Modelleri, Master Tezi, G.Ü. Fenbilimleri Enstitüsü Endüstri Bölümü, Ankara, 1987.

## ÖZGEÇMİŞ

Hadi Gökçen 1964 yılında Ankara'da doğdu. İlk, orta ve lise tahsilini Ankara'da tamamladıktan sonra 1982 yılında G.Ü. Müh.Mim.Fak. Endüstri Mühendisliği Bölümüne girdi ve aynı bölümden 1986 yılında mezun oldu. Halen sözkonusu bölümde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmakta olan Hadi Gökçen, evli ve bir çocuk babasıdır.

**T. C.**  
**Yükseköğretim Kurulu**  
**Dokümantasyon Merkezi**