

**STOKASTİK İŞLEM ZAMANLI MONTAJ HATTI DENGEME  
İÇİN TAVLAMA BENZETİMİ ALGORİTMASI**

**Burçin ÇAKIR**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**NİSAN 2006  
ANKARA**

Burçin ÇAKIR tarafından hazırlanan STOKASTİK İŞLEM ZAMANLI MONTAJ HATTI DENGELEME İÇİN TAVLAMA BENZETİMİ ALGORİTMASI adlı bu tezin yüksek lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Berna DENGİZ  
Tez Yöneticisi

Bu çalışma, jürimiz tarafından Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Zulal Güngör \_\_\_\_\_

Üye(Danışman) : Prof. Dr. Berna Dengiz \_\_\_\_\_

Üye : Prof.Dr. Fevzi Kutay \_\_\_\_\_

Üye (Danışman) : Doç. Dr. Fulya Altıparmak \_\_\_\_\_

Üye : Yrd. Doç.Dr. Ergün Eraslan \_\_\_\_\_

Tarih : 20.04.2006

Bu tez, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygundur.

## **TEZ BİLDİRİMİ**

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

**STOKASTİK İŞLEM ZAMANLI MONTAJ HATTI Dengeleme İÇİN  
TAVLAMA BENZETİMİ ALGORİTMASI**  
(Yüksek Lisans Tezi)

Burçin ÇAKIR

GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
Nisan 2006

**ÖZET**

Montaj hattı dengeleme, toplam işin öğelerinin, öncelik ilişkileri dikkate alınarak, bir veya daha fazla performans ölçütünü eniyileyecek biçimde iş istasyonlara atanması ile ilgili problem olarak tanımlanabilir. Montaj hatlarında işler için tanımlanan zamanlar, insan unsuruna bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Bu tip montaj hatlarında, stokastik bir dengeleme yapmak, zaten zor olan problemi daha da karmaşık hale getirmektedir. Çünkü her istasyonun, tanımlanan çevrim zamanını aşma olasılığı söz konusudur. Son zamanlarda yapılan araştırmalarda, modern sezgisel algoritmaların bu problemler üzerinde iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu çalışmada, stokastik işlem zamanlı, tek modellenmiş montaj hatlarında, paralel istasyonların kurulmasına izin veren tek ve çok amaçlı iki tavlama benzetimi algoritması geliştirilmiştir. Çok amaçlı algoritma içerisinde, amaçlar değerlendirilirken, “eşit ağırlıklandırma”, “rassal ağırlıklandırma” ve “multinomial” olarak adlandırılan üç yaklaşım önerilmiş ve bu yaklaşımların etkinlikleri, literatürdeki test problemleri üzerinde karşılaştırılmıştır.

**Bilim Kodu** : 906.1.141  
**Anahtar Kelimeler** : Stokastik Montaj Hattı, Paralel Hatlar, Tavlama Benzetimi  
**Sayfa Adedi** : 93  
**Tez Yöneticisi** : Prof. Dr. Berna DENGİZ

**SIMULATED ANNEALING ALGORITHM FOR BALANCING ASSEMBLY  
LINES WITH STOCHASTIC TASK TIMES**

**(M.Sc. Thesis)**

**Burçin ÇAKIR**

**GAZI UNIVERSITY  
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

**April 2006**

**ABSTRACT**

Assembly line balancing is known as the problem of assigning the tasks of the total work to the workstations such that the precedence relations among the tasks are satisfied and some performance measure is optimized. In practice, task times are not constant or deterministic. Task times variability comes into picture when tasks are performed manually at the workstations. But in assembly lines with stochastic task times, balancing procedure is more complex due to the probability of incompleteness of stations times in a given cycle time. The recent researchs show that modern heuristics give good solutions to these type of problems. In this study, the first one is single and the other one is multi –objective, two simulated annealing algorithms are developed for stochastic, single model assembly lines. Proposed algorithms allows parallel stations. Under multi-objective algorithm, three different approaches (equal weighting, random weighting and multinomial) are proposed and the performances of these approaches researched experimentally.

**Science Code : 906.1.141**

**Key Words : Stochastic Assembly Line, Parallel Lines, Simulated Annealing**

**Page Number: 93**

**Adviser : Prof.Dr. Berna DENGİZ**

## TEŞEKKÜR

Tez çalıŐmalarım süresince beni destekleyen, yönlendiren, değerli bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım tez danıŐmanım Prof. Dr. Berna DENGİZ'e sonsuz teŐekkürlerimi sunarım. Değerli bilgilerinden yararlandığım ve yardımlarını gördüğüm diğer danıŐmanım Doç. Dr. Fulya ALTIPARMAK'a da ayrıca teşekkür ederim. Algoritma oluşturma çalıŐmalarım sırasında yardımcı olan araştırma görevlisi Arda ALP'e teşekkür ederim. Daima desteklerini arkamda hissettiğim aileme de Őükranlarımı sunmayı bir borç bilirim.

## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER .....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ .....	xii
1. GİRİŞ.....	1
3. MONTAJ HATTI DENGELEME .....	3
2.1 Montaj Hatları .....	3
2.2. Montaj Hattı Dengeleme Problemi .....	3
2.3 Montaj Hattı Dengeleme Çalışmalarının Amacı.....	4
2.4 Montaj Hatlarının Sınıflandırılması .....	7
2.5 Montaj Hattı Dengelemeyi Etkileyen Kısıtlar.....	10
2.6 Montaj Hatlarının Dengelenmesinde Kullanılan Temel Kavramlar .....	10
2.6.1. İş ögesi .....	10
2.6.2. İş istasyonu.....	11
2.6.3. İş istasyonu süresi .....	11
2.6.4. Çevrim süresi .....	11
2.6.5. İş istasyonu boş zamanı.....	12
2.6.6. Denge kaybı .....	13
2.6.7. Teknolojik öncelik diyagramı .....	13
2.6.8. Öncelik matrisi.....	14

**Sayfa**

3. MONTAJ HATTI Dengelemede Paralellik Durumu.....	15
3.1 İşlerin Paralleştirilmesi .....	15
3.2 İstasyonların Paralleştirilmesi .....	17
4. TAVLAMA BENZETİMİ ALGORİTMASI.....	19
5. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	29
5.1 Montaj Hattı Dengeleme Problemine İlk Yaklaşımlar.....	29
5.2 Stokastik İşlem Zamanlı Montaj Hattı Dengeleme Konusunda Yapılmış Çalışmalar .....	32
5.2.1 Değiştirilmiş deterministik modellerle dengeleme .....	32
5.2.2 Benzetim tekniğiyle dengeleme .....	33
5.2.3 Probleme özgü geliştirilen sezgisel algoritmalar .....	35
5.2.4 Probleme özgü modern sezgisel algoritmalar .....	38
5.3 Çok Amaçlı Yaklaşımları Kullanan Çalışmalar.....	38
5.4 Paralel Hatlar Üzerine Yapılmış Çalışmalar .....	39
5.5 Tavlama Benzetimi Kullanılarak Yapılan Çalışmalar .....	41
6. UYGULAMA: STOKASTİK İŞLEM ZAMANLI MONTAJ HATTI Dengeleme İçin Tavlama Benzetimi Algoritmaları.....	44
6.1 Tek Amaçlı Stokastik İşlem Zamanlı Paralel İstasyonlu Montaj Hatları İçin Geliştirilen Tavlama Benzetimi Algoritması .....	49
6.1.1 Deneysel çalışmalar .....	55
6.2 Çok Amaçlı Stokastik İşlem Zamanlı Paralel İstasyonlu Montaj Hatları İçin Geliştirilen Tavlama Benzetimi Algoritması .....	62
6.2.1 Çok amaçlı karar verme mekanizmasında kullanılan yaklaşımlar .....	67
6.2.2 Deneysel çalışmalar .....	68

	<b>Sayfa</b>
6.2.3. Üç yaklaşımın etkinliklerinin karşılaştırılması .....	72
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	76
KAYNAKLAR .....	80
EKLER.....	85
EK-1. Deneysel sonuçlar.....	86
ÖZGEÇMİŞ .....	93

## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

<b>Çizelge</b>	<b>Sayfa</b>
Çizelge 2.1. Montaj hattı dengelemeyi etkileyen kısıtlar .....	10
Çizelge 2.2. 9 öğeli bir öncelik matrisi .....	14
Çizelge 5.1. Stokastik işlem zamanlı montaj hatlarını dikkate alan çalışmalar .....	31
Çizelge 6.1. Tavlama benzetimi algoritması parametreleri için alternatif değerler .....	48
Çizelge 6.2. Parametre setlerinin değerlendirilmesi .....	49
Çizelge 6.3. Geliştirilen tek amaçlı tavlama benzetimi algoritmasının bazı ara adımları.....	55
Çizelge 6.4. Geliştirilen tek amaçlı tavlama benzetimi algoritmasının kodlama yapısı .....	56
Çizelge 6.5. Problem 1 için farklı başlangıç çözümleri ile elde edilen sonuçlar .....	57
Çizelge 6.6. Problem 2 için farklı başlangıç çözümleri ile elde edilen sonuçlar .....	57
Çizelge 6.7. Problem 3 için farklı başlangıç çözümleri ile elde edilen sonuçlar .....	57
Çizelge 6.8. Problem 4 için farklı başlangıç çözümleri ile elde edilen sonuçlar .....	58
Çizelge 6.9. Farklı başlangıç çözümlerinden elde edilen sonuçlar için ortalama ve varyanslar değerleri .....	59
Çizelge 6.10. Hipotez testleri .....	59
Çizelge 6.11. Geliştirilen tek amaçlı tavlama benzetimi algoritmasının etkinliğinin karşılaştırılması.....	60
Çizelge 6.12. Çok amaçlı tavlama benzetimi algoritması içinden adım örnekleri .....	65

<b>Çizelge</b>	<b>Sayfa</b>
Çizelge 6.13. Çok amaçlı tavlama benzetimi algoritmasının pareto optimal setinin değişim adımları .....	66
Çizelge 6.14. Problem 1 için üç yaklaşımdan elde edilen pareto optimal setler .....	72
Çizelge 6.15. Problem 2 için üç yaklaşımdan elde edilen pareto optimal setler .....	72
Çizelge 6.16. Problem 3 için üç yaklaşımdan elde edilen pareto optimal setler .....	73
Çizelge 6.17. Problem 4 için üç yaklaşımdan elde edilen pareto optimal setler .....	73
Çizelge 6.18. Problem 5 için üç yaklaşımdan elde edilen pareto optimal setler .....	74
Çizelge 6.19. Birleştirilmiş pareto optimal setlerden elde edilen, birbirini domine edemeyen çözümler.....	77

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 2.1. Montaj hattı dengeleme sistemi .....	3
Şekil 2.2. Mükemmel denge hiperbolü .....	6
Şekil 2.3. Teknolojik öncelik diagramı .....	13
Şekil 3.1. Örnek 1 için öncelik diagramı.....	16
Şekil 3.2. 4. işin paralel olduğu öncelik diagramı.....	16
Şekil 3.3. Örnek 2 için öncelik diagramı.....	17
Şekil 3.4. Örnek 2 için düz istasyonda denge durumu.....	18
Şekil 3.5. Örnek 2 için paralel istasyonlarla denge durumu .....	18
Şekil 6.1. Raouf ve Tsui(1982) problemi için performans ölçütlerinden SI yakınsaması (bir deneme için) .....	55
Şekil 6.2. Raouf ve Tsui(1982) problemi için performans ölçütlerinden maliyet yakınsaması (bir deneme için) .....	56
Şekil 6.3. Raouf ve Tsui(1982), Alp ve ark.(2001) ve önerilen algoritmadan elde edilen SI değerleri .....	60
Şekil 6.4. Raouf ve Tsui(1982), Alp ve ark.(2001) ve önerilen algoritmadan elde edilen maliyet değerleri .....	61
Şekil 6.5. Raouf ve Tsui(1982), Arda(2001) ve önerilen algoritmadan elde edilen dengelenmiş hatların doluluk oranları .....	61
Şekil 6.6. Problem 1 için üç yaklaşımdan elde edilen pareto optimal setler.....	75
Şekil 6.7. Problem 2 için üç yaklaşımdan elde edilen pareto optimal setler.....	75
Şekil 6.8. Problem 3 için üç yaklaşımdan elde edilen pareto optimal setler.....	76
Şekil 6.9. Problem 4 için üç yaklaşımdan elde edilen pareto optimal setler.....	76
Şekil 6.10. Problem 1 için üç yaklaşımdan elde edilen pareto optimal setler.....	77

## 1. GİRİŞ

Üretim yapan endüstrilerde, toplam işin bölünemez en küçük parçalara ayrılması ve bu parçaların ayrı ayrı işçiler tarafından yapılmasıyla daha seri ve ucuz üretim yapılabilmesinin mümkün olduğu görülmüştür. Bunun sonucu olarak üretim, üzerinde değişik iş istasyonlarının bulunduğu belirli bir hat üzerinden parçaların geçirilmesi yoluyla yapılır. Hatta giren yarı ürün ve ham maddeler, ilgili işlemleri geçirdikten sonra hattın sonundan ürün olarak çıkarlar.

Bir hat üretimi tasarlanırken, üretim hattındaki iş istasyonlarına ilişkin işlem sürelerinin dengelenmesi problemi ortaya çıkar. Bir hat üzerinde dikkate alınan performans ölçütlerinde iyileşme sağlanabilmesi için, hattın iyi dengelenmesi gerekir. Dengesiz hatlar, üretimde verimsizliğe, maliyet artışlarına, teknoloji ve işçilikte daha birçok kayıplara neden olur. Hat dengeleme problemi, üretim yapan işletmeler için önemli bir konudur. Çünkü artan rekabet, zorlaşan piyasa şartları altında üretimi en verimli şekilde tasarlamak ve değişimlere cevap verebilecek düzeyde tutabilmek için hat dengeleme çalışmalarının detaylı olarak yapılması gerekmektedir.

Montaj hattı dengeleme problemi, analitik olarak ilk defa 1955 yılında tanımlanmıştır ve araştırmacıların oldukça ilgisini çekmiştir. Günümüzde de, bu konuda çıkan makaleler, probleme olan ilginin yoğun biçimde devam ettiğini göstermektedir.

Montaj hattı dengeleme problemi NP-zor problemdir ve çözümü oldukça karmaşıktır. Çözüme yönelik olarak geliştirilen algoritmaların bir kısmı en iyi çözümü bulan kesin metotlar, bir kısmı ise en iyiye yakın çözümü bulan sezgisel metotlardır. Kesin metotlar, büyük boyutlu test problemlerini çözerken oldukça uzun işlem zamanı gerektirirler ve bu nedenle uygulamada sezgisel metotlar daha hızlı ve kullanışlıdır.

Montaj hatları ile ilgili çalışmaların bir çoğunda, işlerin sürelerinin baştan bilindiği ve değişmediği varsayılmıştır. Oysa insan unsurunun karıştığı ortamlarda değişkenlik söz konusudur. İnsan, çeşitli nedenlerden dolayı bir işi her zaman aynı sürede yapamaz ve iş sürelerinin değişken olmasına neden olur. İşlem sürelerinin bir birimden diğerine değişkenlik göstermesi, konu ile ilgilenen araştırmacıların da dikkatini çekmiş ve makalelerde buna yönelik algoritmalar geliştirilmiştir. Ancak bu özellik, problemi olduğundan daha da zorlaştırmıştır. Çünkü iş istasyonları için, çevrim zamanını aşma olasılığı ortaya çıkmıştır ve tamamlanamayan işler nedeniyle ek bir maliyetin dikkate alınması gerekmiştir.

Literatürde, stokastik işlem zamanlı montaj hatlarının çözümünde geliştirilen metotların tamamı sezgiseldir. Bu sezgisel metotlar, değiştirilmiş deterministik modeller, benzetim tekniği, probleme özgü algoritmalar ve modern sezgiseller başlıkları altında incelenmektedir. Son zamanlarda yapılan çalışmalar incelediğinde, modern sezgisellerin (tabu arama, tavlama benzetimi, genetik algoritma), problem çözümünde oldukça etkili ve iyi sonuçlar verdikleri görülmüştür.

Bu çalışmada, stokastik işlem zamanlı montaj hatlarında, çevrim zamanını aşma olasılığı belirli bir değerden yüksek istasyonlarda, aynı işlerden oluşan paralel istasyonlar oluşturularak işlerin tamamlanmama olasılığı yok edilmeye çalışılmıştır. Bu problemi çözerken modern sezgiseller arasından Tavlama Benzetimi algoritması kullanılmıştır.

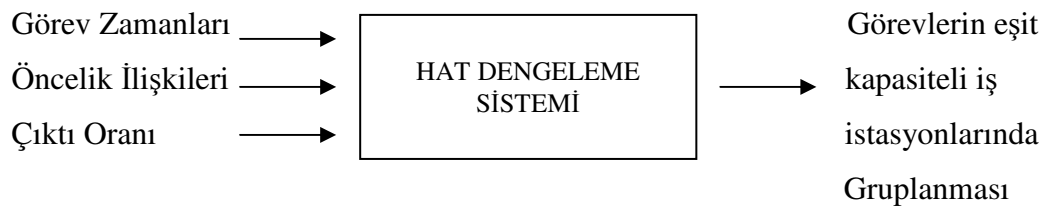
Bu çalışmanın kalan kısmı 5 bölümden oluşmaktadır. 2. bölümde montaj hatları ve dengeleme problemi ayrıntılı olarak tanımlanmıştır. Sonraki bölümde, montaj hatlarında paralellik durumu incelenmiştir. 4.bölümde, tavlama benzetimi algoritması tanımlanmıştır. 5. bölümde ise montaj hattı dengeleme ile ilgili literatür araştırması verilmiştir. Daha sonraki bölüm içinde, geliştirilen tavlama benzetimi algoritmaları verilmiş ve bu algoritmaların etkinlikleri ölçülmüştür. Son bölümde ise, sonuçlar ve öneriler sunulmuştur.

## 2. MONTAJ HATTI DENGELEME

### 2.1. Montaj Hatları

Bir montaj hattı, malzemelerin üretim hattı boyunca insan gücünden yararlanılarak transfer edildiği ve parça üzerindeki işlemlerin sıralı istasyonlar boyunca yapıldığı sistem olarak tanımlanabilir [Gökçen, 1997].

### 2.2. Montaj Hattı Dengeleme Problemi



Şekil.2.1.Montaj hattı dengeleme sistemi [Dervitsiotis, 1981]

Montaj hatlarında bir ürünün montajı, birçok parça bileşen ve alt montajın bir araya getirilmesi ve üzerinde bir takım işlemlerin yapılması ile gerçekleştirilir. İşlemleri yapacak olanlar, hat boyunca sıralanmış olan işçi grupları ya da diğer bir deyişle iş istasyonlarıdır. Bir montaj hattının temel özelliği, iş parçalarının bir istasyondan diğer bir istasyona hareket etmesidir. Mamule göre yerleştirmede, oldukça kısa bir zamanda geniş hacimde üretim yapılmakta ise de, üretim hattı bir kez kurulduktan sonra, bu tür yerleştirmede, işleme göre yerleştirmede pek o kadar önemli olmayan bir takım problemler ortaya çıkar. Bu oldukça karışık problemlerden birisi de hat dengeleme problemidir. Montaj hattında meydana gelen bu problemlere çözüm getirmekteki amaç, elemanter işler arasında bulunan öncelik şartlarını sağlayacak, her istasyondaki toplam iş yükü zamanı, verilen çevrim zamanından büyük olmayacak ve istenilen performans kriterleri sağlanacak şekilde, görevlerin iş istasyonlarına atanmasıdır [Gökçen ve Erel, 1997].

Kullanılan performans ölçülerinin önemli bir bölümü, iki ana grupta toplanabilir; Birinci grup, hat boyunca yerleştirilen istasyon sayısı, ikinci grup ise istasyonlara verilen sürelerdir (çevrim zamanı). Birinci grup insan gücü maliyetini en küçükmekte, ikinci grup ise üretim miktarını en büyükmektedir. Problemin formüle edilmesinin kolaylığına rağmen, yukarıdaki performans ölçülerini en iyileyen iş gruplarının belirlenip istasyonlara atanması, diğer bir deyişle problemin çözümü oldukça güçtür. N tane iş elemanı ve bu iş elemanları arasında r tane öncelik ilişkisi olan bir problem için yaklaşık olarak  $N!/2^r$  değişik hat tasarımı elde edilebilir [Ignall, 1965]. Endüstrideki uygulamalar göz önüne alındığında bu rakam, günümüz bilgisayar kapasitelerinin çok üzerindedir. Problemin çözümü için geliştirilen yöntemler, en iyi çözümü bulan (optimum) ve sezgisel yöntemler olmak üzere ikiye ayrılırlar. En iyi çözümü bulan yöntemler, çok uzun bilgi işlem zamanına ihtiyaç duydıklarından, genellikle akademik araştırmalar olarak kalan ve pratikte fazla uygulama imkanı bulunmayan yöntemlerdir.

### **2.3. Montaj Hattı Dengeleme Çalışmalarının Amacı**

Montaj hattı dengelemenin ana amacı, oluşan şartlar altında montaj hattının sürekli olarak çalışmasını sağlamaktır. Bu işlerin, çevrim zamanında tamamlanması ile mümkündür. İstasyon sayısının sabit olduğu problemlerde amaç çevrim zamanını minimum yapmaktır. Amaçları kısaca özetlersek;

- 1-Düzenli bir malzeme akışını sağlamak.
- 2-İnsan gücü kullanımını en üst düzeye ulaştırmak.
- 3-Makine sığalarını en üst düzeyde kullanmak.
- 4-İşlemler için en az miktarda süreyi kullanmak.
- 5-İşlemler için en az miktarda malzeme kullanmak.
- 6-Boş zamanları veya dengeleme kayıplarını en küçükmek.
- 7-İş istasyonu sayısını en küçükmek.
- 8-Denge kayıplarını, iş istasyonları arasından düzgün şekilde dağıtmak.
- 9-Hat dengeleme maliyetini en az düzeyde tutmak.

Bunların yanında hat dengelemenin yapılabilmesi için aşağıdaki bilgilere ihtiyaç vardır;

- Her işin standart yapılış yöntemi (metot tanımlama).
- Her iş elemanını için geçerli standart zaman. Bu bilgiler “iş ölçümü” sonucunda elde edilir.
- İş akışı, gerekli alet ve ekipmanlar.
- Ölçülmüş veya tahmini bant verimliliği (uygulamada genelde %100 alınır).
- Yerleşim kısıtları, makine grupları, bant uzunluğu ve hareket alanları.
- İş elemanlarının öncelik diyagramı.

Montaj hattı dengelemenin amaçları birbirleriyle çeliştirdiklerinden, hepsini birden en üst düzeye ulaştırmak olası olmayabilir [Erkut ve Baksak, 1997]. Hat dengeleme amaçları arasındaki çelişki, Eş.2.1’de verilen maliyet fonksiyonu ile açıklanabilir [Plenert, 1997];

$T(n,c)$ = iş istasyonu sayısı ve çevrim zamanına göre maliyet

$k_1, k_2, k_3$ =maliyet katsayıları

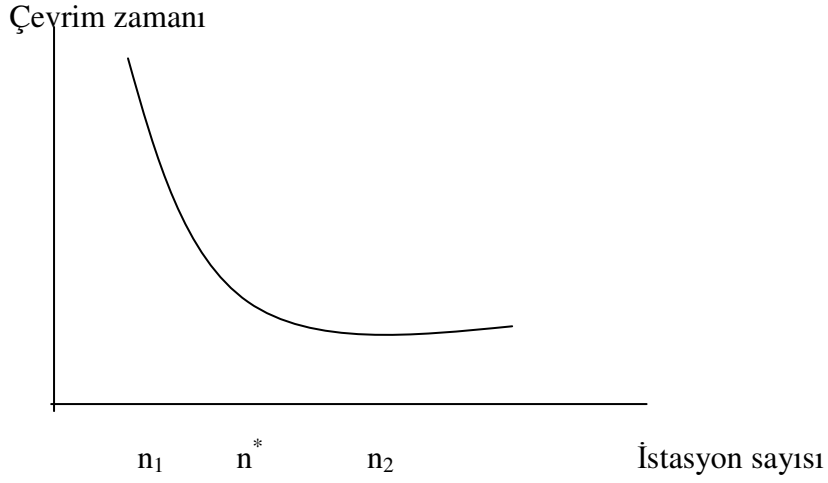
$n^*$ =en iyi istasyon sayısı

$C^*$ =en iyi istasyon servis zamanı

$$T(n,c)=k_1(nC-\Sigma t)+k_2(C-C^*)+k_3(n-n^*) \quad (2.1)$$

Maliyet =(atıl kapasite maliyeti)+(düşük verimlilik)+(fazla işgücü maliyeti)

Bu maliyet ilişkileri mükemmel denge hiperbolü (Şekil 2.2) incelendiğinde, bulunan en iyi istasyon servis zamanı  $C^*$  değerine göre  $n^*$  kadar istasyon gerekmektedir,  $n_2$  değerinin,  $n^*$  dan büyük ilk tamsayı olduğu varsayılırsa ,  $n_2 C^* > \Sigma t$  olur ve düşük kapasite kullanımı ortaya çıkar. Diğer taraftan  $n_1=n_2-1$  olarak istasyon sayısı bulunur ise, bunun uygulanması olanaksızdır. Çünkü  $\Sigma t > n_1 C^*$  olur. Diğer bir deyişle toplam gerekli süre toplam ayrılan süreden büyük olur. Bu durumda uygun çözüm  $n_1$  sayıda istasyon ve  $C_1$  çevrim zamanı kullanılmalıdır. Fakat bu durumda düşük verimlilik maliyeti  $(1/C^*)-(1/C_1)$  söz konusudur.



Şekil 2.2. Mükemmel denge hiperbolü

Bu ifadeden de görüldüğü gibi montaj hattı tasarımı ve dengelenmesi problemi çözümü, değişik iş istasyonu sayısı ve çevrim zamanlarının karşılaştırılması ile bulunur.

Bu problem iki bölüme ayrılabilir ve birinin çözümü diğerini getirir.

1. Gerekli çevrim zamanı verilerek ve her görevin zamanı, önceliği ve bölgesi belirlenerek, montaj işindeki görevlerin yapılabilmesi için istenen işçilerin minimum sayısı belirlenir. (Tip-1)
2. Belirli işçi sayısı verilerek ve her görevin zamanı, önceliği ve sırası bilinerek bir montajı tamamlamak için gerekli çevrim zamanı belirlenir (Tip-2). [Zorlu, 2000]

## 2.4. Montaj Hatlarının Sınıflandırılması

Montaj hatlarını sınıflandırmada bir çok yol vardır;

1. İşin Yapısına Göre Montaj Hatları : İşin yapısına göre, iki çeşit montaj hattı vardır; manuel ya da otomatik montaj hatları. Manuel hatlarda ürün son istasyona ulaşana kadar ve bir ürün olarak çıkana kadar çoklu istasyonlar vardır. Her istasyonda toplam iş yükünün bir bölümü, bir veya daha çok işçi tarafından yapılmaktadır. İnsan unsurunun ön planda olduğu bu çeşit montaj hatlarında dengeleme yaparken, otomatik hatlara göre daha çeşitli kriterleri dikkate almak gerekmektedir. Otomatik hatlarda, istasyonlardaki işler ve istasyonlar arası transferler otomatik olarak yapılmaktadır.

İstasyonlar arası iş transferinin de iki yolu vardır; mekanik olmayan hatlar veya hareketli hatlar kullanmak. Mekanik olmayan hatlarda parçalar bir istasyondan diğerine elle geçerler. Diğerlerinde ise hareketli konveyörlerle geçiş sağlanır.

Bu çalışmada dikkate alınan montaj hatları manuel montaj hatlarıdır. Yani hat üzerindeki işlemler insan gücünden yararlanılarak yapılmaktadır.

2. Model Çeşitlerine Göre Montaj Hatları : Model çeşitlerine göre üç çeşit montaj hattı vardır;

- i) Tek Modelli Hatlar; Tek tip ürün yada modelin üretiminde kullanılırlar.
- ii) Çok Modelli Hatlar; Bu hatlarda değişik modeller üretilir. Değişik modellerin üretimi ayrı ayrı kafieler halinde yapılır. Belirli bir zamanda bir ürün parti halinde üretilir, arkadan diğer modellerin üretimine geçilir. Modeller farklı ürünler yada aynı ürünün farklı modelleri olabilirler. Her iki durumda da ürünler aynı olmayan fakat benzer üretim ihtiyaçları gösterirler. Pratikte montaj hattı birinci model için hazırlanır. Daha sonra ikinci, üçüncü vb. modellerin parti üretimi için hatta gerekli düzenlemeler yapılır.

iii) Karışık Modelli Hatlar; aynı anda birden fazla benzer tipteki modellerin karışık olarak üretildiği hatlardır. Karışık modelli üretimin en önemli faydası, müşteri isteğini karşılamak üzere değişik modellerin sürekli olarak üretilmesi ve büyük bitmiş mamul stoklarını gerektirmemesidir. Modellerin değişik işlem zamanlarından doğan dezavantajlı yönleri ise, iş akışının düzenli olmaması, dolayısıyla daha fazla istasyon boş zamanları, yarı bitmiş mamullerden oluşan yığınlardır. [Acar ve Estaş, 1986]

3. İstasyonların Yerleşimine Göre Montaj Hatları: Fiziksel yerleşimlerine göre montaj hatları, düz, dairesel, rastsal, değişik açılı, U-şekilli, zigzag gibi değişik biçimlerde tasarlanabilir. Geleneksel montaj hatları düz olarak tasarlanmıştır. Daha sonra yeni üretim hatlarında U-hatlar daha çok tercih edilmeye başlanmıştır. U tipi hatlar JIT sistemleri için daha çok tercih edilen hatlardır.

İşlevsel yapılarına göre de seri, bileşik, paralel ve besleyici montaj hatları olarak sınıflandırılır [Erkut ve Baksak, 1997]. Eğer bazı işlerin işlem zamanları, çevrim zamanını aşarsa paralel veya çoklu istasyonlar dengeleme için kullanılabilir. Parallellik ile daha az istasyonla daha dengeli hatlar elde edilebilir.

4. Gecikmeli veya Gecikmesiz Montaj Hatları: Bir montaj hattı tasarımında gecikmeli veya gecikmesiz bir hat tasarımı arasında bir seçim yapılmalıdır. Çünkü hattın devamlılığı buna bağlı olarak gerçekleşecektir. Gecikmesiz hatta, her istasyona her ürün birimini üretmek için eşit zaman miktarı verilir (çevrim zamanı). Bu çevrim zamanı sonunda sistem otomatik olarak yeni istasyona geçildiğini varsayar. Tamamlanmamış işler varsa, bu işler hattın sonunda yeni bir istasyonda tamamlanabilmektedir. Gecikmeli hatta ise, bir iş tamamlandığı sürede yeni bir iş alınır. İşlerin tamamlanmasına izin verilir ancak bu durumda hattın gecikme miktarı da iyice incelenmelidir.

5. İşlem Zamanlarına Göre Montaj Hatları: Montaj hattı dengeleme problemlerinde, işlem zamanları göz önüne alındığında, çok genel iki farklı durum söz konusudur;

1- İşlem zamanlarının belirli olması (Deterministik MHD)

2- İşlem zamanlarının değişken olması (Stokastik MHD)

Deterministik MHD problemlerinde, görev zamanlarının verilmiş olduğu ve bu zamanların bir birimden diğerine herhangi bir değişim göstermediği varsayılmaktadır. Bu varsayım özellikle robot teknolojisinin uygulama alanı bulabildiği, ileri teknoloji sanayilerinde geçerlidir.

Stokastik MHD problemlerinde ise, görev zamanları, belirli bir dağılımla ifade edilir. İnsan unsuru, görev zamanlarının değişken olmasına yol açmaktadır. Söz konusu değişkenliğin sebepleri arasında yorulma, dikkatin dağılması, yetersiz nitelikteki işgücü, iş tatminsizliği, hatalı girdiler, araç/gereç bozulmaları sayılabilir. Bu durum istasyonlara atanan işlerin aldıkları toplam zamanın, çevrim zamanını aşmasına ve dolayısıyla bazı görevlerin bitirilememesine sebep olmaktadır. Özellikle işler arasındaki öncelik ilişkileri göz önüne alındığında bazı görevlere hiç başlanamamaktadır. Bu tür dengeleme problemlerinde araştırmacıların çoğu görev zamanlarının normal dağılıma göre değer aldıklarını, bazıları ise görev zamanlarının değişkenlik katsayılarının ( $s/\mu$ ) tüm işler için sabit olduğunu varsaymışlardır [Erel, 1991].

Montaj hattı dengeleme problemleri, 4 grupta toplanabilir; Tek modellenmiş deterministik (TMD), Tek modellenmiş stokastik (TMS), Çok/Karışık modellenmiş deterministik (ÇMD) ve Çok/Karışık stokastik (ÇMS) problemler.

## 2.5. Montaj Hattı Dengelemeyi Etkileyen Kısıtlar

Bir montaj hattı dengeleme esnasında, karşılaşılabilecek kısıtlar, Çizelge 2.1’de özetlenmiştir.

Çizelge 2.1. Montaj hattı dengelemeyi etkileyen kısıtlar

Temel Kısıtlar	Yan Kısıtlar
1. Çevrim Zamanı	1. Konum Kısıtı
2. Öncelik İlişkileri	2. Sabit Donanım Kısıtı
	3. İstasyon Yüğü
	4. Aynı İstasyona Atanması İstenen İşler
	5. Aynı İstasyona Atanması İstenmeyen İşler

## 2.6. Montaj Hatlarının Dengelemesinde Kullanılan Temel Kavramlar

### 2.6.1. İş ögesi

İşler, temel hareketlerden veya iş parçacıklarından oluşur. İş ögeleri; toplam işin uygun ve pratik en küçük alt parçalarıdır ve bu iş parçacıklarının bir veya birkaçı tarafından oluşturulurlar. İş ögesi; üretim süreci içinde, toplam iş içeriğinin, mantıksal olarak bölünmüş bir parçasıdır. Diğer bir görüşe göre iş ögesi; montajcılar arasında gereksiz karışıklıklara neden olmadan, iki veya daha fazla işçi arasında paylaştırılması olanaksız en küçük iş birimidir. Yani toplam işin kaç aşamada tamamlanacağını ve bunların hangi aşamalar olacağını belirleyen, işi yeterli ve anlamlı en azlara bölme sonucu ortaya çıkan birimler ve yapılacak işlemlerdir. Örneğin bir parçaya beş tane delik açmak için beş farklı iş ögesi tanımı yapılabilir. Ama montaj hattının dengelenmesi söz konusu olunca, mantıksal iş ögesi, beş deliği birden açmayı içeren iş grubu olarak tanımlanmalıdır. Ayrıca bu işlem otomatik bir tezgahta tek bir seferde yapılıyor ise o zaman beş tane delik açma işi tek bir iş ögesidir.

### **2.6.2. İş istasyonu**

Montaj hattı üzerinde verilen bir işin, işçi/işçiler tarafından yapıldığı alandır. Her istasyonda, bir işçinin, bir işlem için gerekli araçlarla çalıştığı varsayılır. Genellikle iş istasyonu (work station), bir montajcı tarafından doldurulan yer olarak düşünülür. Bir montaj hattının, en az istasyon sayısının 1 olması ve en az, montaj hattı dengeleme çalışması sırasında saptanan gerekli istasyon sayısı kadar istasyona sahip olması gerektiği gibi kısıtlar vardır.

### **2.6.3. İş istasyonu süresi**

Yani, istasyona gelen bir parça üzerinde o istasyonda yapılması gereken ilk iş ögesinin başlangıç anı ile son iş ögesinin bitiş anı arasındaki süre farkıdır. Bir iş istasyonu süresi, o hattaki iş ögesi sürelerinin en büyüğünden küçük, çevrim süresinden büyük olamaz.

### **2.6.4. Çevrim süresi**

Çevrim süresi (cycle time), montaj hattında, ürünün bir istasyonda kalabileceği en büyük süre veya bir iş istasyonundaki işçinin o istasyonda yapılması gerekli işleri tamamlaması için gerekli süre olarak tanımlanabilir.

Çevrim süresi, iş istasyonu süresine eşit veya daha büyük olabilen, iş istasyonundaki işçinin, işini tamamlayabilmesi için kullanabileceği süredir. Çevrim süresini seçmekteki ana düşünce, gerek duyulan üretim hızıdır.

Bir istasyonda, ardışık ögeler için iş tamamlama ve başlatma arasında bir süre geçer. Ayrıca o istasyondaki tüm işler bitmesine rağmen çevrim süresi dolmamış olabilir. Bu nedenle çevrim süresi üç alt süreye ayrılabilir: Üretken iş süresi, üretken olmayan iş süresi, atıl süre.

Kuramsal olarak çevrim süresi, gerçekleşmesi istenen ürün çıktısından hesaplanabilir (Eş. 2.2);

C: Çevrim Süresi

T: Eldeki toplam süre

N: Yapılması istenen ürün sayısı. olmak üzere

$$C = \frac{T}{N} \quad (2.2)$$

### 2.6.5. İş istasyonu boş zamanı

Operatörlerin diğer istasyonlara kıyasla boş kalma süresidir. Çevrim süresi ile iş istasyonu zamanı arasındaki fark iş istasyonunun boş zamanını göstermektedir. Boş zaman sembolü  $d_k$  olup; k'inci istasyondaki boş zamanı gösterir. (Eş. 2.3)

$$d_k = C - T_k \quad (2.3)$$

Dengeleme kriterinin seçimi genel olarak boş zaman ile ilgilidir. Burada C çevrim süresi ve k istasyon sayısı ise, boş zaman toplamı Eş. 2.4 ile ifade edilir.

$$D = kC - \sum t_i \quad (2.4)$$

Boş zamanın minimize edildiği şekilde işlerin iş istasyonlarına tahsis edilmesi ile her birim ürün için ortalama montaj süresi en aza indirilecektir.

### 2.6.6. Denge kaybı

İş istasyonları arasındaki montaj işlemlerinin dengesiz bir şekilde dağıtılmasından kaynaklanan boş zamandır. Denge kaybı iş istasyonlarındaki ortalama boş zamanın çevrim süresine oranı olarak ifade edilmektedir (Eş. 2.5):

D=denge kaybı yüzdesi

C=çevrim süresi

$C_0$ =ortalama iş istasyonu zamanı

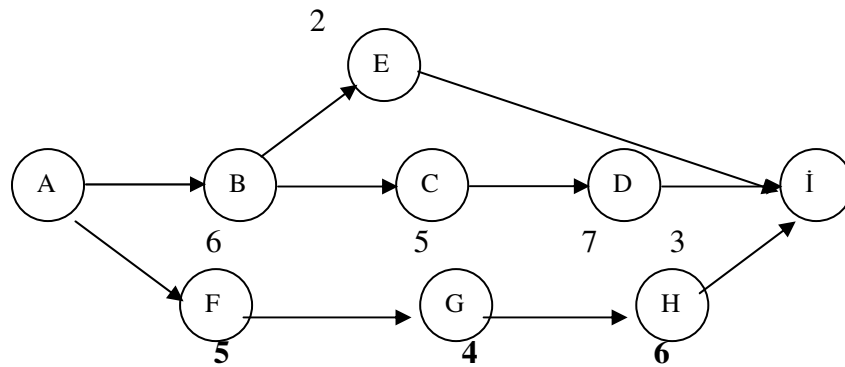
$$D = ((C - C_0) / C) * 100 \quad (2.5)$$

Montajda k istasyon varsa o zaman denge kaybı (Eş. 2.6);

$$d = 100(k_c - kc_0) / k_c \quad (2.6)$$

### 2.6.7. Teknolojik öncelik diyagramı

Montajın teknik özelliklerinden dolayı, bazı iş öğelerinin zorunlu olarak birbirini izlemesi gerekir. Bu özelliklerin tümü öncelik ilişkileri adı altında toplanır. Bu ilişkiler genellikle bir grafik ile gösterilir. Şekil 2.3'te bir montaj hattına ilişkin öncelik diyagramı görülmektedir.



Şekil 2.3. Teknolojik öncelik diyagramı



### 3. MONTAJ HATTI DENGELEMEDE PARALLELLİK DURUMU

Geleneksel montaj hattında en temel varsayım hattın seri olmasıdır. Paralellik bir işin birden çok istasyonda yapılmasına izin verir. Böylece en uzun iş zamanının azalmasına yardımcı olur, çünkü iş birden çok istasyonda yapılabilmektedir. Böylece üretim oranı da yükselecektir. Montaj hattı dengelemede iki çeşit paralellik sağlanabilir; işlerin paralelleştirilmesi veya istasyonların paralelleştirilmesi [Ege, 2001].

#### 3.1. İşlerin Parallelleştirilmesi

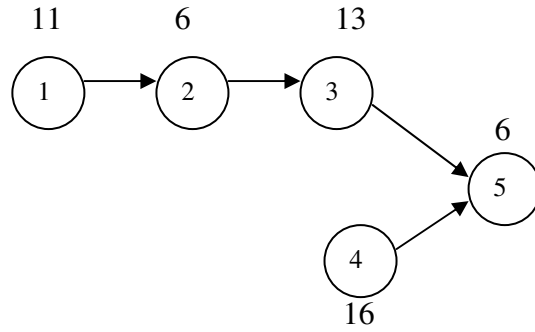
Eğer montaj hattında bir işin zamanı çevrim zamanından büyükse, işlerin paralelliği kullanılabilir. Paralel bir iş birden çok istasyonda yapılabilir. İşin tekrar sayısı kadar etkin işlem zamanı azaltılmış olur.

Teorik olarak paralel bir işin etkin işlem zamanları,  $t_{ia}$  ve  $t_{ib}$  olarak verilirse;  $t_{ia} + t_{ib} = t_i$  olur,  $t_i$ , işin toplam işlem zamanıdır.  $t_{ia}$  ve  $t_{ib}$  nin olası kombinasyonlarını aramak çözümü oldukça zorlaştıracaktır, bu nedenle literatürde  $t_{ia} = t_{ib} = t_i/2$  olarak kabul edilir.

Montaj hattının bir diğer kritik varsayımı da işlerin bölünemez olmasıdır. Bir iş paralel olduğu zaman bu varsayım hala geçerlidir, çünkü paralellik işi bölmek değil, işi birden çok istasyonda yapmaktır.

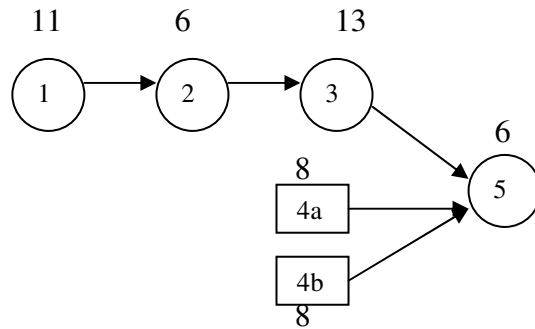
*Örnek 1.*

Şekil 3.1’de verilen 5 işe ait öncelik diyagramında çevrim zamanı 14 dakika olarak verilmiş olsun.



Şekil 3.1. Örnek 1 için öncelik diyagramı

Görüldüğü gibi 4. işin işlem zamanı çevrim zamanından büyüktür. 4. işin paralel olduğu durum Şekil 3.2’de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. 4. işin paralel olduğu öncelik diyagramı

### 3.2. İstasyonların Paralleleştirilmesi

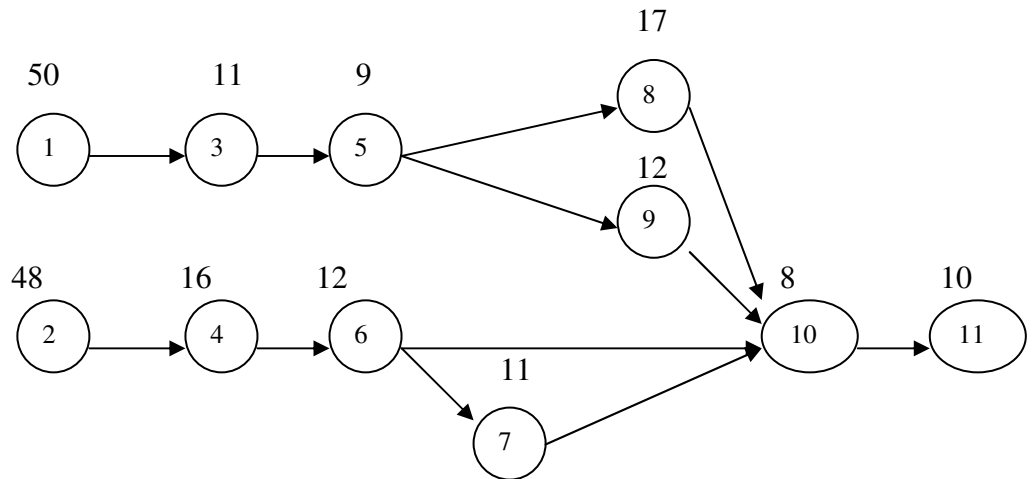
İstasyondaki işlerin aynen tekrarlanmasıdır. Bir istasyonun paralelleştirilmesiyle o istasyonun maksimum iş yükü kapasitesi  $m \cdot CT$  olur,  $m$ ; istasyonun kaç kere tekrarlandığını gösterir. İstasyonda birden fazla işçi çalışarak, o istasyondaki işlerin aynısını yaparlar. İstasyon paralelleştirmenin en büyük avantajı denge etkinliğini artırmasıdır. Paralellik, işlerin istasyonlara daha sıkışık yerleştirilmesini sağlayarak boş zamanı azaltır [Ege, 2001].

Ek olarak paralellik, sistemin güvenilirliğini artırır. Düz bir hatta, bir istasyonun aksaması sistemin aksamasına neden olurken, paralel istasyonlarda sistemin işleyişi etkilenmez.

Avantajlarının çokluğu yanında istasyon paralelleştirmenin ek bir maliyet getireceği de bilinmelidir.

*Örnek2.*

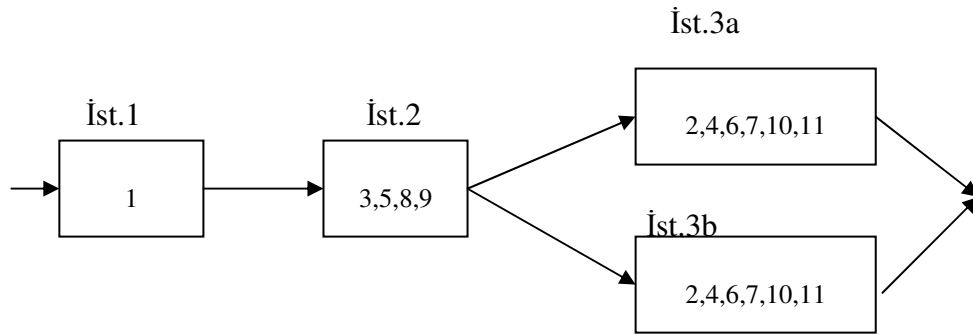
CT=55 min.



Şekil 3.3. Örnek 2 için öncelik diyagramı [Bard,1989]



Şekil 3.4. Örnek 2 için düz istasyonda denge durumu



Şekil 3.5. Örnek 2 için paralel istasyonlarla denge durumu

İstasyonların paralelliğine izin verilmediğinde, hat 5 istasyonla dengelenmektedir.

Hattın etkinliğini hesaplırsak;

Toplam boş zaman= $5+7+5+9+45=71$  dak.

$BD=71/5*55=0.26$

Hattın etkinliği= $1-0.26 \implies \%74$

Paralelliğe izin verildiği durumda hat dört istasyonla dengelenmektedir. Bu durumda hattın etkinliği;

Toplam boş zaman= $5+6+[(2*55)-105]=16$  dak.

$BD=19/4*55=0.07$

Hattın etkinliği= $1-0.07 = \%93$

#### 4. TAVLAMA BENZETİMİ ALGORİTMASI

Tavlama Benzetimi(TB), kombinatoriyal optimizasyon problemleri için iyi çözümler veren olasılıklı bir arama yöntemidir. “Tavlama Benzetimi” ismi, katıların fiziksel tavlama süreci ile olan benzerlikten ileri gelmektedir. Günümüze kadar bilgisayar tasarımı, görüntü işleme(image processing), moleküler fizik ve kimya, çizelgeleme gibi farklı alanlardaki bir çok optimizasyon problemine uygulanmıştır.

Fizik biliminde tavlama, bir katının ısı banyosunda düşük enerji durumlarının elde edilmesi için bir ısı süreci olarak tanımlanmaktadır. Bu süreç aşağıda belirtilen iki adımı içermektedir:

1. Isı banyosunun sıcaklığını katının eriyebileceği en yüksek değere yükselt.
2. Katının yer durumunda (ground state) parçacıkları kendilerini düzenleyene kadar, ısı banyosunun sıcaklığını dikkatli biçimde azalt.

Sıvı safhada katının tüm parçacıkları kendilerini rassal olarak düzenlerler. Yer durumunda ise parçacıklar, oldukça yapıli bir kafes şeklinde (çaprazvari) düzenlenirler ve bu durumda sistemin enerjisi minimumdur. Katının yer durumu, ancak maksimum sıcaklık yeteri kadar yüksek ve soğutma da yeteri kadar yavaş yapılmış ise elde edilir. Aksi halde katı, yer durumunda değil, yarı kararlı (meta-stable) bir durumda donacaktır. Örneğin, eritilmiş bir maddeden tavlama süreci ile bir kristal elde edilebilir, fakat tavlama gereken şartlarda yapılmamışsa bu kristalde bir çok kusur görülecektir.

Tavlama süreci ile kombinatoriyal optimizasyon problemleri arasındaki benzerlik şöyle açıklanabilir: Katının farklı durumları, problemdeki mümkün farklı çözümlere ve sistem enerjisi problemin amaç fonksiyonuna karşılık gelmektedir. Yer durumu global optimumu, yarı-kararlı durum ise yerel optimumu göstermektedir.

Mevcut durumu  $i$  ve enerjisi  $E_i$  olan katının, mevcut durumu bir hareket mekanizması kullanılarak bir sonraki  $j$  durumuna küçük bir değişiklikle dönüştürülür. Böylece son durumun enerjisi  $E_j$  olmaktadır. Eğer  $(E_j - E_i)$  enerji farkı sıfıra eşit veya daha küçükse,  $j$  durumu yeni mevcut çözüm olarak kabul edilir. Eğer enerji farkı sıfırdan büyükse,  $j$  durumu Eş.4.1’de verilen belirli bir olasılıkla kabul edilir. Bu eşitlikteki  $T$  ısı banyosunun sıcaklığını ve  $k_B$  “Boltzman sabiti” olarak bilinen fiziksel bir sabiti ifade etmektedir.

$$\exp \left[ \frac{E_i - E_j}{k_B \cdot T} \right] \quad (4.1)$$

Yukarıda verilen kabul kuralı “Metropolis kriteri” ve tanımlanan algoritma “Metropolis algoritması” olarak bilinmektedir. Eğer sıcaklık yeteri kadar yavaş azaltılırsa, katı her sıcaklıkta ısıl dengeye ulaşabilecektir. Metropolis algoritmasında ısıl dengeye ulaşabilmek için, verilen bir sıcaklık değerinde oldukça fazla sayıda geçişler (sonraki durumda hareketler) üretilir. Isıl denge, “Boltzmann dağılımı” ile karakterize edilmektedir. Eş.4.2’de ifade edilen bu dağılım, katının  $T$  sıcaklığında  $E_i$  enerjili  $i$  durumunda olma olasılığını vermektedir.

$$P_T\{X=i\} = 1/Z(T) \exp \left[ -E_i / k_B \cdot T \right] \quad (4.2)$$

3.2 eşitliğindeki  $X$ , katının mevcut durumunu gösteren olasılıklı bir değişkendir.  $Z(T)$  ise “bölme fonksiyonudur” (partition function) ve Eş.4.3’te verilmektedir.

$$Z(T) = \sum_j \exp \left[ -E_j / k_B \cdot T \right] \quad (4.3)$$

4.3 eşitliğinde mümkün tüm durumların toplamı dikkate alınmakta ve Boltzman dağılımı TB algoritmasının analizinde önemli bir rol oynamaktadır.

*Tavlama Benzetimi Algoritması* : TB, bir katının minimum enerji durumu elde edilene kadar yavaş yavaş soğutulduğu fiziksel tavlama sürecini taklit eden olasılıklı bir arama yöntemidir. Bu yöntem ile üretilen çözümler sırasının amaç fonksiyon değerleri genel bir azalma eğilimindedir, fakat bazı durumlarda amaç fonksiyon değerleri yüksek olan çözümlerde kabul edilebilmektedir. Bu yolla, yerel minimum etrafında yapılan aramdan çıkılıp, daha iyi bir yerel belki de global bir minimum için aramaya devam etmek amaçlanır. TB'nin kombinatorial optimizasyon problemleri için optimuma yakın çözümler veren kullanışlı bir yöntem olarak kullanıldığı söylenebilir.

TB algoritmasında, Metropolis algoritması kombinatorial optimizasyon problemlerinin çözümlerinin bir sırasını üretmek için kullanılır. Daha öncede bahsedildiği gibi, çok-parçacıklı fiziksel bir sistem ile bir kombinatorial optimizasyon problemi arasındaki benzerliğin aşağıdaki eşitliklere dayandığı kabul edilmektedir;

- Problemdeki çözümler, fiziksel sistemdeki durumlara eşittir.
- Bir çözümün maliyeti, bir durumun enerjisine eşittir.

Tüm çözümlerin sonlu kümesi  $S$  çözüm uzayı ile ve  $S$ 'in üyeleri için tanımlanan maliyet değerleri  $f$  maliyet fonksiyonu ile tanımlanacak olursa, söz konusu problem, tüm  $S$  üzerinde  $f$ 'i en küçükleyen ve  $i \in S$  olan bir  $i$  çözümünün veya durumunun bulunmasıdır.

TB komşu arama metoduna dayalı algoritmalarından birisidir. Komşu aramanın basit bir şekli olan “İniş(descent) algoritması”, keyfi olarak seçilen bir başlangıç çözümü ile aramaya başlar. Daha sonra uygun bir hareket mekanizması ile bu çözümün bir komşusu üretilir ve maliyetteki değişim hesaplanır. Eğer maliyette bir azalma söz konusuysa, komşu çözüm yeni mevcut çözüm olarak kabul edilir, aksi halde mevcut çözüm değişmez. Bu süreç mevcut çözümün hiçbir komşusu maliyette iyileşme

sağlamayana kadar devam eder ve böylece iniş algoritması yerel bir minimumda durmuş olur. İniş algoritmasının program taslağı Çizelge 4.1’de verilmektedir.

İniş algoritması basit ve hızlı olsa da, global minimumdan oldukça uzak olabilen yerel minimum çözümleri bulma dezavantajına sahiptir. Bulunan bu çözümün iyileştirilmesi için kullanılan bir yöntem, iniş algoritmasının farklı başlangıç çözümleriyle birkaç kez çalıştırılması ve bulunan en iyi yerel optimumun seçilmesidir. TB algoritması ise, bu stratejinin yerine, maliyette yükselmeye yol açan komşu hareketlerini de bazen kabul ederek, yerel optimum tuzaklardan kurtulmaya çalışır. Maliyette yükselmeye yol açan bir hareketin kabul edilip edilmemesi, kontrollü bir olasılığa göre rassal olarak belirlenmektedir.

Maliyet fonksiyonu  $f$ ’de  $\Delta$  kadar bir yükselmeye yol açan hareketin kabul edilme olasılığı kabul fonksiyonu olarak adlandırılır ve genellikle Eş.4.4 ile ifade edilir. Bu eşitlikte  $T$ , fiziksel tavlamadaki sıcaklığa karşılık gelen bir kontrol parametresidir.

$$\exp[-\Delta/T] \quad (4.4)$$

Kabul fonksiyonuna göre,  $f$ ’de meydana gelen küçük artışların kabul edilme olasılığı, büyük artışların kabul edilme olasılığından daha fazladır. Ayrıca,  $T$  yüksek olduğunda hareketlerin çoğu kabul edilecektir.  $T$  sifıra yaklaştıkça ise,  $f$ ’de artışa yol açan hareketlerin çoğu reddedilecektir. Bu nedenle TB algoritmasında, yerel optimum tuzaklarına düşülmesini engellemek için göreceli olarak yüksek bir  $T$  değeri ile aramaya başlanır. TB algoritması, bir taraftan sıcaklık yavaş yavaş azaltılırken, her sıcaklık değerinde belli sayıda hareket deneyerek arama işlemini sürdürür. Basit bir TB algoritmasının adımları Çizelge 4.2.’de görülmektedir.

Çizelge 4.1. İniş Algoritması

Adım 1	Bir başlangıç durumu seç: $i \in S$
Adım 2	$i$ 'nin bir komşusu olan $j$ durumunu üret $\Delta = f(j) - f(i)$ Eğer $\Delta \leq 0$ ise $i = j$
Adım 3	$i$ 'nin komşuları olan tüm $j$ 'ler için $f(j) \geq f(i)$ ise DUR, aksi halde Adım2'ye git.

Çizelge 4.2. Tavlama Benzetimi Algoritması

Adım 1	Bir başlangıç durumu seç: $i \in S$ Bir başlangıç sıcaklığı seç: $T > 0$ Sıcaklık değişim sayacını sıfırla : $t = 0$
Adım 2	Durdurma koşulu sağlanmışsa DUR, değilse tekrar sayacını sıfırla : $n = 0$ ve devam et.
Adım 3	$i$ 'nin bir komşusu olan $j$ durumunu rassal olarak üret. $\Delta = f(j) - f(i)$ Eğer $\Delta < 0$ ise $i = j$ , değilse ve $U(0.1) < \exp(-\Delta/T)$ ise $i = j$ .
Adım 4	$n = n + 1$ Eğer $n < M$ ise Adım 3'e git, değilse $t = t + 1$ , $T = T(t)$ ve Adım 2'ye git.

Şekil 4.2'de  $M$  her sıcaklık değerinde denenecek hareket sayısına ve  $T(t)$  sıcaklığın aldığı  $t$ . değere karşılık gelmektedir. TB algoritmasının global optimum çözümlere yakınsama hızı,  $M$  ve  $T(t)$ ,  $t=0,1,2,\dots$  parametreleri tarafından belirlenmektedir. Ancak pratikte, algoritmanın parametre değerlerinin uygulamaya yönelik seçimi "tavlama" veya "soğutma" planı ile belirlenmektedir. TB algoritmasında, başlangıç sıcaklığının, sıcaklık azaltma oranının, her sıcaklıktaki tekrar sayısının ve durdurma koşulunun belirlenmesi tavlama veya soğutma planı olarak tanımlanmaktadır. Soğutma planının seçimi, algoritmanın performansı üzerinde çok önemli bir etkiye sahiptir.

*Tavlama Benzetimi Algoritmasının Yakınsaması:* TB algoritması, “Markov zincirleri” teorisi kullanılarak modellenenmektedir. Bir markov zinciri, denemelerin bir sırasındır. Bu sırada, verilen bir denemenin sonucunun olasılığı, sadece bir önceki denemenin sonucuna bağlıdır. T. denemenin sonucu olasılıklı bir değişken olan  $x(t)$  ile ifade edilecek olursa, her  $i, j$  sonuç çifti için t. denemedeki “geçiş olasılığı” Eş.4.5 ile tanımlanmaktadır.

$$P_{ij}(t)=P\{x(t)=j/x(t-1)=i\} \quad (4.5)$$

Elemanları Eş. 3.5 te verilen  $P(t)$  matrisi, “geçiş matrisi” olarak bilinmektedir. TB algoritmasının yakınsamasını tanımlamadan önce aşağıdaki tanımların yapılması faydalı olacaktır:

1. Markov zinciri, sonuçların sonlu bir kümesi üzerinde tanımlanırsa, sonlu Markov zinciri olarak adlandırılır.
2. Bir Markov zincirinde geçiş olasılıkları deneme sayısına bağlı ise homojen olmayan bir Markov zinciridir. Eğer geçiş olasılıkları deneme sayısından bağımsız ise, homojen Markov zinciri söz konusudur.

TB algoritmasında, T sıcaklık parametresi sabit tutulursa, bir i durumundan j durumuna hareket etme olasılığı deneme sayısından bağımsız olacaktır ve böylece homojen bir Markov zinciri elde edilecektir. Eğer herhangi bir i durumundan, herhangi bir j durumuna sonlu sayıda hareketlerle geçmek mümkün ise, elde edilen Markov zinciri, başlangıç durumundan bağımsız bir  $q(i)$  denge dağılımına “stationary distribution” sahip olur. Denge dağılımı Boltzman dağılımına karşılık gelmektedir. Sonuçta T sıcaklık parametresi sıfıra yaklaşırken, bu denge dağılımı optimum çözümlerin kümesi üzerinde bir uniform dağılım olmaktadır, yani TB algoritması global optimum çözümlere yakınsamaktadır. Denge dağılımının elde edilmesi için gerekli iterasyon sayısının en azından çözüm uzayı boyutunun karesidir. Fakat, çözüm uzayının boyutu, genellikle problem boyutuyla üstel artış

göstereceği için TB algoritmasının çalıştırılması için gereken zaman da üstel olacaktır.

Bu nedenle, TB algoritmasında sıcaklık parametresinin sabit tutulması yerine dereceli olarak azaltılmasına izin verilir. Böylece, T sıcaklık parametresinin her değerinde ortaya çıkan sonlu uzunluklu homojen Markov zincirlerinin bir sırası elde edilmiş olur. Bu süreç, homojen Markov zincirlerinin, homojen olmayan tek bir markov zincirine birleştirilmesi olarak tanımlanmaktadır. Eğer m. homojen Markov zincirinde sıcaklık parametresinin değeri  $T'(m)$  ile homojen Markov zincirlerinin uzunluğu M ile gösterilecek olursa, t. iterasyonda sıcaklık parametresinin değeri,  $T(t)$ , Eş. 4.6'daki gibi olacaktır.

$$T(t)=T'(m)m.M<t\leq(m+1).M \quad (4.6)$$

Böylece, Eş. 4.6'da tanımlanan aralık için sıcaklık parametresi sabit tutulmakta, daha sonra belli bir yöntemle azaltılarak  $m=0,1,2,\dots$  için  $T'(m)$  sırası elde edilmektedir. Bu sıra, Eş. 4.7 ve Eş. 4.8.'de verilen şartları sağlamaktadır.

$$T'(m+1)\leq T'(m) \quad m=0,1,2,\dots \quad (4.7)$$

$$\lim_{m\rightarrow\infty}T'(m)=0 \quad (4.8)$$

*Tavlama Benzetimi Algoritmasının Uygulanması:* Belli bir kombinatoriyal optimizasyon problemine TB algoritmasının uygulanması için verilmesi gereken bazı kararlar vardır.

*Probleme özgü seçimler:* Problem, mümkün çözümlerin kümesi tanımlanacak şekilde formüle edilmelidir. Ayrıca, herhangi bir çözümün komşu yapısı, buradaki herhangi bir komşu çözüme nasıl hareket edileceği ve çözümlerin amaç fonksiyonu değerlerinin belirlenme yöntemi tanımlanmak zorundadır. Bunun yanı sıra, bir başlangıç çözümü üretilmesi gerekmektedir. Genelde, yerel optimumların sığ olduğu

“düzgün” bir arama uzayını gösteren komşu yapısı, yerel optimumların derin olduğu “engebeli” bir arama uzayını gösteren komşu yapısına tercih edilmektedir.

Eğer kısıtlı bir problem söz konusuysa, çözüm uzayı sadece kısıtları sağlayan çözümler ile sınırlandırılmalıdır veya kısıtları bozan çözümler uygun bir ceza fonksiyonu dikkate alınarak çözüm uzayına dahil edilmelidir.

*Tavlama planına ait seçimler:* Sıcaklık parametresinin azalan değerlerinin sonlu bir sırası için sonlu uzunluklu homojen Markov zincirleri üretilerek oluşturulan bir TB algoritmasının, uygulanması da sonlu bir zaman alacaktır. Yakınsamanın sağlanabilmesi için bu algoritmada kullanılan parametreler kümesi uygun bir şekilde belirlenmek zorundadır. TB algoritmasında kullanılan parametrelerin ve değerlerinin belirlenmesi tavlama veya soğutma planı olarak tanımlanmaktadır. Tavlama planı ile aşağıdaki parametreler belirlenmektedir.

1. T sıcaklık parametresinin başlangıç değeri
2. Sıcaklığın hangi yöntemle azaltılacağını belirlemek için kullanılan  $T(t)$  sıcaklık fonksiyonu
3. Her sıcaklıkta gerçekleştirilmesi gereken M tekrar sayısı
4. Algoritmayı durdurmak için T sıcaklık parametresinin son değeri

Günümüze kadar çeşitli tavlama planları önerilmiştir. Bunlardan bazılarında, maddenin sıvı safhaya ulaştığında tüm parçacıklarının rassal olarak düzenlenmesini taklit etmek için, T sıcaklık parametresinin başlangıç değeri, denenen tüm hareketler kabul edilecek kadar yüksek seçilmiştir. Sıcaklık parametresinin değerini azaltmak için ise oransal bir sıcaklık fonksiyonu kullanılarak sabit bir r için  $T(t+1)=r.T(t)$  dikkate alınmıştır. Burada r, 1’den küçük fakat 1’e yakın bir sabittir ve pratikte genellikle 0.80 ile 0.99 arasında bir değer almaktadır. Bu sıcaklık fonksiyonu ile sıcaklık parametresinin değeri, sıfıra yaklaştıkça daha yavaş azalmaktadır. Sıcaklık parametresinin her değerinde gerçekleştirilecek M tekrar sayısı, sabit bir üst sınıra göre kabul edilen yeterli sayıda geçişler tarafından belirlenmiştir. Böylece problemin, fiziksel tavlamadaki ısı dengeye karşılık gelen bir denge durumuna ulaşması

amaçlanmaktadır.  $M$  tekrar sayısı, sabit veya problemin yada komşu yapısının boyutuyla orantısal olarak alınabilmektedir. Bu tavlama planı ile, sıcaklık parametresinin her değerinde elde edilen çözüm, belli sayıda ardıl sıcaklık değişimleri boyunca aynı kalırsa TB algoritması durmaktadır. Buna göre elde edilen son durum, fiziksel tavlamadaki “donma durumuna (frozen state)” karşılık gelmektedir.

Diğer tavlama planları bölüm 4.3’de anlatılan asimtotik yakınsamanın teorik sonuçlarını kullanmaktadır. Bu planlarda sıcaklık parametresinin her değerinde gerçekleştirilen  $M$  tekrar sayısı, o sıcaklıkta sistemin denge dağılımına ulaşmasına yetecek kadar yüksek seçilmektedir.

Önerilen tavlama planları,  $T(t)$  ve  $M$  değerleri için geri besleme kullananlar ve kullanmayanlar olmak üzere genel bir ayırma tabi tutulabilir. Geri besleme kullanmayan basit tavlama planlarında  $T(t)$  ve  $M$  değerleri herhangi bir komşunun başlangıcında belirlenmektedir. Diğer tavlama planları ise, algoritmanın sürecinden alınan geri beslemeyi  $T(t)$  ve  $M$ ’ in mevcut değerlerini değiştirmek için kullanırlar [Alabaş, 1999].

## 5. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Çalışmanın bu bölümünde, öncelikle montaj hattı dengeleme ile ilgili yapılmış çalışmalar genel olarak özetlenmiştir (Bölüm 5.1). Daha sonra, bu çalışmada stokastik işlem zamanlar, paralel hatlar, çok amaçlı yaklaşımlar kullanıldığı için bu konulara yönelik yapılmış çalışmalar ayrı ayrı verilmiştir (Bölüm 5.2-4). Son olarak da tavlama benzetimini kullanan çalışmalar Bölüm 5.5'te açıklanmıştır.

### 5.1. Montaj Hattı Dengeleme Problemine İlk Yaklaşımlar

Montaj hattı dengeleme problemine ilk analitik yaklaşım 1954'te Bryton tarafından yapılmış ve bundan sonra pek çok yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemler iki grupta incelenebilir. Birinci grupta, 'Kesin Modeller' olarak adlandırılan ve problemin optimum çözümünü bulan yöntemler(matematiksel programlama modelleri) yer alır. İkinci grup ise en iyiye yakın çözümler veren sezgisel (heuristic) yöntemlerden oluşur. Sezgisel yöntemler, optimum çözümü garantilememekle beraber, belirli kısıtlar altında, göreceli olarak iyi veya geçerli çözümleri daha az bir hesaplama ile sağlamaktadırlar.

TMD montaj hattı dengeleme problemi, en fazla araştırılan ve üzerinde en fazla makalenin yayınlandığı problemlerdir. Salveson (1955), MHD problemini doğrusal tamsayılı programlamayla modellemiştir. Modelin amaç fonksiyonu, istasyonlardaki toplam boş zamanın en küçüklenmesidir. İstasyonlara görev atamalarının tüm mümkün kombinasyonlarının bir araya getirilmesi, modelin pratikten ziyade akademik seviyede olduğunu göstermektedir. Bowman (1960) problemi, doğrusal 0-1 tamsayılı programlama şeklinde formüle ederek, görevlerin bölünmesi problemini ortadan kaldırmıştır. Thangavelu ve Shetty (1971), Bowman ve White'ın 0-1 tamsayılı programlama formülasyonunun bir geliştirilmiş versiyonunu sunmuşlar ve problemin çözümü için Balas additive algoritmasını kullanmışlardır. Tablot ve Patterson(1984) tek model montaj hattı dengeleme problemleri için bir tamsayılı programlama algoritması geliştirmişlerdir. Patterson ve Albracht (1975),

literatürdeki diğer formulasyonlardan daha etkili bir tamsayı programlama formülasyonu sunmuşlardır. Gökçen ve Erel (1998), çok modelli montaj hatları için bir tamsayı formulasyon geliştirmişlerdir. Pinto, Dannenbring ve Khumawala(1975), görevlerin paralel olduğu durumları içeren dengeleme problemleri için bir tamsayı programlama modeli önermişlerdir.

Kapsamlı literatür incelemeleri Ghosh ve Gagnon(1989) ve Scholl(1999) tarafından yapılmıştır. Ghosh ve Gagnon(1989), montaj hattı dengeleme literatüründe bir sınıflandırma oluşturmuşlardır. Bu plan ilk önce montaj hatlarını bir ürünün tek veya karışık-model olarak üretilmesiyle ilgili farklılaştırır. Bu iki kategori daha sonra problemin görev zamanlarının deterministik veya stokastik varsayılmasıyla kırılmıştır. Son bir adım problemin basit veya daha genel durumda tanımlanmasıdır (Ghosh and Gagnon,1989). Genel durumlar karışık istasyonlar, paralelleştirme kısıt belirleme ve alternatif akış politikaları (U-tipi yerleşim) gibi durumları kapsayabilir. Ghosh ve Gagnon(1989)'un çalışmalarının kapsamı verildiğinde, ilgili araştırmacılar çalışmalarını montaj hattı dengelemenin detaylarına yöneltmişlerdir. İlk bakıldığında basit-model, deterministik problem, dal ve sınır metotları daha çok ilgi çekmeye devam etmektedir. (Hoffman 1992, Sprecher 1999). Easton (1989) montaj hattı dengeleme problemini çözmek için iki şebeke-tabanlı algoritma geliştirmiştir. Anderson ve Ferris(1994) genetik algoritma tekniklerini kullanmışlardır. Çoklu-model, deterministik montaj hattı dengeleme tam zamanlı üretim yerlerinde çok uygulanabilen bir modeldir. Kabir, Tabucanon ve Moden(1983) bu konuda çalışmalar yapmıştır. Miltenburg ve Wijngaard(1994) U-şekilli yerleşimi tanımlamışlardır. Deterministik görev zamanlı MHD problemlerini çözen bir çok tekniğin geliştirilmesine rağmen, stokastik görev zamanlı problemler için yapılan çalışmalar, göreceli olarak o kadar fazla değildir. Problemin matematiksel yapısındaki karmaşıklık, bu konuda fazla çalışma yapılamamasının en önemli nedenleridir. Hem çok modelli deterministik ve hem de çok modelli stokastik hat dengeleme problemleri için geliştirilen ilk öncü model Arcus (1996) un COMSOAL metodudur. Çoklu modelli montaj hatları için, modellerin sıralanması problemini ilk olarak Kilbridge ve Wester (1961) tanımlamışlardır.

## 5.2. Stokastik İşlem Zamanlı Montaj Hattı Dengeleme Konusunda Yapılan Çalışmalar

Literatürde bu konuda yapılmış çalışmalar Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Stokastik işlem zamanlı montaj hatlarını dikkate alan çalışmalar

		STOKASTİK İŞLEM ZAMANLI MONTAJ HATTI DENGELEME PROBLEMİNİ İÇEREN ÇALIŞMALAR
TEK MODELLİ	TEK AMAÇ	Moodie ve Young (1965), Mansoor ve Ben-Tuvia (1966), Ramsing ve Downing (1970), Reeve ve Thomas (1973), Moberly ve Wyman (1973), Kottas ve Lau (1973), Kottas ve Lau (1976), Kottas ve Lau (1981), Vrat ve Vrani (1976), Buxey (1978), Raouf ve Tsui (1982), Kottas ve Lau (1981), Shtub (1984), Sculli (1984), Driscoll ve Abdel-Shafi (1985), Silverman ve Carter (1986), Shin (1989), Betts ve Mahmoud (1989), Sarin ve Erel (1990), Rajamani ve Singh (1991), Shin (1991), Suresh ve Sahu (1994), Suresh ve Sahu (1996), Sarin ve Erel (1999), Khan J.Day (2001), Ağpak ve Gökçen (2002), McMullen ve Tarasewich (2003), Liu ve Ong (2004),
	ÇOK AMAÇ	
ÇOK MODELLİ	TEK AMAÇ	Chakravarty ve Shtub (1986), McMullen (1995), McMullen ve Frazier (1997), McMullen ve Tarasewich (2002),
	ÇOK AMAÇ	McMullen ve Frazier (1998)

### 5.2.1. Değiştirilmiş deterministik modellerle dengeleme

Moodie ve Young (1965) iki aşamalı bir sezgisel prosedür geliştirmiştir. İlk aşamada, “En büyük görev zamanı” kuralına göre bir denge oluşturulur. İkinci aşamada, işler istasyonlar arasında boş zamanı azaltmak ve boş zamanları istasyonlara eşit şekilde dağıtmak için bölünürler. Bir istasyona atanan bir işin orada tamamlanma olasılığı önceden belirlenmiş bir değerden yüksek veya eşittir. İşlerin performans zamanlarının normal dağılıma uyduğu kabul edilir. Tamamlanmayan birimleri dikkate almaz.

Mansoor ve Ben-Tuvia(1966), normal dağılmış görev zamanlarıyla birlikte tam dengelenmiş istasyon sayıları verildiğinde, en iyi çevrim zamanının belirlenmesi üzerine çalışmışlardır. Metot, iki plan çerçevesinde toplam işgücü maliyetlerini en küçükleyen optimal bir çevrim zamanı araştırmaktadır. İlk plan sabit teşvik oranlarına bağlıdır. İkinci plan ise işçinin kazanç için sarfettiği çabayla ilişkilidir. Bu araştırma, ekonomik amaç kriterinin kullanımı açısından oldukça önemlidir.

Ramsing ve Downing(1970), “sıralı pozisyon ağırlığı” (ranked positional weight technique) olarak adlandırılan bir teknik geliştirmişlerdir.

Raouf ve Tsui(1980,1982), Brady ve Drury’nin oluşturduğu teoremden faydalanarak, SMD problemi için geliştirilmiş bir prosedürü modifiye ettiler. İşler arasında bir ilişki olmadığı farz edilirse, bir iş bir grup işe dahil edildiğinde, yeni istasyon zamanının değişim katsayısı eskisinden daha az olacaktır. Prosedür işlerin performans zamanlarının normal dağılımlı olduğunu varsaymaz, onun yerine herhangi bilinen veya bilinmeyen bir simetrik dağılım kabul edilir. Prosedür öncelikle uygun işlerin listesini yapar, bu işler atanmamış bir önceliği olmayan işlerdir. Daha sonra listedeki işlerden, istasyon zamanının çevrim zamanını geçme olasılığı önceden belirli bir değerden az olan iş seçilir. Bu işler kümesinden, mevcut istasyonun içeriği Brady ve Drury’nin teoremini sağlayan bir alt küme seçilir. Eğer bu alt kümede bir tek işten daha fazla iş varsa varyasyon katsayısı en az olan seçilir.

Yazarlar sınırlı deneyle prosedürün iyi ve gerçekçi sonuçlar oluşturduğunu kabul etmişlerdir.

Kao(1976), öncelik ilişkilerini sağlayan ve işçilik maliyetini en küçükleyen iş gruplarını bulan bir dinamik programlama yaklaşımı geliştirmiştir. Bu formülasyona göre her istasyondaki iş içeriğinden ortaya çıkan olasılığın CT'nin belli bir değerinden fazla olması engellenmekte ve böylece işler CT içinde tamamlanma olasılığı en az verilen değer kadar olan en az sayıda istasyona atanmaktadır. İş zamanları poisson, gamma, binom veya negatif binom dağıldığı durumlarda bu yaklaşım en iyi değerle sonuçlanmaktadır.

### **5.2.2. Benzetim tekniğiyle dengeleme**

Reeve ve Thomas (1973), MS montaj hatları için dört çözüm metotunu karşılaştırmıştır. Bu metotlarda başlangıç çözümü verilir ve amaç bir veya daha çok istasyon zamanının çevrim zamanını geçme olasılığını minimize edecek biçimde düzenleme yapmaktır. İlk metot, Moodie ve Young tarafından bulunan transfer ve trade (T&T) konseptine dayanır. Çevrim zamanını geçme olasılığını azaltmak için istasyonlar arasında birebir iş uygulanır. İkinci metot, boş zamanın üst limitlerini ve çevrim zamanını geçme olasılığını belirlemek için başlangıç çözümü kullanan bir dal-sınır tekniğidir. Bu metot tamamlanırsa optimal çözümü üretmektedir. Üçüncü metot, bazı sezgisel kurallarla bir önceki metotun modifiye edilmiş şeklidir. Son metot BABTAB, birinci ve üçüncü metotların bir kombinasyonudur. Öncelikle daha fazla ilerleme yapılamayana kadar başlangıç çözüme dal-sınır tekniği uygulanır, daha sonra ekle ve değiştir metodu dizaynı geliştirmek için uygulanır.

Dört metot test edildikten sonra dal-sınır tekniğinin yeterli bilgisayar zamanında optimum çözümü garanti ettiği gözlenmiştir. Yeterli işlem zamanı olduğunda, dal-sınır sezgiseli iyi sonuçlar verir. BABTAB daha kısa zamanda güzel sonuçlar verir. Ekle ve değiştir metodu en az etkili olandır.

Buxey(1978), Monte-Carlo simülasyonunu kullanarak SMS 'yi incelemiştir.

Driscoll ve Abdel-Shafi(1985), değişen şartlarda çözümlerin performanslarını değerlendiren simülasyon bağlantılı bir denge metodu geliştirmiştir. Metot, Helgeson ve Birnie tarafından üretilen "sıralı pozisyon ağırlığı" tekniğine benzemektedir. Görev zamanlarının stokastikliği Moodie ve Young(1965) yaklaşımına göredir.

Moberly ve Wyman(1973), çıktı oranını arttırmak için bir simülasyon çalışması yapmışlardır. Bu çalışmada dual hatların tek hatlara göre daha verimli olduğu ortaya çıkmıştır.

Arcus(1966), ana düşüncesi mümkün diziden rassal seçim yapmak olan COMSOAL tekniğini geliştirmiştir. İstasyon zamanları rassal olarak binom bir dağılımdan üretilen bir ağırlıkla çarpılır.

Arcus(1966) tarafından geliştirilen ve içerisine bir simülasyon modelinin de ilave edildiği COMSOAL'ın değişik bir versiyonu çok modelli montaj hattı problemlerine de çözüm getirebilmektedir.

Johnson (1983), bazı pratiğe yönelik kısıtlar altında, çok modelli hatlarda istasyon sayısını en küçükleyen bir dal sınır algoritması sunmuştur.

Silverman ve Carter(1986), stokastik işlem zamanlarının toplam işlem maliyeti üzerindeki etkisini incelemiştir. Tamamlanmayan işler için gerekli zaman kadar hat durdurulur. Hat dengeleme metodu Arcus'unkine benzer bir metottur.

Nkasu ve Leung(1995), stokastik hat dengeleme için Comsoal tabanlı bir çözüm geliştirmişlerdir. Bu metot önce hat dengeleme probleminin bazı stokastik uygulamalarını simüle eder ve daha sonra COMSOAL 'ın modifiye edilmiş bir versiyonunu uygulayarak farklı uygun çözümler oluşturur ve olası sonuçlar arasından en iyisini seçer.

### 5.2.3. Probleme özgü geliştirilen sezgisel algoritmalar

Kottas ve Lau(1973), maliyet fonksiyonunu minimize eden bir sezgisel geliştirmişlerdir. Herhangi bir iş için gerekli zamanın normal dağılımla ifade edildiğini varsaymışlardır. Bir iş tamamlanmadığı zaman, hattın bitiminde tamamlanır. Öncelik sırasına uygun olarak işlerin listesi yapılır, her atamadan sonra bu liste güncellenir. Daha sonra atanmak için marjinal tercihli işlerin tanımlandığı bir tercih listesi oluşturulur. Bir iş ,gözlem altındaki belirli bir pozisyondaki beklenen işçilik getirilerinin, beklenen tamamlanmama maliyetinden fazla olduğu durumlarda marjinal tercihlidir denir.

Kottas ve Lau (1976), daha sonra dizaynın beklenen tamamlanmama maliyetini değerlendiren bir metot geliştirmiştir. Metot tamamlanmayan işlerin bütün kombinasyonlarını tanımlar. Her kombinasyon için, mevcut olasılıklar ve maliyetler hesaplanır. Kottas ve Lau(1981), daha önceki çalışmalarının geliştirilmiş bir şekli olan bir metot geliştirmiştir. Farklı seçim kuralları ve onların olasılıklı kombinasyonları kullanılmıştır. Seçim işlemi Arcus'un ağırlıklı rassal seçim ve Tonge'nin sezgisellerin olasılık kombinasyonları metotlarıyla ilişkilidir. Seçim kuralları; rassal seçim, en yüksek tamamlanmama maliyetli işin seçimi, en düşük tamamlanmama maliyetli işin seçimi gibi kurallardır. Böylece, farklı hat dizaynları oluşturulmakta ve değerlendirilmektedir. En düşük maliyetli tasarım metotun çözümü olur.

Vrat ve Virani(1976), Kottas ve Lau nun tekniğini 51 istasyonlu ve 75 çalışanlı bir gerçek durum problemine uygulamışlardır. Tekniği, işlem zamanı çevrim zamanından büyük işler için istasyonları paralelleştirecek biçimde modifiye etmişlerdir.

Shtub(1984), stokastik işlem zamanlı ve farklı istasyon durumlu hat dizaynları için bir sezgisel metot geliştirdi. Bir görev için bekleme zamanı işin atanacağı

istasyondaki işçi sayısının azalan kesikli bir fonksiyonu olduğu varsayıldı. Metot Kottas ve Lau'nun metoduna benzeyen bir metottur.

Sculli (1979), sistemin başlangıç tasarımından sonra, prosesteki çeşitli dinamik faktörler nedeniyle, hattın yeniden düzenlenmesini dikkate alan dinamik bir görüşten bahsetmiştir. CT talep oranına bağlı olarak ayarlanmakta, spesifikasyonlarda değişim oluşmakta ve operatörler standart bir oranda çalışmamaktadır.

Sculli(1984), daha sonra kullanıcıyla etkileşerek çözüme ulaşan bir bilgisayar programı geliştirdi. Bu prosedürdeki kısıtlar, bir sonraki istasyonun çalışması için gerekli olan çıktı miktarı ve alt sınırı geçmeyecek kadar bir istasyona atanmış işçi sayısıdır.

Lau ve Shtub(1987), bazı işler tamamlanmadığında, çevrim zamanının aşılabileceği bir melez hat tasarısı önermiştir. Bu çalışmada işler iki sınıfa ayrılmıştır. Birinci sınıfta, hat işlerin tamamlanması için ihtiyaç duyulan süre kadar durdurulabilir. İkinci sınıfta ise, işler temel çevrim zamanında tamamlanmayacak olsa bile hat durdurulmaz.

Shin(1990), geniş çevrim zamanı için deterministik problem metotunu kullanan bir sezgisel metot geliştirdi. Beklenen toplam maliyeti hesaplama yolu Kottas ve Lau'nunkine benzerdir. Montajı yapılacak parçaların talebinin sabit ve belirli olduğu, iş bölünmelerine izin verilmediği, iş istasyonlarının belirli olmadığı, iş zamanlarının bilinen ortalama ve varyans ile normal dağıldığı varsayımları altında  $\text{Toplam maliyet} = \text{Toplam beklenen tamamlanma maliyeti} + \text{Toplam işçilik maliyeti}$  fonksiyonunu en küçükleyen bir algoritmadır. Tamamlanmayan işler hattın sonunda tamamlandığı varsayılır. Çevrim zamanında en alt sınıra ulaşana kadar metot devam ettirilir. Çözümün kalitesi yüksek oranda faydalanılan deterministik metoda bağlıdır. Beklenen toplam maliyetin minimum olduğu noktada çevrim zamanının değerini tanımlama fikri ilginçtir ve yönetime üretim oranı alternatifleri sunar.

Betts, Mahmoud(1989), stokastik zamanlı hat dengeleme için, sınırların öncelik matrisinden hesaplandığı bir dal-sınır tekniği kullanmışlardır. Bu yaklaşım optimal çözüm kümesi oluşmasına izin verir ve bu da çözüm seçiminde büyük esneklik sağlar. Rajamandi ve Singh(1991), çalışmalarında siyah-beyaz televizyon alıcısı montaj hattının Kottas ve Lau(1973) ve Vrat ve Virani'deki(1976) maliyet fonksiyonları yardımıyla dengelenmesini ve bu dengelenmiş hattın SLAM-II benzetim diliyle modelleyerek ortaya çıkabilecek durumları incelemişlerdir.

Carraway, Tip-1 hat dengeleme için görev zamanlarını normal dağılıma uyduğu bir dinamik programlama metodu geliştirmiştir. Sarin ve Erel(1990), toplam işçilik ve tamamlanmama maliyetlerinin minimize edildiği tek modellenmiş stokastik montaj hattı için bir maliyet modeli geliştirmiştir. Dinamik programlama metodu kullanılmıştır. Sarin ve Erel(1990), büyük ölçekli problemler içinde problemi alt problemine ayıran yaklaşık bir prosedür geliştirmişlerdir. Her bir alt problem için, dinamik programlama prosedürü kullanılarak yaklaşık bir sonuç elde edilmektedir. Bu yaklaşık sonuçlar, prosedürün dal ve sınır tipiyle geliştirilmekte ve geliştirilmiş alt problem sonuçları, daha sonra orijinal problemin sonucunu üretmek üzere birleştirilmektedir.

McMullen ve Frazier(1997), de çok modellenmiş stokastik hatlar için paralellığe izin veren bir sezgisel geliştirmişlerdir. Sezgisel altı farklı hat dengeleme problemine uygulanmıştır ve mevcut ve yeni görev seçimi kuralları kullanılmıştır. Sonuç yerleşimler simule edilmiş ve performansları analiz edilmiştir. Sarin ve diğerleri(1999) TMSMHD için amaç fonksiyonu toplam işçi ve beklenen tamamlanma maliyetinden oluşan bir sezgisel birerleme yöntemi geliştirmişlerdir.

Ağpak ve Gökçen(2002), görev zamanlarının normal dağılımla ifade edildiği U tipi hatlar için bir sezgisel geliştirmiştir. Arcus tarafından deterministik modeller için geliştirilen COMSOAL metodundan faydalanılmıştır. Herbir istasyon için yönetim tarafından belirlenen güvenlik seviyesi kısıtı altında görevlerin, istasyon sayısını minimize edecek şekilde atanmalarını amaçlamaktadır.

Liu,Huang(2004), tek modelli stokastik montaj hattını Tip-2 problemi için çözmüşlerdir. Önceden belirli istasyon sayısı ve güven seviyesinde, metot en küçük çevrim zamanına ulaşmayı amaçlar. İlk aşamada görevler istasyonlara ileri ve geri doğrultularda atanırlar. İkinci aşamada iş yükü işlerin istasyonlarda dağıtımıyla dengelenir. Son olarak çevrim zamanı üst limitinden güven seviyesini sağlayana kadar adım adım indirilir.

#### **5.2.4. Probleme özgü modern sezgisel algoritmalar**

Suresh ve Sahu(1994), stokastik zamanlı montaj hattı problemini tavlama benzetimi metotunu kullanarak çözmüştür. Önerilen yaklaşım farklı yerel optimum noktalarına gitmeden genel optimuma ulaşmaya çalışır. Çalışmalarında düzgünlük indeksi(SI, smoothness indeks) ve hattın durma olasılığını verimlilik ölçütü olarak almışlar, çözüm kümelerini oluşturma işlemini istasyonlar arasında mümkün olan değişimleri yaparak gerçekleştirmişlerdir. Sezgiselin çözüm kabiliyeti parametrelerin seçimine göre değişiklik göstermektedir. Suresh ve Sahu(1996) çalışmalarında, TMSMHD problemine iyi kalitede çözüm elde edebilmek için genetik algoritma(GA) yaklaşımı sunmuştur. SI ve hattın durma olasılığı uygunluk fonksiyonu olarak kullanılmıştır. Biri imkansız çözümlere izin veren ve karşılıklı örneklerini belli aralıklarla değiştiren iki popülasyonla çalışan değiştirilmiş GA, düzensiz arama uzayının kontrolü için önerilmiştir.

Khan ve J.Day (2002), KBDM tekniği kullanarak farklı durumlardaki hat dengeleme problemlerini çözmüşlerdir. KBDM tekniği paralel istasyonlar, stokastik zamanlar ve istasyon birleştirme gibi durumlara uygun bir tekniktir. İlk önce uygun montaj sisteminin seçimiyle başlar ve daha sonra uygun çevrim zamanına, paralel istasyon ihtiyacına, paralel hat uygulamalarına karar verir. Bütün bunlara dikkat edilerek ekonomik istasyon sayısına karar verilir. Son olarak da detaylı hat dizaynı yapılır.

### 5.3. Çok Amaçlı Yaklaşımları Kullanan Çalışmalar

Malakooti ve Kumar (1996), montaj hatları için, amaçların istasyon sayısı, çevrim zamanı ve maliyet olduğu çok amaçlı bir karar verme tekniği kullanmışlardır. Çok amaçlı montaj hatları için metot ilk önce, belirli bir çevrim zamanı için istasyon sayısını en küçüklemektedir. Daha sonra belirli bir istasyon sayısı için çevrim zamanını en küçük yapmaya çalışır ve son olarak da belirli bir çevrim zamanı için maliyeti en küçük yapacak istasyon sayısını belirler. Çözümlerden en etkili olanı, ‘tercihlerin önemine göre alternatiflerin derecelendirilmesi’ metoduna göre seçilir.

Gökçen ve Erel (1997), çok modelli montaj hatları için bir amaç programlama yaklaşımı önermişlerdir. Bu amaç programlama yaklaşımı, karar vericiye farklı amaçları değerlendirme esnekliği sağlamaktadır.

Minzu ve Henrioud (1997), montaj grafiğini kullanmaya dayanan genel bir algoritma önermişlerdir. İşlerin ekipmanlara atanması, ekipmanların öncelik sıralamaları ve istasyonların işlem zamanlarının hesaplanmasına yönelik bir metottur. Metot, gizli zamanları, işçi hareketlerini ve hazırlık zamanlarını göz önüne almaktadır. Yazarlar, ‘sabit üretim’ ve geri yönlü dengeleme algoritmasını kullanmışlardır.

McMullen ve Frazier (1998), çok amaçlı montaj hatları için bir tavlama benzetimi önermişlerdir. Üç farklı amaç göz önüne alınmıştır; (1) işçi ve ekipman ihtiyacından oluşan dizayn maliyetinin en küçüklenmesi (2) SI en küçüklenmesi (3) işlem zamanlarının stokastik olmasından dolayı oluşabilecek gecikme olasılığının en küçük yapılması. Amaçlar birinci ve üçüncü amacın ağırlıklandırılarak toplanmasından oluşturulmuştur. Ağırlıklar önemli olan kritere göre kullanıcı tarafından keyfi olarak belirlenebilir.

Falkenauer ve Delchambre (1995), bütünleştirilmiş bir yaklaşım olarak, kaynak bağımlı işlem zamanlı montaj hatları için genetik algoritmayı ilk olarak önermişlerdir. Genetik algoritmanın gruplandırılması (GGA) ve B&B algoritmasına

dayanır. Metot, sabit bir istasyon sayısı için, iyi dengelenmiş ve ucuz bir montaj hattı sağlar. İşlere sırayla, en yavaş ve en hızlı kaynaklar atanarak, klasik montaj hattı problemi çözülür ve en yüksek ve en düşük istasyon sayısı belirlenir. GGA, işeri istasyonlara dağıtır ve B&B algoritması ise, her istasyon için en iyi kaynak setini seçer.

Ponnabalam (2000), deterministik işlem zamanlı montaj hatlarında, hat etkinliği ve SI optimizasyonunu amaçlayan, çok amaçlı bir genetik algoritma yaklaşımı önermişlerdir. Bu çalışmada fiziksel ve geometriksel bazı kısıtlar, işlemler arasındaki benzerlikler ve alet değişim sıklığı gibi faktörlerde göz önüne alınmıştır.

Reikek (2001), hibrit montaj hattı dizaynına çok amaçlı bir yaklaşım önermişlerdir. Çok amaçlı gruplandırılmış genetik algoritma tekniğine dayanmaktadır (MO-GGA). Amaç işeri istasyonlara atamak ve onları yapacak ekipmanları seçmektir. Farklı amaçlar için çeşitli ağırlıklandırılmalar seçerek tercih yapılmasını sağlar.

Chen ve Lu (2002), deterministik işlem zamanlı montaj hattı planlama problemine çok amaçlı bir hibrit genetik algoritma önermişlerdir. Öncelikle, bilinen çeşitli sezgisellerle mümkün çözümler oluşturulmakta, daha sonra bu çözümler genetik algoritma için, rassal populasyon havuzuna konulmaktadır. Sezgisellerle elde edilen çözümlerin seçilmesindeki amaç, arama uzayını daraltarak algoritmanın işlem zamanını kısaltmaktır. Algoritma sonuçta, amaçlar açısından birbirini domine edemeyen sonuçların bulunduğu bir pareto optimal set oluşturmaktadır.

#### **5.4. Paralel Hatlar Üzerine Yapılmış Çalışmalar**

Literatürde paralel durumun dikkate alınarak hat dengelenmesi üzerine çalışmalar fazla değildir. Buxey(1994), istasyonlarda paralelliğin nasıl kullanılabileceğini tanımlamıştır. RPW tekniğini ve Random Generation metotunu paralel istasyonları dahil ederek kullanmıştır.

Pinto (1975), işlerin paralelliğine izin veren bir dal-sınır algoritması uygulamıştır. Vrat ve Vırani (1976), Kottas ve Lau'nun metodunu gerçek problemlere uygulamışlardır. Çevrim zamanından büyük görev zamanları için paralel istasyonların kurulmasına imkan verecek şekilde Kottas Lau'nun metodunu geliştirmişlerdir. Pinto (1981), ikinci bir dal-sınır tekniği daha geliştirmiştir. İlk metota oldukça benzer bir çözüm yolu önermiştir. Sarker ve Shanthikumar(1983), işlerin zamanlarının çevrim zamanından kısa veya daha uzun olabileceği bir montaj hattında bir sezgisel geliştirmiştir. Yaklaşım iki aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada işler farklı istasyonlara en uzun işlem zamanlı iş kuralına göre atanır, daha sonra ikinci aşamada ekle ve değiştir prosedürleriyle denge kayıpları minimize edilmeye çalışılır. Çevrim zamanı, en az bir işin işlem zamanından küçükse paralellik ilk aşamada oluşturulur. Bard(1989), paralel istasyonlu montaj hattı için dinamik bir programlama yaklaşımı geliştirmiştir. Amaç maliyet minimizasyonudur. Hem işlerin hem de istasyonların paralelliğini içerir.

Gökçen(1997), hattın dengelenmesinden sonra, etkinliğini arttırmak için paralelliğe izin veren bir sezgisel geliştirmiştir. Düz hatta elde edilen denge durumunda boş zamanı fazla olan istasyonlar paralelleştirilir. Burada iki konu üzerinde karar verilmeye çalışılır. İstasyonların paralelleştirilmesine gerek olup olmadığına ve hangi istasyonların paralelleştirileceğine karar verilir. Eğer paralellik sonucu elde edilen istasyon sayısı ilkiyle aynıysa paralel durumdan vazgeçilir.

Askin ve Zhou(1997), çok modelli montaj hatlarında doğrusal olmayan bir tamsayılı programlama modeli önermişlerdir. Modelde, seri üretim hattına paralel hatlar eklenebilmektedir. Paralel hattı oluşturmak ve işleri atamak içinde bir sezgisel önerilmiştir. Çalışma işten bağımsız malzeme maliyetini ve paralelliği birlikte göz önüne almaktadır.

McMullen ve Frazier(1997), çok modelli stokastik hatlar için paralelliğe izin veren bir sezgisel geliştirmişlerdir. Sezgisel, altı farklı hat dengeleme problemine uygulanmıştır ve mevcut ve yeni görev seçimi kuralları kullanılmıştır. Sonuç

yerleşimler simule edilmiş ve performansları analiz edilmiştir. Araştırma, mevcut bir sezgiselin kompleks problemler için nasıl farklı stratejiler kullanılarak uygulanabileceğini ve bu stratejilerin farklı performans ölçütleriyle nasıl değerlendirilebileceğini göstermiştir. McMullen ve Frazier(1998), çok modelli, paralel, stokastik hatlar için çok amaçlı bir tavlama benzetimi algoritması önermişlerdir. Amaçlar; çevrim zamanının performansını arttırmak ve toplam dizayn(ekipman ve işçilik) maliyetini minimize etmektir. McMullen ve Frazier(2002), çok modelli, paralel hatlı montaj hatları için, ANT tekniğine dayanan bir metot geliştirmişlerdir.

Simaria Ve Vilarinho(2002), çok modelli, deterministik zamanlı paralel istasyonlu hatlar için iki aşamalı bir sezgisel önermişlerdir. Bir matematiksel programlama modeli geliştirilmiş ve tavlama benzetimi yaklaşımıyla, kompleks model çözülmüştür. İlk aşamada sabit çevrim zamanına göre istasyon sayısını minimize etmek amaçlanmış, ikinci aşamada ise elde edilen çözüm başlangıç çözüm kabul edilerek istasyonlar arası ve istasyonlar içi iş yükü dengesini sağlamak amacıyla problem yeniden çözülmüştür. Simaria Ve Vilarinho(2004), çok modelli problemde bir matematiksel model ve genetik algoritma tabanlı bir prosedürü Tip-2 problemi için uygulamışlardır. Problemde sabit bir işçi sayısına göre çevrim zamanı minimize edilmektedir. Paralel istasyonlara izin verilmektedir. Atama kısıtları ve iş yükü dengelemesi de dikkate alınmaktadır. İstasyonlarının paralellik sayıları kısıtlanmıştır.

Pinto(1975,1981), Bard(1989), Simiria ve Vilarinho(2002,2004) 2-dereceli paralellığe izin vermiştir. Yani bir istasyon veya bir iş yalnızca bir kere daha tekrarlanabilir. Diğer çalışmalarda 2'den daha fazla paralellığe de izin verilmiştir.

### **5.5. Tavlama Benzetimi Kullanılarak Yapılmış Çalışmalar**

Tavlama benzetimi algoritmasını montaj hattı dengelemede ilk defa Suresh ve Sahu(1994) kullanmıştır. Önerilen yaklaşım farklı yerel optimum noktalarına gitmeden genel optimuma ulaşmaya çalışır. Çalışmalarında düzgünlük

indeksi(SI,smoothness indeks) ve hattın durma olasılığını verimlilik ölçütü olarak almışlardır. Stokastik işlem zamanlarını göz önüne almışlar ancak paralel istasyonlara veya çok modelli durumlara çalışmalarında yer vermemişlerdir.

McMullen ve Frazier (1998), çok amaçlı montaj hatları için bir tavlama benzetimi önermişlerdir. Sabuncuoğlu ve Aksu (2001), U-tipi yerleşimli montaj hatları için bir tavlama benzetimi algoritması geliştirmiştir. Simaria ve Vilarinho(2001), tek modelli deterministik montaj hatları için iki aşamalı bir tavlama benzetimi geliştirmişlerdir. Daha sonra ise, Simaria Ve Vilarinho(2002), bu algoritmayı geliştirerek çok modelli hatlar için bir sezgisel önermişlerdir. Bir matematiksel programlama modeli geliştirilmiş ve tavlama benzetimi yaklaşımıyla, kompleks model çözülmüştür. İlk aşamada sabit çevrim zamanına göre istasyon sayısını minimize etmek amaçlanmış,ikinci aşamada ise elde edilen çözüm başlangıç çözüm kabul edilerek istasyonlar arası ve istasyonlar içi iş yükü dengesini sağlamak amacıyla problem yeniden çözülmüştür.

## 6. UYGULAMA : STOKASTİK İŞLEM ZAMANLI MONTAJ HATTI DENGELEME İÇİN TAVLAMA BENZETİMİ ALGORİTMALARI

Bu bölümde stokastik montaj hattı dengeleme probleminde paralel hatlara da izin veren tavlama benzetimi algoritmaları ve bunların gelişim süreci anlatılmaktadır.

*Problemin Tanımı ve Kullanılan Varsayımlar:* Montaj hattı dengeleme, belirli amaçları göz önüne alarak, tanımlı iş parçalarının (görevlerin), iş istasyonlarına atanması çalışmalarıdır. Bu amaçlar temel olarak iki çeşittir. İlki, işçi sayısını ve istasyon sayısını minimize etmeye çalışan Tip-1 problemi, ikincisi ise çevrim zamanının minimize edilmesini amaçlayan Tip-2 problemidir. Bu çalışma çevrim zamanının kullanıcı tarafından belirlendiği bir çalışma olduğundan Tip-1 problem yapısına yakındır.

Problem türünden bağımsız olarak montaj hattı dengelemede genel varsayımlar vardır;

- Bir iş ancak kendisinden önceki işler atandıktan sonra, bir istasyona atanabilir.
- Bir iş sadece bir istasyona atanabilir.
- Hattaki tüm işçiler eşit seviyede çalışma yeteneğine sahiptir.
- Bütün işler bir diğerinden bağımsızdır.

Bu çalışmada ise istasyonların paralelleştirilmesine izin verildiği; işlem zamanlarının stokastik olduğu ve sabit bir değişim katsayısıyla normal dağıldığı varsayılmıştır. Ayrıca hat üzerinde tek bir ürün üretilmektedir (tek modelli).

*Kullanılan Notasyonlar:* Algoritmalar içinde kullanılan notasyonlar aşağıda verilmiştir.

$E_i$  : i. çözümün amaç fonksiyonun değeri

SI : smoothness index

TC : toplam maliyet

TD :toplam doluluk

$t_i$  : i .işin ortalama işlem zamanı

$\sigma_i$  : i. işin tahmini standart sapması

$\sigma_i^2$  : i. işin varyansı

cv : varyasyon katsayısı

CT : çevrim zamanı

$\hat{w}_j$  : j istasyonu için işçi sayısının tamsayı durumu

$w_j$  : j istasyonu için gerekli işçi sayısı

Q : parça başına yıllık ekipman maliyeti

$m_j$  : j. istasyonda gerekli ekipman sayısı

L : işçi başına yıllık maliyet

$q_j$  : j. istasyona atanan iş sayısı

$\hat{I}k_j$  : j. istasyonun istasyon kapasitesi

$St_j$  : j. istasyonun istasyon zamanı

$D_j$  :j. istasyonun doluluk oranı

T : sıcaklık miktarı

$\Delta$  : amaç fonksiyondaki değişim

Bu çalışmada TB tekniğine dayalı olarak geliştirilen algoritmalarda performans ölçütleri olarak Eş. 6.1 ve Eş. 6.2’de verilen, paralel durumlar için kullanılan SI (smoothness index) ve maliyet değerleri dikkate alınmaktadır.

$$SI = \sqrt{\sum_{j=1}^m (\hat{w}_j - w_j)^2} \quad (6.1)$$

$$TC = \sum (\hat{w}_j * L + m_j * Q) \quad (6.2)$$

Bu çalışmada işler için sabit bir değişim katsayısı olduğu varsayılmıştır. Bir iş için tahmini standart sapma ise Eş. 6.3’de verilen formülle hesaplanmaktadır.

$$\sigma_i = cv(t_i) \quad (6.3)$$

Bir j istasyonu için gerekli olan işçi sayısı, o istasyona atanmış olan işlerin sürelerinin toplamının (istasyon zamanının) çevrim zamanına oranıyla bulunur (Eş. 6.4). Bu değer tamsayı olmadığı takdirde en yakın tamsayı değerine yuvarlanır. (Eş. 6.5)

$$w_j = [1/CT(\sum t_i)] \quad (6.4)$$

$$\hat{w}_j = 1 + \text{int}(w_j) \quad (6.5)$$

Bir j istasyonu için gerekli ekipman sayısı ise o istasyondaki işçi sayısı ile, o istasyona atanan iş sayısının çarpımına eşittir (Eş. 6.6).

$$m_j = \hat{w}_j * q_j \quad (6.6)$$

Bir j istasyonunun kapasitesi, o istasyonda çalışan işçi sayısı ile çevrim zamanının çarpımına eşittir (Eş. 6.7).

$$İk_j = \hat{w}_j * CT \quad (6.7)$$

İstasyon kapasitesini aşma olasılıkları Chebyshev eşitsizliğinden faydalanılarak hesaplanmıştır.(Eş. 6.8) Eğer istasyonda tek işçi çalışıyorsa yani paralellik yoksa istasyon kapasitesi çevrim zamanına eşit olmaktadır. Paralel istasyonlarda ise, çevrim zamanıyla istasyonun paralellik sayısının (yani o istasyonda çalışan işçi sayısının) çarpımı istasyonun kapasitesini verir [Simiria ve Vilarinho, 2004].

$$P(ST > İK) = \frac{\sum_{i=1}^N \sigma_i^2}{2(CT - \sum_{i=1}^N t_i)} \quad (6.8)$$

Bir denge durumunda istasyonların mümkün olduğunca dolu olması yani boş zamanın az olması istenir. Ancak stokastik zamanlı çalışmalarda zamanların değişkenliği istasyonların tam dolu olmasına izin vermemektedir. İstasyonların kapasitesini aşma olasılıklarına göre bir boşluk kalabilmektedir. Bir istasyonda doluluk oranı Eş. 6.9 ile hesaplanabilir.

$$D_i = ST_j / İK_j \quad (6.9)$$

Bu durumda hattın toplam doluluk oranı ise Eş. 6.10 ile hesaplanır.

$$TD = \sum ST_j / \sum İK_j \quad (6.10)$$

Yani toplam istasyon zamanının toplam kapasiteye oranı o hattın doluluk oranını vermektedir. Bu değer 1'e yaklaştıkça, sonuç daha iyidir, denilebilir.

Tavlama fonksiyon değerimiz ise Eş.6.11 ile hesaplanmaktadır.

$$TVD = \exp(-\Delta/T) \quad (6.11)$$

$$\Delta = \text{Yeni amaç fonksiyon değeri} - \text{Eski amaç fonksiyon değeri} \quad (6.12)$$

*En iyi parametre setinin seçilmesi* : Bir tavlama benzetimi algoritması geliştirirken, bazı başlangıç parametreleri tanımlamamak gerekmektedir. Bunlar Bölüm 3’te detaylı olarak anlatılmıştır. Bu bölümde, algoritmamızda en iyi sonucu bulabilmek için kullanmamız gereken parametre seti saptanmıştır. Parametrelerimiz, başlangıç sıcaklığı ( $T_0$ ) ; her sıcaklıkta denenecek iterasyon sayısı ( $k$ ), soğutma katsayısı ( $\alpha$ ) ve algoritmanın durduğu sıcaklık ( $T_s$ ) ‘tır.

Her parametre için üç farklı durum seçilmiştir (Çizelge 6.1). Daha sonra bu seçenekler için tüm kombinasyonlar ayrı ayrı, Rauf ve Tsui (1982) problemi üzerinde denenerek en iyi set seçilmiştir.

Çizelge 6.1. Tavlama benzetimi algoritması parametreleri için alternatif değerler

	$T_1$	$T_2$	$T_4$
$T_0 =$	50	100	200
	$T_{S1}$	$T_{S2}$	$T_{S4}$
$T_s =$	5	3	1
	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_4$
$\alpha =$	0.98	0.97	0.96
	$k_1$	$k_2$	$k_3$
$k =$	5	15	25

Parametrelerden en iyi sonucu veren seti belirleyebilmek amacıyla, Rauf ve Tsui(1982) test problemi için rassal bir başlangıç çözümü seçilmiş, ve problem önerilen birinci algoritma kullanılarak, parametrelerin tüm kombinasyonları ile çözülmüştür. Doğru bir karara varabilmek için her çözüm için iki deneme yapılmış ve bu denemelerin ortalaması alınmıştır. Sonuçlar Çizelge 6.2 ‘de verilmiştir.

Çizelge 6.2. Parametre setlerinin değerlendirilmesi

Parametre Setleri	Ortalama		Parametre Setleri	Ortalama		Parametre Setleri	Ortalama	
	SI	MALİYET		SI	MALİYET		SI	MALİYET
T <sub>1</sub> T <sub>S1</sub> α <sub>1</sub> k <sub>1</sub>	1,07	264,00	T <sub>2</sub> T <sub>S1</sub> α <sub>1</sub> k <sub>1</sub>	1,25	277,50	T <sub>3</sub> T <sub>S1</sub> α <sub>1</sub> k <sub>1</sub>	1,11	259,50
T <sub>1</sub> T <sub>S1</sub> α <sub>1</sub> k <sub>2</sub>	0,99	250,50	T <sub>2</sub> T <sub>S1</sub> α <sub>1</sub> k <sub>2</sub>	0,88	252,00	T <sub>3</sub> T <sub>S1</sub> α <sub>1</sub> k <sub>2</sub>	0,90	250,50
T <sub>1</sub> T <sub>S1</sub> α <sub>1</sub> k <sub>3</sub>	1,11	271,00	T <sub>2</sub> T <sub>S1</sub> α <sub>1</sub> k <sub>3</sub>	0,91	252,00	T <sub>3</sub> T <sub>S1</sub> α <sub>1</sub> k <sub>3</sub>	0,91	252,00
T <sub>1</sub> T <sub>S1</sub> α <sub>2</sub> k <sub>1</sub>	1,12	267,00	T <sub>2</sub> T <sub>S1</sub> α <sub>2</sub> k <sub>1</sub>	0,92	252,00	T <sub>3</sub> T <sub>S1</sub> α <sub>2</sub> k <sub>1</sub>	1,28	276,00
T <sub>1</sub> T <sub>S1</sub> α <sub>2</sub> k <sub>2</sub>	1,31	276,00	T <sub>2</sub> T <sub>S1</sub> α <sub>2</sub> k <sub>2</sub>	1,07	265,50	T <sub>3</sub> T <sub>S1</sub> α <sub>2</sub> k <sub>2</sub>	1,28	276,00
T <sub>1</sub> T <sub>S1</sub> α <sub>2</sub> k <sub>3</sub>	1,07	264,00	T <sub>2</sub> T <sub>S1</sub> α <sub>2</sub> k <sub>3</sub>	0,88	250,50	T <sub>3</sub> T <sub>S1</sub> α <sub>2</sub> k <sub>3</sub>	1,25	276,00
T <sub>1</sub> T <sub>S1</sub> α <sub>3</sub> k <sub>1</sub>	1,01	256,50	T <sub>2</sub> T <sub>S1</sub> α <sub>3</sub> k <sub>1</sub>	1,16	261,00	T <sub>3</sub> T <sub>S1</sub> α <sub>3</sub> k <sub>1</sub>	0,87	253,50
T <sub>1</sub> T <sub>S1</sub> α <sub>3</sub> k <sub>2</sub>	1,28	276,00	T <sub>2</sub> T <sub>S1</sub> α <sub>3</sub> k <sub>2</sub>	1,10	262,50	T <sub>3</sub> T <sub>S1</sub> α <sub>3</sub> k <sub>2</sub>	0,87	252,00
T <sub>1</sub> T <sub>S1</sub> α <sub>3</sub> k <sub>3</sub>	0,88	253,50	T <sub>2</sub> T <sub>S1</sub> α <sub>3</sub> k <sub>3</sub>	1,19	264,00	T <sub>3</sub> T <sub>S1</sub> α <sub>3</sub> k <sub>3</sub>	0,92	250,50
T <sub>1</sub> T <sub>S2</sub> α <sub>1</sub> k <sub>1</sub>	1,28	276,00	T <sub>2</sub> T <sub>S2</sub> α <sub>1</sub> k <sub>1</sub>	0,92	252,00	T <sub>3</sub> T <sub>S2</sub> α <sub>1</sub> k <sub>1</sub>	1,05	258,00
T <sub>1</sub> T <sub>S2</sub> α <sub>1</sub> k <sub>2</sub>	1,28	276,00	<b>T<sub>2</sub> T<sub>S2</sub> α<sub>1</sub> k<sub>2</sub></b>	<b>0,80</b>	<b>235,50</b>	T <sub>3</sub> T <sub>S2</sub> α <sub>1</sub> k <sub>2</sub>	0,86	255,00
T <sub>1</sub> T <sub>S2</sub> α <sub>1</sub> k <sub>3</sub>	1,19	264,00	T <sub>2</sub> T <sub>S2</sub> α <sub>1</sub> k <sub>3</sub>	1,18	267,00	T <sub>3</sub> T <sub>S2</sub> α <sub>1</sub> k <sub>3</sub>	0,91	249,00
T <sub>1</sub> T <sub>S2</sub> α <sub>2</sub> k <sub>1</sub>	0,95	247,50	T <sub>2</sub> T <sub>S2</sub> α <sub>2</sub> k <sub>1</sub>	1,08	264,00	T <sub>3</sub> T <sub>S2</sub> α <sub>2</sub> k <sub>1</sub>	0,93	260,50
T <sub>1</sub> T <sub>S2</sub> α <sub>2</sub> k <sub>2</sub>	0,94	250,50	T <sub>2</sub> T <sub>S2</sub> α <sub>2</sub> k <sub>2</sub>	0,89	250,50	T <sub>3</sub> T <sub>S2</sub> α <sub>2</sub> k <sub>2</sub>	0,91	249,00
T <sub>1</sub> T <sub>S2</sub> α <sub>2</sub> k <sub>3</sub>	1,04	265,50	T <sub>2</sub> T <sub>S2</sub> α <sub>2</sub> k <sub>3</sub>	0,88	249,00	T <sub>3</sub> T <sub>S2</sub> α <sub>2</sub> k <sub>3</sub>	0,86	246,00
T <sub>1</sub> T <sub>S2</sub> α <sub>3</sub> k <sub>1</sub>	1,08	267,00	T <sub>2</sub> T <sub>S2</sub> α <sub>3</sub> k <sub>1</sub>	0,86	243,00	T <sub>3</sub> T <sub>S2</sub> α <sub>3</sub> k <sub>1</sub>	0,89	250,50
T <sub>1</sub> T <sub>S2</sub> α <sub>3</sub> k <sub>2</sub>	1,01	258,00	T <sub>2</sub> T <sub>S2</sub> α <sub>3</sub> k <sub>2</sub>	0,88	250,50	T <sub>3</sub> T <sub>S2</sub> α <sub>3</sub> k <sub>2</sub>	0,92	252,00
T <sub>1</sub> T <sub>S2</sub> α <sub>3</sub> k <sub>3</sub>	0,94	255,00	T <sub>2</sub> T <sub>S2</sub> α <sub>3</sub> k <sub>3</sub>	0,86	250,50	T <sub>3</sub> T <sub>S2</sub> α <sub>3</sub> k <sub>3</sub>	0,83	243,00
T <sub>1</sub> T <sub>S3</sub> α <sub>1</sub> k <sub>1</sub>	1,08	264,00	T <sub>2</sub> T <sub>S3</sub> α <sub>1</sub> k <sub>1</sub>	0,88	252,00	T <sub>3</sub> T <sub>S3</sub> α <sub>1</sub> k <sub>1</sub>	0,87	250,50
T <sub>1</sub> T <sub>S3</sub> α <sub>1</sub> k <sub>2</sub>	1,09	264,00	T <sub>2</sub> T <sub>S3</sub> α <sub>1</sub> k <sub>2</sub>	0,92	252,00	T <sub>3</sub> T <sub>S3</sub> α <sub>1</sub> k <sub>2</sub>	0,89	252,00
T <sub>1</sub> T <sub>S3</sub> α <sub>1</sub> k <sub>3</sub>	1,28	276,00	T <sub>2</sub> T <sub>S3</sub> α <sub>1</sub> k <sub>3</sub>	0,99	258,00	T <sub>3</sub> T <sub>S3</sub> α <sub>1</sub> k <sub>3</sub>	0,8	235,50
T <sub>1</sub> T <sub>S3</sub> α <sub>2</sub> k <sub>1</sub>	1,03	259,50	T <sub>2</sub> T <sub>S3</sub> α <sub>2</sub> k <sub>1</sub>	0,86	250,50	T <sub>3</sub> T <sub>S3</sub> α <sub>2</sub> k <sub>1</sub>	0,92	252,00
T <sub>1</sub> T <sub>S3</sub> α <sub>2</sub> k <sub>2</sub>	1,22	271,50	T <sub>2</sub> T <sub>S3</sub> α <sub>2</sub> k <sub>2</sub>	0,88	250,50	T <sub>3</sub> T <sub>S3</sub> α <sub>2</sub> k <sub>2</sub>	0,92	252,00
T <sub>1</sub> T <sub>S3</sub> α <sub>2</sub> k <sub>3</sub>	1,25	277,50	T <sub>2</sub> T <sub>S3</sub> α <sub>2</sub> k <sub>3</sub>	1,05	265,50	T <sub>3</sub> T <sub>S3</sub> α <sub>2</sub> k <sub>3</sub>	0,89	252,00
T <sub>1</sub> T <sub>S3</sub> α <sub>3</sub> k <sub>1</sub>	1,03	258,00	T <sub>2</sub> T <sub>S3</sub> α <sub>3</sub> k <sub>1</sub>	1,07	264,00	T <sub>3</sub> T <sub>S3</sub> α <sub>3</sub> k <sub>1</sub>	1,18	267,00
T <sub>1</sub> T <sub>S3</sub> α <sub>3</sub> k <sub>2</sub>	1,28	276,00	T <sub>2</sub> T <sub>S3</sub> α <sub>3</sub> k <sub>2</sub>	0,92	252,00	T <sub>3</sub> T <sub>S3</sub> α <sub>3</sub> k <sub>2</sub>	0,93	252,00
T <sub>1</sub> T <sub>S3</sub> α <sub>3</sub> k <sub>3</sub>	1,04	265,50	T <sub>2</sub> T <sub>S3</sub> α <sub>3</sub> k <sub>3</sub>	0,92	253,50	T <sub>3</sub> T <sub>S3</sub> α <sub>3</sub> k <sub>3</sub>	0,87	250,50

Çizelge 6.2. 'de görüldüğü gibi en küçük SI ve maliyet değeri,  $T_2$   $T_{S2}$   $\alpha_1$   $k_2$  parametre setinde oluşmuştur. Yani  $T_0 = 100$  ;  $T_S = 3$  ve  $\alpha = 0.98$  ve  $k=15$  olarak alındığında, algoritmamızın performansı en iyi konumundadır.  $T_3$   $T_{S3}$   $\alpha_1$   $k_3$  parametre setinde de aynı sonucu elde etmemize rağmen,  $T_2$  sıcaklığı ve  $k_2$  adım sayısının bizim için yeterli olduğunu görmekteyiz. Bu nedenle daha yüksek değerler seçilmeyerek, algoritmanın çalışma zamanının uzaması engellenmiştir. Bundan sonra çözülen tüm problemlerde, bu parametre seti kullanılmıştır.

Çalışmada iki farklı tavlama benzetimi algoritması geliştirilmiştir. İlk algoritmada tek amaçlı diğer algoritmada ise çok amaçlı model yaklaşımı kullanılmıştır. Bu nedenle çalışma tek ve çok amaçlı denge modelleri olarak iki kısma ayrılmıştır.

### **6.1 Tek amaçlı stokastik işlem zamanlı paralel istasyonlu montaj hatları için geliştirilen tavlama benzetimi algoritması**

Çalışmanın bu bölümünde SI minimizasyonu amaç fonksiyonu olarak alınmıştır. Ancak SI değerinin yanında maliyet değerleri de her çözüm için hesaplanmış ve artış ve azalış yönü de incelenmiştir. Bu şekilde elde edilen çözümlerde, SI minimizasyonu açısından oldukça iyi olan bazı çözümlerde, istasyon sayısının çok azaldığı ve paralellik miktarının çok arttığı da gözlenmiştir. Ancak fazla sayıda paralel istasyon ek bir maliyete neden olacağından bu sonuçlarda maliyetin istenilenden yüksek çıktığı da görülmüştür. Paralel bir montaj hattında yeterli sayıda işçinin paralel istasyonda bütün işleri yapmasıyla tek istasyonlu bir hat düzenlemesi bile yapılabilir. Ancak böyle bir denge az öncede açıklandığı gibi yüksek bir maliyet getirecektir ve ayrıca montaj hatlarının özelliği olan vasıfsız işçi çalıştırma mantığına da uymayacaktır (Simiria,2001).

Bütün bunlar göz önüne alındığında bir istasyonun paralelleştirilme sayısına bir kısıt getirilmesi uygun görülmüştür. Yapılan denemelerden sonra paralellik sayısının maksimum iki olması,yani bir istasyonun en fazla bir kere daha tekrarlanmasıyla maliyet ve SI açısından güzel sonuçlar elde edilmiştir. Ancak programda bu kısıt kolayca kullanıcı tarafından belirlenebilir olarak yerleştirilmiştir. Büyük boyutlu

problemlerde 3 veya 4 gibi değerler verilerek de çözümler daha uygun çözümler elde edilip edilmediğine de bakılabilir.

*Algoritmanın adımları:* Geliştirilen algoritmanın adımları aşağıda verilmiştir.

*Adım1.* Başlangıç değerlerini ver ve mümkün bir başlangıç çözümlerini mevcut çözümler olarak ata.  $T=T_0$

*Adım2.* Mevcut çözüme eşit olasılıkla 'ekle' veya 'değiştir' prosedürlerinden birisini uygulayarak bir komşu çözümler elde et.

*Adım3.* Komşu çözümlerinin olabirirliğini kontrol et;

*Adım3.1.* Öncüllük ve ardılılık şartları sağlanmıyorsa tamir modülünü kullanarak komşu çözümlerini yeniden düzenle.

*Adım3.2.* En azından bir istasyon süresi istasyon kapasitesini aştıysa Adım 4'e git. Değilse Adım 6'ya git.

*Adım3.3.* İstasyon kapasitesini aşma olasılığı  $> 0.05$  ise Adım 4'e git. Değilse Adım 6'ya git.

*Adım4.* İstasyon kapasitesini aşan veya aşma olasılığı 0.05'ten büyük olan istasyonlarda aynı işlerden oluşan paralel bir istasyon daha oluştur.

*Adım5.* Aday çözümlerinin olabirirliğini kontrol et

*Adım6.* Uniform(0,1) dağılımdan rassal olarak bir  $x$  sayısı üret ve tavlama fonksiyonu değerini hesapla.

Eğer  $x \leq$  tavlama fonksiyonu değeri ise aday çözümlerini mevcut çözümler olarak ata, değilse değişiklik yapma.

*Adım7.* Eğer mevcut çözümlerde tek elemanlı iş istasyonları varsa bunların içindeki en yüksek zamanlı elemanı kendi istasyonu haricindeki maksimum bolluğu olan bir istasyona atayarak yeni bir aday çözümlerini oluştur. Bu işlem 'istasyon azaltma modülü' ile yapılmaktadır.

*Adım8.* Aday çözümlerinin olabirirliğini kontrol et.

*Adım8.1.* Öncüllük ve ardılılık şartları sağlanmıyorsa tamir modülünü kullanarak aday çözümlerini yeniden düzenle.

*Adım9.* Adım 6'yı uygula.

*Adım10.*  $k=k+1$ , Eğer  $k < K$  ise Adım 2'ye git, aksi halde  $T=T*f$

*Adım11.*  $T < T_s$  ise dur, değilse Adım2' ye git.

Yukarıda görülen algoritma içinde kullanılan işlemler, aşağıda ayrı ayrı açıklanmıştır.

*Ekle-değiştir işlemi:* Geliştirilen algoritmanın 2. adımında komşu bir çözüm elde etmek için 'ekle' veya 'değiştir' prosedürleri uygulanmaktadır (Alp ve diğerleri, 2001). Yüksek sıcaklıklarda ( $T > 50$ ) uygulanan ekle mekanizmasına göre rassal olarak seçilen bir iş, maksimum bolluğa sahip bir iş istasyonuna atanmaktadır. 'Değiştir' mekanizmasında ise rassal olarak seçilen iki istasyondan yine rassal olarak seçilen iki iş karşılıklı olarak değiştirilmektedir. Burada mevcut çözümden oldukça farklı komşu çözümlerin elde edilmesi amaçlanmaktadır.

*Bölgesel yoğun arama işlemi:* Tek modellenli, tek amaçlı, stokastik işlem zamanlı ve paralel hatlara izin veren montaj hattı dengeleme problemi için tavlama benzetimi ile bu çalışmada geliştirilen algorithmada, literatürdeki mevcut çalışmalardan farklı olarak, düşük sıcaklıklarda kabul olasılığı düşük olan kötü çözümler arasından en iyi olanı seçerek çeşitlendirme sağlamak amacıyla bir " *bölgesel yoğun arama*" işlemi önerilmiştir. Bu işlem düşük sıcaklıklarda ( $T < 50$ ) devreye girmektedir. Bu prosedüre göre ise seçilen bir iş için, öncülünün atandığı son istasyon ile ardılının atandığı son istasyon arasındaki bütün istasyonlar denenmekte ve amaç fonksiyonu açısından en iyi çözümü veren seçim aday çözüm olarak kabul edilmektedir.

Düşük sıcaklıklarda kötü bir çözümün kabul olasılığı düşüktür ve 'bölgesel yoğun arama' prosedürü ile, mümkün atamalar arasından en iyisi seçilerek çözümün reddedilme olasılığı azaltılmaktadır ve algoritmanın düşük sıcaklıklarda daha geniş çaplı bir arama yapması sağlanmaktadır.

*Tamir işlemi:* Öncüllük ve ardılık şartlarının sağlanmaması durumunda, aday çözümü tamir ederek mümkün bir çözüm haline getirmek amacıyla Alp ve diğerleri (2001)'de önerilen tamir işlemi kullanmıştır. Bu modüle göre şartı bozan aday iş, öncülün atandığı son istasyonla ardılının atandığı ilk istasyon arasındaki en büyük bolluğa sahip istasyona atanmaktadır.

*İstasyon Azaltma İşlemi:* İstasyon azaltma işleminde (Alp ve diğerleri,2001), tek işli istasyonlar arasında en büyük işlem zamanlı olan iş seçilerek kendi istasyonu dışındaki bir istasyona atanmaktadır. Burada da öncüllük ve ardılık koşullarının sağlanmaması durumunda tamir işlemi ile çözüm düzenlenmektedir.

*Paralellik işlemi :* Tek modelli, tek amaçlı, stokastik işlem zamanlı ve paralel hatlara izin veren montaj hattı dengeleme problemi için tavlama benzetimi ile bu çalışmada geliştirilen algoritmada, istasyon zamanı çevrim zamanını aşan veya aşma olasılığı belirli bir değerden fazla olan istasyonlara, aynı işlerden oluşan yeni bir istasyon eklenerek, bu istasyonların paralelleştirilmesine izin verilmektedir. Literatürde paralellik yaklaşımını kullanan çalışmalar, Bölüm 4.5 'te detaylı olarak açıklanmıştır.

Algoritmanın çalışma mantığının görsel olarak izlenebilmesi için, Rauf ve Tsui (1982) test probleminin, çözüm sürecinden alınan birkaç adım Çizelge 6.3' de verilmektedir.

Çizelge 6.3. Geliştirilen tek amaçlı tavlama benzetimi algoritmasının bazı ara adımları

DENEMELER	1.ist	2.ist	3.ist	4.ist	5.ist	6.ist	7.ist	8.ist
Başlangıç Ataması	1,11	7,8	2	6,12	3,4	5,9	10,13	14
6. işi istasyon 3'e ekle	1,11	7,8	2,6	12	3,4	5,9	10,13	14
12. işi istasyon 7'ye ekle	1,11	7,8	2,6	XX	3,4	5,9	10,12,13	14
11. işe 7. işi karşılıklı değiştir	1,7	11,8	2,6	XX	3,4	5,9	10,12,13	14
11. işi istasyon 7'ye ekle	1,7	8	2,6	XX	3,4	5,9	10,11,12,13	14
2. işle 7. işi karşılıklı değiştir	1,2	8	7,6	XX	3,4	5,9	10,11,12,13	14
5. işi istasyon 5'e ekle	1,2	8	7,6	XX	3,4,5	9	10,11,12,13	14
8. işi istasyon 6'ya ekle	1,2	XX	7,6	XX	3,4,5	8,9	10,11,12,13	14
5. işi istasyon 7'ye ekle	1,2	XX	7,6	XX	3,4	8,9	5,10,11,12,13	14

Bir aday çözüm için kodlama yapısı ise Çizelge 6.4 'de görülmektedir.

Çizelge 6.4. Geliştirilen tek amaçlı tavlama benzetimi algoritmasının kodlama yapısı

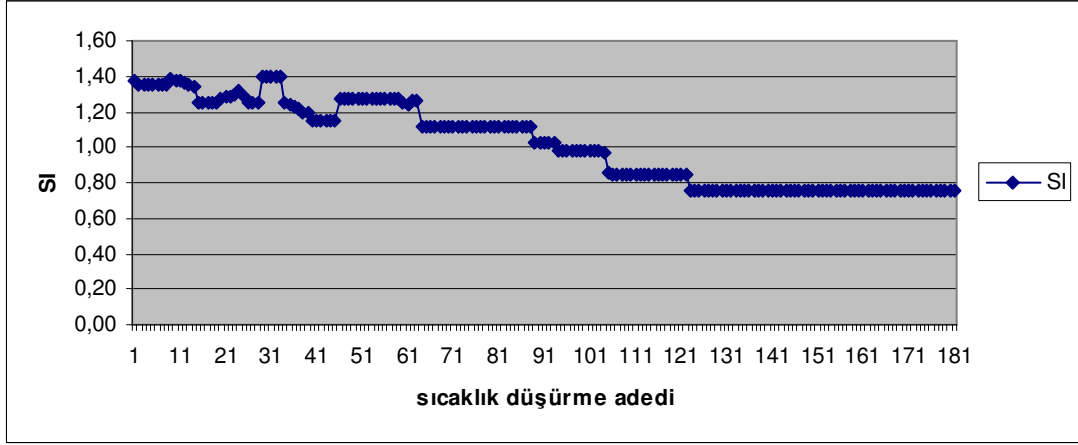
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0
3	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0
5	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Çizelge 6.4 'te sütunlar işlerin, satırlar ise istasyonların numaralarını göstermektedir.

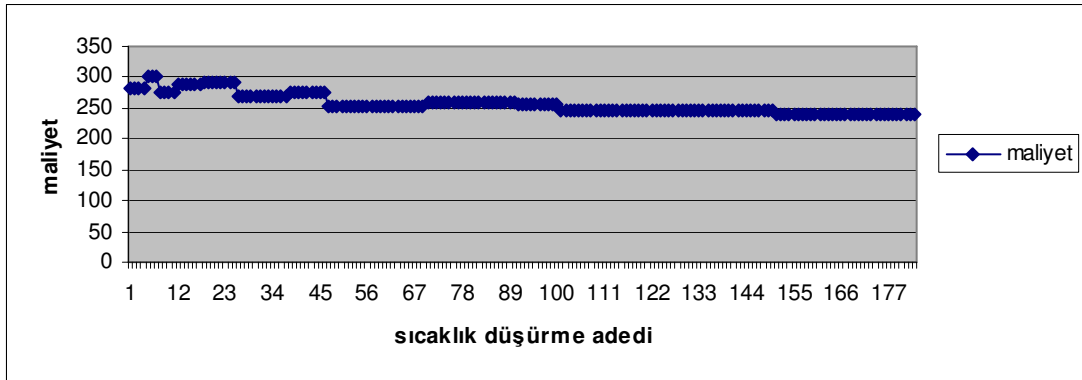
Matris tipi gösterimde, j işi eğer i. istasyona atanmış ise  $f(i,j) = 1$  ; atanmamış ise

$f(i,j) = 0$  olmaktadır.

Aynı problem için performans ölçütlerinin değişimi Şekil 6.1 ve Şekil 6.2 'den incelenebilir.



Şekil 6.1 Raouf ve Tsui(1982) problemi için performans ölçütlerinden SI yakınsaması (bir deneme için)



Şekil 6.2 Raouf ve Tsui için Performans Ölçütlerinden Maliyetin Yakınsaması (Bir deneme için)

### 6.1.1. Deneysel çalışmalar

Bu bölümde algoritmanın başlangıç çözüme olan duyarlılığını incelemek amacıyla, literatürde çözümü mevcut olan 4 test problemi (Problem 1: Raouf ve Tsui (1982) ; Problem 2 : Kottas ve Lau (1981) ; Problem 3: Liu ve Ong (2002) ; Problem 4 : Alp ve diğerleri (2001) ) dikkate alınarak bilinen bir başlangıç çözümü ve rassal seçilen

bir başlangıç çözümü ile denenerek sonuçlar istatistiksel olarak incelenmiştir. Deneyle ve elde edilen sonuçlar aşağıda anlatılmaktadır.

#### Geliştirilen algoritmanın başlangıç çözüme duyarlılığı

*Problem 1.* Raouf ve Tsui (1982) 'nin çalışmalarında inceledikleri 14 işli problem

Problem için öncelikle Raouf ve Tsui'nin(1982) geri yönlü dengeleme sonucunda buldukları çözüm, daha sonra Alp ve ark.(2001), çalışmasında bulunan çözüm ve en son olarak rassal bir çözüm, başlangıç çözümü seçilerek, bu çalışmada önerilen algoritma ile yeniden çözülmüştür. Üç farklı başlangıç çözümü içinde beşer deneme yapılmış, en iyi ve ortalama sonuçlar Çizelge 6.5 'de verilmiştir.

Çizelge 6.5. Problem 1 için farklı başlangıç çözümleri ile elde edilen sonuçlar

CT=40 ,P(İK>CT)<0.05, $\alpha= 0.98$ , T=100, Ts=3 k=15				
Başlangıç Çözüm	En İyi		Ortalama	
	SI	Maliyet	SI	Maliyet
Raouf ve Tsui (1982)	0,84	252	0,876	250,2
Alp ve ark. (2001)	0,76	240	0,838	248,4
Rassal	0,78	234	0,856	246,6

*Problem 2.* Kottas ve Lau'nun (1981) 11 işli problemi

Araştırmacıların bulduğu çözüm ve bir rassal çözüm, başlangıç çözümü olarak alınıp önerilen algoritma ile çözüldüğünde, beş deneme içinde en iyi sonuç ve ortalamalar Çizelge 6.6'de verilmiştir;

Çizelge 6.6. Problem 2 için farklı başlangıç çözümleri ile elde edilen sonuçlar

CT=23 ,P(İK>CT)<0.05, $\alpha= 0.98$ , T=100, Ts=3 k=15				
Başlangıç Çözüm	En İyi		Ortalama	
	SI	Maliyet	SI	Maliyet
Kottas ve Lau (1981)	0,60	123	0,602	123
Rassal	0,60	123	0,632	123

*Problem 3.* Mitchell 'in 21 işli problemi

Mitchell 'in 21 işli problemi için, Liu ve Ong (2002) 'un buldukları çözüm ve bir rassal çözüm, başlangıç çözümü olarak alınıp önerilen algoritma ile çözüldüğünde, beş deneme içinde en iyi sonuç ve ortalamalar Çizelge 6.7'de verilmiştir;

Çizelge 6.7. Problem 3 için farklı başlangıç çözümleri ile elde edilen sonuçlar

CT=25 ,P(İK>CT)<0.05, $\alpha= 0.98$ , T=100, Ts=3 k=15				
Başlangıç Çözüm	En İyi		Ortalama	
	SI	Maliyet	SI	Maliyet
Liu ve Ong (2002)	1,15	273	1,154	277,8
Rassal	1,15	273	1,168	289

*Problem 4.* Alp ve ark.(2001), çalışmasında yer alan 30 işli gerçek uygulama problemi. Alp ve ark.(2001), çalışmasındaki 30 işli problem, çalışmada bulunan çözümlerden biri ve rassal bir çözüm, başlangıç çözümü olarak alınıp önerilen algoritma ile çözüldüğünde, beş deneme içinde en iyi sonuç ve ortalamalar Çizelge 6.8'de verilmiştir;

Çizelge 6.8. Problem 4 için farklı başlangıç çözümleri ile elde edilen sonuçlar

CT=25 ,P(İK>CT)<0.05, $\alpha= 0.98$ , T=100, Ts=3 k=15				
Başlangıç Çözüm	En İyi		Ortalama	
	SI	Maliyet	SI	Maliyet
Alp ve ark. (2001)	0,61	271	0,712	306,6
Rassal	0,66	270	0,702	293,4

*Hipotez testleri* :İki yığınının ortalamaları arasında anlamlı bir farkın olup olmadığını test etmek için hipotez testi yapılması gerekir. Burada  $\mu_1$  ; 1. yığının ortalaması ve  $\mu_2$  ; 2. yığının ortalaması olduğuna göre hipotezimiz;

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2$$

olur. Tüm problemler için, Eş.6.13 ve Eş.6.14'te verilen formüllerle t değerleri hesaplandıktan sonra  $\alpha = 0.05$  anlamlılık düzeyinde hipotezlerimiz edildi.

$$S_d = \frac{[(S_1^2/n_1) + (S_2^2/n_2)]^2}{(S_1^2/n_1)^2/n_1 + (S_2^2/n_2)^2/n_2} \quad (6.13)$$

$$s_d t = [(x_1 - x_2) - (\mu_1 - \mu_2)] / \sqrt{(S_1^2/n_1 + S_2^2/n_2)} \quad (6.14)$$

$$s_d t_{0,05} = 1,860$$

Çizelge 6.9 Farklı başlangıç çözümlerinden elde edilen sonuçlar için ortalama ve standart sapma değerleri

	Başlangıç Çözüm	Ortalama	Std. Sapma
Problem 1	Rauf ve Tsui (1982)	0,876	0,00283
	Rassal	0,856	0,00253
Problem 2	Kottas Lau (1981)	0,6	0
	Rassal	0,632	0,060581
Problem 3	Liu ve Ong (2002)	1,154	0,005477
	Rassal	1,168	0,014832
Problem 4	Arda (2001)	0,712	0,099
	Rassal	0,702	0,06261

Çizelge 6.10 Hipotez testleri

	T tablo değeri A = 0,05	Ho hipotezi
Problem1	1,860	KABUL
Problem2	1,860	KABUL
Problem2	1,860	KABUL
Problem4	1,860	KABUL

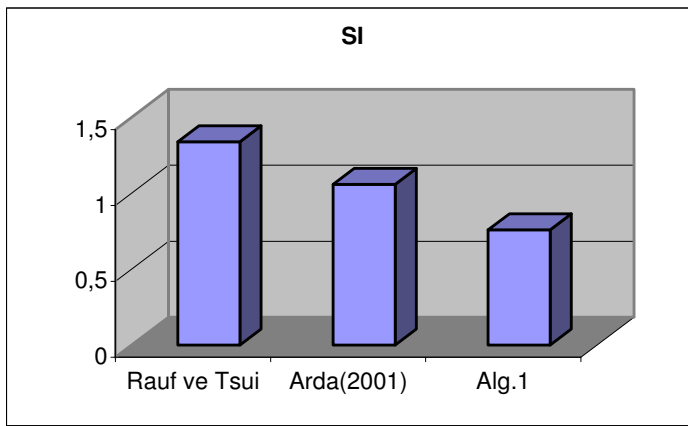
Çizelge 6.10'de görüldüğü gibi dört problem içinde  $H_0$  hipotezi kabul edilmiştir. Yani başlangıç çözümünün rassal olarak üretilmesinin veya bir sezgiselin elde ettiği çözüm olmasının, elde edilen sonuç kalitesini etkilemediğini söyleyebiliriz.

### Geliştirilen algoritmanın etkinliğinin karşılaştırılması

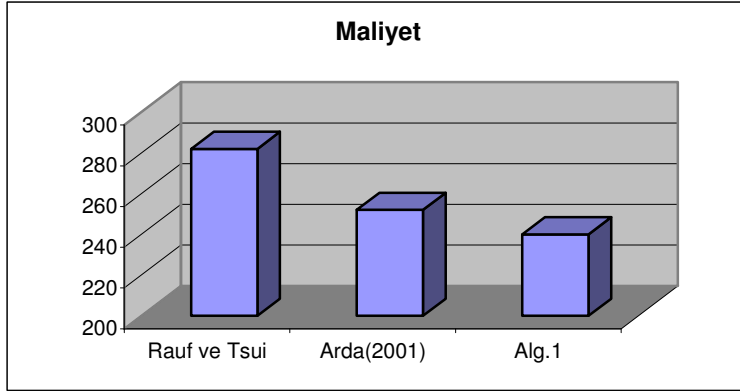
Algoritmanın performansını değerlendirmek amacıyla, Problem 1 için, Rauf ve Tsui'nin geri yönlü dengeleme metoduyla, Alp ve ark.(2001)'in tavlama benzetimi metoduyla elde ettiği sonuçlar, bu çalışmada geliştirilen algoritmadan elde edilen sonuçlar ile Çizelge 6.11 'de karşılaştırılmıştır.

Çizelge 6.11. Geliştirilen tek amaçlı tavlama benzetimi algoritmasının etkinliğinin karşılaştırılması

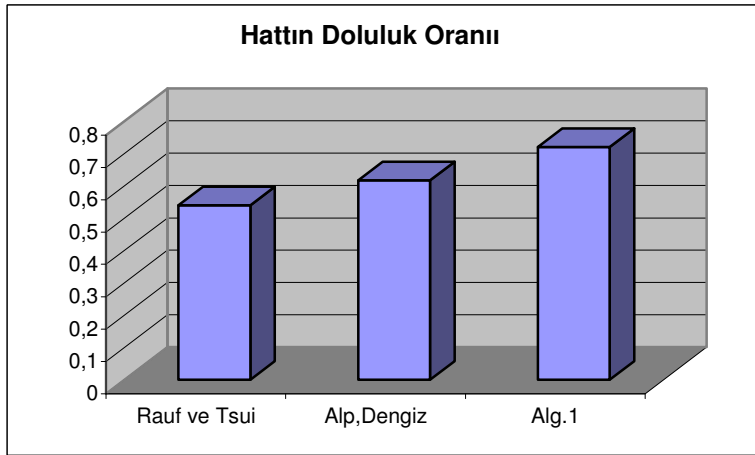
	SI	Maliyet	Doluluk Oranı	İst. Sayısı	Top. İşçi Sayısı
Rauf ve Tsui(1981)	1,34	282	0,54	8	8
Alp ve ark. (2001)	1,06	252	0,617	7	7
Önerilen Algoritma	0,76	240	0,71	5	6



Şekil 6.3 Raouf ve Tsui(1982), Alp ve ark.(2001) ve önerilen algoritmadan elde edilen SI değerleri



Şekil 6.4. Raouf ve Tsui(1982), Alp ve ark. (2001) ve önerilen algoritmadan elde edilen maliyet değerleri



Şekil 6.5. Raouf ve Tsui(1982), Alp ve ark. (2001) ve önerilen algoritmadan elde edilen dengelenmiş hatların doluluk oranları

## 6.2 Çok Amaçlı Stokastik İşlem Zamanlı Paralel Montaj Hattı için Geliştirilen Tavlama Benzetimi Algoritması

Gerçek hayatta karşılaşılan dengeleme problemlerinde, SI ( işlerin istasyonlardaki dağılım düzgünlüğü ) parametresi yanında, maliyetinde en küçük olması işletme açısından dikkat edilmesi gereken bir parametredir. Bu nedenle en azından 2. bir amacı maliyet olarak almak önemli olmaktadır.

Çalışmanın bu bölümünde iki amaç; SI ve maliyet dikkate alınarak, stokastik işlem zamanlı, tek modelli, paralellğe izin veren bir montaj hattı dengeleme problemi için tavlama benzetimi ile bir algoritma önerilmektedir. Ancak bu algoritma içerisinde üç farklı yaklaşım tanımlanmış ve algoritmanın hangi yaklaşımla daha iyi sonuçlar verdiği incelenmiştir.

Tek amaçlı bir optimizasyon probleminde , mevcut çözüme göre daha kötü bir sonuç veren bir hareketin kabul edilme olasılığı tektir ve belirsizliğe düşmeden tanımlanabilir.

Ancak çok amaçlı modellerde mevcut durumdan yeni bir duruma geçiş üç farklı biçimde sonuçlanabilir; ilk durumda elde edilen aday çözüm, tüm amaçlar açısından mevcut çözüme göre daha iyi bir çözümdür ; ikinci durumda aday çözüm bütün amaçlar açısından mevcut çözüme göre daha kötü bir çözümdür; son durumda ise aday çözüm bazı amaçlar için mevcut çözüme göre daha iyi, bazı amaçlar içinse daha kötü bir çözümdür. Bu durumda iki çözümden hiçbiri diğerini domine edemez.

Buna bağlı olarak çok amaçlı bir optimizasyon problemi birden fazla en iyi çözüme sahip olabilir. Bunlara *pareto-optimal* çözümler denir. Çok amaçlı yaklaşımda, bir pareto optimal çözüm kümesi, birbirini domine edemeyen çözümlerden oluşmuş bir çözüm kümesidir. (Suman,2003).

Çok amaçlı optimizasyon problem literatüründe çoğu metot, amaçlar kümesinin belirli bir ağırlıklandırma yöntemi kullanılarak birleştirilip tek amaç haline getirilmesine tekniğine dayanır. (Sadan,2004).

*Algoritma adımları:* Geliştirilen algoritmanın adımları aşağıda verilmiştir.

*Adım1.* Başlangıç değerlerini ver ve mümkün bir başlangıç çözümünü mevcut çözüm olarak ata. Mevcut çözümde her istasyon için gerekli işçi, ekipman sayılarını ve istasyon kapasitesini hesapla. SI ve maliyet değerlerini hesapla. Başlangıç çözümünü pareto optimal sete koy.  $T=T_0$

*Adım2.* Mevcut çözüme eşit olasılıkla 'ekle' veya 'değiştir' prosedürlerinden birisini uygulayarak bir komşu çözüm elde et.

*Adım3.* Komşu çözümün olabirliğini kontrol et;

*Adım3.1.* Öncüllük ve ardıllık şartları sağlanmıyorsa tamir modülünü kullanarak komşu çözümü yeniden düzenle.

*Adım3.2.* En azından bir istasyon süresi istasyon kapasitesini aşıyorsa Adım4'e git. Değilse Adım 5'e git.

*Adım3.3* İstasyon kapasitesini aşma olasılığı  $> 0.05$  ise Adım4'e git. Değilse Adım 5'e git.

*Adım4.* İstasyon kapasitesini aşan veya aşma olasılığı 0.05'ten büyük olan istasyonlarda aynı işlerden oluşan paralel bir istasyon daha oluştur. Yeni aday çözüm için işçi ve ekipman sayısı, istasyon kapasitesi, SI ve maliyet değerlerini hesapla.

*Adım5.* Aday çözümü mevcut çözümle karşılaştır ve mevcut çözüm olarak atanıp atanmayacağına karar ver.

*Adım6.* Aday çözüm mevcut çözüm olarak atandıysa, mevcut çözümü pareto optimal setteki tüm çözümlerle karşılaştır ve gerekliyse pareto optimal seti güncelle.

*Adım7.* Periyodik olarak pareto optimal seti kontrol et ve eğer gerekliyse pareto optimal set içinden rassal bir çözümü mevcut çözüm olarak ata ve algoritmaya buradan devam et.

*Adım 8.*  $k=k+1$ , Eğer  $k < K$  ise Adım 2'ye git, aksi halde  $T=T*f$

*Adım 9.*  $T < T_s$  ise dur, değilse Adım2' ye git.

Algoritmanın ekle ve değiştir prosedürlerinin işleyişi bölüm 6.3.1 'de geliştirilen tek amaçlı algoritmanınkiyle aynıdır. Bu algoritmada tek amaçlı algoritmadan farklı olarak, herhangi bir paralellik kısıtı konulmamıştır. Çünkü burada, birden fazla sonuç elde edilmektedir ve en uygun olanın seçimi kullanıcıya bırakılmıştır. Bu algoritma içinde kullanılan diğer işlemlerde aşağıda açıklanmıştır.

*Pareto optimal setin güncellenmesi işlemi:* Algoritmanın 6. adımında tanımlanan pareto optimal setin güncellenmesi ise řu esaslara dayanmaktadır; aday çözüm, pareto optimal setteki tüm çözümlerle karşılaştırılır. Eğer yeni çözüm, pareto optimal setteki hiçbir çözüm tarafından domine edilemiyorsa, yeni çözüm sete eklenmektedir ve bu çözüm tarafından domine edilen çözümler setten kaldırılmaktadır. Eğer yeni çözüm, setteki çözümler tarafından domine ediliyorsa ( yeni çözüm, her iki amaç içinde setteki çözümlere göre daha kötü bir çözümsen), pareto optimal sete eklenmez.

*Pareto optimal setin periyodik olarak gözden geçirilmesi işlemi:* Algoritma, başlangıç sıcaklığının dörtte biri miktarda sıcaklık azaldığında gözden geçirilmektedir. Bu noktada, son 4 iterasyonda sete yeni bir çözüm eklenmemişe, pareto optimal set içinden rassal bir çözüm seçilerek mevcut çözüm olarak atanır ve algoritmanın çözümüne buradan devam edilir. Burada amaç, iyileşme göstermeyen kötü çözümleri bu noktadan atlatıp, döngüden kurtarmaktır (*diversification*).

Algoritmanın akışının daha iyi anlaşılabilmesi için Rauf ve Tsui (1982) test probleminin çözümü sırasında algoritma bir iterasyonda rassal olarak durdurulmuş ve bu esnadaki pareto optimal set kaydedilmiştir. Daha sonra birkaç iterasyon için algoritmanın işleyişi Çizelge 6.12'de ve pareto optimal setin değişimi Çizelge 6.13'de detaylı olarak verilmiştir.

Çizelge 6.12 Çok amaçlı tavlama benzetimi algoritması içinden adım örnekleri

	DENEMELER	1.ist.	2.ist.	3.ist.	4.ist	SI	Mal
	Algoritmadan rassal seçilen atama	1,2,3,7	XX	4,6,8,9,10	5,11,12,13,14	1.02	264
1	11.no'lu işi 2. istasyona ata	1,2,3,7	11	4,6,8,9,10	5,12,13,14	1,37	291
2	11 no'lu işi 3. istasyona ata	1,2,3,7	XX	4,6,8,9,10,11	5,12,13,14	1.38	291
3	5 no'lu işle 11 no'lu işi değiştir	1,2,3,7	XX	4,5,6,8,9,10	11,12,13,14	0.97	264
4	2 no'lu işi 2. istasyona ata	1,3,7	2	4,5,6,8,9,10	11,12,13,14	1.45	291
5	5 no'lu işi 4 no'lu istasyona ata	1,3,7	2	4,6,8,9,10	5,11,12,13,14	1.48	291
6	4 no'lu işle 7 no'lu işi değiştir	1,3,4	2	7,6,8,9,10	5,11,12,13,14	0.85	252
7	10 no'lu işle 11 no'lu işi değiştir	1,3,4	2	7,6,8,9,11	5,10,12,13,14	0.85	252
8	6 no'lu işi 2. istasyona ata	1,3,4	2,6	7,8,9,11	5,10,12,13,14	1.43	285
9	11 no'lu işi 2. istasyona ata	1,3,4	2,6,11	7,8,9	5,10,12,13,14	1.47	285
10.	9 no'lu işi 4. istasyona ata	1,3,4	2,6,11	7,8	5,9,10,12,13,14	0.86	249

Çizelge 6.13 Çok amaçlı tavlama benzetimi algoritmasının pareto optimal setinin değişim adımları

	POS	
	SI	Maliyet
Algoritmanın rassal seçilen anındaki	1,06	252
	1,02	264
1. denemeden sonra	1,06	252
	1,02	264
2. denemeden sonra	1,06	252
	1,02	264
3. denemeden sonra	1,06	252
	0,97	264
4. denemeden sonra	1,06	252
	0,97	264
5. denemeden sonra	1,06	252
	0,97	264
6. denemeden sonra	0,85	252
7. denemeden sonra	0,85	252
8. denemeden sonra	0,85	252
9. denemeden sonra	0,85	252
10. denemeden sonra	0,85	252
	0,86	249

### 6.2.1. Çok amaçlı karar verme mekanizmasında kullanılan yaklaşımlar

Çok amaçlı optimizasyon probleminde amaçları doğru biçimde birleştirebilmek ve çözüm setinin nasıl oluşturulacağını belirleyebilmek önemlidir. Çünkü çok amaçlı yapının kullanılma şekli algoritmanın performansı üzerine oldukça etkilidir.

Bu bölümde çok amaçlı algoritmadaki, iki amaç için karar verme mekanizmasında kullanılan yaklaşımlar tanımlanmıştır. Bu yaklaşımlar kullanılarak, algoritma farklı problem setleri üzerinde denenmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

#### Eşit ağırlıklandırma yaklaşımı

Bu yaklaşım çok amaçlı optimizasyonlarda kullanılan ağırlıklandırma yöntemini esas almaktadır. Amaç fonksiyonumuz hem SI hem de maliyeti içerdiği için, tavlama benzetimi yapısında amaç fonksiyonundaki değişimi incelerken, bu iki değer arasındaki değişim oranları dikkate alınmıştır. Çünkü farklı birimlerdeki bu amaçları, aynı fonksiyon içinde incelerken bu farklılığı ortadan kaldırmak gerekmektedir. Değişim oranlarının hesaplanması Eş. 6.15 ve Eş. 6.16'da verilmektedir.

$$a = (\text{Yeni Maliyet} - \text{Eski Maliyet}) / \text{Eski maliyet} \quad (6.15)$$

$$b = (\text{Yeni SI} - \text{Eski SI}) / \text{Eski SI} \quad (6.16)$$

Bu durumda tavlama fonksiyonu değerimiz

$TVD = (-\Delta/T)$  iken  $\Delta$  değeri Eş. 6.17 ile hesaplanmaktadır.

$$\Delta = (a + b) / 2 \quad (6.17)$$

Burada amaçlardaki değişimlerin eşit oranlarda ağırlıklandırıldığı varsayılmıştır.

### Rassal ağırlıklandırma yaklaşımı

Eşit ağırlıklandırma yaklaşımda, amaçların değişim oranları eşit olarak fonksiyona dahil edilmişti. Ancak bu yaklaşımda, amaçların ağırlıklarının eşit olmadığı düşünülerek, ağırlıkların rassal olarak atanması önerilmiştir. Rassal olarak üretilen  $\lambda_1$  değeri, maliyet değişim oranının ağırlık katsayısıdır.  $\lambda_2$  ise, SI için ağırlık katsayısıdır ve,

$$\lambda_1 + \lambda_2 = 1 \text{ 'dir.} \quad (6.18)$$

Tavlama fonksiyonu değerimiz

TVD =  $(-\Delta/T)$  iken  $\Delta$  değeri Eş.6.19 ile hesaplanmaktadır.

$$\Delta = \lambda_1 * a + \lambda_2 * b \quad (6.19)$$

Algoritma için 20 farklı  $\lambda_1$  değeri üretilmiştir ve 6.18 eşitliği yardımı ile her  $\lambda_1$  değeri için,  $\lambda_2$  değeri de hesaplanmıştır. Algoritma, üretilen bütün  $\lambda_1$  ve  $\lambda_2$  değerleri ile, her algoritmada durma sıcaklığına kadar aynı  $\lambda$  değerlerini kullanmak kaydıyla, çözülmüştür. Her yeni değere geçildiğinde, başlangıç sıcaklığı yeniden  $T_0$  olarak alınmış ve yeni bir rassal başlangıç çözümü seçilmiştir. Ancak bir sonraki  $\lambda$  değerlerine geçildiğinde, bir önceki çözümden elde edilen pareto optimal set, yeni çözümün başlangıç pareto optimal seti olarak alınmıştır. Yani 20 farklı  $\lambda$  değeriyle çözüm sonucunda, tek bir pareto optimal seti elde edilmektedir.

### Multinomial yaklaşım

Çok amaçlı optimizasyonlarda çoğu yöntem, amaçlar kümesinin ağırlıklandırma yoluyla tek bir amaç fonksiyonuna dönüştürülmesine dayanmaktadır. Her ne kadar bu yöntem kolay uygulanabilir ve etkili olsa da, çeşitli zorluklar içermektedir. Öncelikle, amaçlara ne kadar ağırlık verileceğinin tespit edilmesi zordur. Farklı

ağırlıklar sonuçlar büyük olasılıkla değişecektir. İkinci olarak Fonseca ve Fleming (1995), ağırlıklandırma yaklaşımının konveks olmayan çözüm kümelerinde, seçimli yüzeydeki bütün noktaları tanımlayamadığını öne sürmüşlerdir ki bir çok bütünleşik problem, konveks olmayan ve sürekli olmayan çözüm kümelerine sahiptir. Son olarak, amaçlar arasında ölçeklendirme problemi ortaya çıkmaktadır. Farklı ölçüm birimlerindeki amaçların normalize edilmesi gerekmektedir [Sadan, 2004].

Literatürde, montaj hattı dengeleme problemlerinde çok amaç dikkate alınıyorsa, araştırmacıların bir çoğunun ağırlıklandırma yaklaşımını kullandığı görülmektedir. Multinomial yaklaşım, montaj hattı dengeleme problemi için, ilk defa bu çalışmada kullanılmıştır.

Bu yaklaşım, bu zorlukları ortadan kaldırma amacıyla kullanılan, her iterasyonda bir amacın aktif olmasını sağlayan, bir multinomial yaklaşımdır. Algoritmanın her adımında, rassal olarak bir amaç seçilmekte ve kabul ve ret kriterleri bu amaç için geçerli olmaktadır. Diğer amacın iyileşme veya kötüleşme durumu göz ardı edilmektedir.

### **6.2.2 Deneysel çalışmalar**

Bölüm 6.2.1 'de anlatılan yaklaşımlar, literatürdeki problem setleri üzerinde denenmiş ve elde edilen sonuçlar verilmiştir. Problem setlerine ait veriler Scholl ve Klein'in "Montaj Hattı Dengeleme" sitesinden alınmıştır. Daha önce, geliştirilen algoritmanın başlangıç çözümden etkilenmediğini belirlemiştik. Bu nedenle, problem setleri için mümkün başlangıç çözümleri rassal olarak seçilmiştir.

#### Amaç Fonksiyonunun 0-1 Değerleri Arasında Olması Durumu

Geliştirilen algoritmanın birinci ve ikinci yaklaşımında, (eşit ağırlık ve rassal ağırlık), farklı birimlerdeki amaç fonksiyon değerleri aynı fonksiyon içinde değerlendirileceği için, bir çeşit normalizasyon uygulanmıştı. Her adımda elde edilen

SI ve maliyet değerleri için, değişim miktarları yerine değişim oranları dikkate alınmıştır. Bu durumda, amaç fonksiyonumuz 0-1 arasında değerler almaya başlar ve daha önce belirlediğimiz tavlama benzetimi parametre setindeki veriler 0-1 arasında değişen bu amaç fonksiyonu değerimize uygun değildir. Çünkü yüksek sıcaklıklarda, 0-1 arasındaki çok küçük değişimlerin hepsi kabul edilecek, hiçbiri çok kötü bir çözüm gibi görünmeyecektir. Bu nedenle bu yaklaşımlarda kullanılmak üzere yeni bir parametre seti tanımlamak gereklidir. Bu seti seçebilmek için yapılan denemeler sonucunda,  $T_0 = 2$ ,  $T_s = 0,01$ ,  $\alpha = 0,99$  ve  $k = 15$  parametre seti en iyi sonucu vermiştir. Eşit ağırlık ve rassal ağırlık yaklaşımı ile çözülen problemlerde bu parametre seti kullanılmıştır. Multinomial yaklaşımda ise, her adımda sadece bir tek amaç fonksiyonu dikkate alındığı için böyle bir değişim yapmaya gerek yoktur. Multinomial yaklaşım için, önerilen tek amaçlı algoritmada bulunan parametre seti kullanılmıştır.

#### Eşit Sayıda Çözümü Karşılaştırma

Rassal ağırlıklandırma yaklaşımında, üretilen 20  $\lambda$  değeri için, algoritma tek bir pareto optimal setle 20 kere çalıştırıldığı için, bir deneme içinde elde edilen çözüm sayısı diğer yaklaşımlara göre fazla olmuştur. Bu durumda, eşit ağırlık yaklaşımı ve multinomial yaklaşımda da eş sayıda çözüm üretmeden, yaklaşımların performansını karşılaştırmak doğru olmayacaktır. Bu nedenle, rassal ağırlıklandırma yaklaşımı için elde edilen uygun parametre setindeki, her sıcaklıktaki çözüm üretme sayısı, 'k', multinomial ve eşit ağırlık yaklaşımı için arttırılmıştır ( $k=25$ ) ve sonuçta eş sayıda çözüm üretilmesi sağlanmıştır.

Literatürden seçilen beş test problemi, üç yaklaşım ile çözülmüştür. Elde edilen pareto optimal setler Çizelge 6.14-18'de verilmiştir. Bu pareto optimal set çözümlerindeki hat dengesi ise detaylı olarak Ek1'de verilmiştir (Ek1 Çizelge.1-15).

*Problem 1.* Raouf ve Tsui(1982)'nin 14 işli problemi

Çizelge.6.14. Problem 1 için üç yaklaşımdan elde edilen pareto optimal setler

CT=40 ,P(İK>CT)<0.05, $\alpha= 0.99$ , T=2, Ts=0.01 k=25		
Yöntem	POS	
	SI	Maliyet
Eşit Ağırlık	0,85	255
	0,87	252
	0,92	249
Rassal Ağırlık	0,84	252
	0,89	249
	0,90	234
Multinomial	0,76	240
	0,77	237
	0,81	234
	0,84	231

*Problem 2.* Mitchell'in 21 işli problemi

Çizelge.6.15. Problem 2 için üç yaklaşımdan elde edilen pareto optimal setler

CT=25 ,P(İK>CT)<0.05, $\alpha= 0.99$ , T=2, Ts=0.01 k=25		
Yöntem	POS	
	SI	Maliyet
Eşit Ağırlık	0,90	327
	0,91	321
	1,06	297
	1,19	294
	1,27	291
Rassal Ağırlık	0,48	297
	0,90	294
	0,93	291
	1,17	273
Multinomial	0,46	267
	0,49	264

*Problem 3. Heskia'nın 28 işli problemi*

Çizelge 6.16. Problem 3 için üç yaklaşımdan elde edilen pareto optimal setler

CT=210 ,P(İK>CT)<0.05, $\alpha= 0.99$ , T=2, Ts=0.01 k=25		
Yöntem	POS	
	SI	Maliyet
Eşit Ağırlık	1,07	342
	1,09	339
	1,13	333
	1,17	330
Rassal Ağırlık	1,07	345
	1,08	339
	1,11	336
	1,19	333
Multinomial	0,70	336
	0,71	318
	1,01	309

*Problem 4. Buxey'in 29 işli problemi*

Çizelge.6.17. Problem 4 için üç yaklaşımdan elde edilen pareto optimal setler

CT=42 ,P(İK>CT)<0.05, $\alpha= 0.99$ , T=2, Ts=0.01 k=25		
Yöntem	POS	
	SI	Maliyet
Eşit Ağırlık	1,37	519
	1,39	513
	1,58	504
Rassal Ağırlık	1,04	468
	1,05	465
	1,08	462
Multinomial	1,01	474
	1,04	468
	1,11	465

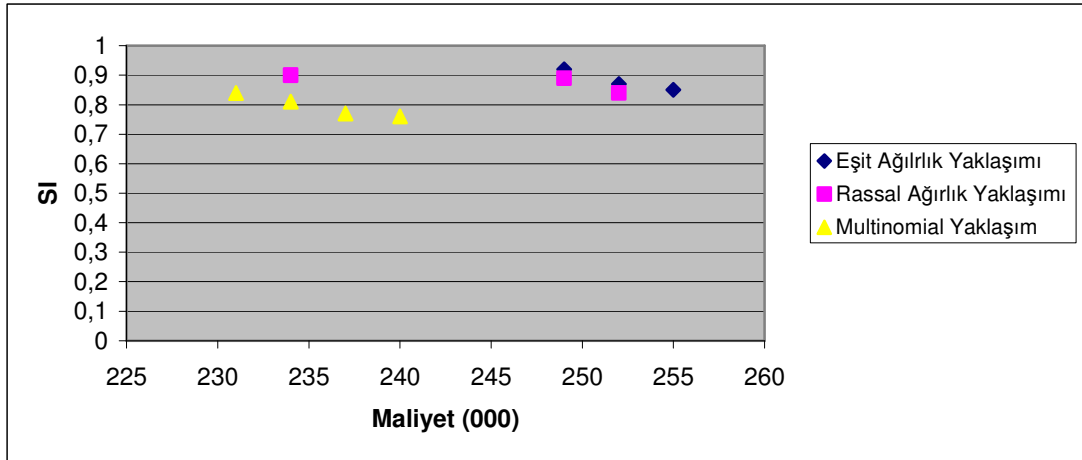
*Problem 5. Sawyer'ın 30 işli problemi*

Çizelge.6.18. Problem 5 için üç yaklaşımdan elde edilen pareto optimal setler

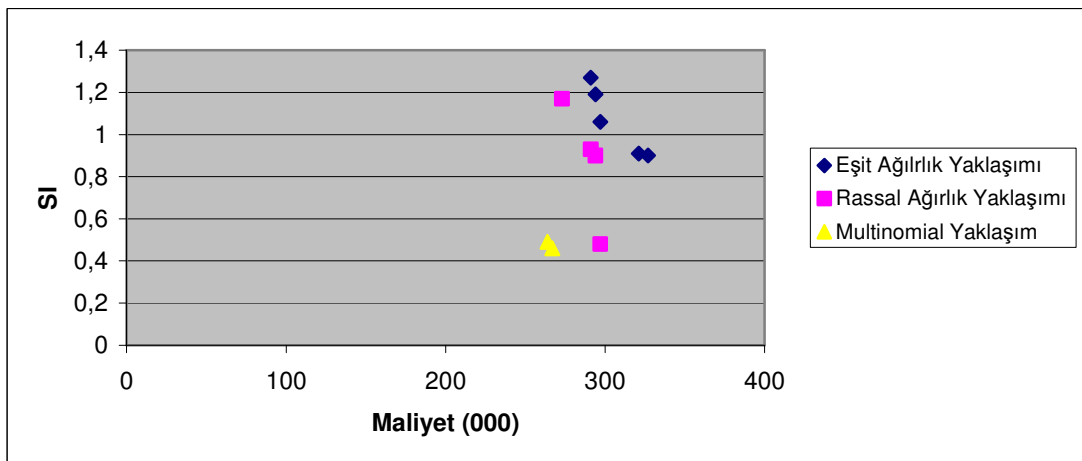
CT=41 ,P(İK>CT)<0.05, $\alpha= 0.99$ , T=2, Ts=0.01 k=25		
	POS	
	SI	Maliyet
Eşit Ağırlık	1,31	537
	1,57	522
	1,63	528
	1,80	522
Rassal Ağırlık	1,20	528
	1,22	507
	1,30	504
	1,35	495
	1,57	492
Multinomial	1,07	519
	1,22	495
	1,29	489
	1,35	468

### 6.2.3. Üç Yaklaşımın etkinliklerinin karşılaştırılması

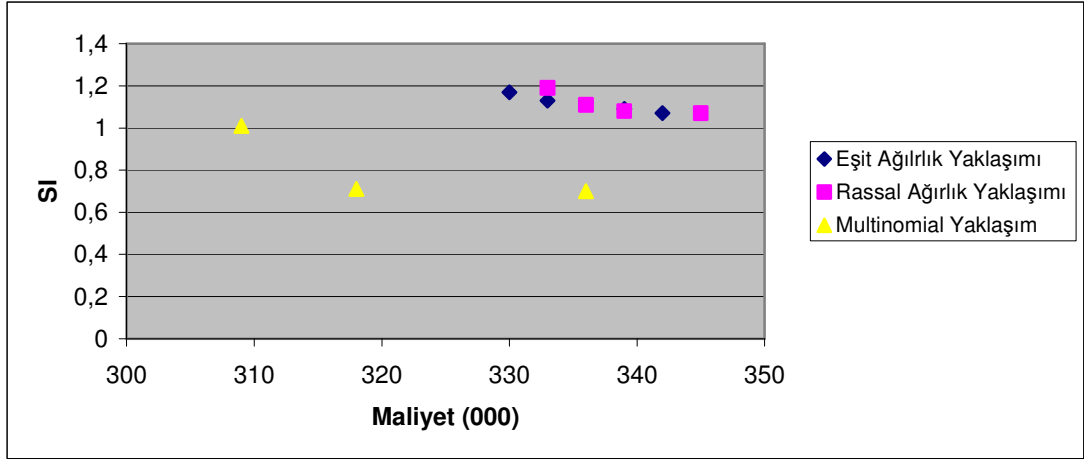
Stokastik işlem zamanlı, paralel hatlara izin veren montaj hattı dengeleme problemi için önerilen çok amaçlı tavlama benzetimi algoritmasında, üç farklı yaklaşım denendi. Bu bölümde, bu yaklaşımların etkinliklerini incelemek amacıyla, her test problemi için elde edilen pareto optimal setler şekil 6.6-10 'da karşılaştırılmıştır.



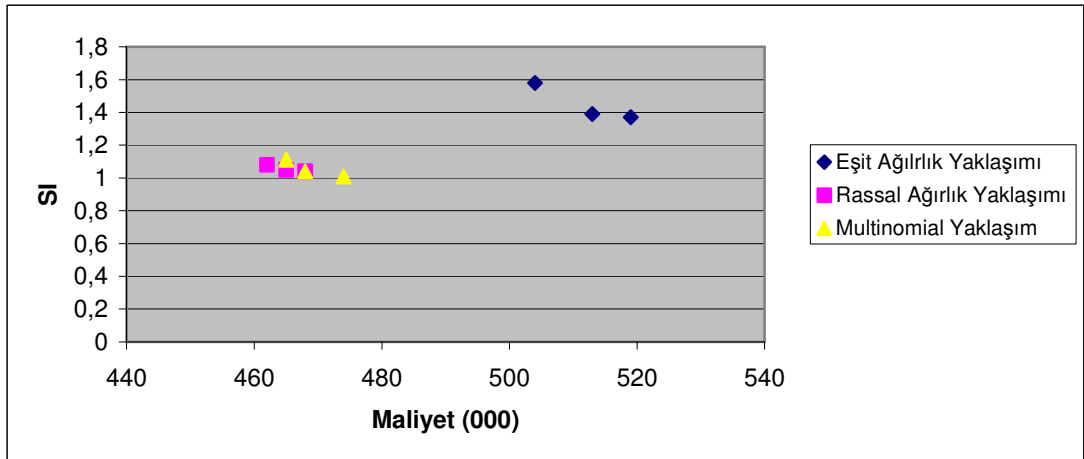
Şekil 6.6. Problem 1 için üç yaklaşımdan elde edilen pareto optimal setler



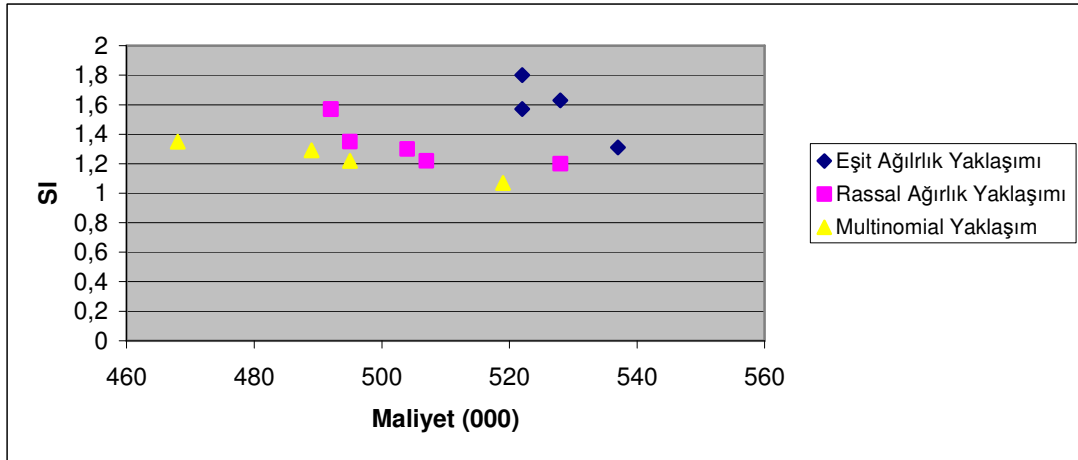
Şekil 6.7. Problem 2 için üç yaklaşımdan elde edilen pareto optimal setler



Şekil 6.8. Problem 3 için üç yaklaşımdan elde edilen pareto optimal setler



Şekil 6.9. Problem 4 için üç yaklaşımdan elde edilen pareto optimal setler



Şekil 6.10. Problem 5 için üç yaklaşımdan elde edilen pareto optimal setler

Her problem için, üç yaklaşımdan elde edilen pareto optimal setler birleştirilip, birbirini domine edemeyen çözümler kalana dek, iki amaç içinde kötü olan çözümler elendiğinde, elde edilen son pareto optimal setler Çizelge 6.19'da verilmiştir. Tablo incelendiğinde, elde edilen son pareto optimal setlerin, multinomial yaklaşımdan elde edilen pareto optimal setlerle aynı olduğu görülmektedir. Yani multinomial yaklaşımdan elde edilen pareto optimal setteki çözümleri domine edecek hiçbir çözüm, diğer yaklaşımlarda bulunamamıştır. Buradan en iyi performansın multinomial yaklaşımdan elde edildiğini söyleyebiliriz.

Çizelge 6.19. Birleştirilmiş pareto optimal setlerden elde edilen, birbirini domine edemeyen çözümler

	Problem1	Problem2	Problem3	Problem4	Problem5
SI	0.76	0.46	0.70	1.01	1.07
	0.77	0.49	0.71	1.04	1.22
	0.81		1.01	1.11	1.29
	0.84				1.35
Maliyet	240	267	336	474	519
	237	264	318	468	495
	234		309	465	489
	231				468

## 7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tezde, stokastik işlem zamanlı, tek modelli montaj hattı dengeleme problemi ele alınmıştır. Bir montaj hattı madde taşıma sistemiyle bağlanmış ardışık istasyonların bir kümesidir. Toplam işin içeriği ekonomik bölünemeyen iş elemanlarına ayrılır. Bu iş elemanları arasında teknolojik öncelik ilişkileri vardır. Aynı istasyonda işlem görecektir iş elemanları, bir işlem veya bir istasyon yükü olarak adlandırılır. Bir işlemi gerçekleştirmek için kullanılan zaman çevrim zamanı ile kısıtlandırılır. Montaj hattı dengeleme problemi teknolojik öncelik ilişkileri, çevrim zamanı kısıtı ve görevlerin bölünemezliğine bağlı olarak görevleri istasyonlara atama problemidir.

Bu çalışmada, istasyonlara işlerin atanması, işçilik materyal gibi maliyetlerin minimize edilmesi, talebin karşılanması ve belirli kısıtların sağlanabilmesi için montaj hattının en doğru biçimde tasarımı problemi ile ilgilenilmiştir.

Montaj hattı dengeleme problemi NP-zor bir problemdir. Bunun nedeni, hatta yapılacak iş elemanı ve bu iş elemanları arasındaki öncelik ilişkileri sayısına bağlı olarak alternatif çözüm uzayının üstel olarak artış göstermesidir. Çözüm uzayının üstel olarak artış göstermesi, zamanın da üstel olarak artmasına yol açmaktadır. Bu nedenlerden ötürü büyük boyutlu problemler, optimum metotlarla çözülememektedir.

Literatürde, montaj hattı dengelemesiyle ilgili yapılan çalışmalarda ya optimum metotlar ya da sezgisel metotlar kullanılmıştır. Sezgisel metotları kullanan araştırmacılar, probleme özgü olarak geliştirdikleri algoritmaları veya modern sezgisel tekniklerden, Genetik Algoritma, Tabu Arama ve Tavlama Benzetimi kullanmışlardır.

Bu çalışmada, stokastik işlem zamanlı, paralel hatlara izin veren montaj hatları için tek ve çok amaçlı iki tavlama benzetimi algoritması geliştirilmiştir.

Tavlama benzetimi, bir katının minimum enerji durumu elde edilene kadar derecesel olarak soğutulduğu fiziksel tavlama sürecini taklit eden olasılıklı bir arama yöntemidir. Tavlama Benzetimi, komşuluk aramaya dayanan bir sezgisel yöntemdir ve her iterasyonda mevcut çözümün komşuluğunu elde etmek için yine tanımlanan bir hareket mekanizması kullanılır. Soğutma planına göre belirlenen bir sıcaklık değeri, seçilen iterasyonlarda derecesel olarak soğutulur ve rassal olarak seçilen bir komşu çözümün yeni mevcut çözüm olarak kabul edilebilmesi için, tavlamanın o anki sıcaklığına ve komşu çözümün amaç fonksiyon değerine bağlı olan bir kabul fonksiyonu kullanılır. Öyle ki, sıcaklık azaldıkça düşük amaç fonksiyonlu komşu çözümlerin kabul edilme olasılığı artarken, daha yüksek sıcaklıklarda, mevcut çözüme göre amaç fonksiyon değeri açısından daha büyük olan komşu çözümler de kabul edilebilmektedir. Bu yolla, yerel bir minimum etrafında yapılan aramadan çıkılıp, daha iyi bir yerel veya belki de global bir minimum için aramaya devam etmek amaçlanır. Tavlama Benzetimi, sıcaklık değeri sıfıra yaklaştıkça optimuma yakın bir sonuca yakınsamaktadır. Bu sezgisel, bilgisayar tasarımı, görüntü işlemi (image processing), moleküler fizik ve kimya, çizelgeleme gibi farklı alanlardaki bir çok optimizasyon problemine uygulanmıştır.

Bu çalışmada geliştirilen Tavlama Benzetimi algoritmalarının her ikisinde de, tek modelli, stokastik işlem zamanlı ve paralel hatlara izin veren montaj hatları ele alınmıştır. İstasyon zamanı çevrim zamanı aşan veya, aşma olasılığı belirli bir değerden fazla olan istasyonlarda, aynı işlerden oluşan paralel bir istasyon daha oluşturularak paralellik sağlanmıştır. Algoritmalarda, düşük sıcaklıklarda, ekle işlemi yerine “bölgesel yoğun arama” işlemi önerilmiştir. Bu işlemde, rassal seçilen bir işin atanabileceği istasyonlar arasında, amaç fonksiyon değeri açısından en iyi değeri veren atamanın yapılması sağlanmıştır. Düşük sıcaklıklarda kötü çözümlerin kabul edilme olasılığı azaldığı için, bu prosedürün kullanılmasındaki amaç, düşük sıcaklıklarda daha iyi çözümler elde edilmesini sağlayarak çözümlerin reddedilme olasılığını azaltmaktır.

İki algoritmada da en iyi parametre setini belirleyebilmek amacıyla, her parametre için üç farklı değer seçilmiş ve örnek bir problem, bu parametre setinin tüm kombinasyonları ile çözülmüştür. En iyi sonucu veren parametre seti seçilmiş ve tüm test problemlerinde o set kullanılmıştır. Ancak çok amaçlı algoritma içindeki üç yaklaşımdan ilk ikisinin amaç fonksiyon değeri (0-1) arasında olduğu için, bu iki yaklaşım için yeniden parametre seti denemesi yapılmış ve bu yaklaşımlarla çözülen problemlerde bu parametre seti kullanılmıştır.

Geliştirilen ilk algoritma, tek amaçlı bir algoritmadır. Algoritmada amaç fonksiyonu SI minimizasyonudur ama her elde edilen çözüm için maliyet değeri de hesaplanmaktadır. Ancak deneme sonuçlarında, SI minimizasyonu için oldukça iyi çözüm veren sonuçlar elde edildiği halde, bu sonuçlarda maliyetin oldukça yüksek çıktığı görülmüştür. Bunu sebebi, paralel istasyonların getirdiği maliyet yüküdür. Bu nedenle SI minimizasyonu amacı altında algoritma çalıştırılırken, paralel istasyon sayısına bir kısıt getirilmesi uygun görülmüştür. Bir istasyonun en fazla bir kere daha tekrar edilebileceği, yani bir istasyonda en fazla iki işçinin çalıştırılabileceği kısıtı getirilmiştir. Bu kısıt altında problem setleri çözüldüğünde, maliyetinde kontrol altına alındığı gözlenmiştir.

Önerilen algoritmanın başlangıç çözümüne duyarlılığının test edilebilmesi için, literatürde çözümü olan dört problem seti, hem araştırmacıların bulduğu çözüm hem de rassal bir başlangıç çözüm seçilerek çözülmüş ve sonuçlar değerlendirilmiştir. Değerlendirme için iki yığınının ortalamaları arasında anlamlı bir fark olup olmadığı istatistiksel olarak araştırılmış ve sonuçta, algoritmanın çözüm kalitesinin başlangıç çözümden etkilenmediğine karar verilmiştir. Ayrıca, geliştirilen algoritma ile literatürde bulunan sonuçlardan daha iyi sonuçlara ulaşılmıştır.

Geliştirilen ikinci algoritma paralellik kısıtı içermeyen ve çok amaçlı bir algoritmadır. Bu algoritmada pareto optimal set adıyla, farklı amaçlar açısından birbirini domine edemeyen çözümlerin oluşturduğu bir set tanımlanmıştır. Böylece,

algoritmanın çözümünden elde edilen tek bir çözüm olmayıp, birbirini domine edemeyen farklı çözümlerden oluşan bir set olmaktadır.

Bu algoritma içinde de üç farklı yaklaşım tanımlanmıştır. İlk yaklaşım, “eşit ağırlıklandırma yaklaşımı” olup, iki amaç içinde eşit ağırlıkların alınmasını öngörmektedir. İkinci yaklaşım “rassal ağırlıklandırma yaklaşımı”, eşit ağırlıklandırma yaklaşımındaki her amaca da eşit önem verilmesi varsayımının doğru olmaması ihtimaliyle geliştirilmiştir. Üçüncü yaklaşım olan “multinomial yaklaşım” ise, çok amaçlı fonksiyonlarda ağırlıklandırmanın getirebileceği yanlışlıkları ortadan kaldırmak amacıyla geliştirilmiştir. Multinomial yaklaşımın mantığı, algoritmanın her adımında rassal bir amaç seçilerek, değerlendirilmenin o amaç üzerinden yapılması esasına dayanmaktadır.

Geliştirilen üç yaklaşımın etkinliği, test problemleri kullanılarak incelendiğinde multinomial yaklaşımın, pareto optimal seti üretmede çok daha etkin olduğu görülmüştür.

Multinomial yaklaşım daha önce, montaj hattı dengeleme problemlerinde kullanılmamıştır, ileriki çalışmalarda, daha farklı ve fazla sayıda amaç göz önünde bulundurularak ve diğer modern sezgiseller (genetik algoritma veya tabu arama) kullanılarak, multinomial yaklaşımın etkinliği değerlendirilebilir.

## KAYNAKLAR

1. Acar, Nesime ve Estaş, S. “Kesikli Seri Üretim Sistemlerinde Planlama ve Kontrol Çalışmaları”, *MPM Yayınları*, Ankara, 309 (1991)
2. Alabaş, Ç., “Tabu Arama ve Tavlama Benzetimi Algoritmalarıyla Bilgisayar Şebekelerinin Topolojik Optimizasyonu”, Yüksek lisans Tezi, *Gazi Üniv. Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 57-63 (1999).
3. Alp, A., Çerçioğlu, H., Tokaylı, M., Dengiz, B., “Stokastik montaj hattı dengeleme-Bir tavlama benzetimi algoritması”, *Endüstri Mühendisliği Dergisi*, 3-4: 32-51 (2001).
4. Amen M., “Heuristic methods for cost-oriented assembly line balancing:A survey”, *International Journal of Production Research*, 68 :1-14 (1998).
5. Baskak, M.,“Montaj Hattı Dengelenmesinde Çok Amaçlı Yaklaşım” , Yüksek Lisans Tezi, *İ.T.Ü. Sosyal Bilimler Enstitüsü*, 35-47 (1991).
6. Baksak, M., “Çok Modelli Montaj Hattı Dengeleme”, Doktora Tezi, *İ.T.Ü.Sosyal Bilimler Enstitüsü*, 28-43 (1998).
7. Betts, J., Mahmoud, K.I., “A method for assembly line balancing”, *Engineering Costs and Production Economics*, 18:55-64 (1989).
8. Buxey, G.M. Slack, N.D. and Wild, R., “Incompletion costs versus labour efficiency on the fixed-item moving felt flowline”, *International Journal of Production Research*, 16: 233-247 (1978).
9. Chakravarty,A.K., and Shtub, A, “A cost minimization procedure for mixed-model production lines with normally distributed task times”, *European Journal of Operational Research*, 23: 25-36 (1986).
10. Chen, R., Lu, K., Yu, S., “A hybrid genetic algorithm approach on multi-objective assembly planning problem”, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 15: 447-457 (2002).
11. D.E. Goldberg. “Genetic algorithms in search, optimization and machine learning”, *Addison-Wesley*, 87-89 (1989).
12. Dervitsiotis,K,N., “Operations Management”, *McGraw-HillBook Company*, 34-37 (1981).

13. Driscoll, J. and Abdel-Shafi, A.A.A., "A simulation approach to evaluating assembly line balancing solutions", *International Journal of Production Research*, 23: 975-985 (1985).
14. Engin, Turgay, (1996), "Montaj Hattı Dengeleme ve Otomotiv Endüstrisinde Uygulaması", Yüksek Lisans Tezi, *İ.T.Ü. Sosyal Bilimler Enstitüsü*, 46-54 (1996).
15. Ege, Yunus, "Assembly Line Balancing with Station Paralelling", Master Thesis *ODTÜ, Department of Industrial Engineering*, 28-33 (2001).
16. Erel, E., "Stokastik montaj hattı dengeleme problemi üzerinde yapılan araştırmalar", *Endüstri Mühendisliği Dergisi*, 3(13): 11-15 (1991).
17. Erel, E., "A methodology to solve single model assembly line balancing problem and its extention", Ph.D Thesis, *Blacksburg, Virginia*, 30-32 (1987).
18. Erel, E., Sabuncuoğlu İ., Aksu, A., "Balancing U-type assembly systems using simulated annealing", *International Journal of Production Research*, 39(11): 3003-3015 (2001).
19. Erkan Zorlu, "İş Tasarımı ve montaj hattı dengeleme", Yüksek Lisans Tezi, *Fen Bilimleri Enstitüsü*, 23-25 (2000).
20. Erkut, Haluk ve Baksak, Murat, "Tesis Tasarımı", *İrfan Yayıncılık*, İstanbul, 35-54 (1997).
21. Farhad, Azadivar and John (Jian), Wang, "Facility layout optimization using simulation and genetic algorithms", *International Journal of Production Research*, 38(17): 4369-4383 (2000).
22. Gerhard Plenert, "Line balancing techniques as used for just-in-time (jit) product line optimization", *Production planning and control*, 8(7): 686-693 (1997).
23. Ghosh, S., R. Gagnon, J., "A comprehensive literature review and analysis of the design, balancing and scheduling of assembly systems", *International Journal of Production Research*, 27(4): 789-810 (1989).
24. Gökçen, H., "Çok modellenli montaj hatlarında model parti sıralarının belirlenmesi: Dal ve sınır yaklaşımı", *Gazi Ünv. Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 10 (1): 34-45 (1997).
25. Gökçen, H. ve Erel, E. "A goal programming approach to mixed-model assembly line balancing", *International Journal of Production Economics*, 48: 177-185 (1997).

26. Gökçen, H. ve Erel, E. “Karışık ürünli montaj hattı dengeleme problemleri için bir sezgisel yöntem”, *Verimlilik Dergisi*, 23-34 (1997).
27. Gökçen, H. ve Baykoç, Ö.F., “ A new line remedial policy for the paced lines with stochastic task times”, *International Journal of Production Economics*, 58(2): 191-197 (1999).
28. Gökçen,H., Ağpak, K., Saray, N., Özel, S., “Stokastik görev zamanlı tek modellenli U-tipi montaj hattı dengeleme problemleri için bir sezgisel”, Gazi Üniv. *Müh.-Mim. Fak. Dergisi*, 14: 115-124 (2002).
29. Ignall, E.J., “A review of assembly line balancing” *Journal of Industrial Engineering*, 16(4): 89-94 (1965)
30. Khan,A. and Day,J. “A knowledge-based design methodology for manufacturing assembly lines” *Computers and Industrial Engineering*,41: 441-467 (2001).
31. Kobu, Bülent, “Üretim Yönetimi”, *Avciol Yayıncılık*, İstanbul, 76-87 (1999).
32. Kottas J.F.and Lau, H.S. “A cost oriented approach of stochastic line balancing”, *AIIE Transactions* , 5:164-171 (1973).
33. Kottas J.F.and Lau, H.S., “A total operating cost model for paced lines with stochastic task times”, *AIIE Transactions* ,8:234-240 (1976).
34. Kottas J.F.and Lau, H.S., “A stochastic line balancing procedure”, *International Journal of Production Research* ,19:177-193 (1981).
35. Leu ,L.A. Matheson,and L.P. Rees, “Assembly line balancing using genetic algorithms with heuristic-generated initial populations and multiple evaluation criteria”, *Decision Sciences*, 581-606 (1995)
36. Liu, S.B., Ong, H.L., Huang, H.C., “A bidirectional heuristic for stochastic assembly line balancing Type II problem”, *Int. J. Adv. Manuf. Technology*, 189-210 (2004).
37. Mansoor,E.M, and Ben-Tvuai,S. “Optimizing balanced assembly lines”, *Journal of Industrial Engineering*, 17:126-131 (1966).
38. McMullen,P.R., Frazier,G.V., “Using simulated annealing to solve a multiobjective assembly line balancing problem with parallel workstations”, *International Journal of Production Research*, 36: 2717-2741 (1998).

39. McMullen, P.R., Tarasewich, P., "Using ant techniques to solve the assembly line balancing problem", *IIE Transactions*, 35:605-617 (2003).
40. Moberly L.E. and Wyman F.P. "An application of simulation to the comparison of assembly line configurations", *Decision Sciences*, 4:505-516 (1973).
41. Moodie, C.L., and H.H. Young, "A heuristic method of assembly line balancing for assumptions of constant or variable work element times", *The Journal of Industrial Engineering*, 16(1): 23-29 (1965).
42. Ponnambalam, S., Aravindan, G., "A multi-objective genetic algorithm for solving assembly line balancing problem", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 16: 341-352 (2000).
43. Rajmandu, R., Talbot, B., "Improving the equality of workload assignments in assembly line balancing", *International Journal of Production Research*, 29: 619-633 (1991).
44. Raouf, A. And Tsui. C.L., "A new method for assembly line balancing having stochastic work elements", *Computers and Industrial Engineering*, 6: 131-148 (1982).
45. Reed, Rudbell, "Fabrika Yerinin Seçimi Yerleşme Düzeni", İstanbul: Çev. *MPM Yayınları*, 67-81 (1967).
46. Reeve, N.R. and Thomas, W.H., "Balancing stochastic assembly lines", *AIIE Transactions*, 5:223-229 (1973).
47. Reikek, B., "A multiple objective grouping genetic algorithm for assembly line balancing", *Journal of Intelligent Manufacturing*, 12: 467-485 (2001).
48. Rubinovitz, J., Levitin, G., "Genetic algorithm for assembly line balancing", *International Journal of Production Research*, 41: 343-354 (1995).
49. Sadan, Smith, A., Norman, B., "Multi-objective tabu search using a multinomial probability mass function", *European Journal of Operational Research*, 169: 918-931 (2006).
50. Sarin, S.C. and Erel, E. "Development of cost model for the single model stochastic assembly line balancing problem", *International Journal of Production Research*, 28:1305-1316 (1990).
51. Sarin, S.C. and Erel, E. "A methodology for solving single model stochastic assembly line balancing problem", *Omega, Int. J. Mgmt. Sci.*, 27: 525-535 (1999).

52. Sculli, D., "Short term adjustment to production lines", *Computers and Industrial Engineering*, 8:53-63 (1984).
53. Shin. D., "An efficient heuristic for solving stochastic assembly line balancing problems", *Computers and Industrial Engineering*, 18:285-295 (1990).
54. Shtub. A., "The effect of incomplection cost on the line balancing with multiple manning of work stations", *International Journal of Production Research*, 22:235-245 (1984).
55. Silverman, F.N. and Carter. J.C., "A cost-based methodology for stochastic line balancing with the stoppages", *International Journal of Production Research*, 4: 212-235 (1986).
56. Suman B., "Simulated annealing-based multiobjective algorithms and their applicaiton for system reliabilitiy", *Eng. Operation*, 35(4): 391-416 (2003).
57. Suresh. G. And Sahu. S. "Stochastic assembly line balancing using simulated annealing", *International Journal of Production Research*, 32: 1801-1810 (1994).
58. Suresh. G. And Sahu. S. "A genetic algorithm for assembly line balancing", *Production Planning Control*, 7: 38-46 (1996).
59. Vilarinho, P. and Simaria, A. "A two-stage heuristic method for balancing mixed-model assembly lines", *International Journal of Production Research*, 40(6): 1405-1420 (2002).
60. Vilarinho, P. and Simaria, A. "A genetic algorithm based approach to the mixed-model assembly line balancing problem of type II", *Computers and Industrial Engineering*, 1-17 (2004).
61. Vrat.P. and Virani.A., "A cost model for optimal mix of balanced stochastic assembly line and the modular assembly system for a customer oriented production system", *International Journal of Production Research*, 14: 445-463 (1976).

## **EKLER**

## EK-1 Deneysel sonuçlar

## Problem 1 : Raouf ve Tsui (1982)'nin 14 işli problemi

Çizelge 1.1 .CT=40 ,P(İK>CT)<0.05,  $\alpha= 0.99$  , T=2, Ts=0.01 k=25

Eşit Ağırlıklandırma Yaklaşımı	SI	MALİYET	İSTASYONLARA ATANAN İŞLER	İSTASYONLARDA ÇALIŞAN İŞÇİ SAYILARI
Rassal Başlangıç Çzm	1.38	282	(1,7,4); (2); (3,5); (6,8); (9,11); (10,12); (13); (14)	1-1-1-1-1-1-1
Elde Edilen Pareto Optimal Set	0.85	255	(1,2,3,4,7); (11); (4,8); (5,9,10,12,13,14)	2-1-1-2
	0.87	252	(1,3); (2,4); (7,8,11,12); (5,6,9,10,13,14)	1-1-2-2
	0.92	249	(1,4,7); (3,11); (2,6,8,12); (5,9,10,13,14)	1-1-2-2

Çizelge 1.2.CT=40 ,P(İK>CT)<0.05,  $\alpha= 0.99$  , T=2, Ts=0.01 k=15

Rassal Ağırlıklandırma Yaklaşımı	SI	MALİYET	İSTASYONLARA ATANAN İŞLER	İSTASYONLARDA ÇALIŞAN İŞÇİ SAYILARI
Rassal Başlangıç Çzm	1.38	282	(1,7,4); (2); (3,5); (6,8); (9,11); (10,12); (13); (14)	1-1-1-1-1-1-1
Elde Edilen Pareto Optimal Set	0.84	252	(1,7); (2,3,6,8); (9,11); (4,5,10,12,13,14)	1-2-1-2
	0.89	249	(1,3); (2,6,11); (4,7,8); (5,9,10,13,14)	1-2-1-2
	0.90	234	(1,2,4,11); (6,7,8); (3,9); (10,12); (5,13,14)	2-1-1-1-1

Çizelge 1.3.CT=40 ,P(İK>CT)<0.05,  $\alpha= 0.99$  , T=2, Ts=0.01 k=25

Multinomial Yaklaşım	SI	MALİYET	İSTASYONLARA ATANAN İŞLER	İSTASYONLARDA ÇALIŞAN İŞÇİ SAYILARI
Rassal Başlangıç Çzm	1.38	282	(1,7,4); (2); (3,5); (6,8); (9,11); (10,12); (13); (14)	1-1-1-1-1-1-1
Elde Edilen Pareto Optimal Set	0.76	240	(1,11); (2); (7,8); (3,4,5); (9,10,12,13,14)	1-1-1-1-2
	0.77	237	(1,2,3,4,7); (6,8); (9,11); (10,12); (13,14)	2-1-1-1-1
	0.81	234	(1,2,7,11); (6,8); (3,9); (4,10,12); (5,13,14)	2-1-1-1-1
	0.84	231	(1,3,4); (2,6,7); (8,11); (9,10,12); (5,13,14)	1-2-1-1-1

## EK-1 (Devam) Deneysel sonuçlar

## Problem 2. Mitchell'in 21 işli problemi

Çizelge 1.4 .CT=25 ,P(İK>CT)<0.05,  $\alpha= 0.99$  , T=2, Ts=0.01 k=25

Eşit Ağırlıklandırma Yaklaşımı	SI	MALİYET	İSTASYONLARA ATANAN İŞLER	İSTASYONLARDAKİ ÇALIŞAN İŞÇİ SAYILARI
Rassal Başlangıç Çzm	1.42	303	(1,2,3); (4,5); (6,7); (8,9,10,11); (13,21); (14,15,16,17,18,19,20)	1-1-1-1-1-1-1
Elde Edilen Pareto Optimal Set	0.90	327	(1,3); (5,6); (2,8,9); (4,7,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21)	1-1-1-3
	0.91	321	(1,3); (5,6); (2,8,9,10); (4,7,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21)	1-1-1-3
	1.06	297	(1); (3); (2,4,5,6,7,8,14); (9,10,11,12,13,15,16,17,18,19,20,21)	1-1-2-2
	1.19	294	(1,3); (2,4,5); (6,7,14); (8,9,10,11,12); (21); (13,15,16,17,18,19,20)	1-1-1-1-1-2
	1.27	291	(1,3); (4,5); (6,7); (2,8,9,10,11,12,13); (15,16); (14,17,18,19,20,21)	1-1-1-1-1-2

Çizelge 1.5.CT=25 ,P(İK>CT)<0.05,  $\alpha= 0.99$  , T=2, Ts=0.01 k=15

Rassal Ağırlıklandırma Yaklaşımı	SI	MALİYET	İSTASYONLARA ATANAN İŞLER	İSTASYONLARDAKİ ÇALIŞAN İŞÇİ SAYILARI
Rassal Başlangıç Çzm	1.42	303	(1,2,3); (4,5); (6,7); (8,9,10,11); (13,21); (14,15,16,17,18,19,20)	1-1-1-1-1-1-1
Elde Edilen Pareto Optimal Set	0.48	297	(1,2,3); (4,6,8,9); (5,7,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21)	1-1-3
	0.90	294	(1,3); (4,5,6); (2,7,8,9,11,12,13,14); (10,15,16,17,18,19,20,21)	1-1-2-2
	0.93	291	(1,3); (2,4,5,6,7,8,9,10,14); (11,12,13,15); (16,18); (17); (19,20,21)	1-2-1-1-1-1
	1.17	273	(1,2,3); (4,5); (6,7,14); (8,9,11); (10,12,13,15); (16,18); (17,19,20,21)	1-1-1-1-1-1-1

## EK-1 (Devam) Deneysel sonuçlar

Çizelge 1.6.  $CT=25$  ,  $P(\bar{K}>CT)<0.05$  ,  $\alpha= 0.99$  ,  $T=2$  ,  $T_s=0.01$   $k=25$ 

Multinomial Yaklaşım	SI	MALİYET	İSTASYONLARA ATANAN İŞLER	İSTASYONLARDA ÇALIŞAN İŞÇİ SAYILARI
Rassal Başlangıç Çzm	1.42	303	(1,2,3); (4,5); (6,7); (8,9,10,11); (13,21); (14,15,16,17,18,19,20)	1-1-1-1-1-1-1-1
Elde Edilen Pareto Optimal Set	0.46 0.49	267 264	(1,3,4); (2,5,6,7,8,9,10,11,14); (12,13,15,16,17,18,19,20,21) (1,2,3,4); (5,6,7,8,9,10,11,14); (12,13,15,16,17,18,19,20,21)	1-2-2 1-2-2

## Problem 3. Heskia'nın 28 işli problemi

Çizelge 1.7.  $CT=210$  ,  $P(\bar{K}>CT)<0.05$  ,  $\alpha= 0.99$  ,  $T=2$  ,  $T_s=0.01$   $k=25$ 

Eşit Ağırlıklandırma Yaklaşımı	SI	MALİYET	İSTASYONLARA ATANAN İŞLER	İST. ÇALIŞAN İŞÇİ SAYILARI
Rassal Başlangıç Çzm	1.45	354	(1,3,4,5,8); (2,6); (17); (19,21,22,23); (24,25,26,27); (9,10,11,12,7,18); (15,13); (14,16,20); (28)	1-1-1-1-1-1-1-1-1
Elde Edilen Pareto Optimal Set	1.07 1.09 1.13 1.17	342 339 333 330	(1,4,19); (2,5,8,23,24); (6,9,10,21); (3,7,11,12,13,14,18,20,22); (15,16,17,25,26,27,28) (1,22,23,26); (2,3,6,19,21,24,25); (4,7,8,9,10,11,18); (12,13); (5,14,15,16,17,20,27,28) (1,19); (2,4,5,8,12,23,24,26); (3,9,10,11,22); (6,7,13,15,18,20,21); (14,16,17,25,27,28) (1,3,19); (2,4,5,24,26,27); (6,8,9,10,11,21,22); (12,13,14,20); (7,15,16,17,18,23,25,28)	1-1-1-2-2 1-2-1-1-2 1-1-1-2-2 1-1-1-1-1-2

## EK-1 (Devam) Deneysel sonuçlar

Çizelge 1.8.  $CT=210$  ,  $P(\hat{IK}>CT)<0.05$  ,  $\alpha= 0.99$  ,  $T=2$  ,  $T_s=0.01$   $k=15$ 

Rassal Ağırlıklandırma Yaklaşım	SI	MALİYET	İSTASYONLARA ATANAN İŞLER	İST. ÇALIŞAN İŞÇİ SAYILARI
Rassal Başlangıç Çzm	1.45	354	(1,3,4,5,8); (2,6); (17); (19,21,22,23); (24,25,26,27); (9,10,11,12,7,18); (15,13); (14,16,20); (28)	1-1-1-1-1-1-1-1-1
Elde Edilen Pareto Optimal Set	1.07	345	(1,3,5); (4,6,8,9,23); (2,10,22); (12,13,14,19,20,21,24,26); (7,11,15,16,17,18,25,27,28)	1-1-2-2
	1.08	339	(1,3,4,8,22); (2,5,23,24,26); (9,10,14); (6,7,11,12,13,15,19,20,21); (16,17,18,25,27,28)	1-1-1-2-2
	1.11	336	(1,3,23,26); (2,6,8,9); (4,10,12,13,19,21,24); (5,11,14,15,20,22); (7,16,17,18,25,27,28)	1-1-2-1-2
	1.19	333	(1,8,21,24); (2,6,9,10,22,26); (3,4,5,7,12); (11,13,14,15,16,19,23,25); (17,18,20,27,28)	1-1-1-2-2

Çizelge 1.9.  $CT=210$  ,  $P(\hat{IK}>CT)<0.05$  ,  $\alpha= 0.99$  ,  $T=2$  ,  $T_s=0.01$   $k=25$ 

Multinomial Yaklaşım	SI	MALİYET	İSTASYONLARA ATANAN İŞLER	İST. ÇALIŞAN İŞÇİ SAYILARI
Rassal Başlangıç Çzm	1.45	354	(1,3,4,5,8); (2,6); (17); (19,21,22,23); (24,25,26,27); (9,10,11,12,7,18); (15,13); (14,16,20); (28)	1-1-1-1-1-1-1-1-1
Elde Edilen Pareto Optimal Set	0.70	336	(1,2,8,21); (5,6,9,19,24); (3,4,10,11,12,22,26); (7,13,14,15,16,17,18,20,23,25,27,28)	1-1-1-3
	0.71	318	(1,2,5,24); (6,7,8,9,19,26); (3,4,10,11,12,13,21,22,25,27); (14,15,16,17,18,20,23,28)	1-1-2-2
	1.01	309	(1,3,5,8,21); (2,6,19,24); (22,25,26,27); (4,7,9,10,11,12,18,23); (14,20); (13,15,16,17,28)	1-1-1-1-1-2

## EK-1 (Devam) Deneysel sonuçlar

## Problem 4. Buxey'in 29 işli problemi

Çizelge 1.10. CT=42 ,P(İK>CT)<0.05,  $\alpha= 0.99$  , T=2, Ts=0.01 k=25

Eşit Ağırlıklandırma Yaklaşımı	SI	MALİYET	İSTASYONLARA ATANAN İŞLER	İST. ÇALIŞAN İŞÇİ SAYILARI
Rassal Başlangıç Çzm	2,31	573	(1,3); (2,6); (4,5); (7,25); (8,11); (9,12); (10,13); (14,15); (16,17); (18,20); (19,21); (22,26); (23); (27,28); (24,29)	1-1-1-1-1-1-1-1 -1-1-1-1-1-1-1-1
Elde Edilen Pareto Optimal Set	1,37	519	(1,2,6,25); (3,4,7); (5,8,11,13,17,9); (10,12,15,19); (14,16,18); (20,21,22,23,24,26,27,28,29)	2-1-2-2-1-3
	1,39	513	(1,2,6,7,25); (3,4,9); (5,8,11,13); (10,12,15); (14,16,17,18,19); (20,21,22,23,24,26,27,28,29)	2-1-2-1-2-3
	1,58	504	(1,3,7); (4,5); (9,10,12); (14,15); (2,6,8,11,13,16,26); (19,21); (18,25); (17,20,22,23,24,27,28,29)	1-1-1-1-2-1-1-2

Çizelge 1.11. CT=42 ,P(İK>CT)<0.05,  $\alpha= 0.99$  , T=2, Ts=0.01 k=15

Rassal Ağırlıklandırma Yaklaşımı	SI	MALİYET	İSTASYONLARA ATANAN İŞLER	İST. ÇALIŞAN İŞÇİ SAYILARI
Rassal Başlangıç Çzm	2,31	573	(1,3); (2,6); (4,5); (7,25); (8,11); (9,12); (10,13); (14,15); (16,17); (18,20); (19,21); (22,26); (23); (27,28); (24,29)	1-1-1-1-1-1-1-1-1 1-1-1-1-1-1-1-1
Elde Edilen Pareto Optimal Set	1,04	468	(1,2,6,3); (4,7,25); (5,8,11,13,17); (9,10,12,15); (14,16,18,26); (19,20,21,22,23,24,27,28,29)	2-1-2-1-1-3
	1,05	465	(1,2,6,7,25); (3,4,26); (5,8,11,13,17); (9,10,12,15,19); (14,16,27);	2-1-2-1-1-3
	1,08	462	(18,20,21,22,23,24,28,29) (1,2,6,7,25); (3,4,26,27); (5,8,11,13); (9,10,12,15,19); (14,16,18); (17,20,21,22,23,24,28,29)	2-1-2-1-1-3





## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : ÇAKIR, Burçin  
 Uyruğu : T.C.  
 Doğum tarihi ve yeri : 20.01.1981 Ankara  
 Medeni hali : Bekar  
 Telefon : 0 (312) 266 20 80  
 e-mail : bcakir@baskent.edu.tr

### Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Lisans	Gazi Üniversitesi/ Endüstri Mühendisliği Bölümü	2002
Lise	Samsun Anadolu Lisesi	1998

### İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2006-Bugün	Başkent Üniversitesi	Burslu Araştırma Görevlisi

### Yabancı Dil

İngilizce

### Hobiler

Bilgisayar teknolojileri, Yüzme