



**MALİYET TABANLI STOKASTİK MONTAJ HATTI Dengeleme
PROBLEMİ İÇİN MODELLEME VE ÇÖZÜM YAKLAŞIMLARI**

AHAD FOROUGHI

**DOKTORA TEZİ
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

TEMMUZ 201

Ahad FOROUGHİ tarafından hazırlanan “Maliyet Tabanlı Stokastik Montaj Hattı Dengeleme Problemi İçin Modelleme ve Çözüm Yaklaşımları” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalında DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof.Dr. Hadi GÖKÇEN

Endüstri Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Başkan: Prof.Dr. Ömer Faruk BAYKOÇ

Endüstri Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Üye : Doç.Dr. Yakup KARA

Endüstri Mühendisliği, Selçuk Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Üye : Doç.Dr. Selçuk Kürşat İŞLEYEN

Endüstri Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Üye : Doç.Dr. Ahmet Kürşad TÜRKER

Endüstri Mühendisliği, Kırıkkale Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Tez Savunma Tarihi: 22/07/2014

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Doktora Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof.Dr. Şeref SAĞIROĞLU

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Ahad FOROUGHI

08.07.2014

MALİYET TABANLI STOKASTİK MONTAJ HATTI Dengeleme Problemi İçin Modelleme ve Çözüm Yaklaşımları

(Doktora Tezi)

Ahad FOROUGHİ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Temmuz 2014

ÖZET

İşletmelerde ekonomik çalışma gereğinin büyük önem taşıdığı günümüzde, kaynakların etkin olarak kullanılıp değerlendirilmesi oldukça önemli bir konudur. Kaynakların verimli kullanılması sonucunda işletmelerin maliyetleri önemli ölçüde azalacak, kapasite kullanım oranları ve toplam kârlarında artışlar sağlanabilecektir. Endüstrileşme sürecinde yüksek hacimde, hızlı ve düşük maliyetli üretim yapabilmek için atölye tarzı yerleşimden montaj hattı (MH) yerleşimine geçmek zorunluluk hale gelmiştir. Ayrıca, çoğu endüstriyel ürünlerin toplam maliyetinin büyük bir oranı, montaj maliyetinden oluşmaktadır. Bu nedenle montaj hatlarında maliyetlerin azaltılması ve iş gücü gibi kaynaklardan verimli şekilde faydalanmak, toplam üretim maliyetini önemli ölçüde etkilemektedir. Maliyet tabanlı montaj hattı dengeleme problemi tüm öncelik ve zaman kısıtlarını dikkate alarak ve birim ürün başına toplam maliyeti minimize ederek görevlerin iş istasyonlarına mümkün atamasını kapsamaktadır. Genellikle, son montajın emeğe dayalı olarak yapıldığı, otomasyon fazla olmadığı üretim ortamlardır. Bu nedenle maliyet tabanlı montaj hattı dengeleme problemlerinde, iş gücü maliyeti detaylı olarak analiz edilmek zorundadır. Ayrıca gerçek üretim sistemlerinde, özellikle manuel montaj hatlarında, montaj operasyon süreleri genellikle deterministik değildir ve değişiklik göstermektedir. Bu durum montaj hattının deterministik değil, stokastik olarak ele alınmasını zorunlu kılmaktadır. Bu çalışmada Maliyet Tabanlı Stokastik Montaj Hattı dengeleme problemi ilk kez ele alınmış ve bu amaçla bir şans kısıtlı matematiksel model önerilmiştir. Önerilen model, IBM ILOG CPLEX 12.4 yazılımı yardımıyla küçük ve orta boyutlu problemler için çözülmüştür. Problemin NP-zor olduğu için, büyük boyutlu problemler için genetik algoritma önerilmiştir. Deneyisel araştırma sonuçları önerilen genetik algoritmanın daha iyi bir performansla sahip olduğunu göstermektedir.

Bilim Kodu : 906.1.141

Anahtar Kelimeler : Maliyet Tabanlı Montaj Hattı Dengeleme, Stokastik Görev Zamanı, Şans Kısıtlı Programlama

Sayfa Adedi : 101

Danışman : Prof. Dr. Hadi GÖKÇEN

COST ORIENTED STOCHASTIC ASSEMBLY LINE BALANCING PROBLEM:
SOLUTION APPROACHES AND MODELLING

(Ph. D. Thesis)

Ahad FOROUGHI

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

July 2014

ABSTRACT

Nowadays business world's need of economic studies is significant; evaluation and effective use of resources are very important issues. As a result of efficient use of recourse, cost of business will reduce significantly, and the utilization rate of capacity and total profit will increase. In the process of industrialization in order to make high-volume, fast and low-cost production, it has become mandatory to switch from workshop layout to assembly line layout. In addition, a considerable proportion of manufacturing activities and costs are devoted to the assembly of products. Therefore, in assembly lines, reduction of costs and benefit from resources such as labor efficiently has become imperative. Cost oriented assembly line balancing problem is to assign the work elements (tasks) to workstations so that all precedence and time constraints are satisfied and objective function will minimize the total costs per product unit. Usually, final assembly of products is very labor intensive. Therefore, in cost oriented assembly line balancing problems, labor costs must be analyzed in detail. Furthermore, in real manufacturing systems, especially in manual assembly lines, operations times aren't usually deterministic and can vary. This situation requires addressing assembly line as a stochastic, not deterministic. In this research, the chance constraint mathematical model for stochastic cost oriented assembly line balancing problem has been proposed. The proposed model has been solved for small to medium-sized problems using IBM ILOG CPLEX 12.4 solver. Due to the NP-hardness problem, a genetic algorithm has been proposed for large scale problems. Experimental results show that the proposed genetic algorithm has a better performance and efficiency.

Science Code : 906.1.141

Key Words : Cost Oriented Assembly Line Balancing, Stochastic Task Time,
Chance Constraint Programming

Page Number : 101

Supervisor : Prof. Dr. Hadi GÖKÇEN

TEŞEKKÜR

İlk olarak, doktora öğrenimin her aşamasında ihtiyaç duyduğum her konuda yanımda olan ve hiçbir desteğini esirgemeyen, sadece akademik hocam değil, hayatta kendilerinden çok şeyler öğrendiğim ve her zaman öğrencisi olmaktan onur duyduğum değerli hocam sayın Prof.Dr. Hadi GÖKÇEN'e sonsuz teşekkür ediyorum. Aynı zamanda, tez izleme komitesi toplandıkları görüşleri ile yapmış oldukları katkılardan dolayı Prof. Dr. Ömer Faruk BAYKOÇ ve Doç. Dr. Yakup KARA hocalarıma da teşekkür ediyorum. Ayrıca hayatım boyunca maddi ve manevi hiçbir fedakârlıktan kaçınmayan, destek, sevgi ve dualarını hiçbir zaman eksik etmeyen sevgili aileme, özellikle annem Behnaz AHMADPOUR ve babam Mahdi FOROUGHİ'e teşekkürü bir borç biliyorum.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	İV
ABSTRACT	V
TEŞEKKÜR	Vi
İÇİNDEKİLER	Vii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	X
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	Xii
1. GİRİŞ	1
2. MONTAJ HATTI Dengeleme.....	5
2.1. Montaj Kavramı.....	5
2.2. Montaj Hatlarının Üretimdeki Yeri	5
2.3. Montaj Hattı Dengeleme Problemi.....	7
2.4. Montaj Hatlarının Dengelenmesinin Amaçları	8
2.4.1. Montaj hatları ile ilgili temel kavramlar.....	8
2.5. Montaj Hatlarının Sınıflandırması.....	14
2.5.1. Ürün sayısına göre sınıflandırma.....	15
2.5.2. Hattın kontrol yapısına göre sınıflandırma.....	16
2.5.3. İşlem zamanlarının değişkenliğine göre sınıflandırma	18
2.5.4. Hattın yerleşimine göre sınıflandırma.....	19
2.6. Montaj Hattı Dengeleme Problemlerinin Sınıflandırılması	21
3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	27
3.1. Stokastik Montaj Hattı Dengeleme İçin Literatür Araştırması	27
3.2. Maliyet tabanlı Montaj hattı dengeleme İçin Literatür Araştırması.....	28
4. MALİYET TABANLI STOKASTİK MONTAJ HATTI Dengeleme (MSMHD) PROBLEMİ	31
4.1. Stokastik Montaj Hattı Dengeleme.....	31
4.2. Maliyet Tabanlı Montaj Hattı Dengeleme	32

4.3. İki İstasyon Kuralı (Two Stations Rule).....	38
5. MSMHD PROBLEMİ İÇİN ŞANS KISITLI 0-1 TAMSAYI MATEMATİKSEL MODELİ.....	41
5.1. Şans Kısıtlı Stokastik Programlama	41
5.2. MSMHD Problemi İçin Önerilen Şans Kısıtlı Model	42
5.2.1. MSMHD problemi şans kısıtlı modeli için doğrusal yaklaşım.....	45
5.2.2. MSMHD problemi şans kısıtlı modeli için doğrusal dönüşüm.....	47
6. MSMHD PROBLEMİ İÇİN GENETİK ALGORİTMA	51
6.1. Genetik Algoritma	51
6.1.1. Genetik algoritma çalışma sistematığı	52
6.2. Önerilen Genetik Algoritma.....	55
6.2.1. Önerilen genetik algoritmanın kromozom yapısı	56
6.2.2. Uygunluk fonksiyonu.....	62
6.2.3. Seçim operatörü	63
6.2.4. Çaprazlama Operatörü	64
6.2.5. Mutasyon Operatörü	64
7. HESAPLAMA VE ANALİZ SONUÇLARI.....	65
7.1. Test Problemleri	65
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	81
KAYNAKLAR	83
EKLER	91
EK-1. Test problemleri için üretilen düşük, büyük ve rassal değişim katsayı değerleri.	92

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. 9 Görevli öncelik matrisi.....	12
Çizelge 2.2. BMHDP' nin sınıflandırılması.....	23
Çizelge 3.1. Stokastik görev zamanlı montaj hatlarını dikkate alan çalışmalar	28
Çizelge 4.1. 7 görevli problemin optimal sonuçları.....	36
Çizelge 4.2. 7 görevli problemin istasyon (operatör) boş zamanları	37
Çizelge 6.1. Genetik algorithmada kullanılan görev atama kuralların listesi.....	58
Çizelge 7.1. Genetik algoritmasının parametre değerleri.....	66
Çizelge 7.2. Test problemlerin sınıflandırılması	66
Çizelge 7.3. GA ile küçük boyutlu problemler için elde edilen sonuçlar	67
Çizelge 7.4. GA ile orta boyutlu problemler için elde edilen sonuçlar	71
Çizelge 7.5. En iyi çözümü bulunan orta boylu problemler için GA sonuçları	73
Çizelge 7.6. En iyi çözümü bulunamayan orta boylu problemler için GA sonuçları	75
Çizelge 7.7. GA ile büyük boyutlu problemler için elde edilen sonuçlar	76

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Üretim sistemlerin sınıflandırması	6
Şekil 2.2. Montaj hattı şeması.....	7
Şekil 2.3. Öncelik diyagramı	11
Şekil 2.4. Montaj hatların sınıflandırılması.....	15
Şekil 2.5. Tek modellenli (a), Karışık modellenli (b), Çok modellenli (c) montaj hatları.....	16
Şekil 2.6. Gecikmesiz montaj hattı yerleşimi	17
Şekil 2.7. Gecikmeli montaj hattı yerleşimi	17
Şekil 2.8. Düz montaj hattı yerleşimi.....	19
Şekil 2.9. U tipi montaj hattı yerleşimi	20
Şekil 2.10. Paralel montaj hattı yerleşimi.....	20
Şekil 2.11. İki taraflı montaj hattı yerleşimi.....	21
Şekil 2.12. Montaj hattı dengeleme probleminin sınıflandırılması.....	22
Şekil 4.1. Örnek öncelik diyagramı.....	35
Şekil 6.1. Genetik algoritma akış şeması	54
Şekil 6.2. 11 görevli öncelik diyagramı	56
Şekil 6.3. MHD için kullanılan kromozom gösterimleri.....	58
Şekil 6.4. Önerilen genetik algoritmanın kromozom yapısı.....	60
Şekil 7.1. GA ve DY_MSMHD modelinden elde edilen sonuçların sapmalarının karşılaştırılması	69
Şekil 7.2. Küçük boyutlu problemler için GA'nın DD_MSMHD modeline göre sapmaları.....	70
Şekil 7.3. En iyi çözümü bulunan orta boylu problemler için GA'nın DD_MSMHD modeline göre sapmaları.....	74
Şekil 7.4. En iyi çözümü bulunamayan (72000 sn) orta boylu problemler için GA'nın DD_MSMHD modeline göre sapmaları.....	75
Şekil 7.5. Büyük boylu problemler için DY_MSMHD modelin, DD_MSMHD modeline göre sapmaları.....	78

Şekil	Sayfa
Şekil 7.6. Büyük boylu problemler için GA'nın, DY_MSMHD modeline göre sapmaları.....	78
Şekil 7.7. Büyük boylu problemler için GA'nın, DD_MSMHD modeline göre sapmaları.....	79

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
C	çevrim zamanı
n	görev sayısı
M	istasyon sayısı
i, h	görev numarası, $i, h=1, \dots, n$
j	istasyon numarası, $j=1, \dots, M$
k_j^s	j. istasyonun ücret oranı
k_i^t	i. görevin ücret oranı
x_{ij}	i görevi j istasyona atanmış ise 1, diğer durumlarda 0
S_j	eğer j istasyonu açılmış ise 1, diğer durumlarda 0
R_i	i. görevin öncüller kümesi
E_i	i görevin yapılabileceği en erken istasyon
L_i	i görevin yapılabileceği en geç istasyon
CV	değişim katsayısı
t_i	i. görevin süresi
F_i	i. görevin ardıllar kümesi
ΔK_i	i. Görevin mevcut istasyona atanması durumunda, aylak maliyetin değişim miktarı

Kısaltmalar	Açıklamalar
DD-MSMHD	Doğrusal dönüşüm maliyet tabanlı stokastik montaj hattı dengeleme
DY-MSMHD	Doğrusal yaklaşım maliyet tabanlı stokastik montaj hattı dengeleme
GA	Genetik algoritma

Kısaltmalar**MH****MHD****MMHD****MSMHD****Açıklamalar**

Montaj hattı

Montaj hattı dengelem

Maliyet tabanlı montaj hattı dengeleme

Maliyet tabanlı stokastik montaj hattı dengeleme

1. GİRİŞ

Artan rekabet ortamında karı daha yüksek veya aynı seviyede tutabilmenin şartı maliyetlerin azaltılmasıdır. Üretim maliyetlerin düşürülebilmesi için daha az girdi maliyetleri ile daha çok ürün üretme isteği, işletmeleri atölye tarzı yerleşimden montaj hattı (MH) yerleşimine geçmeyi zorunlu kılmıştır. Montaj hattı yerleşimleri ile ürünler birbirlerine bağlı iş istasyonlarında üretilmektedir. Bu birbirine bağlı istasyonların her birinde daha önceden tanımlanan ve ürün üretilmesi için gerekli olan operasyonlar gerçekleştirilir. Bu operasyonlar, montaj hattındaki istasyonlara öyle paylaşmalıdır ki, hiçbir istasyon diğerini beklemeden ilgili operasyonları yerine getirsin ve ürün tamamlanmış olarak hattın çıkartılabilirsin. İşte bu istek, montaj hatlarının dengeleme (MHD) problemlerini ortaya çıkarmıştır.

MHD Problemi, montaj işleminin yapılabilmesi için gerekli işlerin, bu işlerin süreleri ve işler arasındaki öncelik ilişkileri verildiğinde, bir performans ölçütü eniyilenecek şekilde, sıralı iş istasyonlarına atanması şeklinde tanımlanabilir. MHD problemdeki amaçlardan biri, her iş istasyonuna eşit miktarda iş dağıtımını yapabilmek, başka bir deyişle, toplam iş yükünü iş istasyonları arasında mümkün olduğu kadar eşit bir şekilde bölebilmektir. MHD problemdeki bir diğer amaç; oluşan şartlar altında hattın kesintisiz olarak çalışmasını sağlamaktır. Bu da ancak, işler arasındaki öncelik şartlarını sağlayarak her istasyondaki toplam iş yükü süresinin, verilen çevrim zamanından büyük olmaması ve hattaki istasyonu sayısının en küçük olacak bir biçimde işlerin iş istasyonlarına atanmasıyla sağlanabilmektedir. MHD problemdeki bir başka amaç ise, iş istasyonu sayısının sabit olduğu durumlarda amaç, çevrim zamanının en küçüklenmesidir. MHD problemi çalışmalarında genelde en çok kullanılan amaç fonksiyonları; en çok ürünü elde etmek, boş zamanları en küçüklemek, denge kaybını en küçüklemek, denge kaybını iş istasyonları arasında eşit olarak dağıtmak, iş istasyonları önlerindeki kuyruklardaki yığılma ve beklemleri en küçüklemek olarak sıralanabilir.

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.

Bir montaj hattı ilk kez kurulacağı zaman, üretim sistemine ilişkin kaynaklar ve maliyetler henüz tam olarak belirlenmediği için üretilecek ürüne göre hattın tasarlanması problemi karşımıza çıkmaktadır. Bu durumda üretilecek ürüne ait iş akışı ve olası öncelik ilişkisi diyagramları çizilerek alternatif üretim seçenekleri değerlendirilir. Kullanılacak farklı makineler ve farklı yeteneklere sahip işçilerin görevlere ve istasyonlara atamalarının oluşturacağı maliyetler hesaplanarak, maliyeti en küçükleyecek montaj hattı kurulur.

MHD probleminin gerçek hayatta karşımıza çıkış şekli, genelde, kurulum aşamasından ziyade, değişen müşteri talepleri ya da yeni ekipmanların alınması ile yeniden dengelemeye ihtiyaç duyulması şeklindedir [1]. Yeniden dengeleme durumu, yeni makine, yeni işgücü, yeni ürün ve yeni metot olmak üzere temelde dört sebepten ortaya çıkmaktadır. Bir makinenin bir istasyona yerleştirildikten sonra tekrar yerinin değiştirilmesi, özellikle ağır sanayide pek mümkün olmamakla birlikte bir maliyet oluşturmaktadır. Makinelerin istasyonlara etkin bir şekilde yerleşimi yapılabilmesi için alan kısıtı da dikkate alınmalıdır.

Ayrıca, yeni bir makinenin alınması durumunda hattın dengelenmesi yapılırken, makinenin alım maliyeti ve hatta yapacağı iyileştirmenin getirisi birlikte değerlendirilmeli ve ona göre karar verilmelidir. Yeniden dengeleme yapılırken, üretim programında meydana gelecek değişiklikler (örneğin vardiya değişimleri) dikkate alınır. Artık montaj hattı kurulmuş olduğu için, buradaki amaç istasyon sayısını en küçüklemekten ziyade, çevrim zamanını en küçükleyerek üretim miktarını ve satışları arttırmaktır.

Montaj, imalat sanayinde ürün geliştirmenin en önemli aşamalarından biridir. Bundan dolayı, otomotiv ve elektronik gibi sektörlerde istihdam edilen işçilerin büyük çoğunluğunu montaj hattında çalışanlar oluşturmaktadır. Ayrıca, çoğu endüstriyel ürünlerin toplam maliyetine % 40 - % 60 oranında montaj maliyeti etki etmektedir. Montaj aşamalarıyla ilgili ürün maliyetinde yapılacak iyileştirmeler, ürünün maliyetini önemli ölçüde etkilemektedir.

Dolayısıyla, yeniden dengeleme yapılırken amaç, istasyon sayısını veya çevrim zamanını en küçüklemekten ziyade, eldeki kaynakları en iyi şekilde kullanarak bir ürünün toplam üretim maliyetini en küçükleme amaçını kullanarak

hat dengeleme çalışmaları Maliyet tabanlı Montaj Hattı Dengeleme (MMHD) problemi başlığı altında toplanmıştır ve bu konu hakkında çok az çalışma bulunmaktadır.

Montaj hatları ile ilgili çalışmaların birçoğunda, 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 stokastik 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.

Bu çalışmanın amacı; yukarıda verilen bilgiler doğrultusunda, Maliyet tabanlı stokastik Montaj Hattı Dengeleme (MSMHD) problemleri ile ilgili literatüre ve mevcut bakış açısına göre, şimdiye kadar literatürde incelenmemiş olan MSMHD problemini tanımlayarak, farklı yönlerini dikkate alarak yeni çözüm önerileri getirmektir. Bu amaç doğrultusunda bu çalışmayla, MSMHD problemi için yeni modeller ve çözüm yaklaşımları önermek ön planda tutulmuştur. Bu önerilen yeni modeller ve yaklaşımlarla literatürdeki açığın kapatılması hedeflenmiştir.

Çalışmanın sunumu şu şekilde organize edilmiştir. Çalışmasının ikinci bölümünde; montaj kavramı, MH ve MHD problemi ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Sonra montaj hatları ile ilgili temel kavramlardan bahsedilip MH'leri ve MHD problemleri sınıflandırılmıştır. Üçüncü bölümde; stokastik MHD problemi ve MMHD problemi ile ilgili yapılan çalışmalar incelenmiştir. Dördüncü bölümde; stokastik MHD ve MMHD problemleri tanımlanıp ve MMHD probleminde kullanılan iki istasyon kuralı detaylı olarak açıklanmıştır. Beşinci bölümde; MSMHD problemi için yeni tamsayılı şans kısıtlı programlama modeli ve çözüm yaklaşımları önerilmiştir. Altıncı bölümde; makul sürelerde MSMHD probleminin yaklaşık çözümlerini bulabilmek için genetik algoritma sunulmuştur. Yedinci bölümde, genetik algoritma, deney setleri üzerinde test edilmiş ve elde edilen sonuçlar önerilen tamsayılı şans kısıtlı karar modeli sonuçlarıyla (veya alt sınır değerleriyle), çözüm kalitesi ve çözüm süresi açısından karşılaştırılmıştır. Son bölümde

ise, araştırma sonuçlarının genel bir değerlendirmesi ve ileride yapılabilecek çalışmalar için öneriler yer almaktadır.

2. MONTAJ HATTI DENGEME

2.1. Montaj Kavramı

Montaj, bir ürün oluşturmak amacıyla çeşitli parçaların toplanma ve birleştirilme sürecine verilen addır. Kullanılan parçalar ve bunları bir araya getirme işi üzerinden tanımlanır. Montajda kullanılan parçalar, malzeme veya yarı ürün olabilir [2].

2.2. Montaj Hatlarının Üretimdeki Yeri

Üretim, mühendisler tarafından, fiziksel bir varlık üzerinde onun değerini artırıcı bir değişiklik yapmak veya hammadde ve yarı mamulleri mamule dönüştürmek olarak tanımlanmaktadır [3]. Fiziksel bir varlığın değerini arttırıcı bir değişiklik yapan tasarım süreci ise üretim sistemi olarak tanımlanabilir. Genelde üretim sistemleri şu şekilde sınıflandırmak mümkündür [4].

Siparişe göre yada atölye tipi üretim, tüketicinin veya müşteri firmanın, zaman, tasarım, miktar ve kalite bakımından özel olarak belirlediği bir mamulün üretilmesidir [5]. Bu tip üretimde, küçük miktarlarda fakat çok çeşitli ürün üretilir. Bu sistemlerde, çok yönlü tezgâhlar kullanılmakta ve farklı tezgâhlarda çalışabilecek esnek işçi kullanımı gerekmektedir. Bu tip üretime, yerinde alınan ölçüye göre mobilya üreten sistemler örnek olarak verilebilir.

Parti tipi üretim, özel bir siparişi veya sürekli bir talebi karşılamak amacıyla belli bir mamul grubunun belirli miktarlardan oluşan partiler halinde üretilmesidir. Bu tip üretimde oldukça çeşitli ürünlerin, değişik miktarlarda ve genellikle orta büyüklükteki partiler halinde üretildiği söylenebilir. Bu sistemlerin en büyük özelliği bir parti bitmeden diğerinin üretimine geçilmemesidir. Talep sürekli ve sipariş tipi üretimde olduğu kadar değişken değildir. Metal işleme atölyeleri ile bir traktör fabrikasının motor atölyesinde gerçekleştirilen üretimi bu tip üretime örnek olarak verilebilir.

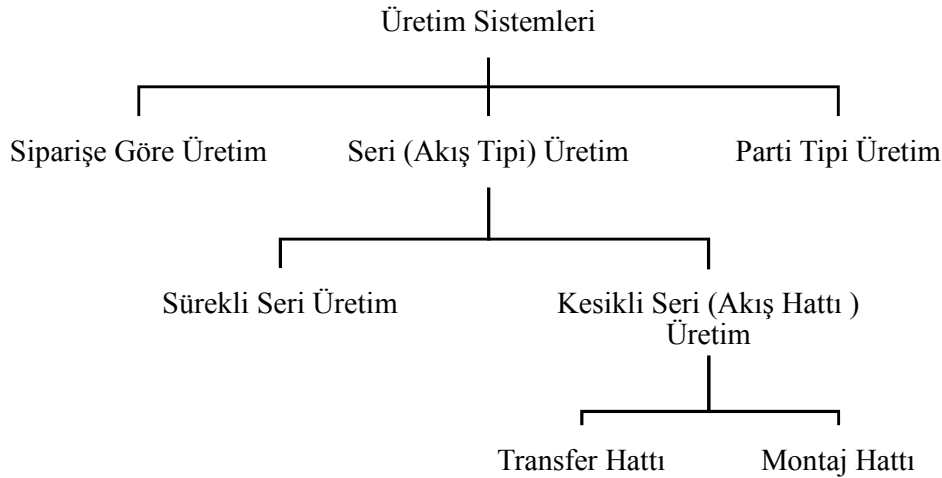
Seri üretim, yüksek miktarlarda fakat düşük seviyede çeşitlilik gösteren ürünler için uygulanan üretim şeklidir. Seri üretimin ana özelliği, ürün akışının olması ve tesislerin üretilcek ürüne göre tasarlanmasıdır. Seri üretimde, sistemin başlangıç noktasından

başlayan hammadde, yarı mamul ve parça gibi girdiler, işlem birimlerinden geçmekte ve son ürün haline dönüşerek sistemden çıkmaktadırlar.

Sürekli seri üretimde, ürün akışı sürekli. Demir-çelik ürünler, çimento ve gıda maddeleri bu tip üretime örnek olarak gösterilebilir.

Kesikli seri üretim de, sürekli seri üretim gibi aynı temel prensip üzerine gelişmiştir. Karmaşık birimler akış kuralı kullanılarak büyük miktarlarda özel akış sistemlerinin tasarımı ile üretilmektedirler. Otomobil, beyaz eşya, televizyon vb. ürünler kesikli seri üretime örnektir. Kesikli seri üretim, transfer hatları ve montaj hatları olarak ikiye ayrılmaktadır.

Transfer hatları, büyük ve karmaşık makinelerden oluşan üretim sistemleridir. Bu hatlar düz yada devirli tiplerde olabilir. Ürün yada malzemelerin bir yerden başka bir yere nakli insan gücü ile değil otomatik hareket ve transfer yöntemiyle saklanmaktadır. Böylece transfer hatları, transfer aletleri ile başlanmış otomatik imalat makine serilerinin oluşturduğu üretim hatlarıdır denilebilir [6]. Şekil 2.1’de üretim sistemlerin sınıflandırması gösterilmektedir.



Şekil 2.1. Üretim sistemlerin sınıflandırması

Montaj hattı dengeleme problemi endüstri mühendisliğinin temel araştırma konularından birisidir. Etkin bir montaj hattı tasarımı üretim zamanının verimli kullanılması, iş gücünden iyi faydalanılması, ürün kalitesinin mükemmele yükseltilmesi gibi pek çok konuda montaj işlemlerine yardımcı olmaktadır.

2.4. Montaj Hatlarının Dengelenmesinin Amaçları

Montaj hatlarının dengelenmesinde amaçlar farklılık gösterebilirler ve birbirleriyle çelişebilirler. Ama burada asıl amaçlanan, tüm istekleri dikkate alarak en uygun çözüme ulaşmaktır.

Bir montaj hattının kurulmasında ulaşılması gereken amaçlar şunlardır [10]:

- Düzenli bir malzeme akışını sağlamak
- İnsan gücü ve tezgâh kapasitelerini en üst düzeyde kullanmak
- İşlemleri en kısa sürede tamamlamak
- Montaj hattı üzerindeki iş istasyonu sayısını en küçüklemek
- Boş (atıl) süreleri en küçüklemek
- Atıl süreleri, iş istasyonları arasında düzgün şekilde dağıtmak
- Üretim maliyetlerini en küçüklemek

2.4.1. Montaj hatları ile ilgili temel kavramlar

Görev:

Toplam iş kapsamının mantıksal olarak bölünmüş yada daha fazla ayrıştırılamayan en küçük iş ögesidir. Görev i indisiyle ifade edilir, problemdeki görev sayısının toplamı ise N ile gösterilir.

Görev Zamanı:

Bir görevin tamamlanabilmesi için gereken süredir. Montaj hattı dengeleme problemlerinin çözümünde bu zamanlar sabit ve belirli (deterministik) olarak alınabileceği gibi, ortalaması ve standart sapması bilinen bir dağılıma uyduğu da (stokastik) kabul edilebilmektedir. t_i Görevinin tamamlanma zamanını ifade etmektedir.

Bir görev zamanı μ_i ortalama ve σ_i^2 varyansa sahip normal dağılımdan gelirse $1-\alpha$ olasılıkla görev zamanı Eş. 2.1'deki gibi bulunur.

$$t_i \leq \mu_i + Z_{1-\alpha} \sqrt{\sigma_i^2} \quad (2.1)$$

Toplam Görev Zamanı:

Montaj hattı üzerinde üretilecek bir ürünün montajı için gerekli olan süre veya işi oluşturan tüm görevlerin standart tamamlanma sürelerinin toplamıdır.

İş İstasyonu:

Montaj hattında çalışan operatörlerin iş yaptıkları alanlara verilen isimdir. Bir montaj hattı için; en küçük istasyon sayısının bir olduğu ve istasyon sayısı dengeleme çalışması sırasında saptanan en büyük istasyon sayısını asmamak gerektiği kısıtları vardır. Her bir istasyonda ürünlerin üretilmesi için gereken N operasyonun bir alt kümesi gerçekleştirilir ve toplam istasyon sayısı ise K ile ifade edilir.

Çevrim Zamanı:

Çevrim zamanı (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 zamanı, 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 öğeler 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.

$$C = \frac{\sum t_i}{N} \quad ya \ da \ C = \frac{T}{Q} \quad (2.2)$$

Burada Q, birim zamanda üretilecek miktar; T, ise üretimin gerçekleştirileceği zaman dilimini ifade etmektedir.

İstasyon Zamanı (İş Yüğü):

Aynı istasyonda yapılan görevlerin zamanları toplamıdır. K İstasyonuna ait zaman C_k ile gösterilir ve montaj hattındaki bir istasyon zamanı hattın çevrim zamanından (C) büyük olmamalıdır. Eş. 2.3

$$Max \ t_i \leq Max \ C_k \leq C \quad (2.3)$$

İstasyon Gecikme Zamanı (Boş Zaman):

Çevrim zamanı ile istasyon zamanı arasındaki farka eşittir ve aynı zamanda istasyon boş zamanı olarak da adlandırılır.

$$Boş \ zaman = C - C_k \quad (2.4)$$

Toplam Boş Zaman:

Bir hattın tasarım etkinliğinin bir ölçüsü olarak bütün istasyonların boş zamanlarının toplamı alınabilir. Eş. 2.5. Bu, toplam boş zaman olarak adlandırılır.

$$TBZ = \sum_{k=1}^K (C - S_k) \quad (2.5)$$

Denge Gecikmesi:

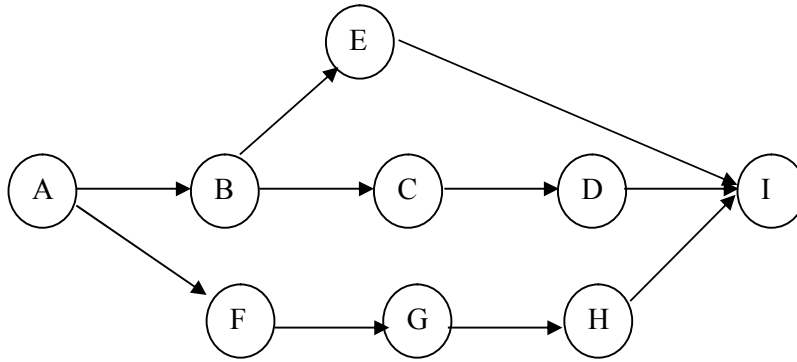
Etkinliğin bir ölçüsü olan denge gecikmesi, toplam boş zamanın, ürünün hattın başından sonuna hareketi sırasında harcadığı toplam zamanın istasyonlara kötü bir şekilde dağıtılması sonucunda, bazı istasyonlardaki operatörlerin boş kaldığı süreye denge gecikmesi denir. Bu süre, montaj hattının dengesizliğinin de bir ölçüsü olarak kullanılır ve Eş. 2.6'e göre hesaplanır. Mükemmel dengelenmiş hatlarda denge gecikmesi sıfırdır.

$$D = \frac{(K \cdot C - \sum_{i=1}^N t_i)}{K \cdot C} \quad (2.6)$$

K, toplam istasyon sayısını, n, görev sayısını, C ise çevrim zamanını göstermektedir.

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 diyagram ile gösterilir. Şekil 2.3'te bir montaj hattına ilişkin öncelik diyagramı görülmektedir.



Şekil 2.3. Öncelik diyagramı

Öncelik matrisi:

Öncelik diyagramının matris durumuna dönüştürülmüş şeklidir. Bu matriste aralarında doğrudan doğruya öncelik ilişkileri bulunan iş öğeleri için, matriste önde gelen öğe numaralı satırla; izleyen öğe numaralı sütunun kesiştiği noktaya “1”, diğer noktalara “0” değeri konur. Çizelge 2.1’de, Çizelge 2.1’te teknolojik öncelik diyagramı verilen montaj hattı için hazırlanmış öncelik matrisi görülmektedir.

Çizelge 2.1. 9 Görevli öncelik matrisi

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
A	0	1	0	0	0	1	0	0	0
B	0	0	1	0	1	0	0	0	0
C	0	0	0	1	0	0	0	0	0
D	0	0	0	0	0	0	0	0	1
E	0	0	0	0	0	0	0	0	1
F	0	0	0	0	0	0	1	0	0
G	0	0	0	0	0	0	0	1	0
H	0	0	0	0	0	0	0	0	1
I	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Hattın Etkinliği:

Verimlilik ölçütü olarak kullanılır ve Eş. 2.7'e göre hesaplanır. Bu oran her zaman 0 ile 1 arasında değer almak durumundadır.

$$E = \frac{\sum_{k=1}^K S_k}{K \cdot C} \quad \text{ya da} \quad e = 1 - d \quad (2.7)$$

Düzensizlik İndeksi:

Montaj hattı dengeleme problemlerinde amaç, her bir istasyonun istasyon zamanını çevrim zamanına eşit olacak şekilde düzenlemektir. Bu durumda TBZ ve doğal olarak D sıfır olacaktır. TBZ'nin sıfıra yakın olması, beraberinde istasyonlar arasındaki iş yükü farkının da sıfıra yaklaşması anlamına gelmektedir.

Fakat bu durum her zaman mümkün olmamaktadır. Düzensizlik indeksi (Dİ) ise, dengeleme performansının bir ölçüsü olarak kullanılır. Dİ, her bir istasyon zamanının en büyük istasyon zamanından (S_{max}) farklarının kareleri toplamının kareköküdür.

Mükemmel dengelenmiş hatlarda Dİ değeri sıfırdır. Dİ, aşağıdaki Eş. 2.8 yardımıyla hesaplanır:

$$DI = \sqrt{\sum_{k=1}^K (S_{max} - S_k)} \quad (2.8)$$

Gerekli en az iş istasyonu sayısı:

Tüm iş öğelerinin çevrim süresini aşmayacak şekilde istasyonlara atanması durumunda gereksinim duyulan en az istasyon sayısıdır. Hesaplamak için çeşitli yöntemler vardır. Genelde birden fazla yöntem sıra ile uygulanır, en fazla istasyon sayısını veren sonuç, gerekli en az istasyon sayısı olarak kabul edilir.

Sıra Kuvveti ve Esneklik Oranı:

Bunlar, montaj hattı dengeleme problemlerinin zorluk derecesini ifade eden ölçütlerden ikisidir. Bu ölçütler, öncelik ilişkileri diyagramı ve öncelik matrisi kullanılarak, montaj hattı dengeleme problemlerindeki öncelik ilişkilerinin göreceli sayısını belirler. Bu ölçütler ayrıca, problemin çözümünde elde edilebilecek uygun çözüm sayısının birer ölçüsü olup, her ikisinin de alabileceği değerler 0 ile 1 arasında değişmektedir. Esnekliğin Oranı (EO), Sıra Kuvvetinin (SK) tersi niteliğindedir. EO'nın 0'a yaklaşması durumunda SK değeri 1'e yaklaşacaktır.

SK ve EO değerleri sırasıyla aşağıdaki Eş. 2.9 ve 2.10 kullanılarak hesaplanır:

$$SK = \frac{2 \cdot \sum_{i=1}^n |F_i|}{n \cdot (n - 1)} \quad (2.9)$$

$$EO = \frac{2 \cdot Y}{n \cdot (n - 1)} \quad \text{veya} \quad EO = 1 - SK \quad (2.10)$$

Eş. 2.9'deki $|F_i|$ değeri, i görevinin tüm ardıl görevlerinin sayısı; n , toplam görev sayısı; $\sum_{i=1}^n |F_i|$ ise öncelik matrisindeki "1" değerlerinin toplam sayısını ifade etmektedir. Eş (2.10)'deki Y değeri, öncelik matrisindeki "0" değerlerinin toplam sayısını ifade etmektedir.

Hiçbir öncelik ilişkisi olmayan bir montaj hattı dengeleme probleminde SK değeri sıfıra, EO değeri ise 1'e eşittir. EO değerinin sıfıra yakın olması, esnekliğin az olduğunu

göstermektedir. Eğer esneklik oranı sıfır ise, tüm görevler ardışık olarak sıralanmış demektir ve hatta herhangi bir esneklik söz konusu değildir. Esneklik oranının 1'e yakın olması, problemde değerlendirilebilecek çok sayıda tasarım alternatifi oluşturacağından, problemin çözümünü de güçleştirecektir. Esneklik oranı 1 olduğunda ise görevler arasında önceliği gösteren herhangi bir ilişki yoktur, yani şebekedeki düğümler birbirlerinden kopuktur. Bu durumda hat tamamen esnektir ve montaj hattı problemi kutu paketleme (bin-packing) problemine benzer. Kutu paketleme problemi ise NP-zor sınıfında yer alan bir problemdir [11].

İstasyon Tıkanması (Blocking):

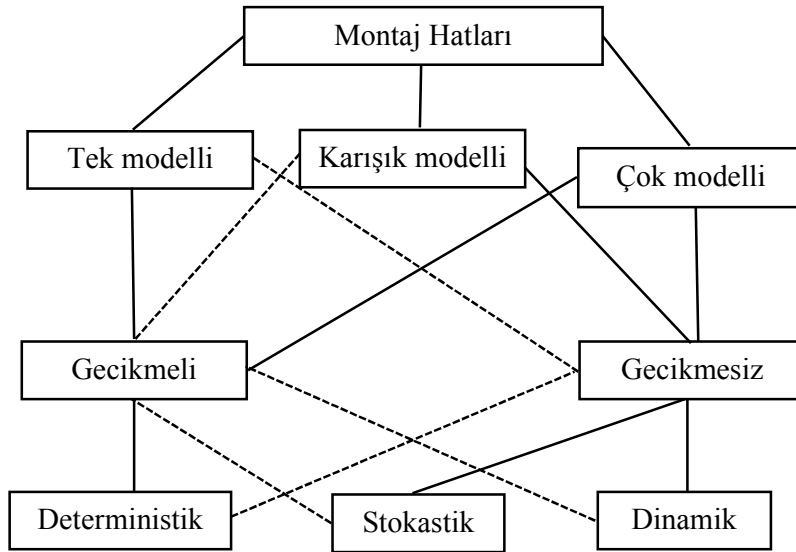
Eğer istasyonda tamamlanmış birimler, yetersiz alan yüzünden stoklanamıyorsa veya bir sonraki istasyon iş yükünü tamamlamaması nedeniyle birimler söz konusu istasyonda kalmak zorunda kalıyorsa istasyon tıkanmış demektir. Bu durumda istasyon, parçanın istasyondan çıkması için şartlar müsait olana kadar boş bekleyecektir.

İstasyon Açlığı (Starving):

Eğer istasyon uygunsa ve işlemi başlatmak için mevcut birime sahip değilse, istasyon açtır denilir. Bu durumda istasyon ihtiyacı olan birim gelene kadar boş bekleyecektir.

2.5. Montaj Hatlarının Sınıflandırması

Literatürde montaj hatları birçok şekilde sınıflanmaktadır [2, 12-16]. Scholl [2] Montaj hatlarını Şekil 2.4'de olduğu gibi sınıflandırmıştır. İlgili şekilde sürekli çizgiler çok rastlanan ilişkileri göstermekte, kesikli çizgiler ise nadir olarak karşılaşılan ilişkileri göstermektedir.



Şekil 2.4. Montaj hatların sınıflandırılması

Şekil 2.4'den de anlaşılabilceği gibi montaj hatları, aynı hatta üretilcek ürün model sayısına, taşıma sistemlerine ve işlem zamanlarındaki değişkenliklere göre sınıflara ayrılabilir.

2.5.1. Ürün sayısına göre sınıflandırma

Tek modelli hatlar:

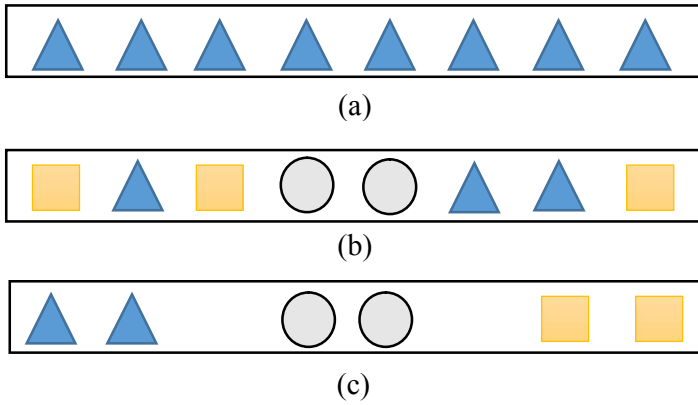
Tek bir ürünün sürekli olarak ve yüksek miktarlarda üretildiği hatlardır. Tüm istasyonlarda, aynı görevler tekrar edilir. Zaman boyunca tüm istasyonların iş yükü sabittir.

Karışık Modelli Hatlar:

Bir ana ürünün çeşitli modellerinin aynı hat üzerinde üretilmesiyle oluşurlar. Ana işlemler, her bir model için ortak olduğundan model değişiminde hazırlık zamanı ya yoktur veya çok azdır. Taleplerdeki değişimi karşılayabilmek için, modeller hat üzerinde karışık olarak eşzamanlı üretilirler. Bu durumda dengeleme problemi, en etkin model sırasının belirlenmesi problemiyle ilişkilendirilir.

Çok Modelli Hatlar:

Değişik model yada ürünlerin bir veya birden fazla montaj hattında üretilmesiyle oluşturulurlar. Üretim işlemindeki önemli farklılıklar, ürün değişiminde hattın yeniden düzenlenmesini gerektirir. Hazırlık zamanlarını azaltmak amacıyla üretim ayrı kafileler şeklinde gerçekleştirilir. Ancak kafiye büyüklükleri arttıkça hazırlık maliyetleri düşerken stok maliyetleri artmaktadır. Şekil 2.5’de ürün sayısına göre montaj hatlarının sınıflandırılması görülmektedir.



Şekil 2.5. Tek modelli (a), Karışık modelli (b), Çok modelli (c) montaj hatları

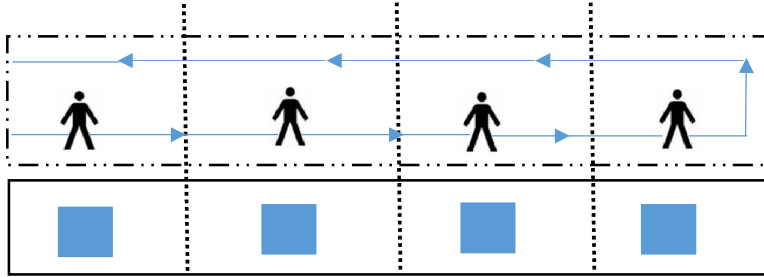
2.5.2. Hattın kontrol yapısına göre sınıflandırma

Hattın kontrol yapısına göre montaj hatları gecikmesiz ve gecikmeli hatlar olmak üzere iki sınıfa ayrılmaktadır.

Gecikmesiz hatlar:

Konveyörler, hareketli bantlar gibi malzeme taşıma ekipmanları, istasyonları esnek olmayan bir biçimde birbirine bağlar (Şekil 2.6). İş parçaları hareketli bantlar üzerinde bir istasyondan diğerine sabit hızda hareket ederler veya işlendikten sonra kesik kesik transfer edilirler. Her iki durumda da her bir istasyona, görevlerin yerine getirilmesinde aynı zaman miktarı verilir. Şekil 2.6’de sürekli hareket eden bir bant görülmektedir. İş parçası istasyondan geçerken operatörde onunla birlikte hareket etmekte, işlemi gerçekleştirmekte ve istasyonun başlangıç noktasına geri dönmektedir. Kesikli transferde ise parça istasyonda

beklemekte ve işlem biter bitmez bir sonraki istasyona sevk edilmektedir. Transferdeki gecikmeyi önlemek için, malzemenin hareketinin çok hızlı olması gerekmektedir.

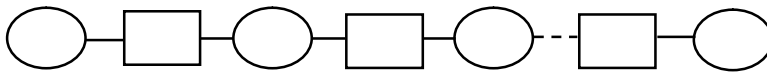


Şekil 2.6. Gecikmesiz montaj hattı yerleşimi

Gerçek hayatta karşımıza çıkan problemler, insan faktöründen dolayı genellikle stokastik işlem zamanlı olduğu için, dengenin tam anlamıyla sağlanabilmesinde gecikmeli hatlar tasarlamak daha doğru olmaktadır. İş parçası bir istasyondan diğerine geçirilirken, gecikmeleri önlemek her zaman mümkün olamadığından, görevlerin zamanında tamamlanamama olasılığı da dikkate alınmalıdır.

Gecikmeli Hatlar:

Bu tip hatlarda istasyonlar arasında tampon bulunmaktadır. Tampon, takip eden istasyonda bir önceki işlem devam ederken iş parçasının tutulduğu yer olarak tanımlanır.



Şekil 2.7. Gecikmeli montaj hattı yerleşimi

Tampon kapasiteleri kısıtlı olduklarından, eğer takip eden tampon tam doluysa istasyon tıkanır. Bu durumda istasyon, tampon da alan müsait olana kadar boş bekleyecektir. Bir başka olumsuz durum ise istasyon açlığıdır. İstasyon açlığı istasyonun uygun olması durumunda işlem yapacak parçanın olmamasıyla ortaya çıkar bu durumda tampona parça girene kadar istasyon boş bekleyecektir. İstasyon açlığının sebepleri düşük üretim oranları ve bir önceki istasyonda meydana gelen arızalar olabilmektedir. İstasyon açlığı, eğer iş yükleri eşit olarak dağıtılmazsa, gecikmesiz hatlarda kaçınılmazdır [17].

2.5.3. İşlem zamanlarının değişkenliğine göre sınıflandırma

Deterministik İşlem Zamanları:

Montaj hattı dengeleme modellerinin çoğu sabit deterministik işlem zamanlarını temel alırlar. Bu kabul, beklenen görev zamanlarının değişimi oldukça küçük olduğunda doğru olur. Montaj hatlarında genelde insan faktörüyle gerçekleştirilen görevlerin zamanını sabit tutabilmek için çalışanların kalifiyeli ve yüksek motivasyona sahip olmaları gerekmektedir. Gelişmiş üretim teknolojileri otomasyonu arttırarak görev zamanlarındaki değişimi azaltmışlardır.

Stokastik İşlem Zamanları:

İnsan faktörü görev sürelerinin değişken olmasına yol açmaktadır bu da sistem performansını önemli ölçüde etkilemektedir. İşlem zamanları çalışanların becerisine ve motivasyonuna bağlıdır. Söz konusu değişkenliğin sebepleri arasında yorulma, dikkatin dağılması, yetersiz nitelikteki işgücü, iş tatminsizliği, hatalı girdiler, araç-gereç bozulmaları gibi unsurlar sayılabilir. Bu durum, istasyonlara atanan işlerin aldıkları toplam sürenin istasyona verilen süreyi aşmasına ve dolayısıyla bazı işlerin bitirilememesine sebep olabilmektedir. Özellikle işler arasındaki öncelik ilişkileri göz önüne alındığında, bazı işlere hiç başlanamamaktadır. Bu sebeple hattın çıktı oranı görev zamanlarının istatistiksel dağılımına bağlı olmaktadır.

Dinamik İşlem Zamanları:

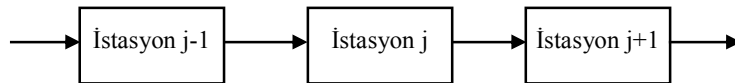
İşlem zamanlarındaki stokastik değişimin yanında, üretim sisteminin geliştirilmesi ve öğrenmenin etkisiyle görev zamanlarında sistematik bir azalma olması mümkündür. Genellikle yeni bir montaj hattı sistemi kurulduğunda, operatörün işe alışınca kadar harcadığı zaman fazlayken, kalifiyesi arttıkça ve öğrenme derecesine bağlı olarak görev zamanı azalır [2].

2.5.4. Hattın yerleşimine göre sınıflandırma

Montajı yapılacak ürüne bağlı olarak montaj hattının şekli ve buna bağlı işstasyonlarının yerleşim biçimi farklılık gösterir. Bunlardan önemli olan montaj hattı yerleşim şekilleri aşağıda verilmiştir [11].

Düz montaj hatları:

Düz montaj hatları, bir doğru boyunca birbiri ardına sıralanmış iş istasyonlarından oluşan montaj hatlarıdır. Şekil 2.8’de düz hat yerleşimi gösterilmektedir. Üretim sistemlerinde montaj hatları ilk olarak düz montaj hatları olarak ortaya çıkmıştır. Montajı yapılacak ürün ilk istasyondan girer ve son istasyondan montajı bitmiş bir şekilde çıkar. Düz hatların birtakım üstün yanları olduğu gibi sakıncaları da vardır. İş akışının daha hızlı ve kolay olması, basit ve sistematik olması, kolayca yerleşim yapılabilmesi, servis verme olanaklarının kolaylıkla sağlanabilmesi, konveyör sistemlerinin uygulanabilirliğinin artması ve maliyetlerinin düşmesi, ayrıca köşelerde meydana gelebilecek transfer zorluklarının ortadan kalkması gibi nedenlerle, montaj ve üretim hatlarının yerleşiminde düz hatlar tercih edilir. Bunların yanında, çok yer kaplaması ve işçilerin birbirleriyle olan iletişim olanağının az olması ise düz hatların sakıncaları arasında gösterilebilir.



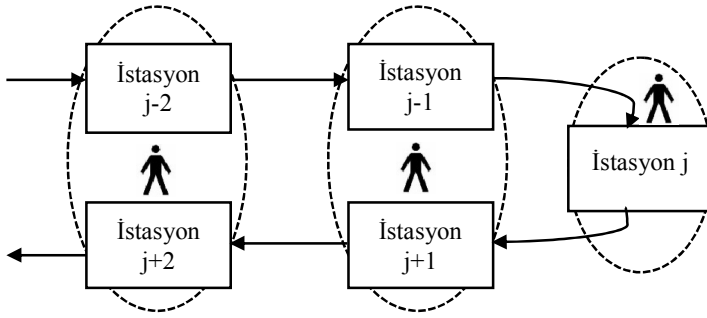
Şekil 2.8. Düz montaj hattı yerleşimi

U tipi montaj hatları:

Küreselleşme ve beraberindeki değişimler üretim sistemlerini de etkilemiştir. Günümüz üretim sistemleri, olabildiğince esnek yapıya ihtiyaç duymaktadır. Bunun nedenleri olarak ürün çeşitliliğinin artması, kitlesel talebin azalması, rekabetin artması, verimliliğin rekabette önemli bir faktör haline gelmesi sayılabilir. Son yıllarda, işletmelerin tam zamanında üretim ilkesini uygulamaya başlaması ile birlikte, montaj hatları günümüz üretim ihtiyaçlarını karşılayacak şekilde değişime uğramış ve sonuç olarak geleneksel düz hatların yerini U-tipi hatlar almaya başlamıştır. U tipi yerleşimde hattın girişi ve çıkışı aynı pozisyonadadır (Şekil 2.9). Bu yerleşimin en dikkat çekici ve önemli avantajı, üretim

miktardaki değişimlere uyum sağlamada gerekli işçi sayısını arttırabilme yada azaltabilme esnekliğinin sağlanmasıdır.

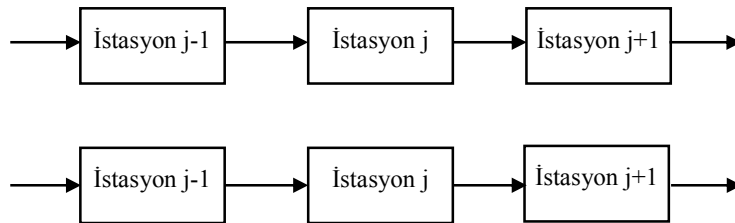
U tipi montaj hatlarının ilk uygulaması Toyota Üretim sisteminde olmuştur. U tipi hatlarda çok fonksiyonlu işçi kullanır. Eğer giriş ve çıkış şeklindeki gibi yakın olursa bu yerleşim şekli U tipi yerleşim olarak, eğer bu yerleşim içerisinde aynı işçi birden fazla makinede çalışıyorsa, bu durumda da U tipi üretim hattı olarak adlandırılır.



Şekil 2.9. U tipi montaj hattı yerleşimi

Paralel montaj hatları:

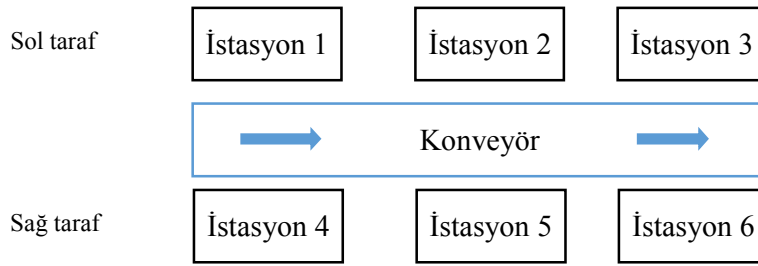
Paralel montaj hatları birçok paralel montaj hattını içeren bir üretim sistemini dikkate alır. Paralel montaj hatları, aynı ya da benzer ürünlerin üretildiği birden fazla paralel hatta, istasyonlara görev atamalarının eş zamanlı yapılması ve dolayısıyla kaynak en küçüklemesini hedefleyen yeni bir kavramdır [18]. Paralel montaj hattı dengeleme problemi 'de birden fazla montaj hattının birlikte dengelenmesiyle, gerekli operatör sayısının enazlanması amaçlanmaktadır.



Şekil 2.10. Paralel montaj hattı yerleşimi

Çift taraflı montaj hatları:

Geleneksel düz montaj hatlarında istasyonlar tek tarafta ve bir dizi şeklinde sıralanmıştır. Çift taraflı montaj hatlarında ise iş istasyonları hattın hem sağ hem de sol tarafına paralel olacak şekilde yerleştirilmesi ile tasarlanırlar. Şekil 2.11’de klasik çift taraflı montaj hattı gösterilmektedir. Bu tip montaj hatları genelde kamyon, traktör, otomobil gibi büyük boyutlu ürünlerin üretiminde kullanılırlar. Bu gibi hacimsel olarak büyük ürünler üretilirken montaj işlemi bazen ürünün solunda veya sağında yapılmaya elverişlidir. Örneğin bir otomobilin sağ kapısının montajı otomobilin sağında yapılmaya uygunken, sol kapısı da sol tarafından yapılmaya daha müsaittir. Dolayısıyla bu hatlar, iş parçasının montaj işlemini bandın her iki tarafında bulunan istasyonlardaki operatörler tarafından eş zamanlı olarak yapmaya olanak sağlar.

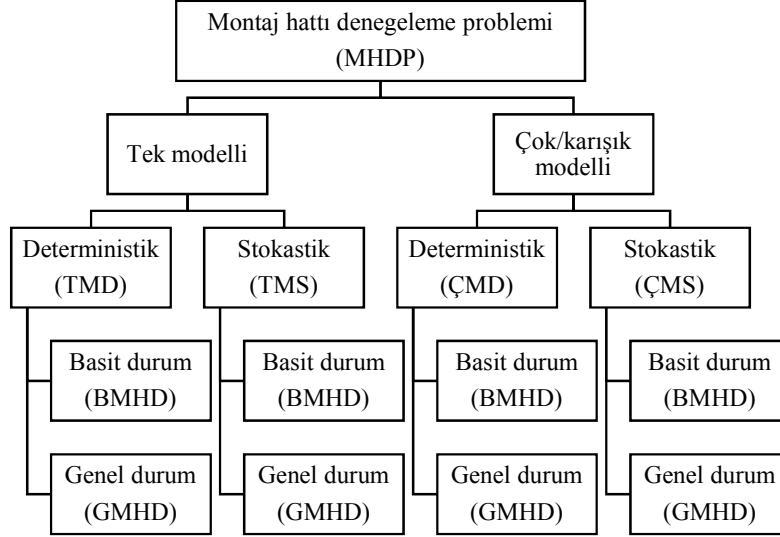


Şekil 2.11. İki taraflı montaj hattı yerleşimi

2.6. Montaj Hattı Dengeleme Problemlerinin Sınıflandırılması

Problem yapısına göre, MHDP iki grupta sınıflandırılmaktadır. İlk grup montaj hattı modellerine göre (tek modellenli ve çok karışık modellenli montaj hattı dengeleme problemleri) sınıflanmaktadır. İkinci grupta ise Baybars’ın sınıflandırmasıdır [12]. Baybars, MHDP’ini, Basit Montaj Hattı Dengeleme (BMHD) problemi ve Genel/Geleneksel Montaj Hattı Dengeleme (GMHD) problemi olmak üzere iki gruba ayırmıştır. MHDP’nin en basit hali olan BMHD problemi, sadece görevler arasındaki öncelik ilişkisi kısıtlarını kapsayan, görev zamanlarının sabit ve belirli olduğu, üretim akışına yönelik istasyonların düz olarak sıralandığı ve tek bir ürünün (modelin) montajının yapıldığı problemdir. Kaynaklarda, BMHD problemlerinin bazı varsayımlarını genelleştiren ya da kaldıran tüm problem tipleri GMHD problemleri olarak adlandırılır. Bu sınıfta yer alan problemler teçhizat seçimi, süreç alternatifleri, bölgeleme kısıtları vb. pratik uygulamaları kapsayan çok geniş bir

uygulama alanına sahiptir. Bir başka ifadeyle, GMHD problemi, BMHD probleminin bir uzantısıdır [11]. MHD'nin sınıflandırılması Şekil 2.12'de verilmiştir.



Şekil 2.12. Montaj hattı dengeleme probleminin sınıflandırılması

TMD problemi, MHD problemlerinde hatta yalnız bir modelin üretildiği ve görev zamanlarının bir birimden diğerine herhangi bir değişiklik göstermediği yani sabit ve belirli olduğu varsayılır. Bu varsayım, montaj hattında makinelerin ve robotların kullanıldığı hatlarda geçerli olmakla birlikte insanların çalıştığı hatlarda çok geçerli olmamaktadır. Buna göre görevler, öncelik ilişkileri sağlanacak ve belirli bir performans ölçüsü eniyilenecek şekilde işistasyonlarına atanırlar. TMD, yukarıda da belirtildiği gibi MHD probleminin orijinal ve en basit şekli olan BMHD problemidir.

BMHD problemi için temel varsayımlar şunlardır [6]:

- Montaj hattında tek bir ürünün montajı büyük miktarlarda gerçekleştirilir.
- Görev zamanları belirli ve sabittir.
- Problemin öncelik diyagramı bilinmektedir.
- Bir görev iki ya da daha fazla işistasyonu arasında bölüşdürülemez.
- Bir görev kendisinden önce gelen görevler tamamlanmadan başlayamaz.
- Bir istasyona atanan görevlerin tamamlanma zamanlarının toplamı, çevrim zamanına eşit yada ondan küçük olmalıdır.

BMHD problemlerinin çözümü için çeşitli performans ölçüleri kullanılmıştır.

BMHDP'nin versiyonları Çizelge 2.2'de verilmiştir.

Çizelge 2.2. BMHDP' nin sınıflandırılması

BMHD problemi versiyonları		Çevrim zamanı (C)	
		Verilmiş	Enküçükle
İstasyon sayısı	Verilmiş	BMHDP-F	BMHDP-2
	Enküçükle	BMHDP-1	BMHFP-E

BMHDP – F: Çevrim zamanı ve istasyon sayısı verilir, uygunluk kontrolü yapılır.

BMHDP – 1: Çevrim zamanı verilir, istasyon sayısı enküçüklenir.

BMHDP – 2: İstasyon sayısı verilir, çevrim zamanı enküçüklenir.

BMHDP – E: Çevrim zamanı ve istasyon sayısı birer değişken iken, hat etkinliği enbüyüklenir.

Literatürde yer alan pek çok çalışmada BMHDP ele alınmıştır. BMHDP'de tüm parametreler kesin olarak bilinmektedir ve yukarıdaki varsayımlar sağlanmaktadır. BMHD problemine farklı kısıtların ya da faktörlerin (paralel istasyonlar, paralel görev, bölgeleştirme kısıtları vb.) ilave edilmesi ile problemin yapısı GMHD problemine dönüşür. Tek Modelli Stokastik (TMS) problemi tek tip ürün ve modelin üretilmesi için gerekli olan görevlerin tamamlanma zamanlarının özellikle işgücü performansının değişkenliğinden kaynaklanan farklılaşmaların meydana geldiği durumları içerir. Ayrıca, işçilerin işlem zamanlarının nadiren de olsa sabit olduğunu ve manuel montaj hattı için daha gerçekçi olmak üzere görev zamanlarının değişkenliğini belirtir. Görev zamanındaki değişiklik, insan ve/veya süreçten kaynaklanmaktadır. Söz konusu değişkenliğin sebepleri arasında; yorulma, dikkatin dağılması, yetersiz nitelikteki işgücü, iş tatminsizliği, hatalı girdiler, araç-gereç bozulmaları vb. faktörler sayılabilir. Bu durum, istasyonlara atanan görevlerin toplam süresinin çevrim zamanını aşmasına ve dolayısıyla bazı görevlerin tamamlanamamasına sebep olabilmektedir. Özellikle görevler arasındaki öncelik ilişkileri dikkate alındığında, bazı görevlere başlanamadığı da görülebilmektedir. Hatta

tamamlanamayan görevler, ya en kısa sürede tamamlanmak üzere hattın dışına alınırlar ve orada tamamlanırlar, ya da bitmemiş ürün olarak ayrılırlar. Bu şekilde yarım kalan veya hiç başlanmayan görevlerde, görev zamanlarının stokastik olduğunun kabul edilmesi, montaj hatlarını iyileştirme politikalarından birisidir. Stokastik MHDP’de ise, görev zamanlarının kesin olarak bilinmediği varsayılmakta fakat görev zamanları belirli bir olasılık dağılımı ile modellenebilmektedir. Buna göre problem, öncelik ilişkileri dikkate alınarak ve belirli bir performans ölçüsü eniyilenecek şekilde görevlerin uygun iş istasyonlarına atanmasıdır. Manuel montaj hattı için daha gerçekçi bir yaklaşımdır. Bu tip problemlerde, amaç toplam işgücü ve toplam beklenen tamamlanmama maliyetinden oluşan toplam sistem maliyetinin enküçüklenmesidir [6].

Tüketici sayılarının ve bilinç düzeylerinin artması ile birlikte diğer imalatçı kuruluşların rekabeti, tek tip ürünün seri üretimini engellemektedir. Bu durumda çok modelli ve karışık modelli hat tasarımları gündeme gelmektedir. Çok/Karışık Modelli Deterministik (ÇMD), görev zamanlarının deterministik (sabit ve kesin belirli) olduğunu kabul eden ve bir montaj hattında farklı ürünlerin veya aynı ürünün farklı modellerinin üretildiği MHD problemidir. Çok modelli üretim, iki veya daha fazla ürünün büyük partiler halinde ayrı bir şekilde üretilmesidir. Çok modelli üretim akışı, bir partinin üretiminin tamamlanmasından sonra diğer partinin üretimine geçilmesiyle sağlanır. Karışık modelli montaj hatlarında ise, ürünlerin farklı modellerinin çok düşük hacimlerde (genellikle bir adet olarak ifade edilen) herhangi bir sırada karışık olarak üretilmesi söz konusudur. Her iki durumda da benzer üretim süreçleri söz konusudur. Tek modelli montaj hatlarından farklı olarak model seçimi, model sıralaması, model parti büyüklüklerinin belirlenmesi vb. problemlerin ele alındığı çok/karışık modelli hatlar, tek modelli hatlara göre daha karmaşık ve zor problemlere yol açarlar. Bu tip üretimin en önemli faydası, müşteri isteğini karşılamak üzere değişik modellerin sürekli olarak üretilmesi ve büyük mamul stoklarına gidilmemesidir. Modellerin değişik işlem zamanlarından doğan dezavantajı ise, iş akışının düzenli olmaması, dolayısıyla da daha fazla istasyon boş zamanı ve yarı bitmiş mamullerden oluşan yığınlardır.

Çok/Karışık Modelli Stokastik (ÇMS) problem perspektifinin yukarıdaki problem yapısından tek farkı, görev zamanlarının stokastik olmasıdır. Ayrıca, bu problem yapısında model sıralama problemi daha karmaşıktır. Bu karmaşıklığın sebebi, öğrenme etkileri, operatör yetenek seviyesi, iş tasarımı ve operatör görev zamanı değişkenliği vb. faktörlerin

hattın sıklıkla montajı yapılan her bir ürün için yeniden dengelenmesini zorunlu kılması, problemin analiz edilmesini daha da güçleştirmektedir.

Çok modelli hatlarda yapılan dengeleme işlemleri karışık modelli hatlarda yapılan işlemlerden daha kolaydır. Çünkü bu hatlarda üretimlerde benzer imalat gereksinimleri olduğundan hattın bir model için dengelenmesi (tasarlanması) ve elde edilen sonuçlardan yararlanılarak hat üzerinde gerekli düzenlemelerin yapılmasıyla diğer modeller için de uygun bir hale getirilmesi mümkündür. Çok modelli ve karışık modelli hatların dengelenmesi probleminin çözümünde yaşanan zorluklar nedeniyle bu tip problemler için en iyi çözümü veren kesin çözüm yöntemleri yerine sezgisel yöntemlerden yararlanılır [11].

3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Montaj hatları ile ilgili eski yıllardan günümüze kadar birçok çalışma yapılmıştır. Montaj hatlarının dengelenmesi düşüncesi ilk kez Bryton'ın yüksek lisans tezinde yer almıştır. Montaj hattı dengeleme problemi ise ilk defa Salveson tarafından 1955 yılında ortaya atılmıştır. Modelin amaç fonksiyonu, istasyonlardaki toplam boş zamanın en küçüklenmesidir. Bowman [19], problemi doğrusal 0-1 tamsayılı programlama şeklinde formüle ederek, görevlerin bölünmesi problemini ortadan kaldırmıştır. Talbot ve Patterson [20] tek model montaj hattı dengeleme problemleri için bir tamsayılı programlama algoritması geliştirmişlerdir. Gokcen ve Erel [21], çok modellenli montaj hatları için bir tamsayılı formulasyon geliştirmişlerdir.

Ghosh ve Gagnon [15], 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.

3.1. Stokastik Montaj Hattı Dengeleme İçin Literatür Araştırması

Deterministik görev zamanlı MHD problemlerini çözen birçok 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. Stokastik montaj hattı dengeleme ise ilk defa Moodie ve Young [22] tarafından ortaya koyulmuştur. Stokastik görev zamanlarının genellikle normal dağılıma uyan bağımsız rassal değişkenlerden oluştuğu kabul edilmektedir. Verilen bir olasılığa göre, her bir istasyonun toplam zamanı, çevrim zamanını aşmayacak şekilde görevler istasyonlara atanır. Görev zamanlarının farklı olasılık dağılımlara uyduğunu kabul eden çalışmalar da vardır: [23-25].

Literatürde bu konuda yapılmış çalışmalar Çizelge 3.1 verilmiştir [26].

Çizelge 3.1. Stokastik görev zamanlı montaj hatlarını dikkate alan çalışmalar

		STOKASTİK GÖREV ZAMANLI MONTAJ HATTI Dengeleme PROBLEMİNİ İÇEREN ÇALIŞMALAR
TEK MODELLİ	TEK AMAÇ	Moodie ve Young [22], Mansoor ve Bentuvia [27], Ramsing ve Downing [28], Reeve ve Thomas [29], Moberly ve Wyman [30], Kottas ve Lau [31], Kottas ve Lau [32], Kottas ve Lau [33], Vrat ve Virani [34], Buxey [35], Raouf ve Tsui [36], Shtjib [37], Sculli [38], Driscoll ve Abdelshafi [39], Silverman ve Carter [40], Shin [41], Betts ve Mahmoud [42], Sarin, Erel [43], Suresh ve Sahu [44], Suresh, Vinod [45], Khan ve Day [46], Ağpak, Gökçen [9], McMullen ve Tarasewich [47], Liu, Ong [48],
	ÇOK AMAÇ	
ÇOK MODELLİ	TEK AMAÇ	Chakravarty ve Shtub [49], McMullen ve Frazier [50],
	ÇOK AMAÇ	McMullen ve Frazier [51]

3.2. Maliyet tabanlı Montaj hattı dengeleme İçin Literatür Araştırması

Amen [52], Maliyet Tabanlı Montaj Hattı Dengeleme Problemini tanıtarak, karakteristik özelliklerinden bahsetmiştir. Maliyet Tabanlı Montaj Hattı Dengeleme Problemini, istasyonların “maksimum doluluk” (Maximally loaded station rule) kuralına göre çözüldüğünde optimal çözümü kaçırdığını belirterek, bu kriter yerine “iki istasyon” (Two-stations rule) kuralına göre çözülmesi gerektiğini belirtmiştir. Problemin optimal çözümünü bulmak için 7 tane baskın kural kullanan Dal-sınır algoritması önermiştir. Bu method birerleme yöntemini kullanarak çözüm aramaktadır. Tüm çözümlere bakmamak için sınır kuralları önermiştir.

Amen [53], Montaj Hattı Dengeleme Probleminin çözümü için kullanılan sezgisel algoritmaları sınıflandırarak, Maliyet Tabanlı Montaj Hattı Dengeleme Problemini çözmek için yeni bir sezgisel algoritma önermiştir. Sezgisel algoritmaların kullandığı öncelik kurallarına yeni bir tanesini eklemiştir (best change of idle cost). Problemi çözmek için yeni bir yaklaşım önermiştir (exact solution of sliding problem windows).

[54], Maliyet Tabanlı Montaj Hattı Dengeleme Problemini çözmek için kullanılan sezgisel algoritmalar, çözüm kalitesi ve çözüm süresine göre karşılaştırılmıştır.

Scholl ve Becker [55], Amen [52] makalesinde Maliyet Tabanlı Montaj Hattı Dengeleme Probleminin çözümü için önerdiği Dal-Sınır algoritmasının kullandığı baskın kurallardan bir tanesinin yanlış olduğunu belirterek, düzeltmiştir. Bu kurallara yeni bir tanesini eklemiştir.

Amen [56], Maliyet Tabanlı Montaj Hattı Dengeleme Problemi çözümü için matematiksel model geliştirmiştir. Bu modelin kısıtlarında bazı geliştirmeler önermiştir. Maliyet Tabanlı Montaj Hattı Dengeleme Probleminin çözümünün, Zaman Tabanlı Montaj Hattı Dengeleme Problemine göre daha zor olduğunu göstermiştir.

Padron, Resto [57], Maliyet Tabanlı Montaj Hattı Dengeleme Problemi çözümü için kesin sonuç veren algoritma ile sezgisel algoritmayı birlikte kullanarak, maliyeti en küçükmeye çalışmışlardır. Problemin çözümünde operasyon maliyetleri, iş ile ilgili maliyetler, istasyon yatırım maliyetleri dikkate alınmıştır.

Grzechca [58], Maliyet Tabanlı Montaj Hattı Dengeleme Problemi çözümü için 2 aşamalı sezgisel algoritmalarından oluşan bir yöntem önermiştir. İlk aşamada ele alınan problem zaman tabanlı montaj hattı dengeleme problemi olarak çözülmektedir. Daha sonra ikinci aşamada ise, elde edilen sonuç üzerine maliyet tabanlı sezgiseller uygulanarak çözüm iyileştirilmeye çalışılmıştır.

Yazdanparast, Hajihosseini [59], genel montaj hattı dengeleme problemi için Andres, Miralles [60] tarafından önerilen modeli dikkate alarak bir maliyet tabanlı model önermişlerdir. Roshani, Fattahi [61], maliyet tabanlı iki taraflı montaj hatları için bir tavlama benzetim algoritması geliştirmişlerdir.

Bu tez çalışması içerisinde ele alınan Maliyet Tabanlı Stokastik hat dengeleme problemi (MSHDP), bu problem için ele alınan ilk çalışma olacaktır.

4. MALİYET TABANLI STOKASTİK MONTAJ HATTI Dengeleme (MSMHD) PROBLEMİ

4.1. Stokastik Montaj Hattı Dengeleme

Bir montaj hattında görev zamanlarının çoğu zaman deterministik olduğu varsayımı dikkate alınmıştır. Oysaki görev zamanlarının çeşitli sebeplerden dolayı değişkenlik gösterebildiği, başka bir deyişle görev zamanlarının stokastik olabileceği bilinmektedir. Görev zamanındaki değişiklik, insandan ve/veya süreçten kaynaklanmaktadır. Yorulma, dikkatin dağılması, yetersiz nitelikteki işgücü, iş tatminsizliği, hatalı girdiler, hatalı montaj, araç/gereç bozulmaları değişkenliğin temel sebeplerini oluşturmaktadır. Bu durum, istasyonlara atanan işlerin aldıkları toplam zamanın, çevrim zamanını aşmasına ve dolayısıyla bazı görevlerin bitirilememesine, bazı istasyonların da boş kalmasına sebep olmaktadır. Özellikle işler arasındaki öncelik ilişkileri göz önüne alındığında bazı görevlere hiç başlanamamaktadır. Bu şekilde yarım kalan veya hiç başlanmayan işlere yönelik olarak değişik hat iyileştirme politikaları geliştirilmiştir [62].

Söz konusu stokastik problemin çözümü için geliştirilen Metotlar, Tip 1 ve Tip 2 olmak üzere iki ana gruba ayrılabilir:

- Tip 1 grubundaki metotlar deterministik problem için geliştirilen metotların değiştirilmesiyle elde edilmiş ve iki temel yaklaşım kullanmışlardır: Birinci yaklaşım istasyonlardaki görev süreleri toplamının, çevrim zamanının belli bir oranını geçmemesi koşuluyla insan gücü maliyetini en küçüklemekte, ikinci yaklaşım ise istasyonlara atanan işlerin verilen çevrim zamanı içinde tamamlanabilme ihtimallerinin belli bir değerden küçük olmaması koşuluyla işgücü maliyetini en küçüklemektedir.
- Tip 2 grubundaki metotlar, özellikle problemin stokastik durumu için geliştirilmişlerdir ve yukarıda sözü edilen amaç fonksiyonunu en küçüklemektedir. Bu tür dengeleme problemlerinde araştırmacıların çoğu görev zamanlarının normal dağılıma göre değer aldıklarını, bazıları ise görev zamanlarının değişkenlik katsayılarının (s/μ) tüm işler için sabit olduğunu varsaymışlardır [63]. Görev zamanlarının farklı olasılık dağılımlarına uyması mümkün görünse de literatürde daha çok görev zamanlarının normal dağılıma uyduğunu varsayan çalışmalar mevcuttur.

4.2. Maliyet Tabanlı Montaj Hattı Dengeleme

Günümüzde uluslararası rekabet hızla büyümektedir. Bu rekabet şartlarında var olabilmenin ön koşulu daima en önde koşabilmektir. Bunun için de çağın dinamik yapısına ayak uydurmak, değişiklik ve yeniliklere açık olmak gereklidir. Firmalar bu yüzden yeni sistemleri, teknikleri ve teknolojileri bünyelerine adapte etmek zorundadırlar. Aksi takdirde yarışta gerilerde kalmaya mahkum olurlar. Son yıllarda sanayide ortaya çıkan acımasız rekabet, üretim maliyetlerini daha fazla anlamlı hale getirmiştir. Montaj hattı sistemine sahip başarılı üretim sistemlerinde dahi, üretim maliyetlerini aşağı çekme çabası bir zorunluluk haline gelmiştir.

Bilindiği üzere bir montaj hattında üretilen birime dair toplam maliyet, 3 unsuru içermektedir:

1) Hammadde Maliyeti

Nihai ürünün temel yapısını oluşturan hammaddelerin maliyetidir. Bunlar ürün maliyetine kolayca yansıtılırlar.

2) İşgücü maliyeti

Ürünün üretiminde bizzat çalışan, hammaddelerin ürün haline gelmesine emeği ile doğrudan katkıda bulunan işçiliğin maliyetidir.

3) Genel üretim maliyetleri

Hammadde ve işçilik dışında kalan tüm üretim maliyetleridir. Bu maliyetlerin ürünlerle ilişkisi dolaylı ve geneldir. Bu nedenle bu maliyetler, ancak dağıtım işlemi ile oransal olarak ürünlere yüklenmektedirler.

Toplam maliyeti azaltılması, yukarıda ifade edilen bileşenlerin azaltılması ile mümkün olabilecektir. Geleneksel montaj kökenli, otomobil, ev aletleri, kameralar gibi sektörlerde son montajın genellikle, emeğe dayalı olarak yapıldığı, otomasyonun fazla olmadığı üretim ortamlarıdır. Son montaj hatlarında tedarikçiden satın alınan veya firma içinde üretilen yarı mamullerin montaj iş elemleri yapılmaktadır. Yarı mamullerin montajı hangi istasyonda

yapılırsa yapılısın, satın alma maliyeti veya üretim maliyeti (son montaj hattı için malzeme maliyetidir) aynı olacaktır. Dolayısıyla, malzeme maliyetinin ve genel üretim giderlerinin azaltılması, son montaj hattı etkinliğinin artırılmasıyla doğrudan ilgili olmadığı değerlendirilmektedir. işgücü maliyeti, özellikle emek yoğun özelliğe sahip son montaj hatlarında toplam maliyetin büyük bir yüzdesini oluşturmaktadır. Amen [52], hatta kullanılan makinelerin sermaye maliyeti anlamında ilişki kurmuş olsa da, özellikle emek yoğun olduğu varsayılan son montaj hattında, istasyon sayısının sabit olduğu düşünülürse, dikkate alınması gereken bir maliyet bileşeni olarak görülmemektedir.

Üretimde kullanılan tüm duran varlıkların amortisman giderleri, görevlerin istasyonlara atanmasıyla ilişkili değildir. Yani hangi görevi, hangi istasyona atarsanız bu maliyetler değişmeyecektir. Son montaj hatlarında genellikle emek yoğun bir üretim gerçekleştirildiğinden, mevcut ücret haddi (oranı) sisteminin analiz edilmesi zorunludur.

İşçiye ödenecek ücretin belirlenmesine ilişkin önemli kavramlardan birisi de ücret haddidir (oranıdır). Ücret haddi (oranı); belirli bir zaman içerisinde veya belirli bir üretim birimi başına ödenen ücreti gösterir. Ücret geliri ise iş süresi ve ücret haddinin çarpımına eşittir. İş veren bakımından işçinin maliyetinin hesaplanmasında ücret geliri göz önüne alınır. Çünkü ücret haddi çıplak ücrettir.

Bir esasa dayanmayan ve tamamen şahsî görüşlere göre yapılan ücretlendirme haliyle bazı dengesizliklere sebep olmakta, bu da personel arasında huzursuzluk yaratmaktadır. Burada anlaşılması gereken husus iş değerlendirmesinin, işin mutlak değerini değil, işler arasındaki karşılaştırmalı değerlendirmeyi tayin eden bir metod olduğudur. Yani iş değerlendirmesi herhangi bir iş yapan kimsenin ne kadar ücret alması gerektiğini değil, A işini yapan işçinin B işini yapan işçiye nazaran ne oranda ücret alması gerektiğini tayin eder.

Çoğu gelişmiş sanayi ülkelerinde (örn. Almanya endüstrisi) sendikalar ve çalışanlar arasındaki neredeyse tüm ortaklaşa anlaşmalar, bir ücret farklılaşmasını içermektedir. Bir görevin yapılmasındaki zorluk ne kadar fazlaysa, görevin ve ücret oranının değeri de o kadar yüksek olacaktır.

Bir istasyonda çalışan bir işçinin ücret oranı, o operasyonda/istasyonda yapılan en zor göreve (en yüksek iş değerli göreve) bağlıdır. Bu ücret oranı, toplam çevrim zamanı (boş zaman + istasyon zamanı) için ödenmek zorundadır. Çalışana, operasyonun süresine bakılmaksızın tüm bir çevrim zamanı için ödeme yapılmak zorundadır. Dolayısıyla ürün birimi başına toplam iş gücü maliyeti, tüm istasyonların ücret oranları toplamının çevrim zamanı ile çarpılmasıdır.

Her görev, zorluk dercesine göre toplam maliyetin belli bir kısmını tüketmektedir. Toplam maliyet unsurlarından malzeme ve genel üretim giderlerini kapsam dışında tuttuğumuzdan, her bir görevin tükettiği maliyet işgücü maliyeti olarak değerlendirilmektedir. Başka bir ifadeyle, görev maliyetleri, istasyon maliyetlerini oluşturmaktadır. İstasyon maliyetleri de işgücü maliyetini oluşturmaktadır. Yani, görev maliyetlerinde zorluk ve kolaylıklarına göre farklılıkların olması, işgücü maliyetinde muhtemel bir azalmanın mümkün olabileceğine işaret etmektedir.

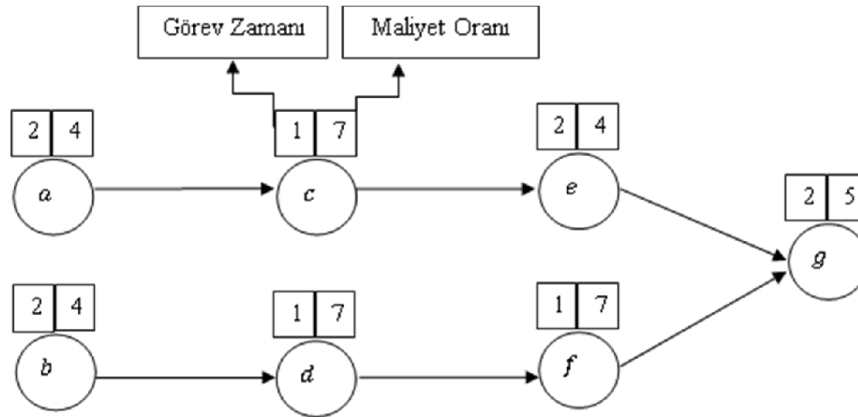
Zaman Tabanlı Montaj Hattı Dengeleme Problemini çözmek için önerilen kesin sonuç veren ve sezgisel algoritmalar, belirli kriterler doğrultusunda yeni istasyonlar kurmaktadır. Örneğin atanabilecek olan tüm işler şu an ki istasyon çevrim zamanını geçiyorsa, yeni istasyon aç gibi. İş süreleri, çevrim süresi ve öncelik ilişkileri gözden geçirilerek işler istasyonlara uygun biçimde atanmaya başlanır. Atama yapılan her bir işten sonra, istasyon süresinden atanan işin süresi çıkarılarak kalan süre bulunur ve kalan süreyi aşmayacak biçimde atama yapılmaya devam edilir. Tüm işler istasyonlara atanana kadar prosedür sürdürülür.

Herhangi bir istasyona atanmamış ve öncelik ilişkileri sağlanmış işe, yani tüm öncül işleri önceki istasyonlara atanmış ise, buna uygun iş denmektedir (available task). Uygun bir iş, bir istasyona atandığında çevrim zamanını aşmıyorsa, bu iş de atanabilir iş olarak adlandırılmaktadır. (assignable task). Eğer bir istasyona atanabilir herhangi bir iş yoksa, yani atanabilir iş kümesi boşsa, bu istasyona maksimum dolu denmektedir. Hiç bir istasyona atanmamış işler varsa ve tüm istasyonlar maksimum dolu ise, yeni bir istasyon açılır. Zaman tabanlı Montaj Hattı Dengeleme problemini çözmek için maksimum dolu istasyon kuralı baskın bir kriterdir. Yani bir istasyon maksimum dolu olmadan kapanmaz.

Zaman tabanlı (time oriented) yöntemlerde ücret farklılıkları dikkate alınmamaktadır. Maliyet tabanlı montaj hattı dengeleme probleminde, verilen görevlerin maliyet değerleri, görevin işgücü bakımından değerini ifade etmektedir. Amaç ise, sadece hattaki istasyon sayılarının minimizasyonu değil (istasyon sayısı minimizasyonu yapılmıyor. Tam tersine Amen istasyon sayısı arttıkça maliyetin düşebileceğini belirtmiştir), aynı zamanda da birim başına toplam üretim maliyetini minimize etmektir. Maliyet tabanlı yöntemleri kullanarak görevlerin yeniden atanmasıyla üretim maliyetlerinde %20'ye kadar tasarruf sağlamak mümkündür.

Zaman tabanlı Montaj Hattı Dengeleme Probleminin çözümünde başarılı olan maksimum dolu istasyon kuralı, Maliyet Tabanlı Montaj Hattı Dengeleme Probleminin optimal çözümü kaçırdığı için kullanılamaz. Aşağıdaki örnekte bu durum açıklanmaktadır.

7 görevden oluşan ve tek bir ürüne ait öncelik diyagramı Şekil 4.1'de verilmektedir. Düğümlerin içerisindeki sayılar görevleri, düğümleri bağlayan oklar öncelik ilişkilerini ve düğümlerin üstündeki sayılar ise görev zamanlarını (sol) ve maliyet oranlarını (sağ) göstermektedir. Bu örnek için çevrim zamanı 3 olarak verilmiştir.



Şekil 4.1. Örnek öncelik diyagramı

Yukarıdaki problem maksimum dolu istasyon kuralı uygulanarak Zaman Tabanlı MHD Problemi olarak ve maksimum dolu istasyon kuralı uygulanmadan Maliyet Tabanlı MHD Problemi olarak çözülmüştür. Zaman Tabanlı Montaj Hattı Dengeleme Problemi istasyon sayısını enküçükmeye çalışırken, Maliyet Tabanlı Montaj Hattı Dengeleme Problemi bir ürünün toplam üretim maliyetini enküçükmeye çalışmaktadır. Optimal sonuçlar Çizelge

4.1'de verilmiştir. Çizelge 4.1'deki sonuçlardan görüldüğü üzere, maksimum dolu istasyon kuralı uygulanarak çözülmüş olan Zaman Tabanlı Montaj Hattı Dengeleme Probleminin optimal istasyon sayısı 4 çıkmıştır. Buna karşılık toplam üretim maliyeti 78 br'dir. Oysaki, Maliyet Tabanlı Montaj Hattı Dengeleme Probleminin optimal toplam üretim maliyet değeri 72 br'dir. Bu optimal çözümde istasyon sayısının 5 olması dikkat çekmektedir.

Çizelge 4.1. 7 görevli problemin optimal sonuçları

		Zaman Tabanlı MHD		Maliyet Tabanlı MHD	
	İş istasyonu	Görevler	Maliyet oranları	Görevler	Maliyet oranları
	1	a1, a3	7	a1	4
	2	a2, a4	7	a2	4
	3	a5, a6	7	a3, a4, a6	7
	4	a7	5	a5	4
	5	-	-	a7	5
$\sum_{m=1}^M K_m^s$			26		24
k	3 * 26 =		78	3 * 24 =	72
M	4				5

Buradan çıkarılması gereken üç sonuç vardır. Birincisi, eğer problem maksimum dolu istasyon kuralına göre çözülmüşse, Maliyet Tabanlı Montaj Hattı Dengeleme Probleminin optimal sonucu bulunamamaktadır. İkincisi, istasyon sayısındaki enküçükleme toplam maliyeti azaltmamaktadır. Tam tersine çözümden de görüleceği gibi, istasyon sayısındaki artış, toplam üretim maliyetini 78'den 72'ye düşürmüştür. Yani Maliyet Tabanlı Montaj Hattı Dengeleme Problemi çözülmüşken, istasyonların maksimum doldurması yaklaşımı, optimal sonucun elde edilememesine neden olmaktadır.

Çizelge 4.2. 7 görevli problemin istasyon (operatör) boş zamanları

İş istasyonu	Zaman Tabanlı MHD		Maliyet Tabanlı MHD	
	Görevler	Boş zamanlar	Görevler	Boş zamanlar
1	a1, a3	0	a1	1
2	a2, a4	0	a2	1
3	a5, a6	0	a3, a4, a6	0
4	a7	1	a5	1
5	-	-	a7	1

Üçüncü sonuç ise, Zaman Tabanlı Montaj Hattı Dengeleme Probleminde amaç, istasyon sayısını enküçüklerken, istasyon (operatör) boş zamanlarını da (idle time) enküçüktür. Maksimum dolu istasyon kuralı uygulanarak çözülen problemin optimal çözümündeki istasyon boş zamanlarına bakıldığında, bu amaç başarılmış görülmektedir. Fakat Maliyet Tabanlı Montaj Hattı Problemindeki amaç bir ürünün toplam üretim maliyetini enküçükleme olduğu için, bu istediğimiz sonuç değildir. Yani maksimum dolu istasyon kuralı istasyon boş zamanlarını enküçüklerken bir ürünün toplam üretim maliyetini de enküçüklemez. Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2'deki sonuçlara birlikte bakıldığında açıklıkla görülüyorki, maksimum dolu istasyon kuralı uygulanarak bulunan optimal sonuçta toplam istasyon boş zamanı 1 iken, toplam üretim maliyeti 78 br, ama Maliyet Tabanlı Montaj Hattı Dengeleme Probleminin optimal sonucunda toplam istasyon boş zamanı 4 iken, toplam üretim maliyeti 72 br'dir. Yani 7 görevli bir ürünün toplam üretim maliyeti, toplam istasyon boş zamanı 4 iken, toplam istasyon boş zamanı 1 olan üretim şekline göre daha küçüktür. Tabi ki, istasyon boş zamanlarının da bir maliyeti vardır. Maliyet Tabanlı Montaj Hattı Dengeleme Problemi çözümünde kullanılan amaç fonksiyonu Eş. 4.1 gibidir.

$$K = \sum_{m=1}^M C \cdot k_m^s = C \cdot \sum_{m=1}^M \max\{k_i^t | i \in I_m^s\} \quad (4.1)$$

Eş. 4.1'e göre bir ürünün toplam üretim maliyeti hesap edilirken, her istasyonun ücret oranları, istasyon çevrim zamanıyla çarpılmaktadır. Yani ücret oranları istasyon süreleriyle çarpılmadığı için, istasyon boş zamanlarının maliyetlerinde dikkate alınmıştır. Bundan dolayı Maliyet Tabanlı Montaj Hattı Dengeleme Probleminin çözümünde maksimum dolu

istasyon kuralı yerine, istasyon doluluk oranını biraz daha gevşek tutan iki istasyon kuralı kullanılmaktadır.

Maliyet Tabanlı Montaj Hattı Dengeleme Problemi; montaj maliyetlerini en küçük hale getirecek, talepleri karşılayacak ve montaj sürecindeki kısıtları karşılayacak şekilde, görevlerin iş istasyonlarına mümkün atamasını kapsamaktadır.

4.3. İki İstasyon Kuralı (Two Stations Rule)

Bu kuralın kullanılması için iki tane ardışık istasyondaki ($m-1$. istasyon ve m . istasyon) toplam görev zamanlarının, çevrim zamanını geçmesi gerekmektedir. Eğer $d_{m-1}^s + d_m^s > C$, $m = 2, \dots, M$, $d_m^s = \sum_{i \in I_m^s} d_i^t$ ise, ya yeni $m+1$. istasyonu açılmaktadır ya da ileriki diğer iş, m istasyonuna atanmaktadır. Eğer m istasyonu maksimum dolu ise, $m+1$. istasyon açılmak zorundadır. Açıkça görüldüğü gibi istasyonlar maksimum dolu olduğu zamanlar iki istasyon kuralı kullanılmak zorundadır.

$d_{m-1}^s + d_m^s < C$, $m = 2, \dots, M$, $d_m^s = \sum_{i \in I_m^s} d_i^t$ olduğu durumlarda, iki istasyon kuralı uygulanmaz. Bu gibi durumlarda ardışık iki istasyonda yer alan görevleri birleştirip, tek istasyonda birleştirmek daha az maliyetlidir. Ayrıca iki istasyonda yer alan tüm görevlerin aynı istasyona atanması öncüllük ilişkilerini de bozmaz.

Örneğin k_{m-1}^s , $m-1$. istasyonun ücret haddi (oranı) ve k_m^s m . istasyonun ücret haddi (oranı) olsun. Eğer $d_{m-1}^s + d_m^s < C$ eşitsizliği geçerli ise, $m-1$. ve m . istasyondaki görevler tek istasyonda birleştirilmeden önce üretilecek bir birim ürün için maliyet $c(k_{m-1}^s + k_m^s)$ 'dir. $m-1$. ve m . istasyondaki görevler tek istasyonda birleştirilirse, bir birim ürün maliyeti $c \max\{k_{m-1}^s, k_m^s\}$ olur. Dolayısıyla $d_{m-1}^s + d_m^s < C$ eşitsizliği geçerli olursa ve ardışık iki istasyondaki görevler tek istasyonda birleştirilirse, $\Delta k = c \min\{k_{m-1}^s, k_m^s\}$ kadar maliyete tasarrufumuz olur. $d_{m-1}^s + d_m^s > C$ eşitsizliği geçerli olduğunda iki istasyondaki toplam görev süreleri çevrim zamanını aştığı için, görevleri tek istasyonda birleştirmek mümkün değildir. Bu gibi durumda iki istasyon kuralını uygulamak kaçınılmazdır.

Sonuç olarak Zaman tabanlı Montaj Hattı Dengeleme Problemi çözümü için baskın kriter olan maksimum dolu istasyon kuralı, Maliyet tabanlı Montaj Hattı Problemi çözümü için baskın kriter değildir. Aynı zamanda Maliyet tabanlı Montaj Hattı Dengeleme Probleminin

optimal çözümünü bulmayı engellemektedir. Dolayısıyla Maliyet tabanlı Montaj Hattı Dengeleme Probleminin çözümü için daha az baskın olan iki istasyon kuralı kullanılmalıdır. İki istasyon kuralı ile bulunan çözümler, maksimum dolu istasyon kuralı ile bulunan çözümleri de içermektedir.

5. MSMHD PROBLEMİ İÇİN ŞANS KISITLI 0-1 TAMSAYI MATEMATİKSEL MODELİ

5.1. Şans Kısıtlı Stokastik Programlama

Doğrusal programlama problemi olarak modellenen birçok gerçek hayat probleminde katsayılar rasgele değişken olarak ortaya çıkar. Bu durumda kurulan probleme Stokastik Programlama problemi adı verilmektedir. Belirsizlik altındaki doğrusal programlar için bazı yaklaşımlar geliştirilmiştir. Belirsizlik aslında doğrusal programlama parametrelerinin kesin olarak belirlenmesinin zor olduğu durumlarda ortaya çıkar. Stokastik programlamada rasgele değişken içeren tüm kısıtların bir olasılığa sahip olması gerekmektedir. Burada genel yaklaşım, problemin olasılıksal yapısını, problemin gerçek yapısını bozmadan ona eşdeğer olan deterministik duruma dönüştürmektir. Bu tip problemlerde kesinlik elde edilir ve simpleks yöntem ile çözülür [64].

Stokastik programlama teknikleri çok aşamalı programlama ve şans kısıtlı programlama olmak üzere ikiye ayrılır. Bu çalışmada ele alınan şans kısıtlı Stokastik Programlama tekniğidir. Bu teknik, rasgele kısıtları belirli seviyelerine göre deterministik duruma getirmeyi amaçlar.

Şans kısıtlı stokastik programlama ilk olarak Charnes ve Cooper [65] tarafından modellenmiştir. Symonds [66], çalışmasında şans kısıtlı programlama problemleri için deterministik çözümler sunmuştur. Kolbin [67], stokastik programlama problemlerini açıkça tanımlamıştır. Planlama ve yönetim problemlerindeki risk ve belirsizliği incelemiş, şans kısıtlı programlama modellerini sunmuştur.

Katsayıların normal dağılıma sahip rasgele değişkenler olmaları durumunda, rasgele kısıtların ve amaç fonksiyonunun deterministik hale dönüştürülmesi kolay ve zahmetsizdir. Bu nedenle şans kısıtlı problemlerin çoğunda katsayıları normal dağılıma sahip olan modeller ele alınmıştır. Ancak gerçek hayat problemlerinde farklı dağılımlara sahip katsayıların da olduğu düşünülerek normal dağılım dışında farklı bir dağılıma sahip şans kısıtlarının da incelenmesine gerek duyulmuştur.

Katsayıların başka dağılımına sahip olması durumunda deterministik eşitliklerin elde edilişleri oldukça karmaşık hesaplamalar gerektirir. Bu da literatürde normal dağılımın tercih edilme sebebini açık bir şekilde ortaya koymaktadır.

Şans kısıtlı stokastik programlama problemi rasgele verileri içerir ve belirlenen olasılık limitlerine kadar kısıt bozulmalarına izin verir. Eğer doğrusal kısıtlar, kısıtlardaki bozulmaların genişliğini belirten olasılık ölçülerinin kümesiyle birleştiriliyorsa doğrusal programlama modeli şans kısıtlı olarak adlandırılır. Kısıtların kısmi bozulmasına izin veren şans kısıtlı stokastik programlama problemi, yaklaşık güvenilirliği sağlayan bir yöntem olarak görülebilir. Bu yöntem genelleştirilmiş ve birçok endüstriyel ve ekonomik problemde uygulanmıştır [68].

5.2. MSMHD Problemi İçin Önerilen Şans Kısıtlı Model

Stokastik montaj hattı dengeleme problem ile deterministik montaj hattı dengeleme problemi arasındaki temel fark görevlerin stokastik durumda, belirli olasılık dağılıma göre değer almalarıdır. Bu tezde Amen [52]'in maliyet tabanlı montaj hattı dengeleme problemi için sunduğu model temel alınmıştır ve şans kısıtlı programlama tekniği ile yeniden modellenmiştir.

MSMHD problemi için aşağıdaki varsayımlar dikkate alınmıştır:

- Montaj hattında sadece bir çeşit ürün üretilmektedir.
- Her bir görev sadece bir istasyona atanabilir.
- Bütün görevler bir diğerinden bağımsızdır.
- Görev zamanları Stokastik ve normal dağılımına uymaktadır
- Öncelik diyagramı belirlidir ve bilinmektedir.
- Bir görev, ancak kendisinden önceki görevler tamamlandıktan sonra başlayabilir.
- Her bir görevin maliyet oranı, görev ücret oranını ve sermaye maliyetini içermektedir.
- Her bir görevin maliyet oranı belirli ve sabittir.
- Her istasyonunda sadece bir operatör çalışmaktadır.
- Her istasyonunda çalışan operatörler her göreve yapabilecek bilgi ve beceriye sahiptir.
- İstasyonlar arası stok tutulmasına izin verilmemektedir.

Deterministik Maliyet Tabanlı MHD problemi için Amen [52]'in modeli aşağıda verilmektedir.

$$\text{Min } k = c. \sum_{j=1}^M k_j^s$$

st:

$$\sum_{j=1}^M x_{ij} = 1 \quad , i = 1, \dots, n \quad (5.1)$$

$$k_j^s \geq k_i^t . x_{ij} \quad , j = 1, \dots, M \quad i = 1, \dots, n \quad (5.2)$$

$$\sum_{i=1}^n t_i . x_{ij} \leq c . S_j \quad , j = 1, \dots, M \quad (5.3)$$

$$\sum_{j=1}^M j . x_{hj} \leq \sum_{j=1}^M j . x_{ij} \quad , \forall i = 1, \dots, n \quad h \in R_i \quad (5.4)$$

$$S_j \geq S_{j+1} \quad , j = 1, \dots, M - 1 \quad (5.5)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad , j = 1, \dots, M \quad , i = 1, \dots, n \quad (5.6)$$

$$S_j \in \{0,1\} \quad , j = 1, \dots, M \quad (5.7)$$

Modelin amacı, bir üretim biriminin toplam üretim maliyetini en küçükmektir. Eş. 5.1 her görevin sadece bir istasyona atanmasını sağlamaktadır ve tüm görevler atanmalıdır. Eş. 5.2, Bir istasyonun maliyet oranı, o istasyona atanan görevlerin en yüksek maliyet oranı olduğunu ifade etmektedir. Eş. 5.3, montaj hattında kullanılan herhangi bir istasyonun toplam iş yükünün, çevrim zamanını aşmamasını sağlamaktadır. Eş. 5.4, görevler arasındaki öncelik ilişkilerinin sağlanmasını ifade etmektedir. Eş. 5.5, istasyonların ardışık kurulmasını sağlamaktadır. Eş. 5.6 ve Eş. 5.7, karar değişkenlerin 0 veya 1 değerini almalarını sağlamaktadır.

Geliştirilen yeni şans kısıtlı 0-1 tamsayı programlama modelinin amacı, istasyona atanan görev zamanları toplamının, istasyon çevrim zamanını aşma olasılığın belirlenen α seviyesinin altında kalacak şekilde ($P_k \leq \alpha$) en küçük maliyet ile dengelemeyi yapmaktır. Model içerisinde stokastik durum ifade eden görev zamanlarının normal olasılık dağılıma uyduğu kabul edilmiştir.

Görev zamanı t_i , $t_i \sim N(\mu_i, \sigma_i^2)$ iken $Y = \sum t_i$ alınır, $Y \sim N(\sum \mu_i, \sum \sigma_i^2)$ $z = \frac{Y - \sum \mu_i}{\sqrt{\sum \sigma_i^2}}$ dönüşümü ile $Z \sim N(0,1)$ olur.

İstasyon zamanını çevrim zamanını aşma olasılığı en fazla α olacağından, $P(Y > C) \leq \alpha$ yazılabilir. Biraz daha düzenleme yapılırsa $1 - P(Y \leq C) \leq \alpha$ ve ya $P(Y \leq C) \geq 1 - \alpha$ olur. Buradan z dönüşümü yapılırsa Eş. 5.8 Eşitliği elde edilir.

$$P\left(z \leq \frac{C - \sum \mu_i}{\sqrt{\sum \sigma_i^2}}\right) \geq 1 - \alpha \quad (5.8)$$

$P(z \leq z_{1-\alpha}) = 1 - \alpha$ olduğundan. Eş. 5.8 den Eş. 5.9 veya Eş. 5.10 elde edilir.

$$z_{1-\alpha} \leq \frac{C - \sum \mu_i}{\sqrt{\sum \sigma_i^2}} \quad (5.9)$$

$$\sum \mu_i + z_{1-\alpha} \sqrt{\sum \sigma_i^2} \leq C \quad (5.10)$$

Eş. 5.10' a görev değişkenleri (x_{ij}) eklendiğinde sonuç olarak Eş. 5.11, yani yeni kısıtlar elde edilir. Bu kısıtlar yeni modelde deterministik çevrim zamanı kısıtlarının yani Eş. 5.3'ün yerini alacaktır.

$$\sum_{i=1}^n \mu_i \cdot x_{ij} + z_{1-\alpha} \sqrt{\sum_{i=1}^n \sigma_i^2 \cdot x_{ij}} \leq c \cdot S_j, \quad j = 1, \dots, M \quad (5.11)$$

Yeni kısıtlar kullanarak (MSMHD) problemi için önerilen şans-kısıtlı programlama modeli aşağıda verilmektedir.

$$\text{Min } k = c. \sum_{j=1}^M k_j^s$$

st:

$$\sum_{j=1}^M x_{ij} = 1 \quad , i = 1, \dots, n \quad (5.12)$$

$$k_j^s \geq k_i^t \cdot x_{ij} \quad , j = 1, \dots, M \quad i = 1, \dots, n \quad (5.13)$$

$$\sum_{i=1}^n \mu_i \cdot x_{ij} + z_{1-\alpha} \sqrt{\sum_{i=1}^n \sigma_i^2 \cdot x_{ij}} \leq c \cdot S_j \quad , j = 1, \dots, M \quad (5.14)$$

$$\sum_{j=1}^M j \cdot x_{hj} \leq \sum_{j=1}^M j \cdot x_{ij} \quad , \forall i = 1, \dots, n \quad h \in R_i \quad (5.15)$$

$$S_j \geq S_{j+1} \quad , j = 1, \dots, M - 1 \quad (5.16)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad , j = 1, \dots, M \quad , i = 1, \dots, n \quad (5.17)$$

$$S_j \in \{0,1\} \quad , j = 1, \dots, M \quad (5.18)$$

Geliştirilen model bir 0-1 doğrusal olmayan modeldir bu yüzden modeli çözerken elde edilen sonuçlar optimum sonuçlar değildir dolayısıyla optimum sonuçları elde etmek için Eş. 5.14 doğrusallaştırmamız gerekir. Bunun için Ağpak ve Gökçen [69] 'in çalışmasında kullanılan yaklaşım bu model için de uygulanmıştır. Birinci yaklaşımdan elde edilen sonuçlar yaklaşık sonuçlardır. İkinci yaklaşım ise bir doğrusal dönüşüm olduğundan dolayı optimal sonuçlar üretmektedir.

5.2.1. MSMHD problemi şans kısıtlı modeli için doğrusal yaklaşım

Geliştirilen şans kısıtlı modelde Eş. 5.19'e dayanarak Eş. 5.14, Eş. 5.20'e dönüştürülmektedir.

$$\sqrt{\sum_{i=1}^n a_i^2} \leq \sum_{i=1}^n a_i \quad , a_i \in \mathfrak{R}^+ \quad (5.19)$$

$$\sum_{i=1}^n (\mu_i + z_{1-\alpha} \cdot \sigma_i) x_{ij} \leq c \cdot S_j \quad , j = 1, \dots, M \quad (5.20)$$

Yeni yaklaşım ile sadece katsayılarda bir değişim olmuştur. Bu nedenle yeni modelin deterministik durum için geliştirilen model ile aynı karakteristiklere sahip olacağını söyleyebiliriz. Böylece modeldeki doğrusal olmayan eşitlikler doğrusallaştırılmıştır.

Ağpak ve Gökçen [69]'in çalışmasında, stokastik montaj hatlar için tanımlanan minimum istasyon sayısı T_{min} , i görevin yapılabileceği en erken istasyon E_i ve i görevin yapılabileceği en geç istasyon L_i , dikkatte alınmıştır ve aşağıda eşitlikler ile ifade edilmektedirler.

$$T_{min} = \left\lceil \frac{z_{1-\alpha} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n \sigma_i^2} + \sum_{i=1}^n \mu_i}{C} \right\rceil \quad (5.21)$$

$$E_i = \left\lceil \frac{\mu_i + \sum_{i \in p_i} \mu_i + z_{1-\alpha} \cdot \sqrt{\sigma_i^2 + \sum_{i \in p_i} \sigma_i^2}}{C} \right\rceil \quad (5.22)$$

$$L_i = K_{max} + 1 - \left\lceil \frac{\mu_i + \sum_{i \in s_i} \mu_i + z_{1-\alpha} \cdot \sqrt{\sigma_i^2 + \sum_{i \in s_i} \sigma_i^2}}{C} \right\rceil \quad (5.23)$$

Stokastik hatlar için, E_i ve L_i tanımları kullanılarak oluşturulan yeni model aşağıda sunulmuştur.

$$\text{Min } k = c. \sum_{j=1}^M k_j^s$$

st:

$$\sum_{j=E_i}^{L_i} x_{ij} = 1 \quad , i = 1, \dots, n \quad (5.24)$$

$$k_j^s \geq k_i^t \cdot x_{ij} \quad , j = E_i, \dots, L_i \quad i = 1, \dots, n \quad (5.25)$$

$$\sum_{i=1}^n (\mu_i + z_{1-\alpha} \cdot \sigma_i) x_{ij} \leq c \cdot S_j \quad , j = 1, \dots, M \quad (5.26)$$

$$\sum_{j=E_h}^{L_h} j \cdot x_{hj} \leq \sum_{j=E_i}^{L_i} j \cdot x_{ij} \quad , \forall i = 1, \dots, n \quad h \in R_i \quad (5.27)$$

$$S_j \geq S_{j+1} \quad , j = 1, \dots, M - 1 \quad (5.28)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad , j = 1, \dots, M \quad , i = 1, \dots, n \quad (5.29)$$

$$S_j \in \{0,1\} \quad , j = 1, \dots, M \quad (5.30)$$

5.2.2. MSMHD problemi şans kısıtlı modeli için doğrusal dönüşüm

Geliştirilen şans kısıtlı modelin doğrusal olmamasının sebebi Eş. 5.9 teki görev değişkeni eklenmiş halile $\sqrt{\sum_{i=1}^n \sigma_i^2 \cdot x_{ij}}$ terimdir. Bu nedenle bu terimde kökün kaldırılması ile doğrusallaştırma mümkün olacaktır. Bunun için Eş. 5.9'in her iki tarafının karesi alınarak Eş. 5.31 elde edilmiştir.

$$z_{1-\alpha} \leq \frac{C - \sum \mu_i \cdot x_{ij}}{\sqrt{\sum \sigma_i^2 \cdot x_{ij}}} \quad \rightarrow \quad (z_{1-\alpha})^2 \leq \frac{(C - \sum \mu_i \cdot x_{ij})^2}{\left(\sqrt{\sum \sigma_i^2 \cdot x_{ij}}\right)^2} \quad (5.31)$$

Eş. 5.31 ile $\sqrt{\sum_{i=1}^n \sigma_i^2 \cdot x_{ij}}$ teriminden kaynaklanan doğrusal olmayan durum kaldırılırken $(C - \sum \mu_i \cdot x_{ij})^2$ terimiyle yeni bir doğrusal olmayan durum karşımıza çıkmıştır. Terimin açılmış hali Eş. 5.32’te verilmiştir.

$$\left(C - \sum \mu_i \cdot x_{ij} \right)^2 = C^2 - 2C \sum \mu_i \cdot x_{ij} + \begin{pmatrix} \mu_1^2 x_{1j}^2 + \mu_1 x_{1j} \mu_2 x_{2j} + \dots + \mu_1 x_{1j} \mu_n x_{nj} \\ \mu_1 x_{1j} \mu_2 x_{2j} + \mu_2^2 x_{2j}^2 + \dots + \mu_2 x_{2j} \mu_n x_{nj} \\ \vdots \\ \mu_1 x_{1j} \mu_n x_{nj} + \mu_2 x_{2j} \mu_n x_{nj} + \dots + \mu_n^2 x_{nj}^2 \end{pmatrix} \quad (5.32)$$

x_{ij}^2 değişken 0-1 olduğundan x_{ij} ye eşittir. $(\mu_i x_{ij} \mu_n x_{nj})$ terimi ise doğrusal olmayan kısımdır. Bunun için literatürde var olan dönüşüm teknikleri kullanılmıştır.

$$u_{ivj} = x_{ij} \cdot x_{vj} \quad (5.33)$$

Eş. 5.33 teki değişken dönüşümü yapıldıktan sonra Eş. 5.34 ve Eş. 5.35 ile $u_{in,j}, x_{ij}$ ve x_{nj} ile ilişkilendirilmiştir.

$$x_{ij} + x_{vj} - u_{ivj} \leq 1 \quad (5.34)$$

$$x_{ij} + x_{vj} - 2u_{ivj} \geq 0 \quad (5.35)$$

Eş. 5.31 dikkat edilmesi gereken bir diğer durumda eşitsizliğin, payın iki durumu için geçerli olmasıdır. Bunlar Eş. 5.36 ve Eş. 5.37 de verilmiştir.

$$z_{1-\alpha} \leq \frac{C - \sum \mu_i \cdot x_{ij}}{\sqrt{\sum \sigma_i^2 \cdot x_{ij}}} \quad (5.36)$$

$$-z_{1-\alpha} \geq \frac{C - \sum \mu_i \cdot x_{ij}}{\sqrt{\sum \sigma_i^2 \cdot x_{ij}}} \quad (5.37)$$

Eş. 5.37, Eş. 5.31'in $1 - (1 - \alpha)$ olasılığında da geçerli olmasına izin vermektedir. Bu nedenle Eş. 5.38, Eş. 5.31'le birlikte kullanarak bu durum ortadan kaldırılmış olacaktır. Aynı zamanda bu kısıt temel deterministik modelde yer alan çevrim zamanı kısıtıyla aynıdır.

$$\left(C - \sum \mu_i \cdot x_{ij}\right) \geq 0 \quad (5.38)$$

Bu çalışmada, Ağpak ve Gökçen [69] 'in çalışmasında, önerilen dönüşüm metoduna dayanarak MSMHD problemi için doğrusallaştırılmış olan model aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir.

$$\text{Min } k = c \cdot \sum_{j=1}^M k_j^s$$

st:

$$\sum_{j=E_i}^{L_i} x_{ij} = 1 \quad , i = 1, \dots, n \quad (5.39)$$

$$k_j^s \geq k_i^t \cdot x_{ij} \quad , j = E_i, \dots, L_i \quad i = 1, \dots, n \quad (5.40)$$

$$C^2 - 2C \sum_{i=1}^n \mu_i \cdot x_{ij} + \sum_{i=1}^n \mu_i^2 \cdot x_{ij}^2 + 2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{v=i+1}^n \mu_i \cdot \mu_v \cdot u_{ivj} - z_{1-\alpha}^2 \sum_{i=1}^n \sigma_i^2 \cdot x_{ij} \geq 0 \quad (5.41)$$

$$j = 1, \dots, M$$

$$\sum_{j=E_h}^{L_h} j \cdot x_{hj} \leq \sum_{j=E_i}^{L_i} j \cdot x_{ij} \quad , \forall i = 1, \dots, n \quad h \in R_i \quad (5.42)$$

$$\sum_{i=1}^n \mu_i \cdot x_{ij} \leq c \cdot S_j \quad , j = E_i, \dots, L_i \quad (5.43)$$

$$x_{ij} + x_{vj} - u_{ivj} \leq 1 \quad , j = 1, \dots, M \quad , i = 1, \dots, n \quad v = i + 1, \dots, n \quad (5.44)$$

$$x_{ij} + x_{vj} - 2u_{ivj} \geq 0 \quad , j = 1, \dots, M \quad , i = 1, \dots, n \quad v = i + 1, \dots, n \quad (5.45)$$

$$S_j \geq S_{j+1} \quad , j = 1, \dots, M - 1 \quad (5.46)$$

$$x_{ij}, u_{ivj}, S_j \in \{0, 1\} \quad , j = 1, \dots, M \quad , i = 1, \dots, n \quad v = i + 1, \dots, n \quad (5.47)$$

6. MSMHD PROBLEMİ İÇİN GENETİK ALGORİTMA

6.1. Genetik Algoritma

Charles Darwin'in 1859 yılında evrim teorisi kitabında yayınlanması ile genetik kavramının tanıtı yapmıştır. Genetik algoritma da Darwin' in evrim teorisinden etkilenecek geliştirilmiştir. Doğal seçim teorisine göre bugün ki mevcut bitkiler ve hayvanların milyonlarca yıl çevrenin taleplerine adapte olmanın sonucudurlar. Herhangi bir zamanda, farklı organizmalar birlikte bulunup ve bir ekosistemde aynı kaynaklar için rekabet etmektedirler. Kaynak elde etmekte ve başarılı doğuran en yetenekli olan organizmalar, gelecekte çoğunluğa sahip olan organizmalar olacaklardır. Daha az yetenekli organizmalar hangi nedenle olursa olsun, gelecekte az veya hiç torunları olmayan organizmalar olacaklardır. Zamanla, ekosistemin tüm nüfusu önceki nesillere göre daha uygun organizmaları içermektedir. Çünkü bu organizmalar daha uygun özelliklere sahip oldukları için hayatta kalmayı başarmışlardır. evrimsel hesaplama teknikleri, Bu evrimsel İlkeleri bir problemin optimum çözümlerini aramak için kullanılabilir algoritmalarda nasıl kullanılması tekniklerdir.

Evrimsel algoritmaları geleneksel arama algoritmalarından ayıran önemli nokta, evrimsel arama algoritmaların popülasyon bazlı olmasıdır. Büyük sayıda bireylerin ardışık nesillerde uyumlu olması sayesinde evrimsel algoritma, aramayı etkin şekilde yönlendirir. Evrimsel arama, genel rasgele aramadan daha iyidir ayrıca gradyan tabanlı aramanın tepetırmanma (hill-climbing) özeliğine duyarlı değildir. Evrimsel hesaplama araştırmalarında en popüler teknik, genetik algoritmasıdır (GA).

GA ilk olarak Michigan Üniversitesinde yer alan John Holland tarafından ortaya atılmıştır. Öğrencisi David Goldberg de kitabı ile konuya önem kazandırmıştır [70]. Bu kitapta genetik algoritmalar ile ilgili çok sayıda örnek verilmiştir. Farklı bilim dallarındaki araştırmacılar, kendi alanlarında konunun teorisi ve pratiği üzerine araştırmalara halen devam etmektedirler.

Genetik algoritmaların temel ilkesi, her aşamada bir önceki nesilden yeni kromozomlar üretilerek amaç fonksiyonunu iyileştirmek ve sonuç olarak belli kısıtlamaları sağlayarak amaç fonksiyonunun en iyi değerini elde etmektir.

6.1.1. Genetik algoritma çalışma sistematığı

Genetik algoritmalarla ilgili pek çok yöntem bulunmasına rağmen, tüm yöntemler aşağıdaki temel adımlardan oluşmaktadır:

1. Adım:

Problemde tanımlar, değişkenler, amaç fonksiyonu Genetik algoritma hesaplarında kullanılacak olan genetik parametreler (popülasyon büyüklüğü, nesil sayısı, çaprazlama oranı, mutasyon oranı vb...), araştırmacıdan alınır. Bu parametreler aynı problem için farklı deneylerde, farklı sayılar olabilir.

2. Adım:

Başlangıç popülasyonun oluşturulması olası çözümlerin (kromozom, birey) kodlandığı rastgele veya kullanıcı tanımlı bir çözüm grubu oluşturulur. Genel olarak bu gruptaki eleman sayısı 100-500 aralığında önerilmektedir.

3. Adım:

Hali hazır nesildeki her bir birey için uygunluk fonksiyonu değerleri bulunur, uygunluk değerlerine göre sıralanır.

4. Adım:

Ebeveyn Seçimi için, kromozomların uygunluk değerlerine göre seçim yapılır. Bu seçimi yapmak için rulet çemberi, mertebe ve turnuva seçimi gibi seçme yöntemleri uygulanır.

5. Adım:

Çaprazlama, seçilmiş olan ebeveynler arasında rastgele olarak veri alışverişi sağlamaktadır. Çözüm setinde yeni bireyler oluşturulmaktadır.

6. Adım:

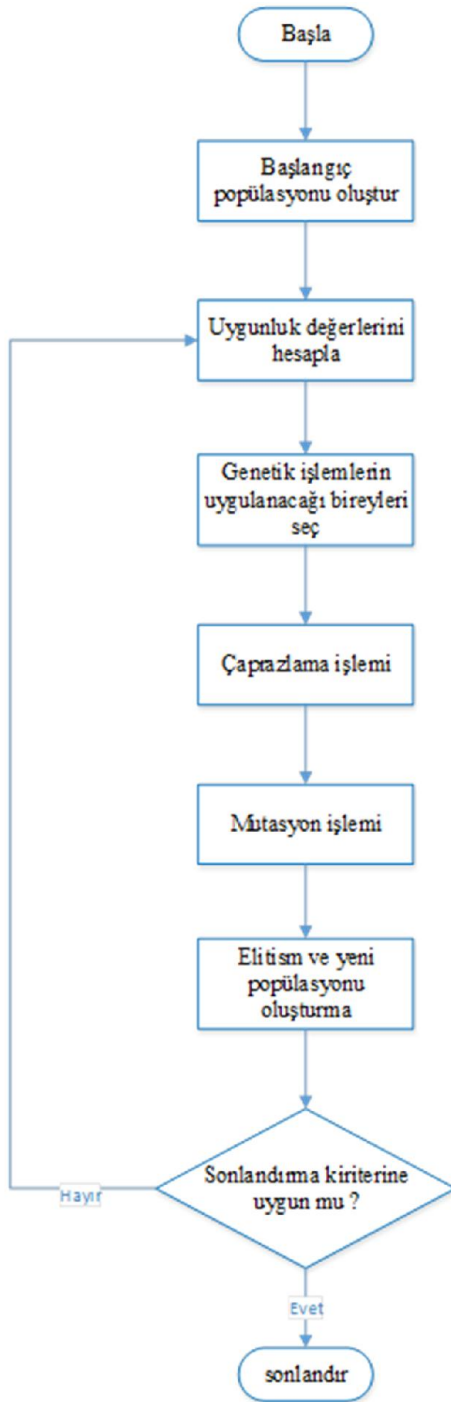
Seçilmiş olan ebeveynler arasında mutasyon oranı kadar mutasyon operatörü uygulanır.

7. Adım:

Doğru çözüme olan yakınsama, zaman veya toplam döngü sayısı gibi kabuller algoritma tarafından sağlanmadığı takdirde, 3. adıma dönmek suretiyle hesaplamalar devam eder. Aksi takdirde 8. adım ile algoritma bitirilir.

8. Adım:

Sonuçlar, grafikler ve şekiller ile listelenmektedir. Son nesildeki en uygun kromozom sonuçtur. Ancak bazı çalışmalar; nesillerin içinde de daha uygun çözümler olabileceğini göstermiştir. Bu durumda algoritma hali hazır nesildeki en iyi çözümü, elitizm gibi bir operatörle yeni nesillere aktarmalı ya da, ayrı bir değişken setinde birey sıra numara ve nesil sıra numara bilgisi ile bu çözüm, nesillerin en uygunları ile karşılaştırılarak, bütün nesiller içindeki en uygun çözüm bulunmalıdır [71]. Yukarıda 8 adımda algoritma yapısı anlatılan genetik algoritmaya ait bir akış diyagramı aşağıda verilmiştir. (Şekil 6.1)



Şekil 6.1. Genetik algoritma akış şeması

6.2. Önerilen Genetik Algoritma

Bu tezde MTSMHD problemi için birden çok kural tabanlı bir genetik algoritma (multiple rule based genetic algorithm) önerilmiştir. Önerilen algoritma GA ve görev atama kurallarını birleştirmektedir ve adım adım aşağıda açıklanmaktadır.

Mevcut görevler kümesinin (set of available tasks) belirlenmesi: Hiç bir öncül görevi olmayan veya öncül görevleri, mevcut veya önceki bir istasyona atanan görev kümesine, mevcut görev kümesi denir.

Atanabilir görevler setinin (set of assignable tasks) belirlenmesi ve atanacak görevin seçimi: Mevcut görevler kümesinden, atanmak istenen istasyonun kalan boş zamandan daha uzun bir süreye sahip olmayan görevlere, atanabilir görevler kümesi denir. Kromozomun ilgili pozisyondaki atama kuralını kullanarak atanabilir görevler kümesinden bir görev seçilir. Genetik algoritmanın kromozom yapısı aşağıda açıklanmıştır.

İstasyon zamanının hesaplanması: Belirlenen olasılık aralığı α altında istasyon süresi, aşağıdaki formül üzerinden hesaplanır. İstasyon zamanı çevrim zamanını aşma olasılığı en fazla α olmalıdır.

$$Y \leq \sum_{i=1}^n \mu_i \cdot x_{ij} + z_{1-\alpha} \sqrt{\sum_{i=1}^n \sigma_i^2 \cdot x_{ij}} \quad (6.1)$$

İki istasyon baskın kuralının uygulanması ve görevin istasyona atanması: İki istasyon kuralının aşamaları şu şekilde:

İki ardışık m ve $m-1$ istasyon dikkate alınır ve toplam istasyon zamanları hesaplanır (d_{m-1}^s, d_m^s).

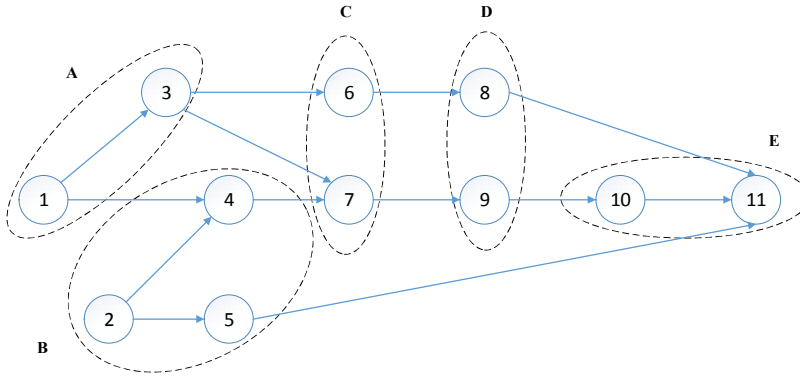
Eğer $d_{m-1}^s + d_m^s > C$ ise, ya yeni istasyon ($m+1$) açılır veya seçilen görev m istasyonuna atanır.

Eğer $d_{m-1}^s + d_m^s < C$ ise, $m-1$ ve m istasyonları birleştirilir. Eğer birleştirilen istasyon maximum dolu ise, yeni istasyon açılır.

6.2.1. Önerilen genetik algoritmanın kromozom yapısı

Belirli bir problemde GA uygulanırken ilk adım, problem çözümlerinin kromozom denilen bir dizge türü yapıya dönüştürüp ve göstermektir. Bu gösterim ile kromozom değerlerinin karar değişkenler üzerinde eşsiz bir şekilde eşleştirilmesi gerekmektedir.

Gerçek-değerli (Real- valued) kromozom gösterimi, hat dengeleme problemi için daha çok etkilidir. Becker ve Scholl [72] literatür inceleme çalışmasında basit montaj hattı dengeleme (SALB) problemi için dört tip kromozom gösterimi sunulmaktadır. Tasan ve Tunali [73] çalışmasında geniş bir literatür alanı kapsayarak 6 tip kromozom gösterimi sunmuştur. Bu altı tip gösterimden ikili gösterim sadece [Stockton, Quinn [74], 75] tarafından montaj hattı dengeleme problemlerinde kullanılmıştır ayrıca ikili gösterimin bilgi eksikliğinden dolayı, sadece geri kalan diğer beş kromozom gösterim şemaları ayrıntılı şekilde bir örnek üzerinde Şekil 6.3’de açıklanmaktadır. Örnekte çevrim zamanı 10 dakika ve istasyon sayısı 5 olarak dikkate alınmıştır.



Şekil 6.2. 11 görevli öncelik diyagramı

Görev tabanlı gösterim:

Kromozom, görevlerin uygun öncelik ilişkilerine göre tanımlanmaktadır [76-78]. Kromozomun uzunluğu görevlerin sayısı ile tanımlanır. Örneğin, Şekil 6.2’te verilen çözümün görev tabanlı gösterimi Şekil 6.3(a) görüntülenmiştir. ALBP Tip-1 problemlerin amaç fonksiyonu toplam istasyon sayısını minimize ettiğinden dolayı görev tabanlı gösterim, ALBP Tip-1 problemler için en uygun gösterimdir [73].

Embriyonik gösterim:

İlk defa Brudaru ve Valmar [79] tarafından önerilmiştir. Embriyonik kromozom gösterimi aslında görev tabanlı kromozomun özel bir sürümüdür. İkisi arasındaki tek fark, embriyonik gösterim tek bir çözüm yerine çözümlerin alt kümelerini de göz önüne almasıdır. Kuşaklar boyunca embriyonik kromozom, tam uzunlukta bir çözüme gelişir. Bu nedenle kromozom uzunluğu kuşaklar boyunca değişmektedir. Uzunluğu ilk olarak rastgele bir sayı ile tanımlanır ve sonra görevlerin sayısına ulaşana kadar artırılır. Şekil 6.3 (b), Şekil 6.2'te verilen çözümün embriyonik gösteriminin bir örneği gösterilmektedir.

İstasyon tabanlı gösterim:

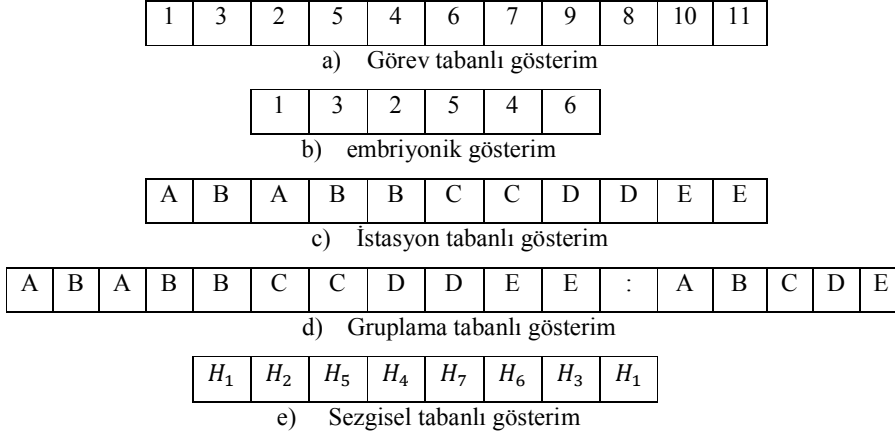
Kromozom, görevleri atanmak isteyen istasyonların etiketini içeren bir vektör olarak tanımlanmaktadır [80, 81]. Kromozom uzunluğu görevlerin sayısı ile tanımlanır. Örneğin, Şekil 6.2'te verilen çözümün istasyonu tabanlı gösterimi, 4. görevin B. istasyona atanmasını göstermektedir. Bu tür kromozom gösterim şeması genellikle ALBP Tip-2 için kullanılmaktadır.

Gruplama tabanlı gösterim:

Bu tip gösterim özellikle ALBP Type-1 gibi gruplama problemleri için Falkenauer ve Delchambre [82] tarafından önerilmiştir. Yazarlar istasyon tabanlı gösterimin, ALBP Tip-1 için uygun olmadığını belirlemişlerdir. (Bkz Şekil 6.3 (d)).

Sezgisel tabanlı gösterim:

Bu tür gösterim şeması, çözümleri dolaylı bir şekilde temsil etmektedir. İlk olarak [Goncalves ve de Almeida [83], Bautista, Suárez [84], Baykasoglu ve Ozbakir [85]] bu tür kromozom gösterimini montaj hattı dengeleme problemlerinde kullanmışlardır. Yazarlar görevlerin atamasında kullanılan öncelik kuralları ve ya sezgiselleri belirledikten sonra bunların her bir görev için kullanma sırasını kromozom üzerinde değiştirerek farklı çözümler üretmişlerdir. Kromozom uzunluğu görev sayısına göre tanımlanır. Örneğin Şekil 6.3(e) de H1,H2,H5,H4,H7,H6 ve H3 sezgiselle sahip olan bir kromozom gösterilmektedir.



Şekil 6.3. MHD için kullanılan kromozom gösterimleri

Önerilen genetik algoritmada, sezgisel tabanlı gösterim dikkate alınmıştır. Kromozomların genleri tamsayıdır ve her bir tamsayı bir görev atama kuralını temsil etmektedir. Kromozomun uzunluğu görev sayısı kadardır. Örneğin, eğer istasyonlara atanacak 14 görev varsa, o zaman kromozomun uzunluğu 14'dür. Her gen 1 ile q arasında değerler alabilir. q ise görev atama kurallarının toplam sayısıdır. Önerilen GA'da kullanılan görev atama kuralları, Çizelge 6.1'de gösterilmektedir. Bu problemin kromozom gösterimi Şekil 6.4'deki gibi olacaktır:

Çizelge 6.1. Genetik algoritmada kullanılan görev atama kuralların listesi

Kural No.	Görev atama kuralı	Kısaltma
1	En uzun görev süre	LPT
2	En kısa görev süre	SPT
3	En çok sayıda ardıl görev	MaTNST
4	En az sayıda ardıl görev	MiTNST
5	En uzun ardıl görev süreleri toplamı	MaTTST
6	En kısa ardıl görev süreleri toplamı	MiTTST
7	En çok sayıda öncül görev	MaTNPT
8	En az sayıda öncül görev	MiTNPT
9	En uzun öncül görev süreleri toplamı	MaTTPT
10	En kısa öncül görev süreleri toplamı	MiTTPT
11	En çok ücret oranı	MaCR
12	En az ücret oranı	MiCR
13	Mevcut istasyonun ücret oranının en az mutlak farkı	MiADCR
14	Aylak maliyetin en iyi değişimi	BeCIC

Çizelge 6.1 deki kuralları açıklamadan önce aşağıdaki simgeler tanıtılmaktadır.

LPT: atanabilir görevler arasından en uzun süreye sahip olan görevin seçilmesi.

$$\max \{t_i | i \in I^{atanabilir}\}.$$

SPT: atanabilir görevler arasından en uzun süreye sahip olan görevin seçilmesi.

$$\min \{t_i | i \in I^{atanabilir}\}.$$

MaTNST: atanabilir görevler arasından en çok ardıl göreve sahip olan görevin seçilmesi.

$$\max \{|F_i| | i \in I^{atanabilir}\}.$$

MiTNST: atanabilir görevler arasından en az ardıl göreve sahip olan görevin seçilmesi.

$$\min \{|F_i| | i \in I^{atanabilir}\}.$$

MaTTST: atanabilir görevler arasından en uzun toplam ardıl görevler süresine sahip olan görevin seçilmesi, $\max \{\sum t_h | h \in F_i, i \in I^{atanabilir}\}.$

MiTTST: atanabilir görevler arasından en kısa toplam ardıl görevler süresine sahip olan görevin seçilmesi, $\min \{\sum t_h | h \in F_i, i \in I^{atanabilir}\}.$

MaTNPT: atanabilir görevler arasından en çok öncül göreve sahip olan görevin seçilmesi.

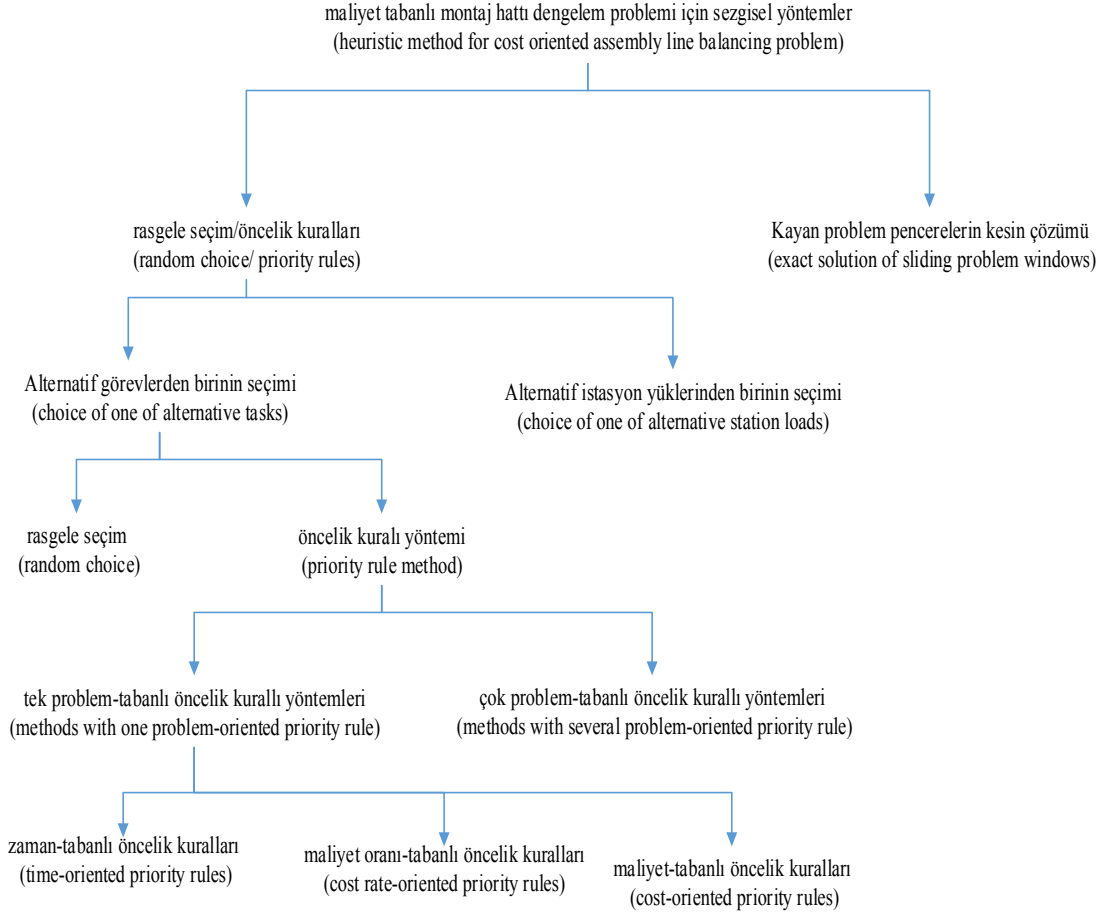
$$\max \{|R_i| | i \in I^{atanabilir}\}.$$

MiTNPT: atanabilir görevler arasından en az öncül göreve sahip olan görevin seçilmesi.

$$\min \{|R_i| | i \in I^{atanabilir}\}.$$

MaCR: atanabilir görevler arasından en çok ücret orana sahip olan görevin seçilmesi.

$$\max \{K_i^t | i \in I^{atanabilir}\}.$$



Şekil 6.5. Maliyet tabanlı montaj hattı dengeleme problemleri için sezgisel algoritmaların sınıflandırılması

Bu sezgisellerin çoğu rasgele seçim veya öncelik kuralı ile seçim yöntemleri olarak nitelendirilebilir. Bu kategoride yer alan yöntemlerin tümünde çözüm sürecinin her aşamasında bir atama için alternatif görevlerden sadece biri seçilir.

Öncelik kurallı yöntemler, bir problem-tabanlı öncelik kural yöntemi (one problem-oriented priority rule) ve çok sayıda problem-öncelik kuralı yöntem (Several problem-oriented priority rule) olarak ayrılabilir. Eğer problemin yapısal yönleri dikkate alınırsa, o zaman öncelik kurallarına problem-tabanlı denmektedir.

Problem-tabanlı öncelik kurallar seti üç alt sınıftan oluşmaktadır. Zaman tabanlı öncelik kuralları, sadece süreler ve / veya görevlerin öncelik ilişkilerini dikkate almaktadır. Maliyet oranı tabanlı öncelik kuralları ise görevlerin sadece maliyet oranlarını dikkate almaktadır. Aslında maliyet, hem maliyet oranı hem de sürenin ürünüdür. Bu yüzden

Amen [53] bu iki faktörü dikkate alarak yeni maliyet tabanlı öncelik kuralı önermiştir (BeCIC kuralı).

MiADCR ve BeCIC kuralları istasyonun mevcut maliyet oranına bağlı oldukları için dinamik kurallardır. Bu kurallar için her atamadan sonra mevcut istasyonun kalan boş zamanının hesaplanmasından ziyade, aynı zamanda istasyonun maliyet oranının da güncellenmesi gerekmektedir. MaCR ve MiCR kuralları sadece maliyet oranının dikkate alınmasıdır, diğer kurallar ise zaman tabanlı kurallardır.

Önerilen genetik algoritmanın kromozom yapısında her üç sınıf öncelik kuralı dikkate alınmıştır. Dolayısıyla hem algoritma başlangıç popülasyonu oluştururken hem diğer aşamalarda yeni kromozom üretirken farklı cevaplar üretilmiş olur ve böylece algoritma daha büyük çözüm alanı taramış olup performansının yüksek olmasını sağlar.

Özenle tasarlanmış genetik operatörler ve uygunluk fonksiyonu ile birlikte uygun bir kromozom gösterim şeması, GA tasarımı için önemlidir. İstasyon tabanlı ve gruplama tabanlı kromozom gösterimlerde, GA'nın çaprazlama ve mutasyon gibi operatörlerini uygularken olumsuz çözümler ortaya çıkabilir. Bu yüzden olumsuz çözümleri cezalandırma, yeniden düzenleme gibi sezgisel stratejiler ile veya GA için özel operatörler kullanarak, olumsuz çözümleri ortadan kaldırmak gerekir. Sezgisel tabanlı gösterimde GA operatörleri ile yeni kromozomlar üretirken hiçbir zorluk yaşamadan uygun çözümü elde etmek mümkündür. Bu da sezgisel tabanlı gösterimin diğerlerine göre avantajı olarak sayılmaktadır.

6.2.2. Uygunluk fonksiyonu

Her popülasyondaki üretilen kromozomların uygunluk değerleri, atanan görevlerin ücret oranı maliyetine göre hesaplanır. Algoritmanın amacı bu fonksiyonu minimize etmektir. Bölüm 2'de kullanılan birim ürün başına toplam maliyeti minimize eden maliyet tabanlı amaç fonksiyonu kullanılmaktadır.

$$K = \sum_{m=1}^M C \cdot k_m^s = C \cdot \sum_{m=1}^M \max\{k_i^f | i \in I_m^s\} \quad (6.2)$$

6.2.3. Seçim operatörü

Yeni nesilleri üretmek için, kromozom seçimi GA da son derece önemli bir rol oynamaktadır. GA da seçim, normalde kromozomların uygunluk değerlerine bağlı bir olasılıksal mekanizmayla seçilir. Öyle ki yüksek uygunluk değerleri olan kromozomlar seçim için daha yüksek şansları var. Rulet çemberi seçim mekanizması, ilk seçim mekanizması olarak Holland [86] tarafından önerilmiştir. Literatürde Ölçekleme teknikleri, turnuva, elitist modeller ve sıralama yöntemleri gibi diğer seçim mekanizmaları da mevcuttur [70, 71].

Bu araştırmada, rulet çemberi mekanizmasının bir uzantısı olan ve [87] tarafından önerilen yöntem kullanılmıştır. Seçimi başlatmak için, öncelikle her bir kromozomun uygunluk değerini mevcut popülasyonun toplam uygunluk değerine göre normalleştirmek gerekir. P_{S_i} kromozomun normalleştirilmiş uygunluk değeri aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$P_{S_i} = \left| \frac{f_{S_i}}{\sum_{i=1}^{sp} f_{S_i}} \right| \quad (6.3)$$

sp popülasyon büyüklüğü ve f_{S_i} ise i . kromozomun uygunluk değerini göstermektedir.

$P = [P_{S_1}, P_{S_2}, P_{S_3}, \dots, P_{S_{sp}}]$ Vektörü, kromozomların normalize edilmiş uygunluk değerlerine göre hesaplanır. Sonra P vektörü ile aynı boyutta $[0 \ 1]$ arası üniform dağılmış rasgele sayılardan oluşan R vektörü oluşturulur. Kromozom seçimi, P vektörü R vektöründen çıkarılmasıyla elde edilen D vektörü üzerinden yapılır.

$$D = [P_{S_1} - R_{S_1}, P_{S_2} - R_{S_2}, P_{S_3} - R_{S_3}, \dots, P_{S_{sp}} - R_{S_{sp}}] \quad (6.4)$$

D Vektöründe en düşük değer ile ilgili olan kromozom seçilmektedir. Solimanpur ve Foroughi [88] bu mekanizmanın iyi çözümler için daha fazla seçim şansı sağlamasını matematiksel olarak ispatlamışlardır.

6.2.4. Çaprazlama Operatörü

Çaprazlama operatörü genetik algoritmaların en önemli ve temel operatörüdür [89]. Çünkü kromozomların çözüm sürecinde gelişerek sonuca doğru gelişmesindeki en büyük etken, çaprazlamadır. Bu çalışmada tek noktalı ve iki noktalı çaprazlama kullanılmaktadır.

6.2.5. Mutasyon Operatörü

Mutasyonun amacı, popülasyonda çeşitliliği sağlamaktır. Mutasyon işlemi, genetik algortmada mutasyon oranı değerinca ara sıra gerçekleştirilerek, kromozomda rastgele seçilmiş gen noktalarının karşılıklı olarak değiştirilmesi şeklinde çalışmaktadır. Ekleme, yer değiştirme ve iki taraflı değiştirme gibi mutasyon türü vardır. Bu araştırmada, bir kromozom seçim mekanizması ile popülasyondan seçilir. 1 ve toplam görev sayısı arasında rasgele bir sayı (r) üretilir sonra kromozom üzerinde r. gen, 1 ve toplam atama kuralı sayısı arasında (14) rasgele bir değeri alır.

Yukarıda tartışılan çaprazlama ve mutasyon operatörleri yaptıktan sonra kromozomların hala fizibilitesi bozulmuyor. Çaprazlama ve mutasyon operatörlerinden sonra üretilen yeni kromozomlar değiştirme stratejisine göre yeni nesile aktarılmaktadır. Bu çalışmada elitist stratejisi kullanılmaktadır. Bu stratejiye göre şimdiki neslin en iyi kromozomları önceki neslin kötü kromozomları ile yer değiştirmektedir. Bu strateji her zaman en iyi kromozomların hayatta kalmasını sağlamaktadır.

7. HESAPLAMA VE ANALİZ SONUÇLARI

7.1. Test Problemleri

Literatürde MSMHD problemleri için test problemi bulunmamaktadır. Dolayısıyla geliştirilen modellerin ve önerilen GA'nın performans ve davranış analizini yapmak için test problemi gerekmektedir. Test problemlerinin üretimi için, literatürdeki bilinen deterministik test problemlerinden faydalanılmıştır. Her problem, görev sayısı, görev süresi, görevlerin öncelik ilişkileri ve çevrim zamanını içermektedir. Problem verileri arasında her görevin ücret oranı bilgisi bulunmamaktadır. Ücret oranları verileri hazırlanırken, kolay, orta ve zor test problem setleri hazırlamak için, Amen [54]'nin çalışmasında yer alan yöntem dikkate alınmıştır.

Stokastik test problemleri oluşturulurken Guerriero ve Miltenburg [90] çalışması ele alınmıştır. Bu çalışmada, test problemi oluşturulması amacıyla öncelikle üç farklı varyans tipi ve bunların alabileceği değişim katsayılarının (CV- Coefficient of Variation) alt ve üst sınır değerlerini oluşturmuşlardır. Kullanılan CV değeri; istatistik bilimi içerisinde sıkça karşılaşılan ve verilerin değişkenliğini, standart sapmanın ortalamaya oranlanması yoluyla normalize eden bir katsayıdır. Belirlenen varyans tipleri düşük varyans ($0 < CV < 0,3$), yüksek varyans ($0,3 < CV < 0,6$), ve rassal varyanstır ($0 < CV < 0,6$). İkinci aşamada ise bu aralıklarda rassal sayılar üretilerek ortalama zaman değerleri ile çarpılmış ve sonuç olarak her varyans tipi için uygun varyans değerleri oluşturulmuştur. Bu çalışmada kullanılan deterministik test problemlerin görev zamanları ortalama görev zamanı olarak kabul edilmiştir, belirlenen varyans tipine göre sınır değerleri arasından düzgün (Uniform) dağılıma uygun olarak rassal sayılar üretilerek her bir görev için ayrı CV değerleri üretilmiştir. Bu değerler ortalama görev zamanları ile çarpılarak her bir görevin varyansı belirlenmiştir. Böylelikle deterministik test problemi kümesi, stokastik durum için kullanılabilir bir yapıya dönüştürülmüştür. Yukarıda anlatılan yaklaşım ile her test probleminden farklı değişim katsayıları dikkate alınarak, 3 test problemi üretilmiştir. Bu test problemler, modelde farklı (α) değerleri (istasyon zamanı, çevrim zamanı aşma olasılığının üst limiti) alınarak çözülmüştür. (α) değerleri düşük ($\alpha=0.05$) orta ($\alpha=0.10$) ve yüksek ($\alpha=0.15$) olarak belirlenmiştir. Böylece her bir test problemi farklı parametreler ile 9 kez çözülmüştür.

Önerilen genetik algoritmanın performansını değerlendirmek için 17 tane test problemi farklı α ve CV değerleri ile (toplam 153 test problemi) çözülmüştür. Geliştirilen GA algoritması BorlandC++ derleyicisi kullanılarak C++ programlama dilinde kodlanmış ve yapılan deneysel çalışmalar Intel Pentium 4, 3.2 GHz işlemcili ve 4 GB Ram özelliğine sahip bir bilgisayar sisteminde gerçekleştirilmiştir. Önerilen genetik algoritmanın parametre setlerini belirlemek amacıyla deneysel çalışmalar yapılmıştır. Elde edilen deney sonuçlarına göre MSMHD problemlerinin çözümünde önerilen genetik algoritmanın en iyi parametre seti Çizelge 7.1’de verilmiştir. Algoritmanın sonlandırma koşulu, iterasyon sayısı kadar çalışmasıdır. Çözülen problemler küçük, orta ve büyük boyutlu problemler olarak üç sınıfta gruplanmıştır. Bu gruplama Çizelge 7.2’de verilmiştir.

Çizelge 7.1. Genetik algoritmasının parametre değerleri

Parametreler	Değerler
Popülasyon büyüklüğü	500
Çaprazlama oranı	0,8
Mutasyon oranı	0,2
Elit liste uzunluğu	10
İterasyon sayısı	100

Çizelge 7.2. Test problemlerin sınıflandırılması

Boyut	Problem	Görev Sayısı	Çevrim Zamanı
Küçük	Jackson	11	10
			15
			19
	Roszieg	25	16
			22
			30
Orta	Kilbridge	45	79
			110
			138
	Han	53	2004
			2806
			4676
Büyük	Tonge	70	234
			270
			293
	Arcus1	83	3958
			5853

Küçük boyutlu problemler için GA'nın elde ettiği çözümler, doğrudan önerilen DD_MSMHD (doğrusal dönüşüm modeli)'den elde edilen çözümler ile kıyaslanmaktadır. Orta ve büyük boyutlu problemlerin bazısında DD_MSMHD model ile, verilen zaman dilimi içerisinde (72000 sn.) problemin en iyi değeri bulunamamıştır. Dolayısıyla bu problem için yaklaşık sonuç veren DY_MSMHD (doğrusal yaklaşım modeli)'den elde edilen sonuçlar alt sınır olarak dikkate alınmıştır ve GA'nın elde ettiği çözümler bu alt sınır değerleri ile karşılaştırılmıştır.

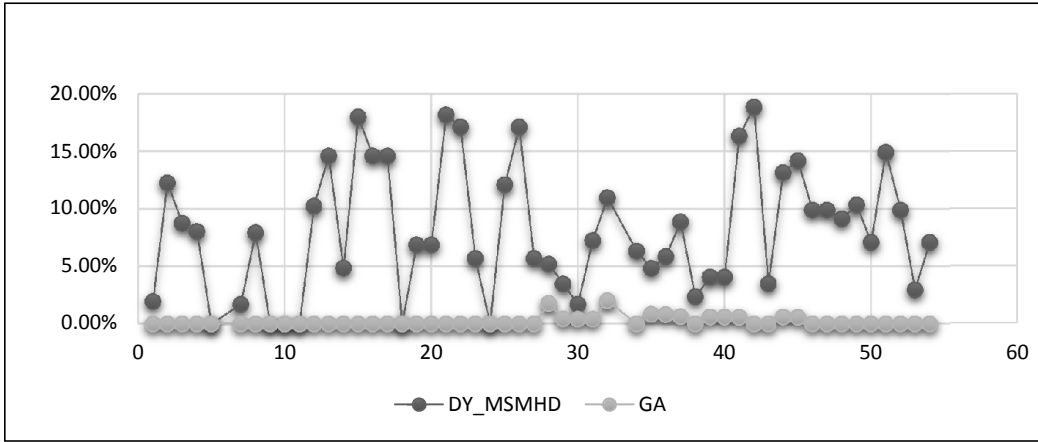
Küçük boyutlu problem için 6 adet (farklı α ve CV parametreler ile toplam 54) test problemi çözülmüştür. Elde edilen çözümler Çizelge 7.3'te verilmiştir.

Çizelge 7.3. GA ile küçük boyutlu problemler için elde edilen sonuçlar

Problem	No	No of Task	Cycle Time	CV													
					α	M Min	DD_MSMHD	M	Time	DY_MSMHD	M	Time	GAP	GA	M	Time	GAP
1 (Jackson)	1	11	10	L	H	5	500	6	0.59	510	6	0.44	1.96%	500	6	4	0.00%
	2				M	5	500	6	0.39	570	7	0.47	12.28%	500	6	3.96	0.00%
	3				L	5	520	6	0.33	570	7	0.36	8.77%	520	6	4.13	0.00%
	4			H	H	6	570	7	0.37	620	8	0.36	8.06%	570	7	4.08	0.00%
	5				M	6	620	8	0.56	620	8	0.41	0.00%	620	8	3.11	0.00%
	6				L	6	NF	-	-	NF	-	-	-	NF	-	-	-
	7			R	H	6	570	7	0.37	580	7	0.44	1.72%	570	7	4.2	0.00%
	8				M	6	580	7	0.41	630	8	0.37	7.94%	580	7	4.38	0.00%
	9				L	6	630	8	0.50	630	8	0.33	0.00%	630	8	4.31	0.00%
2 (Jackson)	10	11	15	L	H	4	525	4	1.31	525	4	0.67	0.00%	525	4	4.64	0.00%
	11				M	4	525	4	1.53	525	4	0.70	0.00%	525	4	4.36	0.00%
	12				L	4	525	4	1.25	585	4	0.59	10.26%	525	4	4.67	0.00%
	13			H	H	4	525	4	1.09	615	5	0.50	14.63%	525	4	4.48	0.00%
	14				M	4	585	4	0.98	615	5	0.23	4.88%	585	4	4.36	0.00%
	15				L	4	615	5	1.40	750	6	0.44	18.00%	615	5	4.42	0.00%
	16			R	H	4	525	4	1.48	615	5	0.72	14.63%	525	4	4.27	0.00%
	17				M	4	525	4	1.42	615	5	0.53	14.63%	525	4	4.46	0.00%
	18				L	4	615	5	1.67	615	5	0.50	0.00%	615	5	4.39	0.00%
3 (Jackson)	19	11	19	L	H	3	513	3	1.00	551	3	0.42	6.90%	513	3	3.97	0.00%
	20				M	3	513	3	1.18	551	3	0.39	6.90%	513	3	4.02	0.00%
	21				L	3	513	3	0.67	627	4	0.65	18.18%	513	3	4.46	0.00%
	22			H	H	3	551	3	0.58	665	4	0.55	17.14%	551	3	4.54	0.00%
	23				M	3	627	4	1.68	665	4	0.48	5.71%	627	4	4.6	0.00%
	24				L	3	665	4	0.95	665	4	0.41	0.00%	665	4	4.32	0.00%
	25			R	H	3	551	3	0.76	627	4	0.38	12.12%	551	3	4.54	0.00%
	26				M	3	551	3	0.56	665	4	0.81	17.14%	551	3	4.43	0.00%
	27				L	3	627	4	1.26	665	4	0.72	5.71%	627	4	4.21	0.00%

Çizelge 7.3. (devam) GA ile küçük boyutlu problemler için elde edilen sonuçlar

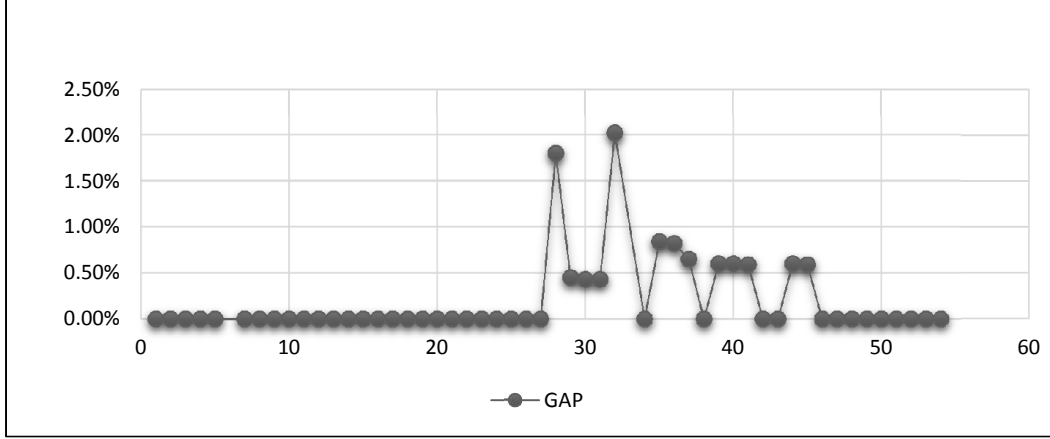
Problem	No	No of Task	Cycle Time	CV													
					α	M Min	DD_MSMHD	M	Time	DY_MSMHD	M	Time	GAP	GA	M	Time	GAP
4 (Roszieg)	28	25	16	L	H	9	3488	10	266.26	3680	11	66.99	5.22%	3552	10	7.1	1.80%
	29				M	9	3552	10	184.69	3680	11	38.38	3.48%	3568	10	7.35	0.45%
	30				L	9	3680	11	113.15	3744	11	31.78	1.71%	3696	11	7.1	0.43%
	31			H	H	9	3680	11	100.84	3968	12	18.50	7.26%	3696	11	7.25	0.43%
	32				M	9	3888	12	123.52	4368	13	17.21	10.99%	3968	12	7.32	2.02%
	33				L	9	NF	-	-	NF	-	-	-	NF	-	-	-
	34			R	H	9	3552	10	212.47	3792	11	60.06	6.33%	3552	10	7.35	0.00%
	35				M	9	3776	11	395.88	3968	12	89.95	4.84%	3808	11	7.18	0.84%
	36				L	9	3856	11	379.19	4096	12	42.23	5.86%	3888	11	7.22	0.82%
5 (Roszieg)	37	25	22	L	H	6	3388	7	47.39	3718	8	4.16	8.88%	3410	7	7.15	0.65%
	38				M	6	3630	7	36.74	3718	8	1.90	2.37%	3630	7	7.12	0.00%
	39				L	6	3630	7	41.86	3784	8	1.31	4.07%	3652	7	7.24	0.60%
	40			H	H	7	3630	7	33.24	3784	8	0.84	4.07%	3652	7	7.36	0.60%
	41				M	7	3718	8	57.55	4444	9	0.84	16.34%	3740	8	7.01	0.59%
	42				L	7	3784	8	41.50	4664	10	0.50	18.87%	3784	8	7.21	0.00%
	43			R	H	6	3630	7	43.99	3762	8	1.48	3.51%	3630	7	7.08	0.00%
	44				M	7	3630	7	36.39	4180	8	1.05	13.16%	3652	7	7.36	0.60%
	45				L	7	3718	8	45.72	4334	9	0.84	14.21%	3740	8	7.18	0.59%
6 (Roszieg)	46	25	30	L	H	5	3540	5	6.47	3930	6	1.22	9.92%	3540	5	7.21	0.00%
	47				M	5	3540	5	7.30	3930	6	1.42	9.92%	3540	5	7.08	0.00%
	48				L	5	3570	5	9.50	3930	6	1.33	9.16%	3570	5	7.32	0.00%
	49			H	H	5	3630	5	27.99	4050	6	1.65	10.37%	3630	5	7.36	0.00%
	50				M	5	3930	6	38.16	4230	6	0.75	7.09%	3930	6	7.16	0.00%
	51				L	5	3930	6	57.33	4620	7	0.56	14.94%	3930	6	7.25	0.00%
	52			R	H	5	3540	5	7.77	3930	6	1.14	9.92%	3540	5	7.13	0.00%
	53				M	5	3900	6	45.30	4020	6	1.12	2.99%	3900	6	7.42	0.00%
	54				L	5	3930	6	32.65	4230	6	0.98	7.09%	3930	6	7.22	0.00%



Şekil 7.1. GA ve DY_MSMHD modelinden elde edilen sonuçların sapmalarının karşılaştırılması

Küçük boyutlu problemlerde 6 ve 33 numaralı problemler için fizibil çözüm bulunamamıştır. Bu nedenle incelemede dikkate alınmamaktadır. İncelenen 52 problemde, GA ile 39 problemde en iyi çözüm yakalanmıştır. Geri kalan 13 problemde ise en fazla 2,02% sapma görülmektedir. Genetik algoritmayı küçük boyutlu problemler için önerilen DY_MSMHD modelinin çözümleri ile karşılaştırdığımızda, GA'nın daha iyi bir performansa sahip olduğu görülmektedir. GA ve DY_MSMHD ile elde edilen sonuçların DD_MSMHD modelin sonuçlarına göre sapmaları, grafiksel olarak Şekil 7.1'de verilmektedir.

GA'nın küçük boyutlu problemler için optimal sonuçlardan sapmalarını gösteren grafik Şekil 7.2'de verilmektedir.



Şekil 7.2. Küçük boyutlu problemler için GA'nın DD_MSMHD modeline göre sapmaları.

Orta boyutlu problemler için 6 adet test problemi farklı α ve CV değerleri ile (toplam 54 test problemi) çözülmüştür. Orta boyutlu problemler için, GA, DY_MSMHD ve DD_MSMHD ile elde edilen çözümler hepsi bir arada Çizelge 7.4 verilmektedir.

Sonuçlara baktığımızda, 54 problemde 34 problemde en iyi çözüm bulunmaktadır. Diğer 20 problemde ise belirlenen zaman dilimi içerisinde (72000 sn) bulunan çözümler kayıt edilmiştir.

Çizelge 7.4. GA ile orta boyutlu problemler için elde edilen sonuçlar

Problem	No	No of Task	Cycle Time	CV													
					α	M Min	DD_MSMHD	M	Time	DY_MSMHD	M	Time	GAP	GA	M	Time	GAP
7 (Kilbridge)	55	45	79	L	H	8	23621*	8	72000	23384	8	5126	-1.01%	24016	8	10.76	1.64%
	56				M	8	24095*	8	72000	23542	8	10746	-2.35%	24016	8	14.79	-0.33%
	57				L	8	24332*	8	72000	24806	8	36312	1.91%	24411	8	14.7	0.32%
	58			H	H	8	24569*	8	72000	25833	9	13492	4.89%	24174	8	14.58	-1.63%
	59				M	8	24648*	8	72000	26149	9	5332	5.74%	24648	8	14.36	0.00%
	60				L	8	26623*	9	72000	28203	10	112426	5.60%	26623	9	15.05	0.00%
	61			R	H	8	24490*	8	72000	24490	8	18593	0.00%	24174	8	14.77	-1.31%
	62				M	8	24490*	8	72000	25912	9	26675	5.49%	24648	8	14.74	0.64%
	63				L	8	25596*	8	72000	26070	9	127540	1.82%	24885	8	17.13	-2.86%
8 (Kilbridge)	64	45	110	L	H	6	24420*	6	72000	24530	6	62.31	0.45%	25410	6	15.63	3.90%
	65				M	6	24530*	6	72000	24640	6	33.90	0.45%	25410	6	14.12	3.46%
	66				L	6	24310*	6	72000	24860	6	44.85	2.21%	25410	6	15.1	4.33%
	67			H	H	6	24310	6	60296	25740	6	48.62	5.56%	25520	6	14.43	4.74%
	68				M	6	24420	6	62486	28270	7	395	13.62%	25850	6	15.36	5.53%
	69				L	6	25410*	6	72000	28820	7	89.75	11.83%	25740	6	14.74	1.28%
	70			R	H	6	24640*	6	72000	25080	6	34.27	1.75%	25410	6	15.32	3.03%
	71				M	6	24640*	6	72000	25300	6	55.29	2.61%	25520	6	14.35	3.45%
	72				L	6	24750*	6	72000	28160	7	775	12.11%	25740	6	15.47	3.85%
9 (Kilbridge)	73	45	138	L	H	5	25254*	5	72000	25530	5	27.28	1.08%	25806	5	18.56	2.14%
	74				M	5	25392*	5	72000	25806	5	21.73	1.60%	25806	5	17.36	1.60%
	75				L	5	25530*	5	72000	26358	5	21.06	3.14%	26082	5	17.33	2.12%
	76			H	H	5	25392	5	17792	26634	5	26.91	4.66%	26358	5	15.23	3.66%
	77				M	5	25392	5	8327	26910	5	24.55	5.64%	26910	5	14.68	5.64%
	78				L	5	25668	5	19802	30360	6	165	15.45%	27186	5	15.02	5.58%
	79			R	H	5	25254	5	5983	26220	5	28.58	3.68%	25944	5	15.27	2.66%
	80				M	5	25254	5	5946	26358	5	17	4.19%	26385	5	16.03	4.29%
	81				L	5	26082*	5	72000	26910	5	32.56	3.08%	27324	5	17.45	4.55%
10 (Han)	82	53	2004	L	H	8	767532	8	150.4	767532	8	18.33	0.00%	779556	8	178.25	1.54%
	83				M	8	767532	8	212.3	767532	8	25.56	0.00%	779556	8	179.3	1.54%
	84				L	8	767532	8	235.42	767532	8	48.5	0.00%	779556	8	183.47	1.54%
	85			H	H	8	767532	8	265.39	767532	8	33.12	0.00%	776556	8	44.6	1.16%
	86				M	8	767532	8	165.35	771540	8	37.94	0.52%	776556	8	47.32	1.16%
	87				L	8	767532	8	214.65	825648	9	46.46	7.04%	776556	8	42.36	1.16%
	88			R	H	8	767532	8	289.3	767532	8	38.63	0.00%	779556	8	51.45	1.54%
	89				M	8	767532	8	214	769536	8	36.47	0.26%	779556	8	45.02	1.54%
	90				L	8	767532	8	291.36	771540	8	36.7	0.52%	779556	8	49.47	1.54%

Çizelge 7.4. (devam) GA ile orta boyutlu problemler için elde edilen sonuçlar

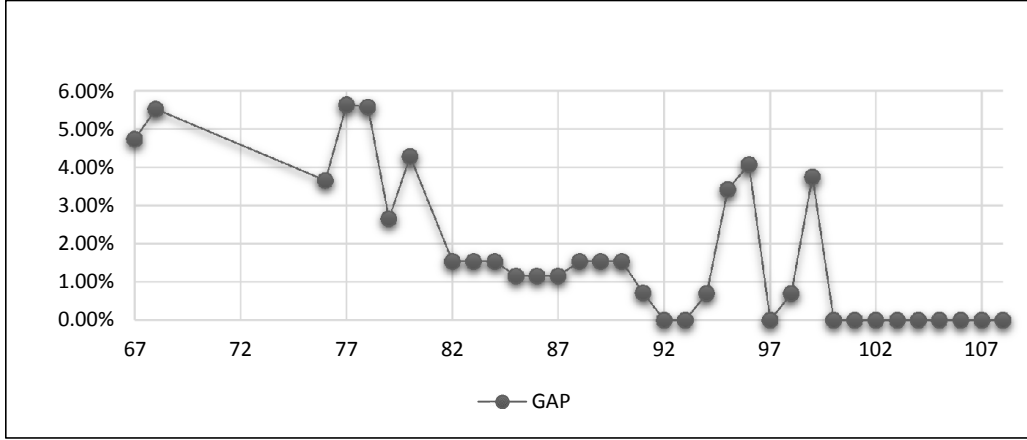
Problem	No	No of Task	Cycle Time	CV													
					α	M Min	DD_MSMHD	M	Time	DY_MSMHD	M	Time	GAP	GA	M	Time	GAP
11 (Han)	91	53	2806	L	H	6	771650	6	54.19	791292	6	24.3	2.48%	777262	6	14.74	0.72%
	92				M	6	777262	6	78.63	791292	6	23.2	1.77%	777262	6	14.86	0.00%
	93				L	6	777262	6	46.66	791292	6	24.5	1.77%	777262	6	14.32	0.00%
	94			H	H	6	791292	6	64.56	791292	6	24.6	0.00%	796904	6	14.07	0.70%
	95				M	6	791292	6	66.72	796904	6	23.4	0.70%	819352	6	14.1	3.42%
	96				L	6	791292	6	44.7	824964	6	24.1	4.08%	824964	6	14.12	4.08%
	97			R	H	6	777262	6	48.35	791292	6	23.5	1.77%	777262	6	13.96	0.00%
	98				M	6	791292	6	79.33	791292	6	24.6	0.00%	796904	6	14.21	0.70%
	99				L	6	791292	6	67.1	796904	6	23.3	0.70%	822158	6	14.17	3.75%
12 (Han)	100	53	4676	L	H	4	925848	4	12.4	925848	4	15.3	0.00%	925848	4	13.85	0.00%
	101				M	4	925848	4	18.24	925848	4	15.2	0.00%	925848	4	14.63	0.00%
	102				L	4	925848	4	12.36	925848	4	14.3	0.00%	925848	4	14.27	0.00%
	103			H	H	4	925848	4	19.48	925848	4	15.7	0.00%	925848	4	14.36	0.00%
	104				M	4	925848	4	13.71	925848	4	15.6	0.00%	925848	4	14.15	0.00%
	105				L	4	925848	4	18.16	925848	4	15.6	0.00%	925848	4	14.36	0.00%
	106			R	H	4	925848	4	13.46	925848	4	15.4	0.00%	925848	4	14.26	0.00%
	107				M	4	925848	4	19.57	925848	4	14.8	0.00%	925848	4	14.15	0.00%
	108				L	4	925848	4	12.53	935200	4	15.2	1.00%	925848	4	14.36	0.00%

Önerilen Genetik algoritmanın performansının değerlendirilmesi bakımından orta boyutlu problemler iki grupta incelenmişlerdir. Birincisi en iyi çözümü bulunan problemler, diğeri ise 72000 sn. sonunda en iyi çözüme ulaşamayan problemler.

En iyi çözümü bulunan problemlerde, genetik algoritmadan elde edilen sonuçların sapması DD_MSMHD modelinden elde edilen en iyi çözüme göre hesaplanmıştır (Çizelge 7.5). Çözülen 34 problemin ortalama sapması 1,71% görünmektedir (Şekil 7.3). Dolayısıyla önerilen GA'nın orta boyutlu problemler için iyi bir performansa sahip olduğu söylenebilir.

Çizelge 7.5. En iyi çözümü bulunan orta boylu problemler için GA sonuçları

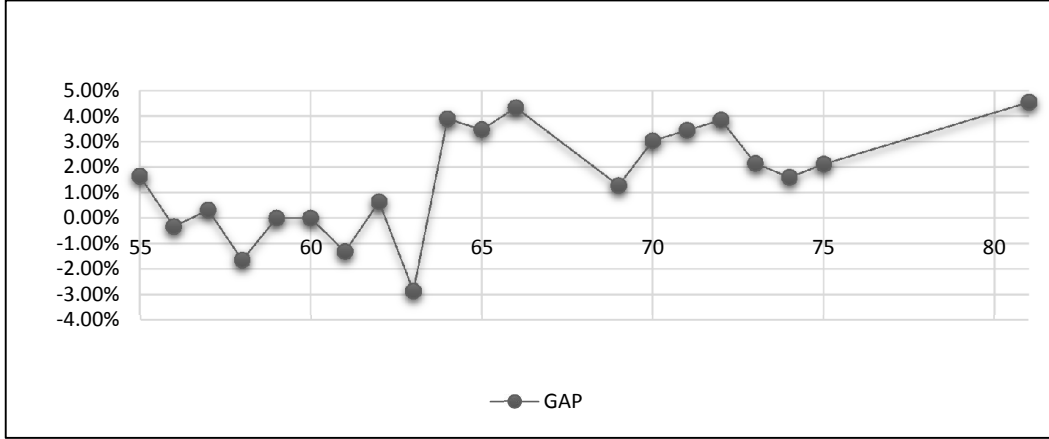
Problem	No	No of Task	Cycle Time	CV									
					α	M Min	DD_MSMHD	M	Time	GA	M	Time	GAP
8 (Kilbridge)	67	45	110	H	H	6	24310	6	60296	25520	6	14.43	4.74%
	68				M	6	24420	6	62486	25850	6	15.36	5.53%
9 (Kilbridge)	76	45	138	H	H	5	25392	5	17792	26358	5	15.23	3.66%
	77				M	5	25392	5	8327	26910	5	14.68	5.64%
	78				L	5	25668	5	19802	27186	5	15.02	5.58%
	79			R	H	5	25254	5	5983	25944	5	15.27	2.66%
	80				M	5	25254	5	5946	26385	5	16.03	4.29%
10 (Han)	82	53	2004	L	H	8	767532	8	150.4	779556	8	178.25	1.54%
	83				M	8	767532	8	212.3	779556	8	179.3	1.54%
	84				L	8	767532	8	235.42	779556	8	183.47	1.54%
	85			H	H	8	767532	8	265.39	776556	8	44.6	1.16%
	86				M	8	767532	8	165.35	776556	8	47.32	1.16%
	87				L	8	767532	8	214.65	776556	8	42.36	1.16%
	88			R	H	8	767532	8	289.3	779556	8	51.45	1.54%
	89				M	8	767532	8	214	779556	8	45.02	1.54%
	90				L	8	767532	8	291.36	779556	8	49.47	1.54%
11 (Han)	91	53	2806	L	H	6	771650	6	54.19	777262	6	14.74	0.72%
	92				M	6	777262	6	78.63	777262	6	14.86	0.00%
	93				L	6	777262	6	46.66	777262	6	14.32	0.00%
	94			H	H	6	791292	6	64.56	796904	6	14.07	0.70%
	95				M	6	791292	6	66.72	819352	6	14.1	3.42%
	96				L	6	791292	6	44.7	824964	6	14.12	4.08%
	97			R	H	6	777262	6	48.35	777262	6	13.96	0.00%
	98				M	6	791292	6	79.33	796904	6	14.21	0.70%
	99				L	6	791292	6	67.1	822158	6	14.17	3.75%
12 (Han)	100	53	4676	L	H	4	925848	4	12.4	925848	4	13.85	0.00%
	101				M	4	925848	4	18.24	925848	4	14.63	0.00%
	102				L	4	925848	4	12.36	925848	4	14.27	0.00%
	103			H	H	4	925848	4	19.48	925848	4	14.36	0.00%
	104				M	4	925848	4	13.71	925848	4	14.15	0.00%
	105				L	4	925848	4	18.16	925848	4	14.36	0.00%
	106			R	H	4	925848	4	13.46	925848	4	14.26	0.00%
	107				M	4	925848	4	19.57	925848	4	14.15	0.00%
	108				L	4	925848	4	12.53	925848	4	14.36	0.00%



Şekil 7.3. En iyi çözümü bulunan orta boylu problemler için GA'nın DD_MSMHD modeline göre sapmaları

72000 sn. de en iyi çözümü bulunamayan orta boyutlu problemlerin çözümlerine bakıldığında, 72000 sn. sonunda DD_MSMHD'den elde edilen değerlerin DY_MSMHD'den elde edilen değerlerden daha iyi olduğu görülmektedir (20 problemim 18 adedinde DD_MSMHD daha iyi sonuçları sağlamıştır). Bu nedenle önerilen GA, DD_MSMHD sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

Çizelge 7.6'de GA'nın DD_MSMHD' dan sapmaları verilmektedir. Bu sapmaları grafiksel olarak Şekil 7.4'de gösterilmektedir. Şekil 7.4'de sapmalara baktığımızda önerilen genetik algoritma, çok kısa zamanda ve küçük sapmalar ile sonuçların elde edilmesi görülmektedir. Genetik algoritmanın DD_MSMHD göre ortalama sapması 1,51% olarak görülmektedir.



Şekil 7.4. En iyi çözümü bulunamayan (72000 sn) orta boylu problemler için GA'nın DD_MSMHD modeline göre sapmaları

Çizelge 7.6. En iyi çözümü bulunamayan orta boylu problemler için GA sonuçları

Problem	No	No of Task	Cycle Time	CV									
					α	M Min	DY_MSMHD	M	Time	GA	M	Time	GAP
7 (Kilbridge)	55	45	79	L	H	8	23621*	8	72000	24016	8	10.76	1.64%
	56				M	8	24095*	8	72000	24016	8	14.79	-0.33%
	57				L	8	24332*	8	72000	24411	8	14.7	0.32%
	58			H	H	8	24569*	8	72000	24174	8	14.58	-1.63%
	59				M	8	24648*	8	72000	24648	8	14.36	0.00%
	60				L	8	26623*	9	72000	26623	9	15.05	0.00%
	61			R	H	8	24490*	8	72000	24174	8	14.77	-1.31%
	62				M	8	24490*	8	72000	24648	8	14.74	0.64%
	63				L	8	25596*	8	72000	24885	8	17.13	-2.86%
8 (Kilbridge)	64	45	110	L	H	6	24420*	6	72000	25410	6	15.63	3.90%
	65				M	6	24530*	6	72000	25410	6	14.12	3.46%
	66				L	6	24310*	6	72000	25410	6	15.1	4.33%
	69			H	L	6	25410*	6	72000	25740	6	14.74	1.28%
	70			R	H	6	24640*	6	72000	25410	6	15.32	3.03%
	71				M	6	24640*	6	72000	25520	6	14.35	3.45%
	72				L	6	24750*	6	72000	25740	6	15.47	3.85%
9 (Kilbridge)	73	45	138	L	H	5	25254*	5	72000	25806	5	18.56	2.14%
	74				M	5	25392*	5	72000	25806	5	17.36	1.60%
	75				L	5	25530*	5	72000	26082	5	17.33	2.12%
	81			R	L	5	26082*	5	72000	27324	5	17.45	4.55%

Büyük boyutlu problem için 5 adet test problemi farklı α ve CV parametreleri ile (toplam 45 test problemi) genetik algoritma, DY_MSMHD ve DD_MSMHD modelleri ile çözülmüştür (Çizelge 7.7). Problemin NP-zor yapıya sahip olduğu için önerilen DY_MSMHD ve DD_MSMHD matematiksel modelleri önceden belirlenen zaman dilimi

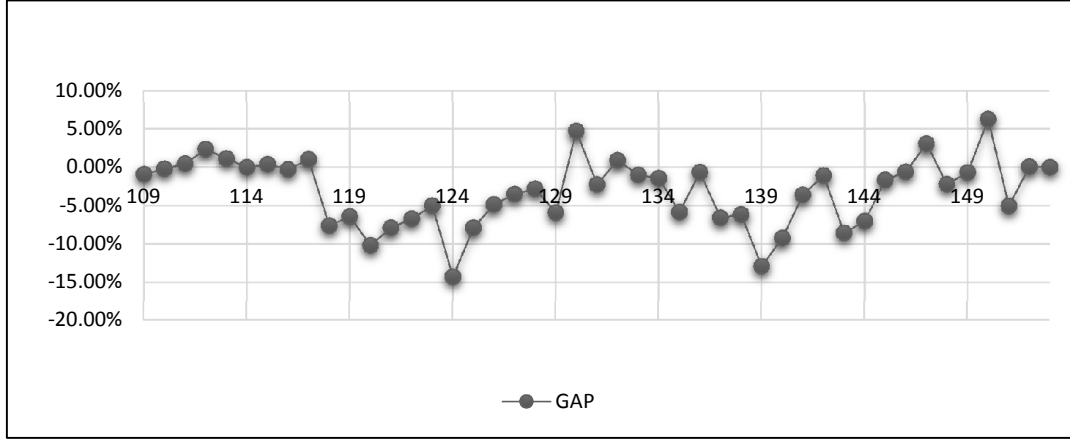
içerisinde, (72000 sn) problemi çözmekte yetersiz kalmaktadırlar. Ayrıca sonuçlara baktığımızda DY_MSMHD modelinin DD_MSMHD modele göre belirlenen zaman dilimi içerisinde daha iyi sonuçlar, elde ettiği görünmektedir (çözülen 45 problemin 35 tanesinde, DY_MSMHD modeli daha iyi sonuç vermiştir). DY_MSMHD modelinden elde edilen sonuçların sapmaları, DD_MSMHD modele göre ortalama -3.18% hesaplanmıştır ve grafiksel olarak Şekil 7.5.'te verilmektedir. Sözkonusu karşılaştırmada 72000 sn sonunda ulaşılan DD_MSMHD modelinin sonuçlarıyla, DY_MSMHD modelinin sonuçlarının karşılaştırılmasını ifade etmektedir. Yani bu karşılaştırmada DD_MSMHD modelinden elde edilen sonuçlar yaklaşık sonuçlardır. Dolayısıyla DY_MSMHD modelinin yaklaşık sonuçlarının DD_MSMHD modelinin sonuçlarından daha iyi olması anlamlıdır. Dolayısıyla büyük boyutlu problemlerde Genetik algoritmanın performansını değerlendirmek için, DY_MSMHD modelin sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlara baktığımızda genetik algoritma ile küçük bir zaman içerisinde çözülen 45 test problemin hepsinde aynı veya daha iyi sonuçların elde edilmesi görünmektedir. Genetik algoritmanın, DY_MSMHD modele göre ortalama sapması -2.35% olarak hesaplanmıştır ve grafiksel gösterimi Şekil 7.6'de verilmektedir.

Çizelge 7.7. GA ile büyük boyutlu problemler için elde edilen sonuçlar

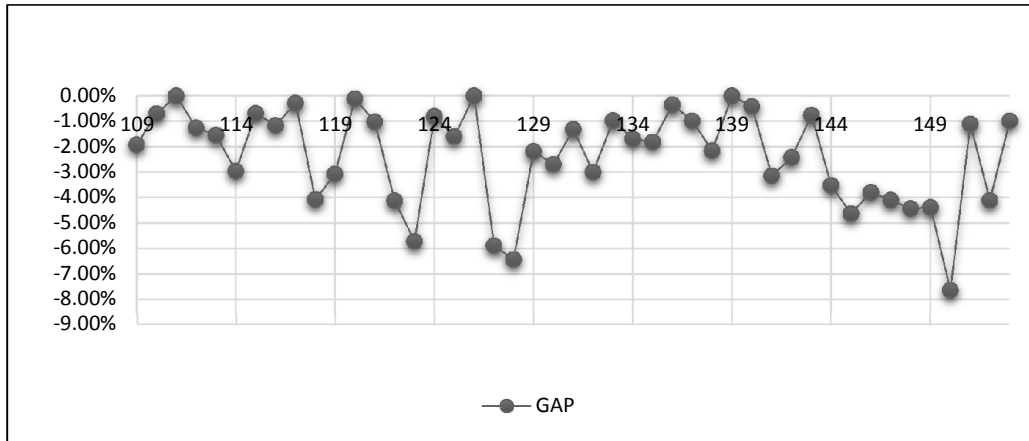
Problem	No	No of Task	Cycle Time	CV													
					α	M Min	DD_MSMHD	M	Time	DY_MSMHD	M	Time	GAP	GA	M	Time	GAP
13 (Tonge)	109	70	234	L	H	16	238446	18	72000	236340	18	72000	-0.89%	231894	17	32.25	-2.83%
	110				M	16	234468	17	72000	234000	18	72000	-0.20%	232362	17	33.23	-0.91%
	111				L	16	238680	17	72000	239850	18	72000	0.49%	239850	17	32.36	0.49%
	112			H	H	16	239382	18	72000	245232	19	72000	2.39%	242190	18	35.74	1.16%
	113				M	16	244062	18	72000	246870	19	72000	1.14%	243126	18	39.25	-0.38%
	114				L	16	NF	-	72000	252486	20	72000	-	245232	18	37.14	-
	115			R	H	16	238914	18	72000	239850	18	72000	0.39%	238212	17	36.28	-0.29%
	116				M	16	245934	18	72000	245232	19	72000	-0.29%	242424	18	35.15	-1.45%
	117				L	16	242658	18	72000	245232	19	72000	1.05%	244530	18	31.47	0.77%
14 (Tonge)	118	70	270	L	H	14	252720	16	72000	234900	15	72000	-7.59%	225720	14	30.35	-11.96%
	119				M	14	251100	16	72000	235980	15	72000	-6.41%	228960	14	31.25	-9.67%
	120				L	14	260820	17	72000	236790	15	72000	-10.15%	236520	15	30.24	-10.27%
	121			H	H	14	259470	17	72000	240570	15	72000	-7.86%	238140	15	30.27	-8.96%
	122				M	14	262170	17	72000	245700	16	72000	-6.70%	235980	15	31.69	-11.10%
	123				L	14	272700	18	72000	259740	16	72000	-4.99%	245700	15	30.45	-10.99%
	124			R	H	14	270540	17	72000	236790	15	72000	-14.25%	234900	15	31.36	-15.17%
	125				M	14	259470	17	72000	240570	15	72000	-7.86%	236790	15	31.47	-9.58%
	126				L	14	252180	16	72000	240570	15	72000	-4.83%	240570	15	32.02	-4.83%

Çizelge 7.7. (devam) GA ile büyük boyutlu problemler için elde edilen sonuçlar

Problem	No	No of Task	Cycle Time	CV																
					α	M Min	DD_MSMHD	M	Time	DY_MSMHD	M	Time	GAP	GA	M	Time	GAP			
15 (Tonge)	127	70	293	L	H	13	251394	15	72000	242897	15	72000	-3.50%	229419	13	31.24	-9.58%			
	128				M	13	249343	15	72000	242604	15	72000	-2.78%	227954	13	33.56	-9.38%			
	129				L	13	262235	16	72000	247585	15	72000	-5.92%	242311	14	29.34	-8.22%			
	130			H	H	13	234986	14	72000	246706	15	72000	4.75%	240260	14	32.05	2.20%			
	131				M	13	252566	15	72000	246999	15	72000	-2.25%	243776	14	33.25	-3.61%			
	132				L	13	249929	15	72000	252273	15	72000	0.93%	244948	14	34.63	-2.03%			
	133			R	H	13	244948	14	72000	242604	15	72000	-0.97%	240260	14	33.02	-1.95%			
	134				M	13	249929	15	72000	246413	15	72000	-1.43%	242311	14	34.27	-3.14%			
	135				L	13	261063	16	72000	246706	15	72000	-5.82%	242311	14	35.32	-7.74%			
16 (Arcus1)	136	83	3985	L	H	20	5718475	21	72000	5682610	21	72000	-0.63%	5662685	21	52.32	-0.99%			
	137				M	20	6085095	23	72000	5710505	21	72000	-6.56%	5654715	21	53.24	-7.61%			
	138				L	20	6196675	22	72000	5838025	22	72000	-6.14%	5714490	21	53.17	-8.44%			
	139			H	H	20	6419835	24	72000	5686595	21	72000	-12.89%	5686595	21	53.36	-12.89%			
	140				M	20	6236525	24	72000	5710505	21	72000	-9.21%	5686595	21	52.89	-9.67%			
	141				L	20	6097050	23	72000	5885845	22	72000	-3.59%	5706520	21	53.01	-6.84%			
	142			R	H	20	5814115	21	72000	5754340	21	72000	-1.04%	5618850	21	53.47	-3.48%			
	143				M	20	6272390	24	72000	5778250	22	72000	-8.55%	5734415	21	52.14	-9.38%			
	144				L	20	6272390	24	72000	5861935	22	72000	-7.00%	5662685	21	52.36	-10.77%			
	145			L	H	13	6186621	15	72000	6087120	15	72000	-1.63%	5817882	14	53.14	-6.34%			
	146				M	13	6128091	15	72000	6092973	15	72000	-0.58%	5870559	14	53.14	-4.39%			
	147				L	13	5905677	14	72000	6092973	15	72000	3.07%	5853000	14	53.24	-0.90%			
	17 (Arcus1)			148	83	5853	H	H	13	6215886	17	72000	6081267	15	72000	-2.21%	5823735	14	53.58	-6.73%
				149				M	13	6174915	15	72000	6133944	15	72000	-0.67%	5876412	14	52.36	-5.08%
				150				L	13	5958354	14	72000	6356358	17	72000	6.26%	5905677	14	53.78	-0.89%
151		R	H	13			6215886	17	72000	5917383	14	72000	-5.04%	5853000	14	53.14	-6.20%			
152			M	13			6081267	15	72000	6087120	15	72000	0.10%	5847147	14	53.12	-4.00%			
153			L	13			6011031	15	72000	6011031	15	72000	0.00%	5952501	14	53.69	-0.98%			

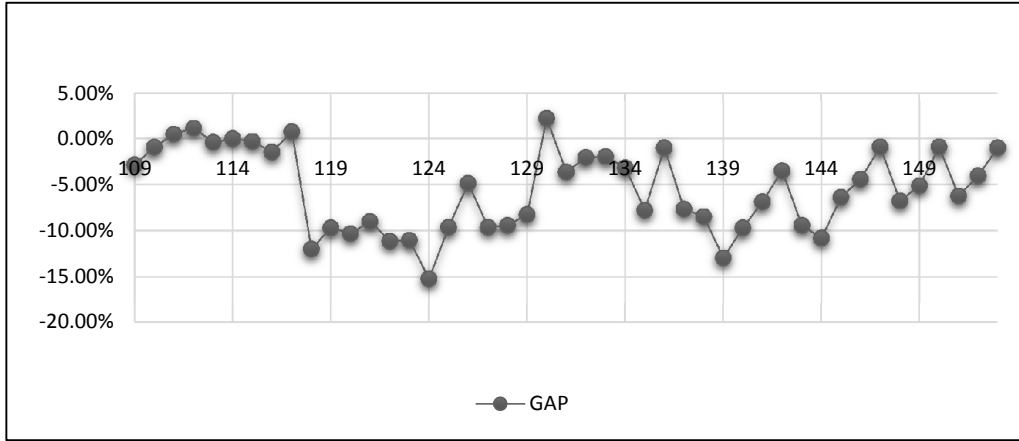


Şekil 7.5. Büyük boylu problemler için DY_MSMHD modelin, DD_MSMHD modeline göre sapmaları



Şekil 7.6. Büyük boylu problemler için GA'nın, DY_MSMHD modeline göre sapmaları

Önerilen genetik algoritma ve DD_MSMHD modeli karşılaştırdığımızda çözülen 45 problemin 41 tanesinde genetik algoritma aynı ve ya daha iyi sonuç vermiştir. Ortalama sapma ise -5.57% olarak hesaplanmıştır ve Şekil 7.7'de verilmektedir.



Şekil 7.7. Büyük boylu problemler için GA'nın, DD_MSMHD modeline göre sapmaları

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tezde, Amen (2000a) tarafından montaj hattı dengeleme literatürüne sunulan maliyet tabanlı montaj hat dengeleme problemi ele alınmıştır. Literatürde şu ana kadar yapılmış olan çalışmalar, montaj hattındaki operasyon sürelerini deterministik olarak dikkate alan çalışmalardır. Stokastik operasyon sürelerinin gerçek dünyayı daha iyi temsil ettiği gerçeği, bu problemde de stokastik versiyonunun çalışılması gereğini doğurmuş, tez için motivasyon kaynağı olmuştur.

Tezde, literatürde çalışılmamış olan maliyet tabanlı stokastik montaj hat dengeleme (MSMHD) problemi çalışılmış, tanıtılmış ve çözüm yaklaşımları ilk olarak literatüre sunulmuştur. Ele alınan problem için bir şans kısıtlı 0-1 tamsayılı karar modeli önerilmiştir. Önerilen doğrusal olmayan modeli doğrusallaştırması için iki yöntem kullanılmış ve iki farklı model önerilmiştir. Birincisi doğrudan dönüşüm yöntemi (DD_MSMHD modeli) ve diğeri ise yaklaşım dönüşüm yöntemi (YD_MSMHD modeli). Önerilen modeller, IBM ILOG CPLEX 12.4 yazılımı yardımıyla küçük ve orta boyutlu problemler için çözülmüştür. Problemin NP-zor olduğundan dolayı, büyük boyutlu problemleri çözmek için sezgisel veya meta sezgisel yöntemlerden faydalanmak gerekmektedir. Bu çalışmada çok-kurallı genetik algoritma önerilmiştir. Literatürde MSMHD problemleri için test problemi bulunmamaktadır. Dolayısıyla geliştirilen modellerin ve önerilen GA'nın performans ve davranış analizini yapmak için test problemi gerekmektedir. Test problemlerinin üretimi için, literatürdeki bilinen deterministik test problemlerinden faydalanılmıştır. 17 tane test problemi farklı α ve CV değerleri ile (toplam 153 test problemi) küçük, orta ve büyük boyutlu problemler olarak üç sınıfta gruplanıp ve çözülmüştür. Geliştirilen GA algoritması Borland C++ derleyicisi kullanılarak C++ programlama dilinde kodlanmış ve yapılan deneysel çalışmalar Intel Pentium 4, 3.2 GHz işlemcili ve 4 GB Ram özelliğine sahip bir bilgisayar sisteminde gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışma literatürde maliyet tabanlı stokastik Montaj hattı dengeleme probleminin boşlunu kapatarak gelecek çalışmalar için iyi bir başlangıç noktası olarak şöyle özetlenebilir:

- Gelecek araştırmalarda sezgisel algoritmalar ve Tabu arama, Karınca koloni ve Tavlama benzetimi gibi meta sezgisel algoritmalar geliştirip ve bu tez deki sonuçlarla karşılaştırılabilir;
- Hedef programlama yaklaşımı gibi çok kriterli karar verme tekniklerinin incelenmesi gelecekteki araştırmalar için iyi bir konu olabilir;
- Önerilen yaklaşımı farklı montaj hatları rneėin U şeklinde, paralel ve iki taraflı, hatlar için genişletmek ilgi çekici olabilir;
- Gama gibi farklı olasılık dağılımına göre stokastik görev zamanlarının geliştirilmesi ileriki çalışmalar da dikkate alınabilir;

KAYNAKLAR

1. Falkenauer, E. (2005). Line balancing in the real world. in *Proceedings of the International Conference on Product Lifecycle Management PLM*.
2. Scholl, A. (1999). Balancing and sequencing of assembly lines. Darmstadt Technical University, Department of Business Administration, Economics and Law, Institute for Business Studies (BWL).
3. Acar, N. (1996). *Üretim planlaması yöntem ve uygulamaları*. Ankara: MPM Yayınları.
4. Özkan, B. (2009). *Stokastik U Tipi Montaj Hattı Dengeleme Problemleri için Parçacık Sürü Optimizasyonu*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Ankara.
5. Üreten, S., (1999). *Üretim/işlemler yönetimi*. Ankara: Başar Ofset.
6. Gökçen, H. (1994). *Karışık modellenli montaj hattı dengeleme problemleri için yenimodeller*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 5-13.
7. Baskak, M., (2005). *Üretim Hatlarında Modelleme Ders Notları*. İstanbul.
8. Filizay, O. S. (2008). *Çok İşçili Hat Dengeleme Problemi İçin Bir Çözüm Yaklaşımı ve Boji Şasesi İmalat Hattı Tasarımı İçin Uygulaması* Yüksek Lisans, Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 12-18.
9. Ağpak, K., Gökçen, H., Saray, N. N. and Özel, S. (2002). Stokastik Görev Zamanlı Tek Modelli U Tipi Montaj Hattı Dengeleme Problemleri İçin Bir Sezgisel. *Journal of the Faculty of Engineering & Architecture of Gazi University*. 17(4), 115-124.
10. Tanyaş, M. and Baskak M., (2003). *Üretim Planlama ve Kontrol*. İstanbul: İrfan Yayıncılık.
11. Tusan, D. (2012). *Maliyet Tabanlı Paralel Montaj Hattı Dengeleme Problemleri: Yeni modeller*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara,
12. Baybars, I. (1986). A Survey of Exact Algorithms for the Simple Assembly Line Balancing Problem. *Management Science*. 32(8), 909-932.
13. Erel, E. and Sarin, S. C. (1998). A survey of the assembly line balancing procedures. *Production Planning & Control*. 9(5), 414-434.
14. Boysen, N., Fliedner, M. and Scholl, A. (2008). Assembly line balancing: Which model to use when? *International Journal of Production Economics*. 111(2), 509-528.
15. Ghosh, S. and Gagnon, R. J. (1989). A comprehensive literature review and analysis of the design, balancing and scheduling of assembly systems. *The International Journal of Production Research*. 27(4), 637-670.

16. Rekiek, B., Dolgui, A., Delchambre, A. and Bratcu, A. (2002). State of art of optimization methods for assembly line design. *Annual Reviews in Control*. 26(2), 163-174.
17. Yılmaz M.M. (2006). *Bulanık Operasyon Zamanlı Geleneksel Montaj Hattı Dengeleme Problemi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara,
18. Benzer, R., Gokcen, H., Cetinyokus, T. and Cercioglu, H. (2007). A network model for parallel line balancing problem. *Mathematical Problems in Engineering*.
19. Bowman, E. H. (1960). Assembly-line balancing by linear programming. *Operations Research*. 8(3), 385-389.
20. Talbot, F. B. and Patterson, J. H. (1984). An integer programming algorithm with network cuts for solving the assembly line balancing problem. *Management Science*. 30(1), 85-99.
21. Gokcen, H. and Erel, E. (1998). Binary integer formulation for mixed-model assembly line balancing problem. *Computers & Industrial Engineering*. 34(2), 451-461.
22. Moodie, C. L. and Young, H. H. (1965). 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.
23. Kao, E. P. (1976). A preference order dynamic program for stochastic assembly line balancing. *Management Science*. 22(10), 1097-1104.
24. Kao, E. P. (1979). Computational experience with a stochastic assembly line balancing algorithm. *Computers & Operations Research*. 6(2), 79-86.
25. Nkasu, M. M. and Leung, K. H. (1995). A Stochastic Approach to Assembly-Line Balancing. *International Journal of Production Research*. 33(4), 975-991.
26. Çakır, B. (2006). *Stokastik İşlem Zamanlı Montaj Hattı Dengeleme İçin Tavlama Benzetimi algoritması*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara,
27. Mansoor, E. and Bentuvia, S. (1966). Optimizing balanced assembly lines. *Journal of Industrial Engineering*. 17(3), 126-&.
28. Ramsing, K. and Downing, R. (1970). Assembly line balancing with variable element times. *Industrial Engineering*. 2(1), 41-&.
29. Reeve, N. R. and Thomas, W. H. (1973). Balancing stochastic assembly lines. *AIIE Transactions*. 5(3), 223-229.
30. Moberly, L. E. and Wyman, F. P. (1973). An application of simulation to the comparison of assembly line configurations. *Decision Sciences*. 4(4), 505-516.
31. Kottas, J. F. and Lau, H.-S. (1973). A Cost-Oriented Approach to Stochastic Line Balancing1. *AIIE Transactions*. 5(2), 164-171.

32. Kottas, J. F. and Lau, H.-S. (1976). A total operating cost model for paced lines with stochastic task times. *AIIE Transactions*. 8(2), 234-240.
33. Kottas, J. F. and Lau, H.-S. (1981). A stochastic line balancing procedure. *The International Journal Of Production Research*. 19(2), 177-193.
34. Vrat, P. and Virani, A. (1976). A cost model for optimal mix of balanced stochastic assembly line and the modular assembly system for a customer oriented production system. *The International Journal Of Production Research*. 14(4), 445-463.
35. Buxey, G. (1978). Incompletion costs versus labour efficiency on the fixed-item moving belt flowline. *The International Journal Of Production Research*. 16(3), 233-247.
36. Raouf, A. and Tsui, C. (1982). A new method for assembly line balancing having stochastic work elements. *Computers & Industrial Engineering*. 6(2), 131-148.
37. Shtjib, A. (1984). The effect of incompletion cost on line balancing with multiple manning of work stations. *The International Journal Of Production Research*. 22(2), 235-245.
38. Sculli, D. (1984). Short term adjustments to production lines. *Computers & Industrial Engineering*. 8(1), 53-63.
39. Driscoll, J. and Abdelshafi, A. A. A. (1985). A Simulation Approach to Evaluating Assembly Line Balancing Solutions. *International Journal of Production Research*. 23(5), 975-985.
40. Silverman, F. N. and Carter, J. C. (1986). A cost-based methodology for stochastic line balancing with intermittent line stoppages. *Management Science*. 32(4), 455-463.
41. Shin, D. (1990). An Efficient Heuristic for Solving Stochastic Assembly Line Balancing Problems. *Computers & Industrial Engineering*. 18(3), 285-295.
42. Betts, J. and Mahmoud, K. I. (1989). Identifying Multiple Solutions for Assembly Line Balancing Having Stochastic Task Times. *Computers & Industrial Engineering*. 16(3), 427-445.
43. Sarin, S. C., Erel, E. and Dar-El, E. M. (1999). A methodology for solving single-model, stochastic assembly line balancing problem. *Omega-International Journal of Management Science*. 27(5), 525-535.
44. Suresh, G. and Sahu, S. (1994). Stochastic assembly line balancing using simulated annealing. *The International Journal of Production Research*. 32(8), 1801-1810.
45. Suresh, G., Vinod, V. V. and Sahu, S. (1996). A genetic algorithm for assembly line balancing. *Production Planning & Control*. 7(1), 38-46.
46. Khan, A. and Day, A. J. (2002). A Knowledge Based Design Methodology for manufacturing assembly lines. *Computers & Industrial Engineering*. 41(4), 441-467.

47. McMullen, P. R. and Tarasewich, P. (2003). Using ant techniques to solve the assembly line balancing problem. *Iie Transactions*. 35(7), 605-617.
48. Liu, S. B., Ong, H. L. and Huang, H. C. (2005). A bidirectional heuristic for stochastic assembly line balancing Type II problem. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 25(1-2), 71-77.
49. Chakravarty, A. K. and Shtub, A. (1986). A cost minimization procedure for mixed model production lines with normally distributed task times. *European Journal of Operational Research*. 23(1), 25-36.
50. McMullen, P. R. and Frazier, G. V. (1997). A heuristic for solving mixed-model line balancing problems with stochastic task durations and parallel stations. *International Journal of Production Economics*. 51(3), 177-190.
51. McMullen, P. R. and Frazier, G. (1998). Using simulated annealing to solve a multiobjective assembly line balancing problem with parallel workstations. *International Journal of Production Research*. 36(10), 2717-2741.
52. Amen, M. (2000a). An exact method for cost-oriented assembly line balancing. *International Journal of Production Economics*. 64(1-3), 187-195.
53. Amen, M. (2000b). Heuristic methods for cost-oriented assembly line balancing: A survey. *International Journal of Production Economics*. 68(1), 1-14.
54. Amen, M. (2001). Heuristic methods for cost-oriented assembly line balancing: A comparison on solution quality and computing time. *International Journal of Production Economics*. 69(3), 255-264.
55. Scholl, A. and Becker, C. (2005). A note on "An exact method for cost-oriented assembly line balancing". *International Journal of Production Economics*. 97(3), 343-352.
56. Amen, M. (2006). Cost-oriented assembly line balancing: Model formulations, solution difficulty, upper and lower bounds. *European Journal of Operational Research*. 168(3), 747-770.
57. Padron, M., Resto, P. and Mejia, H. P. (2009). A methodology for cost-oriented assembly line balancing problems. *Journal of Manufacturing Technology Management*. 20(1147-1165).
58. Grzechca, W. (2008). Estimation of Time and Cost Oriented Assembly Line Balancing Problem. in *Systems Engineering, 2008. ICSENG'08. 19th International Conference on*. IEEE.
59. Yazdanparast, V., Hajihosseini, H. and Bahalke, A. (2011). Cost Oriented Assembly Line Balancing Problem with Sequence Dependent Setup Times *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*. 5(0), 878-884.
60. Andres, C., Miralles, C. and Pastor, R. (2008). Balancing and scheduling tasks in assembly lines with sequence-dependent setup times. *European Journal of Operational Research*. 187(3), 1212-1223.

61. Roshani, A., Fattahi, P., Roshani, A., Salehi, M. and Roshani, A. (2012). Cost-oriented two-sided assembly line balancing problem: A simulated annealing approach. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*. 25(8), 689-715.
62. Gökçen, H. and Baykoç, Ö. F. (1997). Stokastik Görev Zamanlı Dengelenmiş Gecikmesiz Montaj Hatlarının İyileştirilmesi için Bir Model. *Endüstri Mühendisliği Dergisi*. 8(1), 3-8.
63. Erel, E. (1991). Stokastik montaj hattı dengeleme problemi üzerinde yapılan araştırmalar. *Endüstri Mühendisliği Dergisi*. 3(13), 11-15.
64. Taha, H. A., (2007). *Operations research: an introduction*. Pearson/Prentice Hall.
65. Charnes, A. and Cooper, W. W. (1959). Chance-constrained programming. *Management science*. 6(1), 73-79.
66. Symonds, G. H. (1967). Deterministic solutions for a class of chance-constrained programming problems. *Operations Research*. 15(3), 495-512.
67. Kolbin, V. a. c. V., (1977). *Stochastic programming*. Springer.
68. Sengupta, J. K., (1972). *Stochastic programming: methods and applications*. North-Holland Publishing Company Amsterdam, Holland.
69. Ağpak, K. and Gökçen, H. (2007). A chance-constrained approach to stochastic line balancing problem. *European Journal of Operational Research*. 180(3), 1098-1115.
70. Goldberg, D. E., (1989). *Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning*. Vol. 412. Addison-wesley Reading Menlo Park.
71. Michalewicz, Z., (1996). *Genetic algorithms+ data structures= evolution programs*. springer.
72. Becker, C. and Scholl, A. (2006). A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing. *European Journal of Operational Research*. 168(3), 694-715.
73. Tasan, S. O. and Tunali, S. (2008). A review of the current applications of genetic algorithms in assembly line balancing. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 19(1), 49-69.
74. Stockton, D. J., Quinn, L. and Khalil, R. A. (2004). Use of genetic algorithms in operations management - Part 1: applications. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B-Journal of Engineering Manufacture*. 218(3), 315-327.
75. Stockton, D., Quinn, L. and Khalil, R. (2004). Use of genetic algorithms in operations management: Part 2: Results. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 218(3), 329-343.
76. Ajenblit, D. A. and Wainwright, R. L. (1998). Applying genetic algorithms to the U-shaped assembly line balancing problem. in *Evolutionary Computation Proceedings, 1998. IEEE World Congress on Computational Intelligence., The 1998 IEEE International Conference on*. IEEE.

77. Leu, Y. Y., Matheson, L. A. and Rees, L. P. (1994). Assembly-Line Balancing Using Genetic Algorithms with Heuristic-Generated Initial Populations and Multiple Evaluation Criteria. *Decision Sciences*. 25(4), 581-606.
78. Sabuncuoglu, I., Erel, E. and Tanyer, M. (2000). Assembly line balancing using genetic algorithms. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 11(3), 295-310.
79. Brudaru, O. and Valmar, B. (2004). Genetic algorithm with embryonic chromosomes for assembly line balancing with fuzzy processing times. in *The 8th international research/expert conference trends in the development of machinery and associated technology*.
80. Anderson, E. J. and Ferris, M. C. (1994). Genetic algorithms for combinatorial optimization: the assemble line balancing problem. *ORSA Journal on Computing*. 6(2), 161-173.
81. Kim, Y. K., Kim, Y. H. and Kim, Y. J. (2000). Two-sided assembly line balancing: a genetic algorithm approach. *Production Planning & Control*. 11(1), 44-53.
82. Falkenauer, E. and Delchambre, A. (1992). A genetic algorithm for bin packing and line balancing. in *Robotics and Automation, 1992. Proceedings., 1992 IEEE International Conference on*. IEEE.
83. Goncalves, J. F. and de Almeida, J. R. (2002). A hybrid genetic algorithm for assembly line balancing. *Journal of Heuristics*. 8(6), 629-642.
84. Bautista, J., Suárez, R., Mateo, M. and Companys, R. (2000). Local search heuristics for the assembly line balancing problem with incompatibilities between tasks. in *Robotics and Automation, 2000. Proceedings. ICRA'00. IEEE International Conference on*. IEEE.
85. Baykasoglu, A. and Ozbakir, L. (2007). Stochastic U-line balancing using genetic algorithms. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 32(1-2), 139-147.
86. Holland, J. H., (1975). *Adaptation in natural and artificial systems: An introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*. U Michigan Press.
87. Gargari, E. A., Hashemzadeh, F., Rajabioun, R. and Lucas, C. (2008). Colonial competitive algorithm: a novel approach for PID controller design in MIMO distillation column process. *International Journal of Intelligent Computing and Cybernetics*. 1(3), 337-355.
88. Solimanpur, M. and Foroughi, A. (2011). A new approach to the cell formation problem with alternative processing routes and operation sequence. *International Journal of Production Research*. 49(19), 5833-5849.
89. Gen, M. and Cheng, R., (2000). *Genetic algorithms and engineering optimization*. Vol. 7. John Wiley & Sons.

90. Guerriero, F. and Miltenburg, J. (2003). The stochastic U-Line balancing problem. *Naval Research Logistics*. 50(1), 31-57.

EKLER

EK-1. Test problemleri için üretilen düşük, büyük ve rassal değişim katsayı değerleri

Çizelge 1.1. Jackson problemi

i	μ_i	k_i^t	düşük CV	rassal CV	yüksek CV	düşük σ_i^2	rassal σ_i^2	yüksek σ_i^2
1	6	11	0.00346	0.03409	0.54417	0.02076	0.20454	3.26502
2	2	5	0.15188	0.12673	0.35491	0.30376	0.25346	0.70982
3	5	6	0.15218	0.01435	0.45699	0.7609	0.07175	2.28495
4	7	6	0.18042	0.10379	0.51908	1.26294	0.72653	3.63356
5	1	8	0.07823	0.55168	0.55015	0.07823	0.55168	0.55015
6	2	10	0.06541	0.36797	0.47744	0.13082	0.73594	0.95488
7	3	9	0.2464	0.15412	0.54297	0.7392	0.46236	1.62891
8	6	6	0.19164	0.57731	0.4177	1.14984	3.46386	2.5062
9	5	10	0.00848	0.57048	0.33063	0.0424	2.8524	1.65315
10	5	8	0.10182	0.35987	0.40841	0.5091	1.79935	2.04205
11	4	6	0.00586	0.23718	0.46605	0.02344	0.94872	1.8642

EK-1. (devam) Test problemleri için üretilen düşük, büyük ve rassal değişim katsayı değerleri

Çizelge 1.2. Roszieg problemi

i	μ_i	k_i^t	düşük CV	rassal CV	yüksek CV	düşük σ_i^2	rassal σ_i^2	yüksek σ_i^2
1	4	24	0.00346	0.03409	0.54417	0.01384	0.13636	2.17668
2	3	24	0.15188	0.12673	0.35491	0.45564	0.38019	1.06473
3	9	17	0.15218	0.01435	0.45699	1.36962	0.12915	4.11291
4	5	25	0.18042	0.10379	0.51908	0.9021	0.51895	2.5954
5	9	13	0.07823	0.55168	0.55015	0.70407	4.96512	4.95135
6	4	13	0.06541	0.36797	0.47744	0.26164	1.47188	1.90976
7	8	21	0.2464	0.15412	0.54297	1.9712	1.23296	4.34376
8	7	24	0.19164	0.57731	0.4177	1.34148	4.04117	2.9239
9	5	21	0.00848	0.57048	0.33063	0.0424	2.8524	1.65315
10	1	22	0.10182	0.35987	0.40841	0.10182	0.35987	0.40841
11	3	14	0.00586	0.23718	0.46605	0.01758	0.71154	1.39815
12	1	12	0.22351	0.20134	0.42198	0.22351	0.20134	0.42198
13	5	21	0.18763	0.45259	0.57373	0.93815	2.26295	2.86865
14	3	12	0.10459	0.35622	0.44119	0.31377	1.06866	1.32357
15	5	15	0.19832	0.17608	0.51864	0.9916	0.8804	2.5932
16	3	18	0.13371	0.27078	0.49131	0.40113	0.81234	1.47393
17	13	24	0.21285	0.24759	0.39128	2.76705	3.21867	5.08664
18	5	25	0.05978	0.36413	0.39199	0.2989	1.82065	1.95995
19	2	19	0.20439	0.32311	0.59385	0.40878	0.64622	1.1877
20	3	24	0.17585	0.23803	0.31089	0.52755	0.71409	0.93267
21	7	23	0.18127	0.12795	0.39333	1.26889	0.89565	2.75331
22	5	18	0.21994	0.06277	0.31208	1.0997	0.31385	1.5604
23	3	17	0.05098	0.36516	0.30326	0.15294	1.09548	0.90978
24	8	22	0.09222	0.3766	0.45136	0.73776	3.0128	3.61088
25	4	21	0.03406	0.27062	0.39855	0.13624	1.08248	1.5942

EK-1. (devam)Test problemleri için üretilen düşük, büyük ve rassal değişim katsayı değerleri

Çizelge 1.3. Kilbridge problemi

i	μ_i	k_i^t	düşük CV	rassal CV	yüksek CV	düşük σ_i^2	rassal σ_i^2	yüksek σ_i^2
1	9	38	0.00346	0.03409	0.54417	0.03114	0.30681	4.89753
2	9	45	0.15188	0.12673	0.35491	1.36692	1.14057	3.19419
3	10	23	0.15218	0.01435	0.45699	1.52180	0.14350	4.56990
4	10	22	0.18042	0.10379	0.51908	1.80420	1.03790	5.19080
5	17	36	0.07823	0.55168	0.55015	1.32991	9.37856	9.35255
6	17	35	0.06541	0.36797	0.47744	1.11197	6.25549	8.11648
7	13	22	0.24640	0.15412	0.54297	3.20320	2.00356	7.05861
8	13	30	0.19164	0.57731	0.41770	2.49132	7.50503	5.43010
9	20	38	0.00848	0.57048	0.33063	0.16960	11.40960	6.61260
10	20	34	0.10182	0.35987	0.40841	2.03640	7.19740	8.16820
11	10	43	0.00586	0.23718	0.46605	0.05860	2.37180	4.66050
12	11	40	0.22351	0.20134	0.42198	2.45861	2.21474	4.64178
13	6	30	0.18763	0.45259	0.57373	1.12578	2.71554	3.44238
14	22	44	0.10459	0.35622	0.44119	2.30098	7.83684	9.70618
15	11	25	0.19832	0.17608	0.51864	2.18152	1.93688	5.70504
16	19	36	0.13371	0.27078	0.49131	2.54049	5.14482	9.33489
17	12	39	0.21285	0.24759	0.39128	2.55420	2.97108	4.69536
18	3	39	0.05978	0.36413	0.39199	0.17934	1.09239	1.17597
19	7	37	0.20439	0.32311	0.59385	1.43073	2.26177	4.15695
20	4	27	0.17585	0.23803	0.31089	0.70340	0.95212	1.24356
21	55	34	0.18127	0.12795	0.39333	9.96985	7.03725	21.63315
22	14	25	0.21994	0.06277	0.31208	3.07916	0.87878	4.36912
23	27	28	0.05098	0.36516	0.30326	1.37646	9.85932	8.18802
24	29	22	0.09222	0.37660	0.45136	2.67438	10.92140	13.08944
25	26	33	0.03406	0.27062	0.39855	0.88556	7.03612	10.36230
26	6	37	0.27688	0.41232	0.52093	1.66128	2.47392	3.12558
27	5	38	0.10512	0.48847	0.48941	0.52560	2.44235	2.44705
28	24	45	0.02222	0.30709	0.35738	0.53328	7.37016	8.57712
29	4	27	0.28979	0.11034	0.47136	1.15916	0.44136	1.88544
30	5	38	0.02309	0.16220	0.58014	0.11545	0.81100	2.90070
31	7	41	0.26342	0.36459	0.52563	1.84394	2.55213	3.67941
32	4	37	0.00018	0.14177	0.49879	0.00072	0.56708	1.99516
33	15	23	0.07853	0.37440	0.45484	1.17795	5.61600	6.82260

EK-1. (devam) Test problemleri için üretilen düşük, büyük ve rassal değişim katsayı değerleri

Çizelge 1.3. (devam) Kilbridge problemi

i	μ_i	k_i^t	düşük CV	rassal CV	yüksek CV	düşük σ_i^2	rassal σ_i^2	yüksek σ_i^2
34	3	44	0.10450	0.53180	0.49241	0.31350	1.59540	1.47723
35	7	33	0.09357	0.42845	0.43739	0.65499	2.99915	3.06173
36	9	44	0.04666	0.40869	0.39391	0.41994	3.67821	3.54519
37	4	44	0.08237	0.39162	0.49554	0.32948	1.56648	1.98216
38	7	29	0.13858	0.41717	0.55048	0.97006	2.92019	3.85336
39	5	31	0.10310	0.06490	0.43008	0.51550	0.32450	2.15040
40	4	39	0.03525	0.14213	0.34910	0.14100	0.56852	1.39640
41	21	24	0.10951	0.00490	0.39871	2.29971	0.10290	8.37291
42	12	30	0.09814	0.49465	0.58654	1.17768	5.93580	7.03848
43	6	40	0.25213	0.55634	0.40388	1.51278	3.33804	2.42328
44	5	30	0.06523	0.00046	0.42622	0.32615	0.00230	2.13110
45	5	39	0.02964	0.17417	0.48977	0.14820	0.87085	2.44885

Çizelge 1.4. Han problemi

i	μ_i	k_i^t	düşük CV	rassal CV	yüksek CV	düşük σ_i^2	rassal σ_i^2	yüksek σ_i^2
1	971	47	0.0035	0.0341	0.5442	3.3597	33.1014	528.3891
2	142	36	0.1519	0.1267	0.3549	21.5670	17.9957	50.3972
3	142	48	0.1522	0.0144	0.4570	21.6096	2.0377	64.8926
4	142	53	0.1804	0.1038	0.5191	25.6196	14.7382	73.7094
5	103	50	0.0782	0.5517	0.5501	8.0577	56.8230	56.6654
6	96	27	0.0654	0.3680	0.4774	6.2794	35.3251	45.8342
7	99	25	0.2464	0.1541	0.5430	24.3936	15.2579	53.7540
8	1207	47	0.1916	0.5773	0.4177	231.3095	696.8132	504.1639
9	160	33	0.0085	0.5705	0.3306	1.3568	91.2768	52.9008
10	180	31	0.1018	0.3599	0.4084	18.3276	64.7766	73.5138
11	82	25	0.0059	0.2372	0.4660	0.4805	19.4488	38.2161
12	60	45	0.2235	0.2013	0.4220	13.4106	12.0804	25.3188
13	112	44	0.1876	0.4526	0.5737	21.0146	50.6901	64.2578
14	420	36	0.1046	0.3562	0.4412	43.9278	149.6124	185.2998
15	1556	49	0.1983	0.1761	0.5186	308.5859	273.9805	807.0038
16	236	37	0.1337	0.2708	0.4913	31.5556	63.9041	115.9492
17	259	28	0.2129	0.2476	0.3913	55.1282	64.1258	101.3415
18	125	37	0.0598	0.3641	0.3920	7.4725	45.5163	48.9988
19	601	47	0.2044	0.3231	0.5939	122.8384	194.1891	356.9039

EK-1. (devam) Test problemleri için üretilen düşük, büyük ve rassal değişim katsayı değerleri

Çizelge 1.4. (devam) Han problemi

i	μ_i	k_i^t	düşük CV	rassal CV	yüksek CV	düşük σ_i^2	rassal σ_i^2	yüksek σ_i^2
20	80	47	0.1759	0.2380	0.3109	14.0680	19.0424	24.8712
21	80	40	0.1813	0.1280	0.3933	14.5016	10.2360	31.4664
22	70	48	0.2199	0.0628	0.3121	15.3958	4.3939	21.8456
23	89	27	0.0510	0.3652	0.3033	4.5372	32.4992	26.9901
24	89	35	0.0922	0.3766	0.4514	8.2076	33.5174	40.1710
25	105	36	0.0341	0.2706	0.3986	3.5763	28.4151	41.8478
26	330	35	0.2769	0.4123	0.5209	91.3704	136.0656	171.9069
27	132	38	0.1051	0.4885	0.4894	13.8758	64.4780	64.6021
28	69	44	0.0222	0.3071	0.3574	1.5332	21.1892	24.6592
29	99	44	0.2898	0.1103	0.4714	28.6892	10.9237	46.6646
30	70	37	0.0231	0.1622	0.5801	1.6163	11.3540	40.6098
31	70	37	0.2634	0.3646	0.5256	18.4394	25.5213	36.7941
32	158	38	0.0002	0.1418	0.4988	0.0284	22.3997	78.8088
33	191	37	0.0785	0.3744	0.4548	14.9992	71.5104	86.8744
34	70	46	0.1045	0.5318	0.4924	7.3150	37.2260	34.4687
35	53	51	0.0936	0.4285	0.4374	4.9592	22.7079	23.1817
36	50	40	0.0467	0.4087	0.3939	2.3330	20.4345	19.6955
37	125	43	0.0824	0.3916	0.4955	10.2962	48.9525	61.9425
38	353	34	0.1386	0.4172	0.5505	48.9187	147.2610	194.3194
39	70	32	0.1031	0.0649	0.4301	7.2170	4.5430	30.1056
40	128	29	0.0353	0.1421	0.3491	4.5120	18.1926	44.6848
41	65	31	0.1095	0.0049	0.3987	7.1182	0.3185	25.9162
42	1775	47	0.0981	0.4947	0.5865	174.1985	878.0038	1041.1085
43	91	31	0.2521	0.5563	0.4039	22.9438	50.6269	36.7531
44	91	39	0.0652	0.0005	0.4262	5.9359	0.0419	38.7860
45	113	40	0.0296	0.1742	0.4898	3.3493	19.6812	55.3440
46	487	37	0.0401	0.3957	0.3751	19.5092	192.7010	182.6640
47	138	26	0.1410	0.3054	0.4260	19.4525	42.1507	58.7866
48	80	41	0.2857	0.5206	0.5368	22.8560	41.6448	42.9456
49	80	39	0.2913	0.3588	0.5809	23.3048	28.7008	46.4736
50	65	29	0.2324	0.1233	0.4373	15.1080	8.0158	28.4226
51	40	41	0.1313	0.5000	0.3778	5.2532	20.0016	15.1136
52	742	49	0.1500	0.2325	0.3826	111.3148	172.5150	283.9041
53	1085	45	0.2515	0.5345	0.3876	272.8992	579.9434	420.5460

EK-1. (devam) Test problemleri için üretilen düşük, büyük ve rassal değişim katsayı değerleri

Çizelge 1.5. Tonge problemi

i	μ_i	k_i^t	düşük CV	rassal CV	yüksek CV	düşük σ_i^2	rassal σ_i^2	yüksek σ_i^2
1	17	49	0.0035	0.0341	0.5442	0.0588	0.5795	9.2509
2	66	48	0.1519	0.1267	0.3549	10.0241	8.3642	23.4241
3	54	39	0.1522	0.0144	0.4570	8.2177	0.7749	24.6775
4	52	35	0.1804	0.1038	0.5191	9.3818	5.3971	26.9922
5	6	53	0.0782	0.5517	0.5502	0.4694	3.3101	3.3009
6	88	59	0.0654	0.3680	0.4774	5.7561	32.3814	42.0147
7	21	62	0.2464	0.1541	0.5430	5.1744	3.2365	11.4024
8	128	61	0.1916	0.5773	0.4177	24.5299	73.8957	53.4656
9	68	57	0.0085	0.5705	0.3306	0.5766	38.7926	22.4828
10	70	47	0.1018	0.3599	0.4084	7.1274	25.1909	28.5887
11	85	54	0.0059	0.2372	0.4661	0.4981	20.1603	39.6143
12	21	37	0.2235	0.2013	0.4220	4.6937	4.2281	8.8616
13	134	46	0.1876	0.4526	0.5737	25.1424	60.6471	76.8798
14	135	40	0.1046	0.3562	0.4412	14.1197	48.0897	59.5607
15	94	45	0.1983	0.1761	0.5186	18.6421	16.5515	48.7522
16	90	39	0.1337	0.2708	0.4913	12.0339	24.3702	44.2179
17	50	37	0.2129	0.2476	0.3913	10.6425	12.3795	19.5640
18	143	55	0.0598	0.3641	0.3920	8.5485	52.0706	56.0546
19	19	67	0.2044	0.3231	0.5939	3.8834	6.1391	11.2832
20	54	60	0.1759	0.2380	0.3109	9.4959	12.8536	16.7881
21	50	54	0.1813	0.1280	0.3933	9.0635	6.3975	19.6665
22	40	59	0.2199	0.0628	0.3121	8.7976	2.5108	12.4832
23	73	46	0.0510	0.3652	0.3033	3.7215	26.6567	22.1380
24	12	45	0.0922	0.3766	0.4514	1.1066	4.5192	5.4163
25	152	69	0.0341	0.2706	0.3986	5.1771	41.1342	60.5796
26	42	35	0.2769	0.4123	0.5209	11.6290	17.3174	21.8791
27	45	38	0.1051	0.4885	0.4894	4.7304	21.9812	22.0235
28	74	41	0.0222	0.3071	0.3574	1.6443	22.7247	26.4461
29	26	50	0.2898	0.1103	0.4714	7.5345	2.8688	12.2554
30	11	45	0.0231	0.1622	0.5801	0.2540	1.7842	6.3815
31	31	42	0.2634	0.3646	0.5256	8.1660	11.3023	16.2945
32	50	45	0.0002	0.1418	0.4988	0.0090	7.0885	24.9395
33	102	57	0.0785	0.3744	0.4548	8.0101	38.1888	46.3937
34	46	59	0.1045	0.5318	0.4924	4.8070	24.4628	22.6509
35	35	35	0.0936	0.4284	0.4374	3.2750	14.9957	15.3087
36	40	49	0.0467	0.4087	0.3939	1.8664	16.3476	15.7564

EK-1. (devam) Test problemleri için üretilen düşük, büyük ve rassal değişim katsayı değerleri

Çizelge 1.5 (devam) Tonge problemi

i	μ_i	k_i^t	düşük CV	rassal CV	yüksek CV	düşük σ_i^2	rassal σ_i^2	yüksek σ_i^2
37	2	40	0.0824	0.3916	0.4955	0.1647	0.7832	0.9911
38	1	52	0.1386	0.4172	0.5505	0.1386	0.4172	0.5505
39	3	36	0.1031	0.0649	0.4301	0.3093	0.1947	1.2902
40	13	69	0.0353	0.1421	0.3491	0.4583	1.8477	4.5383
41	16	57	0.1095	0.0049	0.3987	1.7522	0.0784	6.3794
42	25	49	0.0981	0.4947	0.5865	2.4535	12.3663	14.6635
43	21	65	0.2521	0.5563	0.4039	5.2947	11.6831	8.4815
44	43	67	0.0652	0.0005	0.4262	2.8049	0.0198	18.3275
45	30	55	0.0296	0.1742	0.4898	0.8892	5.2251	14.6931
46	83	36	0.0401	0.3957	0.3751	3.3250	32.8423	31.1316
47	89	45	0.1410	0.3054	0.4260	12.5454	27.1842	37.9131
48	56	66	0.2857	0.5206	0.5368	15.9992	29.1514	30.0619
49	59	52	0.2913	0.3588	0.5809	17.1873	21.1668	34.2743
50	43	37	0.2324	0.1233	0.4373	9.9945	5.3028	18.8026
51	11	66	0.1313	0.5000	0.3778	1.4446	5.5004	4.1562
52	26	44	0.1500	0.2325	0.3826	3.9005	6.0450	9.9481
53	44	70	0.2515	0.5345	0.3876	11.0669	23.5184	17.0544
54	121	67	0.1825	0.3761	0.3155	22.0765	45.5033	38.1803
55	38	50	0.1320	0.2914	0.4140	5.0168	11.0728	15.7309
56	68	64	0.1741	0.4017	0.4185	11.8361	27.3163	28.4573
57	22	58	0.0296	0.4054	0.4133	0.6503	8.9197	9.0915
58	7	57	0.2904	0.5354	0.3457	2.0331	3.7477	2.4199
59	16	49	0.0579	0.5714	0.5395	0.9258	9.1429	8.6325
60	32	59	0.0966	0.3513	0.3249	3.0918	11.2413	10.3962
61	25	50	0.2162	0.5837	0.5438	5.4058	14.5918	13.5950
62	27	58	0.2512	0.4755	0.3647	6.7829	12.8377	9.8458
63	156	68	0.1556	0.1977	0.3850	24.2767	30.8365	60.0522
64	28	68	0.1004	0.3182	0.4895	2.8115	8.9104	13.7052
65	15	45	0.0251	0.1781	0.4331	0.3761	2.6715	6.4968
66	26	46	0.0839	0.2635	0.5139	2.1809	6.8500	13.3624
67	18	40	0.1254	0.4770	0.4373	2.2565	8.5867	7.8721
68	72	61	0.0087	0.4155	0.4680	0.6278	29.9138	33.6989
69	23	61	0.1381	0.2261	0.4397	3.1761	5.2005	10.1120
70	27	58	0.1700	0.2858	0.3013	4.5911	7.7158	8.1348

EK-1. (devam) Test problemleri için üretilen düşük, büyük ve rassal değişim katsayı değerleri

Çizelge 1.6 Arcus1 problemi

i	μ_i	k_i^t	düşük CV	rassal CV	yüksek CV	düşük σ_i^2	rassal σ_i^2	yüksek σ_i^2
1	1673	61	0.0035	0.0341	0.5442	5.7886	57.0326	910.3964
2	985	50	0.1519	0.1267	0.3549	149.6018	124.8290	349.5863
3	1836	78	0.1522	0.0144	0.4570	279.4025	26.3466	839.0336
4	973	66	0.1804	0.1038	0.5191	175.5487	100.9877	505.0648
5	1700	77	0.0782	0.5517	0.5501	132.9910	937.8560	935.2549
6	2881	42	0.0654	0.3680	0.4774	188.4462	1060.1216	1375.5046
7	2231	42	0.2464	0.1541	0.5430	549.7184	343.8417	1211.3661
8	1040	45	0.1916	0.5773	0.4177	199.3056	600.4024	434.4080
9	1793	63	0.0085	0.5705	0.3306	15.2046	1022.8706	592.8196
10	1250	41	0.1018	0.3599	0.4084	127.2750	449.8375	510.5125
11	700	48	0.0059	0.2372	0.4660	4.1020	166.0260	326.2350
12	464	45	0.2235	0.2013	0.4220	103.7086	93.4218	195.7987
13	500	52	0.1876	0.4526	0.5737	93.8150	226.2950	286.8650
14	1133	61	0.1046	0.3562	0.4412	118.5005	403.5973	499.8683
15	577	83	0.1983	0.1761	0.5186	114.4306	101.5982	299.2553
16	483	61	0.1337	0.2708	0.4913	64.5819	130.7867	237.3027
17	880	47	0.2128	0.2476	0.3913	187.3080	217.8792	344.3264
18	667	74	0.0598	0.3641	0.3920	39.8733	242.8747	261.4573
19	600	45	0.2044	0.3231	0.5938	122.6340	193.8660	356.3100
20	233	67	0.1758	0.2380	0.3109	40.9730	55.4610	72.4374
21	408	51	0.1813	0.1279	0.3933	73.9582	52.2036	160.4786
22	847	63	0.2199	0.0628	0.3121	186.2892	53.1662	264.3318
23	767	56	0.0510	0.3652	0.3033	39.1017	280.0777	232.6004
24	850	52	0.0922	0.3766	0.4514	78.3870	320.1100	383.6560
25	780	75	0.0341	0.2706	0.3985	26.5668	211.0836	310.8690
26	912	41	0.2769	0.4123	0.5209	252.5146	376.0358	475.0882
27	748	57	0.1051	0.4885	0.4894	78.6298	365.3755	366.0787
28	1863	53	0.0222	0.3071	0.3574	41.3959	572.1087	665.7990
29	714	53	0.2898	0.1103	0.4714	206.9101	78.7828	336.5510
30	1004	64	0.0231	0.1622	0.5801	23.1824	162.8488	582.4606
31	713	42	0.2634	0.3646	0.5256	187.8185	259.9527	374.7742
32	642	77	0.0002	0.1418	0.4988	0.1156	91.0163	320.2232
33	629	62	0.0785	0.3744	0.4548	49.3954	235.4976	286.0944
34	1234	64	0.1045	0.5318	0.4924	128.9530	656.2412	607.6340
35	1143	69	0.0936	0.4284	0.4374	106.9505	489.7183	499.9368
36	1266	70	0.0467	0.4087	0.3939	59.0716	517.4016	498.6901

EK-1. (devam) Test problemleri için üretilen düşük, büyük ve rassal değişim katsayı değerleri

Çizelge 1.6 (devam) Arcus1 problemi

i	μ_i	k_i^t	düşük CV	rassal CV	yüksek CV	düşük σ_i^2	rassal σ_i^2	yüksek σ_i^2
37	792	49	0.0824	0.3916	0.4955	65.2370	310.1631	392.4677
38	1251	74	0.1386	0.4172	0.5505	173.3636	521.8796	688.6505
39	1310	62	0.1031	0.0649	0.4301	135.0610	85.0190	563.4048
40	663	70	0.0353	0.1421	0.3491	23.3708	94.2322	231.4533
41	494	75	0.1095	0.0049	0.3987	54.0979	2.4206	196.9628
42	1288	83	0.0981	0.4946	0.5865	126.4043	637.1092	755.4635
43	792	59	0.2521	0.5563	0.4039	199.6870	440.6213	319.8730
44	578	80	0.0652	0.0005	0.4262	37.7029	0.2659	246.3552
45	594	60	0.0296	0.1742	0.4898	17.6062	103.4570	290.9234
46	578	74	0.0401	0.3957	0.3751	23.1547	228.7088	216.7962
47	622	71	0.1410	0.3054	0.4260	87.6771	189.9837	264.9658
48	578	55	0.2857	0.5206	0.5368	165.1346	300.8837	310.2820
49	564	76	0.2913	0.3588	0.5809	164.2988	202.3406	327.6389
50	578	54	0.2324	0.1233	0.4373	134.3445	71.2790	252.7421
51	578	61	0.1313	0.5000	0.3778	75.9087	289.0231	218.3915
52	578	44	0.1500	0.2325	0.3826	86.7116	134.3850	221.1544
53	578	78	0.2515	0.5345	0.3876	145.3786	308.9468	224.0328
54	578	46	0.1825	0.3761	0.3155	105.4561	217.3627	182.3821
55	578	75	0.1320	0.2914	0.4140	76.3076	168.4234	239.2747
56	578	41	0.1741	0.4017	0.4185	100.6067	232.1884	241.8872
57	578	71	0.0296	0.4054	0.4133	17.0857	234.3443	238.8585
58	578	74	0.2904	0.5354	0.3457	167.8743	309.4496	199.8146
59	578	77	0.0579	0.5714	0.5395	33.4431	330.2866	311.8483
60	578	72	0.0966	0.3513	0.3249	55.8464	203.0456	187.7806
61	578	70	0.2162	0.5837	0.5438	124.9809	337.3613	314.3164
62	578	56	0.2512	0.4755	0.3647	145.2052	274.8217	210.7735
63	578	46	0.1556	0.1977	0.3850	89.9484	114.2533	222.5011
64	578	69	0.1004	0.3182	0.4895	58.0370	183.9369	282.9137
65	578	54	0.0251	0.1781	0.4331	14.4905	102.9418	250.3434
66	578	83	0.0839	0.2635	0.5139	48.4826	152.2799	297.0573
67	578	46	0.1254	0.4770	0.4373	72.4581	275.7291	252.7825
68	578	46	0.0087	0.4155	0.4680	5.0402	240.1417	270.5271
69	467	77	0.1381	0.2261	0.4396	64.4880	105.5934	205.3165
70	887	52	0.1700	0.2858	0.3013	150.8255	253.4780	267.2442
71	396	65	0.1386	0.3352	0.3409	54.8896	132.7234	134.9845
72	1296	68	0.0357	0.5564	0.3120	46.2672	721.0296	404.3131

EK-1. (devam) Test problemleri için üretilen düşük, büyük ve rassal değişim katsayı değerleri

Çizelge 1.6 (devam) Arcus1 problemi

i	μ_i	k_i^t	düşük CV	rassal CV	yüksek CV	düşük σ_i^2	rassal σ_i^2	yüksek σ_i^2
73	1100	79	0.2088	0.5921	0.4083	229.6470	651.2661	449.1520
74	2543	48	0.2939	0.3972	0.4631	747.4131	1010.0034	1177.7904
75	764	76	0.2197	0.3820	0.3177	167.8584	291.8327	242.7228
76	357	47	0.2331	0.1777	0.5079	83.2096	63.4532	181.3203
77	701	60	0.1955	0.0671	0.5608	137.0595	47.0231	393.1138
78	1164	58	0.1583	0.5575	0.3553	184.2263	648.9417	413.6158
79	286	46	0.0094	0.4447	0.5465	2.6827	127.1756	156.3076
80	2100	53	0.0452	0.0004	0.3257	94.8780	0.7980	683.9490
81	450	57	0.1656	0.0517	0.5554	74.5380	23.2605	249.9255
82	1300	80	0.0450	0.3995	0.5864	58.4870	519.3890	762.3849
83	3691	41	0.2237	0.5626	0.5325	825.8612	2076.4458	1965.6052

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : FOROUGHI, Ahad
Uyruğu : IRAN
Doğum tarihi ve yeri : 01.04.1983, Tabriz
Medeni hali : Bekâr
Telefon : 0537 915 7747
e-mail : ahad.foroughi@gmail.com



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	İslamic Azad Üniv. / Endüstri Müh.	2009
Lisans	Payam Noor Üniv. / Bilgisayar Müh.	2006
Lise	Tabriz Taleghani Lisesi	2002

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

- Maliyet Tabanlı Stokastik Montaj Hattı Dengeleme Problemi, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, (Accepted).
- A New Approach to The Cell Formation Problem with Alternative Processing Routes and Operation Sequence, international journal of production research, 49:19, 5833-5849, 2010.
- A Two-Stage Solution Approach Based on Mathematical Programming for Designing Manufacturing Cells, 3rd International Conference on Industrial Engineering and Operations Management (IEOM 2012) Istanbul, Turkey, July 3-6, 2012.
- Solving Cell Formation Problem Considering Operation Sequence and Alternative Process Routing, 2th International Conference of Iranian Operations Research Society, Babolsar, Iran, May 20-22, 2009.

Hobiler

Bisiklet sürme, Yüzme,



GAZİ GELECEKTİR...