



**U TİPİ MONTAJ HATTI DENGELEME PROBLEMLERİNDE ÜRETİM
ORANININ ARTIRILMASINA YÖNELİK YENİ ÇÖZÜM
YAKLAŞIMLARI**

Murat ŞAHİN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

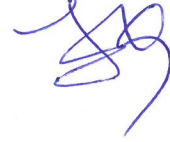
OCAK 2016

Murat ŞAHİN tarafından hazırlanan “U TİPİ MONTAJ HATTI DENGELEME PROBLEMLERİNDE ÜRETİM ORANININ ARTIRILMASINA YÖNELİK YENİ ÇÖZÜM YAKLAŞIMLARI” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Talip KELLEGÖZ

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.



Başkan : Doç. Dr. İsmail KARAOĞLAN

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Selçuk Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.



Üye : Doç. Dr. Selçuk Kürşat İŞLEYEN

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.



Tez Savunma

Tarihi: 08/01/2016

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



Prof. Dr. Metin GÜRÜ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

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

- Çalışma 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,
- Çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

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

Murat ŞAHİN

08.01.2016

U TİPİ MONTAJ HATTI Dengeleme Problemlerinde Üretim Oranının Artırılmasına Yönelik Yeni Çözüm Yaklaşımları

(Yüksek Lisans Tezi)

Murat ŞAHİN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2016

ÖZET

U tipi montaj hatları genellikle tam zamanında üretim sistemlerinde kullanılan hücresel imalatın özel bir türü olarak bilinmektedir. Görevlerin istasyonlara atanmasında düz hatlara kıyasla daha fazla esneklik sağlayan bu hatlar, üretim oranının artırılmasında avantajlı olabilmektedir. U tipi montaj hatlarında üretim oranının artırılmasına yönelik az sayıda çalışma bulunmasına rağmen, belirtilen probleme gerçek hayatta sıklıkla karşılaşılmaktadır. Bu tezde, literatürde U tipi montaj hattı dengeleme problemlerine uygulanan farklı matematiksel modelleme yaklaşımları kullanılarak, belirtilen problemin tamsayılı doğrusal programlama modelleri oluşturulmuştur. Orta ve büyük ölçekli problemlerin çözümü için grup genetik algoritma ile tavlama benzetimine dayalı iki farklı sezgisel yöntem geliştirilmiştir. Literatürde bulunan karşılaştırma problemleri kullanılarak, matematiksel modeller ile önerilen sezgisel yöntemlerin etkinliği karşılaştırılmıştır. Sonuçlar matematiksel modellerin küçük ölçekli örneklerde etkili olduğunu belirlerken, grup genetik algoritma ve tavlama benzetiminin bütün problem örnekleri için kabul edilebilir kalitede çözümler ürettiğini göstermiştir. Genel olarak yöntemler kıyaslandığında ise grup genetik algoritma en iyi performansı sergilemiştir.

Bilim Kodu : 906.1.141

Anahtar Kelimeler : Montaj hattı dengeleme, U tipi hatlar, grup genetik algoritma, tavlama benzetimi, üretim oranı

Sayfa Adedi : 81

Danışman : Yrd. Doç. Dr. Talip KELLEGÖZ

NEW SOLUTION APPROACHES FOR U SHAPED ASSEMBLY LINE BALANCING
PROBLEMS WITH MAXIMIZING PRODUCTION RATE

(M. Sc. Thesis)

Murat ŞAHİN

GAZİ UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2016

ABSTRACT

U-shaped assembly lines are known as a specific type of cellular manufacturing systems, which generally used in just-in-time production systems. These lines, which may provide flexibility in assigning tasks to stations when compared straight lines, may be more efficient in maximizing production rate. Although the studies which try to maximize production rate for U shaped assembly lines are very few, the stated problem generally occurs in real life applications. In this thesis, firstly, the integer linear programming models of the problem are improved by inspiring the approaches used in solving different version of the U shaped assembly line balancing problems. Then a grouping genetic and simulated annealing algorithms are proposed in order to solve medium and large size problem instances. A set of benchmark instances from the literature was solved in order to evaluate the efficiency of the mathematical models and proposed metaheuristics. Results showed that while mathematical models are effective in solving small size problem instances, grouping genetic and simulated annealing algorithms can solve all instances with acceptable solution quality. Moreover grouping genetic algorithm is superior to other methods in solving real-life size problem instances.

Science Code : 06.1.141

Key Words : Assembly line balancing, U-type lines, grouping genetic algorithm, simulated annealing, production rate

Page Number : 81

Supervisor : Assist. Prof. Dr. Talip KELLEĞÖZ

TEŞEKKÜR

Düşünce ve görüşleri ile tezin oluşmasına çok büyük katkı sağlayan değerli hocam Yrd. Doç. Dr. Talip KELLEĞÖZ'e, mesai arkadaşlarım Ar. Gör. Serhan KÖKHAN ve Ar. Gör. İsmet SÖYLEMEZ'e ve desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen sevgili aileme teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	v
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	vii
İÇİNDEKİLER	viii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. MONTAJ HATTI VE MONTAJ HATTI Dengeleme Problemi	5
2.1. Montaj Hatları İle İlgili Temel Kavramlar	5
2.2. Montaj Hattı Dengeleme Problemleri.....	9
2.2.1. Üretilen ürün çeşitliliğine göre montaj hatları.....	9
2.2.2. Görev sürelerinin değişkenliğine göre montaj hatları	11
2.2.3. Atama kısıtlarının değişkenliğine göre montaj hatları.....	12
2.2.4. İstasyon türlerine göre montaj hatları	13
2.2.5. Yerleşim planına göre montaj hatları	14
2.2.6. Amaca göre montaj hattı dengeleme problemleri.....	16
3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	17
3.1. U Tipi Montaj Hattı Çalışmaları.....	17
3.2. Montaj Hattı Dengeleme Tip II Çalışmaları	23
4. PROBLEM TANIMI VE MATEMATİKSEL MODELLER.....	27
4.1. Matematiksel Modelleme Yaklaşımları.....	29
5. ÖNERİLEN SEZGİSEL YÖNTEMLER.....	35

	Sayfa
5.1. Genetik Algoritmalar	35
5.1.1. Genetik algoritmaların genel özellikleri ve temel kavramlar	35
5.2. Grup Genetik Algoritma	39
5.2.1. Kodlama yapısı	40
5.2.2. Başlangıç popülasyonunun üretilmesi	41
5.2.3. Seçim mekanizması	43
5.2.4. Çaprazlama operatörü	43
5.2.5. Mutasyon operatörü	49
5.2.6. Yerel arama yöntemi	49
5.2.7. Erken yakınsama kontrolü ve yeniden üretim mekanizması	51
5.2.8. Parametre ayarlaması	51
5.3. Önerilen Tavlama Benzetimi Algoritması	52
5.3.1. Kodlama yapısı, başlangıç çözümü oluşturulması ve komşuluk yapısı .	55
5.3.2. Soğutma çizelgesi	56
6. HESAPLAMA SONUÇLARI	57
7. SONUÇ VE ÖNERİLER	63
KAYNAKLAR	65
EKLER	71
EK-1. Test problemlerinin çözümünden elde edilen sonuçlar	72
ÖZGEÇMİŞ	81

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 5.1. Rastsal kromozom oluşturulmasının adımları	43
Çizelge 5.2. Parametre değerlerinin belirlenmesi	52
Çizelge 6.1. Hesaplama sonuçlarının özetlenmesi.....	58
Çizelge 6.2. Genel karşılaştırma tablosu.....	61

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Öncelik diyagramı ve öncelik matrisine bir örnek	7
Şekil 2.2. Montaj hattı dengeleme problemlerinin sınıflandırılması	10
Şekil 2.3. Tek modellenli montaj hatlarına bir örnek	10
Şekil 2.4. Karışık modellenli montaj hatlarına bir örnek.....	11
Şekil 2.5. Çok modellenli montaj hatlarına bir örnek.....	11
Şekil 2.6. Düz montaj hattının şekilsel gösterimi	14
Şekil 2.7. U tipi montaj hattının şekilsel gösterimi.....	15
Şekil 4.1. Düz ve U tipi montaj hatlarında görev atamalarına ilişkin bir örnek	28
Şekil 4.2. Urban modeline ilişkin hayali ve gerçek öncelik diyagramına bir örnek.....	30
Şekil 4.3. Dong modelleme yaklaşımının şekilsel gösterimi.....	32
Şekil 5.1. Önerilen GGA'nın genel yapısı.....	40
Şekil 5.2. Kodlama yapısının Jackson problemi üzerinde gösterimi	41
Şekil 5.3. Rastsal kromozomun oluşturulmasına ilişkin algoritma	42
Şekil 5.4. Rastsal kromozom oluşturulmasına bir örnek	42
Şekil 5.5. Çaprazlama operatörünün uygulanmasına ilişkin algoritma	44
Şekil 5.6. Rastsal pozisyonların belirlenmesi	46
Şekil 5.7. Yavru kromozomda görev yönlerinin belirlenmesi ve rastsal atamalar	46
Şekil 5.8. Uygunluğu bozmayan genlerin baba kromozomdan kopyalanması.....	47
Şekil 5.9. Kritik yolun bulunması ve en kısa yol probleminin oluşturulması.....	48
Şekil 5.10. En kısa yol problemine göre gerçekleştirilen atamalar.....	48
Şekil 5.11. Çaprazlama sonucu elde edilen yavru kromozom 1	48
Şekil 5.12. Mutasyon operatörünün uygulanışına bir örnek	49
Şekil 5.13. Yerel arama yönteminin uygulanışına ilişkin algoritma.....	50
Şekil 5.14. Tavlama benzetimi algoritmasının genel yapısı	54

Şekil	Sayfa
Şekil 5.15. Komşu çözüm oluşturulmasının şekilsel gösterimi	55
Şekil 6.1. Matematiksel modellerin karşılaştırılması.....	59
Şekil 6.2. GGA ile Fattahi matematiksel modelinin performanslarının karşılaştırılması.	60
Şekil 6.3. Önerilen yöntemlerin problem boyutlarına göre karşılaştırılması.....	62

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
c	Çevrim süresi
D_i	Düzgünlük indeksi
HE	Hat etkinliği
I_k	k. istasyonun boş zamanı
LB_c	Çevrim süresinin teorik alt sınır değeri
m	Toplam istasyon sayısı
n	Toplam görev sayısı
P_i	i görevinin direk öncüllerinin kümesi
P_C	Çaprazlama operatörünün uygulanma olasılığı
P_{CR}	Çaprazlamada bir genin seçilme olasılığı
P_{LS}	Yerel arama yönteminin uygulanma olasılığı
P_M	Mutasyon operatörünün uygulanma olasılığı
S_k	k. istasyona atanan görevler kümesi
SR	Kromozomların birbirine benzeme oranı
S_{TR}	Benzerlik oranı için eşik değeri
St_k	k. istasyonun işlem süresi
t_i	i. görevin işlem süresi
$t_{assigned}$	Atanan görevlerin işlem süreleri toplamı
t_{sum}	Bütün görevlerin işlem süreleri toplamı
v_i	Görevin U tipin hattın hangi tarafına atadığını gösteren 0-1 değişken
x_{ik}	Görevin gerçek diyagramdan atanmasını gösteren 0-1 değişken
y_{ik}	Görevin hayali diyagramdan atanmasını gösteren 0-1 değişken

Kısaltmalar**Açıklamalar**

BGA	Basit genetik algoritma
COMSOAL	Montaj hattında görevlerin sıralanması için bilgisayar yöntemi
GGA	Grup genetik algoritma
ICA	Yayılan rekabetçi algoritma
MHDP	Montaj hattı dengeleme problemleri
NP	Polinomsal zamanda çözilemeyen
TB	Tavlama benzetimi
TBZ	Toplam boş zaman
ULINO	U tipi montaj hattı iyileştirici
UMHDP	U tipi montaj hattı dengeleme problemleri
UMHDP-I	U tipi montaj hattı dengeleme tip I problemleri
UMHDP-II	U tipi montaj hattı dengeleme tip II problemleri

1. GİRİŞ

Günümüzde işletmeler arasında yoğun rekabetin yaşanmasına bağlı olarak, endüstriyel üretim teknolojilerinin önemi de artmaktadır. Rekabet gücünün artırılması açısından üretim maliyetlerinin düşürülmesi ve kaynakların daha etkin kullanılması gün geçtikçe daha önemli bir hale gelmektedir. Endüstriyel işletmeler ise kısıtlı olan üretim kaynaklarını daha etkin kullanabilmek ve üretim maliyetlerini azaltmak amacıyla akış tipi üretim sistemlerine yönelmişlerdir (Polat, 2008). Akış tipi üretim sistemlerinde, standartlaştırılmış ürünler yüksek hacimlerde üretilmektedir. Yüksek miktarlarda üretimin yanı sıra üretim maliyetlerinin düşük seviyelerde olması istenmektedir. Önemli bir akış tipi üretim şekli olan montaj hatları ise en temel üretim sistemlerinden biri olarak bilinmektedir. Bir *montaj hattı*, belirli sayıda ardışık iş istasyonunun birbirlerine bir malzeme taşıma sistemi ile bağlanmasıyla meydana gelir. Malzemeler, bu istasyonlar arasında sabit bir taşıma hızıyla hareket eder. Her istasyonda, ürünün tamamlanması için gerekli olan görevlerden bazıları gerçekleştirilir ve hattın sonuna gelindiğinde, ürün tamamlanmış olur (Gökçen, Ağpak ve Benzer, 2006).

Üretim şartlarının gerektirdiği durumlara göre montaj hatlarının farklı konfigürasyonlarda tasarlanması avantaj sağlayabilmektedir. Genellikle sürekli üretimde kullanılan düz montaj hatları zamanla müşteri beklentileri, rekabet faktörleri ve teknolojik gelişmeler paralelinde tasarım açısından değişik şekillerde kullanılmıştır (Özcan, 2006). Farklı şekillerde dizayn edilebilen montaj hatlarının, U tipi ya da düz bir şekilde tasarlanabilmesi mümkün olmaktadır. Basit montaj hatlarında görevlerin gerçekleştirileceği istasyonlar düz bir hat üzerinde bulunurken, U tipinde istasyonlar dar bir U biçimini sergileyecek şekilde yerleştirilir. Bu sayede U tipi hattın içerisinde bulunan bir işçi, hattın giriş ve çıkış tarafında bulunan istasyonlara atanan görevleri yerine getirebilmektedir (Shimbun, 1991). U tipi hatların en önemli avantajlarından birisi görevlerin istasyonlara atanması sırasında, basit montaj hatlarına kıyasla daha fazla esneklik sağlamasıdır. Zira düz montaj hatlarında bir görevin sıradaki istasyona atanabilmesi için öncül görevlerinin tamamının sıradaki ya da önceki istasyonlara atanmış olması gerekirken, U tipinde öncül görevlerinin tamamının ya da ardıl görevlerinin tamamının sıradaki ya da önceki istasyonlara atanmış olması yeterlidir (Ajenblit ve Wainwright, 1998).

Montaj hatlarının farklı yerleşim düzeninde tasarlanmasındaki amaçlardan bazılarının, kısıtlı kaynakların verimli bir şekilde kullanımının sağlanması, üretim maliyetlerinin düşürülmesi ve rekabet gücünün artırılması olduğu söylenebilmektedir. Maliyet kalemlerini artırmadan üretim oranının artırılması rekabet gücü ve karlılık açısından büyük önem taşımaktadır. Montaj hatları ile üretim yapılan işletmelerde ise üretim oranının artırılması, çevrim süresinin (c) minimizasyonu ile sağlanabilmektedir. İki ürün çıkışı arasında geçen zaman aralığını ifade eden çevrim süresinin diğer bir tanımı da; istasyonlara atanan görevlerin operatörler tarafından gerçekleştirilmesi için sağlanan maksimum süredir (Scholl, 1999: 3,65). Üretim oranını artırmayı amaçlayan montaj hattı dengeleme problemleri tip II olarak bilinmekte olup, önceden belirlenen bir istasyon sayısı altında, öncelik kısıtlarını da göz önünde bulundurarak görevleri istasyonlara uygun bir şekilde atamaya çalışır.

Üretim oranının artırılması istenen ve U tipi montaj hatları ile üretim yapılan işletmelerde U tipi montaj hattı dengeleme tip II problemlerine (UMHDP-II) sıklıkla karşılaşılmaktadır. NP-zor (Gutjahr, 1964) bir yapıya sahip olan montaj hattı dengeleme problemleri (MHDP) ile ilgili literatürde çok sayıda çalışma bulunmasına rağmen, UMHDP-II problemleri ile ilgili yayın sayısı oldukça kısıtlıdır. UMHDP-II ile ilgili bilinen çalışmalardan biri Scholl ve Klein (1999) tarafından sunulmuştur. Makalede U tipi montaj hattı dengeleme probleminin farklı versiyonları derinlik öncelikli bir dal sınır algoritma kullanılarak çözülmüştür. Amaç fonksiyonu olarak istasyon sayısının minimizasyonu, çevrim süresinin minimizasyonu ve hat etkinliğinin maksimizasyonu benimsenmiştir. UMHDP-II ile ilgili bilinen bir diğer çalışma ise Johnalagedda ve Dabade (2014) tarafından gerçekleştirilmiştir. Rastsal arama yöntemine dayanan basit bir genetik algoritma (BGA) sunularak bazı problem örnekleri çözülmüştür.

Bu çalışmada UMHDP-II'ye yönelik yeni çözüm yaklaşımları sunularak, önerilen yaklaşımların literatürde bulunan metotlara kıyasla etkinliği araştırılmıştır. Literatürde U tipi montaj hattı dengeleme problemlerine uygulanan matematiksel modelleme yaklaşımları kullanılarak ilgili problemin tamsayı doğrusal programlama modelleri tanımlanmıştır. Bunun yanı sıra NP-zor bir yapıya sahip olan problemin çözümü için grup genetik algoritma (GGA) ve tavlama benzetimine (TB) dayalı iki farklı sezgisel yöntem geliştirilmiştir. Önerilen sezgisel yöntemler ile matematiksel modellerin etkinliği literatürde bulunan birtakım test problemleri üzerinde karşılaştırılmıştır.

Çalışmanın devamı şu şekilde organize edilmiştir. İkinci bölümde montaj hatları ile ilgili genel bilgiler verilmiş ve temel kavramlar tanıtılmıştır. Yine aynı bölümde montaj hattı modelleri ve problemleri anlatılmıştır. Literatürde montaj hatlarında üretim oranının artırılması ile U tipi hatlara yönelik olarak gerçekleştirilen çalışmalar Bölüm 3’de iki ayrı başlık altında sunulmuştur. Bu tez kapsamında incelenen probleme ilişkin bilgiler ve matematiksel modeller ise Bölüm 4’de anlatılmıştır. Bölüm 5’de geliştirilen sezgisel yöntemler hakkında detaylı bilgiler verilmektedir. Literatürde bulunan birtakım test problemleri üzerinde önerilen yöntemlerin etkinliğinin karşılaştırılması 6. bölümde sunulmuştur. Bölüm 7’de ise sonuç ve değerlendirmeler yer almaktadır.

2. MONTAJ HATTI VE MONTAJ HATTI DENGELEME PROBLEMİ

Montaj hatları üzerinde işlemleri yapacak olanlar, hat boyunca sıralanmış olan istasyonlarda bulunan işçilerdir. Bir montaj hattının temel özelliği iş parçalarının bir istasyondan diğer bir istasyona hareket etmesidir. Bir montaj hattı kurulması planlandığında, üretim hattı için iş istasyonlarına ait işlem sürelerinin dengelenmesi problemi ortaya çıkar. Belirtilen problem, kurulan montaj hattının verimli olarak çalışabilmesi için ürüne ilişkin operasyonların istasyonlara elden geldiğince eşit olarak dağıtılmasını amaçlamaktadır. Bir diğer tanımla, mevcut kısıtlar altında istasyonlar arasındaki iş yükü farkları toplamının en küçüklenmesidir. İstasyonların oluşturulması bu problemin çözümüne bağlı olduğu için hat dengeleme konusu yerleşim düzenlemesiyle de yakından ilgilidir. Üretim hızının artırılması, kaynak israfının ve iş gücü kaybının en küçük düzeye indirilmesi, çok sayıda mamulün daha seri bir şekilde ve çok daha ucuz bir maliyetle üretilebilmesi, çalışma şartlarının iyileştirilmesi, çalışanların fizyolojik ve psikolojik özelliklerine uygun bir çalışma ortamı oluşturulabilmesi amacıyla montaj hatlarının dengelenmesi yoluna gidilmektedir. Montaj işleminin yapılabilmesi için gerekli işler, bu işlerin aldıkları süreler ve aralarındaki öncelik ilişkileri verildiğinde, işlerin bir başarımlı ölçütünü eniyileyecek şekilde iş istasyonlarına atanması, MHDP olarak tanımlanmaktadır (Ağpak ve Gökçen, 2002).

2.1. Montaj Hatları İle İlgili Temel Kavramlar

Montaj hattı literatüründe kullanılan önemli bazı temel kavramlar ve ölçütler aşağıdaki şekildedir (Saçlı, 2006; Scholl, 1999: 3,65; Becker ve Scholl, 2006).

Montaj hattı

Bir ve veya birkaç ürünü üretmek için gerekli olan işlemlerin sırası ile uygulanmasını sağlamak amacıyla, çok sayıda çalışma alanlarından oluşan ve ürünlerin bu alanlara çeşitli taşıma ekipmanları ile ulaştırılması sağlanarak, en son çalışma alanında yapılan işlemler neticesinde nihai ürünü ortaya koyan üretim sistemine montaj hattı denir.

Görev

Bir montaj hattında yapılması gereken bölünemez en küçük iş parçasına görev adı verilir.

Görev zamanı (t_i)

Montaj hattında yapılması gereken herhangi bir görevin, gerçekleştirilmesi için gerekli olan süreye görev zamanı denir. Bu görev zamanları deterministik olabileceği gibi işçilerin çalışma hızları gibi herhangi bir faktördeki değişime bağlı olarak stokastik değerlerde alabilirler.

İstasyon

Montaj hattında birtakım görevlerin yerine getirildiği çalışma alanlarına istasyon adı verilir. Basit montaj hatlarında her istasyonda bir işçi bulunurken, çok işçili montaj hatlarında alan vb. çeşitli faktörler dikkate alınarak istasyonlarda birden fazla işçi bulundurulabilir.

İstasyon süresi (St_k)

Montaj hattında belirli bir istasyona atanmış olan görevlerin işlem süreleri toplamı istasyon zamanını vermektedir.

$$St_k = \sum_{i \in A_k} t_i \quad (2.1)$$

Bu eşitlikte A_k , k . istasyona atanan görevler kümesidir.

Çevrim süresi (c)

Standart bir çalışma temposu ile bir montaj hattının ucundan ardı ardına iki ürün çıkışı arasında geçen süredir. Başka bir ifade ile montaj hattını oluşturan bir istasyona, o istasyona atanan görevleri tamamlayabilmesi için ayrılan en büyük zamandır.

$$c = \max_{k=1, \dots, m} (St_k) \quad (2.2)$$

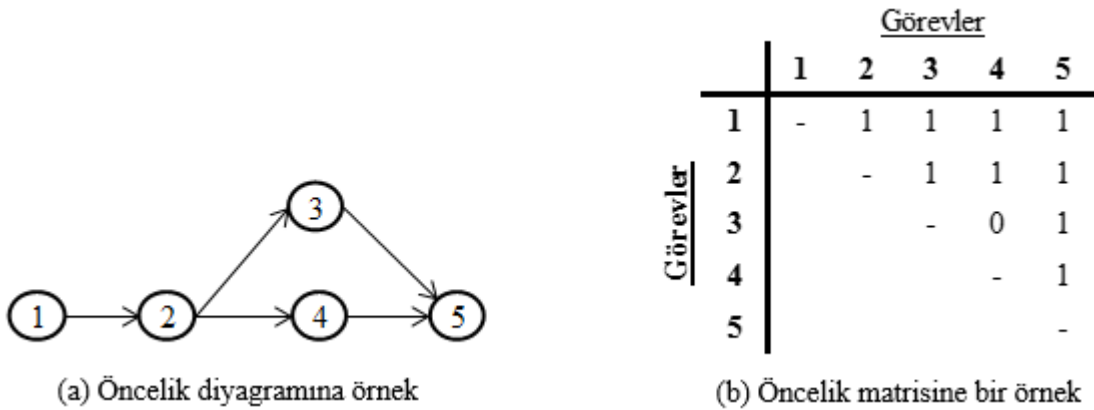
Bu eşitlikte m açılacak maksimum istasyon sayısını göstermektedir.

Öncelik kısıtı

Montaj hattında bazı görevlerin gerçekleştirilmesi için öncesinde diğer bazı görevlerin tamamlanmış olması gerekmektedir. Buna bağlı olarak görevlerin belirli bir sıra ile yerine getirilmesi gerekmekte olup bu duruma öncelik ilişkisi, bu ilişkinin ortaya koyduğu kısıta da öncelik kısıtı adı verilir.

Öncelik diyagramı, öncelik matrisi, öncül görev, ardıl görev

Üretim prosesinde gerçekleştirilecek olan görevlerin öncelik ilişkilerine göre dizilişlerini gösteren diyagramlara öncelik diyagramı denir. İşlerin istasyonlara ataması gerçekleştirilirken öncelik diyagramındaki sıralamanın göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Bir montaj işleminde gerçekleştirilmesi gereken görevler arasındaki öncelik ilişkilerinin ifade edildiği, elemanlarının 0-1 değerlerini aldığı ve boyutu görev sayısına eşit olan kare matrise ise öncelik matrisi adı verilir. Eğer öncelik diyagramında bir j görevinin başlaması için i görevinin tamamlanmış olması gerekiyorsa öncelik matrisinin i . satır, j . sütun elemanı 1 değerini, aksi durumda 0 değerini almaktadır. Öncelik diyagramı ve öncelik matrisine bir örnek Şekil 2.1’de sunulmuştur.



Şekil 2.1. Öncelik diyagramı ve öncelik matrisine bir örnek

Şekil 2.1’de gösterilen öncelik diyagramı dikkate alınacak olursa, 2. göreve başlanması için, 1. görevin tamamlanmış olması gerekmektedir. Görev 4’e başlanması için 1. ve 2. görevlerin gerçekleştirilmiş olması şarttır. Bir göreve başlamak için bitirilmesi gereken görevler o görev için öncül görevler (*öncüller*) olarak adlandırılırken, bir görev bitmeden başlanamayacak olan görevler o görev için ardıl görevler (*ardıllar*) olarak belirtilir.

İstasyon boş zamanı (I_k)

Montaj hattında istasyonlara atanan görevlere başlama zaman aralığı eşittir ve çevrim süresi kadardır. Çevrim süresi ile istasyon süresi arasındaki fark istasyon boş zamanı olarak adlandırılır. İstasyon boş zamanının hesaplanması Eş. 2.3’de sunulmuştur.

$$I_k = c - St_k \quad (2.3)$$

Toplam boş zaman ve denge gecikmesi

Montaj hattındaki istasyonların boş zamanlarının toplamı, toplam boş zaman olarak ifade edilir. Toplam boş zamanın (TBZ) ürünün hat boyunca harcadığı toplam zamana oranı, hattın etkinliğinin bir ölçüsü olup, denge gecikmesi olarak adlandırılır.

Düzensizlik indeksi ($Dİ$)

MHDP’de amaç, her bir istasyonun istasyon zamanını çevrim zamanına eşit olacak şekilde düzenlenmesidir. Bu durumda TBZ ve doğal olarak denge gecikmesi sıfır olacaktır. TBZ’nin sıfıra yakın olması beraberinde, istasyonlar arasındaki iş yükü farkının da sıfıra yaklaşması anlamına gelmektedir. Fakat bu her zaman mümkün olmamaktadır. Düzensizlik indeksi ise, dengeleme performansının bir ölçüsü olarak kullanılır. Düzensizlik indeksi her bir istasyon zamanının en büyük istasyon zamanından farklarının kareleri toplamının kareköküdür. Mükemmel dengelenmiş hatlarda düzensizlik indeksi değeri sıfırdır. Düzensizlik indeksinin hesaplanmasına ilişkin eşitlik Eş. 2.4’de gösterilmiştir.

$$Dİ = \sqrt{\sum_{k=1}^m (c - St_k)^2} \quad (2.4)$$

Hat etkinliği (HE)

Toplam iş süresi, iş istasyonlarına atanan iş ögelerinin süreleri toplamı olan istasyon sürelerinin genel toplamıdır. Bir anlamda bu süre, hat nasıl dengelenirse dengelensin, etkin olarak gerçekleştirilen görevlerin toplam süresidir. Toplam etkin sürenin (toplam iş süresinin) dengeleme sonucunda montaj için ayrılması gerektiği saptanan süreye oranı, hat

etkinliği olarak adlandırılan değeri verir. Hat etkinliği; montaj hattındaki toplam işgücünün ne kadarlık bir yüzdesinin kullanıldığını gösteren önemli bir ölçektir. Hat etkinliği Eş. 2.5 kullanılarak hesaplanabilmektedir.

$$HE = \frac{\sum_{k=1}^m St_k}{m \cdot c} \quad (2.5)$$

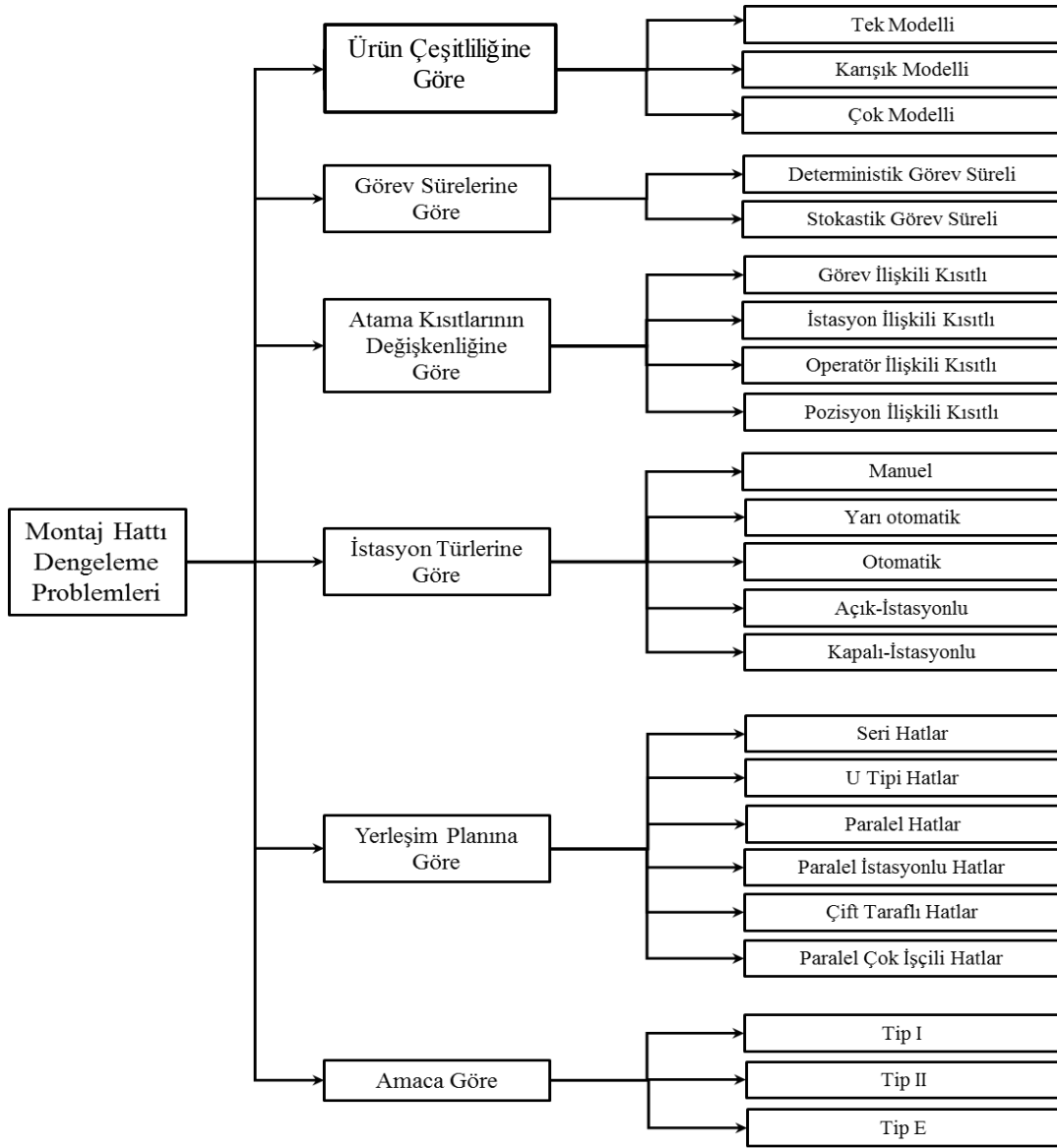
2.2. Montaj Hattı Dengeleme Problemleri

Montaj hattı dengeleme, son dönemlerde üzerinde yoğun çalışmalar yapılan ve çözümü için değişik yöntemler geliştirilen bir konudur. Bu problem, çeşitli sınıflara ayrılarak ele alınmakla birlikte, geliştirilen yöntemler ele alınan sınıflara göre farklılıklar göstermektedir.

Yerleşim alanları, amaç fonksiyonları, ürün çeşitliliği vb. hususlar açısından montaj hattı dengeleme problemleri farklılıklar gösterebilmektedir. Montaj hatlarının gösterdiği farklılıklar nedeniyle hat dengeleme problemlerinin görsel olarak sınıflandırılması Şekil 2.2’de sunulmaktadır.

2.2.1. Üretilen ürün çeşitliliğine göre montaj hatları

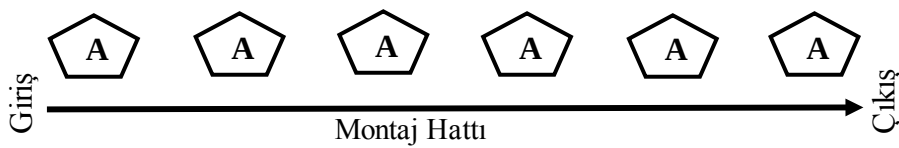
Montaj hatları genellikle standardize edilmiş ürünlerin yüksek miktarlarda üretildiği hatlar olup, ürün çeşitliliğine göre üç farklı bölüme ayrılabilir. Bunlar tek bir modelin üretildiği hatlar (Simple-Model), karma modellenli montaj hatları (Mixed-Model) ve çok modellenli montaj hatlarıdır (Multi-Model). Söz konusu montaj hatlarına ilişkin ayrıntılı bilgiler aşağıda belirtilmiştir (Scholl, 1999: 3,65).



Şekil 2.2. Montaj hattı dengeleme problemlerinin sınıflandırılması

Tek modelli montaj hatları

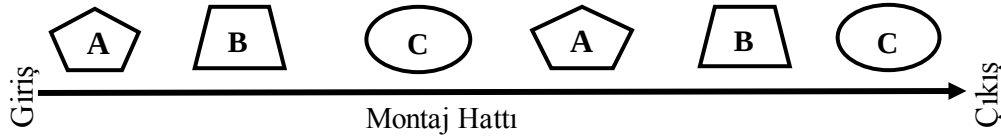
Tek tip ürünün büyük miktarlarda üretildiği montaj hatlarıdır. Bütün istasyonlarda aynı ürün üzerinde, o istasyona atanan işler çevrim süresi kadar zaman aralığında tekrarlanarak üretim sağlanır. Tek modelli montaj hatlarına örnek bir gösterim Şekil 2.3’de sunulmuştur.



Şekil 2.3. Tek modelli montaj hatlarına bir örnek

Karışık modelli montaj hatları

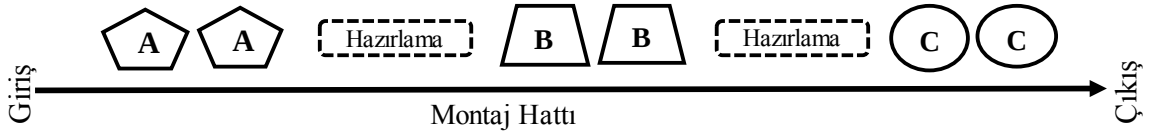
Bir ürünün çeşitli modellerinin karışık olarak üretilbildiği montaj hatlarıdır. Bu tip montaj hatlarında farklı modellerin gerektirdiği operasyonların ağırlıklı kısmı aynıdır. Çünkü ürünler genel itibariyle aynıdır, ancak modeller arasında farklılıklar vardır. Dizüstü bilgisayarların çeşitli modellerinin üretildiği montaj hatları bu gruba örnek olarak gösterilebilir. Şekil 2.4’de karışık modelli montaj hatlarına bir örnek sunulmuştur.



Şekil 2.4. Karışık modelli montaj hatlarına bir örnek

Çok modelli montaj hatları

Benzer ürünlerin partiler halinde üretildiği montaj hatlarıdır. Üretim aşamasında farklı bir ürünün üretilmeye başlanması için montaj hattında hazırlık yapmak gerekebilir. Bu durumda hazırlama sürelerinin de en küçüklenmesi istenebilmektedir. Çok modelli montaj hatlarına örnek bir gösterim Şekil 2.5’de verilmiştir.



Şekil 2.5. Çok modelli montaj hatlarına bir örnek

2.2.2. Görev sürelerinin değişkenliğine göre montaj hatları

Operatör, görevler ve diğer bazı çevresel faktörlerin yapısına bağlı olarak görev süreleri değişkenlik gösterebilmektedir. Basit işler için görev sürelerinin belirlenmesinin kolay olması beklenirken, karmaşık işlerin görev sürelerini belirlemek çok da kolay olmamaktadır. Özellikle emek yoğun işlerde, görevlerin işlem süreleri çalışanların psikolojik, sosyal ve fiziksel durumlarına bağlı olarak farklılık arz edebilmektedir. Görev sürelerindeki farklılıklara bağlı olarak montaj hatları iki ana sınıfa ayrılabilir (Scholl, 1999: 3, 65).

Deterministik görev süreli

Montaj hattına atanan görevlerin işlem sürelerinin sabit ve problem çözüm sürecinde değişmediği montaj hatlarıdır. Bu tür montaj hatlarında teknolojik gelişmeler paralelinde işlem sürelerindeki değişkenlik asgari düzeye indirilmiş durumdadır.

Stokastik görev süreli

Bu tür montaj hatlarında insan faktörünün etkili olmasına bağlı olarak, görevlerin işlem süresindeki değişkenliklerin sistemin performansını etkileyecek düzeyde olduğu bilinmektedir. Operatörlerin el becerilerine bağlı olarak görevlerin işlem sürelerindeki değişkenlik fazladır. Ayrıca sistemde meydana gelebilecek aksaklıklar hattaki üretimin yavaşlamasına neden olabilmektedir. Bu hatlarda görev süreleri rastsal değişkenler olarak ifade edilmektedir.

2.2.3. Atama kısıtlarının değişkenliğine göre montaj hatları

Üretim aşamasında bazı durumlarda öncelik diyagramının yanı sıra ekstra kısıtlamalar da uygulamak gerekebilmektedir. Bu duruma bağlı olarak geliştirilen kısıtlamalar aşağıda belirtilmiştir (Scholl, 1999: 3, 65).

Görev ilişkili kısıtlama

Bazı durumlarda iki işin aynı istasyona atanması istenebilir. Böylesi durumlarda görevlerin aynı istasyonlara atanması, iki görev arasında maksimum uzaklık (belirtilen maksimum uzaklık kısıtı zaman veya alan uzaklığı ile sağlanabilir) kısıtı eklenerek sağlanmaktadır.

Bazı durumlarda ise görevlerin aynı istasyona atanması istenmeyebilmektedir. Bu durumda iki görevin aynı istasyona atanmaması minimum uzaklık kısıtı ile sağlanmaktadır.

İstasyon ilişkili kısıtlama

İstasyonlarda bulunan makine ve teçhizatlara bağlı olarak, bazı görevlerin belirli istasyonlara atanması gerekebilmektedir. Bu kısıtlar istasyon ilişkili kısıtlama olarak adlandırılmaktadır.

Pozisyon ilişkili kısıtlama

Montaj hattında büyük ürünlerin bulunması nedeniyle görevlerin yapıldığı pozisyon temeline dayalı kısıtlamalar olabilmektedir. Örneğin uçak, gemi gibi büyük ürünleri montaj hattında diğer istasyonlara taşımak mümkün olamamaktadır. Ancak bulundukları konumda kendi etrafında çevrilerek üretim yapılabilir.

Operatör ilişkili kısıtlama

Yapılacak işin karmaşıklığına bağlı olarak bazı görevleri her operatörün yapabilmesi mümkün olmayabilmektedir. Böyle durumlarda bazı görevlerin belirli operatörlere atanması gerekmekte olup, bu kısıtlama operatör ilişkili kısıtlama olarak adlandırılmaktadır.

2.2.4. İstasyon türlerine göre montaj hatları

Montaj hatları operatörlerin diğer istasyonlarla olan ilişkilerini de ele alabilmektedir. Bu bağlamda bazı montaj hatlarında işçiler diğer istasyonlara erişim sağlayabilirken, bazı montaj hatlarında işçilerin sadece atandıkları istasyonlarda bulunmaları istenmektedir. Ayrıca her istasyonda bulunan teknolojik ekipmanlar farklı seviyelerde olabilmektedir. Bu gelişmeler paralelinde istasyon türleri farklı sınıflara ayrılmıştır (Scholl, 1999: 3, 65).

Otomasyon ve üretim esneklikleri derecelerine göre istasyon sınıfları

İstasyonları sahip oldukları teknolojik ekipmanlara göre manuel, yarı otomatik ve otomatik montaj istasyonları olmak üzere üç ayrı sınıfa ayırmak mümkündür. Manuel montaj hatlarında üretim ağırlıklı olarak işçinin performansına bağlıdır ve görevlerin çoğu, operatör tarafından gerçekleştirilmektedir. Yarı-otomatik montaj hatlarında ise görevlerin önemli bir kısmını makineler gerçekleştirmektedir. Tam otomatik istasyonlarda görevlerin tamamı esnek üretim kabiliyetine sahip makineler aracılığıyla gerçekleştirilmektedir. Otomatik ve yarı-otomatik istasyonlara ağırlıklı olarak tek tip ürünün hızlı bir şekilde üretildiği montaj hatlarında rastlanılmaktadır.

Açık-Kapalı istasyonlar

Bazı montaj hatlarında operatörlerin atandıkları istasyondan farklı bir istasyona geçmemesi istenirken, bazı montaj hatlarında ise üretimdeki esnekliği artırabilmek için operatörlerin

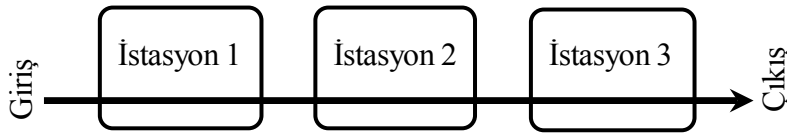
farklı istasyonlara geçişine izin verilmektedir. Bir işçinin atandığı istasyondan farklı bir istasyona geçişine izin verilmeyen istasyon, kapalı istasyon olarak adlandırılır. Farklı bir durum söz konusu ise, yani bir işçinin bulunduğu istasyondan başka istasyonlara geçişine izin veriliyor ise istasyon, açık istasyon olarak adlandırılmaktadır.

2.2.5. Yerleşim planına göre montaj hatları

Montaj hatlarında istasyonların, ürünün akışını kolay bir şekilde sağlayabilmesi gerekmektedir. Bu amaçla istasyonların ve montaj hattının yerleşimi farklılıklar sergileyebilmektedir. Aşağıda yerleşim planına göre montaj hatları belirtilmiştir (Scholl, 1999: 3, 65; Özcan, Kellegöz ve Toklu 2011; Kellegöz ve Toklu, 2012).

Seri hatlar

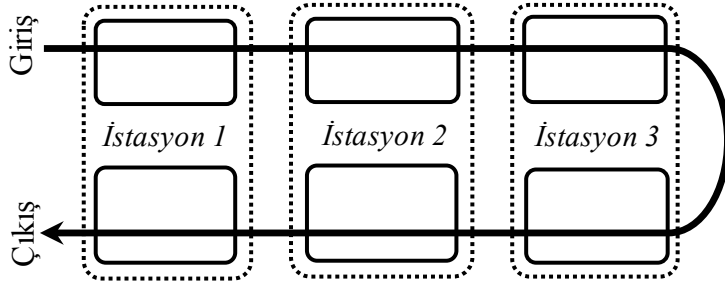
Bu tip hatlar montaj hattının bilinen en geleneksel halidir. Montaj hattı düz bir şekildedir ve istasyonlar hat etrafına kurulmuştur. İstasyonlar arası malzeme-yarı ürün transferi genellikle taşıma bantları ve konveyörler gibi seri ekipmanlar aracılığıyla gerçekleştirilir. Bu hatlara ilişkin örnek bir gösterim Şekil 2.6’da verilmiştir.



Şekil 2.6. Düz montaj hattının şekilsel gösterimi

U-tipi hatlar

Üretimde esnekliği artırmak amacıyla, istasyonlar arasında iletişimin ve istasyonlar arası operatör hareketinin kolay bir şekilde sağlanması istenmektedir. Bu tip durumlarda montaj hattı U şeklinde yapılarak üretimde esneklik sağlanmaktadır. Genellikle tam zamanında üretim ve grup teknolojilerini kullanılan işletmelerde U-tipi montaj hatları tercih edilmektedir. Ayrıca görevlerin gerçekleştirilmesinde olası tıkanıklıklarda, farklı istasyonlarda bulunan operatörlerin, tıkanıklıkların olduğu istasyonlara yönelmesi daha kolay bir şekilde sağlanabilmektedir. Bu hatlara ilişkin bir gösterim Şekil 2.7’de verilmiştir.



Şekil 2.7. U tipi montaj hattının şekilsel gösterimi

Paralel hatlar

Esneklik ile verimliliği artırmak ve sistemin arıza durumuna duyarlılığını düşürmek amacıyla, birkaç montaj hattı kurmak etkili olabilmektedir. Paralel hatların bulunduğu montaj hatlarında, üretim tek bir hat üzerinden değil birkaç hat üzerinden gerçekleştirilmektedir. Bu sayede üretim sisteminin olası arızalara duyarlılığı azalırken, etkinlikte artmaktadır. Belirtilen hatlar genellikle karışık-modelli ürünlerin üretimini gerçekleştiren sistemlerde uygulanır. Paralel hatlarda bulunan operatörlere, komşu istasyona geçerek oradaki görevleri yapma imkanı sağlanmaktadır.

Paralel istasyonlar

Düz hatların dezavantajlarından kaçınmak amacıyla, hat üzerine paralel istasyonlar kurulmaktadır. Paralel istasyonlar aynı görevleri gerçekleştiren birkaç operatörün, farklı istasyonlara atanmasıyla olur. Paralel istasyonlarda ekipman maliyeti istasyon sayısının artmasına bağlı olarak yükselmektedir. Aynı görevlerin farklı istasyonlarda gerçekleştirilmesinin sonucu olarak belirtilen görevler için çevrim süresi artırılabilir.

Çift taraflı hatlar

Büyük boyutlu ürünlerin üretilmesinde tekli istasyonların yerine çift taraflı hatların kurulması, montaj hattında üretim kapasitesinin yükselmesini sağlayabilmektedir. Çift taraflı montaj hattında, hattın sağ ve sol tarafında görev yapan iki operatör bulunmaktadır. Düz montaj hattına göre çift taraflı montaj hattının daha kısa uzunlukta olacağı bilinmekte olup, kapasite açısından işletmeye önemli avantaj sağlayabilmektedir.

Paralel çok işçili istasyonlar

Genellikle büyük boyutlu ürünlerin üretiminde bir iş parçası üzerinde birkaç operatörün eş zamanlı olarak çalışması mümkün olabilmektedir. Çift taraflı montaj hatlarında hattın sağ ve sol tarafında olmak üzere en fazla iki operatörün eş zamanlı olarak çalışmasına izin verilirken, paralel çok işçili montaj hatlarında ise ürün boyutu ile mevcut alan göz önünde bulundurularak ikiden daha fazla operatörün çalışmasına izin verilebilmektedir. Paralel çok işçili istasyonlarda operatör sayısının artmasına bağlı olarak, istasyonlardaki üretim kapasitesinin de yükseldiği görülmektedir. Yine bu istasyonlar hat uzunluğunun kısalmasını, istasyon sayısının azalmasını ve üretim hızının artmasını sağlayabilmektedir.

2.2.6. Amaca göre montaj hattı dengeleme problemleri

Üretimin düzenli bir şekilde gerçekleşmesi için montaj hatlarının iyi bir şekilde tasarlanmış ve görevlerin farklı istasyonlarda bulunan operatörlere etkili bir şekilde atanmış olması gerekmektedir. MHDP’de, içinde bulunulan duruma göre farklı amaçlara öncelik verilmekte olup, bu açıdan MHDP’ni üç ana grup altında toplamak mümkündür (Scholl, 1999: 3, 65).

Tip I

Belirli bir çevrim süresi kısıtı altında istasyon sayısını minimize etmeyi amaçlayan MHDP’dir. Bu amaca yönelik MHDP genellikle belirli bir dönemde üretilecek ürün miktarının talebe bağlı olarak belirli olduğu durumlarda ortaya çıkmaktadır. Böylesi durumlarda üretim oranının önceden belirlenmesi paralelinde, istasyon sayısı en azlanarak etkinlik artırılmaya çalışılmaktadır.

Tip II

Belirli bir istasyon sayısı kısıtı altında, çevrim süresini minimize etmeyi amaçlamaktadır. Genellikle belirli bir alan veya çalışan sayısı kısıtı altında üretim miktarı en büyüklenmek istendiğinde ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle mevcut montaj hatlarının yeniden dengelenmesi problemi olarak da bilinmektedir.

Tip E

Çevrim süresi ve istasyon sayısının değişken oldukları durumda hat etkinliğini enbüyüklemeyi amaçlamaktadır.

3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Montaj hatlarının tarihçesi 1915’li yıllara kadar dayanmaktadır. Montaj hatları ilk olarak Henry Ford tarafından geliştirilmiş ve ABD’de Ford firmasında uygulanmıştır (Erel ve Sarin, 1998). Basit montaj hattı olarak da adlandırılan tek modellenli deterministik montaj hatlarında istasyon sayısını minimize etmeye yönelik ilk çalışma Salveson (1955) tarafından gerçekleştirilmiştir. Belirtilen dönemden günümüze kadar montaj hattı ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır. Ancak U tipi montaj hatlarında üretim oranının artırılmasına yönelik olarak gerçekleştirilen çalışmalar oldukça kısıtlı düzeydedir. Bu nedenle literatür taraması U tipi montaj hatları ile montaj hatlarında üretim oranının artırılmasına yönelik gerçekleştirilen çalışmalar olmak üzere iki alt bölüme ayrılarak sunulmuştur.

3.1. U Tipi Montaj Hattı Çalışmaları

U tipi montaj hatları ilk olarak Schonberger (1982) tarafından ele alınmıştır. Ancak UMHDP’nin tanımı ve konu ile ilgili ilk önemli çalışma Miltenburg ve Wjingaard (1994) tarafından gerçekleştirilmiştir. Çalışmada problemin çözümüne yönelik dinamik programlama modeli geliştirilmiş ve 11 göreve kadar olan problem örnekleri optimal olarak çözülmüştür. Önerilen dinamik programlamanın hesaplama karmaşıklığı nedeniyle yöntemin ancak küçük boyutlu problemlerin çözümünde etkili olduğu belirtilmiştir.

Ajenblit ve Wainwright (1998) UMHDP-I’in çözümüne yönelik sıra bağımlı kodlama sistemini kullanan genetik algoritma (GA) tabanlı sezgisel bir yöntem geliştirmişlerdir. GA’da iki nokta çaprazlama yöntemi kullanılırken, mutasyon operatörü kullanılmamıştır. Literatürde bulunan 61 test problemi üzerinde algoritmanın etkinliği denenmiş olup, Miltenburg ve Wjingaard (1994) tarafından geliştirilen yöntemle karşılaştırılmıştır. 49 örnekte aynı sonuçlar elde edilirken, 11 örnekte daha iyi sonuçlara ulaşılmıştır.

Miltenburg (1998) U tipi montaj hatlarında belirli bir çevrim süresi altında düz, çapraz ve çoklu istasyon sayısını en küçükleme çalışmışlardır. Ayrıca ikinci bir amaç olarak tam zamanında üretim prensiplerinin gerektirdiği gibi boş zamanların bir istasyonda toplanması hedeflenmiştir. Problemin çözümüne yönelik dinamik bir programlama modeli geliştirilmiş ve 22 görevli problem örneklerine kadar etkili olduğu gösterilmiştir.

Urban (1998) UMDHP-I için karışık tamsayılı bir doğrusal programlama modeli önermiştir. Çalışmada problemin gerçek öncelik diyagramının yanı sıra hayali bir öncelik diyagramı eklenerek görevlerin atanmasında iki farklı 0-1 değişken grubu tanımlanmıştır. Gruplardan biri gerçek istasyondan atanan görevleri gösterirken, diğeri hayali öncelik diyagramından atanan görevleri göstermekte olup, öncelik ilişkileri bu iki değişkenle sağlanmıştır. Hayali öncelik diyagramından atanan görevler U tipi hattın çıkış yönüne atanan görevleri gösterirken, gerçek öncelik diyagramından atanan görevler hattın giriş yönüne atanan görevleri göstermektedir. Miltenburg ve Wijngaard (1994) tarafından önerilen yöntemle kıyasla daha etkili olduğu görülen matematiksel modelin 45 görevli problem örneklerine kadar iyi sonuçlar verdiği gösterilmiştir.

Scholl ve Klein (1999) çeşitli U tipi montaj hattı dengeleme problemlerinin çözümünde kullanılan ve ULINO olarak adlandırılan bir dal-sınır algoritması geliştirmişlerdir. Derinlik öncelikli arama yapan dal sınır algoritmasında çeşitli baskınlık kuralları kullanılmakta olup, 297 göreve kadar olan bazı problem örnekleri çözülmüştür. Çalışmada U tipi hatların düz montaj hatlarına kıyasla hat etkinliği açısından daha verimli olduğu gösterilmiştir.

Erel, Sabuncuoğlu ve Aksu (2001) büyük boyutlu U tipi montaj hattı dengeleme tip I problemlerinin çözümü için iyi bir arama mekanizmasına sahip olan TB tabanlı sezgisel bir algoritma geliştirmişlerdir. Önerilen yöntemin literatürde bulunan çeşitli yöntemlerden daha iyi sonuçlar verdiği deneysel örneklerle gösterilmiştir. Özellikle geniş çözüm uzayına sahip problemlerde, önerilen yöntemin hızlı bir yakınsama mekanizmasına sahip olduğu belirtilmiştir.

Miltenburg (2001) tarafından U-tipi üretim hatlarının teori ve pratikteki uygulamaları ele alınmıştır. Çalışmada 114 Amerikan ve Japon U tipi montaj hatları incelenmiş ve U tipi üretim hatlarının farklı modelleri gösterilmiştir. U tipi montaj hatlarının üretkenlik, ara stok miktarı, bekleme süresi ve hatalı ürün miktarında önemli oranlarda iyileştirmeler sağladığı gözlemlenmiştir.

Aase, Olson ve Schniederians (2004) U tipi montaj hatlarının düz hatlara kıyasla, işçilerin üretkenliğini artırdığı tezini inceleyen bir çalışma sunmuşlardır. U tipi montaj hatlarının sadece belirli durumlarda işçilerin üretkenliğini artırdığı, deneysel sonuçlarla belirtilen hatların işçilerin üretkenliğinde her zaman iyileşme sağlamadığı gösterilmiştir. Bu nedenle

düz montaj hatlarını U tipi hatlara çevirmeden önce getireceği ekstra maliyetlerin ve üretkenlikte sağlanması planlanan artışın iyi analiz edilmesi gerektiği vurgulanmıştır. Ancak bir işçinin ortalama 3 veya daha az görevi yerine getirdiği ve problem büyüklüğünün 30 görevden daha az olduğu, geniş zamanlı siparişlerin bulunduğu ve görevler arasında öncelik ilişkilerinin fazla olduğu durumlarda U tipi montaj hatlarının üretkenliği artırdığı belirtilmiştir.

Gökçen, Ağpak, Gencer ve Kizilkaya (2005) basit U tipi montaj hattı dengeleme probleminin çözümü için en kısa yol formülasyonuna dayalı bir yöntem geliştirmişlerdir. Yöntemde istasyonlara atanabilecek olan görevler için oluşturulabilecek kombinasyonlar numaralandırılarak düğümlerin gösteriminde kullanılırken, yollar ise ilişkili durumlarda istasyon boş sürelerini belirtmektedir. İstasyonlara atanabilecek olan görevlerin öncülleri ve ardılları diğer durumlarda atanabilecek görevler arasına alınmaktadır. Makalede UMHDP-I'e farklı bir yaklaşım sunulduğu ve çeşitli problem tiplerine uygulanabileceği belirtilmiştir.

Chiang ve Urban (2006) makalelerinde önceki çalışmalardan farklı olarak stokastik UMHDP-I'in çözümüne yönelik şans-kısıtlı, parçalı doğrusal bir programlama modeli geliştirmelerinin yanı sıra yeni bir alt sınır formülasyonu önermişlerdir. Yöntemin etkinliği literatürde bulunan çeşitli test problemleri üzerinde denenmiş olup, 28 göreve kadar olan problem örnekleri için optimal sonuçlar elde edilmiştir.

Gökçen ve Ağpak (2006) Urban (1998) tarafından önerilen matematiksel modele dayalı UMHDP için bir amaç programlama modeli geliştirmişlerdir. U tipi montaj hatlarında çok amaçlı karar vermeye yönelik ilk çalışma olması nedeniyle önem arz eden makalede karar vericilere, çelişen amaç fonksiyonlarının bulunduğu durumlarda daha fazla esneklik sağlanmıştır.

Toklu ve Özcan (2008) çok amaçlı UMHDP'ye yönelik bulanık amaç programlama modeli sunan ilk araştırmacılarıdır. Çok amaçlı modelde birbiri ile çelişen amaçlar eş zamanlı olarak optimize edilmeye çalışılmıştır. Geliştirilen model Gökçen ve Ağpak (2006) tarafından önerilen hedef programlama yöntemi ile karşılaştırılmış olup, önerilen yöntemin önceki yöntemlerden daha gerçekçi olduğu ve daha fazla esneklik sağladığı belirtilmiştir.

Baykasoğlu ve Özbakır (2007) stokastik UMHDP için COMSOAL (Arcus, 1966) metoduna dayalı genetik algoritma tabanlı sezgisel bir yöntem önermişlerdir. Çalışmada görevlerin istasyonlara atanmasında çeşitli öncelik kuralları kullanılmıştır. Önerilen yöntem Chiang ve Urban (2006) tarafından sunulan metot ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar önerilen yöntemin daha kısa sürede optimal sonuçlara ulaşabildiğini göstermiştir.

Shewchuk (2008) U tipi hatlarda çalışanların dağıtımı ile ilgilenmiştir. Çalışanların dağıtım terimi hangi işçilerin hangi makinelerle atanacağını belirtmekte olup, amaç az sayıda çalışan ile iş yükünü dengeli dağıtmak olarak belirtilmiştir. Çalışanların istasyon içerisindeki yürüme mesafeleri de dikkate alınmıştır. Problemin çözümüne yönelik geliştirilen matematiksel modelin yanı sıra sezgisel bir yöntem de önerilmiştir. 20 makineye kadar olan problem boyutları her iki yöntemle çözülmüş ve optimal sonuca yakın değerler elde edilmiştir.

Hwang, Katayama ve Gen (2008) UMHDP için öncelik tabanlı gösterim metoduna dayanan bir genetik algoritma sunmuşlardır. Çalışmada toplam istasyon sayısının en azlanması ile iş yükü dengelenmesinin eş zamanlı olarak sağlanması amaçlanmıştır. U tipi hattın yanı sıra düz montaj hatları da incelenmiş olup, bazı durumlarda U tipi yerleşimin hat etkinliğini artırdığı gösterilmiştir.

Kara ve Tekin (2009) karışık modelli U tipi montaj hatlarında toplam istasyon sayısının en küçüklenmesine yönelik karışık tamsayılı bir doğrusal programlama modeli önermişlerdir. Ayrıca büyük boyutlu problemlerin çözümüne yönelik olarak COMSOAL metodunu modifiye ederek sezgisel bir yöntem sunmuşlardır. Deneysel sonuçlar matematiksel modelin etkili olduğunu ve sezgisel yöntemin problem örneklerinin %90'ından fazlasını optimal olarak çözdüğünü göstermiştir.

Sabuncuoğlu, Erel ve Alp (2009) UMHDP'de karınca kolonisi algoritmasının etkinliğini göstermek amacıyla bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Belirli bir çevrim süresi altında istasyon sayısı en azlanmaya çalışılmış ve karınca koloni algoritmasına dayalı bir sezgisel yöntem geliştirilmiştir. Önerilen metot literatürde bilinen en iyi yöntemlerden biri olan ULINO (Scholl, 1999) ve tavlama benzetimi (Erel, Sabuncuoğlu ve Aksu, 2001) sezgiseli ile karşılaştırılmıştır. Deneysel sonuçlar ULINO yönteminin daha çok sayıda problem

örneğinde optimal sonuca ulaştığını gösterirken, karınca koloni algoritmasının da etkili sonuçlar verdiğini ortaya koymuştur.

Kara, Paksoy ve Chang (2009) montaj hattı dengeleme problemlerinin bazı durumlarda çelişen amaç fonksiyonlarını optimize etmeye çalışabildiğini belirtmişlerdir. Çalışmada düz ve U tipi montaj hatları için yeni bir ikili bulanık hedef programlama modeli önerilmiştir. Makalede karar vericilerin çevrim süresi ve istasyon sayısının kesin olmadığı durumları inceleyebilmesine olanak sağlanmıştır. Önerilen yöntemde istasyon sayısı ve çevrim süresi eş zamanlı olarak en küçüklenmeye çalışılmıştır.

Özcan ve diğerleri (2011) stokastik görev süreli karışık modellenli U tipi montaj hattı dengeleme ve sıralama problemi üzerinde durmuşlardır. Makalede incelenen problemin özellikleri ve varsayımları belirtilmiş olup, çözüm yöntemi olarak genetik algoritmaya dayalı bir sezgisel yöntem önerilmiştir. Yöntemin etkinliğini ispatlamak için deterministik ve stokastik problem örnekleri çözülmüştür.

Bagher, Zandieh ve Farsijani (2011) stokastik UMHDP-I'in çözümüne yönelik hibrid bir algoritma önermişlerdir. Önerilen algoritma "*imperialist competitive algorithm*" (ICA) olarak adlandırılmış olup, doğa olaylarının benzetimine dayalı bir yöntemdir. Çalışmada ICA'nın Baykasoğlu ve Özbakır (2007) tarafından önerilen genetik algoritma ile karşılaştırılması neticesinde ICA sezgiselinin optimal sonuçlara genetik algorithmadan daha kısa sürede ulaştığı gözlemlenmiştir.

Ağpak, Yegül ve Gökçen (2012) tarafından U tipi hatlar ile çift taraflı montaj hatlarının birleşmesinden oluşan yeni bir hat yerleşimi tanıtılmıştır. Belirtilen hattın pozisyonel kısıtlı problemi için iki amaçlı 0-1 tamsayı değişkenli bir doğrusal programlama modeli sunulmuştur. Bu model yoluyla 65 göreve kadar olan problem örnekleri çözülmüş ve önerilen hat yerleşiminin avantajları ve dezavantajları tartışılmıştır.

Rabbani, Kazemi ve Manavizadeh (2012) karışık modellenli U tipi montaj hatlarında çapraz istasyon sayısını en azlarken hat etkinliğini maksimize etmeye çalışan bir matematiksel model önermişlerdir. Çalışmada işçilerin çapraz istasyonlar arasındaki yürüme süreleri da dikkate alınmıştır. Matematiksel modelin yanı sıra büyük ölçekli problemlerin çözümü için

Baykasoğlu ve Özbakır (2007) tarafından önerilen atama kuralları kullanılarak yeni bir genetik algoritma geliştirilmiştir.

Avikal, Jain, Mishra ve Yadav (2013) U tipi hatlarda işçilerin verimliliğini artırmaya ve istasyon sayısını en azlamaya yönelik kritik yol metoduna dayanan yeni bir sezgisel yöntem geliştirmişlerdir. Deneysel sonuçlar U tipi hatların işçi verimliliği açısından düz hatlara kıyasla genellikle daha etkili olduğunu göstermiştir.

Fattahi, Elaoud, Sadegi, Azer ve Turkay (2014) UMDHP’de istasyon sayısının en küçüklenmesi için yeni bir matematiksel model sunmuşlardır. Modelin etkinliğini artırmak amacıyla 3 farklı mantıksal kesme metodu önermişlerdir. Deneysel sonuçlar önerilen modelin önceki matematiksel modellerden daha etkili olduğunu göstermiştir.

Zha ve Yu (2014) makine ve işçi maliyetlerinin en azlanmasını amaçlayan “*U tipi hat tekrar dengeleme*” problemini tanımlamışlardır. Makalede işçilerin yürüme mesafeleri de dikkate alınarak probleme ilişkin matematiksel model sunulmuştur. Bunun yanı sıra karınca koloni algoritması ve demet arama yöntemine dayanan hibrid bir algoritma geliştirilmiştir.

Jayaswal ve Agarwal (2014) kaynak türüne göre görev sürelerinin değiştiği U tipi montaj hatlarını ele almışlardır. İstasyon kullanımı, ekipman ve asistan çalışan maliyetlerinden oluşan toplam maliyeti en azlamaya çalışmışlardır. Matematiksel modelin yanı sıra tavlama benzetimine dayalı bir sezgisel yöntem kullanılarak problem çözülmüştür.

Dong, Zhang, Xiao ve Mao (2014) karışık modelli stokastik U tipi montaj hatlarında belirli bir çevrim süresi ve istasyon sayısı altında beklenen aşırı iş yükünün minimizasyonu üzerinde çalışmışlardır. Probleme ilişkin matematiksel modelin yanı sıra tavlama benzetimine dayalı sezgisel bir yöntem geliştirilmiştir. Literatürde bulunan bazı test problemleri üzerinde önerilen yöntem ile Özcan ve diğerleri (2011) tarafından önerilen GA’nın performansı karşılaştırılmış ve daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.

Johanalagedda ve Dabade (2014) aynı zamanda bu tezin de konusu olan UMHDP-II problemi üzerinde durmuşlardır. Rastsal arama yöntemine dayanan basit bir genetik algoritma sunmuşlardır. Kodlama sisteminde gene ait indeks görev numarasını belirtirken, o genin aldığı değer o görevin hangi istasyona atandığını belirtmektedir. İki nokta çaprazlama

operatörü kullanılmış olup, uygun olmayan çözümler geliştirilen düzeltme fonksiyonu ile uygun hale getirilmiştir. Bazı test problemleri çözülerek yöntemin etkinliği gösterilmiştir.

Manavizadeh, Rabbani, ve Radmehr (2015) karışık modellenli U tipi hatlarda dengeleme ve sıralama problemlerini eş zamanlı olarak çözen bir sezgisel algoritma önermişlerdir. Amaç fonksiyonu olarak çevrim zamanının en küçüklenmesi, fire oranlarının ve aşırı iş yükünün azaltılması benimsenmiştir.

Alavidoost, Tarimoradi ve Zarandi (2015) bulanık görev zamanlı U tipi ve düz montaj hatlarının dengelenmesi üzerinde durmuşlardır. İstasyon sayısı, bulanık pürüzsüzlük indeksi ve bulanık boş zaman yüzdesini en küçüklerken, bulanık hat etkinliğini maksimize etmeye çalışan genetik bir algoritma sunmuşlardır.

Kucukkoc ve Zhang (2015) U tipi ile paralel hatların birlikte kullanılması ile geliştirilen yeni bir montaj hattı yerleşimini sunmuşlardır. İki veya daha fazla U tipi hattın birbirine paralel şekilde yerleştirilmesi ile paralel U tipi montaj hattı oluşturulmuştur. Paralel olarak tasarlanan U tipi hatlarda çevrim süresinin farklı olabilmesi nedeniyle daha fazla esneklik sağlanmıştır. Hatlarda operatörlerin çalışabileceği alanlar yatay olarak farklı bölgelere ayrılırken, hatların dikey olarak ayrılması ile istasyon alanları belirlenmiştir. Çalışmada incelenen bu tür hatlara görevlerin uygun bir şekilde atanması amacıyla sezgisel bir yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemle göre hatlar bağımsız düşünülerek hatlara atanabilecek görevler kümesi oluşturulmuş ve her iki hatta ayrı şekilde atamalar gerçekleştirilmiştir.

3.2. Montaj Hattı Dengeleme Tip II Çalışmaları

Klein ve Scholl (1996) düz montaj hatları tip II probleminin optimal çözümüne yönelik, çeşitli öncelik kurallarına dayanan ve SALOME-II olarak adlandırılan bir dal sınır algoritması önermişlerdir. Algoritmanın etkinliği 297 göreve kadar olan 302 problem örneği üzerinde denenmiş olup, 217 örnekte optimal çözüme ulaşılmıştır.

Nearchou (2007) düz montaj hattında üretim oranını artırmaya yönelik olarak bir evrimsel algoritma önermiştir. Çalışmada önerilen algoritma rastsal değer ve öncelik tabanlı olmak üzere iki farklı gösterim şekli içinde uygulanmıştır. Uygun olmayan çözümleri uygun hale

getirebilmek amacıyla düzeltme fonksiyonu kullanılmıştır. Kolay olarak uygulanabildiği belirtilen algoritmanın etkinliği literatürde bulunan test problemleri üzerinde gösterilmiştir.

Y.K. Kim, Song ve J.H. Kim (2009) çift taraflı montaj hatlarında üretim oranının artırılması üzerinde durmuşlardır. Makalede probleme ilişkin matematiksel modelin yanı sıra genetik algoritma tabanlı bir iyileştirme sezgiseli geliştirilmiştir. Genetik algortmada erken yakınsamayı engellemek ve çeşitlendirmeyi artırmak amacıyla yeniden üretim tekniği kullanılmıştır.

Kilincci (2010) düz montaj hattı tip II problemi için kesikli sistemleri modellemek ve analiz etmek amacıyla kullanılan matematiksel ve grafiksel araçlar olduğu belirtilen petri ağı-tabanlı bir sezgisel yöntem önermiştir. Belirli bir çevrim süresinde görevlerin belirtilen istasyon sayısına atanarak uygun bir çözüm bulunması amaçlanmaktadır. Verilen çevrim süresinde uygun bir çözüm bulunamaması durumunda çevrim süresi güncellenerek uygun çözüm araştırılmaktadır. İleri, geri ve çift yönlü atama yapılarak yöntemin 3 farklı versiyonu geliştirilmiştir. Büyük boyutlu problem örneklerinde yöntemin etkili olduğu gösterilmiştir.

Alagheband, Ghomi ve Zandieh (2010) sıra bağımlı hazırlık zamanlı düz montaj hatlarında üretim oranının artırılması üzerinde durmuşlardır. Makalede matematiksel modelin yanı sıra tavlama benzetimine dayalı sezgisel bir yöntem geliştirilmiştir. Literatürde bulunan çeşitli test problemleri üzerinde sezgisel yöntemin etkinliği gösterilmiştir.

Yoosefelahi, Aminnayeri, Mosadegh ve Ardakani (2012) çok amaçlı robotik montaj hattı dengeleme problemlerini incelemişlerdir. Çalışmada çevrim süresinin yanı sıra robot hazırlık ve robot maliyetlerinin en azlanması hedeflenmiştir. Probleme ilişkin yeni bir karışık tamsayılı matematiksel modelin yanı sıra çok amaçlı evrimsel algortmaya dayanan sezgisel bir yöntem geliştirilmiştir. Deneysel sonuçlar sezgisel yöntemin matematiksel modele kıyasla daha iyi sonuçlar verdiğini ortaya koymuştur.

Mutlu, Polat ve Supciller (2013) düz montaj hatlarında işçi atama ve dengeleme problemi üzerinde çalışmışlardır. Görev sürelerinin işçilere bağlı olarak değiştiği kabul edilmiş ve üretim oranının artırılması amaçlanmıştır. Genetik algoritma, iteratif yerel arama ve iki yönlü aramaya dayanan hibrid bir algoritma geliştirilmiştir.

Borba ve Ritt (2014) işçilerin görevleri gerçekleştirme sürelerinin farklı olduğunu kabul ederek, montaj hattı dengeleme ve işçi ataması problemi üzerinde durmuşlardır. Belirli bir istasyon sayısında üretim oranının artırılması amaçlanmış olup, probleme ilişkin matematiksel model ve bir dal sınır algoritması geliştirilmiştir. Ayrıca demet arama tabanlı bir sezgisel yöntem sunulmuştur. Purnomo ve Wee (2014) harmoni arama metodunu kullanarak çift taraflı montaj hatlarında üretim oranını artırmaya ve iş yükü dağılımını dengelemeye çalışmışlardır.

4. PROBLEM TANIMI VE MATEMATİKSEL MODELLER

U tipi montaj hatları, yerleşim ve çapraz istasyonlar nedeniyle düz montaj hatlarına kıyasla daha esnek bir yapıya sahiptir. Ancak U tipi montaj hattı dengeleme probleminin düz montaj hattı dengeleme problemlerine kıyasla daha karmaşık olduğu bilinmektedir. Zira düz montaj hattında sıradaki istasyona atanabilecek görevler kümesinde öncüllerinin tamamı atanan görevler bulunurken, U tipinde ise sıradaki istasyona atanabilecek görevler kümesinde düz montaj hattındaki görevlerin yanı sıra ardıllarının tamamı atanan görevlerin de bulunmasıdır (Ağpak ve Gökçen 2002). Belirtilen durum U tipi hatlar için avantaj sağlamakla birlikte, hat dengeleme problemini daha da karmaşık bir hale getirmektedir. Ancak sağladığı avantajlar nedeniyle tam zamanında üretim sistemlerinde sıklıkla tercih edilmektedir. Belirtilen sistemlerde, karlılık açısından önem arz eden üretim oranının artırılması istendiği ise bu tezin de çalışma konusu olan UMHDP-II ortaya çıkmaktadır.

UMHDP ilk olarak Miltenburg ve Wijngaard (1994) tarafından ortaya konmuştur. UMHDP-II problemi; belirli bir iş kümesi ($F = \{i \mid i = 1, 2, \dots, n\}$), öncelik ilişkileri ($P = \{(i, j) \mid i \text{ görevi } j \text{ görevi başlamadan tamamlanmalıdır}\}$), görev süreleri ($T = \{t_i \mid i = 1, 2, \dots, n\}$) ve atama yapılacak istasyon sayısının (m) bilindiği durumlarda, birleşimleri F 'e eşit olacak m adet alt küme ($S_1, S_2, \dots, S_m$) oluşturmaya çalışmaktadır. Bu alt kümeler oluşturulurken istasyon zamanlarının ($St_1, St_2, \dots, St_m$) maksimumuna eşit olan çevrim süresinin en küçüklenmesi istenmekte olup, sağlanması gereken koşullar aşağıdaki eşitliklerde belirtilmiştir:

$$St_k = \sum_{i \in S_k} t_i \quad k=1, \dots, m \quad (4.1)$$

$$\bigcup_{k=1}^m S_k = F \quad (4.2)$$

$$S_k \cap S_l = \emptyset \quad k \neq l \quad (4.3)$$

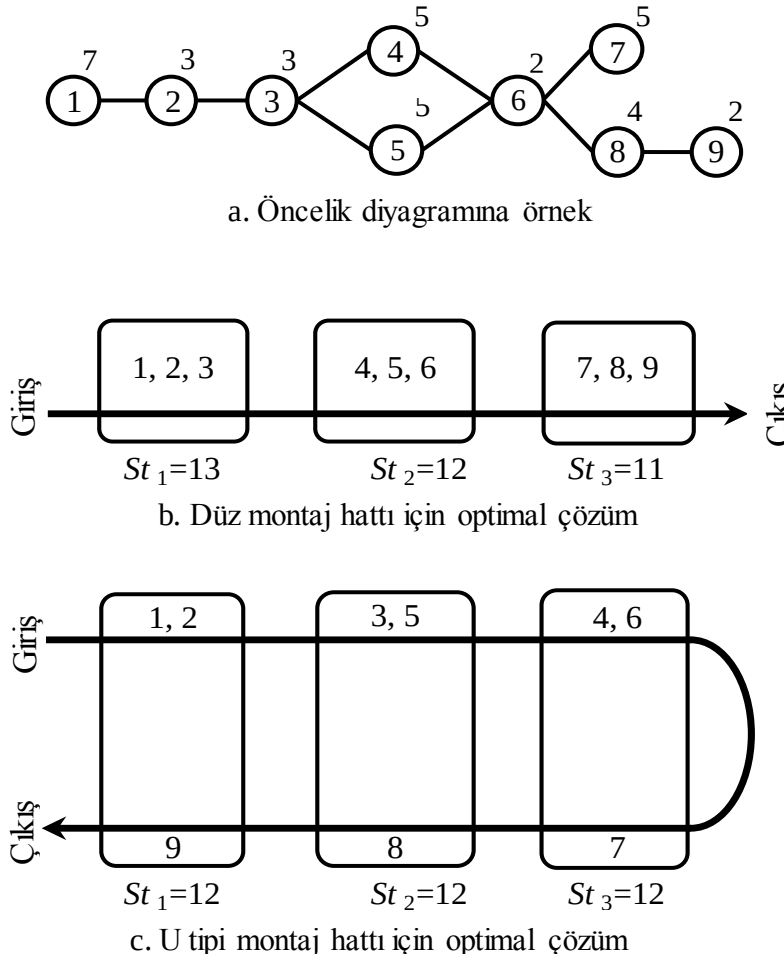
her bir y görevi için;

$$\begin{aligned} & \text{eğer } (x, y) \in P, \quad x \in S_i, \quad y \in S_j, \quad \text{ise } i \leq j, \quad \text{her } x \text{ için}; \text{ ya da} \\ & \text{eğer } (y, z) \in P, \quad y \in S_j, \quad z \in S_k, \quad \text{ise } k \leq j, \quad \text{her } z \text{ için.} \end{aligned} \quad (4.4)$$

$$c \geq St_i \quad i = 1, \dots, m \quad (4.5)$$

Eş. 4.2, Eş. 4.3 ve Eş. 4.4 Miltenburg ve Wijngaard (1994) tarafından önerilen eşitliklerle tamamen aynıdır. Eş. 4.2 ve Eş. 4.3 görevlerin sadece bir istasyona kesin olarak atanmasını sağlarken, Eş. 4.4 U tipi montaj hattındaki öncelik kısıtını sağlamaktadır. Eş. 4.5 ise çevrim süresinin istasyon zamanlarından büyük veya eşit olması gerektiğini ifade eder.

U tipi montaj hatlarının düz hatlara kıyasla avantajını bir örnek üzerinde göstermek amacıyla Şekil 4.1.(a)'da verilen öncelik diyagramına ait 3 istasyonlu, düz ve U tipi montaj hatlarına optimal atamalar Şekil 4.1.(b) ve Şekil 4.1.(c)'de sunulmuştur. U tipi montaj hattında optimal atamalar gerçekleştirildiğinde çevrim süresi 12 bulunurken, düz montaj hattının optimal çözümünde çevrim süresi 13 bulunmuştur.



Şekil 4.1. Düz ve U tipi montaj hatlarında görev atamalarına ilişkin bir örnek

Bu tezde deterministik görev süreli UMHDP-II ele alınmıştır. Diğer bir tanımla U tipi montaj hatlarında üretim oranının artırılması amaçlanmıştır. Problemin varsayımları aşağıdaki gibidir:

- Montaj hattında, homojen tek bir ürün üretilmektedir.
- Açılabilir maksimum istasyon sayısı sabittir ve önceden bilinmektedir. İstasyonların tamamının açılması şartı yoktur.
- Görevler bölünemez ve her bir işçi aynı anda tek görev yapabilmektedir.
- Her bir görev işçilerden sadece birisi tarafından kesintiye uğramaksızın yapılır.
- Her bir istasyonda sadece 1 işçi bulunmaktadır.
- Görev süreleri deterministiktir ve önceden bilinmektedir.
- Ara ürünlerin istasyonlar arası taşınma süreleri ve işçilerin istasyonlardaki yürüme süreleri ihmal edilmektedir.
- Öncelik kısıtı dışında başka bir atama kısıtı bulunmamaktadır.
- Gerekli alet ve ekipmanlar bütün istasyonlarda hazır bulunmaktadır.

4.1. Matematiksel Modelleme Yaklaşımları

Yukarıda belirtilen problemin çözümü için, U tipi montaj hattı dengeleme problemlerinin farklı versiyonlarına uygulanan matematiksel modelleme yaklaşımları kullanılmıştır. Belirtilen probleme uyarlanan modelleme yaklaşımlarının etkinliği, literatürde bulunan test problemleri üzerinde denenmiş olup, matematiksel modellerde kullanılan notasyonlar ve karar değişkenleri aşağıdaki gibidir.

Notasyonlar

- n : Toplam görev sayısı
 m : Toplam istasyon sayısı
 t_i : i görevinin işlem süresi
 P_i : i görevinin direk öncüllerinin kümesi

Karar değişkenleri

- c : Çevrim süresi

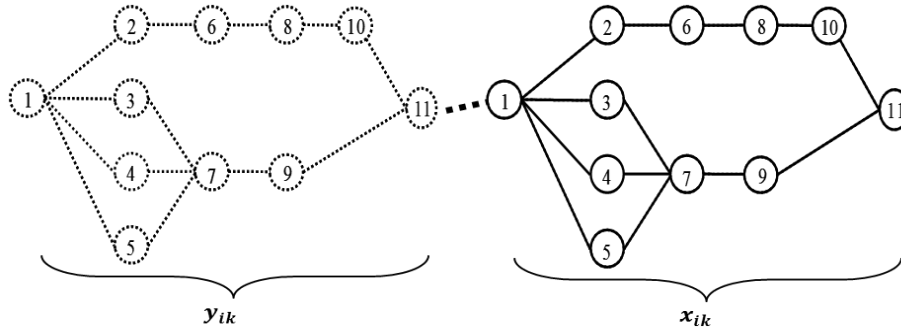
$$x_{ik} = \begin{cases} 1, & \text{eğer } i \text{ görevi } k \text{ istasyonuna atandı ise} \\ 0, & \text{diğer durumlarda} \end{cases}$$

$$y_{ik} = \begin{cases} 1, & \text{eğer } i \text{ görevi hayali öncelik diyagramından } k \text{ istasyonuna atandı ise} \\ 0, & \text{diğer durumlarda} \end{cases}$$

$$v_i = \begin{cases} 1, & \text{eğer } i \text{ görevi hattın giriş yönüne atandı ise} \\ 0, & \text{eğer } i \text{ görevi hattın çıkış yönüne atandı ise} \end{cases}$$

Urban matematiksel model yaklaşımı

Urban (1998) tarafından UMHDP-I için önerilen matematiksel modelleme yaklaşımında, Şekil 4.2’de görüldüğü üzere gerçek öncelik diyagramına hayali bir öncelik diyagramı daha eklenerek, U tipi hattın giriş ve çıkış yönüne atanan görevler iki farklı değişken seti ile tanımlanmaktadır. Açılabilir maksimum istasyon sayısının m , görev sayısının n olduğu UMHDP-II problemleri için belirtilen modelde $2 \cdot m \cdot n + 1$ adet değişkene ihtiyaç duyulmaktadır.



Şekil 4.2. Urban modeline ilişkin hayali ve gerçek öncelik diyagramına bir örnek

Atama kısıtını gerçekleştirmek amacıyla görevlerin hayali ya da gerçek öncelik diyagramının sadece birinden kesin olarak atanması sağlanmıştır. Hattın giriş yönüne atanan görevler (gerçek öncelik diyagramından atanan görevler), öncülleri ile aynı veya daha sonraki bir istasyona atanırken, çıkış yönüne atanan görevlerin (hayali öncelik diyagramından atanan görevler) ise U tipi hatların özelliğinin bir gereği olarak hayali öncülleri ile aynı veya daha erken bir istasyona atanması gerçekleştirilmiştir. Urban (1998)’ın önerdiği bu yaklaşımın UMHDP-II için uyarlanmış hali aşağıdaki gibidir:

$$\min c \quad (4.6)$$

$$\sum_{k=1}^m (x_{ik} + y_{ik}) = 1 \quad i = 1, \dots, n \quad (4.7)$$

$$\sum_{k=1}^m (m - k + 1) \cdot (x_{hk} - x_{ik}) \geq 0 \quad i = 1, \dots, n; \quad h \in P_i \quad (4.8)$$

$$\sum_{k=1}^m (m - k + 1) \cdot (y_{ik} - y_{hk}) \geq 0 \quad i = 1, \dots, n; \quad h \in P_i \quad (4.9)$$

$$\sum_{i=1}^n t_i \cdot (x_{ik} + y_{ik}) \leq c \quad k = 1, \dots, m \quad (4.10)$$

$$c \geq 0 \quad (4.11)$$

$$x_{ik}, y_{ik} \in \{0, 1\} \quad (i = 1, 2, \dots, n; k = 1, 2, \dots, m) \quad (4.12)$$

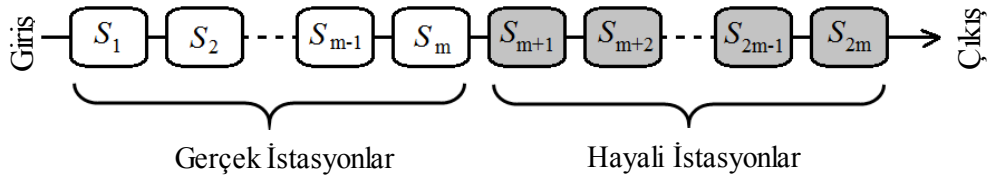
Eş. 4.6 çevrim süresini en küçüklerken, her bir görevin hayali ya da gerçek öncelik diyagramından (hattın giriş ya da çıkış yönüne) sadece bir istasyona kesin olarak atanması Eş. 4.7 ile sağlanır. Hattın giriş yönüne atanan görevlerin öncelik ilişkileri Eş. 4.8 ile sağlanırken, çıkış yönüne atanan görevler arasındaki öncelik kısıtları Eş. 4.9 ile sağlanmaktadır. Eş. 4.10 istasyon sürelerinin çevrim süresini aşmamasını diğer bir ifadeyle çevrim süresinin maksimum istasyon süresine eşit olmasını gerçekleştirir. Eş. 4.11 ve Eş. 4.12 değişkenlerin pozitif ya da 0-1 tamsayı değerlerini almasını sağlamaktadır.

Dong matematiksel model yaklaşımı

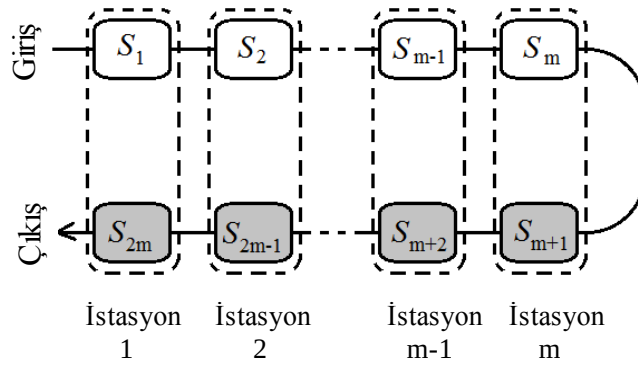
Dong ve diğerleri (2014) tarafından karışık modelli stokastik UMHDP için önerilen yaklaşımda m adet istasyona atanacak görevler için m adet hayali istasyon eklenerek, öncelik ilişkileri Şekil 4.3.(a)'da görülen $2m$ istasyonlu düz montaj hattında sağlanmıştır. $2m$ istasyonlu hayali düz montaj hattı U tipine çevrilerek istasyon sayısı m 'e indirilmiştir (Şekil 4.3.(b)) ve görevlerin hangi istasyonlara atandığı belirlenmiştir. Örneğin $2m$ istasyonlu düz montaj hattı U tipine çevrildiğinde, Şekil 4.3.(a)'da görülen, k . gerçek istasyon U tipinde de yine k . istasyona karşılık gelirken, l . hayali istasyon U tipinde $(2m+1-l)$. gerçek istasyona karşılık gelmektedir. Diğer bir ifadeyle Şekil 4.3.(b)'de gösterilen U-tipi hattın j . gerçek

istasyonunu Şekil 4.3.(a)'da gösterilen yapıda bulunan j . ve $(2m+1-j)$. istasyonlar oluşturmaktadır. Açılabilir maksimum istasyon sayısının m , görev sayısının n olduğu UMHDP-II problemlerinde belirtilen modelleme için $2 \cdot m \cdot n + 1$ adet değişken gerekmektedir.

Bu sayede U tipi montaj hattında öncelik kısıtları sağlanarak görevlerin hangi istasyona atanmış olduğu belirlenmektedir.



(a) Modelleme yaklaşımı



(b) İstasyon sürelerinin belirlenmesi

Şekil 4.3. Dong modelleme yaklaşımının şekilsel gösterimi

Dong ve diğerleri (2014) tarafından önerilen bu yaklaşımın UMHDP-II için uyarlanmış hali aşağıdaki gibidir:

$$\min c \quad (4.13)$$

$$\sum_{k=1}^{2m} x_{ik} = 1 \quad (i = 1, \dots, n) \quad (4.14)$$

$$\sum_{k=1}^{2m} k \cdot x_{ik} \leq \sum_{k=1}^{2m} k \cdot x_{jk} \quad (j = 1, \dots, n; \quad i \in P_j) \quad (4.15)$$

$$\sum_{i=1}^n t_i \cdot x_{ik} + \sum_{i=1}^n t_i \cdot x_{il} \leq c \quad (k=1, \dots, m; \quad l=2 \cdot m+1-k) \quad (4.16)$$

$$c \geq 0 \quad (4.17)$$

$$x_{ik} \in \{0, 1\} \quad (i=1, 2, \dots, n; k=1, 2, \dots, 2m) \quad (4.18)$$

Eş. 4.13 çevrim süresini en küçüklemektedir. Her görevin sadece bir istasyona kesin olarak atanması Eş. 4.14 ile sağlanır. Eğer i görevi j görevinin direk öncülü ise $(i \rightarrow j)$ $2m$ istasyonlu düz montaj hattında i görevinin j görevi ile aynı ya da daha erken bir istasyona atanması Eş. 4.15 ile sağlanır. Eş. 4.16 $2m$ istasyonlu düz montaj hattının U tipi hatta çevrildiğinde, hattaki istasyonların görev sürelerini hesaplar ve çevrim süresini belirler. Amaç fonksiyonu da göz önüne alındığında çevrim süresi en büyük istasyon süresine eşit olacaktır. Eş. 4.17 ve Eş. 4.18 değişkenlerin pozitif ya da 0-1 tamsayı değeri almasını sağlar.

Fattahi matematiksel model yaklaşımı

Fattahi (2014) tarafından UMHDP-I için önerilen matematiksel modelleme yaklaşımında, görevlerin U tipi hattın giriş ya da çıkış yönünden hangisine atandığını belirleyen bir değişken kümesi kullanılmıştır. Eğer bir görev hattın çıkış yönüne atandı ise ardıllarının da hattın çıkış yönüne atanması bir kısıt kümesi ile sağlanmaktadır. Görev sayısı n ve açılabilir maksimum istasyon sayısı m olan UMHDP-II problemlerinde diğer modelleme yaklaşımları için $2 \cdot m \cdot n + 1$ adet değişken gerekirken, Fattahi tarafından sunulan modelde $(m+1) \cdot n + 1$ adet değişken yeterli olmaktadır. Bir diğer ifadeyle belirtilen modelleme yaklaşımında diğer modellere kıyasla daha az sayıda değişken kullanılması avantaj sağlamaktadır. Önerilen modelin UMHDP-II için uyarlanmış hali aşağıdaki gibidir:

$$\min c \quad (4.19)$$

$$\sum_{k=1}^m x_{ik} = 1 \quad i=1, \dots, n \quad (4.20)$$

$$\sum_{k=1}^m k \cdot (x_{hk} - x_{ik}) \leq (1 - v_h) \cdot m \quad i=1, \dots, n; \quad h \in P_i \quad (4.21)$$

$$\sum_{k=1}^m k \cdot (x_{ik} - x_{hk}) \leq v_i \cdot m \quad i = 1, \dots, n; \quad h \in P_i \quad (4.22)$$

$$\sum_{i=1}^n t_i \cdot x_{ik} \leq c \quad k = 1, \dots, m \quad (4.23)$$

$$c \geq 0 \quad (4.24)$$

$$v_h \leq v_i \quad i = 1, \dots, n \quad h \in P_i \quad (4.25)$$

$$x_{ik}, v_i \in \{0, 1\} \quad (i = 1, 2, \dots, n; k = 1, 2, \dots, m) \quad (4.26)$$

Eş. 4.19 çevrim süresini en küçüklerken, her bir görevin sadece bir istasyona kesin olarak atanması Eş. 4.20 ile sağlanmaktadır. Hattın giriş ya da çıkış yönüne atanan görevler arasındaki öncelik kısıtları Eş. 4.21 ve Eş. 4.22 ile sağlanmaktadır. Eş. 4.23 istasyon sürelerinin çevrim süresini aşmamasını diğer bir ifadeyle çevrim süresinin maksimum istasyon süresine eşit olmasını gerçekleştirir. Eş. 4.24 hattın çıkış yönüne atanan bir görevin ardıllarının da çıkış yönüne atanmasını sağlarken, Eş. 4.25 ve Eş. 4.26 değişkenlerin pozitif ya da 0-1 tamsayı değerlerini almasını sağlamaktadır.

5. ÖNERİLEN SEZGİSEL YÖNTEMLER

Montaj hattı dengeleme problemlerinin tamamının NP-zor problemler olduğu bilinmektedir (Gutjahr, 1964). Bu nedenle orta ve büyük ölçekli problemlerde kesin çözüm yöntemleri ile kabul edilebilir sürelerde iyi çözümlere ulaşmak mümkün olmayabilmektedir. Böylesi durumlarda kesin çözüm yöntemlerinden ziyade, sezgisel yöntemler kullanılarak makul sürede iyi sonuçlar elde edilebilmektedir. Bu bölümde problemin çözümüne yönelik genetik algoritma ve tavlama benzetimine dayalı iki farklı sezgisel yöntem sunulmaktadır.

5.1. Genetik Algoritmalar

Canlıların evrimsel gelişiminden esinlenen hesaplama tekniklerinin karmaşık problemlerin çözümüne uygulanması 1960'lerden bu yana araştırmacıların yoğun olarak ilgisini çekmektedir (Gen ve Cheng, 2000: 1). Evrimsel hesaplama tekniklerinin en popüler olanı Holland (1975) tarafından geliştirilen genetik algoritmalar (MacLeod, 2010). Kolay anlaşılır bir yapıya sahip olan genetik algoritmaların, bilgisayar programlarında kolay kodlanabilir olması kullanıcılar açısından avantaj sağlamaktadır. Günlük hayat problemlerine sıklıkla uygulanan genetik algoritmalar büyük boyutlu problemlerin çözümünde dahi etkili olan yöntemlerinden biri olarak bilinmektedir (Coley, 1999: 1). Genetik algoritmaların amacı, salt rastgele çözümler aramadan ziyade, olası hata ve belirsizlik payını da dâhil edecek süreçler kullanarak rastgele sonuçlardan daha iyi çözümler üretmektir. Bu amaca yönelik olarak stokastik optimizasyon yaklaşımlarını kullanan genetik algoritmalar, yerel optimum sonuçlardan en iyisine ya da global optimum sonuca ulaşmaya çalışmaktadır (Spall, 2012: 186, 192). Geleneksel yöntemlerle optimal olarak çözümü zor olan karmaşık, kısıt sayısı fazla, kesin çözüm yöntemleri ile sonuçlandırılmayan optimizasyon problemlerinde de sıklıkla tercih edilmektedir (Paksoy ve Uzun, 2008).

5.1.1. Genetik algoritmaların genel özellikleri ve temel kavramlar

Genetik algoritmalar, kromozom adı verilen ve her biri bir çözüme karşılık gelen belirli sayıdaki kromozom kümelerinden oluşan bir popülasyon ile arama sürecine başlar. Her bir popülasyon, çeşitli operatörler aracılığıyla değişikliğe uğratarak yeni nesil kromozom kümelerinin oluşturulması sağlanır. Kromozomların uygunluk değerleri dikkate alınarak

gerçekleştirilen seçim işlemleri ardından uygunluk değeri iyi olan bireylerin özellikleri bir sonraki nesile aktarılmak üzere seçilir (Goldberg, 1989).

Genetik arama sürecinde popülasyonda bulunan kromozomlardan çeşitli operatörler aracılığıyla yeni kromozomlar üretilerek daha iyi uygunluk değerini sahip çözümler oluşturulmaya çalışılır. Popülasyon tabanlı sezgisel bir yöntem olan algoritma, kesin çözüm yöntemleri ile hesaplanamayacak boyuttaki problem örneklerinde etkinliğini koruyabilmektedir. Başlangıç popülasyonundan sonra oluşturulan popülasyonlar yani farklı çözüm kümeleri, evrimsel operatör aracılığıyla hızlı bir şekilde hesaplanabilmektedir. Özellikle karmaşık problemlerde hesaplanması güç olan ve her bir kromozomu, problemin çözümünden birini belirten popülasyonun, uygun çözümlerden oluşturulması gerekmektedir. Uygun çözümlerin oluşturulmasında, problemin yapısına göre herhangi bir yöntem kullanılabilir. Ancak dikkat edilmesi gereken hususlardan biri, oluşturulan kodlama yapısının genetik operatörlerin kolay bir şekilde uygulanabilir olmasına olanak sağlamasıdır. Bu nedenle genetik algoritmanın temel bileşenleri ve kullanılacak olan operatörler, geliştirilecek algoritmanın başarısı açısından daha da önem kazanmaktadır (Paksoy ve Uzun, 2008). Genetik algortmada kullanılan temel bileşenler ve operatörler hakkında detaylı bilgiler aşağıda belirtilmiştir.

Kodlama yapısı ve kromozom

Genetik algoritmanın başarılı bir şekilde uygulanabilmesi için ilgili probleme ait değişkenlerin gösteriminin uygun bir şekilde gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Seçilen kodlama yapısının problemin türüne göre farklı yapılarda olabileceği bilinmektedir. Çözümlerin gösterilmesinde ikili (0-1 değişkenleri) sayı sistemi sıklıkla tercih edilse de tamsayı, reel sayılar vb. gibi gösterim şekilleri de kullanılmaktadır. Özellikle, karar değişkeni sayısı fazla ve değişkenin ikili sistemdeki karşılığı uzun olan problemlerde tamsayı kodlama tercih edilmektedir. Popülasyonu oluşturan ve farklı kodlama yapılarından oluşabilen, çözüm kümelerinin her birine birey ya da kromozom adı verilmektedir. Her bir kromozom, temsil ettiği çözüme ait bilgileri içermektedir (Srinivas ve Patnaik, 1994).

Gen

Bir kromozomun genetik özelliklerinden herhangi birini taşıyan parçaya gen adı verilmektedir. Bu nedenle kalıtımın fiziksel ve işlevsel birimi olmaktadır. Her gen özel bir işlev taşıyan kromozomların, belli konumunda bulunan en küçük gösterim elemanlarından oluşmaktadır. Kromozom üzerinde belli bir konumda bulunan genler problemin değişkenlerine ilişkin bilgileri göstermektedir (Paksoy ve Uzun, 2008).

Popülasyon genişliği

Popülasyon genişliği başka bir tanımla bir popülasyonda bulunan kromozom sayısı evrimsel hesaplamalarda belirlenmesi gereken önemli parametrelerden birisidir. Araştırmacılar genellikle küçük popülasyon genişliklerinin çözüm kalitesinin yetersiz olmasına, büyük popülasyon genişliklerinin ise kaliteli çözümleri bulma süresinin uzamasına neden olduğunu belirtmektedir. Çözüm kalitesi ve süresi açısından önem arz eden popülasyon genişliğinin uygun olarak belirlenmesi algoritmanın performansı açısından önem arz etmektedir (Roewa, Fidanova ve Paprzycki, 2013).

Uygunluk fonksiyonu

Genetik algoritmaların kullanımının amacı belirli bir optimizasyon probleminde en iyi veya en iyiye yakın bir çözümü makul bir sürede bulabilmektir. Mevcut toplumda bulunan iyi özelliklere sahip (uygun) kromozomların özelliklerinin bir sonraki popülasyona aktarılması, belirli kriterler dâhilinde değerlendirilerek yapılmaktadır. Kromozomların uygunluk performansını değerlendirmek amacıyla bir uygunluk fonksiyonu geliştirilir. Uygunluk fonksiyonu ile her bir çözümün amaç fonksiyonuna göre uygunluğunu belirten bir değer elde edilir. Bu değer ile çözümün, optimal çözüme yakınlığı ve çözüm kalitesi tespit edilir. Uygunluk fonksiyonları en iyi olan kromozomlar ise optimum ya da optimuma yakın çözümü temsil eden kromozomlardır (Goldberg, 1989).

Seçim mekanizması

Özellikleri bir sonraki popülasyona aktarılacak olan kromozomları seçme işlemi iyi olanın yaşaması ilkesine uygun olarak çalışır. Kromozomların uygunluk değerlerinin belirlenmesi ile seleksiyon işlemi uygulanabilir hale gelir. Uygunluk değeri iyi olan kromozomların

özelliklerinin bir sonraki topluluğa aktarılma olasılığı daha yüksektir (Srinivas ve Patnaik, 1994). Uygun olarak seçilen bir kromozom, yeni popülasyonda oluşturulacak bireylerin özelliklerine katkıda bulunabilmektedir. Böylece popülasyondan popülasyona kalıtsal özellikler aktarılabilir. Bir sonraki topluma aktarılacak olan kromozomların seçilmesi amacıyla geliştirilmiş birçok seçim mekanizması bulunmaktadır. Goldberg ve Deb (1991) tarafından seçim mekanizmaları orantılı yeniden üretim, sıralı, turnuva ve denge durumu olmak üzere 4 ana sınıf altında toplanmıştır. En yaygın olarak kullanılan seçim mekanizmaları ise elitist strateji, rulet çarkı ve turnuva seçim mekanizmaları olarak özetlenebilmektedir. Orantılı yeniden üretim mekanizmalarından olan rulet çarkı yöntemi seçim mekanizmalarının en sık kullanılanlarından biri olarak bilinmektedir. Kolaylık ve işlem süresi açısından ise turnuva seçim mekanizmalarının daha avantajlı olduğu söylenebilir. Turnuva seçim mekanizmalarında popülasyonu oluşturan kromozomlardan bazıları, rastsal olarak belirlenmektedir. Belirlenen kromozomlar kıyaslanarak aralarında uygunluk değeri yüksek olan kromozom genetik operatörler uygulanmak üzere seçilmektedir. Bu sayede yeni oluşturulan popülasyon, bir önceki popülasyonun kötü özelliklerinden arındırılmaya çalışılmaktadır. Turnuva yönteminde uygunluk fonksiyonu değerlerini karşılaştırmak üzere seçilen birey sayısı ise turnuva genişliğini oluşturmaktadır.

Çaprazlama operatörü

Seçim işleminin ardından elde edilen kromozomlardan yeni çözümler elde etmek amacıyla çaprazlama operatörü uygulanmaktadır (Srinivas ve Patnaik, 1994). Seçilen kromozomlardan her ikisinin de özelliklerini taşıyan yeni çözümler elde etmek çaprazlama operatörünün temel amaçlarından birisidir. Çaprazlama işleminde, seçilen ebeveyn kromozomlarında bulunan genlerin bazıları anne kromozomdan bazıları baba kromozomdan yavru kromozomlara aktarılır. Böylece ebeveyn kromozomlarındaki genler yeni kromozomlara aktarılmaktadır. Bu sayede popülasyonun toplam uygunluk değerinin artırılması beklenmektedir.

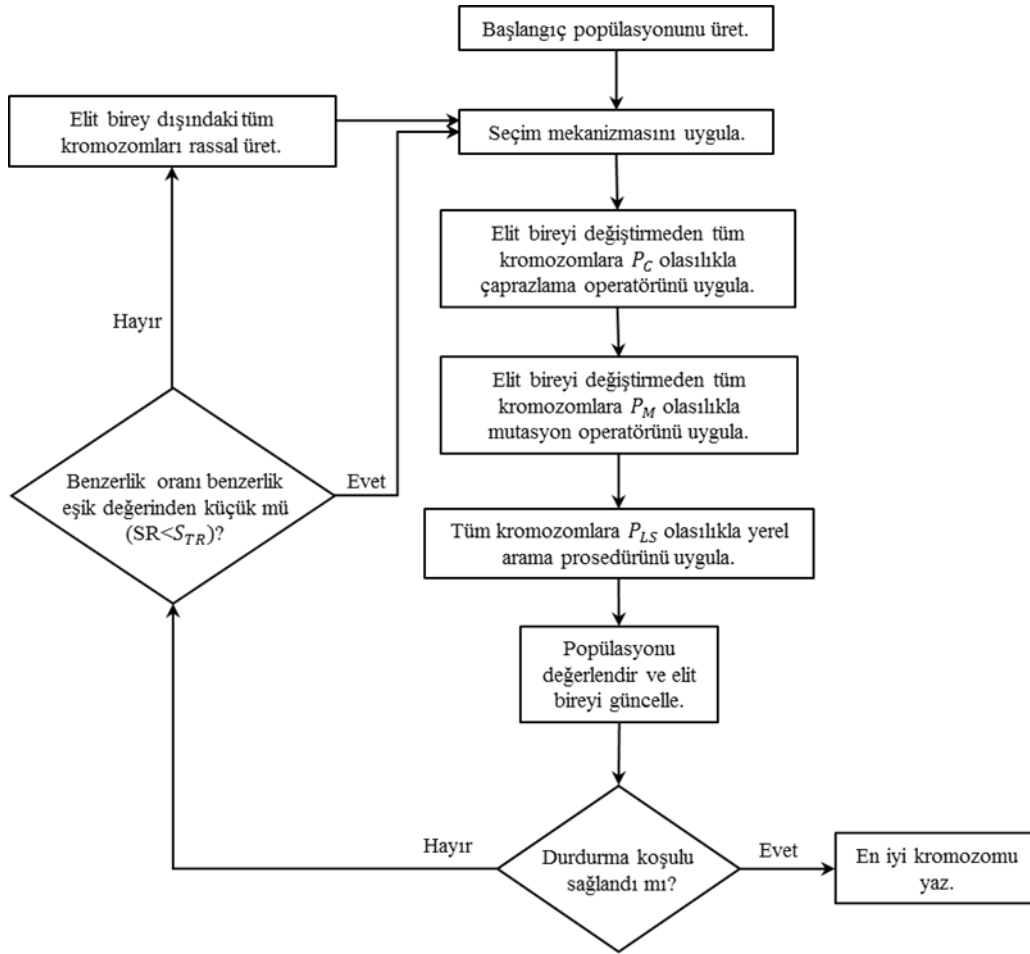
Mutasyon operatörü

Genetik algoritmalarda kullanılan mutasyon (değişim), doğal genetik mutasyon fikrinden ortaya çıkmıştır. Bireylerin birbirine benzediği durumlarda çaprazlama operatörünün etkinliği azalmaktadır. Böylesi durumlarda çeşitliliği artırmak için kromozomdaki bazı

genlerin rastgele değişimi sağlanarak çeşitlilik sağlanır. Mutasyon operatörü popülasyondan seçilen kromozomlara yapılan küçük değişiklikler olarak belirtilebilmektedir (Talbi, 2009: 208). Mutasyon, kromozom başkalaştırılması veya farklılaştırılması için kullanılan etkili bir operatördür (Paksoy ve Uzun, 2008).

5.2. Grup Genetik Algoritma

Genetik algoritma yaşayan organizmaların evrimsel süreçlerinden esinlenerek geliştirilen etkili bir meta-sezgisel yöntem olarak bilinmektedir. Bu algoritmaya göre kromozomların sürekli olarak geliştiği ve son nesillerin en iyi özelliklere sahip olduğu varsayılmaktadır. Kombinatoryonel optimizasyon problemlerinin çözümünde genetik algoritmalar başarılı bir şekilde uygulanmaktadır. Ancak standart genetik algoritmanın gruplama problemlerinin çözümünde çok verimli olmadığı, çaprazlama ve mutasyon operatörlerinin etkili bir şekilde kullanılmadığı bilinmektedir (De Lit, Falkenauer ve Delchambre, 2000). Bu nedenle Falkenauer (1996) tarafından önerilen grup genetik algoritma (GGA) gruplama ve kümeleme problemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. GGA ile genetik algoritma arasındaki en önemli iki fark gösterim şekli ve kullanılan operatörlerdir. GGA’da kullanılan çaprazlama ve mutasyon operatörleri problemin yapısına daha uygun olarak gerçekteştirilmektedir. Ayrıca genetik algoritmanın yerel arama gibi yöntemlerle birlikte kullanılması çözüm kalitesini ve algoritmanın etkinliğini daha da artırmaktadır. Bu tezde de GGA ile yerel aramanın birlikte kullanımına dayalı sezgisel bir yöntem geliştirilmiştir. Önerilen algoritmada, Johnalagedda ve Dabade’nin (2014) çalışmasından farklı olarak çaprazlama ve mutasyon operatörleri neticesinde daima uygun çözümler elde edilmiştir. Bu sayede düzeltme fonksiyonu kullanılmasına gerek kalmamış olup, algoritmanın daha etkili sonuçlar vermesi sağlanmıştır. Önerilen GGA’nın genel yapısı Şekil 5.1’de sunulmuştur.



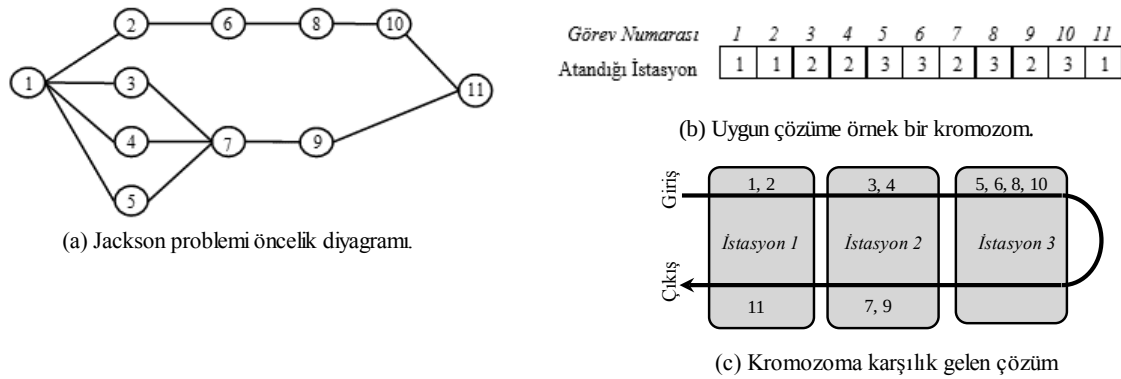
Şekil 5.1. Önerilen GGA'nın genel yapısı

Sunulan GGA'da elitist strateji uygulanmıştır. Bu bağlamda en iyi uygunluk değerine sahip olan kromozoma (çözüm) çaprazlama ve mutasyon operatörleri uygulanmamıştır. Kromozomlar arasındaki benzerlik oranının kabul edilebilir seviyelerin üzerine çıktığı durumlarda, erken yakınsamanın önüne geçmek amacıyla tüm kromozomların rastsal olarak üretildiği aşamada, elit kromozomlar aynı bırakılmıştır. GGA'nın bileşenleri hakkında detaylı bilgiler alt bölümlerde verilmiştir.

5.2.1. Kodlama yapısı

Genetik algoritmaların verimliliğini etkileyen en önemli bileşenlerden biri kodlama yapısıdır. Standart genetik algoritmalarda kullanılan kodlama yapıları gruplama problemleri açısından pek uygun değildir. Bu çalışmada Johnalagedda ve Dabade (2014) tarafından önerilen kodlama yapısı kullanılmıştır. Kromozomun gösterilmesi amacıyla n tane genden oluşan tek boyutlu bir dizi tercih edilmiştir. Her bir genin indisi (kromozomdaki sırası) görev

numarasını gösterirken, o genin aldığı değer ilişkili görevin atandığı istasyonu belirtmektedir. Kodlama yapısını daha açık bir şekilde belirtmek için literatürde bulunan Jackson problemi ve bu problemin UMHDP-II için uygun çözümlerden birisine karşılık gelen kromozom Şekil 5.2’de sunulmuştur. Şekilde görüldüğü üzere 1, 2 ve 11. görevler istasyon 1’e atanırken ($S_1 = \{1, 2, 11\}$), 3, 4, 7 ve 9. görevler istasyon 2’ye ($S_2 = \{3, 4, 7, 9\}$), 5, 6, 8 ve 10. görevler istasyon 3’e ($S_3 = \{5, 6, 8, 10\}$) atanmıştır.



Şekil 5.2. Kodlama yapısının Jackson problemi üzerinde gösterimi

5.2.2. Başlangıç popülasyonunun üretilmesi

Başlangıç popülasyonu rastsal oluşturulan kromozomlardan meydana gelmektedir. Kromozomların rastsal olarak üretilmesinin yanı sıra uygunluk değeri düşük olan kromozomlardan kaçınmak amacıyla toplam iş yükü istasyonlara olabildiğince eşit dağıtılmaya çalışılmıştır. Bu doğrultuda toplam iş yükü istasyon sayısına bölünerek çevrim süresi için teorik alt sınır değeri (LB_c) hesaplanmıştır. Görevler istasyona atanırken alt sınır değerleri de kontrol edilerek atamalar gerçekleştirilmiştir. Önerilen yaklaşımda en son atamanın yapıldığı mevcut istasyon indeksini gösteren k değeri ile alt sınır değerinin çarpımı ($k \cdot LB_c$), atanan görevlerin işlem sürelerinin toplamı ($t_{assigned}$) ile karşılaştırılmaktadır. Atanan görevlerin işlem sürelerinin toplamı, $k \cdot LB_c$ değerini geçtiği durumlarda yeni bir istasyon açılmakta, sonraki atamalar yeni istasyona yapılmaktadır. Kromozomların rastsal üretilmesine ilişkin önerilen algoritmanın genel yapısı Şekil 5.3’de sunulmuştur. Şekilde t_{sum} görevlerin işlem sürelerinin toplamını gösterirken, m toplam istasyon sayısını belirtmektedir.

Prosedür: Rastsal kromozom oluşturma

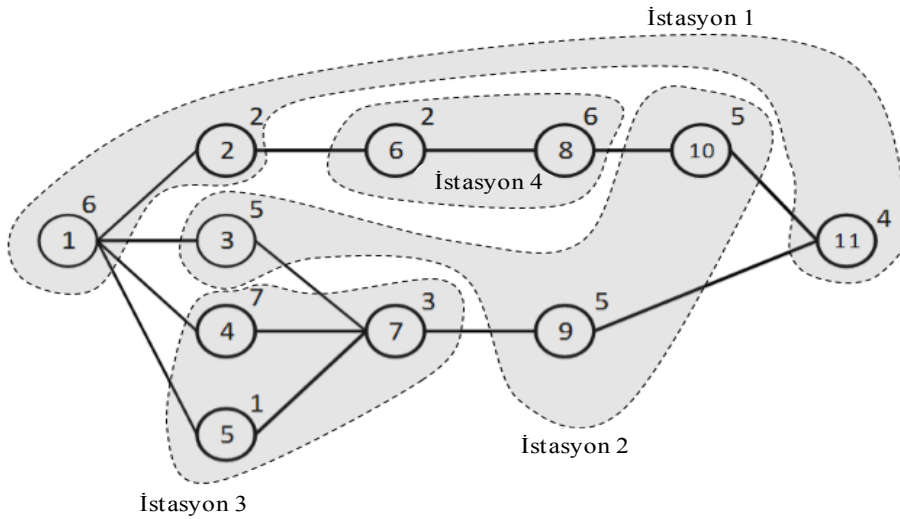
Girdi: Görev süreleri, öncelik ilişkileri, m

Çıktı: Rastsal kromozom

1. $t_{assigned}=0$, $k = 1$ (sıradaki istasyon indeksi), değerlerini ata.
2. Teorik alt sınırı hesapla $LB_c = \lceil t_{sum} / m \rceil$.
3. Ardılık ve öncüllük ilişkilerini kontrol ederek aday görevler kümesini belirle.
4. Aşağıdaki adımları izleyerek görev ata.
 - 4.1. $i \leftarrow$ Aday görevler kümesinden bir görevi rastsal olarak seç.
 - 4.2. Seçilen görevi (i) k istasyonuna ata.
 - 4.3. $t_{assigned}$ değerini güncelle ($t_{assigned} = t_{assigned} + t_i$).
5. Eğer $t_{assigned} \geq k \cdot LB_c$ ise k değerini güncelle $k = k + 1$;
6. Eğer atanmayan görev var ise adım 3'e git;
7. Rastsal kromozomu kaydet.

Şekil 5.3. Rastsal kromozomun oluşturulmasına ilişkin algoritma

Jackson problemine ilişkin rastsal kromozomun oluşturulması Şekil 5.4'de, gerçekleştirilen iterasyonlar ise Çizelge 5.1'de sunulmuştur. Belirtilen örnek için $t_{sum} = 46$ ve $LB_c = \lceil 46/4 \rceil = 12$ olarak hesaplanmıştır. 3, 6, ve 9. İterasyonlarda $t_{assigned}$ değerinin $k \cdot LB_c$ değerini geçmesi nedeniyle yeni istasyonlar açılmıştır.



Şekil 5.4. Rastsal kromozom oluşturulmasına bir örnek

Çizelge 5.1. Rastsal kromozom oluşturulmasının adımları

İterasyon	Sıradaki İstasyon (k)	Aday Görevler	Seçilen Görev	$t_{assigned}$	Açıklama
1	1	1, 11	11	4	-
2		1, 9, 10	1	10	-
3		2, 3, 4, 5, 9, 10	2	12	Yeni istasyon aç
4	2	3, 4, 5, 6, 9, 10	9	17	-
5		3, 4, 5, 6, 7, 10	3	22	-
6		4, 5, 6, 7, 10	10	27	Yeni istasyon aç
7	3	4, 5, 6, 7, 8	4	34	-
8		5, 6, 7, 8	5	35	-
9		6, 7, 8	7	38	Yeni istasyon aç
10	4	6, 8	8	44	-
11		6	6	50	-

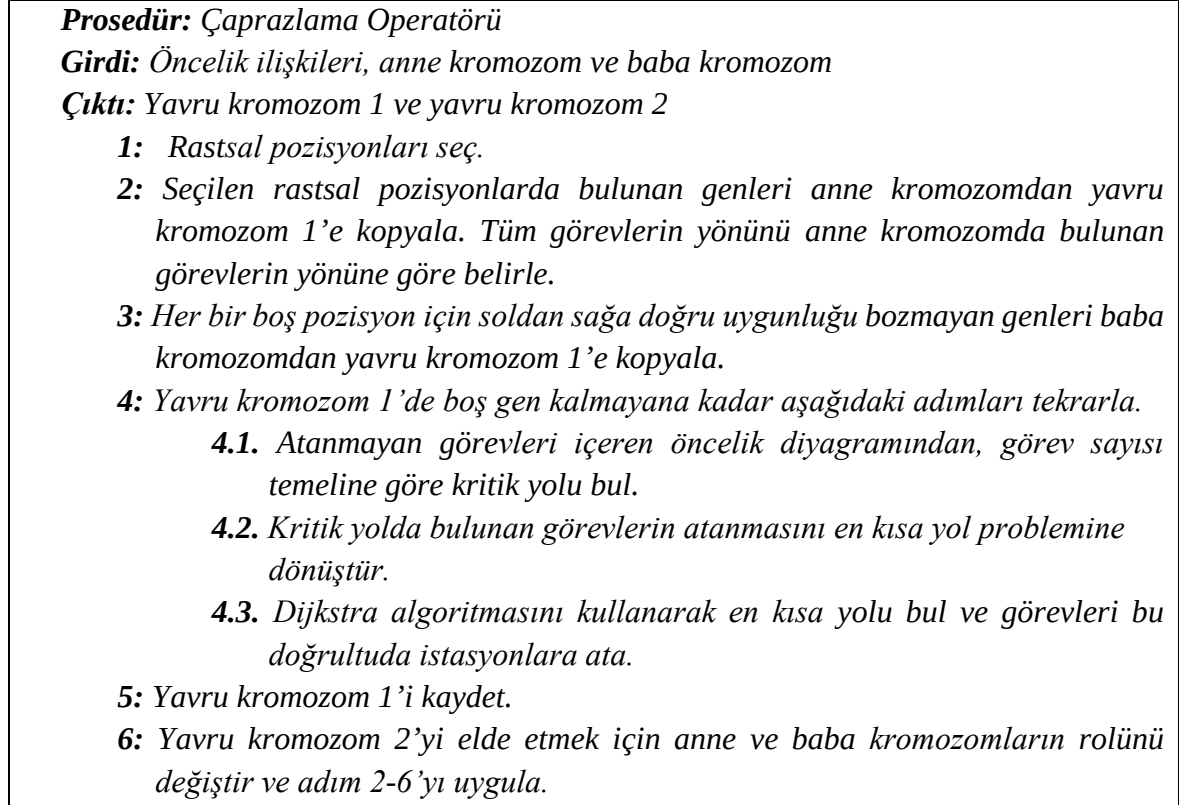
5.2.3. Seçim mekanizması

Genetik algoritmalarda özellikleri bir sonraki popülasyona aktarılabacak olan kromozomlar, seçim mekanizmaları aracılığıyla belirlenmektedir. Bu tezde, turnuva seçim mekanizması kullanılmıştır. Bu mekanizmaya göre popülasyondan rastgele seçilen belirli sayıdaki kromozom arasından, uygunluk değeri en iyi olan kromozom çaprazlama ve mutasyon yoluyla bir sonraki popülasyonu oluşturmak için kullanılmaktadır. Turnuva seçim mekanizmaları da uygunluk fonksiyonu karşılaştırılacak olan kromozom sayısına göre farklılık göstermektedir. Yapılan ön deneysel çalışmalarda turnuva genişliği için en uygun değer iki olarak tespit edilmiştir.

5.2.4. Çaprazlama operatörü

Genetik algoritmanın performansını büyük ölçüde etkileyen bileşenlerden biri çaprazlama operatörüdür (Gen ve Cheng, 2000). Çaprazlama operatöründe yavru olarak adlandırılan, yeni kromozomlar (çözümler) üretmek için anne ve baba olarak adlandırılan iki farklı kromozom ele alınır. Bu yöntemde temel amaç anne ve baba kromozomların özelliklerini olabildiğince taşıyan yeni kromozomlar üretmektir. Problemin yapısı ve özellikleri dikkate alınarak geliştirilen bir kodlama yapısında çaprazlama operatörünün etkili bir biçimde uygulanabilir olması gerekir. Bu tezde pozisyon tabanlı çaprazlama (Syswerda, 1991) yönteminden esinlenilerek algoritmanın etkinliğini artırmak amacıyla daima uygun

çözümler üreten yeni bir çaprazlama operatörü geliştirilmiştir. Önerilen çaprazlama operatörüne ait algoritma Şekil 5.5’de sunulmuştur.



Şekil 5.5. Çaprazlama operatörünün uygulanmasına ilişkin algoritma

Önerilen çaprazlama işleminde ilk olarak, pozisyon tabanlı çaprazlama operatöründe olduğu gibi P_{CR} olasılıkla rastsal pozisyonlar belirlenir. Bu pozisyonlarda olan görevler anne kromozomda hangi istasyona atandı ise yavru kromozomda da o istasyona atanır. Çaprazlama operatöründe yavru kromozomun, anne ve baba kromozomun özelliklerini olabildiğince taşıması istenmektedir. Bu doğrultuda atanmayan görevler arasından sırası ile soldan sağa doğru uygunluğu bozmayan görevler baba kromozomdan kopyalanmaktadır. Soldan sağa doğru atanmayan görevlerin atanabileceği uygun istasyon aralığı, yavru kromozomdaki kısmi çözüm dikkate alınarak belirlenmektedir. Baba kromozomda ilgili görevin atandığı istasyonun uygun istasyon aralığında olması halinde, belirtilen gen baba kromozomdan yavru kromozoma kopyalanmaktadır. Bir görev baba kromozomda, yavru kromozomun kısmi çözümü için uygun olmayan bir istasyona atanmış ise ilgili gen baba kromozomdan kopyalanmaz. Bu sayede yavru kromozom için uygunluğun bozulmaması sağlanır.

Daha sonra atanamayan görevlerin gösterildiği öncelik diyagramından görev sayısına göre oluşturulan kritik yol üzerinde bulunan görevler belirlenmektedir. Kritik yol üzerinde bulunan görevlerin baba kromozoma olabildiğince benzer olarak atanmasını sağlamak amacıyla ilgili görevlerin istasyonlara atanması en kısa yol problemine dönüştürülmektedir. En kısa yol probleminde düğümler görevlerin atanabileceği istasyonları gösterirken, arklar ilgili istasyon ile o görevin baba kromozomda atandığı istasyon arasındaki mutlak farkı belirtmektedir. Dijkstra algoritması kullanılarak tespit edilen en kısa yola göre görevler istasyonlara atanmaktadır. Kalan görevler arasından kritik yolu bulma ve en kısa yol problemine dönüştürme prosedürü bütün görevler atanana kadar devam ettirilmektedir.

Görevlerin istasyonlara atanmasını en kısa yol problemine dönüştürmek için ilk olarak ilgili görevlerin atanabileceği istasyon aralığının belirlenmesi gerekmektedir. U tipi montaj hatlarında bir görevin atanabileceği erken ve geç istasyonların belirlenmesi için öncelikle ilgili görevin hattın hangi yönüne atanacağını tespit etmek (giriş (E) ya da çıkış (L)) gerekmektedir. Bu tez kapsamında önerilen çaprazlama operatöründe yavru kromozomdaki görevlerin anne kromozomla aynı yönde atandığı varsayılmıştır.

Bir çözümdeki görevin atandığı yönü belirlemek için, o görevin direk öncülleri kontrol edilmektedir. Eğer öncüllerden en az biri çıkış yönünde ise, ya da öncüllerinin herhangi birinden daha erken bir istasyona atanmışsa, görevin atama yönü çıkış olarak tespit edilir. Diğer durumlarda ise yönü giriş olarak belirlenir. Örneğin Jackson problemi için Şekil 5.6'da verilen anne kromozoma göre 7. görevin bütün öncülleri giriş yönündedir ve 7. görev öncüllerinden daha geç bir istasyona atanmıştır. Bu nedenle yönü giriş (E) olarak tespit edilir. Diğer taraftan 10. görev öncülünden daha erken bir istasyona atanmış olup, yönü çıkış (L) olarak belirlenmiştir. Yönü belirlenen görevlerin atanabileceği istasyon aralıkları aşağıdaki durumlar sağlanarak tespit edilir.

Durum 1: Görev giriş yönünde ise öncüllerinden daha erken bir istasyona atanamaz.

Durum 2: Görev ve ardılı giriş yönünde ise ardılının atandığı istasyondan daha geç bir istasyona atanamaz.

Durum 3: Görev çıkış yönünde ise ardılından daha erken bir istasyona atanamaz.

Durum 4: Görev ve öncülü çıkış yönünde ise öncülünden daha geç bir istasyona atanamaz.

Jackson problemi üzerinde çaprazlama operatörünün uygulanmasına ilişkin adımlar aşağıdaki örnek üzerinde açıklanmıştır.

Adım 1: Şekil 5.6’da görüldüğü üzere ilk olarak rastsal pozisyonlar belirlenmiştir.

Baba kromozom	1	3	3	1	1	4	1	3	1	2	1
Anne kromozom	*	*					*	*	*		
	2	2	3	2	3	3	4	4	4	3	1

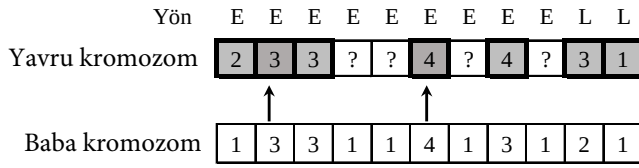
Şekil 5.6. Rastsal pozisyonların belirlenmesi

Adım 2: Şekil 5.7’de de görüldüğü gibi rastsal pozisyonlarda bulunan görevler anne kromozomda hangi istasyona atandı ise yavru kromozomda da aynı istasyona atanmıştır. Yavru kromozomda, görevlerin yönü anne kromozomdaki görevlerin yönü doğrultusunda belirlenmiştir.

	*	*					*	*	*		
Yön	E	E	E	E	E	E	E	E	E	L	L
Anne kromozom	2	2	3	2	3	3	4	4	4	3	1
	↓		↓					↓		↓	↓
Yön	E	E	E	E	E	E	E	E	E	L	L
Yavru kromozom	2	?	3	?	?	?	?	4	?	3	1

Şekil 5.7. Yavru kromozomda görev yönlerinin belirlenmesi ve rastsal atamalar

Adım 3: Şekil 5.8’de görüldüğü üzere kalan görevler (genler) arasında öncelik diyagramı kontrol edilerek soldan sağa doğru uygunluğu bozmayan görevler baba kromozomdan yavru kromozoma kopyalanmıştır. Baba kromozomda 3. istasyona atanan 2. görev, yavru kromozomdaki kısmi çözüme de uygun olduğu için 3. istasyona atanmıştır. Benzer şekilde 6. görevin baba kromozomda atandığı 4. istasyon, yavru kromozomdaki kısmi çözüme uygun olduğu için yavru kromozomda da istasyon 4’e atanmıştır. Diğer taraftan 4. görev yavru kromozomun kısmi çözümünde baba kromozomda atandığı gibi 1. istasyona atanamamıştır. Çünkü yönü giriş olan 4. görevin öncülü (1. görev) 2. istasyona atanmış olup, belirtilen görevin yavru kromozomun kısmi çözümünde 1. istasyona atanması uygunluğu bozmaktadır. Benzer şekilde 5, 7 ve 9. görevlerin baba kromozomdan direk kopyalanmasının uygunluğu bozması nedeniyle bu görevlerin atanması en kısa yol algoritması ile gerçekleştirilecektir.

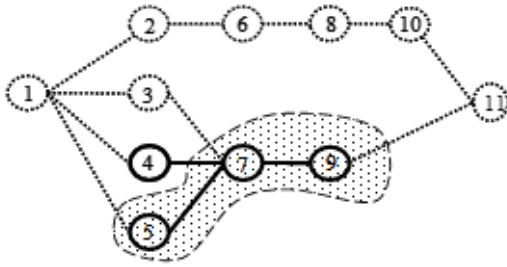


Şekil 5.8. Uygunluğu bozmayan genlerin baba kromozomdan kopyalanması

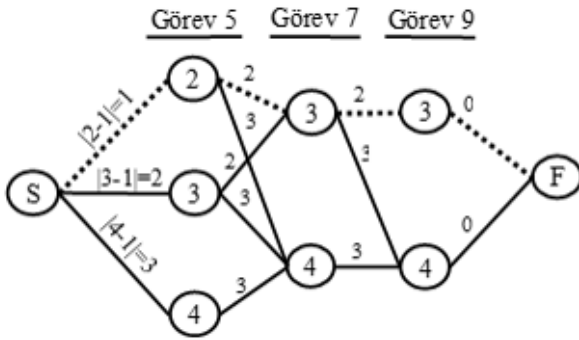
Adım 4: Şekil 5.9(a)'da görüldüğü gibi atanamayan görevleri içeren öncelik diyagramında görev sayısına göre 4-7-9 ve 5-7-9 olmak üzere 2 farklı kritik yol bulunmaktadır. Bu durumda iki kritik yoldan biri rastsal olarak seçilmektedir. 5-7-9 kritik yolunun seçildiği varsayımıyla; yavru kromozomun kısmi çözümü, öncelik diyagramı ve görevlerin atanma yönleri dikkate alınarak atanabilecek istasyon aralıkları bulunur. Örneğin 5. görevin giriş yönünde olması ve direk öncülünün (1. görev) yavru kromozomdaki kısmi çözümde 2. istasyona atanması nedeniyle, atanabileceği en erken istasyon 2'dir. Ardıllarının ilgili görevi kısıtlayacak şekilde atanmaması nedeniyle atanabileceği en geç istasyon ise 4'tür. Yani 5. görevin uygun olarak atanabileceği istasyonlar 2, 3 ve 4'tür. Benzer şekilde hesaplanan Görev 7 ve 9'un atanabileceği istasyonlar aynı olup, 3 ve 4'tür. Şekil 5.9(b)'de gösterildiği gibi bu istasyonlar en kısa yol probleminin düğümlerine karşılık gelmektedir.

Baba kromozoma dikkate alındığında 5. görevin 1. istasyona atanması istenmekte olup, 5. görevin 4. istasyona atanması durumunda istenilen değerden sapma 3 ($4-1=3$) olacaktır. Çaprazlama operatörünün temel amacı her iki kromozomun özelliklerini mümkün olduğunca yansıtan yeni bir çözüm üretmektir. En kısa yol probleminde amaç görevlerin istasyonlara sapma değerlerinin toplamını en azlayacak şekilde atanmasıdır. Bu sayede yavru kromozom anne kromozomun yanı sıra mümkün olduğu derecede baba kromozomun da özelliklerini taşıyacaktır. Belirtilen problem için oluşturulan en kısa yol problemi Şekil 5.9'da sunulmuştur. Başlangıç (S) ve bitiş (F) noktalarına iki hayali düğüm eklenmiştir. En kısa yol probleminde düğümler görevlerin atanacağı istasyonu gösterirken, arklar o görevin atanması istenen istasyon (baba kromozomda atandığı istasyon) ile düğümün belirttiği istasyon arasındaki mutlak farkı göstermektedir. F düğümü bir istasyon belirtmemesi nedeniyle bu düğüme gelen arkların tamamına 0 değeri verilmiştir. Çaprazlama operatöründe bir diğer önemli hususta uygun çözümlerin elde edilmesidir. 5. görevin 4. istasyona atanması durumunda ardılı olan 7. görevin 3. istasyona atanması uygunluğu bozmakta olup, istasyon 4'ten (5. görev için), istasyon 3'e (7. görev için) yol oluşturulmamıştır.

En kısa yol problemi literatürde sıklıkla kullanılan Dijkstra algoritması (Dijkstra, 1959) kullanılarak çözülmüştür. Şekil 5.9'da görülen örnekte bulunan ve kesikli çizgiyle gösterilen en kısa yola göre 5. görev istasyon 2'ye, 7 ve 9. görev de istasyon 3'e atanmıştır. Şekil 5.10'da verilen yavru 1'e ait kısmi kromozoma göre sadece 4. görevin atanamadığı görülmekte olup, bu görev baba kromozoma en yakın olan istasyon 2'ye atanarak yavru kromozomun nihai hali elde edilir. Yavru kromozom 1 Şekil 5.11'de verilmiştir.



(a) Atanamayan görevlere ilişkin öncelik diyagramı ve dikkate alınacak kritik yolun bulunması



(b) Kritik yol üzerinde bulunan görevler için en kısa yol problemi.

Şekil 5.9. Kritik yolun bulunması ve en kısa yol probleminin oluşturulması

Yön	E	E	E	E	E	E	E	E	E	L	L
Yavru kromozom	2	3	3	?	2	4	3	4	3	3	1

Şekil 5.10. En kısa yol problemine göre gerçekleştirilen atamalar

Adım5: Şekil 5.10'da görülen yavru kromozom, yeni çözüm olarak bir sonraki nesile aktarılır. İkinci bir yavru kromozomu elde etmek için anne ve baba kromozomların rolleri değiştirilerek çaprazlama operatörü tekrar uygulanır.

Yön	E	E	E	E	E	E	E	E	E	L	L
Yavru kromozom	2	3	3	2	2	4	3	4	3	3	1

Şekil 5.11. Çaprazlama sonucu elde edilen yavru kromozom 1

Prosedür: Yerel Arama

Girdiler: Başlangıç kromozomu S_B , iterasyon sayısı ($\dot{I}S$)=0, yerel aramadaki tekrar oranı R_{LR} , $Sayaç \leftarrow 0$, toplam görev sayısı (n), açılacak maksimum istasyon sayısı (m).

Çıktı: Yerel optimum çözüm

1. **Eğer** ($\dot{I}S < m$) ise adım 2-6'yı uygula
Değilse eğer, S_B çözümünü yerel optimum olarak kaydet ve çık.
2. S_B çözümündeki maksimum istasyon süresine sahip istasyonu kritik istasyon (S_{CR}) olarak seç. Birden fazla istasyon varsa küçük numaralı istasyonu kritik istasyon olarak seç. S_B çözümünün çevrim süresini hesapla (C_B).
3. Kritik istasyondan bir görevi (i) rastsal olarak seç.
4. i görevinin uygunluğu bozmadan atanabileceği istasyonları belirle ve birini (k) rastsal olarak seç.
5. i görevini k istasyonuna atayarak komşu çözümü (S_N) üret.
6. Aşağıdaki adımları uygulayarak yeni çözümün kabul edilebilir olup olmadığına karar ver.
5.1. S_N çözümünün çevrim süresini (C_N) hesapla.
5.2. Eğer ($C_N < C_B$) ise $S_B \leftarrow S_N$, $C_B \leftarrow C_N$, $Sayaç \leftarrow 0$, ve adım 2'ye git.
Değilse, eğer ($C_N = C_B$ ve $Sayaç \leq n \cdot R_{LR}$) ise $S_B \leftarrow S_N$, $C_B \leftarrow C_N$
 $Sayaç \leftarrow 0$, ve adım 2'ye git.
Değilse, eğer ($C_N = C_B$ ve $Sayaç > n \cdot R_{LR}$) ise adım 7'ye git.
Değilse, eğer ($C_N > C_B$ ve $Sayaç \leq n \cdot R_{LR}$) ise $Sayaç \leftarrow Sayaç + 1$, ve
adım 2'ye git.
Değilse eğer ($C_N > C_B$ ve $Sayaç > n \cdot R_{LR}$) adım 7'ye git.
7. İterasyon sayısını güncelle ($\dot{I}S = \dot{I}S + 1$) ve adım 1'e git.

Şekil 5.13. Yerel arama yönteminin uygulanışına ilişkin algoritma

Yerel arama algoritmasının başlangıcında, verilen çözüm için maksimum istasyon süresine sahip olan kritik istasyon belirlenir. Eğer birden fazla istasyon maksimum istasyon süresine sahipse bunlardan küçük numaralı istasyon kritik istasyon olarak seçilir. Seçilen kritik istasyondaki bir görev rastsal olarak seçilir ve kritik istasyondaki iş yükünü azaltmak amacıyla farklı bir istasyona atanır. Açgözlü algoritmalarda genellikle önceki çözümde iyi olan çözümler kabul edilmektedir. Ancak tez kapsamında incelenen problem yapısı göz önüne alındığında, maksimum istasyon süresine sahip birden fazla istasyon olması durumunda, kritik istasyonun iş yükünün azaltılmasının amaç fonksiyonunda bir iyileştirme sağlayamayacağı görülmektedir. Bu nedenle yerel arama algoritmasında önceki çözümle aynı çevrim süresine ulaşan çözümler belirli bir tekrar sayısı ($n \cdot R_{LR}$) içerisinde kabul

edilmiştir. Art arda $n \cdot R_{LR}$ denemede iyi çözümler bulunamadığı durumlarda iterasyon sayısı artırılır ve belirli bir iterasyon sayısınca algoritma devam eder. Maksimum iterasyon sayısına ulaşıldığında ise en iyi sonuç yerel optimum olarak kaydedilir ve yerel arama algoritması durdurulur.

5.2.7. Erken yakınsama kontrolü ve yeniden üretim mekanizması

Genetik algoritmalarda çaprazlama oranının yüksek olması gibi durumlarda kromozomların kısa sürede birbirine çok benzediği ancak çözüm kalitesinin yeterince iyi olmadığı bilinmektedir. Kromozomların yüksek oranda benzerliğe sahip olması durumunda çaprazlama sonucunda oluşturulan kromozomlar arasında çeşitlilik sağlanamamakta ve genetik arama çözüm uzayının belirli bir bölümüne sıkışabilmektedir. Bu nedenle önerilen GGA kapsamında yeniden üretim stratejisi kullanılarak erken yakınsamanın önüne geçilmesi amaçlanmaktadır. Bu tezde Özcan ve diğerleri (2011) tarafından önerilen yöntem değiştirilerek yeniden üretim stratejisi belirlenmiştir. Bu yöntemle göre mevcut popülasyon için Eş. 5.1 kullanılarak bir benzerlik oranı (SR) hesaplanır.

$$SR = 100 \cdot \frac{\sum_{i=1}^u \sum_{j=1}^n S_{ij}}{u \cdot n} \quad (5.1)$$

Burada u popülasyon büyüklüğünü gösterirken, S_{ij} i . kromozomun j . pozisyonunun elit kromozoma benzerliğini göstermekte olup,

$$S_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{eğer } i. \text{ kromozomun } j. \text{ pozisyonu elit kromozomun } j. \text{ pozisyonuna eşit ise} \\ 0 & \text{diğer durumlarda} \end{cases}$$

olarak tanımlanmıştır. Hesaplanan SR 'nin önceden belirlenen benzerlik eşik değerini (S_{TR}) geçmesi durumunda mevcut popülasyonda elit kromozom dışındaki diğer bütün kromozomlar rastsal olarak tekrar oluşturulmaktadır.

5.2.8. Parametre ayarlaması

Genetik algoritmalar, yöntemde çok önemli yeri olan parametrelerin aldığı değerlerden çok fazla etkilenmektedir. Bu parametreler popülasyon büyüklüğü (u), çaprazlama oranı (P_c) ve

mutasyon oranı (P_M) şeklinde sayılabilir. Bunların yanı sıra uygulanan GGA'da diğer parametre değerlerinin de (P_{CR} , P_{LS} , S_{TR} ve R_{LR}) belirlenmesi gerekmektedir. Kullanılan parametrelere uygun değerler seçilerek yapılan genetik işlemler sonucunda global optimum çözüme ulaşma olasılığı da yükselmektedir. Ancak genetik algoritmaların, stokastik özellikleri nedeniyle, uygun olan parametre değerleri ile dahi çalıştırılrsa da, global optimum sonuca erişimleri mümkün olmayabilmektedir.

Bu tezde önerilen GGA'da kullanılan parametrelerin değerleri yapılan deneysel çalışmalar neticesinde belirlenmiştir. Farklı parametre değerleriyle oluşturulan her bir parametre kombinasyonu için 10 farklı problem örneği 3'er kez çözülmüştür. Bu denemeler neticesinde en iyi sonucu veren parametre değerleri tespit edilmiştir. Denenen ve seçilen parametre değerleri Çizelge 5.2'de sunulmuştur.

Çizelge 5.2. Parametre değerlerinin belirlenmesi

<i>Parametre Adı</i>	<i>Test Edilen Değerler</i>	<i>Seçilen Değer</i>
u	$0,25n ; 0,5n ; n ; 1,5n ; 2n$	n
P_C	$0,6; 0,65; 0,7; 0,75; 0,8; 0,85; 0,9$	$0,85$
P_{CR}	$0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8$	$0,7$
P_M	$0,01; 0,03; 0,05; 0,07; 0,1; 0,15; 0,2$	$0,1$
P_{LS}	$0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7$	$0,5$
S_{TR}	$70; 75; 80; 85; 90; 95$	90
R_{LR}	$0,5; 1; 1,5; 2; 2,5$	1

5.3. Önerilen Tavlama Benzetimi Algoritması

Kirkpatrick, Gelett ve Vecchi (1983) tarafından önerilen TB algoritması, malzemelerin sıcak banyolarda soğutulmasından esinlenilerek hazırlanan bir yöntem olup, ısıtılma işlemi olarak da bilinmektedir. Katı malzeme erime noktasına kadar ısıtılır ve katı hale geçinceye kadar tekrar soğutulursa, soğutulan katı malzemenin yapısal özellikleri sıcaklığı düşürme oranına bağlı olarak değişkenlik gösterebilmektedir. Örneğin, çok yavaş bir soğutma ile uygun bir molekül yapısı elde edilebilirken, hızlı bir soğutma molekül yapısında kusurların oluşmasına neden olabilir. TB bu yapıdan esinlenerek optimizasyon problemlerine uygulanmıştır (Tuzkaya, Gülsün ve Bildik, 2008).

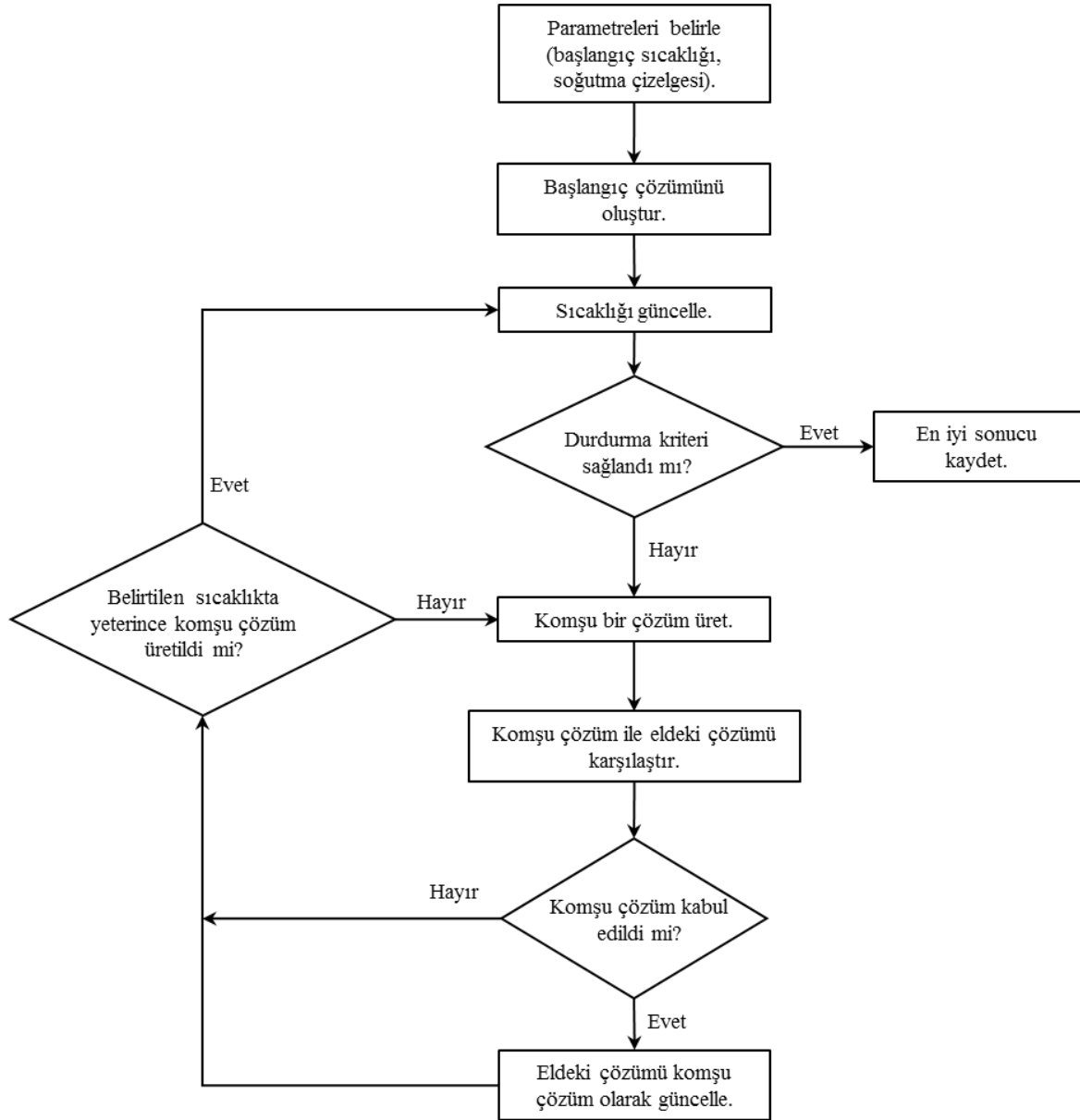
TB algoritması, NP-zor problem grupları da dahil olmak üzere birçok optimizasyon problemine uygulanmaktadır (Nourani ve Andresen, 1998). Uygun çözümlerin bir alt kümesi içerisinde, mevcut çözümden komşu çözümlere tekrarlı bir arama tekniği olan, yerel arama yönteminin farklı bir şekli olarak algılanabilir. Minimizasyon problemleri için yerel arama tekniği, aramanın daima gelişme yönünde olduğu bir iniş stratejisini çalıştırır. Ancak böyle bir strateji global bir çözümden ziyade yerel optimum bir çözüme yakınsar. Yerel aramanın en büyük dezavantajı, global optimumdan çok yerel optimum bulmaya olan yatkınlığıdır. Algoritmanın iteratif olarak tekrar uygulanması ile veya komşuluk değiştirerek daha iyi bir çözüm bulmak istenebilir. Ancak bu varyasyonların hiç biri tam bir tatmin sağlayamamıştır. İniş yöntemlerinden elde edilen çözümler, başlangıç çözümlerine bağlıdır. Bir iniş algoritması daima başlangıç çözümünün de içinde bulunduğu vadinin en alt noktasına doğru arama yapar. Ancak güçlü bir sezgisel yaklaşımın başlangıç çözümüne mümkün olduğunca az bağlı olması gerekmektedir. Başlangıç çözümüne bağımlılığı azaltmak için çözüm uzayında vadinin tepe noktalarına doğru bazı yokuş yukarı hareketler de gerçekleştirilebilmelidir (Tuzkaya ve diğerleri, 2008). Tavlama benzetimi bu doğrultuda kötü çözümleri belirli bir olasılıkla kabul ederek, kontrollü bir şekilde yokuş yukarı hareketlere izin verir. Kötü çözümlerin kabul olasılığı o anki sıcaklık değeri ile sağlanabilmektedir. Tavlama benzetimi maliyet fonksiyonun küçük değerine, küçük sıcaklıklarda yakınsamaktadır. Maliyet fonksiyonu değerinin yüksek olduğu ve sıcaklık değerinin küçük olduğu durumlarda ise kabul olasılığı düşük düzeydedir (Martinez-Rangel ve diğerleri, 2007).

Kötü çözümlerin kabul olasılığının değeri sıcaklığa bağlı bir “*olasılık kabul fonksiyonu*” ile belirlenir. Tavlama benzetiminde kullanılan olasılık kabul fonksiyonu Eş. 5.2’de verilmiştir (Metropolis, Rosenbluth, Rosenbluth, A. H. Teller, ve E. Teller, 1953).

$$p = e^{\frac{-\Delta E}{k_B T}} \quad (5.2)$$

Burada ΔE dizilişin enerjisindeki değişim (yeni çözüm ile önceki çözümün amaç fonksiyonu değerindeki fark), k_B Boltzman sabiti, T ise mevcut sıcaklık değeridir. Yeni dizilişin (yeni çözümün) kabulü ΔE ve T parametrelerinin değerlerine bağlıdır.

Bu tezde popülasyon tabanlı sezgiseller ile tek çözüme dayalı sezgisel yöntemleri karşılaştırmak amacıyla GGA'nın yanı sıra tavlama benzetimi algoritmasına dayanan yeni bir sezgisel yöntem geliştirilmiştir. TB algoritmasının genel yapısı Şekil 5.14'de sunulmuştur.

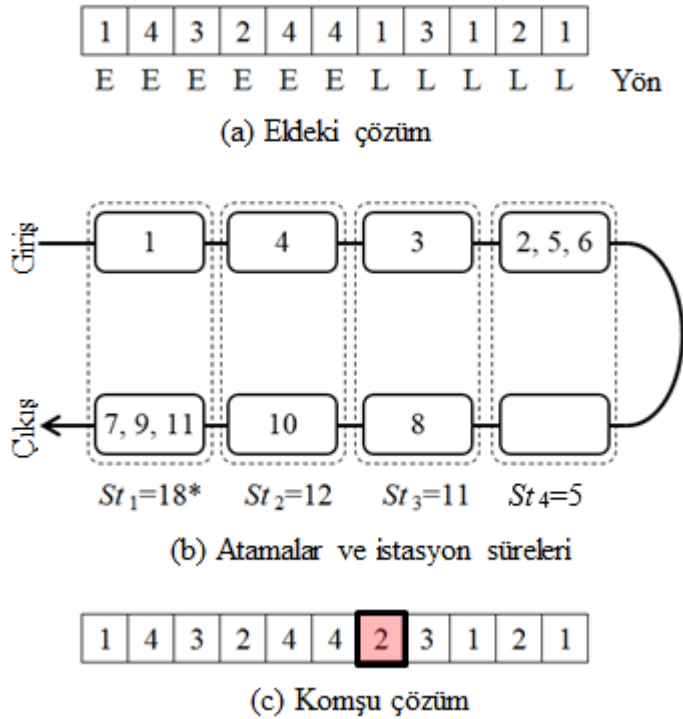


Şekil 5.14.Tavlama benzetimi algoritmasının genel yapısı

5.3.1. Kodlama yapısı, başlangıç çözümü oluşturulması ve komşuluk yapısı

Önerilen tavlama benzetimi algoritmasında Bölüm 5.2.1’de gösterilen kodlama yapısı kullanılmıştır. Ayrıca başlangıç çözümünün üretilmesinde de Bölüm 5.2.2’de ifade edilen yöntem tercih edilmiştir.

GGA’da kullanılan yerel arama prosedüründe komşu çözümlerin üretiliş mekanizması, tavlama benzetiminde de kullanılmıştır. Bu yöntemle önce kritik istasyon bulunmakta olup, kritik istasyona atanan görevlerden biri farklı bir uygun istasyona atanarak komşu çözüm üretilmektedir. 4 istasyonlu Jackson probleminde komşu çözüm üretilmesine bir örnek Şekil 5.15’de sunulmuştur. Mevcut çözüm ve istasyon süreleri Şekil 5.15(a) ve Şekil 5.15(b) de gösterilirken, süresi 18 olan istasyon 1 kritik istasyon olarak belirlenmiştir. Bu istasyona atanan 1, 7, 9 ve 11. görevlerden biri rastsal olarak başka bir istasyona atanarak komşu çözüm üretilmektedir. Görev 7’nin seçildiği varsayımıyla atanabileceği istasyonlar (1, 2, 3 ve 4) belirlenir. Rastsal olarak 2. istasyona atandığı varsayılırsa komşu çözüm Şekil 5.15(c)’deki gibi üretilir. Bu yolla kritik istasyondaki görev yükü azaltılarak amaç fonksiyonu açısından daha iyi bir çözüm elde edilmeye çalışılır.



Şekil 5.15. Komşu çözüm oluşturulmasının şekilsel gösterimi

5.3.2. Soğutma çizelgesi

Soğutma çizelgesi her iterasyonda sıcaklığın ne kadar değişeceğini belirleyen bir mekanizmadır. Algoritmanın etkinliği açısından önemli bir yere sahip olan soğutma çizelgesinde kullanılan parametreler başlangıç sıcaklığı (T_0), soğutma fonksiyonu ve her sıcaklıkta aranacak olan komşu sayısıdır (Talbi, 2009: 130).

Başlangıç sıcaklığının belirlenmesi algoritmanın hızı ve etkinliği açısından önem arz etmektedir. Eğer başlangıç sıcaklığı çok yüksek bir değer ise algoritma rastsal arama yöntemine benzeyecektir. Aksine başlangıç sıcaklığı çok düşük bir değer olursa algoritma yerel aramaya benzer bir tavır sergileyecektir. Bu nedenle başlangıç sıcaklığının uygun bir değer olarak belirlenmesi algoritmanın etkinliğini artıracaktır (Talbi, 2009: 130). Bu tezde kullanılan yöntemde başlangıç çözümünden Δ oranında daha kötü çözümleri P_{SA} olasılıkla kabul edecek bir başlangıç sıcaklığı belirlenmeye çalışılmıştır. Başlangıç sıcaklığının belirlenmesinde Simopoulos, Kavatza ve Vournas (2006) tarafından önerilen ve Eş. 5.3 de verilen formülasyon kullanılmıştır.

$$T_0 = \frac{-\Delta \cdot C_{Baslangic}}{\ln(P_{SA})} \quad (5.3)$$

Eşitlikte $C_{Baslangic}$ başlangıç çözümünde bulunan çevrim süresini gösterirken, Δ ve P_{SA} parametreleri için uygun değerler ön hesaplamalarla sırası ile 0.3 ve 0.85 olarak belirlenmiştir. Soğutma çizelgesinde bir diğer önemli hususta soğutma fonksiyonun belirlenmesidir. Bu tezde adaptif bir soğutma fonksiyonu olan ve Laarhoven ve Aarts (1987) tarafından önerilen, Eş. 5.4'de gösterilen yaklaşım kullanılmıştır.

$$T_{i+1} = T_i \cdot \left(1 + \frac{\ln(1+\delta) \cdot T_i}{3 \cdot \sigma(T_i)} \right)^{-1} \quad (5.4)$$

Eşitlikteki δ parametresi çok küçük bir sayıyı gösterirken (bu tezde 10^{-7} olarak alınmıştır), $\sigma(T_i)$, T_i sıcaklığında üretilen çözümlerin amaç fonksiyonu değerlerinin standart sapmasını belirtmektedir. Yapılan ön hesaplamalar neticesinde her sıcaklıkta aranacak olan komşuluk sayısı $7 \cdot n$ olarak tespit edilmiştir.

6. HESAPLAMA SONUÇLARI

Önerilen algoritmalar ile matematiksel modellerin etkinliğini ölçmek amacıyla literatürde bulunan bazı problem örnekleri kullanılmıştır. 16 farklı öncelik diyagramına sahip problemler için istasyon sayıları değiştirilerek oluşturulan 287 problem örneği, her bir yöntem ile çözülmüştür. Test problemlerine ilişkin bilgilere <http://www.assembly-line-balancing.de> internet adresinden ulaşılabilmektedir.

Her bir probleme ait literatürde bulunan farklı modelleme yaklaşımları kullanılarak geliştirilen tamsayılı doğrusal programlama modelleri Intel I3 4 GB RAM'e sahip bilgisayarlarda, GAMS 22.25 paket programında bulunan Cplex 10.2 çözücüsünde 3600 saniye koşturulmuştur. GGA, TB ile Johnalagedda ve Dabade (2014) tarafından önerilen BGA ise C# programlama dilinde kodlanmış ve matematiksel modellerin çalıştırıldığı bilgisayarlarda her bir problem örneği için 5 kez n saniye süre ile koşturulmuştur. Algoritmaların en iyi çözümlere ne kadar yakınsadığını belirlemek amacıyla Scholl (1999) tarafından önerilen ve Eş. 6.1'de sunulan alt sınır değerleri kullanılmıştır.

$$THL = \max\{t_{\max}, \lceil t_{\text{sum}} / m \rceil\} \quad (6.1)$$

Bu eşitlikte $t_{\max}$ görev süreleri dikkate alındığında en büyük süreyi gösterirken, t_{sum} görev süreleri toplamını ve m açılacak olan maksimum istasyon sayısını belirtmektedir. Alt sınır değerleri ile bulunan sonuçlar arasındaki farkları belirlemek için sapma değerleri Eş. 6.2 ile hesaplanmıştır.

$$\% \text{ gap} = 100 \cdot (c - THL) / THL \quad (6.2)$$

Bu eşitlikte c ilgili çözümde bulunan çevrim süresini belirtmektedir. Koşturumlar neticesinde her bir örnek için elde edilen sonuçlar Ekler bölümünde $\% \text{ gap}$ değerleri ile birlikte sunulmuştur. Sonuçlar özetlenerek her bir problem grubu için, toplam örnek sayısı, ortalama CPU süresi ve $\% \text{ gap}$ değerinin ortalaması Çizelge 6.1'de verilmiştir

Çizelge 6.1. Hesaplama sonuçlarının özetlenmesi

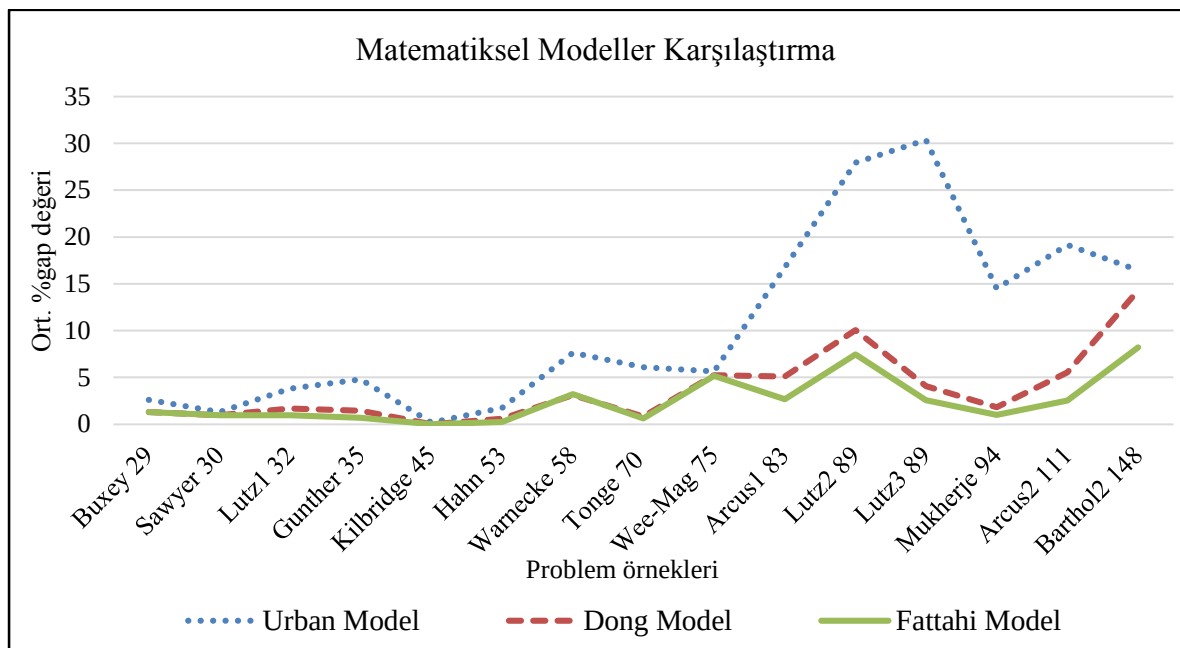
Öncelik Diyagramı	n	# Örnek Sayısı	Urban Model		Dong Model		Fattahi Model		BGA		TB		GGA	
			Ort. %gap	Ort. CPU	Ort. %gap	Ort. CPU	Ort. %gap	Ort. CPU	Ort. %gap		Ort. %gap		Ort. %gap	
									Ort. Çözüm	En İyi Çözüm	Ort. Çözüm	En İyi Çözüm	Ort. Çözüm	En İyi Çözüm
Buxey	29	8	2,61	2267	<u>1,31</u>	1591	<u>1,31</u>	1352	5,3	4,14	1,39	1,31	1,69	1,31
Sawyer	30	8	1,31	2283	<u>0,96</u>	957	<u>0,96</u>	934	5,32	4,68	1,31	1,31	1,31	1,31
Lutz1	32	5	3,8	2181	1,68	2160	<u>0,97</u>	2160	11,44	11,09	6,15	4,07	1,08	0,93
Gunther	35	10	4,79	2553	1,44	1108	0,68	1120	15,3	15,12	0,47	0,47	<u>0,31</u>	0,23
Kilbridge	45	7	0,16	411	0	29	0	1	1,52	1	0	0	0,064	0
Hahn	53	8	1,75	2405	0,59	2286	<u>0,26</u>	2572	8,39	8,22	3,44	1,28	0,46	0,43
Warnecke	58	27	7,63	3414	3,12	3227	3,22	2831	17,38	15,59	<u>2,12</u>	1,74	2,81	1,74
Tonge	70	23	6,08	3168	0,81	2510	<u>0,62</u>	2173	17,63	15,42	2,18	0,88	0,82	0,55
Wee-Mag	75	28	5,65	2467	5,23	2593	5,16	2349	18,94	16,93	<u>4,24</u>	4,08	4,7	4,41
Arcus1	83	20	16,77	2448	5,1	3479	2,67	3420	23,82	21,2	4,3	3,14	<u>1,35</u>	1,03
Lutz2	89	20	27,95	3420	10,05	3093	7,47	2768	58,07	50,5	<u>0,62</u>	0,46	0,83	0,73
Lutz3	89	21	30,38	3086	4,07	3429	2,58	3096	28,3	23,6	<u>0,76</u>	0,63	1,1	0,63
Mukherje	94	24	14,49	3156	1,82	3049	0,98	2636	15,97	14,98	2,22	0,72	<u>0,64</u>	0,45
Arcus2	111	25	19,16	3329	5,53	3378	2,53	2937	29,36	20,33	6,22	4,05	<u>0,79</u>	0,49
Barthol2	148	25	16,45	3600	14,31	3600	8,2	3600	89,35	84,45	2,55	1,93	<u>3,42</u>	2,86
Scholl	297	28	298,31	3600	145,35	3600	9,21	3600	104,19	93,56	5,35	3,95	<u>2,38</u>	2,04

Koyu yazılar sezgisel algoritmaların en küçük sonuçları dikkate alındığında en iyi değerleri göstermektedir.

Altı çizgili yazılar sezgisel algoritmaların ortalama sonuçları dikkate alındığında en iyi değerleri göstermektedir.

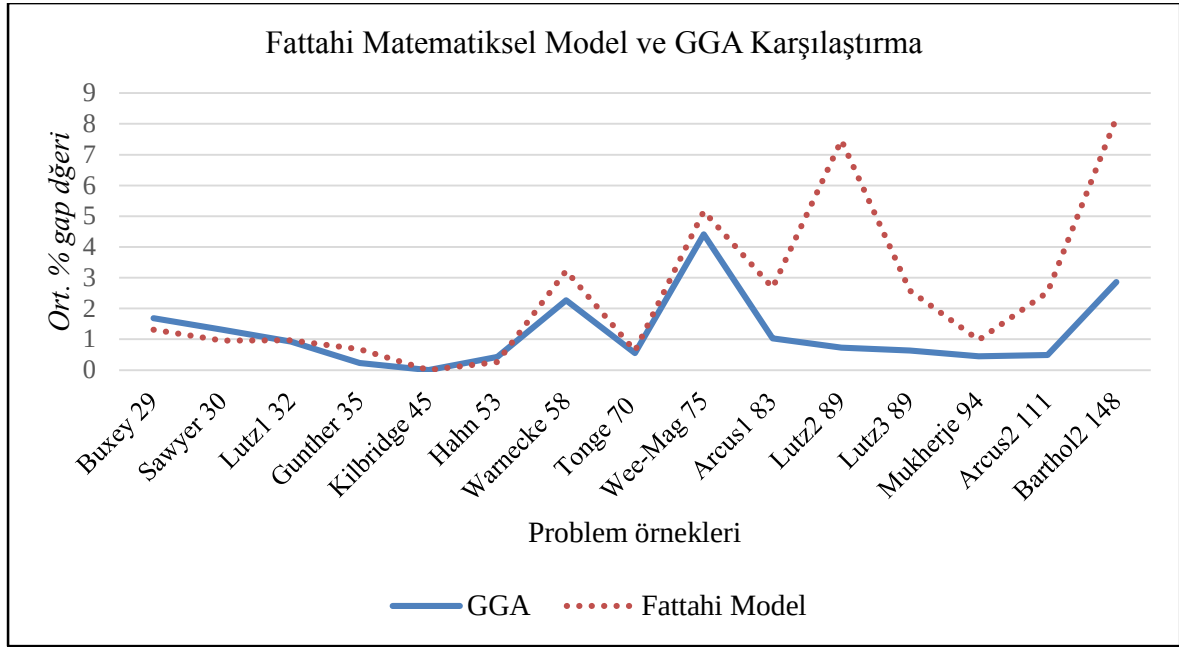
Çizelge 6.1'nin ilk satırında Buxey problemine ilişkin 8 örnek olduğu ve bu örneklerin Urban tarafından önerilen matematiksel modelle ortalama 2267 saniyede ve ortalama 2,61 % *gap* değeri ile çözüldüğü görülmektedir. Dong tarafından önerilen matematiksel modelleme yaklaşımı ile aynı problem örneklerinin ortalama 1591 saniyede ve ortalama 1,31 % *gap* değeri ile çözüldüğü görülmektedir. Fattahi tarafından önerilen yaklaşımla ise aynı problem örnekleri ortalama 1352 saniyede ve ortalama 1,31 % *gap* değeri ile çözülmüştür. 5 deneme sonucu elde edilen çözümlerin ortalamaları alındığında, BGA'nın Buxey problem örneklerini ortalama 5,3 % *gap* değeri ile çözdüğü belirlenirken, en iyileri alındığında ise ortalama % *gap* değerinin 4,14 olduğu görülmektedir. Buxey problemi için sezgisel algoritmalarda 5 deneme neticesinde elde edilen sonuçların en iyileri dikkate alındığında, etkili yöntemlerin TB, GGA, Dong ve Fattahi'nin geliştirdiği matematiksel model yaklaşımlarının olduğu tespit edilirken, sezgisel yöntemlerin ortalama değerleri dikkate alındığında en iyi performansı belirtilen matematiksel modellerin sergilediği görülmektedir. Ancak diğer taraftan CPU süreleri incelendiğinde TB ve GGA'nın ortalama CPU süreleri görev sayısına eşit olup (29 saniye), matematiksel modellere kıyasla çok düşüktür.

Çizelge 6.1 incelendiğinde geliştirilen matematiksel modeller içerisinde, Fattahi tarafından önerilen yaklaşımın, diğer matematiksel modellere genellikle üstünlük sağladığı görülmektedir. Kesin çözüm yöntemine dayanan matematiksel modellerin problem boyutlarına göre performansları karşılaştırmalı olarak Şekil 6.1'de sunulmuştur.



Şekil 6.1. Matematiksel modellerin karşılaştırılması

Küçük ölçekli problemler için sezgisel yöntemler dikkate alındığında, BGA dışında diğer sezgisel yöntemler tarafından üretilen sonuçların kabul edilebilir çözüm kalitesine sahip olduğu görülmektedir. Bununla birlikte 53 göreve kadar olan problem örneklerinde Fattahi tarafından önerilen matematiksel model yaklaşımının sezgisel yöntemlere üstünlük sağlayabildiği tespit edilmiştir. Ancak matematiksel model görev sayısındaki artışa bağlı olarak etkinliğini kaybederken, GGA problem boyutu artsa dahi kısa sürede kabul edilebilir çözümlere ulaşabilmektedir. CPU süreleri de dikkate alındığında GGA'nın Fattahi tarafından önerilen matematiksel modele kıyasla daha etkin olduğu görülmektedir. Fattahi tarafından önerilen matematiksel model ve GGA ile elde edilen en iyi sonuçların karşılaştırılması Şekil 6.2'de sunulmuştur.



Şekil 6.2. GGA ile Fattahi matematiksel modelinin performanslarının karşılaştırılması

Küçük boyutlu problem örneklerinin belirtilen matematiksel model aracılığıyla çözülmesi uygun olmakla birlikte, GGA'nın tüm problem örneklerinde diğer yöntemlere kıyasla gerek süre açısından, gerekse de çözüm kalitesi açısından daha avantajlı olduğu söylenebilir. Diğer taraftan Johnalagedda ve Dabade (2014) tarafından geliştirilen BGA, hiçbir problem grubunda diğer yöntemlere üstünlük sağlayamamış olup, çözüm kalitesi açısından yetersiz olduğu görülmektedir.

Sezgisel yöntemler için 5 deneme sonucunda elde edilen en iyi sonuçlar ve matematiksel model sonuçları dikkate alınarak oluşturulan genel karşılaştırma Çizelge 6.2’de sunulmuştur. Tüm problem örnekleri ele alındığında, Urban (1998) tarafından önerilen matematiksel modelin hem CPU süresi en yüksek hem de ortalama % *gap* değerinde en kötü performansı sergilediği görülmektedir. Ayrıca belirtilen yöntem ile 17 problem örneğinde 3600 saniye içerisinde uygun bir çözüm bulunamamıştır. Fattahi (2014) tarafından önerilen matematiksel model yaklaşımı sezgisel yöntemlere kıyasla daha uzun CPU süresine sahip olmakla birlikte, diğer matematiksel modellere kıyasla iyi bir ortalama % *gap* değeri ile örnekleri çözebilmiştir. Ancak çok sayıda (28) problem örneğinde uygun çözümü bulamamıştır.

Çizelge 6.2. Genel karşılaştırma tablosu

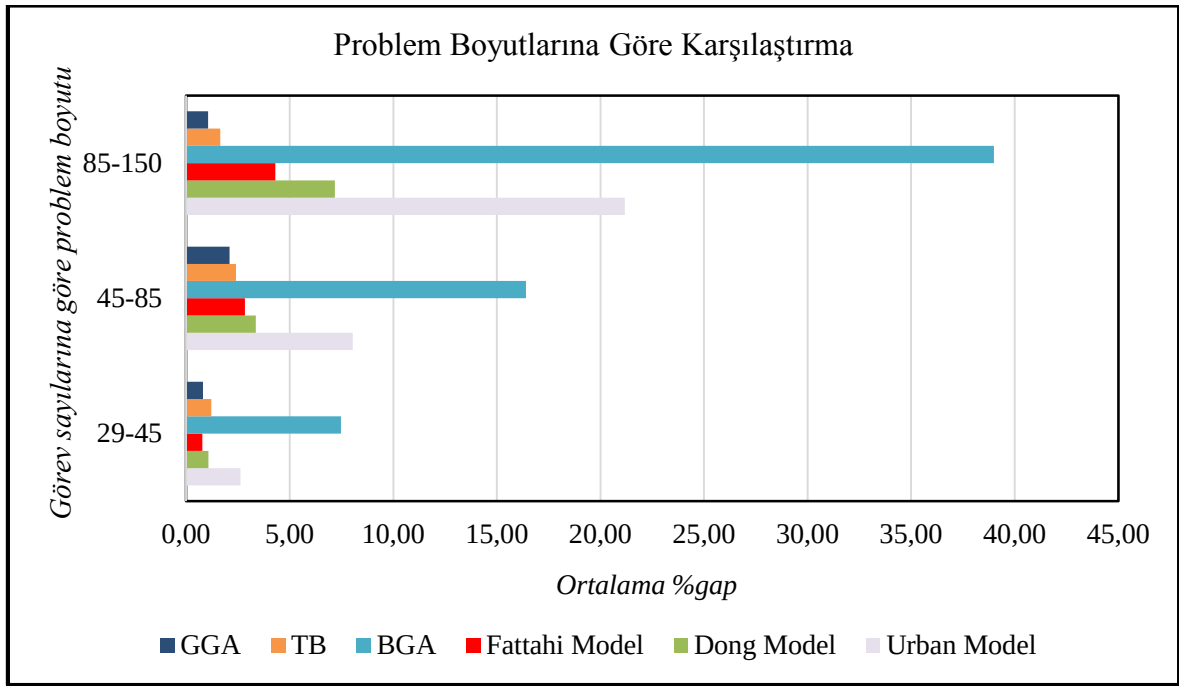
	Urban Model	Dong Model	Fattahi Model	BGA	TB	GGA
Ortalama % <i>gap</i>	40,91	14,31	3,20	31,80	2,092	1,505
Ortalama CPU süresi	3000	2872	2892	102,28	102,28	102,28
Optimal çözüm bulunan örnek sayısı	51	63	84	15 ^a	80 ^a	94 ^a
Uygun çözüm bulunan örnek sayısı	219	215	175	272	207	193
Çözüm bulunamayan örnek sayısı	17	9	28	0	0	0

^aÇevrim süresi alt sınıra ya da matematiksel model tarafından optimal olduğu ispatlanan çevrim süresine eşit olan çözümler

Sezgisel yöntemler için ortalama CPU süresi 102,28 olarak gerçekleşirken, çözüm kalitesi ele alındığında en iyi performansı 1,505 % *gap* değeri ile GGA sergilemiştir. TB algoritmasının ise GGA’dan daha iyi olmamakla birlikte, etkin bir yöntem olduğu söylenebilmektedir. Diğer yöntemler ile kıyaslandığında BGA’nın yeterince kaliteli çözümler üretilmediği tespit edilmiştir.

Yöntemlerin optimal sonuçlara ulaşabilme performansları ele alındığında ise yine 287 problem örneğinden 94’ünü (%33) optimal olarak çözen GGA’nın en iyi performansı sergilediği görülmektedir. Fattahi tarafından önerilen yaklaşım ile örneklerin 84’ü (%29) optimal olarak çözülebilmektedir. TB yöntemi ile elde edilen optimal çözüm sayısı 80’de (%28) kalırken, Dong tarafından önerilen matematiksel modelleme yaklaşımı ile 63 (%22) örnekte optimal çözüme ulaşılabilmiştir. Sadece 15 örneği optimal olarak çözebilen BGA, karşılaştırılan yöntemler içerisindeki en kötü performansı sergilemiştir.

Önerilen yöntemlerin problem boyutlarına göre değişkenlik gösteren performansları Şekil 6.3’de sunulmuştur. Problem boyutlarına göre sonuçlar incelendiğinde 29-45 görevli problem örneklerinde, TB, GGA, Fattahi (2014) ve Dong (2014) matematiksel model yaklaşımlarının kabul edilebilir çözüm kalitesine sahip olduğu görülmektedir. Ancak büyük ölçekli (85-150 görevli) problem örneklerinde matematiksel modeller etkinliğini kaybederken, GGA en iyi performansı sergilemektedir. Sonuç olarak gerek süre açısından, gerekse de çözüm kalitesi açısından en iyi yöntemin GGA olduğu görülmekle birlikte, tek çözüme dayalı TB’nin de etkili bir yöntem olduğu söylenebilir.



Şekil 6.3. Önerilen yöntemlerin problem boyutlarına göre karşılaştırılması

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

İşletmelerin karlılığı açısından önemli bir yere sahip olan üretim oranının artırılması, gerçek hayat uygulamalarında sıklıkla karşılaşılan bir problem olarak ortaya çıkmaktadır. İşletmelerin faaliyet alanı ve üretim sistemlerine göre üretim oranını artırmanın yolları farklılık göstermekle birlikte, U tipi montaj hatlarında çevrim süresinin minimizasyonu ile bu amaca ulaşılabilmektedir. Tam zamanında üretim sistemlerinde sıklıkla kullanılan U tipi montaj hatlarında üretim oranının artırılması amacı UMHDP-II'yi ortaya çıkarmaktadır. Oldukça geniş olan montaj hattı literatüründe UMHDP-II ile ilgili az sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu tez çalışması kapsamında da UMHDP-II ile ilgili yeni çözüm yaklaşımları geliştirilmiş ve literatürde bulunan yöntemler ile karşılaştırılmıştır. Bu kapsamda farklı modelleme yaklaşımları kullanılarak geliştirilen 3 farklı matematiksel model sunulmuştur. Ancak NP-zor bir yapıya sahip olan problemleri kesin çözüm yöntemlerini kullanarak çözmenin uzun süreler gerektirebileceği bilinmektedir. Küçük boyutlu örneklerde matematiksel modeller etkili olsa da, orta ve büyük boyutlu problem örneklerinde modeller etkinliğini kaybetmektedir. Bu nedenle orta ve büyük boyutlu problemlerin çözümüne yönelik olarak grup genetik algoritma ve tavlama benzetimine dayalı iki farklı sezgisel algoritma geliştirilmiştir. Literatürde bulunan bazı test problemleri her bir yöntem ile ayrı ayrı çözülerek sonuçlar karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma işlemi grup genetik algoritmanın diğer çözüm yöntemlerine kıyasla daha etkili olduğunu göstermiştir.

Gelecek çalışmalarda belirtilen problem için evrimsel ve tabu arama gibi farklı sezgisel yöntemler geliştirilebilir. Gerçek hayat uygulamalarında görev sürelerinin stokastik bir davranış sergileyebildiği bilinmekte olup, stokastik UMHDP-II probleminin çözümüne yönelik yeni yaklaşımlar sunulabilir. Ayrıca önerilen yöntemler geliştirilerek bölgeleme gibi ilave bazı kısıtlar içeren UMHDP-II'ye uygulanabilir bir hale getirilebilir.

KAYNAKLAR

1. Aase, G. R., Olson, J. R., & Schniederjans, M. J. (2004). U-shaped assembly line layouts and their impact on labor productivity: An experimental study. *European Journal of Operational Research*, 156(3), 698-711.
2. Ağpak, K., Yegül, M. F., & Gökçen, H. (2012). Two-sided U-type assembly line balancing problem. *International Journal of Production Research*, 50(18), 5035-5047.
3. Ağpak, K. & Gökçen, H. (2002). Basit U Tipi Montaj Hattı Dengeleme Problemine Bulanık Programlama Yaklaşımı. *DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi* 4: 2, 29-40.
4. Ajenblit, D. A. & Wainwright, R. L. (1998, Mayıs). Applying genetic algorithms to the U-shaped assembly line balancing problem. *Evolutionary Computation Proceedings, 1998. IEEE World Congress on Computational Intelligence. The 1998 IEEE International Conference*, 96-101.
5. Alagheband, S. A., Ghomi, S. F., & Zandieh, M. (2011). A simulated annealing algorithm for balancing the assembly line type II problem with sequence-dependent setup times between tasks. *International Journal of Production Research*, 49(3), 805-825.
6. Alavidoost, M. H., Tarimoradi, M., & Zarandi, M. F. (2015). Fuzzy adaptive genetic algorithm for multi-objective assembly line balancing problems. *Applied Soft Computing*, 34, 655-677.
7. Arroyo, J. E. C., & Armentano, V. A. (2005). Genetic local search for multi-objective flow shop scheduling problems. *European Journal of Operational Research*, 167(3), 717-738.
8. Avikal, S., Jain, R., Mishra, P. K. & Yadav, H. C. (2013). A heuristic approach for U-shaped assembly line balancing to improve labor productivity. *Computers & Industrial Engineering*, 64(4), 895-901.
9. Bagher, M., Zandieh, M. & Farsijani, H. (2011). Balancing of stochastic U-type assembly lines: an imperialist competitive algorithm. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 54(1-4), 271-285.
10. Baykasoğlu, A. & Özbakır, L. (2007). Stochastic U-line balancing using genetic algorithms. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 32(1-2), 139-147.
11. Becker, C. & Scholl, A. (2006). A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing. *European Journal of Operational Research*, 168(3), 694-715.

12. Borba, L. & Ritt, M. (2014). A heuristic and a branch-and-bound algorithm for the Assembly Line Worker Assignment and Balancing Problem. *Computers & Operations Research*, 45, 87-96.
13. Chiang, W. C. & Urban, T. L. (2006). The stochastic U-line balancing problem: A heuristic procedure. *European Journal of Operational Research*, 175(3), 1767-1781.
14. Coley, D. A. (1999). *An introduction to genetic algorithms for scientists and engineers*. World Scientific.
15. De Lit, P., Falkenauer, E. & Delchambre, A. (2000). Grouping genetic algorithms: an efficient method to solve the cell formation problem. *Mathematics and Computers in Simulation*, 51(3), 257-271.
16. Dijkstra, E. W. (1959). A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematik*, 1(1), 269-271.
17. Dong, J., Zhang, L., Xiao, T. & Mao, H. (2014). Balancing and sequencing of stochastic mixed-model assembly U-lines to minimise the expectation of work overload time. *International Journal of Production Research*, 52(24), 7529-7548.
18. Erel, E., Sabuncuoglu, I. & Aksu, B. A. (2001). Balancing of U-type assembly systems using simulated annealing. *International Journal of Production Research*, 39(13), 3003-3015.
19. Erel, E. & Sarin, S.C. (1998). A survey of the assembly line balancing procedures. *Production Planning & Control*, 9(5), 414-434.
20. Falkenauer, E. (1996). A hybrid grouping genetic algorithm for bin packing. *Journal of Heuristics*, 2(1), 5-30.
21. Fattahi, A., Elaoud, S., Sadeqi Azer, E. & Turkay, M. (2014). A novel integer programming formulation with logic cuts for the U-shaped assembly line balancing problem. *International Journal of Production Research*, 52(5), 1318-1333.
22. Gen, M. & Cheng, R. (2000). *Genetic algorithms and engineering optimization* (7). John Wiley & Sons.
23. Goldberg, David E. (1989). *Genetic Algorithms in Search, Optimization & Machine Learning*, Addison-Wesley Publishing Company, Inc.
24. Goldberg, D. E. & Deb, K. (1991). A comparative analysis of selection schemes used in genetic algorithms. *Foundations of Genetic Algorithms*, 1, 69-93.
25. Gökçen, H., Ağpak, K. & Benzer, R. (2006). Balancing Parallel Assembly Lines. *International Journal of Production Economics* 103(2), 600-609.

26. Gökçen, H. & Ağpak, K. (2006). A goal programming approach to simple U-line balancing problem. *European Journal of Operational Research*, 171(2), 577-585.
27. Gökçen, H., Ağpak, K., Gencer, C. & Kizilkaya, E. (2005). A shortest route formulation of simple U-type assembly line balancing problem. *Applied Mathematical Modelling*, 29(4), 373-380.
28. Gutjahr, A. L. & Nemhauser, G. L. (1964). An algorithm for the line balancing problem. *Management Science*, 11(2), 308-315.
29. Holland, J. H. (1975). *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. University of Michigan Press, Ann Arbor.
30. Hwang, R. K., Katayama, H. & Gen, M. (2008). U-shaped assembly line balancing problem with genetic algorithm. *International Journal of Production Research*, 46(16), 4637-4649.
31. Jayaswal, S. & Agarwal, P. (2014). Balancing U-shaped assembly lines with resource dependent task times: A Simulated Annealing approach. *Journal of Manufacturing Systems*, 33(4), 522-534.
32. Jonnalagedda, V. & Dabade, B. (2014). Application of Simple Genetic Algorithm to U-Shaped Assembly Line Balancing Problem of Type II. *IFAC World Congress*, 19(1), 6168-6173).
33. Kara, Y., Paksoy, T. & Chang, C. T. (2009). Binary fuzzy goal programming approach to single model straight and U-shaped assembly line balancing. *European Journal of Operational Research*, 195(2), 335-347.
34. Kara, Y. & Tekin, M. (2009). A mixed integer linear programming formulation for optimal balancing of mixed-model U-lines. *International Journal of Production Research*, 47(15), 4201-4233.
35. Kellegöz, T. & Toklu, B. (2012). An efficient branch and bound algorithm for assembly line balancing problems with parallel multi-manned workstations. *Computers & Operations Research*, 39(12), 3344-3360.
36. Kilincci, O. (2010). A Petri net-based heuristic for simple assembly line balancing problem of type 2. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 46(1-4), 329-338.
37. Kim, Y. K., Song, W. S. & Kim, J. H. (2009). A mathematical model and a genetic algorithm for two-sided assembly line balancing. *Computers & Operations Research*, 36(3), 853-865.
38. Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D. & Vecchi, M. P. (1983). Optimization by simulated annealing. *science*, 220(4598), 671-680.

39. Klein, R. & Scholl, A. (1996). Maximizing the production rate in simple assembly line balancing a branch and bound procedure. *European Journal of Operational Research*, 91(2), 367-385.
40. Kucukkoc, I. & Zhang, D. Z. (2015). Balancing of parallel U-shaped assembly lines. *Computers & Operations Research*, 64, 233-244.
41. Laarhoven, V., P. J. & Aarts, E. H. (1987). *Simulated annealing*, Springer Netherlands 7-15.
42. MacLeod, C. (2010). An Introduction to Practical Neural Networks and Genetic Algorithms For Engineers and Scientists, 85-95.
43. Manavizadeh, N., Rabbani, M. & Radmehr, F. (2015). A new multi-objective approach in order to balancing and sequencing U-shaped mixed model assembly line problem: a proposed heuristic algorithm. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 79(1-4), 415-425.
44. Martínez-Rangel, M. G., Cruz-Chávez, M. A., Zavala-Díaz, J. C., Juárez-Romero, D. & Díaz-Parra, O. (2007). Analysis of the simulated annealing convergence in function of the standard deviation and the boltzmann quotient for scheduling problems 1. *Research in Computing Science, IPN, ISSN*, 4069, 282-293.
45. Metropolis, N., Rosenbluth, A. W., Rosenbluth, M. N., Teller, A. H. & Teller, E. (1953). Equation of state calculations by fast computing machines. *The journal of chemical physics*, 21(6), 1087-1092.
46. Miltenburg, J. (1998). Balancing U-lines in a multiple U-line facility. *European Journal of Operational Research*, 109(1), 1-23
47. Miltenburg, J. (2001). U-shaped production lines: A review of theory and practice. *International Journal of Production Economics*, 70(3), 201-214.
48. Miltenburg, G. J. & Wijngaard, J. (1994). The U-line line balancing problem. *Management science*, 40(10), 1378-1388.
49. Mutlu, Ö., Polat, O. & Supciller, A. A. (2013). An iterative genetic algorithm for the assembly line worker assignment and balancing problem of type-II. *Computers & Operations Research*, 40(1), 418-426.
50. Nearchou, A. C. (2007). Balancing large assembly lines by a new heuristic based on differential evolution method. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 34(9-10), 1016-1029.
51. Nourani, Y. & Andresen, B. (1998). A comparison of simulated annealing cooling strategies. *Journal of Physics A: Mathematical and General*, 31(41), 8373-8385.

52. Özcan, U. (2006). *Çift Taraflı Montaj Hattı Dengeleme Problemleri İçin Yeni Çözüm Önerileri*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1-1.
53. Özcan, U., Kellegöz, T. & Toklu, B. (2011). A genetic algorithm for the stochastic mixed-model U-line balancing and sequencing problem. *International Journal of Production Research*, 49(6), 1605-1626.
54. Paksoy, S. & Uzun, A. (2008). Genetik algoritma ile kaynak kısıtlı proje çizelgeleme. *Ç.Ü. Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 17(2), 345-362.
55. Polat, O. (2008). *Montaj Hattı İşçi Atama ve Dengeleme Problemlerinin Genetik Algoritmalarla Çözülmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli, 1-149.
56. Purnomo, H. D. & Wee, H. M. (2014). Maximizing production rate and workload balancing in a two-sided assembly line using Harmony Search. *Computers & Industrial Engineering*, 76, 222-230.
57. Rabbani, M., Kazemi, S. M. & Manavizadeh, N. (2012). Mixed model U-line balancing type-I problem: A new approach. *Journal of Manufacturing Systems*, 31(2), 131-138.
58. Roeva, O., Fidanova, S. & Paprzycki, M. (2013). Influence of the population size on the genetic algorithm performance in case of cultivation process modelling. *In Computer Science and Information Systems (FedCSIS), 2013 Federated Conference on*, 371-376.
59. Sabuncuoglu, I., Erel, E. & Alp, A. (2009). Ant colony optimization for the single model U-type assembly line balancing problem. *International Journal of Production Economics*, 120(2), 287-300.
60. Saçlı, C., 2006, *Montaj Hattı Dengeleme Problemleri İçin Yeni Modeller ve Panel Mobilya Üreten İşletmelerde Uygulamalar*, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Konya, 11-18.
61. Salveson, M.E., (1955). The Assembly Line Balancing Problem. *The Journal of Industrial Engineering*, 6, 18-25.
62. Scholl, A. (Editörler). (1999). *Balancing and Sequencing of Assembly Lines*, New York: Physica-Verlag Heidelberg, 6-18.
63. Scholl, A. & Klein, R. (1999). ULINO: Optimally balancing U-shaped JIT assembly lines. *International Journal of Production Research*, 37(4), 721-736.
64. Schonberger, R.J., (1982). *Japanese Manufacturing Techniques: Nine Hidden Lessons in Simplicity*, The Free Press, New York.

65. Shewchuk, J. P., (2008). Worker allocation in lean U-shaped production lines. *International Journal of Production Research*, 46(13), 3485-3502.
66. Shimbun, N. K. (1991). *The Factory Management Notebook Series: Autonomation/Automation*. Productivity Press, Portland, OR.
67. Simopoulos, D. N., Kavatza, S. D. & Vournas, C. D. (2006). Unit commitment by an enhanced simulated annealing algorithm. *Power Systems, IEEE Transactions on*, 21(1), 68-76.
68. Spall, J. C. (2012). Stochastic optimization. In *Handbook of computational statistics. Springer Berlin Heidelberg*, 173-201.
69. Srinivas, M. & Patnaik, L. M. (1994). Genetic algorithms: A survey. *Computer*, 27(6), 17-26.
70. Syswerda, G., (1991). *Schedule Optimization Using Genetic Algorithms*, New York: Van Nostrand Reinhold.
71. Talbi, E. G. (2009). *Metaheuristics: from design to implementation* (74). John Wiley & Sons.
72. Toklu, B. & Özcan, U. (2008). A fuzzy goal programming model for the simple U-line balancing problem with multiple objectives. *Engineering Optimization*, 40(3), 191-204.
73. Tuzkaya, G., Gülsün, B. & Bildik, E., (2008). Reverse logistics network design: A simulated annealing approach. *Journal of Engineering and Natural Sciences*, 26(1), 68-80.
74. Urban, T. L. (1998). Note. Optimal balancing of U-shaped assembly lines. *Management Science*, 44(5), 738-741.
75. Yoosefelahi, A., Aminnayeri, M., Mosadegh, H. & Ardakani, H. D. (2012). Type II robotic assembly line balancing problem: An evolution strategies algorithm for a multi-objective model. *Journal of Manufacturing Systems*, 31(2), 139-151.
76. Zha, J. & Yu, J. J. (2014). A hybrid ant colony algorithm for U-line balancing and rebalancing in just-in-time production environment. *Journal of Manufacturing Systems*, 33(1), 93-102.

EKLER

EK-1. Test problemlerinin çözümünden elde edilen sonuçlar

			Urban Matematiksel Model			Dong Matematiksel Model			Fattahi Matematiksel Model			Basit Genetik Algoritma				Tavlaya Benzetimi				Grup Genetik Algoritma			
			Sonuç	% Gap		Sonuç	% Gap		Sonuç	% Gap		Ortalama Sonuç	% Gap	En İyi Sonuç	% Gap	Ortalama Sonuç	% Gap	En İyi Sonuç	% Gap	Ortalama Sonuç	% Gap	En İyi Sonuç	% Gap
Problem	n	Alt Sınır																					
Buxey	29	7	47*	0,00		47*	0,00		47*	0,00		47*	0,00	47*	0,00	47*	0,00	47*	0,00	47*	0,00	47*	0,00
Buxey	29	8	41*	0,00		41*	0,00		41*	0,00		42,0	2,44	42	2,44	41*	0,00	41*	0,00	41*	0,00	41*	0,00
Buxey	29	9	37	2,78		37	2,78		37	2,78		38,0	5,56	38	5,56	37,0	2,78	37	2,78	37,0	2,78	37	2,78
Buxey	29	10	33*	0,00		33*	0,00		33*	0,00		34,2	3,64	34	3,03	33,2	0,61	33*	0,00	34,0	3,03	34	3,03
Buxey	29	11	30*	0,00		30*	0,00		30*	0,00		32,0	6,67	32	6,67	30*	0,00	30*	0,00	30*	0,00	30*	0,00
Buxey	29	12	27	3,70		28	3,70		28	3,70		29,4	8,89	29	7,41	28,0	3,70	28	3,70	28,0	3,70	28	3,70
Buxey	29	13	26	4,00		26	4,00		26	4,00		27,8	11,20	27	8,00	26,0	4,00	26	4,00	26,0	4,00	26	4,00
Buxey	29	14	25*	0,00		25*	0,00		25*	0,00		26,0	4,00	25*	0,00	25*	0,00	25*	0,00	25*	0,00	25*	0,00
Sawyer	30	7	47*	0,00		47*	0,00		47*	0,00		47*	0,00	47*	0,00	47*	0,00	47*	0,00	47*	0,00	47*	0,00
Sawyer	30	8	41*	0,00		41*	0,00		41*	0,00		42,0	2,44	42	2,44	41*	0,00	41*	0,00	41*	0,00	41*	0,00
Sawyer	30	9	36*	0,00		36*	0,00		36*	0,00		38,0	5,56	38	5,56	37,0	2,78	37	2,78	37,0	2,78	37	2,78
Sawyer	30	10	33*	0,00		33*	0,00		33*	0,00		34,0	3,03	34	3,03	33*	0,00	33*	0,00	33*	0,00	33*	0,00
Sawyer	30	11	30*	0,00		30*	0,00		30*	0,00		31,8	6,00	31	3,33	30*	0,00	30*	0,00	30*	0,00	30*	0,00
Sawyer	30	12	28	3,70		28	3,70		28	3,70		30,0	11,11	30	11,11	28,0	3,70	28	3,70	28,0	3,70	28	3,70
Sawyer	30	13	26	4,00		26	4,00		26	4,00		27,6	10,40	27	8,00	26,0	4,00	26	4,00	26,0	4,00	26	4,00
Sawyer	30	14	25*	0,00		25*	0,00		25*	0,00		26,0	4,00	26	4,00	25*	0,00	25*	0,00	25*	0,00	25*	0,00
Lutz1	32	8	1782	0,79		1810	2,38		1782	0,79		1928,0	9,05	1926	8,94	1899,6	7,44	1858	5,09	1791,6	1,33	1788	1,13
Lutz1	32	9	1596	1,53		1620	3,05		1596	1,53		1808,4	15,04	1806	14,89	1738,8	10,61	1696	7,89	1596,0	1,53	1596	1,53
Lutz1	32	10	1450	2,55		1456	2,97		1450	2,55		1710,0	20,93	1710	20,93	1570,8	11,09	1518	7,36	1449,6	2,52	1442	1,98
Lutz1	32	11	1400*	0,00		1400*	0,00		1400*	0,00		1481,6	5,83	1474	5,29	1422,8	1,63	1400*	0,00	1400*	0,00	1400*	0,00
Lutz1	32	12	1400*	0,00		1400*	0,00		1400*	0,00		1489,2	6,37	1476	5,43	1400*	0,00	1400*	0,00	1400*	0,00	1400*	0,00
Gunther	35	6	81*	0,00		81*	0,00		81*	0,00		81*	0,00	81*	0,00	81*	0,00	81*	0,00	81*	0,00	81*	0,00
Gunther	35	7	69*	0,00		69*	0,00		69*	0,00		71,2	3,19	71	2,90	69*	0,00	69*	0,00	69,6	0,87	69*	0,00
Gunther	35	8	61*	0,00		63	3,28		61*	0,00		69,0	13,11	69	13,11	61*	0,00	61*	0,00	61*	0,00	61*	0,00
Gunther	35	9	54*	0,00		54*	0,00		54*	0,00		69,0	27,78	69	27,78	54*	0,00	54*	0,00	54*	0,00	54*	0,00
Gunther	35	10	50	2,04		50	2,04		50	2,04		69,0	40,82	69	40,82	49*	0,00	49*	0,00	49*	0,00	49*	0,00
Gunther	35	11	45	2,27		48	9,09		45	2,27		69,0	56,82	69	56,82	45,0	2,27	45	2,27	45,0	2,27	45	2,27
Gunther	35	12	42	2,44		41*	0,00		42	2,44		44,0	7,32	44	7,32	42,0	2,44	42	2,44	41*	0,00	41*	0,00
Gunther	35	13	40*	0,00		40*	0,00		40*	0,00		41,6	4,00	41	2,50	40*	0,00	40*	0,00	40*	0,00	40*	0,00
Gunther	35	14	40*	0,00		40*	0,00		40*	0,00		40*	0,00	40*	0,00	40*	0,00	40*	0,00	40*	0,00	40*	0,00
Gunther	35	15	40*	0,00		40*	0,00		40*	0,00		40*	0,00	40*	0,00	40*	0,00	40*	0,00	40*	0,00	40*	0,00
Kilbridge	45	3	184*	0,00		184*	0,00		184*	0,00		184*	0,00	184*	0,00	184*	0,00	184*	0,00	184*	0,00	184*	0,00
Kilbridge	45	4	138*	0,00		138*	0,00		138*	0,00		138*	0,00	138*	0,00	138*	0,00	138*	0,00	138*	0,00	138*	0,00
Kilbridge	45	5	111*	0,00		111*	0,00		111*	0,00		111*	0,00	111*	0,00	111*	0,00	111*	0,00	111*	0,00	111*	0,00
Kilbridge	45	6	92*	0,00		92*	0,00		92*	0,00		93,0	1,09	93	1,09	92*	0,00	92*	0,00	92*	0,00	92*	0,00

EK-1.(devam) Test problemlerinin çözümünden elde edilen sonuçlar

Problem			Urban Matematiksel Model			Dong Matematiksel Model			Fattahi Matematiksel Model			Basit Genetik Algoritma				Tavlama Benzetimi				Grup Genetik Algoritma			
			Sonuç	% Gap		Sonuç	% Gap		Sonuç	% Gap		Ortalama Sonuç	% Gap	En İyi Sonuç	% Gap	Ortalama Sonuç	% Gap	En İyi Sonuç	% Gap	Ortalama Sonuç	% Gap	En İyi Sonuç	% Gap
Kilbridge	45	7	79*	0,00		79*	0,00		79*	0,00		80,2	1,52	80	1,27	79*	0,00	79*	0,00	79*	0,00	79*	0,00
Kilbridge	45	8	69*	0,00		69*	0,00		69*	0,00		71,2	3,19	70	1,45	69*	0,00	69*	0,00	69,4	0,58	69*	0,00
Kilbridge	45	9	62*	0,00		62*	0,00		62*	0,00		63,8	2,90	63	1,61	62*	0,00	62*	0,00	62*	0,00	62*	0,00
Kilbridge	45	10	56*	0,00		56*	0,00		56*	0,00		58,8	5,00	58	3,57	56*	0,00	56*	0,00	56*	0,00	56*	0,00
Kilbridge	45	11	55*	0,00		55*	0,00		55*	0,00		55*	0,00	55*	0,00	55*	0,00	55*	0,00	55*	0,00	55*	0,00
Hahn	53	3	4676*	0,00		4676*	0,00		4676*	0,00		4676,2	0,00	4676*	0,00	4676*	0,00	4683	0,15	4676*	0,00	4676*	0,00
Hahn	53	4	3508	0,03		3508	0,03		3508	0,03		3754,4	7,05	3754	7,04	3565,8	1,68	3538	0,88	3508,0	0,03	3508	0,03
Hahn	53	5	2808	0,07		2824	0,64		2808	0,07		2829,4	0,83	2829	0,82	2863,4	2,05	2834	1,00	2812,2	0,22	2811	0,18
Hahn	53	6	2353	0,64		2355	0,73		2353	0,64		2355,0	0,73	2352	0,60	2516,0	7,61	2416	3,34	2341,0	0,13	2339	0,04
Hahn	53	7	2004	0,35		2012	0,40		2011	0,35		2214,4	10,50	2201	9,83	2104,4	5,01	2030	1,30	2011,2	0,36	2009	0,25
Hahn	53	8	1775	0,96		1827	2,93		1792	0,96		2065,6	16,37	2056	15,83	1946,4	9,66	1839	3,61	1827,0	2,93	1827	2,93
Hahn	53	9	1775*	0,00		1775*	0,00		1775*	0,00		2056,0	15,83	2056	15,83	1795,8	1,17	1775*	0,00	1775*	0,00	1775*	0,00
Hahn	53	10	1775*	0,00		1775*	0,00		1775*	0,00		2056,0	15,83	2056	15,83	1775*	0,00	1775*	0,00	1775*	0,00	1775*	0,00
Warnecke	58	3	516*	0,00		516*	0,00		516*	0,00		522,0	1,16	522	1,16	517,4	0,27	517	0,19	516*	0,00	516*	0,00
Warnecke	58	4	387*	0,00		387*	0,00		387*	0,00		390,0	0,78	390	0,78	388,2	0,31	387*	0,00	387*	0,00	387*	0,00
Warnecke	58	5	310*	0,00		310*	0,00		310*	0,00		311,0	0,32	311	0,32	310,2	0,06	310*	0,00	310*	0,00	310*	0,00
Warnecke	58	6	258*	0,00		259	0,39		258*	0,00		260,4	0,93	259	0,39	258,4	0,16	258*	0,00	258,8	0,31	258*	0,00
Warnecke	58	7	222*	0,00		223	0,45		222*	0,00		224,8	1,26	224	0,90	222*	0,00	222*	0,00	222*	0,00	222*	0,00
Warnecke	58	8	195	0,52		195	0,52		195	0,52		199,0	2,58	198	2,06	194*	0,00	194*	0,00	195,0	0,52	195	0,52
Warnecke	58	9	-	-		173	0,58		-	-		179,8	4,53	179	4,07	173,0	0,58	173	0,58	173,4	0,81	173	0,58
Warnecke	58	10	156	0,65		156	0,65		156	0,65		163,0	5,16	162	4,52	156,0	0,65	156	0,65	156,0	0,65	156	0,65
Warnecke	58	11	141*	0,00		142	0,71		141*	0,00		151,2	7,23	149	5,67	142,0	0,71	142	0,71	142,2	0,85	142	0,71
Warnecke	58	12	131	1,55		132	2,33		131	1,55		139,4	8,06	137	6,20	130,4	1,09	130	0,78	131,0	1,55	131	1,55
Warnecke	58	13	121	0,83		121	0,83		121	0,83		129,4	7,83	129	7,50	121,0	0,83	121	0,83	121,0	0,83	121	0,83
Warnecke	58	14	112	0,90		115	3,60		112	0,90		124,4	12,07	122	9,91	112,0	0,90	112	0,90	113,0	1,80	112	0,90
Warnecke	58	15	106	1,92		106	1,92		106	1,92		118,2	13,65	116	11,54	105,0	0,96	105	0,96	105,6	1,54	105	0,96
Warnecke	58	16	99	2,06		100	3,09		99	2,06		111,2	14,64	106	9,28	99,0	2,06	99	2,06	99,0	2,06	99	2,06
Warnecke	58	17	96	4,35		94	2,17		96	4,35		108,2	17,61	107	16,30	93,8	1,96	93	1,09	94,0	2,17	94	2,17
Warnecke	58	18	87	1,16		88	2,33		87	1,16		104,0	20,93	103	19,77	88,0	2,33	88	2,33	88,8	3,26	88	2,33
Warnecke	58	19	85	3,66		85	3,66		85	3,66		99,8	21,71	98	19,51	84,6	3,17	84	2,44	84,8	3,41	84	2,44
Warnecke	58	20	80	2,56		81	3,85		80	2,56		96,8	24,10	96	23,08	79,4	1,79	79	1,28	80,8	3,59	80	2,56
Warnecke	58	21	77	4,05		76	2,70		77	4,05		93,6	26,49	91	22,97	76,2	2,97	76	2,70	77,2	4,32	77	4,05
Warnecke	58	22	74	4,23		74	4,23		74	4,23		91,4	28,73	87	22,54	73,4	3,38	73	2,82	75,0	5,63	75	5,63
Warnecke	58	23	72	5,88		71	4,41		72	5,88		87,2	28,24	85	25,00	70,2	3,24	70	2,94	71,6	5,29	70	2,94
Warnecke	58	24	68	4,62		68	4,62		68	4,62		86,2	32,62	85	30,77	67,0	3,08	67	3,08	68,2	4,92	67	3,08

EK-1.(devam) Test problemlerinin çözümünden elde edilen sonuçlar

Problem			Urban Matematiksel Model		Dong Matematiksel Model		Fattahi Matematiksel Model		Basit Genetik Algoritma				Tavlama Benzetimi				Grup Genetik Algoritma			
			Sonuç	% Gap	Sonuç	% Gap	Sonuç	% Gap	Ortalama Sonuç	% Gap	En İyi Sonuç	% Gap	Ortalama Sonuç	% Gap	En İyi Sonuç	% Gap	Ortalama Sonuç	% Gap	En İyi Sonuç	% Gap
Alt Smir	n	m	68	9,68	67	8,06	68	9,68	82,4	32,90	81	30,65	65,4	5,48	65	4,84	66,6	7,42	66	6,45
Warnecke	58	25	62	11,67	66	10,00	67	11,67	82,4	37,33	80	33,33	63,8	6,33	63	5,00	64,4	7,33	64	6,67
Warnecke	58	26	60	5,17	62	6,90	61	5,17	79,4	36,90	78	34,48	60,8	4,83	60	3,45	61,6	6,21	61	5,17
Warnecke	58	27	58	8,93	62	10,71	61	8,93	78,0	39,29	77	37,50	58,8	5,00	58	3,57	58,8	5,00	58	3,57
Warnecke	58	28	56	9,26	57	5,56	59	9,26	76,8	42,22	76	40,74	56,8	5,19	56	3,70	57,4	6,30	57	5,56
Tonge	70	3	1170	0,00	1170*	0,00	1170*	0,00	1326,0	13,33	1326	13,33	1172,6	0,22	1171	0,09	1170*	0,00	1170*	0,00
Tonge	70	4	878	0,00	878*	0,00	878*	0,00	897,0	2,16	897	2,16	881,8	0,43	881	0,34	878*	0,00	878*	0,00
Tonge	70	5	702	0,00	702*	0,00	702*	0,00	747,4	6,47	745	6,13	709,0	1,00	707	0,71	702*	0,00	702*	0,00
Tonge	70	6	585	0,00	585*	0,00	585*	0,00	589,0	0,68	588	0,51	593,2	1,40	592	1,20	585,4	0,07	585*	0,00
Tonge	70	7	502	0,00	502*	0,00	502*	0,00	512,0	1,99	509	1,39	507,8	1,16	504	0,40	502*	0,00	502*	0,00
Tonge	70	8	439	0,46	439*	0,00	441	0,46	451,8	2,92	450	2,51	448,2	2,10	440	0,23	440,0	0,23	440	0,23
Tonge	70	9	390	0,00	391	0,26	390*	0,00	405,8	4,05	401	2,82	399,6	2,46	394	1,03	391,0	0,26	391	0,26
Tonge	70	10	351	0,28	352	0,28	352	0,28	370,6	5,58	369	5,13	361,8	3,08	358	1,99	352,4	0,40	352	0,28
Tonge	70	11	320	0,00	322	0,63	320*	0,00	345,0	7,81	336	5,00	326,8	2,13	322	0,63	321,2	0,37	320*	0,00
Tonge	70	12	293	0,00	294	0,34	293*	0,00	318,0	8,53	316	7,85	299,8	2,32	296	1,02	295,2	0,75	294	0,34
Tonge	70	13	270	0,74	272	0,74	272	0,74	299,4	10,89	296	9,63	275,4	2,00	272	0,74	272,0	0,74	271	0,37
Tonge	70	14	251	0,80	253	0,80	253	0,80	287,8	14,66	283	12,75	260,4	3,75	254	1,20	254,0	1,20	252	0,40
Tonge	70	15	234	0,85	238	1,71	236	0,85	271,8	16,15	269	14,96	238,4	1,88	236	0,85	236,4	1,03	236	0,85
Tonge	70	16	220	0,45	223	1,36	221	0,45	267,8	21,73	266	20,91	227,0	3,18	222	0,91	223,0	1,36	222	0,91
Tonge	70	17	207	0,97	210	1,45	209	0,97	251,6	21,55	246	18,84	214,2	3,48	210	1,45	209,4	1,16	209	0,97
Tonge	70	18	195	2,05	198	1,54	199	2,05	244,4	25,33	236	21,03	201,4	3,28	197	1,03	198,4	1,74	197	1,03
Tonge	70	19	185	1,08	189	2,16	187	1,08	239,2	29,30	232	25,41	189,2	2,27	187	1,08	188,8	2,05	188	1,62
Tonge	70	20	176	1,70	178	1,14	179	1,70	231,6	31,59	228	29,55	187,6	6,59	179	1,70	179,2	1,82	179	1,70
Tonge	70	21	168	2,98	172	2,38	173	2,98	225,8	34,40	213	26,79	173,0	2,98	170	1,19	173,2	3,10	171	1,79
Tonge	70	22	160	1,88	166	3,75	163	1,88	222,2	38,88	212	32,50	165,8	3,63	164	2,50	163,8	2,38	163	1,88
Tonge	70	23	156	0,00	156*	0,00	156*	0,00	218,2	39,87	212	35,90	156,6	0,38	156*	0,00	156,2	0,13	156*	0,00
Tonge	70	24	156	0,00	156*	0,00	156*	0,00	213,2	36,67	205	31,41	156,6	0,38	156*	0,00	156*	0,00	156*	0,00
Tonge	70	25	156	0,00	156*	0,00	156*	0,00	204,4	31,03	200	28,21	156*	0,00	156*	0,00	156*	0,00	156*	0,00
Wee-Mag	75	3	500	0,00	500*	0,00	500*	0,00	500*	0,00	500*	0,00	500,2	0,04	500*	0,00	500*	0,00	500*	0,00
Wee-Mag	75	4	375	0,00	375*	0,00	375*	0,00	375*	0,00	375*	0,00	375,4	0,11	375*	0,00	375*	0,00	375*	0,00
Wee-Mag	75	5	300	0,00	300*	0,00	300*	0,00	301,0	0,33	301	0,33	300*	0,00	300*	0,00	300*	0,00	300*	0,00
Wee-Mag	75	6	250	0,00	250*	0,00	250*	0,00	252,2	0,88	251	0,40	250*	0,00	250*	0,00	250*	0,00	250*	0,00
Wee-Mag	75	7	215	0,00	215*	0,00	215*	0,00	218,6	1,67	218	1,40	215*	0,00	215*	0,00	215*	0,00	215*	0,00
Wee-Mag	75	8	188	0,00	188*	0,00	188*	0,00	193,0	2,66	191	1,60	188*	0,00	188*	0,00	188*	0,00	188*	0,00
Wee-Mag	75	9	167	0,00	167*	0,00	167*	0,00	174,8	4,67	173	3,59	167*	0,00	167*	0,00	167*	0,00	167*	0,00

EK-1.(devam) Test problemlerinin çözümünden elde edilen sonuçlar

			Urban Matematiksel Model			Dong Matematiksel Model			Fattahi Matematiksel Model			Basit Genetik Algoritma				Tavlama Benzetimi				Grup Genetik Algoritma			
			Sonuç	% Gap		Sonuç	% Gap		Sonuç	% Gap		Ortalama Sonuç	% Gap	En İyi Sonuç	% Gap	Ortalama Sonuç	% Gap	En İyi Sonuç	% Gap	Ortalama Sonuç	% Gap	En İyi Sonuç	% Gap
Problem	n	Alt																					
Wee-Mag	75	10	150*	0,00		151	0,67		150*	0,00		160,0	6,67	159	6,00	150,4	0,27	150*	0,00	150,8	0,53	150*	0,00
Wee-Mag	75	11	137*	0,00		137*	0,00		137*	0,00		146,8	7,15	143	4,38	137*	0,00	137*	0,00	137*	0,00	137*	0,00
Wee-Mag	75	12	125	2,40		126	0,80		128	2,40		137,4	9,92	136	8,80	125,8	0,64	125*	0,00	126,0	0,80	126	0,80
Wee-Mag	75	13	116*	0,00		117	0,86		116*	0,00		127,2	9,66	124	6,90	116*	0,00	116*	0,00	116,2	0,17	116*	0,00
Wee-Mag	75	14	108	0,93		110	1,85		109	0,93		120,6	11,67	119	10,19	109,0	0,93	109	0,93	109,6	1,48	109	0,93
Wee-Mag	75	15	100	4,00		101	1,00		104	4,00		115,4	15,40	114	14,00	101,0	1,00	101	1,00	101,6	1,60	101	1,00
Wee-Mag	75	16	94	1,06		95	1,06		95	1,06		112,2	19,36	111	18,09	94,8	0,85	94*	0,00	95,0	1,06	95	1,06
Wee-Mag	75	17	89	1,12		91	2,25		90	1,12		103,0	15,73	101	13,48	90,0	1,12	90	1,12	91,4	2,70	91	2,25
Wee-Mag	75	18	84	4,76		89	5,95		88	4,76		101,0	20,24	98	16,67	87,0	3,57	87	3,57	87,8	4,52	87	3,57
Wee-Mag	75	19	79	8,86		86	8,86		86	8,86		96,4	22,03	93	17,72	85,0	7,59	85	7,59	85,6	8,35	85	7,59
Wee-Mag	75	20	75	12,00		83	10,67		84	12,00		94,4	25,87	93	24,00	77,0	2,67	77	2,67	77,6	3,47	77	2,67
Wee-Mag	75	21	72	1,39		74	2,78		73	1,39		92,6	28,61	91	26,39	73,0	1,39	73	1,39	73,0	1,39	73	1,39
Wee-Mag	75	22	69	1,45		70	1,45		70	1,45		91,0	31,88	90	30,43	69,6	0,87	69*	0,00	70,8	2,61	70	1,45
Wee-Mag	75	23	66	4,55		68	3,03		69	4,55		88,8	34,55	88	33,33	68,0	3,03	68	3,03	69,0	4,55	69	4,55
Wee-Mag	75	24	63	6,35		68	7,94		67	6,35		83,0	31,75	79	25,40	66,2	5,08	66	4,76	67,8	7,62	67	6,35
Wee-Mag	75	25	60	10,00		67	11,67		66	10,00		80,8	34,67	77	28,33	65,8	9,67	65	8,33	66,2	10,33	66	10,00
Wee-Mag	75	26	58	13,79		66	13,79		66	13,79		78,0	34,48	75	29,31	65,0	12,07	65	12,07	65,4	12,76	65	12,07
Wee-Mag	75	27	56	16,07		65	16,07		65	16,07		76,0	35,71	75	33,93	65,0	16,07	65	16,07	65,0	16,07	65	16,07
Wee-Mag	75	28	54	18,52		64	18,52		64	18,52		75,2	39,26	74	37,04	64,0	18,52	64	18,52	64,0	18,52	64	18,52
Wee-Mag	75	29	52	21,15		63	21,15		63	21,15		73,4	41,15	73	40,38	63,0	21,15	63	21,15	63,0	21,15	63	21,15
Wee-Mag	75	30	50	16,00		58	16,00		58	16,00		72,2	44,40	71	42,00	56,0	12,00	56	12,00	56,0	12,00	56	12,00
Lutz3	89	3	548*	0,00		548*	0,00		548*	0,00		564,0	2,92	564	2,92	549,2	0,22	549	0,18	548*	0,00	548*	0,00
Lutz3	89	4	411*	0,00		412	0,24		411*	0,00		411,6	0,15	411*	0,00	411,6	0,15	411*	0,00	411*	0,00	411*	0,00
Lutz3	89	5	329*	0,00		330	0,30		329*	0,00		330,4	0,43	330	0,30	329*	0,00	329*	0,00	329*	0,00	329*	0,00
Lutz3	89	6	274	0,36		275	0,36		275	0,36		277,8	1,39	277	1,09	274*	0,00	274*	0,00	274,2	0,07	274*	0,00
Lutz3	89	7	235	0,43		240	2,13		236	0,43		250,8	6,72	247	5,11	235*	0,00	235*	0,00	235*	0,00	235*	0,00
Lutz3	89	8	206*	0,00		207	0,49		206*	0,00		237,4	15,24	228	10,68	206*	0,00	206*	0,00	206*	0,00	206*	0,00
Lutz2	89	9	54*	0,00		54*	0,00		54*	0,00		63,6	17,78	63	16,67	54*	0,00	54*	0,00	54*	0,00	54*	0,00
Lutz3	89	9	183	0,55		189	3,28		184	0,55		208,4	13,88	196	7,10	183*	0,00	183*	0,00	183,8	0,44	183*	0,00
Lutz2	89	10	49	2,04		50	2,04		50	2,04		57,4	17,14	53	8,16	49*	0,00	49*	0,00	49*	0,00	49*	0,00
Lutz3	89	10	165	0,61		170	3,03		166	0,61		206,6	25,21	192	16,36	166,0	0,61	166	0,61	166,0	0,61	166	0,61
Lutz3	89	11	150	0,67		156	4,00		151	0,67		183,2	22,13	168	12,00	150*	0,00	150*	0,00	150*	0,00	150*	0,00
Lutz2	89	11	45	0,00		45*	0,00		45*	0,00		55,4	23,11	54	20,00	45*	0,00	45*	0,00	45*	0,00	45*	0,00
Lutz2	89	12	41	0,00		41*	0,00		41*	0,00		54,2	32,20	51	24,39	41*	0,00	41*	0,00	41*	0,00	41*	0,00
Lutz3	89	12	137	0,73		144	5,11		138	0,73		197,2	43,94	195	42,34	138,0	0,73	138	0,73	139,0	1,46	138	0,73

EK-1.(devam) Test problemlerinin çözümünden elde edilen sonuçlar

			Urban Matematiksel Model		Dong Matematiksel Model		Fattahi Matematiksel Model		Basit Genetik Algoritma				Tavlama Benzetimi				Grup Genetik Algoritma				
			Sonuç	% Gap	Sonuç	% Gap	Sonuç	% Gap	Ortalama Sonuç	% Gap	En İyi Sonuç	% Gap	Ortalama Sonuç	% Gap	En İyi Sonuç	% Gap	Ortalama Sonuç	% Gap	En İyi Sonuç	% Gap	
Problem	n	m	Alt Sınır																		
Mukherje	94	11	383	384	0,26	384	0,26	384	0,26	406,4	6,11	404	5,48	391,4	2,19	385	0,52	384,0	0,26	384	0,26
Mukherje	94	12	351	352	0,28	352	0,28	352	0,28	376,4	7,24	373	6,27	359,8	2,51	352	0,28	352,0	0,28	352	0,28
Mukherje	94	13	324	325	0,31	327	0,93	325	0,31	353,8	9,20	351	8,33	330,0	1,85	325	0,31	326,4	0,74	325	0,31
Mukherje	94	14	301	301*	0,00	303	0,66	301*	0,00	333,6	10,83	324	7,64	307,2	2,06	302	0,33	302,8	0,60	302	0,33
Mukherje	94	15	281	289	2,85	283	0,71	289	2,85	327,2	16,44	321	14,23	290,0	3,20	284	1,07	283,2	0,78	282	0,36
Mukherje	94	16	263	265	0,76	265	0,76	265	0,76	316,0	20,15	315	19,77	270,8	2,97	265	0,76	265,0	0,76	265	0,76
Mukherje	94	17	248	249	0,40	262	5,65	249	0,40	293,0	18,15	289	16,53	258,2	4,11	250	0,81	250,6	1,05	250	0,81
Mukherje	94	18	234	240	2,56	241	2,99	240	2,56	277,8	18,72	269	14,96	243,2	3,93	236	0,85	236,8	1,20	236	0,85
Mukherje	94	19	222	224	0,90	225	1,35	224	0,90	278,0	25,23	274	23,42	228,0	2,70	224	0,90	224,4	1,08	224	0,90
Mukherje	94	20	211	223	5,69	213	0,95	223	5,69	267,0	26,54	264	25,12	217,0	2,84	213	0,95	213,0	0,95	212	0,47
Mukherje	94	21	201	209	3,98	215	6,97	209	3,98	260,8	29,75	260	29,35	208,6	3,78	203	1,00	203,6	1,29	203	1,00
Mukherje	94	22	192	194	1,04	201	4,69	194	1,04	258,6	34,69	257	33,85	197,2	2,71	195	1,56	194,6	1,35	194	1,04
Mukherje	94	23	183	186	1,64	187	2,19	186	1,64	245,0	33,88	242	32,24	190,2	3,93	186	1,64	186,6	1,97	186	1,64
Mukherje	94	24	176	179	1,70	182	3,41	179	1,70	239,8	36,25	237	34,66	181,4	3,07	180	2,27	179,2	1,82	178	1,14
Mukherje	94	25	171	172	0,58	179	4,68	172	0,58	237,2	38,71	237	38,60	177,4	3,74	173	1,17	172,0	0,58	171*	0,00
Mukherje	94	26	171	171*	0,00	179	4,68	171*	0,00	237,0	38,60	237	38,60	172,4	0,82	171*	0,00	171*	0,00	171*	0,00
Arcus1	111	3	25236	25236*	0,00	25236*	0,00	25236*	0,00	25238,6	0,01	25238	0,01	25282,2	0,18	25257	0,08	25238,4	0,01	25237	0,00
Arcus1	111	4	18927	18929	0,01	19041	0,60	18929	0,01	18942,6	0,08	18932	0,03	19048,0	0,64	19020	0,49	18932,4	0,03	18931	0,02
Arcus1	111	5	15142	15153	0,07	17857	17,93	15153	0,07	15185,8	0,29	15175	0,22	15250,4	0,72	15181	0,26	15159,8	0,12	15159	0,11
Arcus1	111	6	12618	12666	0,38	12643	0,20	12666	0,38	12712,0	0,74	12697	0,63	12724,2	0,84	12703	0,67	12639,0	0,17	12628	0,08
Arcus1	111	7	10816	10878	0,57	10876	0,55	10878	0,57	11000,2	1,70	10929	1,04	10996,6	1,67	10934	1,09	10862,8	0,43	10839	0,21
Arcus1	111	8	9464	9548	0,89	9608	1,52	9548	0,89	9845,2	4,03	9799	3,54	9621,2	1,66	9564	1,06	9493,6	0,31	9485	0,22
Arcus1	111	9	8412	8465	0,63	9278	10,29	8465	0,63	8869,8	5,44	8802	4,64	8622,6	2,50	8577	1,96	8499,0	1,03	8499	1,03
Arcus1	111	10	7571	7649	1,03	8756	15,65	7649	1,03	8158,4	7,76	8054	6,38	7794,6	2,95	7726	2,05	7652,6	1,08	7639	0,90
Arcus1	111	11	6883	6957	1,08	7078	2,83	6957	1,08	7788,6	13,16	7715	12,09	7229,0	5,03	7180	4,31	6962,0	1,15	6926	0,62
Arcus1	111	12	6304	6414	1,74	6564	4,12	6414	1,74	7301,4	15,82	7020	11,36	6545,4	3,83	6497	3,06	6378,2	1,18	6357	0,84
Arcus1	111	13	5824	5916	1,58	6358	9,17	5916	1,58	7067,0	21,34	6973	19,73	6133,2	5,31	6092	4,60	5899,0	1,29	5878	0,93
Arcus1	111	14	5408	5491	1,53	5536	2,37	5491	1,53	6754,2	24,89	6526	20,67	5670,8	4,86	5610	3,74	5481,6	1,36	5467	1,09
Arcus1	111	15	5048	5223	3,47	5210	3,21	5223	3,47	6774,8	34,21	6625	31,24	5351,8	6,02	5252	4,04	5144,6	1,91	5115	1,33
Arcus1	111	16	4732	4889	3,32	4837	2,22	4889	3,32	6540,2	38,21	6390	35,04	5009,4	5,86	4918	3,93	4834,0	2,16	4814	1,73
Arcus1	111	17	4454	5281	18,57	4598	3,23	5281	18,57	6294,8	41,33	6179	38,73	4749,6	6,64	4680	5,07	4585,8	2,96	4543	2,00
Arcus1	111	18	4203	4606	9,59	4529	7,76	4606	9,59	6220,2	47,99	6019	43,21	4508,2	7,26	4493	6,90	4358,0	3,69	4358	3,69
Arcus1	111	19	3985	4141	3,91	4151	4,17	4141	3,91	5852,4	46,86	5650	41,78	4335,6	8,80	4267	7,08	4125,8	3,53	4095	2,76
Arcus1	111	20	3786	3958	4,54	4046	6,87	3958	4,54	5997,4	58,41	5926	56,52	4147,4	9,55	3981	5,15	3926,0	3,70	3900	3,01
Arcus1	111	21	3691	3711	0,54	3845	4,17	3711	0,54	5769,4	56,31	5236	41,86	4004,8	8,50	3912	5,99	3724,4	0,90	3691*	0,00

EK-1.(devam) Test problemlerinin çözümünden elde edilen sonuçlar

Problem	n	m	Alt Smür	Urban Matematiksel Model		Dong Matematiksel Model		Fattahi Matematiksel Model		Basit Genetik Algoritma				Tavla Benzetimi				Grup Genetik Algoritma			
				Sonuç	% Gap	Sonuç	% Gap	Sonuç	% Gap	Ortalama Sonuç	% Gap	En İyi Sonuç	% Gap	Ortalama Sonuç	% Gap	En İyi Sonuç	% Gap	Ortalama Sonuç	% Gap	En İyi Sonuç	% Gap
Arcus1	111	22	3691	3691*	0,00	-	-	3691*	0,00	5824,6	57,81	5731	55,27	3810,4	3,23	3736	1,22	3691*	0,00	3691*	0,00
Arcus2	111	3	50133	50133*	0,00	50133*	0,00	50133*	0,00	50140,4	0,01	50139	0,01	50146,2	0,03	50136	0,01	50133,2	0,00	50133*	0,00
Arcus2	111	4	37600	37600*	0,00	37600*	0,00	37600*	0,00	37655,6	0,15	37645	0,12	37703,4	0,28	37629	0,08	37600,4	0,00	37600*	0,00
Arcus2	111	5	30080	30080*	0,00	30080*	0,00	30080*	0,00	30225,8	0,48	30183	0,34	30250,0	0,57	30117	0,12	30081,4	0,00	30081	0,00
Arcus2	111	6	25067	25067*	0,00	25069	0,01	25067*	0,00	25367,0	1,20	25294	0,91	25214,4	0,59	25166	0,39	25068,8	0,01	25068	0,00
Arcus2	111	7	21486	21486*	0,00	21488	0,01	21486*	0,00	22036,4	2,56	21917	2,01	21745,4	1,21	21552	0,31	21490,2	0,02	21488	0,01
Arcus2	111	8	18800	18802	0,01	20756	10,40	18802	0,01	19687,8	4,72	19409	3,24	19105,6	1,63	19038	1,27	18805,6	0,03	18804	0,02
Arcus2	111	9	16711	16714	0,02	16722	0,07	16714	0,02	17613,4	5,40	17266	3,32	17074,0	2,17	16860	0,89	16718,0	0,04	16714	0,02
Arcus2	111	10	15040	15048	0,05	15047	0,05	15048	0,05	16133,8	7,27	15709	4,45	15483,6	2,95	15178	0,92	15056,2	0,11	15045	0,03
Arcus2	111	11	13673	13676	0,02	13684	0,08	13676	0,02	16104,2	17,78	14530	6,27	14091,8	3,06	13828	1,13	13682,8	0,07	13678	0,04
Arcus2	111	12	12534	12539	0,04	12598	0,51	12539	0,04	15246,0	21,64	13803	10,12	13026,8	3,93	12879	2,75	12553,2	0,15	12547	0,10
Arcus2	111	13	11570	11581	0,10	11576	0,05	11581	0,10	14612,6	26,30	13483	16,53	12128,4	4,83	11815	2,12	11851,2	2,43	11577	0,06
Arcus2	111	14	10743	10753	0,09	10881	1,28	10753	0,09	13541,8	26,05	13046	21,44	11289,2	5,08	11078	3,12	10772,0	0,27	10761	0,17
Arcus2	111	15	10027	10042	0,15	10038	0,11	10042	0,15	13412,0	33,76	12805	27,71	10589,2	5,61	10459	4,31	10071,8	0,45	10043	0,16
Arcus2	111	16	9400	9593	2,05	9512	1,19	9593	2,05	12470,6	32,67	11184	18,98	9913,0	5,46	9674	2,91	9440,6	0,43	9431	0,33
Arcus2	111	17	8847	8862	0,17	9100	2,86	8862	0,17	12104,4	36,82	11959	35,18	9582,2	8,31	9377	5,99	8901,4	0,61	8888	0,46
Arcus2	111	18	8356	8380	0,29	8442	1,03	8380	0,29	11713,0	40,17	10850	29,85	9075,6	8,61	8730	4,48	8456,0	1,20	8438	0,98
Arcus2	111	19	7916	7938	0,28	8059	1,81	7938	0,28	11384,4	43,82	10039	26,82	8509,4	7,50	8268	4,45	7976,2	0,76	7948	0,40
Arcus2	111	20	7520	7544	0,32	9751	29,67	7544	0,32	11230,8	49,35	10965	45,81	8263,6	9,89	7771	3,34	7579,8	0,80	7558	0,51
Arcus2	111	21	7162	10090	40,88	9364	30,75	10090	40,88	10815,4	51,01	10317	44,05	7706,2	7,60	7517	4,96	7255,8	1,31	7203	0,57
Arcus2	111	22	6837	7467	9,21	8578	25,46	7467	9,21	10333,2	51,14	8903	30,22	7743,4	13,26	7430	8,67	6953,6	1,71	6926	1,30
Arcus2	111	23	6540	6737	3,01	6859	4,88	6737	3,01	9416,0	43,98	8439	29,04	7155,6	9,41	7070	8,10	6684,4	2,21	6664	1,90
Arcus2	111	24	6267	6349	1,31	7009	11,84	6349	1,31	9664,4	54,21	8473	35,20	7108,0	13,42	6914	10,32	6375,0	1,72	6349	1,31
Arcus2	111	25	6016	6172	2,59	6670	10,87	6172	2,59	9477,8	57,54	8652	43,82	6898,4	14,67	6778	12,67	6184,4	2,80	6146	2,16
Arcus2	111	26	5785	5939	2,66	5970	3,20	5939	2,66	9636,4	66,58	7882	36,25	6590,2	13,92	6419	10,96	5916,4	2,27	5880	1,64
Arcus2	111	27	5689	5689*	0,00	5810	2,13	5689*	0,00	9072,8	59,48	7773	36,63	6349,0	11,60	6089	7,03	5710,0	0,37	5689*	0,00
Barthol2	148	27	157	163	3,82	160	1,91	163	1,91	243,4	55,03	237	50,96	159,0	1,27	159	1,27	160,0	1,91	160	1,91
Barthol2	148	28	152	166	9,21	157	3,29	166	1,32	239,0	57,24	232	52,63	154,4	1,58	154	1,32	154,8	1,84	154	1,32
Barthol2	148	29	146	160	9,59	162	10,96	160	1,37	234,8	60,82	224	53,42	149,0	2,05	148	1,37	149,2	2,19	149	2,05
Barthol2	148	30	142	154	8,45	144	1,41	154	1,41	228,4	60,85	221	55,63	143,0	0,70	143	0,70	144,8	1,97	144	1,41
Barthol2	148	31	137	150	9,49	140	2,19	150	1,46	225,4	64,53	223	62,77	139,2	1,61	139	1,46	140,4	2,48	140	2,19
Barthol2	148	32	133	145	9,02	136	2,26	145	2,26	222,0	66,92	218	63,91	135,0	1,50	135	1,50	136,0	2,26	136	2,26
Barthol2	148	33	129	142	10,08	137	6,20	142	1,55	218,8	69,61	208	61,24	131,0	1,55	131	1,55	132,0	2,33	132	2,33
Barthol2	148	34	125	137	9,60	130	4,00	137	1,60	213,2	70,56	206	64,80	127,4	1,92	127	1,60	128,6	2,88	128	2,40
Barthol2	148	35	121	133	9,92	134	10,74	133	9,92	212,6	75,70	204	68,60	123,6	2,15	123	1,65	125,0	3,31	125	3,31

EK-1.(devam) Test problemlerinin çözümünden elde edilen sonuçlar

Problem	n	m	Alt	Urban Matematiksel Model		Dong Matematiksel Model		Fattahi Matematiksel Model		Basit Genetik Algoritma				Tavlama Benzetimi				Grup Genetik Algoritma			
				Sonuç	% Gap	Sonuç	% Gap	Sonuç	% Gap	Ortalama Sonuç	% Gap	En İyi Sonuç	% Gap	Ortalama Sonuç	% Gap	En İyi Sonuç	% Gap	Ortalama Sonuç	% Gap	En İyi Sonuç	% Gap
Barhol2	148	36	118	130	10,17	121	2,54	130	10,17	210,6	78,47	198	67,80	120,8	2,37	120	1,69	121,0	2,54	121	2,54
Barhol2	148	37	115	127	10,43	121	2,61	127	10,43	212,2	84,52	207	80,00	118,2	2,78	117	1,74	118,8	3,30	118	2,61
Barhol2	148	38	112	123	9,82	121	8,04	123	9,82	208,4	86,07	206	83,93	114,6	2,32	114	1,79	115,6	3,21	115	2,68
Barhol2	148	39	109	121	11,01	160	46,79	121	11,01	205,0	88,07	199	82,57	112,4	3,12	111	1,83	113,0	3,67	112	2,75
Barhol2	148	40	106	117	10,38	129	21,70	117	10,38	204,0	92,45	199	87,74	109,2	3,02	109	2,83	110,2	3,96	109	2,83
Barhol2	148	41	104	116	11,54	108	3,85	116	11,54	198,4	90,77	194	86,54	106,8	2,69	106	1,92	107,4	3,27	107	2,88
Barhol2	148	42	101	113	11,88	108	6,93	113	11,88	200,2	98,22	195	93,07	104,2	3,17	104	2,97	105,0	3,96	104	2,97
Barhol2	148	43	99	110	11,11	102	3,03	110	11,11	200,2	102,22	199	101,01	101,8	2,83	101	2,02	103,2	4,24	102	3,03
Barhol2	148	44	97	107	10,31	105	8,25	107	10,31	198,0	104,12	194	100,00	100,4	3,51	99	2,06	101,0	4,12	100	3,09
Barhol2	148	45	95	105	10,53	110	15,79	105	10,53	198,0	108,42	194	104,21	97,0	2,11	96	1,05	98,6	3,79	98	3,16
Barhol2	148	46	93	104	11,83	134	44,09	104	11,83	195,2	109,89	194	108,60	95,8	3,01	95	2,15	97,6	4,95	97	4,30
Barhol2	148	47	91	101	10,99	128	40,66	101	10,99	194,3	113,52	192	110,99	93,6	2,86	93	2,20	94,6	3,96	94	3,30
Barhol2	148	48	89	101	13,48	105	17,98	101	13,48	196,8	121,12	192	115,73	92,4	3,82	92	3,37	92,4	3,82	92	3,37
Barhol2	148	49	87	97	11,49	109	25,29	97	11,49	193,6	122,53	190	118,39	90,2	3,68	90	3,45	91,6	5,29	90	3,45
Barhol2	148	50	85	97	14,12	107	25,88	97	14,12	192,2	126,12	184	116,47	89,0	4,71	87	2,35	89,6	5,41	89	4,71
Barhol2	148	51	84	95	13,10	115	36,90	95	13,10	189,8	125,95	185	120,24	86,8	3,33	86	2,38	88,0	4,76	88	4,76
Scholl	297	25	2787	3024	8,50	2835	1,72	3024	8,50	4689,8	68,27	4398	57,80	2868,0	2,91	2847	2,15	2819,0	1,15	2816	1,04
Scholl	297	26	2680	2946	9,93	2703	0,86	2946	9,93	4786,6	78,60	4700	75,37	2757,6	2,90	2748	2,54	2710,2	1,13	2703	0,86
Scholl	297	27	2580	8250	219,77	4151	60,89	-	-	4535,6	75,80	4408	70,85	2670,0	3,49	2655	2,91	2615,4	1,37	2611	1,20
Scholl	297	28	2488	-	-	4151	66,84	-	-	4305,0	73,03	4131	66,04	2568,6	3,24	2546	2,33	2526,6	1,55	2513	1,00
Scholl	297	29	2402	-	-	4327	80,14	-	-	4278,4	78,12	4069	69,40	2479,8	3,24	2457	2,29	2433,8	1,32	2430	1,17
Scholl	297	30	2322	-	-	-	-	-	-	4213,6	81,46	4007	72,57	2399,2	3,32	2362	1,72	2358,4	1,57	2356	1,46
Scholl	297	31	2247	7711	243,17	7056	214,02	-	-	4255,6	89,39	4117	83,22	2321,8	3,33	2308	2,71	2285,6	1,72	2276	1,29
Scholl	297	32	2177	9964	357,69	3184	46,26	-	-	4102,0	88,42	3910	79,60	2263,6	3,98	2229	2,39	2217,6	1,86	2211	1,56
Scholl	297	33	2111	-	-	3776	78,87	-	-	4103,6	94,39	3958	87,49	2204,6	4,43	2179	3,22	2149,6	1,83	2142	1,47
Scholl	297	34	2049	-	-	2700	31,77	-	-	4063,8	98,33	3883	89,51	2146,4	4,75	2120	3,47	2090,2	2,01	2086	1,81
Scholl	297	35	1991	5946	198,64	2135	7,23	-	-	3932,0	97,49	3671	84,38	2080,4	4,49	2053	3,11	2032,2	2,07	2025	1,71
Scholl	297	36	1935	-	-	5720	195,61	-	-	3899,4	101,52	3694	90,90	2038,6	5,35	2008	3,77	1980,2	2,34	1976	2,12
Scholl	297	37	1883	-	-	3300	75,25	-	-	3802,6	101,94	3716	97,34	1980,4	5,17	1963	4,25	1926,8	2,33	1924	2,18
Scholl	297	38	1834	-	-	-	-	-	-	3773,6	105,76	3480	89,75	1934,8	5,50	1913	4,31	1880,0	2,51	1876	2,29
Scholl	297	39	1787	8260	362,23	-	-	-	-	3640,0	103,69	3483	94,91	1895,8	6,09	1887	5,60	1830,8	2,45	1829	2,35
Scholl	297	40	1742	6982	300,80	4525	159,76	-	-	3471,8	99,30	3020	73,36	1832,6	5,20	1796	3,10	1783,6	2,39	1778	2,07
Scholl	297	41	1699	-	-	-	-	-	-	3619,0	113,01	3442	102,59	1795,0	5,65	1760	3,59	1747,0	2,83	1744	2,65
Scholl	297	42	1659	9262	458,29	5707	244,00	-	-	3443,8	107,58	3210	93,49	1763,4	6,29	1739	4,82	1707,6	2,93	1698	2,35
Scholl	297	43	1620	-	-	8437	420,80	-	-	3633,8	124,31	3482	114,94	1715,4	5,89	1691	4,38	1665,4	2,80	1662	2,59

EK-1.(devam) Test problemlerinin çözümünden elde edilen sonuçlar

			Urban Matematisel Model			Dogru Matematisel Model			Fatihli Matematisel Model			Basit Genetik Algoritma						Tavlama Benzetimi						Grup Genetik Algoritma					
Problem	n	m	Alt Sınır	Sonuç		% Gap	Sonuç		% Gap	Ortalama Sonuç		En İyi Sonuç		% Gap	Ortalama Sonuç		En İyi Sonuç		% Gap	Ortalama Sonuç		En İyi Sonuç		% Gap	Ortalama Sonuç		En İyi Sonuç		% Gap
				Sonuç	% Gap		Sonuç	% Gap		Sonuç	% Gap	Sonuç	% Gap		Sonuç	% Gap	Sonuç	% Gap		Sonuç	% Gap	Sonuç	% Gap		Sonuç	% Gap	Sonuç	% Gap	
Scholl	297	44	1584	-	-	-	-	-	-	-	3503.4	121.17	3300	108.33	-	1694.2	6.96	1663	4.99	-	1633.2	3.11	1621	2.34	-	1601.2	3.44	1598	3.23
Scholl	297	45	1548	-	-	-	-	-	-	-	3287.2	112.35	3116	101.29	-	1639.4	7.20	1642	6.07	-	1601.2	3.44	1598	3.23	-	1538.2	2.85	1548	2.18
Scholl	297	46	1515	-	-	-	6475	327.39	-	-	3255.6	114.89	3063	102.18	-	1619.6	6.90	1574	3.89	-	1538.2	3.32	1526	2.90	-	1509.4	3.95	1506	3.65
Scholl	297	47	1483	-	-	-	1774	19.62	-	-	3280.8	121.23	3160	113.08	-	1585.8	6.93	1569	5.80	-	1532.2	3.32	1526	2.90	-	1509.4	3.95	1506	3.65
Scholl	297	48	1452	4958	-	-	8114	458.82	-	-	3365.8	131.80	3041	109.44	-	1565.2	7.80	1538	5.92	-	1509.4	3.95	1506	3.65	-	1481.4	4.18	1470	3.38
Scholl	297	49	1422	-	-	-	3284	130.04	-	-	3344.2	135.18	3244	128.13	-	1533.0	7.81	1506	5.91	-	1481.4	4.18	1470	3.38	-	1447.2	3.82	1438	3.16
Scholl	297	50	1394	-	-	-	-	-	-	-	3288.4	135.90	3055	119.15	-	1506.4	8.06	1478	6.03	-	1447.2	3.82	1438	3.16	-	1422.2	2.61	1417	2.24
Scholl	297	51	1386	-	-	-	-	-	-	-	3350.2	141.72	3175	129.08	-	1488.4	7.39	1477	6.57	-	1422.2	2.61	1417	2.24	-	1404.0	1.30	1400	1.01
Scholl	297	52	1386	10456	-	-	5353	286.22	-	-	3086.0	122.66	2986	115.44	-	1464.2	5.64	1425	2.81	-	1404.0	1.30	1400	1.01	-	-	-	-	-

➤ (-) işareti verilen sürede uygun bir sonuç bulunamadığını göstermektedir.

➤ Koyu yazılar ilgili satırdaki en iyi sonucu göstermektedir.

➤ (*) işareti optimum sonuçları göstermektedir. Sezgisel yöntemler için optimum sonuçlar alt sınır değerine eşit olan ya da optimalitesi matematiksel modellerle kanıtlanmış olan sonuçlardaki olmaktadır.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : ŞAHİN, Murat
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 21.07.1988, Ankara
 Medeni hali : Bekâr
 Telefon : 0 (312) 582 38 01
 e-mail : murat.sahin@gazi.edu.tr



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi / Endüstri Mühendisliği	Devam Ediyor
Lisans	Gazi Üniversitesi/ Endüstri Mühendisliği	2011
Lise	Cumhuriyet Lisesi	2006

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2012-2014	Vakıfbank T.A.Ç -	Mali Analist Yardımcısı
2014-2014	Celal Bayar Üniversitesi	Araştırma Görevlisi
2014-Halen	Gazi Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

Şahin, M. & Kellegöz, T., (2015, Ekim). U tipi montaj hatlarında üretim oranının artırılması: Problem tanımı ve matematiksel formülasyon. 15. Üretim Araştırmaları Sempozyumu, 15(1), 409-416.

Hobiler

Futbol, Sinema, Tiyatro, Satranç.



GAZİ GELECEKTİR...