**T.C.**
**ERCİYES ÜNİVERSİTESİ**
**SOSYAL BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**
**İŞLETME ANABİLİM DALI**
**ÜRETİM YÖNETİMİ VE PAZARLAMA BİLİM DALI**

# STOKASTİK PARALEL MONTAJ HATTI DENGELEME PROBLEMİNE ÜST SEZGİSEL YAKLAŞIM

**Hazırlayan**
**Gökhan SEÇME**

**Danışman**
**Doç. Dr. Lale ÖZBAKIR**

**Doktora Tezi**

**Şubat 2014**
**KAYSERİ**

**T.C.**
**ERCİYES ÜNİVERSİTESİ**
**SOSYAL BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**
**İŞLETME ANABİLİM DALI**
**ÜRETİM YÖNETİMİ VE PAZARLAMA BİLİM DALI**

# STOKASTİK PARALEL MONTAJ HATTI DENGELEME PROBLEMİNE ÜST SEZGİSEL YAKLAŞIM

**Hazırlayan**
**Gökhan SEÇME**

**Danışman**
**Doç. Dr. Lale ÖZBAKIR**

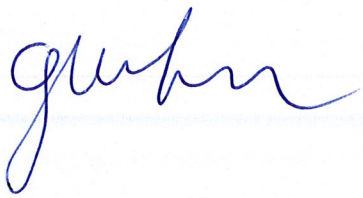
**Bu çalışma; Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından SBD-10-2961 kodlu proje ile desteklenmiştir.**

**Şubat 2014**
**KAYSERİ**

## BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtirim.

**Adı-Soyadı: Gökhan SEÇME**

**İmza:** 

## YÖNERGEYE UYGUNLUK

**Stokastik Paralel Montaj Hattı Dengeleme Problemine Üst Sezgisel Yaklaşım** adlı Doktora tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi'ne uygun olarak hazırlanmıştır.

Tezi Hazırlayan
Gökhan SEÇME

Danışman
Doç. Dr. Lale ÖZBAKIR

İşletme ABD Başkanı
Prof. Dr. Osman UNUTULMAZ

Doç. Dr. Lale ÖZBAKIR danışmanlığında **GÖKHAN SEÇME** tarafından hazırlanan **"STOKASTİK PARALEL MONTAJ HATTI DENGELEME PROBLEMİNE ÜST SEZGİSEL YAKLAŞIM"** adlı bu çalışma, jürimiz tarafından Erciyes Üniversitesi Sosyal Bilimleri Enstitüsü **İŞLETME** Anabilim Dalında **Doktora** tezi olarak kabul edilmiştir.

10./02./2014

**JÜRİ:**

Danışman : Doç. Dr. Lale ÖZBAKIR .....

Üye : Prof. Dr. Ceyda OĞUZ .....

Üye : Prof. Dr. Cemal ÖZGÜVEN .....

Üye : Prof. Dr. Filiz ÇALIŞKAN .....

Üye : Doç. Dr. İbrahim AKGÜN .....

**ONAY:**

Bu tezin kabulü Enstitü Yönetim Kurulunun 11/02./2014 tarih ve ....05.... sayılı karar ile onaylanmıştır.

14./2./2014

Prof. Dr. Lütfullah ÇEBECİ
Enstitü Müdürü

# TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca, tez konusunun seçiminden başlayarak değerli görüş ve önerileri ile çalışmaya yön veren, sabrı ve güveni ile güç veren değerli danışmanım Doç. Dr. Lale ÖZBAKIR'a teşekkürü borç bilirim. Tez çalışmam sırasında misafir doktora öğrencisi olarak University of Nottingham bünyesinde ASAP araştırma grubunda çalışmalarımı yürütme fırsatı sunan, her daim desteğini hissettiğim sevgili hocam Doç. Dr. Ender ÖZCAN'a şükranlarımı sunarım.

Doktora tez çalışmam boyunca sabırları ve destekleri ile her zaman yanımda olan SEÇME ailesine çok teşekkür ederim. Ayrıca tez çalışmasına SBD-10-2961 numaralı proje olarak destek sağlayan Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Birimi'ne de katkılarından dolayı teşekkür ederim.

# STOKASTİK PARALEL MONTAJ HATTI DENGELEME PROBLEMİNE ÜST SEZGİSEL YAKLAŞIM

**Gökhan SEÇME**
**Erciyes Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü**
**Doktora Tezi, Şubat 2014**
**Danışman: Doç. Dr. Lale ÖZBAKIR**

## KISA ÖZET

Akış tipi üretim sistemlerinin en önemli uygulamalarından olan montaj hatları, günümüz üretim ihtiyaçlarının değişmesine paralel olarak yeni uygulama örnekleriyle gelişmektedir. Paralel montaj hatları talebin yeterince yüksek olduğu standart ürünler için yüksek kapasitede üretim imkânları sağlamaktadır. Paralel montaj hattı yapıları gibi montaj hattı dengeleme problemlerinin gerçek dünya uygulamalarına yaklaşmasını sağlayan özelliklerden birisi de görev zamanlarının stokastik olarak değerlendirilmesidir. Böylece insan, makine ve çevreden kaynaklanabilecek değişkenliklerin dikkate alınması sağlanır. Ayrıca montaj hattı kurulum ve işletme kararının orta ve uzun dönemli stratejik bir karar olduğu düşünüldüğünde sadece dengeleme problemi olarak değil, kullanılacak makine ve teçhizatların da dikkate alınarak bir tasarım problemi olarak ele alınması daha da anlamlı olmaktadır.

Bu çalışmada stokastik görev zamanlı paralel montaj hattı dengeleme problemi, makine ve teçhizat maliyetleri de değerlendirilerek incelenmiştir. Montaj hattı dengeleme problemi ile ortak kökene sahip çizelgeleme problemlerinde çok başarılı sonuçlar üretebilen üst sezgisel yaklaşımın, montaj hattı dengeleme problemine de başarıyla uygulanabileceği öngörülmüştür. Problemin çözüm uzayından ziyade, problemin çözümünde yer alan alt sezgisellerin sıralama uzayında arama yapan ve alan bilgisine ihtiyaç duymayan üst sezgisel yaklaşım problemin çözümünde başarıyla uygulanmıştır.

Önerilen üst sezgisel çözüm yaklaşımının performansının değerlendirilmesi için literatürde çözüm sonuçları mevcut; stokastik basit montaj hattı dengeleme problemi, deterministik paralel montaj hattı dengeleme problemi ve stokastik paralel montaj hattı

dengeleme problemleri ile kıyaslamalar yapılmıştır. Ayrıca önerilen tavlama benzetimi üst sezgisel çözüm yaklaşımının algoritmik özellikler açısından da değerlendirilmesi yapılmıştır. Üst sezgisel yaklaşımın montaj hattı dengeleme problemlerinde de başarıyla uygulanabileceği görülmüştür. Ayrıca makine teçhizat maliyetlerinin dikkate alınmasıyla montaj hattı tasarım problemi olarak gelecekteki çalışmalara rehberlik edecek sonuçlara ulaşılmıştır.

***Anahtar Kelimeler:*** *Stokastik Paralel Montaj Hattı Dengeleme Problemi, Üst Sezgisel, Metasezgisel Teknikler.*

# HYPER HEURISTIC APPROACH TO STOCHASTIC PARALLEL ASSEMBLY LINE BALANCING PROBLEM

**Gökhan SEÇME**
**Erciyes University, Institute of Social Sciences**
**Ph. D. Thesis, February 2014**
**Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Lale ÖZBAKIR**

## ABSTRACT

Assembly lines, one of the most important applications of flow shop production, are advancing by new implementations, to meet the requirements of changing today's production environment. Parallel assembly lines allow high capacity production for standard products for which there is a sufficiently high demand. The usage of stochastic task durations, as paralleling lines, makes assembly line balancing (ALB) problems realistic leading to real world applications. The task duration variations due to the humans, machines or environment to be taken into account by stochastic task times. Since installing and balancing an assembly line is a mid to long-term strategic decision, it is more sensible if the problem is not only studied as a line balancing problem, but also a design problem considering machines and tools.

In this thesis, parallel ALB problem with stochastic task times and machine/equipment costs is considered. It has been foreseen that hyper-heuristics, which produced successful results on the timetabling problems, can also successfully be applied to the assembly line balancing problems which are similar problems in nature. Hyper heuristics perform search over the heuristics space formed by a sequence of low level heuristics rather than the solutions directly without requiring any domain knowledge. A simulated annealing (SA) based hyper-heuristic is developed and applied to the stochastic parallel ALB problem in which equipment costs are known.

The performance of the proposed hyper-heuristic is evaluated by comparing the results of test problems with a single model stochastic ALB problem, deterministic parallel ALB problem and stochastic parallel ALB problems, due to lack of problem samples with machine/equipment costs. In addition, an evaluation according to algorithmic

preferences is also carried out. It is shown that hyper heuristics are very successful on different types of ALB problems. This thesis provides results for assembly line design problem with machine/equipment costs, which can be used as a guide in future studies.

***Key Words:*** *Stochastic Parallel Assembly Line Balancing Problem, Hyper Heuristic, Metaheuristics.*

# İÇİNDEKİLER

## STOKASTİK PARALEL MONTAJ HATTI DENGELEME PROBLEMİNE ÜST SEZGİSEL YAKLAŞIM

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK ..... ii
YÖNERGEYE UYGUNLUK ..... iii
KABUL VE ONAY ..... iv
TEŞEKKÜR ..... v
KISA ÖZET ..... vi
ABSTRACT ..... viii
İÇİNDEKİLER ..... x
KISALTMALAR VE SİMGELER ..... xiv
TABLOLAR LİSTESİ ..... xv
ŞEKİLLER LİSTESİ ..... xvi
GİRİŞ ..... 1

**I. BÖLÜM:**
**MONTAJ HATLARI VE MONTAJ HATTI DENGELEME PROBLEMİ**

1.1. Montaj Hatları ve Özellikleri ..... 6
1.2. Montaj Hattı Dengeleme Problemi ..... 8
1.2.1. Basit Montaj Hattı Dengeleme Problemi ..... 11
1.2.2. Genelleştirilmiş Montaj Hattı Dengeleme Problemi ..... 14
1.2.3. Montaj Hattı Dengeleme Problemlerinin Diğer Optimizasyon Problemleri İçerisindeki Yeri ..... 15
1.3. Montaj Hattı Dengeleme Problemlerinin Sınıflandırılması ..... 16
1.3.1. Amaçları Açısından Montaj Hattı Dengeleme Problemleri ..... 17
1.3.2. Model (Ürün) Sayısı ve Türüne Göre Montaj Hatları ..... 19
1.3.3. Görev Zamanlarının Değişkenliğine Göre Montaj Hatları ..... 24
1.3.4. Hattın Şekline Göre Montaj Hatları ..... 25
1.3.5. Süreç Alternatifine veya Kullanılan Makine/Teçhizata Göre Montaj Hatları 29
1.3.6. Atama Kısıtlarına Göre Montaj Hatları ..... 32
1.3.7. Hattın Kontrol Düzenine Göre Montaj Hatları ..... 34

## II. BÖLÜM:
## PARALEL MONTAJ HATLARI VE STOKASTİK PARALEL MONTAJ HATTI DENGELEME PROBLEMİ

2.1. Paralel Montaj Hatları ..... 36
2.1.1. Paralel Montaj Hattı Yapıları ..... 37
2.1.2. Paralel Montaj Hatlarının Özellikleri ..... 39
2.2. Paralel Montaj Hattı Dengeleme Problemi ..... 41
2.3. Paralel Montaj Hattı Dengeleme Problemlerine Çözüm Yaklaşımları ..... 46
2.3.1. Paralel MHD Probleminin 0 – 1 Tamsayılı Programlama Modeli ..... 46
2.3.1. Paralel MHD Probleminin Çözümüne Yönelik Sezgisel Yaklaşımlar ..... 48
2.4. Stokastik Görev Zamanlı MHD Problemi ..... 49
2.5. Literatür Taraması ..... 55
2.5.1. Paralel MHD Problemleri ..... 55
2.5.2. Stokastik Görev Zamanlı MHD Problemleri ..... 61

## III. BÖLÜM:
## ÜST SEZGİSEL YAKLAŞIM

3.1. Üst Sezgisel Kavramı ..... 69
3.2. Üst Sezgisel Yaklaşımın Kökeni ve Gelişimi ..... 72
3.2.1. Otomatikleştirilmiş Sezgisel Sıralama ..... 74
3.2.2. Otomatik Planlama Sistemleri ..... 76
3.2.3. Evrimsel Algoritmalarda Otomatik Parametre Kontrolü ..... 77
3.2.4. Sezgisel Metotların Otomatik Öğrenmesi ..... 78
3.2.5. Otomatik Önceliklendirme: “Squeaky Wheel” Optimizasyonu ..... 78
3.3. Üst Sezgisel Çalışma Mekanizması ve Kapsamı ..... 79
3.4. Üst Sezgisel Yaklaşımların Sınıflandırılması ..... 82
3.4.1. Sezgisel Seçim Metodolojileri ..... 85
3.4.1.1. Yapılandırmalı Sezgisellere Dayanan Sezgisel Seçim Teknikleri ..... 85
3.4.1.2. Pertürbatif Sezgisellere Dayanan Sezgisel Seçim Teknikleri ..... 86
3.4.2. Sezgisel Geliştirme Metodolojileri ..... 89
3.5. Literatür Taraması ..... 90

3.5.1. Sezgisel Seçim Yaklaşımları ..... 91
3.5.1.1. Yapılandırmalı Sezgisellere Dayanan Sezgisel Seçim Yaklaşımları ..... 91
3.5.1.2. Pertürbatif Sezgisellere Dayanan Sezgisel Seçim Yaklaşımları ..... 98
3.5.2. Sezgisel Geliştirme Yaklaşımları ..... 108
3.5.3. Öğrenme Yaklaşımları ..... 110

**IV. BÖLÜM:**
**STOKASTİK PARALEL MONTAJ HATTI DENGELEME PROBLEMİNİN ÜST SEZGİSEL YAKLAŞIM İLE ÇÖZÜMÜ**

4.1. Stokastik Paralel Montaj Hattı Dengeleme Problemi ..... 115
4.1.1. Stokastik Görev Zamanlarının Etkisi ..... 117
4.1.2. Makine/Teçhizat Maliyetlerinin Etkisi ..... 120
4.2. Tavlama Benzetimi ..... 124
4.2.1. Tavlama Benzetimi Yapısı ve Çalışma Mekanizması ..... 126
4.2.2. Tavlama Benzetimi Parametreleri (Soğutma Çizelgesi) ..... 128
4.2.3. Tavlama Benzetimi ve Montaj Hattı Dengeleme Uygulamaları ..... 131
4.3. Stokastik Paralel MHD Problemi için Tavlama Benzetimi Üst Sezgiseli ..... 132
4.3.1. Üst Sezgisel Çözüm Süreci ve Çalışma Mekanizması ..... 133
4.3.2. Çözüm Gösterimi ..... 141
4.4. Önerilen Çözüm Yaklaşımının Örnek Problem Üzerinde Uygulanması ..... 145
4.5. Önerilen Yaklaşımın Literatürdeki Yeri ..... 156

**V. BÖLÜM:**
**PARAMETRE DEĞERLERİNİN TESPİTİNE YÖNELİK DENEYSEL ÇALIŞMA VE ÇÖZÜM SONUÇLARI**

5.1. Parametreler ve Değerleri ..... 159
5.1.1. Problemin Doğasından/Yapısından Kaynaklanan Parametreler ve Değerleri 160
5.1.2. Çözüm Yönteminin Doğasından/Yapısından Kaynaklanan Parametreler ve Değerleri ..... 163
5.2. Taguchi Deney Tasarımı ..... 164
5.3. Tam Faktöryel Deney Tasarımı ..... 170
5.4. Test Problemlerinin Çözüm Sonuçları ..... 176

## VI. BÖLÜM:
## ÜST SEZGİSEL ÇÖZÜM YAKLAŞIMININ DEĞERLENDİRİLMESİ

6.1. Üst Sezgisel Çalışma Mekanizması Açısından Değerlendirme ..... 179

6.2. Test Problemlerinin Çözüm Sonuçlarının Kıyaslanması ..... 182

6.2.1. Stokastik Tek Modelli (Basit) MHD Problemi Açısından Karşılaştırma ... 182

6.2.2. Deterministik Paralel MHD Problemi Açısından Karşılaştırma ..... 186

6.2.3. Stokastik Paralel MHD Problemi Açısından Karşılaştırma ..... 189

6.3. Sezgisel Algoritmaların Özellikleri Açısından Değerlendirme ..... 192

6.3.1. Doğruluk ve Esneklik ..... 193

6.3.2. Kararlılık ..... 193

6.3.3. Ölçeklenebilirlik ..... 196

6.3.4. Dinçlik – Sağlamlık ..... 197

6.4. Amaç Fonksiyonu Bileşenlerinin Çözümü Yönlendirebilme Etkisi ..... 198

6.5. Makine/Teçhizat Maliyetlerinin Etkisi ..... 199

## 7. BÖLÜM:
## SONUÇ VE ÖNERİLER

7.1. Çalışmanın Sonuçları ve Katkıları ..... 202

7.2. Gelecekteki Çalışmalara Öneriler ..... 205

Kaynakça ..... 206

Ek 2: Test Problemlerinin Üst Sezgisel Yaklaşım Çözüm Sonuçları ..... 247

Ek 3: Stokastik Paralel Montaj Hattı Dengeleme Problemi Kıyaslama Sonuçları ... 266

ÖZGEÇMİŞ ..... 308

## KISALTMALAR VE SİMGELER

| | |
|---|---|
| ABS | ABSOLOM yöntemi |
| ACO | Karınca koloni optimizasyonu |
| BMHDP | Basit montaj hattı dengeleme problemi |
| BMHDP-1 | Tip 1 Basit montaj hattı dengeleme problemi |
| c | Çevrim zamanı |
| cv | Değişim katsayısı |
| ÇO | Çözüm zincirindeki öğelerin değiştirilme (çaprazlama) oranı |
| ÇTMHDP | Çift taraflı montaj hattı dengeleme problemi |
| Dİ | Düzgünlük indeksi (SI) |
| EIC | Beklenen tamamlanmama maliyeti |
| GİS | Gelişme olmayan iterasyon sayısı |
| GMHDP | Genelleştirilmiş montaj hattı dengeleme problemi |
| GÖK | Gökçen, Ağpak, Benzer (2006) paralel MHD çözüm yöntemi |
| KMMHDP | Karma modelli montaj hattı dengeleme problemi |
| MHD | Montaj hattı dengeleme |
| MHDP | Montaj hattı dengeleme problemi |
| MHT | Montaj hattı tasarım |
| MOD | Scholl and Boysen (2009) matematiksel programlama modeli |
| MZU | Markov Zinciri Uzunluğu |
| NP-zor | Polinom zamanda çözülemeyen zor problem |
| PMHDP | Paralel montaj hattı dengeleme problemi |
| SO | Soğuma Oranı |
| SSM | Sezgisel Seçilebilirlik Matrisi |
| TB | Tavlama Benzetimi |
| TS | Tabu arama |
| ÜS | Üst sezgisel |

## TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 1.1. Basit montaj hattı dengeleme problemi türleri ..... 13
Tablo 2. 1. Örnek problemde ürünlerin hatlarda bağımsız olarak dengelenmesi durumu için istasyon atamaları, istasyon zamanları ve hat dengeleri ..... 44
Tablo 3. 1. Uygulama alanlarına göre sezgisel geliştirme yaklaşımları ..... 109
Tablo 4. 1. Fiziksel tavlama ve kombinatoryel optimizasyon arasındaki benzerlikler. 125
Tablo 4. 2. Örnek probleme ait veriler ..... 147
Tablo 4. 3. Örnek problem uygulaması için başlangıç çözümü maliyetleri ..... 149
Tablo 4. 4. Birinci iterasyon görev seçme ve atama işlemleri ..... 151
Tablo 4. 5. Komşu çözüm maliyetinin hesaplanması ..... 153
Tablo 4. 6. Güncellenmiş SSM Matrisi ..... 154
Tablo 5. 1. Parametreler ve değerleri ..... 164
Tablo 5. 2. L36 Taguchi L36 deney matrisi ve deney sonuçları ..... 166
Tablo 5. 3. Taguchi faktör sıralaması ..... 169
Tablo 5. 4. Taguchi deney analizi sonuçlarına göre faktörler seviyeleri ve değerleri .. 169
Tablo 5. 5. Faktöryel deney parametreleri ve seviyeleri ..... 170
Tablo 5. 6. Faktöryel deney analizi ANOVA tablosu ..... 171
Tablo 5. 7. Mertens Problemi Sonuçları ..... 178
Tablo 6. 1. Örnek problemin çözümü sonucunda elde edilen nihai SSM matrisi ..... 181
Tablo 6. 2. Literatürdeki stokastik basit MHD sonuçları ile karşılaştırma ..... 184
Tablo 6. 3. Deterministik paralel MHD sonuçları ile karşılaştırma ..... 187
Tablo 6. 4. Stokastik paralel MHD sonuçları ile karşılaştırma ..... 190
Tablo 6. 5. Kararlılık analizi için ortalama sapma ve standart sapma ..... 194
Tablo 6. 6. Parametrelerin farklı değerleri için ortalama sapma ve standart sapma ..... 197
Tablo 6. 7. Amaç fonksiyonu bileşenleri ve maliyet değerleri ..... 198
Tablo 6. 8. Makine/teçhizat maliyetlerinin etkisi ..... 200

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Montaj hattında üretilecek bir ürüne ait öncelik ilişkileri diyagramı .....9
Şekil 1.2. Montaj hatlarının sınıflandırılması .....16
Şekil 1.3. Ürün sayısı ve türüne göre montaj hatları.....20
Şekil 1.4. Hattın şekline göre montaj hatları.....25
Şekil 2. 1 Paralel montaj hattı konfigürasyonları.....38
Şekil 2. 2. Örnek problem için 3 ürünün öncelik ilişkileri ve operasyon zamanları.....43
Şekil 2. 3. Örnek problemin Paralel MHD problemi olarak çözümü.....45
Şekil 3. 1. Üst sezgisel çalışma mekanizması.....80
Şekil 3. 2. Çözüm süreci içerisinde algoritmik olarak alt seviyeli sezgisel seçimi.....81
Şekil 3. 3. Üst sezgisel yaklaşımların sınıflandırılması .....83
Şekil 4. 1. Tavlama Benzetimi Algoritması Yapısı.....126
Şekil 4. 2. Tavlama benzetimi algoritması genel süreci.....128
Şekil 4. 3. Üst sezgisel yapı ve modülleri arasındaki etkileşim.....133
Şekil 4. 4. Geliştirilen üst sezgisel çözüm yaklaşımının özet çalışma mekanizması....134
Şekil 4. 5. Üst sezgisel akış şeması.....136
Şekil 4. 6. Görev seçme ve atama modülü akış şeması.....139
Şekil 4. 7. Çözüm gösterimi.....141
Şekil 4. 8. Sezgisel seçim vektörü.....142
Şekil 4. 9. Alt seviyeli sezgisellerin seçilebilirlik matrisinin gösterimi.....142
Şekil 4. 10. Rulet tekerleği seçiminde kullanılan vektör ve hesaplanan oranlar.....143
Şekil 4. 11. Öncelik ilişkileri matrisi .....144
Şekil 4. 12. Örnek problemdeki modellerin öncelik ilişkileri.....146
Şekil 4. 13. İterasyonlar boyunca amaç fonksiyonunun değişimi.....156
Şekil 5. 1. Taguchi ana etkiler grafikleri.....167
Şekil 5. 2. Jackson Problemi Faktöryel Deney Sonuçları .....174
Şekil 5. 3. Faktöryel Deney Parametre Seviyeleri için Sonuç Optimizasyon Grafiği ..176

# GİRİŞ

Standartlaştırılmış ürünlerin, yüksek miktarlarda üretildiği akış odaklı üretim uygulamalarının en önemlilerinden birisi montaj hatlarıdır. Üretimi yapılacak ürün veya yarımamülleri oluşturan hammadde, yarımamül veya mamüllerin bir üretim sürecinde bir araya getirilerek nihai ürün veya yarımamülün oluşturulması işlemine montaj denir. Montaj faaliyetini oluşturan, ürünü meydana çıkaracak görevlerin bir veya birkaçının birlikte yapıldığı iş merkezlerine istasyon ve tüm sisteme de montaj hattı denir. Montaj hattında sıralı şekilde konumlandırılmış istasyonlarda tüm ürünlerin aynı ortak zaman birimi kadar işlem görecek şekilde ürünü oluşturan görevlerin istasyonlarda gruplandırılmasına çalışılır. Böylece montaj hatlarının temel özelliği olan yüksek hızda ve dolayısıyla yüksek hacimde üretim gerçekleştirilmeye çalışılır. Sürekli çalışarak yüksek hacimde üretim yapacak montaj hatlarının tasarımı, kurulması ve çalıştırılması verimliliği etkileyen en önemli kararlardandır.

Bir montaj hattının verimliliğinin ölçüsü olarak montaj hattı dengeleme (MHD); bir montaj faaliyetini oluşturan görevlerin; görevler arasındaki teknolojik kısıtlar ve görev zamanları dikkate alınarak, bir performans kriterini en iyileyecek şekilde istasyonlara atanmasıdır. İstasyonlardaki boş zamanların ve istasyon zamanları arasındaki farkın mümkün olduğunca az olması bir montaj hattının ne kadar verimli çalıştığının bir göstergesidir. Dolayısıyla görevlerin istasyonlara gruplandırılması kararı, görevlerin sonlu kombinasyonları arasından görev seçme kararı olarak ortaya çıkmaktadır. Bu haliyle kombinatoryal optimizasyon problemi olan MHD problemi, polinom zamanda çözülemeyen NP-zor bir optimizasyon problemidir.

Montaj hatlarını çeşitli kriterlere göre sınıflandırmak mümkündür. Montaj hattında üretilecek ürünlerin çeşidine göre tek modelli hatlar veya çok modelli hatlar olarak bir sınıflandırma yapılabilir. Kurulacak hattın yerleşim düzenine göre seri hatlar ve u-tipi hatlar olarak ikiye ayırmak da mümkündür. Seri ve u-tipi yerleşim düzenlerinin çeşitli özel uygulamaları da mevcuttur. İlk olarak Gökçen, Ağpak ve Benzer (2006) tarafından tanımlanan paralel montaj hattı dengeleme problemi, u-tipi hatların esnekliğini ve seri hatların üretim hızı ve yerleşim alanı özelliklerini bir araya getiren, aynı veya benzer

ürünlerin yüksek miktarlarda talebi karşılayacak şekilde ortak kaynak kullanımı esasına göre dengelendiği MHD problemidir.

MHD için önemli bir sınıflandırma ölçütü de görev zamanlarının değişkenliğidir. Montaj görevlerinin zamanlarının sabit bir zaman değeri ile gösterildiği deterministik MHD problemi ve görev zamanlarının bir olasılık dağılımına uygun olarak belirli bir zaman aralığındaki değerlerle gösterildiği stokastik MHD problemi olarak ikiye ayırmak mümkündür. MHD ile ilgili zengin literatürün önemli bir kısmı deterministik MHD problemini ele alsa da MHD probleminin stokastik olarak ele alınmasıyla gerçek dünya uygulamalarına daha yakın çözümler elde edilebilmektedir. İnsan, makine ve çevreden kaynaklanabilecek çeşitli faktörler ile görev zamanlarının değişken kabul edilmesi, problemi daha gerçekçi bir yapıya dönüştürürken çözümünü de zorlaştırmaktadır. MHD problemlerinde performans kriteri olarak yaygın şekilde kullanılan istasyon sayısı ve düzgünlük indeksi gibi amaçların yanında stokastik MHD problemlerinde, bir de görevlerin çevrim zamanı içerisinde tamamlanamamasının bir ölçüsü olarak tamamlanmama maliyeti (Kottas and Lau, 1973; 1981; Silverman and Carter, 1986) ortaya çıkmaktadır. En yaygın kullanımda tamamlanmama maliyeti, birim tamamlanmama maliyeti ile her bir görev için hesaplanan tamamlanmama olasılıklarının, ilgili görev ve ardıllarının süreleri toplamlarıyla çarpımlarına eşittir. Böylece istasyona atanan görevlerin süreleri toplamının çevrim zamanını aşma olasılığı ikinci bir maliyet unsuru olarak amaç fonksiyonuna yansıtılmaktadır.

MHD kapsamında literatürde sınırlı olarak çalışılan bir diğer araştırma alanı da makine ve teçhizat maliyetleridir. Görevlerin alternatif makinelerde gerçekleştirilebilmesi veya paralel istasyon durumlarında, makine ve teçhizat maliyetlerini dikkate alan çalışmalar mevcuttur. Paralel istasyon durumunda olduğu gibi paralel hatlar söz konusu olduğunda da makine ve teçhizatların dikkate alınması anlamlı olabilmektedir. Günümüz üretim imkânları dikkate alındığında birden fazla farklı görevi gerçekleştirebilen makine ve teçhizatlar olabildiği gibi bazı farklı görevler aynı makine ve teçhizat ile gerçekleştirilebilmektedir. Dolayısıyla aynı makine ve teçhizatla gerçekleştirilebilen görevlerin aynı istasyona atanması durumunda veya birden fazla görevi gerçekleştirebilen makine teçhizatın gerçekleştirebildiği görevlerin aynı istasyona

atanması durumunda, makine ve teçhizat sayısından ve maliyetinden tasarruf etme imkânı ortaya çıkabilmektedir.

Bu tez çalışmasında günümüz üretim sistemlerinde yaygın olarak karşılaşılabilen paralel montaj hattı dengeleme problemi ele alınmıştır. Görev zamanları stokastik olarak değerlendirilerek problemin gerçek dünya uygulamalarına daha da yaklaşması sağlanmıştır. Ayrıca görevlerin gerçekleştirilmesinde kullanılan makine ve teçhizatlar da dikkate alınarak, problem montaj hattı tasarım problemi boyutuna genişletilmiş ve olası makine teçhizat maliyetlerinden tasarruf etme imkânları araştırılmıştır. Paralel montaj hattı yapısı, stokastik görev zamanları ve makine teçhizat maliyetleri birlikte değerlendirilerek; işçilik maliyetleri, tamamlanmama maliyetleri ve makine teçhizat maliyetlerinin toplamından oluşan amaç fonksiyonu, en iyilenecek performans kriteri olarak kullanılmıştır.

Yapısı itibariyle NP-zor bir problem olan MHD problemi, paralel hat yapısı ve stokastik görev zamanları ile daha da zor bir problem haline gelmiştir. Makine teçhizat maliyetlerinin de dikkate alınmasıyla problemin çözüm uzayı keşfedilmesi çok daha zor bir hale gelmiştir. MHD probleminin çözümü için literatürde çok sayıda yaklaşım söz konusudur. Basit MHD problemleri için kesin çözüm sunan matematiksel programlama modelleri kullanılabilmektedir. Ancak problem boyutu büyüdükçe ve çözüm uzayı karmaşık hale geldikçe optimal çözüme ulaşma süresi artmakta hatta büyük boyutlu problemler için matematiksel programlama pratik bir çözüm sunmaktan uzaklaşmaktadır. Stokastik paralel MHD probleminin matematiksel programlama modeli olarak çözümünde; *doğrusal dönüşüm* metoduyla en büyük (11+10) görevli Jackson problemine, *doğrusal yaklaşım* metodu ile ise en büyük (30+28) görevli Sawyer problemine kabul edilebilir zamanlarda sonuç bulunabildiği Çerçioğlu (2009) tarafından rapor edilmiştir. Dolayısıyla gerçek dünya MHD problemlerindeki görev sayılarının çok daha fazla olduğu ve stokastik paralel MHD probleminde makine ve teçhizat maliyetlerinin de dikkate alınmasıyla çözüm uzayının daha da karmaşıklaştığı düşünüldüğünde, problemin çözümü için sezgisel yöntemlerin kullanılması gerekliliği daha net anlaşılmaktadır.

MHD problemlerinin çözümünde kullanılan çok sayıda sezgisel yönteme literatürde sıkça rastlanmaktadır. Son yıllarda hemen hemen tüm optimizasyon problemlerinin çözümünde kullanılan meta sezgisel algoritmalar da MHD problemleri üzerinde oldukça başarılı sonuçlar sağlamıştır. Özellikle MHD probleminin çizelgeleme problemi ile ortak kökeni dikkate alındığında, çizelgeleme problemleri üzerinde çok başarılı sonuçlar sağlayan üst sezgisel (hyper heuristic) yaklaşımın MHD problemlerinin çözümünde de başarılı olacağı öngörülmüştür.

Üst sezgisel yaklaşım, belirli bir problem veya problem ailesi için alt seviyeli sezgiseller (veya bileşenler) kullanarak, verilen problemi etkili bir şekilde çözmek için sezgisellerin (bileşenlerin) uygun bir kombinasyonunu otomatik olarak üreten üst seviyeli bir metodoloji olarak açıklanabilir (Burke; Curtois; Hyde et al., 2010). Üst sezgisel terimi 2000'li yıllardan itibaren kombinatoryal optimizasyon kapsamında "sezgiselleri seçen sezgisel"leri açıklamak için kullanılmıştır (Cowling; Kendall; Soubeiga, 2000). Üst sezgisel yaklaşım kullanılırken, direkt olarak problemin çözüm uzayında arama yapmaktan ziyade problemin verilen durumu için sezgiseller arama uzayında alt sezgisellerin doğru sırasının veya doğru metodun bulunmasına çalışılır. Üst sezgisel yaklaşım, optimizasyon sisteminin çalıştığı genellik seviyesinin yükseltilmesini amaçlayan büyük bir potansiyele sahip gelişen bir arama teknolojisidir. Üst sezgisel terimi genelde; eldeki problemin çözümü için (meta) sezgiselleri seçmede (meta-) sezgisellerin kullanılması sürecini açıklamak için kullanılmaktadır (Burke; Hart; Kendall et al. 2003).

Bu tez çalışmasında makine/teçhizat maliyetli stokastik paralel MHD problemini çözmek için tavlama benzetimi temelli bir üst sezgisel geliştirilmiştir. Geliştirilen üst sezgisel, MHD ve çizelgeleme problemlerinde görev sıralama için kullanılan 11 basit sıralama sezgiselini alt seviyeli sezgisel olarak kullanmaktadır. Tavlama benzetimi üst sezgiseli, probleme ait bir bilgi kullanmamakta sadece alt seviyeli sezgisellerin performansını değerlendirmektedir. Dolayısıyla esnek bir yapıya sahip olup kolayca diğer MHD problem türlerine uyarlanabilmektedir.

Tez çalışmasının birinci bölümünde montaj hatları ile ilgili temel bilgiler verilerek montaj hatlarının sınıflandırılması yapılmıştır. İkinci bölümde, paralel montaj hatları ve

dengeleme problemi açıklanarak Gökçen, Ağpak ve Benzer (2006) tarafından önerilen matematiksel model özetlenmiştir. Paralel montaj hattı dengeleme problemi ile ilgili literatür bilgisi de detaylı olarak açıklanmıştır. Ayrıca görev zamanlarının stokastik olduğu stokastik MHD problemi ve literatür bilgisi de yine bu bölümde incelenmiştir.

Üçüncü bölümde, ele alınan problemin çözüm tekniği olarak üst sezgisel yaklaşım detaylı şekilde açıklanarak geniş literatür bilgisi özetlenmiştir. Dördüncü bölümde stokastik paralel MHD problemi bütün olarak tanımlanmış, stokastik görev zamanlarının etkisi ve makine teçhizat maliyetlerinin etkisi incelenmiştir. Problemin çözümü için geliştirilen tavlama benzetimi üst sezgiseli açıklanarak örneklendirilmiştir.

Beşinci bölüm, önerilen üst sezgisel çözüm yaklaşımında kullanılan parametrelerin ve seviyelerinin belirlenmesine yönelik deneysel çalışma bölümüdür. Önce Taguchi deney tasarımı ile bazı parametreler ve seviyeleri belirlenmiş, kalan faktörler için tam faktöryel deney yapılarak tüm parametrelerin ve seviyelerinin belirlenmesi sağlanmıştır. Belirlenen parametre değerleri ile literatürdeki test problemleri çözülmüş ve sonuçlar rapor edilmiştir.

Altıncı bölümde önerilen çözüm yaklaşımının etkinliği değerlendirilmiştir. Literatürde bu çalışmada ele alındığı haliyle makine teçhizat maliyetli stokastik paralel MHD problemi sonuçları bulunamadığından birebir kıyaslama yapılamamaktadır. Ancak önerilen çözüm yaklaşımı kolayca deterministik yapıya ve tek modelli MHD yapısına dönüştürülebildiğinden, bilgi amaçlı da olsa stokastik basit MHD problemi olarak ve paralel MHD problemi olarak elde edilen çözümler literatürdeki çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Daha anlamlı bir karşılaştırma, stokastik paralel MHD problemi olarak sonuçları rapor edilen Çerçioğlu (2009) çalışması ile yapılmıştır. Literatürdeki çalışmalarla kıyaslamalara ilave olarak, önerilen üst sezgisel çözüm yaklaşımı algoritmik özellikler açısından da değerlendirilmiştir. Son olarak elde edilen sonuçlar ve değerlendirmeler sonuç bölümünde derlenmiş ve gelecekteki çalışmalara yönelik önerilerde bulunulmuştur.

# I. BÖLÜM:
# MONTAJ HATLARI VE MONTAJ HATTI DENGELEME PROBLEMİ

Seri üretim sistemlerinin en önemli uygulamalarından olan montaj hatları büyük miktarlardaki ürünleri düşük maliyetler ile üretebilen üretim sistemleridir. 1950'li yıllardan itibaren montaj hatlarının özellikle seri üretimin yaygın olarak uygulandığı sektörlerden biri olan otomotiv sanayinde uygulanmasıyla, firmaların üretim faaliyetlerini daha rekabetçi (maliyetlerin azalması, üretim hızının artması vb.) yönetmesi sağlanmış ve böylece üretimde yeni bir dönemin kapıları açılmıştır. Montaj hatları otomotiv endüstrisinden bilişim cihazları üretimine kadar çok çeşitli sanayi dallarında yoğun olarak kullanılmaktadırlar.

## 1.1. Montaj Hatları ve Özellikleri

Montaj hattı; istasyon olarak adlandırılan operasyonları gerçekleştiren üretken birimlerin seri şekilde konumlandırıldığı akış odaklı bir üretim sistemidir. Görev adı verilen ve daha küçük alt parçalara bölünemeyen iş parçaları montaj hatlarında konveyör bant gibi bir taşıma sistemi ile hat boyunca ilerleyerek istasyonları birbirini ardına ziyaret eder. Her bir iş istasyonunda önceden belirli bir dizi görev, çevrim zamanı dikkate alınarak gerçekleştirilir ve son ürün hattın sonundan elde edilir.

Tüm işlemlerin tek bir iş istasyonunda gerçekleştirildiği geleneksel süreçlerden farklı olarak montaj hatları firmalara yüksek üretkenlik seviyelerini yakalama imkânı sunarlar. Montaj hatları ürünlerin büyük oranda standartlaştırıldığı ve tüketimin yüksek olduğu endüstrilerde yoğun olarak kullanılmaktadır. Ayrıca düşük seviyede standartlaştırılmış ürünleri veya özelleştirilmiş ürünleri küçük miktarlarda üretmek için de kullanılmaktadırlar (Becker and Scholl, 2006).

Aslında montaj hatları, standartlaştırılmış ürünlerin maliyet etkin kütle üretimi için geliştirilmiş ve yüksek özellikli işgücü ve öğrenme etkilerini kullanmak üzere tasarlanmıştır (Shtub and Dar-El, 1989; Scholl, 1999). Seri üretimin ilk örneklerinden olan Henry Ford ve T-modeli üretiminden bugüne tüketici ihtiyaçları ve üretim sistemleri büyük oranda değişmiştir. Firmalar birim maliyetlerini en küçükleyen seri üretim uygulamalarını kullanırken çeşitlenmiş müşteri ihtiyaçlarını karşılayabilmek için de ürünlerinin kişiselleştirilmesine izin vermek zorunda kalmışlardır. Otomatik aparat değiştirmeli çok amaçlı makineler gibi çeşitli teçhizatlarla, kabul edilebilir hazırlık zamanı ve maliyetlerle seçmeli üretim sırasına izin verilerek, firmaların hızlı ve büyük miktarlarda kişiselleştirilmiş ürünleri üretmelerine imkân sağlanabilmektedir. Bu durum verimli akış hattı sistemlerini sipariş üretiminde düşük hacimli montaj için de uygun hale getirmektedir (Mather, 1989) ve kitlesel özelleştirme gibi modern üretim stratejilerini mümkün kılmaktadır (Pine, 1993). Bu da montaj sistemlerinin planlanması ve uygulanması sürecinde pratikle yüksek ilişki içinde olunacağını göstermektedir.

Montaj hatları, büyük miktarda ürünlerin standartlaştırılmış şekilde seri olarak üretilebilmesi için geliştirilmiş üretim sistemleridir. Dolayısıyla üretim hızı ve ürünlerin standartlaştırılması montaj hatları için önemli faktörlerdir. Maliyet etkin bir üretim sistemi için montaj hatlarının kurulumu ve/veya yeniden tasarlanmasında kritik yatırım kararlarının verilmesi gerekmektedir. Montaj hattı tasarımı, son ürünü üretecek üretken birimlere dair; makine teçhizat kullanımı, üretim sürecindeki faaliyetlerin sıralanması, montaj görevlerinin, çevrim zamanının ve istasyonların belirlenmesi gibi tüm faaliyet ve kararları içerir.

Montaj hatları yatırım maliyeti ve verimlilik hedefleri doğrultusunda uzun vadeli planlama kapsamında değerlendirilir. Dolayısıyla montaj hatlarının dengelenmesi ve uygun şekilde çalıştırılması sistemin mümkün olduğunca yüksek verimde çalışması için büyük önem arz etmektedir (Becker and Scholl, 2006). Montaj hattını dengelemede üretkenliği ve verimliliği arttırmak için birçok yöntem geliştirilmiştir. Bu hedeflere; imalat zamanının azaltılmasıyla ve/veya iş istasyonu sayısının azaltılmasıyla ulaşılabilir.

Montaj hatları; çevrim zamanı, üretim hızı ve çıktı miktarı gibi çeşitli faktörlere göre düzenlenerek istasyonların eş zamanlı çalışması ve taşıyıcı sisteminin eş zamanlı olarak

ilerlemesi sağlanabilir. İstasyon zamanlarının aynı *c* çevrim zamanı değerine sahip olduğu, istasyonların operasyonlarına aynı zamanda başlayıp aynı zamanda bitirdiği montaj hatları, zaman kısıtlı veya düzenlenmiş (paced) montaj hatları olarak ifade edilirler. Literatürde montaj hattı olarak anılan üretim sistemlerinin büyük bölümü düzenlenmiş montaj hatları olarak değerlendirilmektedir. Düzenlenmemiş veya zaman kısıtı olmayan hatlar ise iş parçasının hareketine göre iki farklı durumla nitelendirilirler. Gerekli operasyonlar tamamlandıktan sonra iş parçasının bekleme olmaksızın hemen hareket ettiği senkronize hatlarda, iş yükü en fazla olan istasyonların beklenmesi söz konusu olabilmektedir. Senkronize olmayan hatlarda ise bir iş parçasının ilgili operasyonları istasyonda tamamladıktan sonra ve öncesinde montajlanan başka bir iş parçası tarafından engellenmedikçe, diğer istasyonlardan bağımsız olarak hareket ettirilir. Böyle bir durumda ise istasyonlarda darboğaz oluşumu veya boş kalması/açlığı durumları ortaya çıkabilecektir. Tampon stok bölgelerinin kullanılmasıyla bu tıkanma ve açlıklar dengelenmeye çalışılır.

### 1.2. Montaj Hattı Dengeleme Problemi

Montaj hattı dengeleme (MHD) problemi, bir veya daha fazla sayıda amacın dikkate alanarak montaj işlerinin (bir ürünün üretilebilmesi için yapılması gereken görevler/operasyonlar) optimal şekilde iş istasyonlarına paylaştırılması kararıdır. Literatürde MHD terimi altında karar vericinin verimli montaj sistemleri tasarlamasını desteklemeyi amaçlayan birçok optimizasyon modeli geliştirilmiş ve tartışılmıştır. Salveson (1955) tarafından MHD probleminin ilk matematiksel formülasyonundan beri akademik çalışmalar genelde görevlerin istasyonlara atanması problemi olan konfigürasyon temel problemine odaklanmıştır. Ancak sonraki çalışmalar problemi u-tipi hatlar, paralel istasyonlar veya işlem alternatifleri gibi pratikle ilgili sınırları entegre ederek daha da genelleştirmeye çalışmışlardır (Becker and Scholl, 2006).

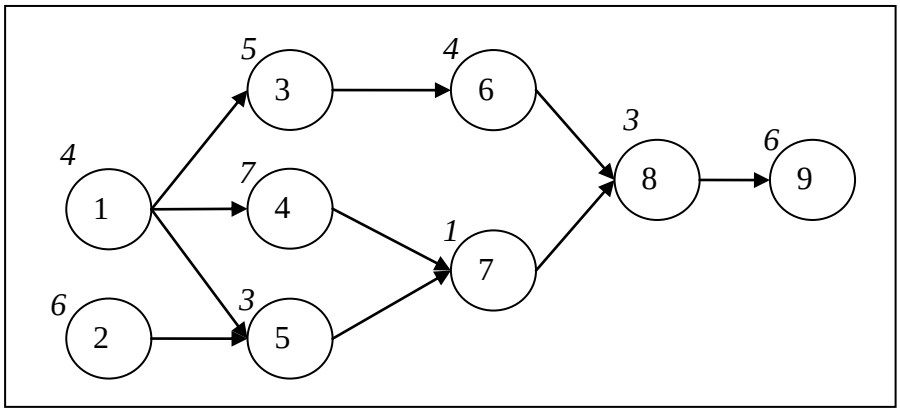
Tüm bu çabalara rağmen konfigürasyon planlaması probleminin matematiksel bir algoritma ile çözüm yaklaşımı, çok az sayıdaki firma tarafından kullanılmaktadır. 1970'li yıllardan günümüze kadar (Chase, 1974; Schöniger and Spingler, 1989) yapılan ampirik çalışmalardan hareketle, bilimsel tartışmalar ve pratik uygulamalar arasında önemli bir uçurum olduğu söylenebilir. MHD algoritmaları ile ilgili daha güncel bilimsel çalışmaların gerçek dünya uygulamalarındaki eksikliği, bu farkın hâlâ var

olduğunu veya daha da genişlediğini göstermektedir. Teorik ve pratik arasındaki bu farklılığın sebepleri olarak (Boysen, Fliedner, Scholl, 2007);

- Araştırmacıların uygulamada karşılaşılan gerçek problemleri ele almaması,
- Dikkate alınan problemlerin tatmin edici şekilde çözülememesi,
- Elde edilen bilimsel bilginin genel pratik uygulamaya dönüştürülememesi gösterilebilir.

Bu sorunların ortaya çıkmasının temel nedenleri ise çok çeşitli sayıdaki MHD problemleri için ortak bir dil ve tanımlamanın kullanılmamasının yanı sıra araştırmalardan elde edilen bilginin pratik uygulamalara transfer edilememesi olarak özetlenebilir (Becker and Scholl, 2006).

Montaj hatlarında üretimin gerçekleştirilebilmesi için gerekli faaliyetler, daha küçük alt birimlere bölünemeyen, *görev* adı verilen temel operasyonlara indirgenirler. Bir *j* (*j*=1,2,…,*n*) görevinin gerçekleştirilebilmesi $t_j$ *görev zamanını* ve belirli bir makine/teçhizat ve/veya işgücünü gerektirir (Becker and Scholl, 2006). Teknolojik ve organizasyonel koşullardan dolayı görevler arasında *öncelik ilişkileri* söz konusudur. Şekil 1.1'deki öncelik ilişkileri grafiğinde bir montaj hattını oluşturan *görevler* düğümlerle, *görevlerin süreleri* düğümler üzerindeki ağırlıklarla ve *görevler arasındaki öncelik ilişkileri* de oklarla gösterilmiştir.




Şekil 1.1. Montaj hattında üretilecek bir ürüne ait öncelik ilişkileri diyagramı

Montaj hatlarının verimli bir şekilde çalışması için hattın dengelenmesine çalışılır. Montaj hattının dengelenmesi; öncelik ilişkileri ve çevrim zamanı gibi kısıtlar dikkate

alınarak montaj hattında gerçekleştirilecek görevlerin istasyonlara atanmasıdır. *k* istasyon numarasını (*k=1,…,m)* göstermek üzere, *k* istasyonuna atanan görevler kümesi $S_k$={1,…,$n_k$} olarak gösterilir ve bu istasyona atanan görevlerin zamanları toplamı $t(S_k) = \sum_{j \in S_k} t_j$ istasyon zamanı olarak adlandırılır. Montaj hatlarında, istasyon zamanı, *çevrim zamanı (c)* ile sınırlandırılmıştır. Çevrim zamanı, hattın sonundan çıkan ardışık iki ürünün üretim zamanları arasındaki zaman farkını (her bir ürün alındığında geçen zaman) gösterir ve en büyük zamanlı görevin süresinden daha küçük olamaz (eşitlik 1.1). İstasyon zamanının çevrim zamanından küçük olduğu durumlarda istasyon boş zamanı oluşur ve her bir çevrimde c–$t(S_k)$ kadar zamanın kullanılmadığını gösterir.

$$c \geq \left(t_{max} = \max\{t_j \backslash j = 1, \dots, n\}\right) \tag{1.1}$$

Montaj hattı tasarlanırken hattın dengeleme kriteri olarak firmanın stratejik hedeflerine yönelik amaçlar dikkate alınmalıdır. İşletmelerin temel amaçlarından olan maliyet ve kârın tahmin edilmesini esas alan amaçlar uzun dönemli planlama şartlarında zorlaşmakta ve hataya açık hale gelmektedir. Bütün bunların yerine kullanılabilecek, hat kullanımının maksimizasyonunu amaçlayan *hat verimliliği/dengesi* (*E*) ise daha genel bir amaç olarak kullanılabilmektedir. Temel olarak hat verimliliği; görevlerin toplam zamanının, toplam istasyonlar zamanına (istasyon sayısı ve çevrim zamanı çarpımı) oranı olarak tanımlanır (Becker and Scholl, 2006).

$$E = \sum t_j \,/(m \times c) \tag{1.2}$$

Şekil 1.1'de gösterilen montaj hattı örneğinde *c=10* ve *m=4* için optimum istasyon atamalarından birisi $S_1$={1,2}, $S_2$={4,5}, $S_3$={3,6}, $S_4$={7,8,9} olarak bulunmuştur. Böylece hattın dengesi E=39/(4x10)= 0,975 (%97,5) olarak hesaplanmıştır. Verilen örnek montaj hattı çözümünde; 1, 2 ve 4. istasyonlarda boş zaman bulunmazken 3. istasyonda 10–(4+5)=1 birim boş zaman bulunmaktadır.

MHD problemi ile ilgili günümüze kadar yapılan çalışmaların birçoğu basit montaj hattı dengeleme problemi (BMHDP) üzerine yoğunlaşmış ve etkili çözüm yaklaşımları geliştirilmiştir. BMHDP'nin daha genelleştirilmiş versiyonu olan genelleştirilmiş montaj hattı dengeleme problemi (GMHDP) Baybars (1986) tarafından tanıtılarak BMHDP probleminden farklılıkları açıklanmıştır. MHD problemleri üzerine yapılan

çalışmaların birçoğu GMHDP'ni ele almaya başlarken, Ghosh ve Gagnon (1989) mevcut ayrımı daha da geliştirerek problemi daha ayırt edici şekilde tanımlamıştır. Zaman içerisinde GMHDP'ne çok sayıda değişken ve sınırlama eklenmesi ihtiyacının doğmasıyla birçok araştırmacı, özel kısıtlamalar içeren GMHDP için ayırt edici özel isimler kullanmaya başlamıştır. Tüm bu çabalar problem karakteristiklerinin anlaşılır olmasına yardımcı olurken aynı zamanda problem alanının daha da çeşitlenerek karışıklıkların ortaya çıkmasına neden olmuştur.

Gerçek dünya problemleri ile literatürde incelenen MHD problemleri arasındaki farkın temel nedenlerinin başında, araştırmaların genellikle MHD'nin sınırlı anlamda tek veya sadece birkaç genelleştirmeyle ilgilenmesi gelmektedir (Boysen, Fliedner, Scholl, 2007). Gerçek dünya montaj sistemleri birçok olası kombinasyonda çok sayıda bu genelleştirmelerden gerektirmektedir. Bu yüzden bu genelleştirmelerin birçoğuyla kombine şekilde ilgilenecek esnek MHD prosedürlerine ihtiyaç vardır. Tipik olarak, optimizasyon sürecinde esneklik ve verimlilik arasında bir takas vardır. Buna göre, gerçek dünya montaj sistemlerinde karşılaşılan genelleştirme kombinasyonları belirlenerek, gerekli ihtiyaçları karşılayacak fakat maksimum esnekliğe sahip prosedürler geliştirilebilir. Ayrıca, uygulayıcılar mevcut modellerin ve prosedürlerin özel montaj sistemlerine nasıl uygulanabileceğine dair öneriler geliştirebilirler.

### 1.2.1. Basit Montaj Hattı Dengeleme Problemi

Genel anlamdaki MHD probleminin temelini BMHD karar problemi oluşturur. BMHDP içerdiği kısıtlamalardan dolayı gerçek dünya problemlerinin karmaşıklığını yansıtmaktan uzak olsa da montaj hatlarının temel özelliklerini dikkate almasından dolayı temel problem olarak birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir. Nitekim daha az sayıda kısıt içeren daha genel problemlerin birçoğu BMHDP'nin bir tür genelleştirmesi olmakta veya karar probleminin bir aşamasında problemin BMHDP olarak çözümüne ihtiyaç duyulabilmektedir (Scholl and Becker, 2006). MHD konusunda yapılan araştırmaların çoğu BMHDP'ni modellemeye ve çözmeye yöneliktir. BMHDP'nin temel özellikleri aşağıda özetlenmiştir (Baybars, 1986; Scholl, 1999; Scholl and Becker, 2006):

- Tek bir ürünün kütle üretimi,
- Önceden bilinen üretim süreci,
- Deterministik görev zamanları ($t_j$),
- Önceden belirlenmiş sabit bir *c* çevrim zamanı,
- Görevlerin sırasını belirleyen öncelik ilişkileri kısıtlarından başka atama kısıtının bulunmaması,
- Bir görevin birden fazla istasyon arasında paylaştırılamaması (görevlerin bölünemezliği),
- Tek yönde *m* istasyonlu seri hat yerleşim düzeni,
- Tüm istasyonların makine ve çalışanlar açısından eşit şekilde donatılması, öncelik ilişkilerine bağlı olarak herhangi bir görevin herhangi bir istasyonda gerçekleştirilebilmesi,
- Hat verimliliğinin maksimizasyonu (maks *E*) amaçlanır.

BMHDP'nin yukarıda açıklanan özellikleri, problemi gerçek dünya uygulamalarından oldukça uzaklaştırmaktadır. Örneğin, üretim sürecinin sabit ve önceden biliniyor olması ile istasyonların eşit şekilde donatılması varsayımları; bir görevin farklı kaynaklarla gerçekleştirilebilmesini, daha güçlü ve hızlı makineler kullanılarak görevlerin daha çabuk gerçekleştirilmesini ve dolayısıyla üretim hızının artmasını engelleyen bir varsayımdır. Diğer taraftan, daha güçlü ve hızlı makineler kullanılması ise makine ve teçhizat satın alma maliyetlerinin yükselmesine neden olacaktır. Zaman ve maliyet arasındaki karşılıklı çelişki durumu, BMHDP'nin dengeleme kararını doğrudan etkileyebilmektedir. Bu gibi faktörleri dikkate almadan, verilen varsayımların kabulü durumunda ise işçi, makine, malzeme gibi kaynakların detaylı bir şekilde değerlendirilmesi gereksiz hale gelmekte ve karar problemi sadece görevlerin istasyonlara atanması problemine dönüşmektedir. Aksi durumda ise kullanılacak kaynakların istasyonlara atanması karar probleminin, hat dengeleme problemine dahil edilmesi gerekecektir (Boysen, Fliedner, Scholl, 2007).

Amaçları açısından BMHDP'nin çeşitli versiyonları Tablo 1.1'de gösterilmiştir (Baybars, 1986; Scholl, 1999). BMHD-1 problemi verilen çevrim zamanında istasyon sayısının minimizasyonunun amaçlandığı problem türüdür. BMHD-2 problemi verilen istasyon sayında çevrim zamanının minimize edildiği (üretim oranını maksimizasyonu

için) BMHD problemidir. BMHD-E problemi ise çevrim zamanı ve istasyon sayısının eş zamanlı olarak minimize edildiği problem türüdür. BMHD-F problemi, verilen *m* istasyon sayısı ve *c* çevrim zamanı için uygun bir çözüm arar. Bu temel problemler için mevcut çözüm süreçleri en güncel haliyle Scholl ve Becker (2006) tarafından özetlenmiştir. Ayrıca problem ile ilgili detaylar literatürde mevcuttur (Baybars, 1986; Shtub and Dar-El, 1989; Ghosh and Gagnon, 1989; Erel and Sarin, 1998; Scholl, 1999; Rekiek, Dolgui, Delchambre et al. 2002).

Tablo 1.1. Basit montaj hattı dengeleme problemi türleri

| | | *c* çevrim zamanı | |
|---|---|---|---|
| | | Biliniyor | Amaç en küçüklemek |
| *m* istasyon sayısı | Biliniyor | BMHD-F | BMHD-2 |
| | Amaç en küçüklemek | BMHD-1 | BMHD-E |

BMHDP'de ikincil bir amaç olarak istasyon yüklerinin (zamanlarının) düzgünleştirilmesi (eşit dağıtımı, yatay dengeleme) (Merengo, Nava, Pozetti, 1999) amacının kullanımı, problemin diğer türlerine ulaşılmasını sağlar. Eşitlik 1.3 ile hesaplanan düzgünleştirme (eğim) indeksinin (*SI*) minimizasyonu ile *m* istasyon sayısı ve *c* çevrim zamanı ikilisinden oluşan (*m*, *c*) kombinasyonunun hat verimliliği açısından optimal değere ulaşacağı öngörülmektedir (Moodie and Young, 1965; Rachamadugu and Talbot, 1991).

$$SI = \sqrt{\sum_{k=1}^{m}(c - t(S_k))^2} \tag{1.3}$$

BMHDP'nin NP-zor yapıda bir optimizasyon problemi olduğu, Karp (1972) tarafından ispatlanmıştır. BMHD-F problemi *NP-tam* uygunluğunda olduğundan, BMHD probleminin optimizasyon versiyonları *NP-zor* problem sınıfındadır (Wee and Magazine, 1982; Scholl, 1999). Dolayısıyla problemin ilgili tüm genelleştirilmiş versiyonları aynı özelliklere sahiptir.

### 1.2.2. Genelleştirilmiş Montaj Hattı Dengeleme Problemi

BMHDP'nin bazı varsayımlarının değiştirilmesi ve genişletilmesiyle elde edilecek GMHDP genel özellikleri aşağıdaki gibi açıklanabilmektedir (Boysen, Fliedner, Scholl, 2007):

- Üretimi yapılacak bir veya daha fazla sayıdaki ürünler tümüyle bilinmektedir
- İşlem alternatifleri önceden bilinmektedir
- Hattın akış yönü ileri ve geri yönde çift yönlüdür
- Görevlerin işlem sıraları öncelik ilişkilerine bağlıdır
- Belirli bir planlama dönemi için üretim miktarı hedefi karşılanacak şekilde hat düzenlenmiştir.

BMHDP'nin temel varsayımı olan tek bir ürünün üretilmesi varsayımının esnetilmesiyle çok modelli ve/veya karma modelli MHDP elde edilir. Ayrıca, belirli bir görev grubunun aynı istasyona atanmasını engelleyen alan kısıtları ve benzer şekilde belirli bazı görevlerin birlikte aynı istasyonda gerçekleştirilmesi gerekliliğini belirten görev birliktelik kısıtları da probleme yeni ve farklı kısıtlar ekleyen diğer varsayımlardır. Paralel istasyonlar, pozisyona bağlı kısıtlamalar ve tampon stok alanları kullanımı gibi alternatif süreçler de BMHDP'ni genişleten diğer faktörlerdir. Besleme hatları, transfer hatları ve geri dönüşlü hatlar ise hattın akış yönünün tek yanlı olması varsayımını değiştiren diğer uygulamalardır.

BMHDP, gerçek dünya problemleriyle küçük miktarda benzerlik gösteren basitleştirilmiş bir modeldir. Bu yüzden daha gerçekçi özellikler (çoklu veya karışık modelli hatlar, aparat seçme problemleri, paralel istasyonlar, u-tipi hatlar, stokastik zamanlar v.b.) içeren ve BMHDP modelinin kısıtlamalarının üstesinden gelen GMHDP konusunda çalışmalar artmaktadır. GMHDP modelinde yaygın olarak kullanılan amaç, montaj hattı maliyetinin minimizasyonu ve kârın maksimizasyonudur. Pinto, Dannenbring ve Khumawala (1983) çalışmasında görevlerin istasyona atanmasında süreç alternatiflerinin dikkate alınarak sabit maliyetlerin ve işçilik maliyetlerinin en küçüklenmesine çalışmışlardır. Amen'in (2000b; 2006) çalışmalarında MHD problemlerindeki maliyetler detaylı bir şekilde tartışılmıştır. GMHDP ile ilgili literatür ise Becker ve Scholl (2006) tarafından özetlenmiştir.

### 1.2.3. Montaj Hattı Dengeleme Problemlerinin Diğer Optimizasyon Problemleri İçerisindeki Yeri

Çok çeşitli türdeki MHD problemlerinin temelini oluşturan BMHDP, *sıralama ve çizelgeleme* genel problem sınıfında yer almaktadır (Baker, 1974). Sıralama ve çizelgeleme problemleri arasındaki temel fark, çizelgeleme sürecinin bir zaman ölçeğinde gerçekleştirilmesidir. Dolayısıyla sıralama problemleri de bir tür çizelgeleme problemi olarak değerlendirilebilir ve zaman ölçeği olmasa da görevler arasındaki öncelik ilişkileri ile karmaşık bir çizelgeleme problemi haline gelebilmektedir. Bu türdeki problemlere en güzel örneklerden birisi *tek makineli çizelgeleme* problemidir. Örneğin, BMHDP'deki öncelik ilişkileri kısıtları yerine, her bir görevin hemen önceki öncül görevi mümkün olan en erken istasyona atanması şartı getirilirse, problem *tek kaynak kısıtlı çizelgeleme* problemi haline gelecektir (Baybars, 1986).

BMHDP olarak değerlendirilebilecek diğer bir problem sınıfı da *kutu paketleme (bin packing)* problemidir. Verilen sınırlı sayıdaki parçanın (görevin), her biri belirli kapasiteye sahip minimum sayıdaki kutuya atanması problemi olan kutu paketleme problemi, öncelik ilişkileri olmayan BMHDP olarak değerlendirilebilmektedir. Birçok bilimsel araştırmada ele alınan kutu paketleme problemi, *üst sezgisel (hyper heuristics)* alanında yapılan çalışmaların da ilk uygulama alanlarından olmuştur. Kutu paketleme problemiyle ve dolayısıyla BMHDP ile benzer özelliklere sahip ve literatürde çok iyi bilinen bir diğer problem sınıfı ise tek bir kutu ve paketlenecek belirli boyutlardaki parçaların belirli bir amacı en iyileyecek şekilde seçilmesi problemi olan *sırt çantası (Knapsack)* problemidir. Bu problem türlerine ilave olarak, verilen belirli sayıdaki parçaların belirli bir amaca göre *gruplandırılması/bölümlendirilmesi* problemi de BMHDP ile büyük benzerlikler taşımaktadır.

Yukarıda açıklanan problem sınıflarının birbirleriyle olan benzerlikleri nedeniyle, bir problemin çözümünde kullanılabilen bir çözüm yaklaşımının diğer problemlerin de çözümünde veya çözümünün bir parçası olarak kullanılması mümkün olabilmektedir. Örneğin, Talbot ve Patterson (1984) çalışmasında BMHDP-1 problemini çözmek için tekrarlı olarak *sırt çantası* problemini çözmüştür. Benzer şekilde, Wee ve Magazine (1982) çalışmasında BMHDP çözümünde *kutu paketleme* sezgisellerini kullanmışlardır. Bu tez çalışması kapsamında da çizelgeleme ve kutu paketleme problemlerinin

çözümünde oldukça başarılı uygulama sonuçlarına sahip olan üst sezgisel yaklaşımın stokastik paralel MHD problemlerinin çözümünde kullanılması incelenmiştir.

### 1.3. Montaj Hattı Dengeleme Problemlerinin Sınıflandırılması

BMHDP, montaj hattı konfigürasyonunda görevlerin istasyonlara atanması temel probleminin karmaşıklığını azaltan sınırlayıcı varsayımlar kümesine dayanır. Pratikteki montaj hatlarını dengelemek ise planlama probleminin yapısını önemli ölçüde etkileyelebilen çok daha geniş ilave teknik veya organizasyonel yönlerin dikkate alınmasını gerektirir. Literatürde montaj hatlarının; paralel iş istasyonları ve görevler, maliyet sinerjileri, operasyon alternatifleri, bölgesel kısıtlamalar, stokastik ve sıraya bağlı operasyon zamanları ve u-tipi montaj hatları gibi çok sayıda farklı yönü ele alınmıştır. Montaj hatları ile ilgili güncel bilgiler ve montaj hatlarının sınıflandırması ile ilgili detaylı bilgiler Becker ve Scholl (2006) ile Boysen, Fliedner ve Scholl (2007) çalışmalarında bulunabilir. Şekil 1.2'de montaj türleri; model sayısına, hattın kontrolüne, yapılan işin sıklığına, otomasyon seviyesine ve yapılan işe göre sınıflandırılmıştır (Boysen, Fliedner, Scholl, 2007).

| Montaj Hatları Sınıflandırma Kriteri | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Model Sayısı | Hat Kontrolü | İşin Sıklığı | Otomasyon Seviyesi | İş Türü |
| Tek model | Sabit hızlı | İlk defa montajlama | Manuel hatlar | Otomobil üretimi |
| Karışık model | Değişken hızlı, eşzamansız | Yeniden montajlama | Otomatize hatlar | Diğer örnekler |
| Çoklu model | Değişken hızlı, eşzamanlı | | | |

Şekil 1.2. Montaj hatlarının sınıflandırılması

MHD konusunun yapılandırılmasına yönelik güncel bir girişim de Boysen, Fliedner ve Scholl (2007) tarafından önerilen sınıflandırma şemasıdır. Bu şema makine çizelgeleme için kullanılan [α | β | γ] üçlü notasyonunun MHD'ye bir uyarlamasıdır. Belirli bir montaj sistemi ilgili tüm uzantıları ile birlikte üçlü olarak karakterize edilebilir (Boysen, Fliedner, Scholl, 2007).

Bu üçlü gösterimin birinci parametresi olan $\alpha$ öncelik ilişkileri grafiğine bağlı özellikleri işaret etmektedir. Öncelik ilişkileri grafiği ile belirlenen özellikler; ürüne bağlı öncelik grafikleri (tek model, çok model, karma model), öncelik ilişkileri grafiğinin yapısı (doğrusal, yayılımlı, yakınsayan, ıraksayan, döngüsel ve döngüsel olmayan), görev zamanlarının türü (deterministik, stokastik ve dinamik değişen görev zamanları), sıralamaya bağlı görev zamanı artışları (görev zamanlarındaki ardışık direkt ilişkilerden kaynaklanan artışlar, dolaylı ilişkilerden kaynaklanan artışlar, sıralamadan bağımsız görev zamanları), atama kısıtları (bazı görevlerin aynı istasyona atanması/atanmaması, belirli görevlerin belirli istasyonlara atanması/atanmaması, bazı görevler arasındaki mesafenin min/maks olması, hiçbir atama kısıtının bulunmaması) ve üretim süreci alternatiflerine göre (öncelik ilişkileri arasındaki alternatifler, görev zamanları arasındaki alternatifler, süreç maliyetleri arasındaki alternatifler) 6 farklı kriter açısından değerlendirilmiştir.

İkinci parametre olan $\beta$ istasyon ve hat özelliklerini işaret etmektedir. İstasyon ve hat özellikleri ile ilgili 6 kriter; iş parçasının hareketi, hattın yerleşim düzeni, paralellik durumu (hat, görev veya istasyon açısından), kaynakların kullanım ve ataması, istasyona bağlı zaman artışları ve hat konfigürasyonunun diğer özellikleri (tampon bölgeler, besleyici hatlar ve hat yönünün değişimi) olarak değerlendirilmiştir.

Üçüncü ve son parametre olan $\gamma$ parametresi MHD probleminin çözümü esnasında ulaşılmak istenen amaçlarla ilgilidir. MHD problemlerinde sıklıkla kullanılan amaçlar; istasyon sayısının minimizasyonu (*min m)*, çevrim zamanının minimizasyonu *(min c),* hat dengesinin maksimizasyonu *(maks E),* maliyet fonksiyonunun minimizasyonu *(min Co),* kâr fonksiyonunun maksimizasyonu *(maks Pr)* ve istasyon yüklerinin düzgünleştirilmesi olarak nitelendirilebilir. Çok amaçlı optimizasyon durumunda ise bu tek amaçlardan kullanılacak olanlar seçilerek bir küme oluşturulabilir.

### 1.3.1. Amaçları Açısından Montaj Hattı Dengeleme Problemleri

BMHDP varsayımları altında MHD'de amaç, üretim hızını veya çıktı miktarını arttırmaya yarayan çevrim zamanının veya istasyon sayısının en küçüklenmesi olarak belirlenmektedir. Ancak MHDP için genel bir amaç tanımlanacak olursa, sadece çıktı miktarını arttıran çevrim zamanı veya istasyon sayısının değil aynı zamanda tüm süreci

etkileyen faktörlerin de dikkate alınması gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Özellikle de montaj hatlarının seri üretimin önemli bir aracı olması, üretim hedeflerinin yanında maliyet faktörlerini de hatırlatmaktadır.

Montaj hatları ürünlerin büyük miktarlarda seri şekilde üretildiği imalat sistemleri olduğundan, genellikle uzun dönemli ve yüksek maliyetli yatırım kararlarına dayanırlar. Ayrıca hattın çalıştırılması ile ücretler, malzeme maliyeti, hazırlık, stoklama ve başarısızlık maliyetleri gibi kısa dönemli işletme faaliyetleri ortaya çıkmaktadır (Scholl, 1999; Becker and Scholl, 2006).

Kurulum ve işletme maliyetleri ile elde edilen gelirler, temelde kullanılan çevrim zamanına ve istasyon sayısına bağlıdır (Deckro, 1989). Bu şekildeki maliyet temelli modeller güçlü bir şekilde BMHD-E modeliyle ilişkilidir. Diğer problemler BMHD-1 veya BMHD-2 problemlerinin iteratif olarak çözülmesiyle sonuçlandırılır. Dolayısıyla aynı çözüm yaklaşımı maliyet veya kâr odaklı modeller için de kullanılabilir. Ancak bazı durumlarda maliyet ve/veya kârı birleştiren modeller daha uygun olabilmektedir. Bu durum özellikle dengeleme probleminin süreç veya teçhizat alternatifini seçme problemi ile bağlantılı olduğu durumlarda daha da anlamlı olmaktadır. MHDP'lerini amaçları açısından, maliyet odaklı ve kâr odaklı olmak üzere ikiye ayırabiliriz.

Maliyet odaklı modellerde; bir istasyonun çalıştırılmasıyla, ilgili istasyonda gerçekleştirilen farklı ücret oranlarına sahip görevlerden maksimum ücret oranına sahip olan görevin ücretinin, istasyonun işletme maliyeti olduğu varsayılır. Bu varsayımın temelinde, istasyona atanan en kritik görevin operatörlerin taşıması gereken yeterlilik seviyesini belirlemesi yatmaktadır. Burada amaç, tüm istasyonlardaki toplam ücret oranının minimizasyonudur (Rosenberg and Ziegler, 1992). Belirlenen bu ücret oranının çevrim zamanı ile çarpılmasıyla ürün başına üretim maliyetleri elde edilir. Eğer tüm görevler aynı ücret oranına sahipse değerlendirilecek amaç istasyon sayısının minimizasyonu haline dönüşür. Sonuçta problem BMHD-1 modelinin direkt olarak genelleştirilmesidir. Bu problemin çözümü için Rosenberg ve Ziegler (1992) öncelik kurallarına bağlı sezgiseller tanımlamış ve değerlendirmişlerdir.

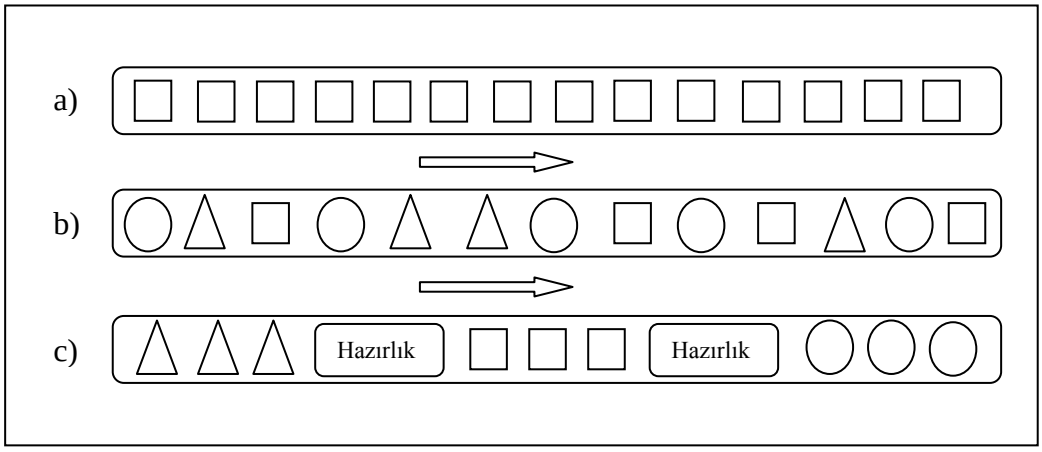
Amen (2000a) çalışmasında, her bir istasyonun önceden belirlenmiş sabit bir yatırım gerektirdiği varsayımı ile sermayenin istasyonla bağlantılı maliyetini değerlendirerek problemi genişletmiştir. Bu problem için istasyon odaklı yapılandırma şeması ve lazer arama stratejisine dayanan topolojik görev isimlendirme kullanarak mutlak bir dal sınır yaklaşımı hazırlamıştır. Aynı problem için Amen (2000b; 2001) çalışmalarında istasyon odaklı öncelik kurallarıyla maliyet odaklı dinamik öncelik kurallarına dayanan çözüm yaklaşımları geliştirerek, bunları mevcut çözüm yaklaşımları ile rastgele oluşturulmuş geniş problem örnekleri üzerinde kıyaslamıştır. İstasyon boş zamanını ve istasyon ücret oranındaki değişimi kontrol eden yeni yaklaşımın, başarılı şekilde çalıştığı görülmüştür. Malakooti (1991; 1994) ile Malakooti ve Kumar (1996) çalışmalarında kapasite ve maliyet odaklı amaçlara sahip çok amaçlı MHDP'ni değerlendirmişler ve etkili alternatif geliştirilmesi, interaktif yaklaşımlar ve hedef programlamayı içeren farklı çözüm yaklaşımları önermişlerdir.

Kâr odaklı modellerde, maliyet ve kâr kavramları birbiri yerine kullanılabilen araçlar olarak değerlendirilmektedir. Bilinen maliyetleri dikkate alan ve bu maliyetin belirli bir oranının üzerindeki kabul edilebilecek değerler, kâr için bir ölçüt olabilir. Nitekim Zapfel (1975), operasyonel giderler, boş zaman maliyetleri, malzeme maliyetleri ve tanıtım giderlerini sabit satış fiyatı olarak değerlendirerek, her bir vardiya için toplam katkı oranını maksimize etmeye çalışmıştır. Farklı istasyonlar için bireysel sabit maliyetleri değerlendiren benzer bir model de Rosenblatt ve Carlson (1985) tarafından önerilmiştir. Bu model daha sonra Martin (1994) tarafından, düzenlenmemiş hatlarda ara stokları ve bu stoklarla ilgili maliyet bileşenlerini kapsayacak şekilde genişletilmiştir.

### 1.3.2. Model (Ürün) Sayısı ve Türüne Göre Montaj Hatları

Montaj hatları geleneksel yaklaşımda kütle üretiminin bileşenleri olarak yüksek derecede standartlaştırılmış, neredeyse tek bir ürünün üretimi için kullanılan üretim sistemleri olarak değerlendirilmektedir. Ancak müşteri taleplerindeki değişimler, pazarlama ihtiyaçları ve teknolojik imkânların artması, montaj hatlarında bir ürünün farklı versiyonları olarak çeşitli ürünlerin üretilmesini sağlamış ve hatta birbirinden tamamen bağımsız farklı ürünlerin üretilmesini de kapsayacak şekilde esnek bir üretim sistemi haline getirmiştir.

Tek bir ürünün montajının yapıldığı tek modelli hatlardan başka birden fazla ürünün karışık şekilde üretildiği montaj hatları da söz konusudur. Birimlerin karışık olarak üretilmesinde iki çeşit montaj hattı ortaya çıkmaktadır (Şekil 1.3). Karma modelli hatlarda, farklı modellere ait birimler önceden belirlenmiş karma bir sıralamada montaj hattı üzerinde işlem görürler (Bukchin; Dar-El; Rubinovitz, 2002). Çok modelli hatlarda ise her biri sadece bir model veya benzer modeller grubunun birimlerini içeren, aralarda hazırlık işlemleri olan partiler sırasında üretim yapılır.




Şekil 1.3. Ürün sayısı ve türüne göre montaj hatları (a) Tek modelli montaj hattı, (b) Karma modelli montaj hattı, (c) Çok modelli montaj hattı

***Tek Modelli Montaj Hattı Dengeleme Problemleri***

Tek modelli montaj hatlarında tüm iş parçaları benzersizdir ve ilgili ürünün üretiminde görev alırlar. Geleneksel formunda montaj hatları tek bir ürünün büyük hacimli üretiminde kullanılmıştır. Günümüzde, yeterli çeşidi olmayan ürünler, montaj sisteminin kârlı bir kullanımını sağlayabilecek şekilde nadiren yeterli talebe sahip olabilmektedir. İleri üretim teknolojileri, kabul edilebilir hazırlık zamanları ve maliyetler ile hazırlık operasyonlarını mümkün kılmaktadır. Böylece aynı hatta birden fazla ürün montaj edilirken, montaj sistemi tek modelli bir hat olarak ele alınabilmekte ve hazırlık zamanlarının göz ardı edilebileceği kabul edilmektedir (Boysen, Fliedner, Scholl, 2007). Tek modelli üretim ve BMHDP ile ilgili çalışmalar Scholl ve Becker (2006) ile Becker ve Scholl (2006) tarafından özetlenmiştir.

***Karma Modelli Montaj Hattı Dengeleme Problemleri***

Karma modelli montaj hatları, standartlaştırılmış bir ürünün çeşitli modellerini karışık bir sırada üretir. Karma modelli üretimde tüm modellerin aynı temel ürünün varyasyonları olduğu varsayılır ve sadece opsiyonlar olarak isimlendirilebilen spesifik ürün özelliklerinin farklılaştığı kabul edilir. Nispeten farklı özelliklere sahip bu modellerin hazırlık zamanlarının ihmal edilebilecek kadar küçük olduğu varsayılır.

Modeller; boyut, renk, kullanılan malzeme veya teçhizat, gerektirdiği farklı görevler, görev zamanları ve öncelik ilişkileri gibi faktörlere bağlı olarak kendi aralarında farklılık gösterebilir. Örneğin, otomobil üretiminde manuel cam kaldırma mekanizması ile elektrikli cam kaldırma mekanizmasının montaj zamanları farklılık gösterecektir. Bu şekilde daha büyük görev zamanı gerektiren modeller ardı ardına işlem görecek olursa çevrim zamanının aşılması ve dolayısıyla hattın durması, fazladan işçi kullanımı, fazladan işlem ihtiyacı gibi faaliyetler ve maliyet unsurları söz konusu olabilecektir (Wild, 1972; Boysen, Fliedner, Scholl, 2008). Öte yandan yüksek görev zamanlı görevler ve daha düşük görev zamanlı işlemlerin sırasıyla işlem görebileceği bir üretim sırası bulunabilirse istasyonların aşırı yüklenmesi engellenebilecektir. Böylece hat dengeleme probleminden başka *sıralama* problemi de ortaya çıkmaktadır (Yano and Bolat, 1989; Sumichrast and Russell, 1990; Sumichrast, Russell, Taylor, 1992; Bard, Dar-El, Shtub, 1992; Merengo, Nava, Pozetti, 1999; Tsai, 1995). Görev zamanlarındaki bu farklılıklar hattın verimliliği için modellerin sıralamasının önemini arttırmaktadır.

Model ne olursa olsun iş yüklerinin, aynı istasyon zamanını ve teçhizatı gerektirdiği bir hat dengesi bulmak oldukça zordur. Bu yüzden montaj hattı, yerel çevrim zamanı kısıtlamaları açısından olduğu kadar operatörün özellikleri ve teçhizat açısından da yeterince esnek olmalıdır. Ayrıca tek modelli montaj hattı durumundan farklı olarak çevrim zamanı, her bir istasyondaki görevlerin en büyük görev zamanına göre değil ortalama zaman (istenilen üretim oranına bağlı olarak tanımlanan) açısından değerlendirilmektedir. Farklı modellerin istasyon zamanlarının her bir istasyon için düzgünleştirilmeye (yatay dengeleme) çalışılmasından dolayı, karma modelli dengeleme problemi BMHDP'den daha zor bir problemdir (Merengo, Nava, Pozetti, 1999).

Karma modelli MHDP'nin modellenmesi ve çözümü için iki temel yaklaşım bulunmaktadır. Birincisi; problemin tek modelli montaj hattı dengeleme problemine indirgenmesi, ikincisi ise karma model kapsamındaki sıralama problemine yatay dengelemeyle çözüm aranmasıdır.

Karma modelli problemin tek modele indirgenmesi için birleştirilmiş öncelik diyagramı kullanılır (Thomopoulos, 1970; Macaskill, 1972; Van Zante-de Fokert and de Kok, 1997). Burada belirli modellerdeki çeşitli görev zamanlarının ortalaması, tahmin edilen model karışımında görevlerin ayrı ayrı ortaya çıkmasına bağlıdır ve tek bir öncelik grafiği oluşturmak üzere birleştirilir. Eğer öncelik ilişkileri modeller arasında farklıysa bu süreç düğümlerin gerekli sayıda tekrarlanmasıyla (aynı görev için birden fazla düğümün oluşturulması) çözülebilecek çatışmalara neden olabilir (Ahmadi and Wurgaft, 1994). Birleştirilmiş öncelik diyagramının kullanılması, farklı modellerde gerçekleştirilecek benzer görevlerin her zaman aynı istasyona atanmasını gerektirir. Bu düşüncenin gerekçesi ise benzer görevlerin genellikle belirli kaynakları gerektirmesidir. Aksi takdirde aynı hat üzerindeki farklı istasyonlarda gerçekleştirilecek aynı görevler için aynı kaynakların satın alınması ve kurulmasına ihtiyaç duyulacaktır (Thomopoulos, 1967; Boysen, Fliedner, Scholl, 2008).

Karma modelli sıralama problemi, kısa dönemli planlamada verilen üretim programındaki tüm modellerin taleplerini karşılayacak şekilde bazı amaçları optimize eden model birimlerinin sıralamasının bulunması olarak tanımlanabilir. Ortaya çıkan sıralama problemi için tüm modellerde istasyonların iş yüklerini eşit olarak dengelemeye çalışan yatay dengeleme amacı kullanılır (Scholl, 1999). Yatay dengelemede tüm modeller için istasyon zamanlarındaki varyansın en küçüklenmesi (Merengo, Nava, Pozetti, 1999) yanında farklı amaçlar da kullanılabilir (Buckhin, 1998; Scholl, 1999; Matanachai and Yano, 2001).

Dengeleme ve sıralama problemleri önemli ölçüde birbiriyle bağlantılıdır. Hat dengesi, görevlerin istasyonlara atanmasını ve dolayısıyla her bir istasyonun ve modelin iş yükünü belirlerken; verilen model karışımının üretim sıralaması istasyonların aşırı yüklemesini minimize edecek şekilde ayarlanmaya çalışılır. Ulaşılan hat dengesi için aşırı yüklemenin miktarı başlı başına bir verimlilik ölçüsüdür. Bu yüzden bazı

araştırmacılar bu her iki planlama probleminin eş zamanlı değerlendirilmesini tercih etmektedirler (McMullen and Frazier, 1998; Kim, Kim, Kim, 2000b; 2000c; 2006; Miltenburg, 2002; Sawik, 2002). Öte yandan dengeleme kararının orta – uzun dönemli bir planlama kararı olması ve model karışım sırasının ise kısa (günlük) planlama kararı olmasından dolayı, sıralama kararının hiyerarşik planlama yaklaşımı ile daha üst seviyedeki dengelemede olmasını beklemek daha anlamlı görülmektedir (Scholl, 1999; Boysen and Fliedner, 2008).

***Çok Modelli Montaj Hatları***

Çok modelli montaj hatlarında farklı ürünler partiler halinde üretilirler. Her bir parti sonunda farklı modele geçerken hazırlık zamanı ihtiyacı ortaya çıkar. Dolayısıyla çok modelli montaj hattı dengeleme problemi sadece sıralama problemiyle değil aynı zamanda *parti büyüklüğü belirleme* problemi ile de bağlantılıdır (Burns and Daganzo, 1987; Dobson and Yano, 1994). Sıralama ve parti büyüklüğü belirleme problemlerinin her ikisi de kısa dönemli planlama problemi olarak ele alınabilecek karar problemleridir.

Çok modelli montaj hatları esasen karma modelli montaj hatlarıyla birlikte değerlendirilmesine karşın bunlar arasında dikkate değer farklılıklar da bulunmaktadır. Bu farklılıkların başında, karma modelli montaj hatlarında üretilen ürünlerin parti büyüklüğünün bir birim olması gelmektedir. Ayrıca bu tek birimler arasındaki hazırlık zamanları ihmal edilebilirdir. Çok modelli montaj hatlarında ise üretilen ürünlerin parti büyüklüğü oldukça büyüktür ve bu partiler arasındaki hazırlık zamanları göz ardı edilemeyecek kadar önemli bir maliyet unsurudur. Diğer bir farklılık ise karma modelli üretimde çoğu zaman istasyon boş zamanının en küçüklenmesine çalışılırken, çok modelli hatlarda amaç değişim ve hazırlık zamanlarını da dikkate alan bir maliyet fonksiyonunun en küçüklenmesidir (Buxey, Slack, Wild, 1973; van Zante- de Fokkert and de Kok, 1995).

Çok modelli montaj hatlarının dengelenmesi için Buxey, Slack ve Wild (1973) iki yaklaşım önermişlerdir. Birinci yaklaşım yeterince büyük parti büyüklüğü olması durumunda uygulanmakta ve her bir modelin ayrı ayrı değerlendirilmesini esas almaktadır. İkinci yaklaşımda ise hat öncelikle en sık üretilen ürüne göre dengelenmekte sonra diğer ürünlere yönelik revizyonlar yapılmaktadır. Günümüz tüketim eğilimleri ve

üretim imkânları doğrultusunda artan parti büyüklükleri ve ürün çeşitliliği ihtiyacı, karma modelli ve çok modelli üretimlerin birlikte değerlendirilmesine yönelik uygulamaların önem kazanmasına neden olmuştur.

### 1.3.3. Görev Zamanlarının Değişkenliğine Göre Montaj Hatları

Montaj hatlarının sınıflandırılmasında dikkate alınan diğer bir önemli özellik de görev zamanlarının değişkenliğidir. Görev zamanlarındaki değişkenliğin yeterince küçük olduğu durumlarda görev zamanlarının deterministik olduğu kabul edilebilir (Johnson, 1983). İnsanın çalışma oranındaki düzensizlikler, yetenek, motivasyon ve karmaşık sistemlerin arıza duyarlılığı gibi faktörlerden kaynaklanabilen görev zamanlarındaki önemli sayılabilecek değişkenlikler, stokastik görev zamanlarının dikkate alınmasını gerektirebilmektedir (Buzacott, 1990; Robinson, McClaion, Thomas, 1990; Hillier and So, 1991; Pike and Martin, 1994). Bir çevrimden diğerine üretim zamanlarındaki değişkenliğin diğer nedenleri olarak da çalışanların yorgunluğu, dikkatlerinin dağılması, çalışma esnasında oyalanma, iş tatminsizliği, makine ve teçhizatın bakımsızlığı, ham madde kusurları ve montajı yanlış yapılmış parçalar gösterilebilir. Stokastik zaman değişkenliğinin haricinde, öğrenme etkisinden veya üretim sürecindeki başarılı iyileştirmelerden kaynaklı görev zamanlarında sistematik azalışlar söz konusu olabilmektedir (Boucher, 1987; Chakravarty, 1988).

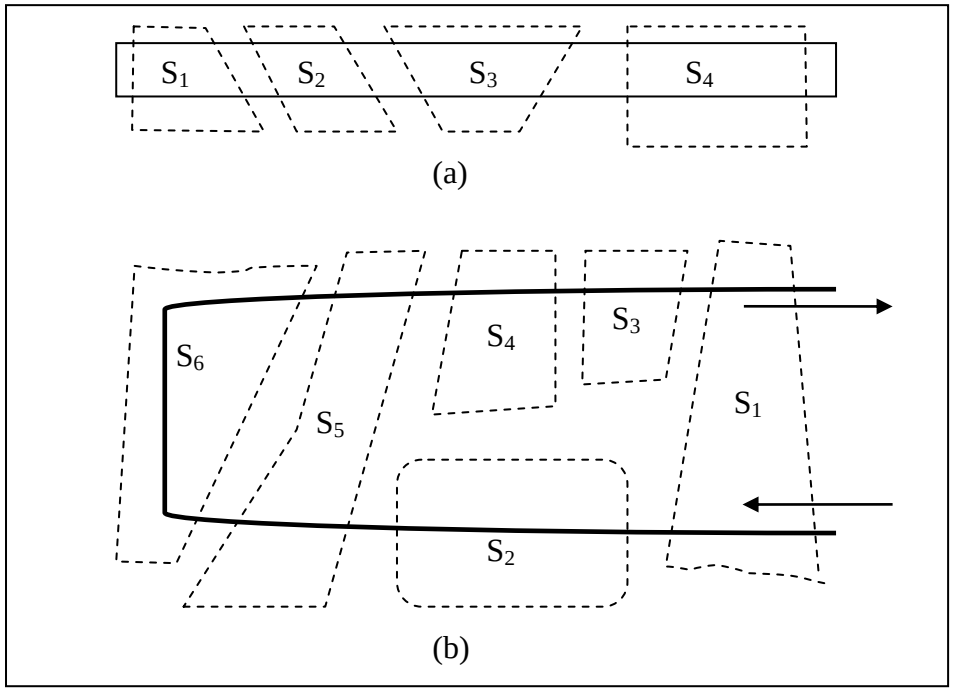
MHDP için önerilen çözüm yaklaşımlarının uygulamada yaygın olarak kullanılmamasının sebeplerinden birisi gerçek montaj hatları şartlarının geliştirilen modellere yeterince yansıtılamaması olarak gösterilmiştir (Ghosh and Gagnon, 1989). BMHDP'nin temel varsayımlarından olan "görev zamanlarının sabit ve önceden biliniyor olması" varsayımı, problemi gerçeklikten uzaklaştıran temel faktörlerdendir. Montaj hatlarında kullanılan zamanların deterministik olduğu kabulü, transfer hatları gibi daha otomatize olmuş sistemler için geçerli olabilmektedir. Operatörlerin insan ağırlıklı olduğu montaj sistemlerinde ise görev zamanları bir çevrimden diğerine farklılıklar gösterebileceğinden (Buzacott, 1990; Scholl, 1999), görev zamanlarının stokastik olarak ele alınmasıyla elde edilecek sonuçların gerçeğe daha yakın olması sağlanabilecektir. Stokastik görev zamanlı MHDP ile ilgili detaylı açıklamalar, problemin modellenmesi ve geçmiş çalışmalar ile ilgili bilgiler, ikinci bölümde ayrıntılı olarak verilmiştir.

### 1.3.4. Hattın Şekline Göre Montaj Hatları

Akış tipi üretim sistemlerinde yerleşim düzeni genellikle malzemenin akışına göre önceden belirlenir. Geleneksel yerleşim düzeninde montaj istasyonları, malzeme taşıma sistemi boyunca doğrusal seri bir hat olarak konumlandırılmıştır (Şekil 1.4). Bu tip yerleşimler sınırlı bir esnekliğe sahiptirler. Montaj hattının iki ucunun birbirine yakın aynı tarafta bulunduğu ve "U" şeklinde bir yapıya sahip hatlara ise u-tipi montaj hatları denilmektedir. Bu tip hatlarda istasyonlar birbirlerine dönük olarak hattın iki yüzünde eşzamanlı olarak çalışabilmektedir. İş zenginleştirme ve genişletme çalışmalarıyla elde edilecek iyileştirmelerle ve daha fazla sayıda görev – istasyon kombinasyonuyla u-tipi hat tasarımında daha iyi istasyon yük dengesi elde edilebilmektedir (Miltenburg and Wijngaard, 1994; Monden, 1998; Scholl and Klein, 1999).

***U-tipi Hat Yerleşimi:***

U-tipi MHDP ilk olarak Miltenburg ve Wijngaard (1994) tarafından ifade edilerek modellenmiştir. Hattın u-şeklinde tasarlanmış olmasından dolayı, aynı çevrim içerisinde farklı pozisyonlardaki iki iş parçası üzerinde çalışılabilme imkânı doğmaktadır (Şekil 1.4).




Şekil 1.4. Hattın şekline göre montaj hatları. a) Düz Montaj hattı ve istasyonlar, b) U-tipi Montaj Hattı ve İstasyonlar

U-tipi MHDP'nin BMHDP'den en büyük farklılığı, *k* istasyonunun sadece tüm öncül görevleri tamamlanmış görevleri değil aynı zamanda tüm ardıl görevleri tamamlanmış görevleri de içerebiliyor olmasıdır. İki farklı çevrimde de aynı iş parçası üzerinde işlem yapan istasyonlar *çapraz/karşıya geçişli* istasyon olarak adlandırılır (Şekil 1.4-b'de istasyon 1, istasyon 5 ve istasyon 6). U-tipi montaj hatları sundukları daha fazla sayıdaki görev – istasyon kombinasyonu ile daha yüksek seviyede hat dengeleri elde edilmesi imkânı sunarlar.

U-tipi MHDP ile ilgili olarak birçok araştırma yapılmıştır. Verilen çevrim zamanında istasyon sayısını en küçüklemeyi amaçlayan u-tipi MHDP için genetik algoritmalar (Ajenblit and Wainwright, 1998), tamsayılı programlama ve CPLEX (Urban, 1998) ve tavlama benzetimi (Erel, Sabuncuoğlu, Aksu, 2001) yaklaşımları kullanılmıştır. Scholl ve Klein (1999) çalışmalarında, BMHDP için geliştirilen SALOME1 (Scholl and Klein, 1997) prosedürünün genişletilmiş versiyonu olan ULINO yaklaşımını açıklayarak u-tipi MHDP'ne uygulamışlardır.

İstasyon sayısının önceden belirli olduğu ve görev zamanlarının rastgele değişkenlerle ifade edildiği stokastik u-tipi MHDP için Nakade, Ohno ve Shanthikumar (1997) sınırlar geliştirmiş ve çevrim zamanını yaklaşık olarak hesaplamıştır. Urban ve Chiang (2006) ise çalışmalarında stokastik görev zamanlı u-tipi MHDP için şans kısıtlı, doğrusal parçalı tamsayılı programlama modeli geliştirmiş ve küçük boyutlu problemler için CPLEX ile çözümler elde etmiştir.

Üretim hattında arıza meydana geldiğinde hattın şeklinin etkinlik üzerindeki etkileri Miltenburg (2000) tarafından araştırılmıştır. İstasyonlar arasındaki tüm bağlantı noktalarına tampon stok alanları oluşturulduğunda, u-tipi hat yapısının düz hat yapına eşit veya daha iyi sonuçlar verdiğini ortaya koymuştur. Bu durum u-tipi hat yapısındaki karşıya geçişli istasyonların düz hatlara göre daha fazla bağlantı noktası ve dolayısıyla daha fazla tampon stok alanı sağlamasıyla açıklanmış ancak bu tampon stok alanlarının oluşturma ve kullanılma maliyetleri dikkate alınmamıştır.

Miltenburg (1998) ise verilen çevrim zamanında *N* adet u-tipi montaj hattının dengelenmesini ele almıştır. Burada amaç her bir istasyonun en fazla iki adet komşu hattan görevler içerecek şekilde belirlenmesidir. Önerilen dinamik programlama algoritmasıyla küçük boyutlu problemler için optimal sonuçlar elde edilmiştir. Bir diğer çalışmada ise Sparling (1998) 3 montaj hattından görevleri içerebilecek çok hatlı istasyonların bulunmasına yönelik bir algoritma geliştirmiştir.

***Paralel Hatlar, İstasyonlar ve Görevler***

Her biri belirli bir ürün veya ürün grubunun üretimini gerçekleştiren tümüyle paralel hatlar, yüksek üretkenlikle beraber olası hatalara ve arızalara karşı daha esnek üretim imkânları sunarlar (Becker and Scholl, 2006). Birden fazla hattın kullanımı durumunda, paralel hat sayısının belirlenmesi ve hangi ürünlerin hangi hatta üretileceğinin belirlenmesine dair yeni karar problemleri ortaya çıkar (Lehman, 1969; Geoffrion and Graves, 1976; Globerson and Tamir, 1980; Ahmadi, Dasu, Tang, 1992). Aslında tek bir hatta da paralelleştirmenin avantajları paralel istasyonlar (iş parçalarının aynı işi yapan birden fazla sayıda operatöre paylaştırılması) kurulmasıyla elde edilebilir. Aynı işi yapan birden fazla çalışan demek aynı işi yapan birden fazla makine kullanılması anlamına da gelmektedir (Becker and Scholl, 2006). Paralel istasyonların avantajlarından birisi de istenilen çevrim zamanından daha büyük zamanlı görev(ler) söz konusu olduğu durumlarda global çevrim zamanının azaltılmasını sağlamasıdır (Freeman and Jucker, 1967; Buxey, 1974; Pinto, Dannenbring, Khumawala, 1981; Sarker and Shanthikumari, 1983; Bard, 1989; Daganzo and Blumenfeld, 1994). Çevrim zamanını en büyük zamanlı görevin süresinden daha aşağıya çekmenin bir yolu da paralel görevler kullanmaktır (Arcus, 1966; Pinto, Dannenbring, Khumawala, 1975; Inman and Leon, 1994). Sıralı görevler, tamamıyla farklı iş parçaları üzerinde döngüsel olarak gerçekleştirilecek şekilde, seri hattın farklı istasyonlarına atanır.

Belirlenen çevrim zamanından daha büyük süreye sahip görev bulunması durumunda, montaj hatlarının genel varsayımlarından olan "en büyük zamanlı görevin süresi çevrim zamanını aşamaz" varsayımı ihlal edilmiş olacaktır. Paralel istasyonlar istasyon zamanının arttırılmasına imkân sağlayarak ortaya çıkacak "çevrim zamanından büyük görev zamanlarının bulunması" durumuna çözüm getirebilmektedir (Buxey, 1974). Paralel yapının en basit örneği olan istasyonların tekrarı durumunda, aynı görevleri

gerçekleştiren ve aynı teçhizatla donatılmış özdeş iki istasyon bulunur. Tekrarlı istasyonlar mevcut geçerli çevrim zamanının iki katı olan yerel bir çevrim zamanına sahiptir. Bu artan çevrim zamanından dolayı, uygun atanabilir görevlerin sayısı paralel istasyonlar için büyük ölçüde artmaktadır (Becker and Scholl, 2006).

Paralel istasyon yapısının beraberinde getireceği basit maliyetlerdeki artıştan dolayı, paralel istasyonlara sahip montaj hatlarının değerlendirilmesinde maliyet odaklı amaç fonksiyonları daha uygun olmaktadır. İstasyonların tekrarına izin verilen bir çözüm yaklaşımı, Pinto, Dannenbring ve Khumawala (1981) tarafından gösterilmiştir. Amaç fonksiyonu olarak; istasyon tekrarının sabit maliyeti ile normal çalışma işçi ücretlerinden ve fazla mesai maliyetlerinden oluşan işçilik maliyetleri kullanılmıştır.

Diğer bir uygulama olarak, uzun görev zamanına sahip görevlerin daha kısa zamanlı ancak aynı öncelik ilişkilerine sahip görevlere ayrıştırılabilir olduğunun varsayıldığı, paralel görev kavramı Pinto, Dannenbring ve Khumawala (1975) tarafından ele alınmıştır. Görevlerin bölünemezliği ilkesine göre ise orijinal görev her bir çevrimde yalnızca tek bir istasyonda gerçekleştirilebilirken; bu varsayımla, istenen çevrim zamanında geçerli ve uygun bir hat dengesi elde edebilmek için ayrıştırılan bu görevlerin farklı istasyonlara atanabilmesi imkânı doğmaktadır. Problemin değerlendirilmesinde ise tesis ve işçilik maliyetlerinden oluşan toplam maliyet fonksiyonu kullanılmıştır. Yazarlar problemin matematiksel gösterimini açıklayarak dal sınır tekniği ile çözüm elde etmişlerdir. Kullanılan çözüm tekniğinde, paralel görevlerin ikiden fazla istasyona atanmadığı ve görev zamanının eşit şekilde bölündüğü kabul edilmiştir.

Bard (1989) çalışmasında, paralel görev ve paralel istasyon durumları ile beraber kullanılmayan (boş) zaman durumunu ele almıştır. Boş zaman; iş parçalarının bir istasyondan diğerine taşınırken ihtiyaç duyulan, hiçbir işlemin gerçekleştirilemediği zaman olarak tanımlanmaktadır. Seri bir hat için boş zaman, kullanılabilir çevrim zamanını azaltmaktadır. Çalışmada, paralel istasyonların kullanımı ile çevrim zamanının üretken olmayan parçasının azaltılabileceği (her bir paralel istasyon için aynı boş zaman geçerli olacağından, tüm hat düşünüldüğünde paralel istasyonlar için yalnızca tek bir boş zaman söz konusu olacaktır) gösterilmiştir (Becker and Scholl, 2006).

Alan sınırlamalarının veya daha az karmaşık taşıma sisteminin gerektirdiği durumlarda, paralel istasyonların seri hat üzerinde yan yana konumlandırılması kullanışlı olabilmektedir. Böyle bir durumda tekrar edilen istasyonun önünde veya arkasında tampon bölgelere ihtiyaç doğabilmektedir. Benzer bir problem üzerinde Inman ve Leon (1994) tarafından yapılan çalışmada, arıza oranlarının, tamir zamanlarının ve görev zamanlarının rastgele belirlendiği stokastik yaklaşım ele alınmıştır. Bu yaklaşımda, tekrar edilen istasyonlar operasyonlarını genellikle aynı zamanda başlatıp bitirememektedirler.

Bir istasyona birden fazla operatör atanması da paralelleştirme uygulamalarına dair diğer bir örnektir. Verilen çevrim zamanında istasyon sayısını ve operatör sayısını en küçüklemeyi amaçlayan Shtub (1984) çalışmasında, Buxey (1974) sezgiseline benzer bir sezgisel açıklamıştır. Problem Wilson (1986) tarafından yeniden formüle edilip sadeleştirilerek standart karma tamsayılı programlama ile çözülmüştür. Ayrıca Chakravarty ve Shtub (1986b) çalışmalarında öğrenme etkilerine bağlı olarak problemdeki dinamik değişimleri incelemişlerdir.

İstasyon paralelleştirme ile benzer etkilere sahip diğer bir yaklaşım da istasyonları operatör takımlarının çalıştığı daha büyük birimler oluşturacak şekilde bir araya getirmektir. Bütünleştirilen istasyonlar orijinal çevrim zamanının katları olacak şekilde kullanılabilir zamana sahip olabilmekte ve operatörlerin iş tatmininin artmasını sağlayabilmektedir. Bu konuda yapılan diğer araştırmalar Johnson (1991), Bukchin, Dar-El ve Rubinovitz (1997) ile Bukchin ve Masin (2004) çalışmalarında incelenebilir.

### 1.3.5. Süreç Alternatifine veya Kullanılan Makine/Teçhizata Göre Montaj Hatları

Bir ürünün imalatının en önemli bileşenlerinden birisi kullanılan makine ve insan gücüdür. Kullanılacak teçhizatın seçimini etkileyen temel faktör ise ilgili istasyona atanan görev ve bu görevin operasyonel gerekliliklerdir. Literatürde sıkça montaj hattı tasarım problemi (MHTP) olarak kullanılan kavram, görevlerin farklı teçhizatlarla veya farklı teknolojiler kullanılarak gerçekleştirilebildiği süreç alternatiflerinin söz konusu olması durumunda, dengeleme probleminin teçhizat veya süreç seçim problemi ile bağlantısını göstermektedir (Baybars, 1986).

Dengeleme problemi ile süreç alternatiflerini birleştirerek ele alan model Pinto, Dannenbring ve Khumawala (1983) tarafından incelenmiştir. Modelde, her biri bazı görevleri gereksiz kılan veya görev zamanlarını azaltan, her bir kombinasyonu farklı öncelik ilişkileri diyagramına sahip olabildiği bir veya daha fazla sayıda süreç alternatifi, maliyet açısından değerlendirilmiştir. Graves ve Holmes (1988) ile Graves ve Lamar (1983) çalışmalarında, kurulacak istasyonların, farklı teçhizatlara sahip özdeş olmayan istasyon alternatifleri arasından seçildiği bir veya daha fazla sayıda ürün modelini ele almışlardır. Bu çalışmalarda sabit görev sırası varsayımı ile dengeleme problemi basitleştirilmiştir.

Üretim sürecinde taşıma sistemi üzerine sabitlenmiş, ağır veya büyük iş parçalarının bulunması durumunda, pozisyona bağlı kısıtlamalar ortaya çıkacaktır. Böyle durumlarda belli görevlerin uygun donanımla önceden belirlenmiş istasyonlara atanması gerekliliği dikkate alınarak görevlerin atamaları yapılacaktır (Wang and Wilson, 1986). Benzer şekilde üretimi yapılacak ürünün ağır iş parçaları içermesi, birbirine paralel iki seri hattın birleştirilmesinden oluşan çift taraflı montaj hattının kullanılmasını daha uygun hale getirebilir. Tek bir istasyon yerine hattın iki yönündeki ters yönlü istasyon çiftlerinin paralel şekilde çalışması, aynı iş parçası üzerinde farklı yönlerde eş zamanlı çalışmaya imkân sağlar (Bartholdi, 1993).

Verilen çevrim zamanı için toplam teçhizat maliyetini en küçükleyen teçhizat alternatifleri, Bukchin ve Tzur (2000) çalışmalarında incelemişlerdir. Araştırmada, her bir istasyonunun teçhizat alternatifleri kümesinden seçilen yalnızca bir tür teçhizatla donatıldığı; her bir tür teçhizatın bağımsız bir maliyetinin ve görev süresi üzerinde farklı bir etkisinin olduğu varsayılmıştır. Kurulacak montaj hattında, istasyon sayısının ve hangi tür teçhizatla donatılacağının tespiti ve istasyona bağlı kısıtlamalar dikkate alınarak görevlerin istasyonlara atanması problemi olmak üzere iki karar problemi incelenmiştir. Problemin çözümü için dal-sınır prosedürüne dayanan kesin çözüm algoritması ve büyük boyutlu problemlerin çözümü için de sezgisel çözüm algoritması önerilmiştir. Aynı problem Nicosia, Pacciarelli ve Pacifici (2002) tarafından incelenmiş, temeli Schrage ve Baker (1978) ile Kao ve Queyranne (1982) çalışmalarına dayanan dinamik programlama prosedürü ile FABLE ve OptPack programlarına bağlı dal sınır

yaklaşımı önerilmiştir. Falkenauer (1997) çalışmasında da benzer şekilde kaynaktan bağımsız görev zamanları içeren problem için gruplama genetik algoritması sunulmuştur. Tüm teçhizat alternatiflerinin belirli kurulum maliyetlerinin olduğu, problemin biraz daha kısıtlanmış bir versiyonu, Rubinovitz ve Bukchin (1993) tarafından ele alınmıştır. Basit ve genelleştirilmiş MHT probleminin çözümü için dal – kesme algoritması Pinnoi ve Wilhelm (1997;1998) tarafından önerilmiştir. Her bir görev için görev zamanlarını ve teçhizat maliyetlerini tanımlayan operasyon yönteminin seçimi problemi ise Rekiek, de Lit ve Delchambre (2002a) tarafından ele alınmıştır.

Bir istasyona atanan görevlerin gerçekleştirilebilmesi için istasyonun gerekli yetenek ve teknolojiye sahip operatör ve makinelerle donatılması gerekir. İstasyona bağlı atama kısıtlarından dolayı, özellikle de karmaşık üretim süreçlerine sahip ürünlerin üretiminde, tüm istasyonların eşit olarak donatılması genellikle mümkün olamamaktadır (Kilbridge and Wester, 1961; Bukchin and Tzur, 2000). Ayrıca görevlerin ataması, görevler arasında uyumsuzluk, zaman veya alan mesafeleri gibi nedenlerden dolayı göreve bağlı kısıtlamalarla sınırlandırılabilir (Ignall, 1965; Deckro, 1989; Agnetis, Ciancimino, Lucertini et al. 1995). Diğer bir tür atama kısıtı ise operatöre bağlı atama kısıtlarıdır. Operatörlerin farklı seviyelerde becerileri olduğu için bir operatör belirli bir istasyona atandığında sadece belirli görev kombinasyonlarını gerçekleştirmesi söz konusu olabilecektir. Ayrıca iş tatmininin operatör üzerindeki etkileri de gözlemlenmiştir (Agrawal, 1985; Iskander and Chou, 1990).

Bir istasyonda tek bir makine/teçhizatın kullanımı yerine birden fazla makine teçhizatın kullanılmasına imkân sağlayan ve teçhizat seçim probleminin özel bir örneği olarak ele alınabilecek paralel istasyon problemi, Bukchin, Dar-El ve Rubinovitz (2002) tarafından ele alınmıştır. Teçhizat seçim problemiyle olan benzerliği nedeniyle modelde değişiklik yapılmadan aynı çözüm prosedürleri ile probleme çözüm üretilebilmektedir.

Süreç ve teçhizat özelliklerinin incelendiği diğer bir hat yapısı da transfer hatlarıdır. Dengeleme probleminin transfer hatlarını kapsayacak şekilde genişletilmesi ile ilgili araştırmalar Dolgui, Guschinski ve Levin (1999) ile Dolgui, Guschinsky ve Levin (2001a) çalışmalarında açıklanmıştır. Bir transfer hattı, görev bloklarını sırasıyla gerçekleştiren otomatikleştirilmiş istasyon sıralarından meydana gelir. Görevlerin

bloklara atanması, atama kısıtlarına bağlıdır. Blok zamanı, bloktaki en büyük süreli görev zamanı ve transfer operasyonları için gerekli ilave zaman ile tanımlanır. Burada amaç, verilen çevrim zamanında her bir parça için hat maliyetini ve her bir blok için ilave maliyetleri en küçüklemektir. Problem, sınırlandırılmış en kısa yol problemi (Dolgui, Guschinski, Levin, 1999; Dolgui, Guschinsky, Levin et al. 2001c; Dolgui, Guschinsky, Levin, 2003); ayrıştırma metodu (Dolgui, Guschinsky, Levin, 2001a); karma tamsayılı programlama (Dolgui, Guschinsky, Levin, 2001b; Dolgui, Guschinsky, Levin et al. 2001c); stokastik sezgisel prosedürler (Dolgui, Finel, Guschinsky et al. 2002a) kullanılarak çözülmüştür.

Teçhizat seçim probleminin, işçilerin üretim hızı veya kalitesi anlamında farklı yeteneklere sahip olduğu ve bu özelliklerine göre ücretlendirildiği işçi seçim/atama problemine denk olduğu (Akagi, Osaki, Kikuchi, 1983; Wilson, 1986; Lutz, Davis, Turner, 1994) çalışmalarında incelenmiştir.

### 1.3.6. Atama Kısıtlarına Göre Montaj Hatları

Montaj hatlarında görevlerin istasyonlara atamasını sınırlayan çok çeşitli faktörler söz konusu olabilir. Sağ ve sol yönlü istasyonlarda çalışabilme ihtiyacı *pozisyona bağlı kısıtlamalar* olarak nitelendirilebilir. Özellikle de kamyon ya da otobüs gibi büyük ve ağır iş parçalarının söz konusu olduğu durumlarda, iş parçasının etrafını dolanmanın mümkün olmadığı veya çok yüksek maliyetli olduğu durumlarda görevlerin hattın sadece tek bir yönünde gerçekleştirilecek şekilde istasyonlar oluşturulması faydalı olabilmektedir. Bu şekildeki sağ ve sol yönlü görevlerin bir araya getirilmemesi gereken durumlar *göreve bağlı kısıtlamalar* olarak da nitelendirilebilir. Aynı istasyona atanmaması gereken görevler ise *uyumsuz/zıt yönlü* olarak isimlendirilir (Becker and Scholl, 2006).

Montaj hattının sağ ve sol yönüne karşılıklı olarak konumlandırılan iş istasyonlarından oluşan çift taraflı montaj hatları, Bartholdi (1993) tarafından gösterilmiştir. Çift taraflı montaj hatlarında, bir çevrimde her bir karşılıklı istasyon çifti tek bir iş parçası üzerinde aynı anda çalışırlar. Burada görevler, üzerinde çalıştıkları aracın yönüne göre gruplandırılırlar. Dolayısıyla sağ yönlü görevler, sol yönlü görevler, çift yönlü görevler (sağ veya sol her iki yöndeki istasyonlardan birisi tarafından yapılabilecek görevler) ve

her iki taraftaki istasyonlarca ortak yapılabilecek görevler söz konusu olabilecektir. Bartholdi (1993) çift taraflı montaj hatlarının verilen *c* çevrim zamanında öncelik ilişkilerine de bağlı olarak, geleneksel tek yönlü hatlardan daha fazla istasyon gerektirmeyeceğini belirtmiştir. Zıt yönlü istasyon çiftleri için dikkat edilmesi gereken önemli bir nokta boş zamanların oluşmasıdır. Görevler, aynı zıt yönlü istasyon çiftlerinde olsalar bile öncelik ilişkilerinden dolayı istasyonlarda boş zamanların oluşmasına neden olabileceklerdir. Bartholdi (1993) çift taraflı MHDP çözümü için öncelik kurallarını temel alan uyarlanmış bir sezgisel kullanmıştır. Yaptığı değişikliklerle kullanıcıya bazı görevlerin belli istasyonlara sabitlenmesi imkânı sağlanmaktadır. Görevler arasında uyumsuzluk ve bazı sabit görev – istasyon kombinasyonları içeren problemler için dinamik programlama yaklaşımı Agnetis, Ciancimino, Lucertini vd. (1995) tarafından sunulmuştur. Çalışmada kullanılan amaç, verilen istasyon sayısı için iş yüklerinin düzgünleştirilmesidir.

Çift taraflı MHDP için istasyon sayısını en küçüklemeye çalışan genetik algoritma yaklaşımı Kim, Kim ve Kim (2000a) tarafından sunulmuştur. Bu problem için Lee, Kim ve Kim (2001) tarafından iki alternatif amaç açıklanmıştır. Bu amaçların birincisinde öncelik ilişkileri açısından birbiriyle direkt olarak ilişkili görevlerin aynı istasyona atanması amaçlanırken; ikincisinde ise birbiriyle ilişkili görevlerin zıt istasyonlara atanmasının engellenmesi amaçlanmıştır. Eğer bu mümkün olmazsa öncül görevin tamamlanma zamanı ile zıt istasyondaki ardıl görevin başlangıç zamanı arasındaki boş zamanın mümkün olduğunca büyük olmasına çalışılır. Problemin çözümü için öncelik kurallı çözüm yaklaşımını temel alan birbiriyle ilişkili görevlerin gruplandırılmasına dayanan yaklaşım önerilmiştir (Becker and Scholl, 2006).

Farklı atama kısıtlarının kullanıldığı, istasyon sayısının önceden belirlendiği ve tek yönlü bir hattın ele alındığı gerçek dünya problemi, Pastor ve Corominas (2000) tarafından ele alınmıştır. Göreve bağlı atama kısıtlarında bazı görevlerin aynı istasyona atanması gerektiği ve dolayısıyla tek bir görev altında birleştirildiği varsayılmıştır. Pozisyona bağlı atama kısıtları olarak ise büyük ve taşınamaz bir iş parçası üzerindeki bazı görevlerin sadece sol veya sağ yönlü operasyonlarla ve bazı görevlerin de iş parçasının üzerinden veya altından gerçekleştirilebileceği varsayılmıştır. Tüm bu işlemlerin çift taraflı montaj hatları kullanılmadan ve bu özelliklerdeki görevlerin aynı

istasyonlara atanmadan gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu problemin çözümü için karma tamsayılı doğrusal programlama modeli ve iki aşamalı sezgisel yaklaşım önerilmiştir. İki aşamalı sezgisel yaklaşımın birinci aşamasında budanmış bir dinamik programlama yaklaşımı kullanılmakta, ikinci aşamada ise elde edilen çözümün tabu arama algoritması ile geliştirilmesine çalışılmaktadır.

Bautista, Suarez, Mateo vd. (2000), görev grupları arasında uyumsuzlukların olduğu ve ikincil amaç olarak da en küçük istasyon sayısı bulunduktan sonra çevrim zamanının azaltılmasını amaçlayan BMHD-1 problemini ele almışlardır. Problemin çözümü için açgözlü uyarlanabilir arama algoritması ve genetik algoritma geliştirmişlerdir. Görev uyumsuzlukları ve mesafe kısıtları ile genişletilmiş BMHD-2 problemi Park, Park ve Kim (1997) tarafından ele alınmış ve problemin çözümü için bir yerel arama sezgiseli geliştirilmiştir.

Görev veya pozisyona bağlı sınırlamalardan başka, operatöre bağlı kısıtlamalar da söz konusudur. Operatörlerin yetenek seviyelerini değerlendirip, benzer zorluktaki görevlerin aynı istasyonda bir araya getirilmesine çalışılır (Johnson, 1983). Üretilecek ürüne olan fiziksel talep Carnahan, Norman ve Redfern (2001) tarafından MHDP'ne dâhil edilmiştir. Görevler talep gücüne göre farklılaşırken, çalışanlar kapasite güçlerine göre farklılaşırlar. Ayrıca bir görevin gerçekleştirilmesi çalışanı yorar ve kapasitesinin azalmasına neden olur. Çalışanlar, istasyonlarına atanan görevlerce aşırı yüklemeye maruz kalmamalıdırlar. Kullanılan amaç, verilen istasyon sayısı için ağırlıklandırılmış çevrim zamanı ve yorulma ölçüsünden oluşan karma bir skor değerini en küçüklemektedir. Problem çözümü çok geçişli bir sezgisel ve iki farklı genetik algoritma ile gerçekleştirilmiştir.

### 1.3.7. Hattın Kontrol Düzenine Göre Montaj Hatları

Bir montaj hattının *c* çevrim zamanı gibi belirli bir zaman düzeninde hareket edip etmemesine göre değerlendirilmesi mümkündür. Çevrim zamanı gibi belirli bir zamana bağlı olarak iş parçasının hareket ettiği hatlar zaman temelinde düzenlenmiş – gecikmesiz (paced) hatlar ve zaman temelinde düzenlenmemiş – gecikmeli (unpaced) hatlar olarak sınıflandırılabilirler.

Gecikmesiz hatlarda çevrim zamanı, iş parçasının her bir istasyonda geçireceği süreyi kısıtlayarak belirli bir üretim hızına karşılık gelir. Bu kısıtlama, tek modelli hatlarda katı bir kural olurken, çok modelli hatlarda, bazı paralelleştirme uygulamalarında ve stokastik görev zamanı durumlarında ortalama olarak karşılanması gereken bir kural haline gelmektedir (Boysen, Fliedner, Scholl, 2007).

Bir görevin istasyondaki operasyonlarının tamamlanmasıyla veya bir sonraki istasyonun boşalmasıyla iş parçasının belirli bir zaman gözetmeksizin hareket ettirilmesi, zaman temelinde düzenlenmemiş – gecikmeli montaj sistemleri olarak nitelendirilir. Gecikmeli hatlarda *senkronize* ve *senkronize olmayan* iki durum söz konusudur. Senkronize olmayan durumda iş parçasının operasyonları istasyonda tamamlanır tamamlanmaz sonraki istasyona ya da sonraki istasyonun önündeki tampon bölgeye gönderilir (Boysen, Fliedner, Scholl, 2007). Bu durumda tampon bölgelerin konumu ve boyutuyla ilgili yeni bir karar problemi ortaya çıkar (Baker, Powell, Pyke, 1990; Hillier and So, 1993; Malakooti, 1994). Senkronize durumda ise operasyonları tamamlanan iş parçasının hareketi sonraki istasyon ile koordineli şekilde gerçekleştirilir. İş parçasının hareketi, her iki istasyonda tüm operasyonları tamamladığında gerçekleşecektir (Boysen, Fliedner, Scholl, 2007).

# II. BÖLÜM:
# PARALEL MONTAJ HATLARI VE STOKASTİK PARALEL MONTAJ HATTI DENGELEME PROBLEMİ

Yüksek verimlilik seviyelerinde çalışma imkânı sağlayan montaj hatlarında talebin de yeterince yüksek olması durumunda paralel istasyonlar/görevler/hatlar kullanılarak daha yüksek verimlilik seviyelerinde çalışabilme imkânı sağlanmaktadır. Hâlihazırda gerçek dünya uygulamalarında genellikle birden fazla montaj hattı ile karşılaşılmaktadır. Bu bölümde paralel montaj hatları ve özellikleri, paralel montaj hattı dengeleme (PMHD) problemi ve çözüm yaklaşımları açıklanmıştır. Ayrıca görev zamanlarının değişkenliğinin dikkate alındığı stokastik MHD problemlerinin modellenmesi ve çözüm yaklaşımları da özetlenmiştir.

## 2.1. Paralel Montaj Hatları

Geleneksel seri üretimde montaj hatları, tek bir modelin üretiminden sorumlu üretim sistemi olarak değerlendirilmektedir. Tüketici ihtiyaçları ve talepteki değişimlere paralel olarak, montaj hatlarının özellikleri ve hat sayıları da değişmiştir. Pratikte üretim sistemlerinin çoğu birden fazla montaj hattına sahiptir (Gökçen ve Ağpak, 2004). Birden fazla montaj hattının kullanılması için iki temel gerekçe söz konusudur (Gökçen, Ağpak, Benzer, 2006; Lusa, 2008):

*(i)* Ürüne olan talebin tek bir montaj hattı tarafından karşılanamayacak kadar yüksek olması,

*(ii)* Benzer ürünlere olan talebin, her bir ürünün tek bir hatta üretilecek kadar yüksek olması.

Günümüzde birçok firma daha uzun çevrim zamanlarına sahip ve her bir istasyonun daha fazla sayıda görevden sorumlu olabileceği çoklu hatlar kurmaktadır (Chiang, Kouvelis, Urban, 2007). Uygulamada sıkça kullanılmasına rağmen paralel montaj

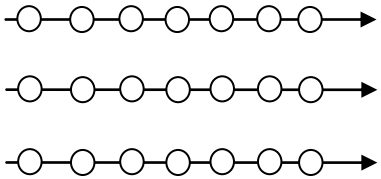
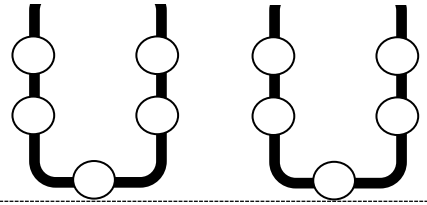
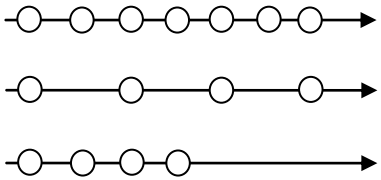
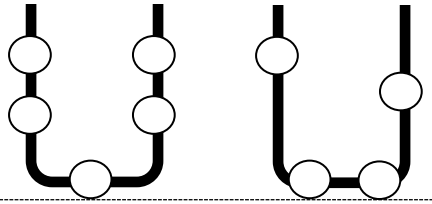
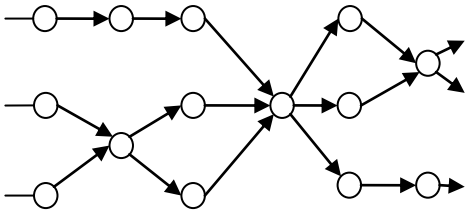
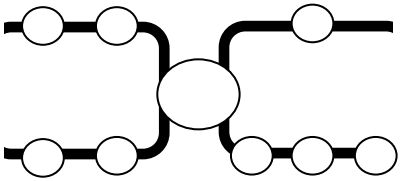
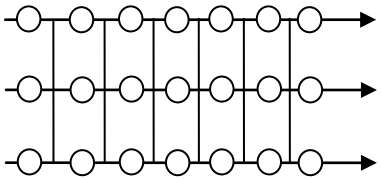
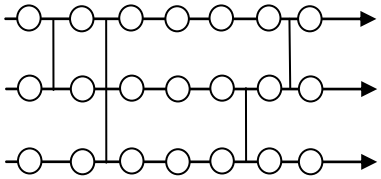
hatları ile ilgili araştırmalar sınırlı sayıda kalmıştır. Başlangıçta mevcut talebi karşılayabilecek aynı üretim hatlarının sayısının tespiti problemi ele alınmış, zaman içerisinde ise paralel görevler ve paralel istasyon yapılarını inceleyen araştırmalar yapılmıştır.

### 2.1.1. Paralel Montaj Hattı Yapıları

Bir üretim sisteminin tasarımında kapasite, maliyet, kalite gibi genel faktörlerle birlikte birçok performans kriteri de dikkate alınmaktadır. Montaj hatlarının tasarımında da makine ve teçhizat maliyetleri, üretim hızı ve üretilebilecek ürün çeşidi gibi faktörler belirleyici olmaktadır. Dolayısıyla hat sayısı, hatlar arasındaki bağlantılar ve sistem konfigürasyonu bu faktörleri doğrudan etkileyebilen ve performansı belirleyebilecek (Koren, Hu, Weber, 1998) tasarım kararlarıdır. Montaj hatları ile ilgili çeşitli makine yerleşimleri ve hat tasarımları üretim miktarı, hat dengesi ve maliyetler dikkate alınarak Spicer, Koren, Shpitalni vd. (2002) tarafından açıklanmıştır.

Çoklu veya paralel montaj hattı yapıları Lusa (2008) tarafından 3 temel kategoride değerlendirilmiştir (Şekil 2. 1). Bağımsız düz paralel montaj hatları, birbiriyle istasyon bağlantısı bulunmayan, düz veya u-tipi şeklinde konumlandırılabilen ve özdeş, benzer ya da farklı ürünlerin üretilebildiği montaj hatlarıdır.

Bazı ortak istasyonlara sahip paralel montaj hatları ise aynı istasyonda birden fazla hattın görevlerinin gerçekleştirildiği çok hatlı istasyonlara sahiptir. Düz veya u-tipi hat yerleşim düzenine sahip olabilen bu türdeki montaj hatları da benzer veya farklı ürünleri üretebilme yeteneğine sahiptir. Literatürde ortak istasyonlara sahip paralel montaj hatları Miltenburg (1998), Sparling (1998) ile Gökçen, Ağpak ve Benzer (2006) tarafından yapılan çalışmalarda ele alınmıştır.

| | Düz Hatlar | U-tipi Hatlar |
|---|---|---|
| Bağımsız Özdeş Hatlar |  |  |
| Bağımsız Farklı Hatlar |  |  |
| Birbiriyle bağlantılı çok hatlı istasyonlar |  |  |
| Her/bazı işlemden sonra bağlantılı istasyonlar |  |  |

Şekil 2. 1 Paralel montaj hattı konfigürasyonları

Paralel montaj hatlarından farklı olarak, bir montaj hattında en büyük görev zamanının istenen çevrim zamanından büyük olması durumunda paralel istasyonlar kullanılabilir. Buradaki paralel istasyon yapısında, bir istasyonun farklı iki montaj hattı tarafından ortak kullanımı söz konusu değildir. Buradaki gaye uzun işlem zamanlarının aynı işlemi yapan birden fazla istasyon ile hızlandırılmasıdır. Bu durum hattın çevrim zamanını azaltmanın ve dolayısıyla üretim oranını arttırmanın da bir yoludur (Buxey, 1974). Ayrıca paralel istasyonlu sistemin kurulmasıyla arıza duyarlılığı azaltılabilir ve genellikle daha iyi hat dengeleri elde edilebilir. Paralel hat durumunda olduğu gibi paralel istasyonlar kurulması durumunda da dikkate alınması gereken ilave sabit maliyetler ortaya çıkacaktır (Becker and Scholl, 2006; Chiang, Kouvelis, Urban, 2007).

### 2.1.2. Paralel Montaj Hatlarının Özellikleri

Paralel montaj hatlarının en önemli özelliklerinden birisi üretim sisteminin tamamının verimliliğini ve üretkenliğini yükseltebilmesidir (Boysen, Fliedner, Scholl, 2007; Lusa, 2008). Paralel hatların sağladığı esneklikle daha iyi hat dengeleri ve daha az boş zamanlar elde edilerek üretkenliğin ve sistem verimliliğinin arttırılması sağlanabilir. Ayrıca sistemin daha az sayıda istasyon kullanması durumunda; daha düşük işçilik maliyetleri, daha az alan ihtiyaçları ve daha az süreç içi stoklar ile çalışmak mümkün olabilmektedir (Chiang, Kouvelis, Urban, 2007). Özellikle de u-tipi montaj hatları ve düşük çevrim zamanları söz konusu olduğunda paralel hatların faydaları daha da ön plana çıkabilecektir.

Paralel montaj hatlarının bir diğer önemli özelliği de sistem esnekliğini arttırması ve hata hassasiyetini azaltmasıdır (Rekiek, Dolgui, Delchambre et al. 2002; Becker and Scholl, 2006; Chiang, Kouvelis, Urban, 2007). Paralel düzende her bir hat kendi çevrim zamanı ile çalışabilmekte, böylece de talepteki değişimlere daha kolay uyum sağlanabilmektedir. Sistem esnekliği beraberinde hataya olan duyarlılığı da azaltmaktadır. Olası arıza durumlarında üretim tamamen durmamakta, diğer hatlar çalışmaya devam edebilmektedir. Dolayısıyla, paralel montaj hatlarının faydaları dikkate alındığında karma modelli montaj hatlarının karmaşıklığı azaltılabilecektir.

Paralel hatların sağladığı en önemli avantajlardan birisi de hatların tek başına ürettiğinden daha az üretim yapmadan çevrim zamanının her bir hat için

artırılabilmesidir. Çevrim zamanının arttırılması ile her bir istasyonda iş genişletme veya iş zenginleştirme yapabilme imkânı doğmaktadır. Bu sayede de işçi tatmini yükseltilebilmekte (Ellegard and Jonsson, 1992), üretim oranında dalgalanmalara neden olabilen işe gelmeme durumu ve fireler azaltılabilmekte ve sistem üretkenliği artabilmektedir (Chakravarty and Shtub, 1988). Ancak çevrim zamanındaki bu artışın sınırlı olması gerekir, aksi takdirde çalışanlar ilgili görev ve miktarı ile ilgili uzmanlaşamayacaklarını düşünebilir ve sonuçta üretkenlik üzerinde olumsuz etkiler söz konusu olabilir. Daha uç bir durum olarak çevrim zamanındaki aşırı artış, tek bir işçinin tüm operasyonları gerçekleştirilebildiği düşük verimlilikte üretim sistemlerine neden olabilir. Diğer bir görüş açısına göre ise çevrim zamanındaki artış ile kalite de iyileşme görülebilir (Ellegard and Jonsson, 1992). Çevrim zamanındaki artışın neden olabileceği bu iki sonuç kendi içerisinde tartışılabilir. Birinci bakış açısına göre işçi tatminindeki artış işçinin gerçekleştirdiği işi daha dikkatli, daha istekli ve daha özverili yapmasını sağlayacağından kaliteyi de olumlu yönde etkileyebilecektir. Öte yandan çalışanların uzmanlaşamayacaklarını düşünmesi, çalışanlar üzerinde olumsuz etki yaparak kalitenin düşmesine neden olabilecektir.

Paralel montaj hatlarının avantaj sağlayan özelliklerinin yanında negatif etkileri olabilen bazı zayıf yönleri de bulunmaktadır. Bunların başında da makine ve teçhizat maliyeti gelmektedir. İkinci bir üretim hattının kurulması ile iki kere makine ve teçhizat maliyetine katlanmak gerekecektir. Üretim süreci ve malzeme tedariği açısından da dikkat edilmesi gereken noktalar bulunmaktadır. Paralel hatlardan her birinin mümkün olduğunca en az sayıda istasyona sahip olması gerekir, aksi durumda malzeme akışı ve tedariki ile ilgili fiziksel dağıtım ve taşımadan kaynaklanabilecek önemli sorunlarla karşılaşılabilir. Üretim alanı açısından da paralel hatlar kullanılması ilave alan ihtiyaçlarını gerektirecektir. Her bir makinenin ve teçhizatın ihtiyaç duyacağı alanlar toplam alan ihtiyacını daha da artırabilecektir.

Paralel montaj hatlarının sağlayabileceği bir avantaj olarak sunulan çevrim zamanının arttırılmasının bazı negatif etkileri de olabilmektedir. Çevrim zamanının arttırılması ile her bir çevrimdeki iş tekrarları azalacağından öğrenme etkisi de azalabilecektir. Sonuç olarak da üretim oranında bir azalış söz konusu olabilecektir. Öğrenme etkisinin azalmasından başka diğer bir etki de görevler arasındaki aparat değiştirme, malzeme

taşıma gibi faktörlerin ihmal edilemeyecek kadar artabilmesidir. Çevrim zamanının arttırılması ile bir işçinin gerçekleştireceği operasyonların sayısı artacağından, bir görevden diğerine geçmek için gerekli zaman da önemli hale gelecektir.

Çok hatlı istasyonlara izin verilmesi toplam gerekli istasyon sayısında azalmaya yardımcı olabilir. Buna rağmen en önemli dezavantajları, sistemin birbiriyle bağlantılı hatların bir şekilde senkronize olmasını gerektirmesi ve çok hatlı istasyonlardaki bir arızanın birden fazla hattın performansını etkileyebilmesidir. Çoklu veya paralel hat dengeleme problemleri ile ilgili çalışmalarda fazlaca yer almayan çaprazlama, makinelerin arıza veya duraksamaya yatkın olduğu durumlarda önerilebilirdir. Doğal olarak yerleşim ve alan konuları çaprazlamanın uygulanabilirliğini sınırlandırmaktadır.

Paralel montaj hatlarının olumlu ve olumsuz özellikleri dikkate alındığında, bu tür üretim sistemlerinin tercih edilebilirliğine yönelik tek başına karar almak doğru bir yaklaşım olmayacaktır. Paralel yapıdaki sistemlerin kurulum kararının alınmasında ve hat sayısının belirlenmesinde, paralel montaj hatlarının sağlayacağı esneklik ve üretkenlik ile katlanılması gerekecek maliyetler arasında bir denge gözetilmesi daha anlamlı karar almaya yardımcı olacaktır.

## 2.2. Paralel Montaj Hattı Dengeleme Problemi

Paralel montaj hatlarını konu alan araştırmaların nispeten sınırlı sayıda olmasına karşın, paralel MHD problemi birden fazla karar problemini içeren oldukça karmaşık ve zor bir tasarım problemidir. Birden fazla hattı konu alan ilk araştırmalarda, talebi karşılayacak hat sayısının belirlenmesi problemi incelenmiştir. Temel amacın ihtiyaç duyulan montaj hatlarının sayısının belirlenmesi olduğu bu araştırmalarda, hatların genellikle birbirinden bağımsız olarak dengelendiği varsayılmıştır. Birden fazla montaj hattının birlikte kullanılmasıyla makine ve teçhizat maliyetlerinin ve üretim miktarının artacağı açıktır. Dolayısıyla problemi sadece hat sayısının belirlenmesi veya hatların ayrı ayrı dengelenmesi probleminden ziyade *montaj hattı tasarım problemi* olarak daha geniş bir perspektif ile değerlendirmek daha doğru bir yaklaşım olacaktır.

İki veya daha fazla montaj hattının birlikte değerlendirilebileceği tasarım problemi; hat sayısının belirlenmesi, ürünlerin montaj hatlarına atanması ve montaj hatlarının

dengelenmesi alt problemlerinden oluşmaktadır. Paralel montaj hatları ile ilgili literatürdeki çalışmalar temelde 4 tip problem üzerine yoğunlaşmıştır (Lusa, 2008):

a) Kurulacak hat sayısını belirlemeye yönelik araştırmalar (Süer and Dagli, 1994; Pinnoi and Wilhelm, 1997; Süer, 1998; Lan, 2007; Chiang, Kouvelis, Urban, 2007).
b) Ürün modellerinin hatlara atanmasına yönelik araştırmalar (Lehman, 1969; Ahmadi, Dasu, Tang, 1992; Süer and Dagli, 1994; Pinnoi and Wilhelm, 1997)
c) Her bir hat için istasyonlarının belirlenmesi ve görevlerin istasyonlara atanarak hattın dengelenmesine yönelik araştırmalar (Pinnoi and Wilhelm, 1997; Süer, 1998; Miltenburg, 1998; Sparling, 1998; Gökçen, Ağpak, Benzer, 2006; Lan, 2007; Chiang, Kouvelis, Urban, 2007)
d) Farklı konfigürasyonları karşılaştırmak için üretim sistemlerinin performansının değerlendirilmesine yönelik araştırmalar (Wyman and Moberly, 1971; (Globerson and Tamir, 1980; Chakravarty and Shtub, 1988; Süer and Dagli, 1994; Freiheit, Shpitalni, Hu, 2004a; 2004b; Li, 2004; Lan, 2007).

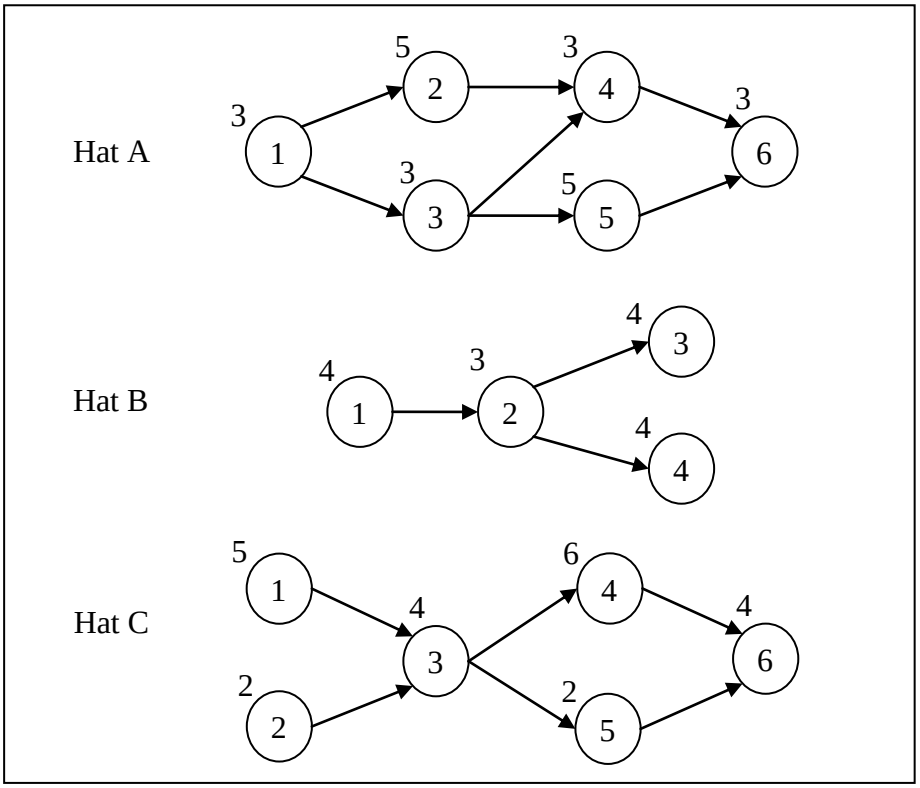
Montaj hattı tasarımı kapsamında paralel olarak konumlandırılmış birden fazla hattın ortaklaşa değerlendirilerek dengelenmeye çalışılması ile istasyon ve çalışan sayısından tasarruf etme imkânı ortaya çıkabilmektedir. Bu anlamda ilk olarak Gökçen, Ağpak ve Benzer (2006) tarafından tanımlanan paralel MHD probleminde daha yüksek hat dengelerinin elde edilebileceği ve daha az sayıda operatör kullanımının mümkün olabileceği gösterilmiştir.

Basit MHD problemi ile çeşitli benzer özelliklere sahip paralel MHD probleminin varsayımları aşağıda özetlenmiştir:

- Montaj görevleri daha fazla alt işlemlere (operasyonlara) bölünemez.
- Montaj görevleri arasındaki öncelik ilişkileri belirlidir ve bilinmektedir.
- Öncelik ilişkileri ve çevrim zamanından başka atama kısıtı yoktur.
- Çevrim zamanı/istasyon sayısı önceden belirlidir ve bilinmektedir.
- Her bir hatta tek bir ürün montajlanmaktadır.
- Malzeme taşıma, yükleme ve boşaltma süreleri ihmal edilebilecek kadar küçüktür veya görev zamanlarına dahil edilmiştir.

- Hazırlık ve/veya aparat değiştirme zamanları ihmal edilebilecek kadar küçüktür veya görev zamanlarına dahil edilmiştir.
- Bir görev, görevi gerçekleştirmeye yetkin teçhizata sahip herhangi bir istasyona öncelik ilişkilerine uygun olarak atanabilir.
- Her bir işçi atandığı istasyondan bağımsız olarak aynı ücreti almaktadır.
- Bir görevin tamamlanması, hat boyunca malzeme taşıma sistemi ile ilerleyen malzemenin üretim hızını değiştirmez.
- Bir istasyona atanan görevlerin toplam süresi, çevrim zamanını aşamaz.

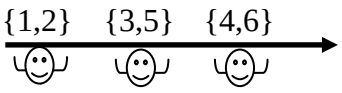
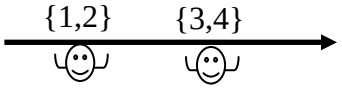
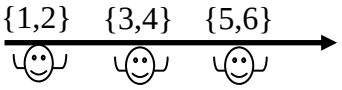
PMHD problemini daha iyi açıklayabilmek için Şekil 2. 2'de öncelik ilişkileri ve operasyon (görev) zamanları verilen 3 ürünü dikkate alalım. Her bir ürünün öncelik ilişkileri grafiğinde görevler düğümlerle ve görev zamanları ise düğümlerin üzerindeki rakamlarla ifade edilmektedir. Bu üç ürün birbirinden farklı ürünler olabileceği gibi tek bir ürünün farklı modelleri de olabilir.




Şekil 2. 2. Örnek problem için 3 ürünün öncelik ilişkileri ve operasyon zamanları

Çevrim zamanı *c*=10 olarak kabul edildiğinde, her bir hattın bağımsız olarak dengelendiği durumda görev istasyon atamaları ve hat dengeleri Tablo 2. 1'deki gibi olacaktır. A ürünü için 3 istasyon, B ürünü için 2 istasyon ve C ürünü için ise 3 istasyon olmak üzere toplam 8 istasyon ve operatöre ihtiyaç duyulmaktadır. Farklı *görev – istasyon* kombinasyonlarına sahip farklı çözümler mevcut olmakla birlikte, optimal çözümdeki istasyon sayıları ve dolayısıyla hat dengesi değerleri değişmemektedir. *Görev – istasyon* atamalarından da görüleceği üzere, A ürününün üretildiği birinci hattaki istasyonların boş zamanları sırasıyla {2, 2, 4} olmaktadır. B ürünü için ise {3, 2} zaman birimi istasyonlarda kullanılmayan zaman olurken, C ürünü için boş zamanlar {3, 0, 4} zaman birimi olarak hesaplanmaktadır. Ortaya çıkan bu boş zamanların azaltılmasının ve hat dengesinin yükseltilmesinin yollarından birisi ortak kaynak kullanımı ile hatların ortaklaşa dengelenmesidir.

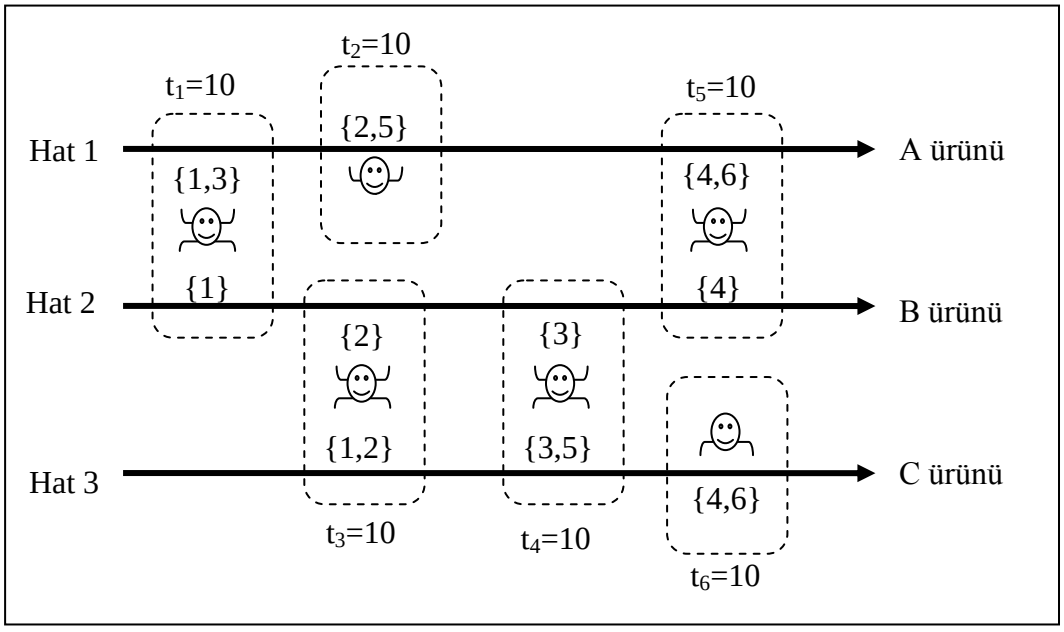
Tablo 2. 1. Örnek problemde ürünlerin hatlarda bağımsız olarak dengelenmesi durumu için istasyon atamaları, istasyon zamanları ve hat dengeleri

| Ürün | İstasyon Atamaları | İstasyon Süreleri | Hat dengesi | İstasyonlar ve Operatörler |
|---|---|---|---|---|
| A | $S_{A1}$={1,2}<br>$S_{A2}$={3,5}<br>$S_{A3}$={4,6} | $t_{A1}$=8<br>$t_{A2}$=8<br>$t_{A3}$=6 | $E_A$=0.733 |  |
| B | $S_{B1}$={1,2}<br>$S_{B2}$={3,4} | $t_{B1}$=7<br>$t_{B2}$=8 | $E_B$=0.75 |  |
| C | $S_{C1}$={1,2}<br>$S_{C2}$={3,4}<br>$S_{C3}$={5,6} | $t_{C1}$=7<br>$t_{C2}$=10<br>$t_{C3}$=6 | $E_C$=0.767 |  |

Örnek problem, ürünlerin üretileceği hatların paralel olarak yerleştirildiği ve kaynakların (operatörler) ortak kullanılabileceği şekilde (PMHD problemi olarak) ele alındığında ise A, B ve C ürünlerinin sırasıyla 1, 2 ve 3 numaralı hatlara atandığı varsayımı altında, Şekil 2. 3'de gösterilen çözüm elde edilebilecektir. Bir operatörün birden fazla hatta operasyon gerçekleştirdiği istasyonlar *paylaşımlı/ortak istasyon*,

sadece tek bir hatta operasyon gerçekleştirilen istasyonlar ise *bağımsız/ayrı istasyon* olarak isimlendirilir.

Hatlar bağımsız olarak dengelendiğinde toplam 8 istasyon ve operatöre ihtiyaç duyulurken (Tablo 2. 1), kaynakların ortak kullanımını esas alan paralel MHD problemi olarak dengelendiğinde ise toplam 6 istasyon ve operatöre ihtiyaç duyulmaktadır (Şekil 2. 3). Ayrıca paralel MHD problemi olarak elde edilen çözümde, tüm istasyonların tam verimle çalıştığı, boş zamanlarının olmadığı da görülmektedir. Böylece, paralel MHD problemi olarak elde edilen çözümün, hatların bağımsız olarak dengelenmesi durumuyla elde edilen çözüm ile aynı sayıda ya da daha az sayıda istasyon ve operatöre ihtiyaç duyacağı sonucuna ulaşılmaktadır. Büyük hacimli üretim düşünüldüğünde elde edilecek maliyet tasarrufu ve verimlilik artışı, montaj hatlarının paralel olarak değerlendirilmesinin önemini daha da arttırmaktadır.




Şekil 2. 3. Örnek problemin ortak kaynak kullanımı ile PMHD problemi olarak çözümü

Paralel MHD probleminin bir tasarım problemi olarak ele alınıp çözülmesi, kaynakların daha etkin kullanımına yardımcı olarak hat verimliliğinin arttırılmasını sağlayabilecektir. Günümüz rekabet şartları ve gerçek dünya uygulamalarındaki hat sayıları da dikkate alındığında, paralel MHD probleminin önemi daha da artmaktadır.

## 2.3. Paralel Montaj Hattı Dengeleme Problemlerine Çözüm Yaklaşımları

Paralel MHD problemi birbiriyle bağlantılı iki alt problemden oluşmaktadır. Birinci problem, paralel hatlara atanacak hat – ürün kombinasyonlarının belirlenmesi problemi, ikincisi ise ürünlerin atandığı hatların dengelenmesi problemidir. Bu iki problemin birbirini etkileyen kesişim noktası ise komşu hatlardaki istasyonların birleştirilebilme veya ortak kullanılabilme imkânıdır.

Montaj hatları tasarımı ve dengelenmesine yönelik kararlar hat sayısı arttıkça zorlaşmaktadır. BMHD problemi NP-zor bir problem olduğundan, hat sayısının arttığı, paralel hatların söz konusu olduğu problemler de NP-zor sınıfında problemlerdir. Paralel montaj hatlarının açıklanan problem türlerine yönelik çeşitli çözüm yaklaşımları, literatür taraması başlığında açıklanmıştır. Paralel MHD probleminin çözümüne yönelik matematiksel programlama veya diğer analitik yöntemlere dayalı giderek artan sayıda araştırmalar söz konusudur. Ancak büyük boyutlu problemlerin etkin zamanlarda çözülememesi sorunu, paralel MHD problemi için de geçerlidir. Problemin NP-zor yapısından dolayı, özellikle de görev sayısı fazla olan problemler için sezgisel yöntemler önemli bir pratik fayda sağlamaktadır.

### 2.3.1. Paralel MHD Probleminin 0 – 1 Tamsayılı Programlama Modeli

Üretim hatlarının ortaklaşa değerlendirilerek, birlikte eşzamanlı dengelenmeye çalışıldığı paralel MHD problemi ilk olarak Gökçen, Ağpak ve Benzer (2006) tarafından açıklanarak aşağıdaki gibi modellenmiştir. Ürünlerin hatlara atamasının bilindiği varsayılan bu yaklaşımın 0 – 1 tamsayılı programlama modeli aşağıda özetlenmiştir.

$c$ çevrim zamanı

$h$ hat numarası, h=1,…,H

$k$ istasyon numarası, k=1,…,K

$||M_{hk}||$ $h$ hattındaki $k$ istasyonuna atanan görevlerin sayısı

$t_{jh}$ $h$ hattındaki $j$ görevinin işlem süresi

$n_h$ $h$ hattındaki görevlerin sayısı

***Değişkenler:***

$$x_{hjk} = \begin{cases} 1 & h\ hattındaki\ j\ görevi\ k\ istasyonuna\ atanırsa \\ 0 & diğer\ durumlarda \end{cases}$$

$$U_{hk} = \begin{cases} 1 & h\ hattında\ k\ istasyonu\ kullanılırsa \\ 0 & diğer\ durumlarda \end{cases}$$

$$z_k = \begin{cases} 1 & k\ istasyonu\ kullanılırsa \\ 0 & diğer\ durumlarda \end{cases}$$

**Model:**

***Amaç fonksiyonu:*** Modelin amaç fonksiyonu görevlerin atandığı istasyonların sayısını en küçüklemektir (eşitlik 2.1).

$$\min \sum_{k=\lceil K_{min} \rceil}^{K_{max}} z_k \qquad (2.\ 1)$$

***Görev – istasyon atamaları:*** Tüm görevlerin istasyonlara atanması ve her bir görevin yalnızca bir tek istasyona atanması eşitlik (2. 2) ile sağlanmaktadır.

$$\sum_{k=1}^{K_{max}} x_{hjk} = 1 \qquad j = 1, \dots, n_h \quad h = 1, \dots, H \qquad (2.\ 2)$$

***Çevrim zamanı kısıtı:*** Bir *k* istasyonundaki görevlerin süreleri toplamının (iş yükü) *c* çevrim zamanını aşamayacağı ve eğer bu *k* istasyonu boş istasyon ise herhangi bir atama yapılamayacağı eşitlik (2. 3) ile gösterilmektedir.

$$\sum_{j=1}^{n_h} t_{hj} x_{hjk} + \sum_{j=1}^{n_{h+1}} t_{(h+1)j} x_{(h+1)jk} \leq c \times z_k$$
$$k = 1, \dots, K_{max}\ ; \qquad h = 1, \dots, H-1 \qquad (2.\ 3)$$

***Komşu hatlar ve görevler:*** Bir *h* hattındaki *k* istasyonunda çalışan operatörün yalnızca bir tek komşu hattan görevler gerçekleştirebilmesi eşitlik (2. 4) ve (2. 5) ile sağlanmaktadır.

$$\sum_{j=1}^{n_h} x_{hjk} - \|M_{hk}\| U_{hk} \leq 0 \qquad h = 1, \dots, H \quad k = 1, \dots, K_{max} \qquad (2.\ 4)$$

$$U_{hk} + U_{(h+a)k} = 1 \qquad h = 1, \dots, H-2;\ \ a = 2 \dots H-h;\ \ k = 1, \dots, K_{max} \qquad (2.\ 5)$$

***Öncelik ilişkileri:*** Bir *r* görevinin, öncülü olan *s* görevinden önceki bir istasyona atanamayacağı eşitlik (2. 6) ile gösterilir.

$$\sum_{k=1}^{K_{max}} (K_{max} - k + 1)(x_{hrk} - x_{hsk}) \geq 0 \qquad \forall (r, s) \in P_h \qquad (2.\ 6)$$

***Değişkenlerin tanımlanması:*** İkili değişkenler aşağıdaki gibi (2. 7) tanımlanmıştır.

$$x_{hjk}, z_k, U_{hk} \in \{0,1\} \qquad h = 1, \dots, H;\ \ k = 1, \dots, K_{max}\ ;\ \ j = 1, \dots, n_h \qquad (2.\ 7)$$

Matematiksel modeli yukarıdaki gibi açıklanan paralel MHD probleminde, hat – ürün atamalarının önceden bilindiği varsayılarak komşu hatlar arasında operatörün ortak kullanımı ile hat verimliliğinin arttırılmasına çalışılmaktadır. Aynı problemin hem ürünlerin hatlara atanması kararını hem de hatların ortak dengelenmesi kararını birlikte değerlendiren *çok ürünlü paralel MHD problemi*, Scholl ve Boysen (2008) tarafından gösterilmiştir. Problem, 0-1 doğrusal programlama modeli olarak modellenerek dal sınır algoritmasına dayanan SALOME tekniği ile çözülmüştür. Geliştirilen yöntem, BMHDP-1 probleminin atama kısıtlarının eklenmesiyle genelleştirilmiş versiyonu olan ARALBP-1 probleminin çözümünde kullanılan ve dal sınır algoritmasına dayanan ABSALOM yöntemiyle; ürünlerin hatlara atanmasını farklı atama alternatifleri deneyerek bulmaya çalışan bir arama algoritmasının kombinasyonudur.

### 2.3.1. Paralel MHD Probleminin Çözümüne Yönelik Sezgisel Yaklaşımlar

Gökçen, Ağpak ve Benzer (2006) tarafından yapılan çalışmada, ürünlerin hatlara atamasının bilindiği durum için önerilen matematiksel programlama modeli yanında, sezgisel bir çözüm yaklaşımı da sunulmuştur. Çalışmada paralel MHD problemini, *pasif* durum ve *aktif* durum olmak üzere iki şekilde ele almışlardır.

Pasif durumda, aynı ürünler aynı çevrim zamanı ile iki farklı montaj hattında üretilmektedirler. Pasif durum, bir iş istasyonundaki boş zamanın çevrim zamanının yarısına eşit veya daha fazla olduğu durumda uygulanmaktadır. Hatlar öncelikle ayrı ayrı dengelenir ve her bir istasyonun boş zamanları hesaplanır. Çevrim zamanının yarısına eşit veya daha fazla boş zamanı olan hatlar komşu hattaki istasyon ile birleştirilir.

Pasif durum, birbiriyle aynı ürünlerin, birbiri ile aynı montaj hatlarında üretildiğini varsaydığı için gerçek uygulamalardan biraz daha uzaktır. Problemin daha gerçekçi, uygulamaya yönelik olarak ele alınması aktif durum olarak gösterilmiştir. Aktif durumda her bir hatta bir ürünün benzer veya farklı modellerinin aynı çevrim zamanı değeri kullanılarak üretilebileceği varsayılmıştır. Hatların farklı çevrim zamanlarına

sahip olması durumunda ise öncelikle çevrim zamanlarını ortak katların en büyüğüne eşitlenir. Bu yaklaşımın çalışma prensibi COMSOAL basit sezgiseline benzemektedir.

Gökçen, Ağpak ve Benzer (2006) ile Scholl ve Boysen (2009) çalışmalarında önerdikleri yöntemleri, literatürde iyi bilinen farklı test problemleri üzerinde uygulamışlardır. Sonuçlar incelediğinde sezgisel yaklaşımın matematiksel model kadar başarılı sonuçlar ürettiği, ayrıca Scholl ve Boysen (2009) tarafından önerilen çözüm yaklaşımının (ABSALOM+arama prosedürü), hem matematiksel modelden hem de Gökçen, Ağpak ve Benzer (2006) tarafından önerilen sezgisel yaklaşımdan daha etkin olduğu gösterilmiştir.

Özcan, Çerçioğlu, Gökçen vd. (2010) tarafından yapılan çalışmada, karma modelli paralel MHD problemi ele alınmış ve bu problemin çözümü için tavlama benzetimi algoritması kullanılmıştır. Kullanılan algoritmada, hat dengesinin en büyüklenmesi ve iş yüklerinin istasyonlar boyunca düzgün dağıtılması amaçlanmıştır. Karma model sıralama problemi için benzer problemlerde yaygın olarak kullanılan minimum parça kümesi yaklaşımı ele alınmıştır. Önerilen sezgisel yaklaşımın çözüm performansının değerlendirilmesi için Kim, Kim ve Kim (2006) tarafından sunulan test problemleri kullanılmıştır. Ayrıca önerilen tavlama benzetimi çözüm yaklaşımı, COMSOAL prensibine dayanan sezgisel yaklaşımla karşılaştırılmış ve önerilen yaklaşımla elde edilen sonuçların biraz daha iyi olduğu tespit edilmiştir.

Paralel MHD probleminin çözümü için önemli bir meta sezgisel çözüm yaklaşımı da Ozbakır, Baykasoglu, Gorkemli vd. (2011) tarafından geliştirilmiştir. Çalışmada sürü zekasına dayanan çok kolonili arı optimizasyon algoritması, modern bir sezgisel olarak kullanılmıştır. Çalışmada, hat dengesinin en büyüklenmesi ve istasyon boş zamanlarının en küçüklenmesi amaçları değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar literatürdeki test problemleri üzerinde test edilerek daha önceki çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Tüm test problemlerinde başarılı sonuçlar elde edildiği, sonuçları ile birlikte gösterilmiştir.

### 2.4. Stokastik Görev Zamanlı MHD Problemi

Görev zamanlarının stokastik olarak değerlendirildiği MHD problemlerinde, görev zamanlarındaki değişkenlikten dolayı istasyona atanan görevlerin, verilen çevrim

zamanı içerisinde tamamlanmaması ihtimali ortaya çıkmaktadır. Dolayısıyla MHD problemlerinde amaç olarak kullanılan istasyon sayısı ve/veya çevrim zamanının dışında, görevlerin çevrim zamanı içerisinde tamamlanmaması durumunda ortaya çıkacak maliyetlerin de dikkate alınmasını gerektirmektedir. Görevlerin istasyon zamanı içerisinde tamamlanmaması veya istasyon zamanını aşması durumunda uygulanabilecek üç temel strateji vardır (Carter and Silverman, 1984; Silverman and Carter, 1986):

- Tamamlanmayan veya eksik görev çevrim içerisinde gerçekleştirilinceye kadar malzeme taşıma sisteminin durdurulması. Bu durumda tek bir istasyon tüm üretim hattını durdurur ve dolayısıyla üretim oranı azalır.
- Tamamlanmayan görevler ve bu görevlerin ardıl operasyonları gerçekleştirilmemiş olarak ürün hattan çıkartılır ve üretim süreci devam eder. Hattan çıkartılan bu ürünün eksik operasyonları çevrim dışı özel istasyonlarda gerçekleştirilebilir veya tamamlanmayan ürün süreç içerisindeyken mobil çalışanlarca yetişmeyen eksik operasyonları tamamlanarak tampon stoklarda bekletilir.
- İstasyon zamanının çevrim zamanını aşma eğilimi olan istasyonlara ilave operatör görevlendirilerek kapasitesi arttırılır. Bu durumda hattın düzeni sağlanmış olur ancak iş parçası başına maliyet de yükselmiş olur.

Görevlerin verilen istasyon zamanı süresinde tamamlanmaması sorununun nasıl aşılacağından bağımsız olarak, her bir tamamlanmama durumu ilave bir maliyete neden olacaktır. Bu tamamlanmama maliyetleri, istasyon kullanım oranlarının düşürülmesiyle azaltılabilmektedir. Aynı zamanda istasyon sayısının veya çevrim zamanının artmasına neden olabilecek bu durum, işçi ve teçhizat maliyetlerini de arttırabilecektir (Kottas and Lau, 1973).

MHD problemlerinde genel olarak kullanılan zaman temelli (istasyon sayısı, çevrim zamanı) amaçlar dışında, maliyet temelli amaçlar; hem problemi gerçek dünya şartlarına daha da yakınlaştırabilmekte hem de problemi etkileyen faktörlerin ortak bir maliyet temelinde değerlendirilmesini sağlayabilmektedir. Stokastik modellerde kullanılan zaman temelli amaçlar; herhangi bir istasyonda çevrim zamanını aşma olasılığının en küçüklenmesi (Reeve and Thomas, 1973) veya istasyon zamanlarının stokastik

değişkenliğinin en küçüklenmesi (Raouf and Tsui, 1982) olarak nitelendirilebilir. Zaman temelli amaçlar kullanılarak da stokastik MHD problemleri değerlendirilebilir ancak yeterince küçük aşma olasılığı elde edebilecek kadar büyük çevrim zamanı kullanmak genellikle mümkün olmadığından, tamamlanmayan görevlerin etkileri büyük önem arz edecektir.

Tamamlanmayan görevler için hesaplanacak tamamlanmama maliyetleri, tamamlanmayan görev ve ardılları için bir maliyet faktörü olacaktır. Stokastik görev zamanlı MHD problemini ele alan çalışmaların hemen hepsinde amaç fonksiyonu olarak işçilik (istasyon) maliyetleri ve tamamlanmama maliyetleri toplamından oluşan, eşitlik (2. 8)'de gösterilen toplam maliyet fonksiyonu kullanılmaktadır. Literatür bilgisi başlığında geçmiş çalışmalarda kullanılan temel amaç fonksiyonları özetlenmiştir.

*Min Z=Top. İşçilik Maliyetleri + Top. Beklenen Tamamlanmama Maliyetleri* (2. 8)

Stokastik görev zamanlı MHD problemlerinde, görev zamanlarının değişkenliğini tanımlamada istatistiksel dağılımlardan, genellikle de normal dağılımdan yararlanılır. Bir görevin süresindeki değişkenlik, görevin *ortalama süresi* ve *varyansı* ($t_j$, $\sigma_j^2$) ile ifade edilir. Literatürdeki çalışmalarda bir görevin bilinen operasyon zamanı *ortalama zaman* olarak değerlendirilirken, ortalama görev zamanının belirli bir oranı *varyans* değeri olarak kullanılmaktadır. Yapılan çalışmalarda ortalama görev zamanının [0.1; 0.40] aralığındaki oranları; düşük, orta ve yüksek varyans durumlarına karşılık gelen değerler olarak kabul edilmiştir (Kottas and Lau, 1973; 1976; 1981; Carter and Silverman, 1984; Silverman and Carter, 1986; Shin, 1990; Sarin, Erel, Dar-El, 1999; Erel, Sabuncuoglu, Sekerci, 2005; Urban and Chiang, 2006; Cakir, Altiparmak, Dengiz, 2011).

Stokastik MHD problemlerinin modellenmesinde kullanılan değişkenler ve eşitlikler aşağıda özetlenmiştir.

$t_j$ = *j* görevinin ortalama görev süresi
$\sigma_j^2$ = *j* görevinin süresinin varyansı
$T_k$= *k* istasyonunun ortalama istasyon süresi

$\delta_k$= *k* istasyonunun standart sapması

$S_k$=*k* istasyonuna atanan görevler kümesi

$\alpha$ = istasyon zamanının çevrim zamanını aşma olasılığı

$z_{1-\alpha}$ = istasyon zamanının çevrim zamanını aşmama olasılığının standart normal değeri

$\phi$= hesaplanan olasılık (standart normal dağılım altında kalan alan)

$P^*_j$ = *j* görevine ait öncül görevler kümesi

$F^*_j$ = *j* görevine ait ardıl görevler kümesi

*r* = birim tamamlanmama maliyeti

*EIC*= beklenen toplam tamamlanmama maliyeti

Eşitlik (2. 9) *k* istasyonuna atanan görevlerin ortalama sürelerinin toplamından oluşan ($T_k$) *ortalama istasyon zamanını* gösterirken; eşitlik (2. 10) *k* istasyonuna atanan görevlerin varyansları toplamının karekökü olarak ($\sigma_k$) *k* istasyonunun süresinin standart sapmasını tanımlamaktadır.

$$T_k = \sum_{j \in S_k} t_j \tag{2. 9}$$

$$\delta_k = \sqrt{\sum_{j \in S_k} \sigma_j^2} \tag{2. 10}$$

Bazı durumlarda, stokastik görev zamanının belirli bir dağılımda güvenlik faktörü içeren görev zamanı değerini geçmediği yaklaşımların kullanılması daha uygun olabilir. Böylelikle stokastik problem sezgisel olarak deterministik yapıya dönüştürülerek uygun şekilde değiştirilmiş MHD çözüm yaklaşımları ile çözülebilirler. Bu konuya dair örnekler Kottas ve Lau (1976; 1981), Sphicas ve Silverman (1976), Henig (1986) ve Carraway (1989) çalışmalarında bulunabilir. Bir istasyona atanacak görevlerde oluşabilecek değişkenlik de dikkate alınarak istasyon zamanının çevrim zamanını aşmamasının belirli bir seviyede garanti altına alınması için istasyona atanabilecek görevlerin ve standart sapmalarının çevrim zamanından küçük olması gerekliliği eşitlik (2. 11) veya eşitlik (2. 12) ile sağlanabilir. Burada $z_{1-\alpha}$ önceden kabul edilen olasılık değerine karşılık gelen standart normal *Z* değerini göstermektedir.

$$T_k + z_{1-\alpha}\sqrt{(\delta_k^2)} \leq c \tag{2. 11}$$

$$\sum_{j \in S_k} t_j + z_{1-\alpha}\left(\sqrt{\sum_{j \in S_k} \sigma_j^2}\right) \leq c \tag{2. 12}$$

Urban ve Chiang (2006) tarafından yapılan çalışmada da verilen, *c* çevrim zamanında istasyondaki tüm görevlerin tamamlanması olasılığının belirli bir *a* değerinden büyük olması eşitlik (2. 13)'deki gibi tanımlanmıştır.

$$Prob\left\{\sum_{j\in S_k} t_j + z_{1-\alpha}\sqrt{\sum_{j\in S_k}\sigma_j^2} \le c\right\} \ge a \qquad (2.\ 13)$$

Bir istasyona atanan görevlerin ortalama sürelerinin çevrim zamanından sapmasının bir ölçüsü olarak *k* istasyonun standart normal sapma değeri $Z_k$ (eşitlik (2. 14)) ve buna bağlı olarak *k* istasyonunda, istasyon zamanının çevrim zamanını aşma olasılığı $Ø_k$ eşitlik (2. 15)'de gösterildiği gibi hesaplanır. $Z_k$ standart normal değeriyle sınırlandırılan standart normal dağılım eğrisinin alanı ($F(Z_k)$) olarak hesaplanır.

$$Z_k = \frac{c - T_k}{\delta_k} \qquad (2.\ 14)$$

$$\phi_k = 1 - F(Z_k) \qquad (2.\ 15)$$

Montaj hatlarında, teknolojik kısıtlar ve görevlerin birbirleri ile olan ilişkileri nedeniyle, bir istasyondaki tamamlanmayan görevlerin sonraki istasyonlardaki görevleri ve dolayısıyla istasyonları etkilemesi söz konusudur. Burada her bir istasyonun çevrim zamanı içerisinde görevlerini tamamlamama olasılığı yerine her bir görevin tamamlanmama olasılığının hesaplanması daha anlamlı bir yaklaşım olarak değerlendirilebilir. Görevlerin öncelik ilişkilerinden dolayı zamanında tamamlanmayan bir görev ardıl görevlerin de tamamlanmamasına neden olacaktır. Dolayısıyla bir istasyondaki her bir görev için çevrim zamanı içerisinde tamamlanmama olasılığının hesaplanması ve amaç fonksiyonunda bir maliyet unsuru olarak değerlendirilmesi mümkündür (Kottas and Lau, 1981).

Erel, Sabuncuoglu ve Sekerci (2005) çalışmasında da açıklandığı üzere bir görevin atandığı istasyondaki çevrim zamanı içerisinde tamamlanmama olasılığı ($Ø_j$) eşitlik (2. 16)'da tanımlandığı şekilde, ilgili görevden önce atanan görevlerin standart normal dağılım altında kalan alanı ile ilgili görev dahil kendinden önce atanan görevlerin standart normal dağılım altında kalan alanlarının farkına eşittir.

$$\phi_j = \phi\left(\frac{c-\sum_{j=1}^{i-1} t_j}{\sqrt{\sum_{j=1}^{i-1}\sigma_j^2}}\right) - \phi\left(\frac{c-\sum_{j=1}^{i} t_j}{\sqrt{\sum_{j=1}^{i}\sigma_j^2}}\right) \qquad j = 1 \dots J, i \in P_j^* \cap i, j \in k \qquad (2.\ 16)$$

Görevlerin verilen istasyon zamanında tamamlanmama olasılığını ve maliyetini etkileyen bir diğer faktör de görevlerin atandıkları istasyon içindeki sıralarıdır (Kottas and Lau, 1976). Bir istasyonda görevlerin istasyon zamanında tamamlanmamasından kaçınmak için istasyondaki izin verilen boş zaman arttıkça, tamamlanmama olasılıkları ve maliyetleri de azalacaktır. Öte yandan, istasyonlara daha fazla boş zaman ayrılması istasyon sayısının dolayısıyla da işçilik ve istasyon maliyetlerinin artmasına neden olacaktır. Birbirini zıt yönlü etkileyen bu durumda izlenebilecek strateji; hattın ilk istasyonlarındaki boş zamanların arttırılarak kalan ardıl görevlerin tamamlanmama olasılıklarının azaltılması ve dolayısıyla maliyetin düşürülmesi sağlanırken, ortaya çıkabilecek istasyon ve işçi sayısı artışını engellemek için son istasyonlara, tamamlanmama olasılığını arttırmasına rağmen, daha fazla görev atamak olacaktır. Hattın sonundaki istasyonlarda tamamlanmama olasılığı yükselecek olsa da ardıl görev sayısının az olması ya da ardıl görev olmaması katlanılacak maliyeti azaltabilecektir.

Görev zamanlarının belirli bir ortalama ve varyansa sahip olarak değişken kabul edildiği stokastik MHD problemlerinde; görevlerin çevrim zamanı içerisinde *tamamlanmama olasılığı*, geleneksel MHD amaç fonksiyonlarına ilave bir maliyet faktörü eklenerek dikkate alınır. Beklenen toplam tamamlanmama maliyeti (*EIC*) olarak isimlendirilen ve eşitlik (2. 17)'de gösterilen bu amaç fonksiyonu, geleneksel işçilik/istasyon maliyetlerine eklenerek en küçüklenmeye çalışılacak amaç fonksiyonunu oluşturur. Beklenen tamamlanmama maliyetinin (*EIC*) belirlenmesinde her bir görev için hesaplanan tamamlanamama olasılığı ($\emptyset_j$), önceden belirlenen ve genellikle normal işçilik/istasyon maliyetlerinin bir oranı olan sabit bir tamamlanamama maliyeti ($r$) ve ilgili görev ve ardıllarının süreleri toplamı ile çarpılarak hesaplanır (Erel, Sabuncuoglu, Sekerci, 2005).

$$EIC \cong \sum_{j\in J}\left(r \times \emptyset_j \times (t_j + \sum_{j\in F_j^*} t_j\right) \qquad (2.\ 17)$$

Stokastik görev zamanlı MHD probleminin matematiksel modelinde, deterministik MHD problemine göre revize edilmesi gereken iki eşitlik bulunmaktadır. Birincisi, tamamlanmama durumunda ortaya çıkacak maliyeti dikkate alması gereken amaç fonksiyonu eşitliği, ikincisi ise çevrim zamanı kısıtıdır. Bu eşitlikler üzerinde yapılması gereken revizyonlar 4.1.1. başlığında açıklanmıştır. Stokastik görev zamanlı MHD problemlerinde kullanılan farklı amaç fonksiyonları ve çözüm yaklaşımları ile ilgili bilgiler ilgili literatür taraması başlığında açıklanmıştır.

## 2.5. Literatür Taraması

MHD problemlerinin yaklaşık 60 yıllık tarihi boyunca çok çeşitli araştırmalar yapılmıştır. Bu tez çalışması kapsamında stokastik görev zamanlı Paralel MHD problemi incelendiğinden, oldukça zengin bir literatüre sahip olan MHD problemlerinden sadece stokastik görev zamanlı ve paralel tasarımlı MHD problemleri ile ilgili önceki çalışmalar bu bölümde özetlenmeye çalışılmıştır.

### 2.5.1. Paralel MHD Problemleri

Montaj hatları ve MHD problemi ile ilgili çok sayıda araştırma bulunmasına rağmen paralel veya çoklu hatların ele alındığı çalışmalar nispeten sınırlı sayıdadır. Literatürdeki Ghosh ve Gagnon (1989), Erel ve Sarin (1998), Rekiek, Dolgui, Delchambre vd. (2002), Scholl ve Becker (2006), Becker ve Scholl (2006), Boysen, Fliedner ve Scholl (2007), Battaia ve Dolgui (2013) çalışmaları montaj hatları ile ilgili önemli literatür özetleri sağlamakta ve gelecekteki araştırmalara rehberlik etmektedir. Paralel montaj hattı dengeleme problemi Gökçen, Ağpak ve Benzer (2006) tarafından tanımlanmadan önce içerisinde paralellik geçen ancak kaynakların ortak kullanımı ile eşzamanlı dengelemeyi kapsamayan çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmalar daha çok hatların bağımsız dengelenmesini ve maliyetleri incelemişlerdir.

Birden fazla montaj hattının paralel olarak değerlendirildiği ilk çalışma Lehman (1969) tarafından gerçekleştirilmiştir. Çalışmada bir dizi ürünün belirli bir sayıdaki paralel konumlandırılmış montaj hattına atanması problemi ele alınmıştır.

Wyman ve Moberly (1971) çalışmasında üç farklı paralel hat yapısının simülasyon modeli sonuçları analiz edilmiştir. Analizlerde kuyruk kapasitesi, arıza oranı, tamirat oranı ve aşama sayısı gibi parametrelerin etkileri incelenmiştir.

İnsan ve üretim sistemleri arasındaki etkileşim için önemli bir araştırma olan Globerson ve Tamir (1980) çalışmasında, bir simülasyon modeli hazırlanmıştır. Önceden belirlenen bir süreci ele alan simülasyon modeli, hat sayısının insan davranışı, sistemin tepki zamanı ve tamamlanan iş oranı üzerindeki etkilerinin incelenmesi için geliştirilmiştir. Analizlerde her bir durumda toplam işçi sayısı sabit tutulmuş ve her bir hat için istasyon sayısı eşit alınmıştır. Çalışmada kullanılan en önemli varsayımlardan birisi ise bir işin istenilen belirli bir sayıdaki istasyona atanabilecek şekilde görevlere bölünebildiği varsayımıdır. Çalışma ile ilgili diğer bir önemli nokta ise stokastik görev zamanlarının kullanılmasıdır. Her bir görevin gerçekleştirilmesi için gerekli zamanın tahmin edilmesinde öğrenme eğrileri kullanılmış ve işe gelmeme ve fire oranları tahmininde standart işlem zamanı kullanılmıştır.

Chakravarty ve Shtub (1988) tarafından yapılan çalışmada, sistemin tepki zamanını en küçükleyecek hat sayısının tespiti için analitik bir model geliştirilmiştir. Aslında sadece hat sayısının belirlenmesi değil genel anlamda iş tasarımı olarak nitelendirilebilen çalışmada devamsızlık, fire ve öğrenme gibi faktörleri sistemin tepki zamanı ile ilişkilendiren matematiksel eşitlikler kullanılmıştır. Analiz sonuçlarına göre öğrenme etkisinin daha etkili olduğu ve yeni sistemler için iyi bir iş tasarımının oldukça önemli bulunduğu belirtilmiştir. Ayrıca paralel montaj hatlarının kullanımıyla, işçi tatmini ve üretkenliğinde yükselmeler olabileceği, Ellegard ve Jonsson (1992) çalışmasında gösterilmiştir.

Çok modelli üretimde üretilecek modellerin mevcut hatlara atanması problemini ele alan bir çalışma da Ahmadi, Dasu ve Tang (1992) tarafından ele alınmıştır. Bu dinamik atama problemi için optimale yakın sonuçlar üreten 3 sezgisel yaklaşım önermişlerdir. Geliştirilen yöntemlerde amaç fonksiyonu olarak, model değiştirme maliyeti ve başarısızlık ceza maliyeti kullanılmıştır. Problemin çözümünde çeşitli türdeki görevlerin paralel makinelerde çizelgelenmesi yaklaşımı esas alınmıştır.

Bu alandaki önemli bir çalışma da Süer ve Dagli (1994) tarafından gerçekleştirilmiştir. Çalışmada *n* farklı modelin değişken sayıdaki hatlara atanması problemi ele alınmıştır. Her bir hatta verilen zaman periyodu boyunca kullanılabilir istasyon sayısını aşmayacak şekilde istasyon sayısı değişebilmektedir. Bu problemin çözümü için sezgisel bir yaklaşım geliştirilmiş ve amaç fonksiyonu olarak tüm işlerin tamamlanma zamanı ve sistemin ortalama tepki zamanı kullanılmıştır. Problemin çözümü için öncelikle her bir zaman periyodu için hat sayısı ve her bir modele atanacak kaynak sayısı önceden belirlenerek, modeller hatlara atandığında 6 farklı çizelgeleme stratejisi ile parametreler hesaplanmıştır.

Paralel hatların kullanılmasıyla ortaya çıkacak makine teçhizat maliyetlerinin incelendiği çalışmada Daganzo ve Blumenfeld (1994), iki veya daha fazla sayıda montaj hattının paralel veya çoklu hat olarak kullanılmasının daha yüksek teçhizat maliyetlerine neden olacağını göstermişlerdir.

Pinnoi ve Wilhelm (1997) çalışmalarında; tek makine, paralel özdeş iki makine, paralel özdeş olmayan iki makine ve benzer makineler durumlarını içeren hat tasarım problemleri için karma modelli doğrusal programlama modeli önermişlerdir. Çalışmada her bir ürünün önceden belirlenmiş bir ürünün üretilebildiği bir hatta veya çeşitli ürünlerin üretilebildiği esnek bir hatta atanabileceği varsayılmıştır. Ayrıca maliyetlerden dolayı sadece tek bir esnek hattın kullanılabildiği kabul edilmiştir. Her bir ürün için görev zamanlarının ve çevrim zamanının bilindiği ve sabit olduğu varsayımı altında, istasyonların ve makinelerin sabit ve değişken maliyetleri ile istasyon açma maliyeti ve esnek hatta atanan ürünlerin hazırlık maliyetleri toplamından oluşan toplam maliyetin en küçüklenmesine çalışılmıştır. Geliştirilen karma tamsayılı programlama modellerinin çözümü için kesme düzlemi yaklaşımının kullanılabileceği belirtilmiştir.

Süer (1998) çalışmasında ise gerekli işçi sayısının görev sayısından fazla olduğu tek bir modelin yüksek hacimde üretilmesi problemi için üç aşamalı sezgisel bir yaklaşım önermişlerdir. Problemde, kullanılacak hat sayısın ve istasyonlara atanacak işçi sayısının belirlenmesine çalışılmakta ve bunun için de toplam işçi sayısının en küçüklenmesini hedefleyen bir amaç fonksiyonu kullanılmıştır. Sezgiselin montaj hattı dengeleme olarak adlandırılan ilk aşamasında görevler istasyonlarda

gruplandırılmaktadır. İkinci aşamada çeşitli istasyon konfigürasyonları değerlendirilerek her bir sayıdaki işçi için çeşitli alternatifler üretilmektedir, böylece paralel istasyonlar belirlenmektedir. Her bir istasyona atanacak işçi sayısının belirlenmesinde ise üretim oranını maksimize edecek şekilde tasarlanan tam sayılı programlama modeli kullanılmaktadır. Üçüncü ve son aşamada, her bir işçi sayısı için en iyi üretim oranını veren alternatif seçilmektedir. Paralel hat sayısını da belirleyen son aşamada tam sayılı programlama modeli kullanılarak toplam işçi sayısı en küçüklenecek şekilde paralel hatların sayısı ve konfigürasyonu belirlenmektedir.

Miltenburg (1998) çalışmasında çoklu u-tipi yerleşim düzeninde u-tipi montaj hatların dengelenmesi problemini ele almıştır. Verilen $N$ adet u-tipi montaj hattının önceden belirli bir çevrim zamanına göre ilgili kısıtları sağlayacak şekilde en küçük istasyon sayısını belirmeye çalışmıştır. U-tipi hattın yerleşim düzeninin ve görevlerin konumunun hattın bir tarafından diğerine çakışma olmaksızın geçme imkânını engelleyebileceğinden ikincil bir amaç olarak boş zamanların bir istasyona yoğunlaştırılarak yapılacak iyileştirme çalışmalarında bu istasyona odaklanma imkânı sağlanmıştır. Normal, çapraz geçişli ve çoklu hatlar olmak üzere üç farklı istasyon yapısı incelenmiştir. Normal hatlarda tıpkı düz hatlarda olduğu gibi ardışık sırada bir dizi görev yerine getirilmekte ve en fazla altı görevin gerçekleştirilmesine izin verilmektedir. Çapraz geçişli istasyonlar bir u-tipi montaj hattının farklı yönlerine yerleştirilmiş istasyonlardır. Çoklu hatlar ise iki komşu u-tipi montaj hattından da görevler içerebilen hatlar olarak değerlendirilmiş ve komşu u-tipi hatlar arasında sadece bir tane çoklu hat istasyonu kurulabilmesi varsayılmıştır. Küçük boyutlu problemler (en fazla 22 görev içeren $N$ adet u-tipi montaj hattı) için dinamik programlama yaklaşımıyla optimal sonuçlar elde edilmiştir.

Sparling (1998), *tam zamanında üretim* birimi olarak isimlendirilen ve tamamı aynı üretim hattı için parçalar üreten, aynı çevrim zamanında çalışan ve çoklu hat istasyonları oluşturabilecek şekilde birbiriyle yakın konumlandırılmış bir dizi u-tipi hattı ele almıştır. U-tipi hatlara erişim sadece u-tipi hattın başlangıç alanı olarak isimlendirilen bölgelerle sınırlandırılmış ve istasyonların çapraz yollarına izin verilmemektedir. Dolayısıyla herhangi bir u-tipi hatla ilişkilendirilen çok hatlı istasyon sayısı ikiden fazla olamamaktadır. Bir çoklu hat istasyonu en fazla $k$ u-tipi hattan

görevler içerebilmektedir. Gezmeli (dolaşmalı) *N* u-tipi dengeleme problemi (NULB-T) olarak isimlendirilen (gezi zamanlarını, çevrim zamanını, öncelik ilişkilerini ve konum kısıtlamalarını içeren) problem modellenerek sezgisel bir çözüm algoritması sunulmuştur.

Paralel montaj hatlarının kullanılmasıyla geleneksel üretim sistemlerinden farklı olarak daha esnek ve daha güvenilir üretim imkânları sağlanacağı Rekiek, Dolgui, Delchambre vd. (2002) çalışmasında açıklanmıştır.

Paralel MHD problemi başlığında açıklandığı üzere ortak kaynaklarla birden fazla montaj hattının eş zamanlı ortaklaşa dengelenmesi problemi ilk olarak Gökçen ve Ağpak (2004) ile Gökçen, Ağpak ve Benzer (2006) tarafından gösterilmiştir. Yazarlar önerdikleri yöntemi literatürde iyi bilinen 14 problem örneğinden üretilen 95 test problemini kullanarak önerilen yaklaşımı test etmişlerdir. Geliştirilen tamsayılı programlama modeli 30 ve daha az görev içeren test problemleri için çözülmüştür. Önerilen sezgisel yaklaşım 95 test probleminin 65'inde hatların bağımsız olarak ele alınmasıyla elde edilecek istasyon sayısından daha az sayıda istasyon bulmuştur.

Lan (2007) çalışmasında bir üretim hattı için geçerli konfigürasyonlar listesinden tercih edilecek konfigürasyonların belirlenmesi ve seçilen her bir konfigürasyon için her bir istasyona atanacak paralel makinelerin sayısının, üretim oranının ve sistem çalışma zamanının tespiti için iki aşamalı bir yaklaşım ortaya koymuşlardır. Her bir türdeki makinelerin sayısı sınırlı tutulmuş ve bir ürünün bir siparişinin miktar ve teslim tarihi koşullarına uyulması zorunlu kılınmıştır. Diğer birçok çalışmadan farklı olarak bu yaklaşımda kâr odaklı bir çözüm üretilmekte ve kârın hesaplanmasında sipariş ile elde edilen gelir ve maliyetlerin farkı kullanılmaktadır. Maliyetler ise malzeme, hazırlık, operasyon, bakım ve stok bulundurma maliyetleri ile sabit maliyetlerden oluşmaktadır. Çözüm yaklaşımının birinci aşamasında eldeki üretim zamanında gerekli üretim miktarını sağlayabilecek bir sistem tasarlanmasının mümkün olup olmadığı belirlenmekte yani maksimum üretim miktarı hesaplanmaktadır. Eğer üretim sistemi gerekli üretimi sağlayamıyorsa sipariş reddedilmekte aksi takdirde ikinci aşama başlamaktadır. İkinci aşamada tüm uygun üretim hattı konfigürasyonları değerlendirilmekte ve her biri için teorik üretim zamanı ve kâr hesaplanmaktadır. Bu

bilgiler her bir konfigürasyonun çalışma zamanını belirleyecek iteratif sürecin başlangıç noktasını oluşturmaktadır. Bu süreçte daha önce hesaplanan kâr miktarları ve sipariş teslim zamanları dikkate alınmakta iteratif olarak çözüm geliştirilmektedir.

Chiang, Kouvelis ve Urban (2007) çalışmasında çoklu u-tipi hatlardan oluşan bir tam zamanında üretim sisteminin dengelenmesi problemi incelenmiştir. Yapılan araştırmaların daha önceki Miltenburg (1998) ile Sparling ve Miltenburg (1998) çalışmalarından farkı hat sayısının belirlenecek olması ve u-tipi hatların bağımsız olduğunun kabul edilmesi nedeniyle hatları birbirine bağlayan çok hatlı istasyonlar bulunmamasıdır. Yazarların amaçlarından birisi de çoklu u-tipi hat dengeleme probleminin açıklanması ve özelliklerinin ortaya konmasıdır. Çalışmada; verilen global çevrim zamanı için toplam istasyon sayısının en küçüklenmesi, verilen istasyon sayısı için çevrim zamanının en küçüklenmesi ve hat sayısı ve istasyon sayısının doğrusal bir fonksiyonu olarak tanımlanan maliyetin en küçüklenmesi amaçları değerlendirilmiştir. Ele alınan çoklu u-tipi hat dengeleme probleminin 45 göreve kadarki örnekleri karma tamsayılı doğrusal programlama yaklaşımıyla etkin şekilde çözülmüştür.

Çeşitli boyutlardaki u-tipi hat dengeleme problemleri doğrusal olmayan programlama ile modellenebilmekte ancak büyük boyutlu problemlerin çözümü pratik olamamaktadır. Bu duruma karşı Chiang, Kouvelis ve Urban (2007) çalışmasında iki adımdan oluşan bir çözüm yaklaşımı önerilmiştir. Birinci adımda, u-tipi hatların her biri için bağımsız olarak iyileştirilemeyen çözümler belirlenmekte ve ikinci adımda çözümdeki her bir türdeki hat sayısının belirlenmesi için tamsayılı doğrusal programlama kullanılmaktadır. Bu iki adımlı yaklaşımın 100'den fazla göreve sahip problemleri optimal olarak etkili şekilde çözebildiği rapor edilmiştir.

Paralel MHD ile ilgili Lusa (2008) ile Scholl ve Boysen (2008;2009) çalışmalarıyla ilgili detaylı bilgiler önceki başlıklarda açıklanmıştı. Scholl ve Boysen (2009) çalışmasında önerilen çözüm yaklaşımı ve elde edilen sonuçlar Gökçen, Ağpak ve Benzer (2006) çalışmasıyla karşılaştırılmıştır. Küçük ve orta büyüklükteki problemlerde optimal çözümler başarıyla bulunmuş, büyük boyutlu problemler içinde etkin zamanlarda başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

Esmaeilian, Sulaiman, Ismail vd. (2008) çalışmasında paralel hat yapısında karma modelli montaj hattı dengeleme problemi ele alınmıştır. Problemin başlangıç çözümünün elde edilmesi için tabu arama algoritmasının nasıl kullanılacağı MATLAB ortamında açıklanmıştır.

Özcan, Çerçioğlu, Gökçen vd. (2009) çalışmasında PMHDP'ne tabu arama algoritması ile çözüm geliştirilmiştir. Önerilen yaklaşım amaç fonksiyonu olarak istasyon sayısının en küçüklenmesi ve istasyon yükleri arasındaki değişimlerin en küçüklenmesi amaçlarını kullanmıştır. Bu yönü ile PMHDP'nin çözümünde çok amaçlı amaç fonksiyonu kullanan ilk çalışma olmuştur.

Özcan, Çerçioğlu, Gökçen vd. (2010) karma modelli paralel montaj hattı dengeleme problemini ele almışlardır. Tavlama benzetimi temelli bir çözüm yaklaşımı sunulan çalışmada model sıralama problemi için en küçük parça kümesi yaklaşımı kullanılırken, hat dengesinin en büyüklenmesi ve iş yüklerinin düzgün dağıtılması amaçları gözetilmiştir. Önerilen çözüm yaklaşımı literatürdeki çeşitli test problemleri üzerinde test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar COMSOAL temelli çözüm yaklaşımından daha başarılı çözümler elde edildiğini göstermektedir.

Ozbakır, Baykasoglu, Gorkemli vd. (2011) çalışmasında ise paralel PMHD probleminin çözümü için çok kolonili arı algoritması yaklaşımı önerilmiştir. Hat dengesinin en büyüklenmesi ve istasyonlardaki boş zamanların en küçüklenmesi amaçları MDM metodu ile bir araya getirilerek amaç fonksiyonu olarak kullanılmıştır. Literatürde sürü zekâsının kullanıldığı modern bir sezgiselin paralel MHD problemine uygulandığı ilk çalışma olarak öne çıkan bu araştırmada, test problemlerinden elde edilen sonuçlar önceki çalışmalar ile karşılaştırılmıştır. Önerilen yaklaşımın tüm test örneklerinde daha etkin zamanlarda daha başarılı sonuçlar verdiği gösterilmiştir.

### 2.5.2. Stokastik Görev Zamanlı MHD Problemleri

Görev zamanlarının değişkenliğini ele alan ilk çalışmalardan birisi Moodie ve Young (1965) tarafından gerçekleştirilmiş ve problemin ilk optimalite kriteri tanımlanarak çözüm için bir sezgisel açıklanmıştır. Çalışmada görev zamanlarının bağımsız normal değişkenliklere sahip olduğu varsayılmıştır.

Görevlerin tamamlanma zamanlarının normal dağılım kullanılarak başarılı şekilde açıklanabildiği Dudley (1963) çalışmasında gösterilmiştir. Çalışan olarak insanı dikkate alan ve dolayısıyla çalışma şartlarını daha gerçekçi yansıttığı düşünülen değişken görev zamanlarıyla ilgili farklı dağılımlar da kullanılmıştır (Kao, 1976; 1979; Sniedovich, 1981; Nkasu and Leung, 1995). Bu çalışmalarda stokastik MHD probleminin optimal çözümü için dinamik programlama yaklaşımları kullanılmıştır.

Stokastik MHD problemlerinde ele alınan stratejilerden istasyon süresi içerisinde tamamlanamayan ürünlerin hattın dışında tamiratının yapılması problemi Kottas ve Lau (1973; 1976; 1981), Carter ve Silverman (1984) tarafından açıklanmıştır. Bu çalışmalarda ürünlerin verilen istasyon zamanında tamamlanmaması durumu maliyet temelli bir amaç fonksiyonu kullanılarak değerlendirilmiştir. Kullanılan amaç fonksiyonu işçilik maliyetleri (LC – labor cost) ve beklenen tamamlanmama maliyetinden (EIC – expected incompletion cost) oluşmaktadır. Beklenen tamamlanmama maliyeti ise her bir görev için ilgili görev ve ardıllarının birim tamamlanmama maliyetlerinin toplamı ile her bir görev için hesaplanan tamamlanmama olasılığının (görevin atandığı istasyon ve o istasyondaki sırasına da bağlı olarak) çarpımına eşittir (Kottas and Lau, 1973; 1976; 1981).

Kottas ve Lau (1981) tarafından önerilen marjinal maliyet takası yaklaşımında, bir görevin bir istasyona atanmasıyla ilgili istasyonda görevin ortalama işlem zamanı kadar bir maliyet tasarrufu sağlanırken, bu ilave işlem zamanının mevcut istasyona eklenmesiyle ortaya çıkacak olan tamamlanmama ihtimalindeki artış ve dolayısıyla beklenen tamamlanmama maliyeti arasında bir takas söz konusudur. Elde edilen maliyet tasarrufunun, maliyet artışından daha büyük olduğu durumlarda ilgili görevin istasyona atanmasına izin verilmektedir. Önerilen bu sezgisel yaklaşım tamamlanmayan görevlerin hattın dışında gerçekleştirilmesini esas alan stokastik MHD problemleri için temel bir sezgisel çerçeve olarak kabul edilmiştir.

Tamamlanmayan ürünlerin hattın dışında tamamlanması yaklaşımı Carter ve Silverman (1984) çalışmasında da ele alınmıştır. Amaç fonksiyonu olarak normal istasyon maliyetleri ve beklenen tamamlanmama maliyetlerinin toplamından oluşan bir maliyet

fonksiyonu kullanılmıştır. Normal istasyon maliyetleri birim istasyon maliyeti, istasyon sayısı ve çevrim zamanının çarpımından oluşmaktadır. Beklenen tamamlanmama maliyeti ise ürünün hat dışında tamamlanma maliyeti ve çevrim zamanını aşma olasılığının çarpımına eşittir. Bu yaklaşımın her bir görev için tamamlanmama olasılığının ve maliyetinin hesaplandığı Kottas ve Lau (1981) yaklaşımından en önemli farkı, tamamlanmama maliyetinin her bir görev için değil her bir istasyon için hesaplanmasıdır. Ayrıca Carter ve Silverman (1984) tarafından önerilen sezgisel yaklaşımda her bir istasyona atanan görevlerin sürelerinin toplamının çevrim zamanını aşmama ihtimalinin belirli bir $\alpha$ güven seviyesinde olması sağlanmaktadır. Çalışmada farklı $\alpha$ güven seviyeleri ve farklı $r$ maliyet değerleri düşük ve yüksek varyans durumları için çeşitli test problemleri üzerinde denenmiştir. Sonuçlar önerilen yaklaşımın tüm örneklerde en az deterministik modeller kadar iyi sonuçlar ürettiğini göstermiştir.

Shtub (1984) Çalışmasında ilave çalışanların dinamik olarak atanabilme ihtimalini değerlendirmiştir. Böylelikle görevlerin tamamlanmama ihtimali bulunan istasyonlara dinamik olarak ilave çalışanlar yönlendirilebilmektedir. Driscolla ve Abdel-Shafi (1985) çalışmasında ise stokastik MHD problemi için beklenen dengeleme koşulları ile gerçek çalışma koşulları arasındaki farklılıkları dikkate alarak simülasyon temelli bir çözüm yaklaşımı önermiştir.

Görevlerin zamanında tamamlanmaması durumunda hattın durdurulması Silverman ve Carter (1986) ve çevrim zamanının genişletilmesi Lau ve Shtub (1987) problemleri de detaylı olarak incelenmiştir. Her iki durumda da problemler için önce bir dizi uygun çözümün geliştirilmesi ve daha sonra bu uygun çözümler arasından en düşük maliyetli çözümün seçilmesi işlemleri çözüm yaklaşımı olarak benimsenmiştir. Amaç fonksiyonu olarak daha önceki çalışmalarda da benimsenen istasyon maliyetleri ve beklenen tamamlanmama maliyetlerini en küçükleyen maliyet temelli bir amaç fonksiyonu kullanılmıştır.

İstasyon açma ve işletme maliyetleri ve ürünlerin tamamlanmama maliyetlerinin toplamını en küçükleyen uygun bir en küçük çevrim zamanı aralığında görevlerin optimal istasyon atamalarını araştıran bir sezgisel Shin (1990) çalışmasında

gösterilmiştir. Çoğunlukla işçilik maliyetlerinden oluşan istasyon açma/çalıştırma maliyetleri ve çevrim zamanı süresi içinde tamamlanmayan ürünlerin tamamlanmama maliyetlerini her bir istasyon için ve baştaki istasyonun sonrakileri etkilediği aşağı yönlü etkileşim ile ve ilave bir fazla mesai maliyet değeri ile birlikte değerlendirilmiştir. Belirli bir aralıkta verilen çevrim zamanı için en küçük değer ve buna bağlı olarak uygun bir görev – istasyon ataması sezgisel süreç tarafından değerlendirilerek probleme çözüm aranmıştır.

Ürünlerin tamamlanmayan görevlerinin hat dışında gerçekleştirilmesi problemi Sarin ve Erel (1990) tarafından da ele alınmış ve problem kısıtlanmış dinamik programlama yaklaşımı ile sezgisel olarak çözülmüştür. Problemin çözümünde önce alt problemler kısıtlanmış dinamik programlama yaklaşımı ile çözülmekte ve dal-sınır prosedürleri uygulanarak geliştirilen başlangıç çözümleri bir araya getirilerek nihai çözüme ulaşılmaktadır.

Sarin, Erel ve Dar-El (1999) çalışmasında, toplam işçilik maliyetleri ve beklenen tamamlanmama maliyetlerinin toplamından oluşan toplam maliyet fonksiyonu, tek modelli stokastik MHD probleminin çözümünde kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan amaç fonksiyonu önceki çalışmalardan farklı olarak tekrar hesaplanan tamamlanmama maliyetlerinin düzeltilmesini içermektedir. Ardıl bir görevin 2 farklı öncülü tarafından tekrar tekrar tamamlanmama maliyetine eklenmesinden kaynaklanan fazladan maliyetler önerilen amaç fonksiyonu ile elenmektedir. Geliştirilen yöntem, dinamik programlamaya dayanan bir başlangıç çözümü elde edilmesi ve bu başlangıç çözümünün dal – sınır yaklaşımı esasında geliştirilmesine dayanmaktadır.

Stokastik görev zamanlı MHD problemlerine meta sezgisel yaklaşımların ilk uygulamalarından olan Suresh ve Sahu (1994) çalışmasında tavlama benzetimi meta sezgiseli kullanılmıştır. Rastgele komşuluklar üreterek bu çözümlerin uygunluğuna karar veren tavlama benzetimi çözüm yaklaşımında başlangıç çözümünden bağımsız olarak nihai çözüme ulaşılabildiği belirtilmiştir. Maliyet temelli amaç fonksiyonunda yapılabilecek ufak değişikliklerle farklı amaçlar doğrultusunda yeni çözümler elde edilebilme imkânı sağlanmış olmaktadır.

Lyu (1997) çalışmasında stokastik görev zamanlı MHD problemi için stokastik optimizasyon modelinin bir tür simülasyon modeli uygulaması olan tek çalıştırmalı optimizasyon (single-run optimization) algoritması kullanmışlardır. Öncelikle bir sezgisel ile başlangıç hat tasarımı yapılmakta daha sonra bu tasarımda kullanılan sezgisel ve parametrelerinin performansı simülasyon modeli üzerinde değerlendirilmektedir. Durdurma kriteri sağlanıncaya kadar tek çalıştırmalı optimizasyon yaklaşımıyla simülasyon modelinin parametreleri değiştirilerek çözümün geliştirilmesi sağlanmaktadır. Düz ve u-tipi montaj hatlarının performanslarını stokastik görev zamanları ile inceleyen Chand ve Zeng (2001) çalışmasında önemli bir tespitte bulunmuşlardır. Görev zamanlarının deterministik olduğu durumda u-tipi hatlar her zaman en az optimal düz hatlar kadar verimli olmasına rağmen, görev zamanları stokastik olduğunda u-tipi hat yapısının daha düşük verime sahip olabileceği belirtilmiştir.

McMullen ve Frazier (1997) çalışmasında karma modelli ve paralel istasyonlu stokastik hat dengeleme probleminin çözümü için yedi adet görev seçme sezgiseli kullanan bir sezgisel önermişlerdir. Öncelikle farklı modellerin görev zamanları toplam talebi karşılayacak şekilde kompozit görev zamanlarına dönüştürülmekte ve talebi karşılayacak çevrim zamanı belirlenmektedir. Daha sonra COMSOAL temelli bir süreç ile görev seçme kriterleri kullanılarak görevlerin istasyonlara atanması ve paralel istasyon açılıp açılmama kararı verilmesi işlemleri gerçekleştirilmektedir. Yapılan deneyeler sonucu bazı görev seçme kurallarının (en küçük işlem zamanı, en küçük iş merkezi kullanım oranı, iş merkezindeki görevlerin zamanında tamamlanma olasılığı en büyük olan, en büyük iş merkezi kullanım oranı) diğerlerine göre daha iyi sonuçlar üretilmesine daha fazla yardımcı olduğu görülmüştür.

McMullen ve Frazier (1998) tarafından yapılan bir diğer çalışmada, tavlama benzetimi meta sezgiseli kullanılarak stokastik MHD problemine çözüm aranmıştır. Çalışmada paralel istasyon kullanılması durumu da incelenerek çok amaçlı bir amaç fonksiyonu kullanılmıştır. Tasarım maliyetinin, düzgünlük indeksinin, gecikme ihtimalinin farklı etki seviyelerinde ağırlıklandırılarak kullanıldığı çok amaçlı yapıda tavlama benzetimi çözüm yaklaşımın ortama performans açısından diğer yaklaşımlardan daha başarılı olduğu belirtilmiştir.

Çevrim zamanı içerisinde tamamlanmayan görevlerin montaj hattı dışında tamamlanması ve tampon bölge, hareketli çalışan kullanılması gibi ilave durumların, mevcut çözüm yaklaşımlarıyla simülasyon modeli üzerinde kıyaslandığı bir araştırma Gökcen ve Baykoc (1999) tarafından gerçekleştirilmiştir. Önerilen yaklaşımda, bir istasyondaki tamamlanmayan iş parçası hattın dışında hareketli bir çalışan tarafından tamamlanmakta ve daha sonra bu parça sıradaki istasyonun tampon bölgesine alınmaktadır. Sıradaki istasyonun sonraki iş parçası tampon bölgeden alınarak montaj süreci devam etmektedir. Dolayısıyla kullanılacak amaç fonksiyonu tampon bölge maliyetlerini de içerecek şekilde düzenlenmelidir.

Doerr, Klastorin ve Magazine (2000) çalışmasında farklı yetenek seviyelerindeki çalışanların görevlere atanması maliyetinin, amaç fonksiyonuna etkisini incelemişlerdir. Farklı çevrim zamanlarında çalışabilen, fazla mesai yapabilen ve görev zamanlarının değişkenliğe sahip olduğu montaj hattı tasarım problemi için kesin çözüm algoritması ve büyük boyutlu problemler için de bir sezgisel geliştirmişlerdir.

Guerriero ve Miltenburg (2003) çalışmasında, her bir istasyondaki tamamlanmama olasılığı belirli bir değerden daha küçük olacak şekilde toplam istasyon sayısını ve iş yükünü minimize eden özyinelemeli (recursive) bir kesin çözüm algoritması geliştirmişlerdir. Yapılan deneysel çalışmalar önerilen algoritmanın 25 göreve kadar ki problemleri çözme yeteneğine sahip olduğunu göstermiştir.

Demet araması (beam search) kullanılarak stokastik montaj hatlarına çözüm aranan Erel, Sabuncuoglu ve Sekerci (2005) çalışmasında, düz ve u-tipi montaj hatları için bir sezgisel çözüm yaklaşımı önerilmiştir. Toplam işçilik maliyetleri ve beklenen tamamlanmama maliyetlerinin toplamından oluşan amaç fonksiyonun kullanıldığı çalışmada düz hatlar için elde edilen sonuçlar Kottas ve Lau (1976) çalışması ile karşılaştırılmıştır. Önerilen yaklaşımın %24'e varan oranlarda daha başarılı sonuçlar ürettiği ve bilinen sezgisellerden daha başarılı olduğu belirtilmiştir.

Stokastik görev zamanlı u-tipi montaj hatlarını ele alan diğer bir çalışma da Urban ve Chiang (2006) tarafından gerçekleştirilmiştir. Stokastik u-tipi MHD probleminin

çözümü için şans kısıtlı parçalı doğrusal tamsayılı programlama modeli geliştirilmiştir. Modelin etkinliğinin arttırılması için alt sınırların belirlenmesinde ayrıştırılabilir programlama ve mevcut kesin çözüm algoritmaları kullanılmıştır. Test problemleri üzerinde yapılan deneyler önerilen çözüm yaklaşımının uygulamada karşılaşılabilecek boyutlardaki problemleri çözebilme yeteneğine sahip olduğunu göstermiştir.

Sotskov, Dolgui ve Portmann (2006) çalışmasında BMHDP-1 tipi problem çözümlerinin güvenilirlik analizini (diğer faktörler sabit iken görev zamanlarındaki değişkenliğin optimum çözüm kararlılığı üzerindeki etkisi) yapmışlardır.

Ağpak ve Gökçen (2007) çalışmasında düz ve u-tipi stokastik MHD problemi için şans kısıtlı 0-1 tamsayılı programlama modeli önermişlerdir. Ayrıca sistemin gerçekçiliğini arttırmak için problemin amaç programlama modeli ile çözümünü gerçekleştirmişlerdir. Geliştirilen yaklaşım literatürdeki test problemleri üzerinde denenerek deneysel sonuçlar rapor edilmiştir. Çalışmada önerilen yaklaşımın 35 görevli problemlere kadar optimal çözümleri bulabildiği, daha fazla görev içeren problemlerin 72000 saniye zaman kısıtı içinde çözülemediği rapor edilmiştir.

Çerçioğlu (2009) çalışmasında stokastik paralel MHD problemi ele alınmıştır. Problemin çözümü için geliştirilen şans kısıtlı 0-1 tamsayılı programlama modelini doğrusallaştırmak için *doğrusal yaklaşım* ve *doğrusal dönüşüm* prosedürleri uygulanmıştır. Doğrusal dönüşüm yaklaşımı ile en fazla (11+10) görevli Jackson problemine etkin zamanda (72000 sn çözüm zamanı kısıtı) çözüm üretilebilirken, doğrusal yaklaşım da en fazla (30+28) görevli Sawyer problemine etkin zamanda çözüm üretilebilmiştir. Daha büyük boyutlu problemleri çözebilmek için bir sezgisel yaklaşım da önerilmiştir. Önerilen sezgisel yaklaşım istasyon sayısının en küçüklenmesi amacı için (3 farklı görev seçme kriteri ile) ve hesaplanan maliyetin en küçüklenmesi amacı için kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar çalışmada rapor edilerek ileriki çalışmalar için kıyaslama imkanı sağlanmıştır.

Stokastik görev zamanlı ve paralel istasyon kullanabilen MHD problemi için çok amaçlı bir sezgisel yaklaşım Cakir, Altiparmak ve Dengiz (2011) tarafından önerilmiştir. Çalışmada, paralel istasyonlu iş merkezleri için düzgünlük indeksinin en küçüklenmesi

ve tasarım maliyetinin (işçilik ve teçhizat maliyetlerinden oluşan) en küçüklenmesi amaçları kullanılmıştır. Bu iki amacı dikkate alarak pareto optimal çözümlerin elde edilmesi için tavlama benzetimi temelli yeni bir sezgisel yaklaşım geliştirilmiştir. Yapılan analizlerde çoklu nomial olasılık yoğunluk fonksiyonu (multi-nomial probability density function) kullanan önerilen yaklaşımın, ağırlıklı toplam kullanan geleneksel yaklaşımdan daha kaliteli pareto optimal çözümler ürettiği belirlenmiştir.

Stokastik MHD problemlerinin çözümünde meta sezgisel yaklaşımların kullanıldığı çeşitli araştırmalar da bulunmaktadır. BMHDP-1 probleminin stokastik versiyonunun tavlama benzetimi yaklaşımı (Suresh and Sahu, 1994) ve genetik algoritma yaklaşımı (Suresh, Vinod, Sahu, 1996) ile çözümleri gösterilmiştir. Paralel istasyonlar, stokastik görev zamanları, karma modelli üretim ve alternatif amaçları içeren GMHD probleminin çözümü için tavlama benzetimi (McMullen and Frazier, 1998) ve karınca optimizasyonu (McMullen and Tarasewich, 2003) yaklaşımları geliştirilmiştir. Bulanık görev zamanlı BMHDP-2 problemi ise Tsujimura, Gen, Kubota (1995) tarafından ele alınmıştır.

# III. BÖLÜM:
# ÜST SEZGİSEL YAKLAŞIM

Üst sezgisel (hyper heuristic) terimi oldukça yeni bir terim olmasına rağmen, sezgisel tasarımını otomatikleştirme fikri 1960 ve 1970'li yıllara kadar tarihlendirilebilen nispeten köklü bir düşüncedir. Üst sezgisel yaklaşımda ana fikir, bilinen sezgiselleri, zayıf yönlerini dengelemeye izin verecek şekilde bazı ilavelerle birleştirerek problemleri çözmek için yeni bir algoritma tasarlamaktır. Çok da yeni olmayan bu düşüncenin birçok uygulaması ve üst sezgisel olarak gelişimi bu bölümde detaylı olarak açıklanmıştır.

## 3.1. Üst Sezgisel Kavramı

Üst sezgisel yaklaşım; belirli bir problem veya problem ailesi için alt seviyeli sezgiseller (veya bileşenler) kullanarak, verilen problemi etkili bir şekilde çözmek için sezgisellerin (bileşenlerin) uygun bir kombinasyonunu otomatik olarak üreten üst seviyeli bir metodoloji olarak açıklanabilir (Burke, Curtois, Hyde, 2010). Üst sezgisel terimi ilk olarak 1997 yılında otomatik teorem doğrulama kapsamında bir dizi yapay zekâ tekniğini birleştiren metodu tanımlamak için kullanılmıştır (Denzinger, Fuchs, Fuchs, 1997). Üst sezgisel terimi ilk kullanımından bağımsız olarak 2000 yılında kombinatoryal optimizasyon kapsamında, "sezgiselleri seçen sezgiseller"i açıklamak için kullanılmıştır (Cowling, Kendall, Soubeiga, 2000). Bu kapsamdaki "üst sezgisel" terimini kullanan ilk bilimsel araştırma Burke, Kendall ve Soubeiga (2003) tarafından yayınlanmıştır. Üst sezgisel yaklaşımla ilişkilendirilebilecek güncel çalışma alanlarına örnek olarak; reaktif arama optimizasyonu (Battiti, Brunato, Mascia, 2008), otomatik parametre kontrolü (Eiben, Michalewicz, Schoenauer et al. 2007) ve uyarlanabilir memetik algoritmalar (Ong, Lim, Zhu et al. 2006) verilebilir.

Üst sezgisel yaklaşım, optimizasyon sisteminin çalıştığı genellik seviyesinin yükseltilmesini amaçlayan büyük bir potansiyele sahip, gelişen bir arama teknolojisidir. Üst sezgisel terimi genelde; eldeki problemin çözümü için (meta) sezgiselleri seçmede (meta-) sezgisellerin kullanılması sürecini açıklamak için kullanılmaktadır. Meta sezgisel alanındaki çalışmaların büyük bir bölümü problem üzerinde doğrudan çalışabilen bu tip yaklaşımların kullanılmasını incelemektedir. Örneğin, zaman çizelgelemede evrimsel hesaplamayla ilgili çalışmaların bir çoğu zaman çizelge popülasyonlarını ele alır ve ana fikir daha güçlü nesiller üretebilmek amacıyla popülasyonun belirli bir jenerasyon sayısı boyunca evrimleştirilmesidir. Buna karşın Terashima-Marin, Ross ve Valenzuela-Dendon (1999) ile Ross, Hart ve Corne (1997) çalışmalarında, zaman çizelgelemeye üst sezgisel evrimsel yaklaşım uygulayarak problemin çözümünü simgeleyen bireylerle değil çözüme aracılık eden sezgiseller popülâsyonu ile ilgilenmişlerdir. Üst sezgisel kullanımı ile ilgili diğer bir örnek de Fang, Ross ve Corne (1994) çalışmasında gösterilmiştir. Bu çalışmada kullanılan genetik algoritma, açık atölye çizelgeleme problemi için sezgisel seçimi sürecini evrimleştirmektedir. Çalışmada kullanılan yöntem o yıllarda üst sezgisel terimi kullanılmadığından "evrimsel sezgisel seçimi" olarak isimlendirilmiştir.

Üst sezgisel yaklaşımın en önemli avantajlarından birisi de uygulama için ucuz olması ve diğer probleme özgü metotlardan daha kolay kullanılabilmesidir. Amaç ise daha genel perspektifte daha kaliteli çözümler elde etmektir. Üst sezgisel amaçlar genel olarak meta sezgisel teknolojilere dayanmaktadır. Literatürde problemin durumuna göre sezgiselleri zeki bir şekilde seçen makine öğrenmesi yaklaşımlarının (durum tabanlı çıkarsama – case based reasoning) gelişimini inceleyen çalışmalar mevcuttur (Burke, MacCarthy, Petrovic et al. 2002; Petrovic and Qu, 2002). Aslında zeki sezgisel seçiminde meta sezgisellerin makine öğrenme yaklaşımları ile hibridizasyonu için önemli bir çalışma alanı bulunmaktadır (Petrovic and Qu, 2002).

Hesaplamalı gerçek dünya problemlerini çözmede sezgisel metotların ve arama tekniklerinin başarısına rağmen bu tekniklerin yeni karşılaşılan problemlere veya benzer problemlerin yeni örneklerine kolayca uygulanabilmesi gibi konularda hala bazı zorluklar bulunmaktadır. Bu zorluklar büyük oranda bu tür yaklaşımların içerdikleri parametre veya algoritma seçiminden veya bu parametre/algoritmaların nasıl

seçileceğine dair bir yol gösterici eksikliğinden ortaya çıkmaktadır. Ayrıca araştırmacıların farklı sezgisellerin farklı durumlarda neden ve nasıl etkili (etkisiz) çalıştıklarını anlama seviyesi, hangi durumda hangi yaklaşımın kullanılacağını seçmeye yardımcı olmamaktadır. Mevcut tekniklerin diğer bir zayıf noktası da gerçek dünya problemleri için geliştirilen en modern tekniklerin, geliştirilmesi ve çalıştırılması pahalı, probleme özgü ısmarlama özellikler göstermesidir. Çözümü zor arama problemlerinin çözümü için sezgisel tekniklerin tasarım ve ayarlama süreçlerini otomatikleştirme hedefi bu zayıf noktanın üstesinden gelebilmek için temel amaçlardan birisini oluşturmaktadır (Burke, Hart, Kendall et al. 2003; Ross, 2005; Burke, Hyde, Kendall et al. 2009).

Üst sezgisel yaklaşım kullanılırken, problemi direkt olarak çözmekten ziyade problemin verilen durumu için sezgisellerin doğru sırasının veya doğru metodun bulunmasına çalışılır. Üst sezgisel yaklaşım "made to measure – ölçmek için yapılan" tekniklerin tersi olacak şekilde "off-the-peg – dolaylı olarak ölçebilen" metot olarak kabul edilebilir. Bu yüzden uygulaması kolay düşük seviyeli sezgiseller kümesine dayanan, kabul edilebilir kalitede çözümler üreten genel yöntemler tasarlamak önemli bir amaçtır. Üst sezgisel, bir dizi düşük seviyeli sezgiselle beraber belirli bir problem durumu veya durumlar kümesi verildiğinde eldeki problemi etkili bir şekilde çözmek için verilen bileşenlerin yeterli kombinasyonunu otomatik olarak üreten yüksek seviyeli bir metodoloji olarak görülebilir (Burke, Gendreau, Hyde et al. 2013).

Üst sezgisel yaklaşımı şekillendiren iki temel düşünce bulunmaktadır. Birincisi, kendi içerisinde arama problemi olarak kabul edilen etkili hibrid ve/veya ortaklaşa sezgiseller seçme veya tasarlama sürecini tanımaktır. İkincisi ise aramayı uyarlanabilir şekilde yönlendirebilecek öğrenme mekanizmalarının katılımıyla arama metodolojilerinin daha etkin olarak kullanılabilmesi düşüncesidir. Bu konuda önemli bir potansiyel olduğu meta sezgisel gelişmelerden de görülebilmektedir. Bu iki temel düşünce farklı türdeki üst sezgisellere ilham kaynağı olmaktadır (Burke, Hyde, Kendall et al. 2009). Bu kapsamda, üst sezgisel, verilen bir dizi düşük seviyeli sezgisel ve belirli bir problem örneği için her bir karar noktasında düşük seviyeli bir sezgiseli seçen ve uygulayan üst seviyeli bir yaklaşımdır (Burke, Gendreau, Hyde et al. 2013).

Üst sezgisel yaklaşım hakkında geçmiş on yıl boyunca çok çeşitli araştırmalar yapılmıştır. 2003 yılındaki ilk çalışmada (Burke, Hart, Kendall et al. 2003) yazarlar üst sezgisel fikrini tartışmışlar ve en önemli amaçlardan biri olan optimizasyon sisteminin çalışacağı genellik seviyesinin yükseltilmesine vurgu yapmışlardır. Bu çalışma konu ile ilgili özet bir tarihçe sunmakta ve o zaman yayınlanmış çeşitli örnekler üzerinde tartışmaktadır. Daha sonra 2005 yılında öğretici bir makale yayınlanmış (Ross, 2005) ve sadece üst sezgisel yaklaşım uygulamalarına yönelik bir rehber değil aynı zamanda ilgili olabilecek birçok araştırma konusunun tartışıldığı ve olası uygulama alanlarının belirlenmeye çalışıldığı bir araştırma olmuştur. Chakhlevitch ve Cowling (2008) çalışmasında üst sezgisel konusundaki en son gelişmeleri tartışmış ve üst sezgisel yaklaşımları sınıflandırmıştır. Daha güncel bir değerlendirme çalışması Burke, Hyde, Kendall vd. (2009) tarafından yapılmış ve çalışmada genetik programlamanın önemli bir rol oynadığı, potansiyel sezgisel bileşenler kümesinden yeni sezgiseller üretme metodolojileri tartışılmıştır. Son olarak, (Burke, Hyde, Kendall et al. 2009) çalışmasında üst sezgisel yaklaşımın önceki sınıflandırmalarını göstermiş ve bu alandaki çalışmaları kapsayacak birleştirmiş bir sınıflandırma ve tanımlama geliştirmişlerdir. Burada sezgisel seçimi ve sezgisel üretimi olmak üzere iki temel üst sezgisel kategori belirlenmiş ve her bir kategorinin birçok açıklayıcı örneği detaylı olarak incelenmiştir.

### 3.2. Üst Sezgisel Yaklaşımın Kökeni ve Gelişimi

Birçok gerçek dünya problemlerinde, çözüm için derinlemesine arama yapmak çeşitli nedenlerden dolayı çoğunlukla pratik olamamaktadır. Arama uzayının çok büyük olması, arama uzayını sırasıyla taramak için uygun bir yol bulunmaması veya uygun çözüm uzayını çok karmaşık bir forma sokan sınırlamalar derinlemesine aramayı zorlaştıran en önemli faktörlerdir. Böyle durumlarda yaygın olarak kullanılan yaklaşım çeşitli kriterler açısından fedakârlıklarda bulunarak amaca mümkün olduğunca yaklaşabilmektir. Bu doğrultuda, sezgisel yöntemlerin de kullanılmasıyla; çözüme ulaşma hızından, optimal çözüme kesin olarak ulaşma garantisinden veya belirli bir çözüm kalitesi seviyesinin yakalanması kararlılığından fedakârlıkta bulunarak uygulanabilir çözümler elde etmek mümkündür.

Sezgisel terimi optimizasyon açısından bazen bütün bir arama algoritması olarak kullanılırken bazen de tekrarlı bir yapı içerisinde yer alan kısmi bir karar süreci olarak

kullanılabilmektedir. Yapay zeka ve bilgisayar bilimindeki gelişmelerle birlikte göreli olarak daha etkili, doğadaki çeşitli yaşam süreçlerinin benzerlerini kullanarak öğrenebilme, çıkarsama ve odaklanma yapabilen meta sezgiseller, optimizasyon problemlerinin çözümü için yeni ve etkili bir yol ortaya koymuştur. Meta sezgisel yaklaşımlarla bir çok kombinatoryal optimizasyon problemi etkili bir şekilde çözülmüştür. Çok sayıdaki araştırmalarda birçok problemin çeşitli meta sezgisellerle çözümü gösterilmiştir. Ancak birçok çalışma meta sezgisel ve sezgisel gelişmeyi sadece bir problem üzerinde tartışmış ve daha çok ilgilenilen probleme özgü meta sezgisel arama algoritmaları geliştirilmiştir. Her bir problem veya problem sınıfı için farklı meta sezgisel algoritmaların geliştirilmesi ihtiyacı ile birlikte farklı meta sezgisellerin birlikte kullanılması – birleştirilmesi – hibridizasyonuna yönelik araştırmalar ön plana çıkmaya başlamıştır. Üst sezgisel yaklaşımın ilk uygulamaları olarak değerlendirilebilecek bu çalışmalar meta sezgisellerin gelişmesine değerli katkılar sağlamakla birlikte kaynaklarının önemli bir bölümünü bu araştırmalara ayıramayan, kendilerine has optimizasyon problemleri için özel amaçlı meta sezgisellere ihtiyaç duyan küçük ölçekli firmalara sınırlı yardımlar sağlayabilmektedirler (Burke, Gendreau, Hyde et al. 2013).

Meta sezgisellerin, yöneylem araştırması ve yapay zekâ alanlarında giderek artan etkisi üst sezgisel yaklaşımların da gelişiminde ve yaygınlaşmasında önemli bir rol oynamıştır. Meta sezgisellerin çizelgeleme, veri madenciliği, stok kesme, medikal görüntüleme ve bio-informatik gibi çok geniş ve farklı alanlarda kullanılmaya başlanması daha çok modern arama teknolojilerinin gelişimine bağlı olarak ilerlemiştir. Meta sezgisellerin ve uygulama alanlarının gelişmesi, büyük karmaşık problemlerin otomatik çözümleri ve arama süreci ile ilgili bilimsel birikimi derinleştirse de yakın zamana kadar ticari ve endüstriyel organizasyonlar üzerindeki pratik etkisinin beklenildiği kadar büyük olmadığını belirtmek doğru olacaktır (Burke, Hyde, Kendall et al. 2010). Geliştirilen en yeni meta sezgisel teknolojilerin birçoğu ya çok probleme özgüdür ya da bilgiye oldukça duyarlı sistemlerdir.

Meta sezgisellerin probleme özgü ve kaynak duyarlılığı yüksek çözümler üretmesi, kullanılan parametre sayısı ve duyarlılığı, içerdiği probabilistik seçimler, çözümün nasıl oluştuğunu tam olarak açıklayamaması ve çözüm sürecine dair bilginin çok az olması ve farklı meta sezgisel algoritmaların göreli olarak yavaş çalışmaları en önemli dezavantaj

ve eleştiri konuları olmaktadır. Yine de bu tür gelişmeleri pazara taşıyacak teknoloji geliştirme şirketleri var olmasına rağmen bu ürünler genellikle çok kaynak tüketen ve pahalı ürünlerdir. Esasen birçok küçük ölçekli firma da pratikte optimizasyon problemlerinin optimal veya optimale yakın bir sonuçla çözülmesiyle ilgilenmemekte, daha çok yeterince iyi, yeterince çabuk ve yeterince ucuz çözümleri tercih etmektedirler. Kullanıcılar uygulaması kolay fakat performansı genellikle daha düşük olan basit sezgiselleri kullanırlar. Burada bir tarafta ucuz ama kırılgan sezgisellerin olduğu, buna karşın diğer tarafta çok iyi çalışan fakat bilgiye duyarlı ve uygulanmasının güç olduğu yöntemlerin olduğu iki farklı bakış açısı söz konusudur.

Üst sezgisel yaklaşım ile bu eleştirilerin ve dezavantajların bir kısmına nispeten cevap verilmeye çalışılmaktadır. Üst sezgisel yaklaşımda en geniş manada amaç tüm problem aralıklarında çalışabilen, hızlı, nispeten kolay anlaşılabilir, kalite ve tekrarlanabilirlik açısından güvenilir ve bu aralıktaki problemler için iyi bir kötü durum davranışı sergileyecek algoritmalar keşfetmektir (Burke, Hyde, Kendall et al. 2009). Ayrıca meta sezgisel ve arama teknolojileri alanında çalışan birçok araştırmacı, gelecek yıllardaki en önemli amaçlardan birinin meta sezgisel ve optimizasyon sisteminin çalışacağı genellik seviyesinin yükseltilmesi olacağını iddia etmektedir. Bu durum tek bir problem sınıfından ziyade benzer problemler üzerinde de çalışabilen, uygulaması kolay ve ucuz sistemlerin geliştirilmesine yardımcı olacaktır.

Üst sezgisel yaklaşımın ardındaki düşünceler, 1960 ve 1970'lerin başlarına kadar tarihlendirilebilecek, bilgisayar bilimleri, yapay zekâ ve yöneylem araştırmasının farklı alanlarında mevcuttur. Üst sezgisel teriminin sezgisellerin otomatik tasarımı düşüncesi ile ilişkili olarak kullanılmaya başlandığı 2000'li yıllardan önce geliştirilmiş erken yaklaşımlar uygulama amacına göre sınıflandırılabilirler.

### 3.2.1. Otomatikleştirilmiş Sezgisel Sıralama

Çözüm sürecinde çeşitli sezgisellerin kullanıldığı farklı araştırma alanlarında çok sayıda çalışma mevcuttur. Problemin çözümünde kullanılan çok sayıdaki sezgisellerin sıralaması problemin çözümü üzerinde büyük bir etkiye sahip olabilmektedir. Fisher ve Thompson (1961; 1963) ile Crowston, Glover, Thompson vd. (1963) çalışmalarında üretim çizelgelemede çizelgeleme kurallarını (öncelik ve gruplandırma kuralları olarak

da bilinen) birleştirmenin bu kuralların herhangi birinin tek başına kullanımından üstün olacağını göstermiştir. Zamanına göre çok ileride olan bu öncü çalışmalar probabilistik öğrenme kullanarak çizelgeleme kurallarının birleştirilmesini öngörmektedir. Önerilen öğrenme yaklaşımı çizelgeleme kuralları sıralama uzayında çalışan bir probabilistik yerel arama algoritmasına benzetilebilmektedir. Bu araştırmalar sonucunda; çizelgeleme kurallarının önceden belirlenmiş rastgele kombinasyonunun, herhangi bir sıralama kuralının tek başına kullanımından daha başarılı olduğu ve çözüm sürecinde öğrenmenin mümkün olabildiği sonuçlarına ulaşılmıştır (Fisher and Thompson, 1963). Üst sezgisel metotlara olan ilginin, uygun algoritmik araçların ve hesaplama gücünün de artmasıyla, sezgisel arama uzayı içindeki arama ve keşfetme faaliyetlerinin kolaylaştığı görülmektedir.

Storer, Wu ve Vaccari (1992; 1995) çalışmalarında bir arama problemi olarak probleme özgü (hızlı) iyi bir sezgisel kombinasyonunu tasarlama problemini ortaya koymuşlar ve sezgisel uzayındaki komşulukları tanımlamışlardır. Sezgisel kombinasyonları karıştırarak, problem verisi veya çözümlerin alt kümesinin her ikisinin birden bu yeni arama uzayında üretilebildiğini göstermişlerdir. Komşuluklar üzerinde yapılacak aramada tepeye tırmanma (hill climbing) algoritmasının basit bir versiyonu kullanılmıştır. Ayrıca tavlama benzetimi, genetik algoritmalar veya tabu arama gibi çok çeşitli arama stratejilerinin kullanılabileceğini de göstermişlerdir. Bu düşüncelerle atölye çizelgeleme için sezgiseller geliştirilerek başarılı şekilde test edilmiştir. Geliştirilen sezgisellerin sonuçları güncel darboğazı kaldırma (shifting bottleneck) prosedürü ile karşılaştırılmış, sonuçların oldukça teşvik edici olduğu belirtilmiştir.

Fang, Ross ve Corne (1993; 1994) çalışmalarında, açık atölye çizelgeleme kapsamında sezgisel seçimlerin sıralama uzayını aramak için genetik algoritma kullanmışlardır. Önerilen yöntem kıyaslama problemleri üzerinde o zamanki bilinen en iyi sonuçlar da dahil olmak üzere çok iyi sonuçlar vermiştir. Benzer bir prosedür Hart ve Ross (1998) tarafından dinamik atölye çizelgeleme problemine başarılı bir şekilde uygulanmıştır. Bu yaklaşım görevleri çizelgeye seçmek için daha önce gösterilen sezgisel algoritmaların birleştirilmiş iterasyonlarının evrimleşmesine dayanmaktadır. Birçok kritere göre kıyaslama problemleri üzerinde test edildiğinde çok iyi sonuçlar elde edilmiştir. Gerçek dünya çizelgeleme problemlerini çözmede genetik algoritma tabanlı yaklaşımları da

kullanmışlardır (Hart, Ross, Nelson, 1998). Ele alınan problem, İskoçya ve kuzey İngiltere'deki çiftliklerden elde edilen canlı tavukların toplanarak bir dizi siparişi karşılayacak şekilde bölgedeki iki fabrikadan birisine dağıtılmasıdır. Bu yaklaşımda birincisi sipariş atamalarını yönetmede ikincisi ise tedarikçilerin gelişini çizelgelemede kullanılan sezgisel seçimleri evrimleştiren iki genetik algoritma birleştirilmektedir. Önerilen strateji proje gerekliliklerini başarıyla karşılamıştır.

Norenkov ve Goodman (1997) çalışmalarında sezgisel sıralama uzayı boyunca arama yapmak için evrimsel algoritmalar kullanmışlardır. Çalışmalarında iş sıralarını tespit eden ve makinelere iş atamalarını belirleyen iki tür çizelgeleme kuralı içeren çok aşamalı akış tipi çizelgeleme problemini ele almışlardır. Yapılan bir dizi deney ile elde edilen çözümlerin kalitesinin güçlü bir şekilde uygulanan sezgiseller alt kümesine bağlı olduğu bulunmuştur.

Yukarıda açıklanan tüm yaklaşımlar "aktif (online)" olduğundan verilen problem örneğini çözmek için sezgisellerin iyi bir sıralamasını bulmaya odaklanılmıştır. Ayrıca açıklanan çalışmalar makine çizelgeleme ile ilgilidir. Yapılan çalışmalardan farklı olarak Drechsler ve Becker (1995) çalışmasında, öğrenme aşamasından sonra verilen problem örneklerine uygulanabilecek başarılı sezgiselleri (daha önceki örnekler kümesinden) öğrenmek için evrimsel algoritma kullanmışlardır. Drechsler ve Becker (1995) çalışması 2 aşamalı AND-EXOR minimizasyonuna ilk uygulamadır. Verilen basit optimizasyon modülleri kümesindeki belirli bir sezgisel bu modüllerin sıralamasını göstermektedir. Bu çalışma daha sonra genişletilerek ikili karar diyagramlarının değişkenlerini sıralamak için sezgisellerin öğrenmesi konusunda çalışılmıştır (Drechsler, Göckel, Becker, 1996).

### 3.2.2. Otomatik Planlama Sistemleri

Üst sezgisel kavramının ilgisini çeken diğer bir çalışma sahası da yapay zekâ alanından gelmektedir. Özellikle otomatik planlama sistemi araştırmalarından ve öğrenme bilgisinin kontrolü odak alınarak yapılan çalışmalar açısından üst sezgisel yaklaşım ayrıca önemli bulunmaktadır. Dünya yörüngesindeki bir dizi uyduyu ve üç yer istasyonu arasındaki uydu haberleşme çizelgelerinin kontrolü için kullanılan COMPOSER sistemi Gratch ve Chien (1996) ile Gratch, Chein ve de Jong (1993)

çalışmalarında ele alınmıştır. Geliştirilen sistem, olası kontrol stratejileri uzayında tepeye tırmanma araması olarak nitelendirilebilir. Öğrenme sistemi mevcut kontrol stratejisine değişiklik alternatifleri önermekte ve bu önerilerin beklenen kullanım oranına ulaşıp olaşmayacağını istatistiksel olarak değerlendirmektedir. Yaklaşım "pasif (off line)" olup çeşitli kontrol stratejilerinin beklenen kullanımını uygun tahmin etmek için çok sayıda eğitim problemine ihtiyaç duymaktadır.

### 3.2.3. Evrimsel Algoritmalarda Otomatik Parametre Kontrolü

Evrimsel algoritmaların parametrelerinin otomatik ayarlanmasına yönelik yapılan ilk çalışmalar üst sezgisel yaklaşımın öncüsü olarak kabul edilebilir. Algoritmanın çalışması boyunca bilgilendirilerek parametrelerin ayarlanmasına yönelik bazı mekanizmalar evrimsel algoritmaların gelişimi boyunca çeşitli çalışmalarda gösterilmiştir (Eiben, Hinterding, Michalewicz, 1999). Örneğin, evrim stratejilerinde mutasyon oranının değiştirilmesinde Rechenberg'in "1/5 başarı kuralı" ve genetik algoritmalarda özellikle çaprazlama operatörlerinin gelişimine bağlı olarak çaprazlama oranının değiştirilmesinde Davis'in "keşfetmesi"nin kullanılması bu türdeki öncül çalışmalardır. Evrimsel algoritmalarda kullanılan operatör olasılıklarının ayarlanmasına yönelik diğer araştırmalar Julstrom (1995), Lobo ve Goldberg (1997), Smith ve Fogarty (1997) ve Tuson ve Ross (1998) çalışmalarında bulunabilir.

Evrimsel algoritmaları ayarlamak için evrimsel algoritmaların kullanılması fikri ise yeni ve farklı bir bakış açısıdır. İki evrimsel algoritma kullanılarak yapılabilen bu işlemde birinci evrimsel algoritma problemi çözmek için, ikincisi ise (meta evrimsel algoritma olarak da anılan) birinci algoritmayı ayarlamak için kullanılmaktadır (Freisleben and Hartfelder, 1993; Grefenstette, 1986). Bu işlem tek bir evrimsel algoritmanın, verilen problemi çözerken aynı zamanda kendi kendisini ayarlamasıyla da yapılabilir. "Kendi kendine uyarlama (self adaptation)" terimi ilk olarak mutasyon parametrelerini çeşitlendirmek için evrim stratejileri kapsamında kullanılmıştır (Rechenberg, 1973). Evrimsel algoritmalarda kendi kendine uyarlama, belirli bir şekilde algoritmanın çalışması boyunca bazı parametrelerin değiştirilmesi anlamına gelmektedir. Bu yaklaşım, olası algoritma konfigürasyonları uzayının taranması düşüncesiyle ilgili olduğundan üst sezgisel yaklaşım ile de bağlantılıdır (Burke, Gendreau, Hyde et al. 2013).

### 3.2.4. Sezgisel Metotların Otomatik Öğrenmesi

Sezgisel bilgisayar programlarının otomatik olarak geliştirilmesine yönelik ilk çalışmalar, kısıt sağlama (constraint satisfaction) problemleri alanında yapılmıştır (Minton, 1996). Minton'un bu öncü çalışması, minimum en büyük eşleme problemine yenilenebilir sezgiseller üretmek için bir sistem önermiştir Kullanıcı bir dizi eğitim örneği sunarak, konfigürasyon süreci boyunca sistemin deney yapmasını sağlamaktadır. Sistem özellikle de eğitim örneklerince gösterilen belirli bir örnek dağılımı için kendisini konfigüre edebilmektedir. Bu çalışma otomatik olarak üretilen sezgisellerin insanlarla yarışabilir olup olmadığını belirlemeye yönelik olarak yapılan ve üç NASA programcısı tarafından geliştirilen yaklaşımla karşılaştırılan, otomatik yaklaşım olarak literatürdeki tek örnektir. Programcıların ve otomatiksel yaklaşımların her ikisine de sezgisellerini geliştirmek için en fazla 8 saat verilmiştir. Sonuçlar insanların geliştirdiği sezgisellerle oldukça rekabet edebilir seviyededir ve üç deneyden birinde daha başarılı bulunmuştur.

Diğer bir ilgi çekici öğrenme yaklaşımı da 1990'ların ortalarında "Teacher - TEchniques fort he Automated Creation of HEuRistics" (Wah, Ieumwananonthachai, Chu et al. 1995; Wah and Ieumwananonthachai, 1999) adıyla anılan problem çözmede kullanılan sezgisellerin öğrenmesi ve genelleştirilmesi için tasarlanan bir sistemdir. Burada amaç kaynak kısıtları altında, çok az veya hiç alan bilgisi olmayan uygulamalarda, mevcutlarla kıyaslandığında daha gelişmiş sezgisel yaklaşımları bulmaktır. Teacher sistemi genetik tabanlı makine öğrenme yaklaşımı kullanmıştır ve süreç haritalama, iş istasyonları ağının yük dengelemesi, devre montajı yönlendirmesi ve testi gibi çeşitli alanlara başarılı şekilde uygulanmıştır (Burke, Gendreau, Hyde et al. 2013).

### 3.2.5. Otomatik Önceliklendirme: "Squeaky Wheel" Optimizasyonu

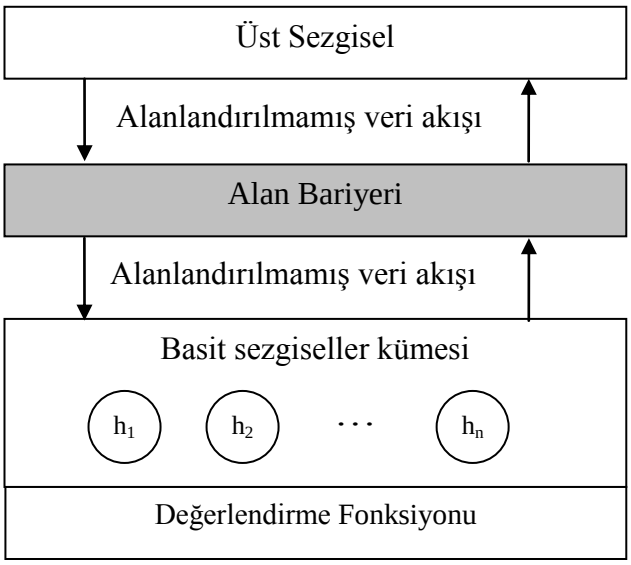
Otomatik önceliklendirme (Joslin and Clements, 1999) olarak isimlendirilen bu optimizasyon yaklaşımı, hem geleneksel çözüm uzayında hem de yeni öncelik uzayının her ikisinde birden çalışarak çözümleri çabucak bulduğundan üst sezgisellerin öncüsü olarak kabul edilebilir. Bu yaklaşımda, çözüm bileşenlerinin öncelik sıralaması açgözlü (greedy) bir yapılandırma algoritmasına verilir. Yapılandırılan çözüm bundan sonra

sorunlu noktaların bulunması için analiz edilir (eğer çözüm bileşenleri iyileştirilmişse, amaç fonksiyonu değerinin de geliştirilip geliştirilmediğine bakılır). Bu sorunlu noktaların öncelikleri arttırılarak aç gözlü yapılandırıcısına yeni öncelik sıralaması verilir. Bu yapılandırma-analiz-önceliklendirme döngüsüne önceden belirlenen kriter karşılanana kadar devam edilir. Verilen bu ikili arama uzayında (çözüm ve öncelikler uzayı) çalışılır ve standart yerel aramanın karşılaşabileceği bazı problemler önlenmiş olur. Sonuçta algoritma çözüm arama uzayının beklenmeyen bölgelerine hızlı bir şekilde hareket etmek için etkili bir şekilde büyük tutarlı zıplamalar yapar. Yazarlar, büyük hareketler yapabilme yeteneğinin yaklaşımın gücü olduğunu fakat aynı zamanda da zayıflığı olduğunu belirtmişlerdir. Küçük "ayarlama" hareketleri yapmak kolay olmamakta fakat yöntemin birleşik arama özelliği (çözüm uzayında yerel arama ile kombinasyonu) süreci kolaylaştırma özelliğine sahiptir.

### 3.3. Üst Sezgisel Çalışma Mekanizması ve Kapsamı

Meta sezgiseller problem üzerinde (genellikle içine alan bilgisini de alarak) doğrudan çalışmaktadırlar. Buna karşın üst sezgisel yaklaşım daha yüksek özetleme seviyesinde çalışır ve genellikle probleme (uygulama alanına) ait bilgisi yoktur. Üst sezgisel algoritmanın sadece bir dizi alt seviyeli sezgisele erişme yetkisi vardır fakat verilen alt seviyeli sezgiselin fonksiyonu veya amacı ile ilgili bir bilgisi yoktur. Bu sayede üst sezgisel algoritma bir kez geliştirildiğinde, sadece alt seviyeli sezgiseller kümesinin ve çözümün kalitesini belirleyen değerlendirme fonksiyonunun yenilenmesiyle, yeni problem alanlarının çözülebilmesi imkânının sağlanabileceği düşünülmektedir. Genel üst sezgisel çalışma mekanizması Şekil 3. 1'de gösterilmiştir (Burke, Hart, Kendall et al. 2003).

Üst sezgisel yaklaşımda alt seviyeli sezgisel ile üst sezgisel arasında bir bariyer vardır. Alan bilgisinin bu bariyeri aşmasına izin verilmemektedir. Bu yüzden, üst sezgiselin altında çalıştırdığı konu ile ilgili bilgisi yoktur. Sadece çağırabileceği *n* tane alt seviyeli sezgiseli olduğunu ve verilen çözüm sonuçlarının amaç fonksiyonu değerlendirmesinden geçeceğini bilir.




Şekil 3. 1. Üst sezgisel çalışma mekanizması

Üst sezgisel ve alt seviyeli sezgisel arasında iyi tanımlanmış bir arayüz bulunur. Böyle bir arayüz kullanmanın önemli iki gerekçesi vardır:

- Üst sezgiselin alt seviyeli sezgisel ile standart bir arayüz kullanarak iletişim kurmasını sağlar, aksi takdirde üst sezgisel her bir alt seviyeli sezgisel için ayrı bir arayüze ihtiyaç duyar ki bununda anlamsız olduğu açıktır. Ayrıca, alt seviyeli sezgisel ile üst sezgisel arasında alan bilgisi içermeyen verinin (non domain data) karşılıklı olarak geçmesine yardımcı olur. Örneğin Cowling, Kendall ve Soubeiga (2000) tarafından açıklanan geliştirilmiş arayüz alt seviyeli sezgisel tarafından kullanılan CPU zamanı ve amaç fonksiyonu değeri (aynı zamanda üst sezgisel tarafından da hesaplanabilen) gibi bileşenler içerir. Ayrıca, alt seviyeli sezgiselin ne kadar uzun çalışacağını bize bildiren bir bileşen dahil edilmiştir. Böylece her bir sezgiseli verilen belirli bir zaman miktarında kullanarak sezgiselin izin verilen zaman aralığındaki en iyi performansının mevcut çözüme uygulanmasına çalışılmıştır. Bu bileşen ile arayüz, alt seviyeli sezgiselin değişiklikleri mevcut çözüme uygulamasını veya bu değişiklikler uygulandığında ne gibi etkilerinin olacağının raporlarını ayrıca tanımlar. Bu da üst sezgiselin her bir alt seviyeli sezgisele, verilen çözüme karşı ne kadar iyi olduğunu sormasıdır. Bundan sonra üst sezgisel hangi sezgiselin (veya sezgisel kümesinin) çözümü güncellemeye uygun olduğuna karar verir.
- Diğer alanlar (problem türleri) için hızlı gelişmelerin önünü açar. Yeni bir problem ele alınırken, kullanıcı bir dizi alt seviyeli sezgisel ve uygun bir amaç

fonksiyonu belirler. Eğer alt seviyeli sezgiseller standart bir arayüzü takip ederse üst sezgisel her hangi bir şekilde bunları alternatiflendiremez. Kullanıcı alt seviyeli sezgiselleri ve amaç fonksiyonunu verir vermez üst sezgisel yeni problemi hemen çözmeye başlayabilmelidir. Bu yüzden, yukarıda açıklandığı gibi meta sezgisel yaklaşımlardan farklı olarak özetlemenin yüksek seviyesinde çalışan bir üst sezgisel hedeflenmektedir.

Bu kapsamda üst sezgiselin eriştiği tek bilgi, tüm problem türleri için ortak olan ve kendi iç durumunun parçası olarak kaydedilmesine karar verilen veridir. Örneğin; alt seviyeli sezgiselin son çağırılışında kullanıldığı CPU zamanı, alt seviyeli sezgisel çağırılmadan geçen CPU zamanı veya amaç fonksiyonundaki değişimin miktarı üst sezgiselin kaydedip kullanabileceği verilerdir (Burke, Hart, Kendall et al. 2003).

Üst sezgisel tasarımcısının yukarıda belirtilen sınırlar içerisinde olabildiğince yaratıcı olmasına izin verilir. Örneğin, üst sezgiselin dâhili hafızası alt seviyeli sezgisel gruplarının birlikte ne kadar iyi çalıştığını kaydedebilir. Benzer şekilde kullanılan alt seviyeli sezgisellerin sıralamasının veya belirli alt seviyeli sezgisellerin birbirini takip eden bir sırada kullanılmasının çözüm üzerinde olumlu veya olumsuz etkisini bilgiler saklayabilmelidir. Bu bilgiler doğrultusunda amaç fonksiyonu değeri açısından en büyük iyileşmeyi sağlayan alt seviyeli sezgisel ve/veya çözüm için kullanılma sayısı en az/çok olan alt seviyeli sezgisellerden hangisinin veya sezgisel gruplarından hangisinin sonraki aşamada kullanılacağına karar verir.

Üst sezgisel yaklaşımın çözüm süreci içerisinde hangi alt seviyeli sezgiseli kullanacağı kararı algoritmik akış içerisinde Şekil 3. 2'de gösterildiği şekilde yapılabilmektedir.

```
Eğer (Problem Türü(P)==p1)
        Uygula (Sezgisel1,P);
Değilse Eğer (Problem Türü(P)==p2)
        Uygula (Sezgisel2, P);
else...
```

Şekil 3. 2. Çözüm süreci içerisinde algoritmik olarak alt seviyeli sezgisel seçimi

Üst sezgiseldeki ana fikir, problemin çözümünde değişiklik yapabilmek için bilinen ve uygun şekilde anlaşılabilen sezgiseller kümesindeki elemanları kullanmaktır. "Bir sezgiselin gücü genellikle mükemmel bir çözümü oluşturma yolunda iyi kararlar verme yeteneğinde yatmaktadır" kabulü basit ve önemlidir (Burke, MacCarthy, Petrovic et al, 2001). Doğru bir şekilde ilerlediği sürece her bir sezgiselin problemin şartları ile ilişkilendirilmesi, çözüm sürecinin farklı parçalarına veya aşamalarına farklı sezgisellerin uygulanabilirliğini sağlayabilir. Üst sezgisel yapı burada problemin hangi aşaması için hangi sezgiselin daha iyi sonuç verdiğini takip ederek evrimleşme süreci içinde problemin farklı aşamaları için en uygun alt seviyeli sezgisellerin kullanılmasını sağlamaya çalışır.

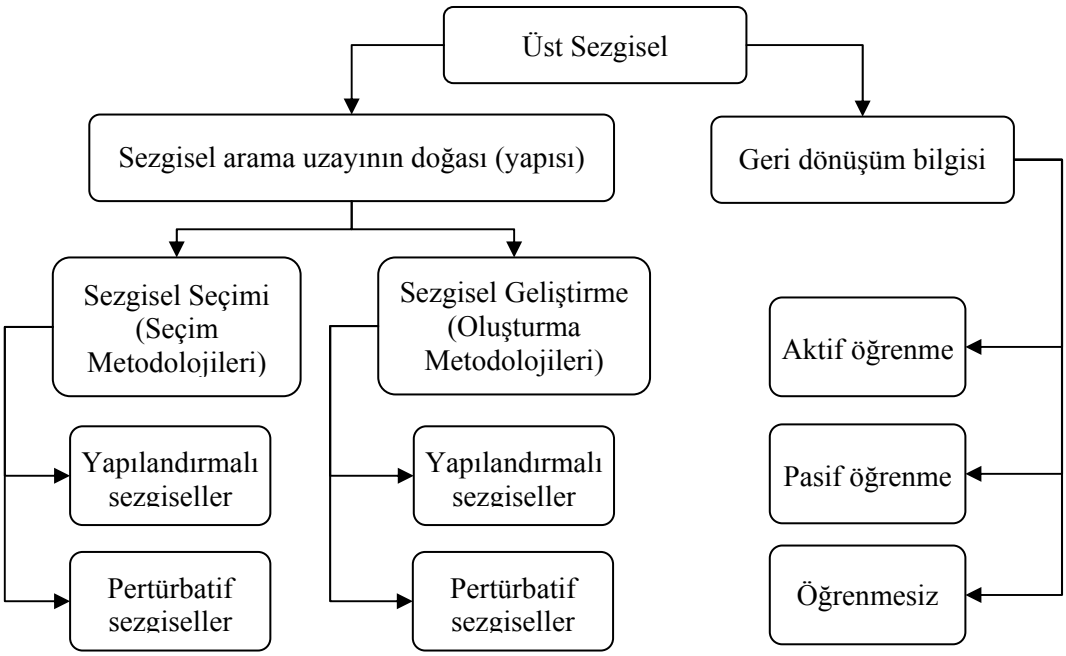
### 3.4. Üst Sezgisel Yaklaşımların Sınıflandırılması

Üst sezgisel teriminin ilk kullanılmaya başlandığı 2000'li yılların başında, geçmiş uygulamalar dikkate alınarak iki üst sezgisel kategorisi belirlenmişti. Birincisi; mevcut sezgiselleri seçen veya tercih eden *sezgisel seçimi*, ikincisi ise mevcut sezgisellerin bileşenlerinden yeni sezgiseller üreten *sezgisel geliştirme* kategorisidir (Burke, Hyde, Kendall et al. 2009).

Problemlerin çözümünde kullanılacak sezgiselleri seçmek veya üretmek için kullanılacak üst seviyeli stratejinin de bir sezgisel olması için herhangi bir zorunluluk bulunmamaktadır. Nitekim Burke, Petrovic ve Qu (2006) çalışmasında ele alınan üniversite zaman çizelgeleme probleminde; üst sezgisel strateji durum tabanlı çıkarsama gibi bilgiye dayalı bir teknikle kullanılarak başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Böylece "üst sezgisel" teriminin sezgisel tasarımı ve seçimi sürecini otomatikleştiren genel bir metot olduğunu ortaya koyan daha genel bir tanımlama yapılmasını sağlamıştır. "Üst sezgisel, hesaplamalı arama problemlerini çözmek için sezgiselleri seçen veya geliştiren bir arama metodu veya öğrenme mekanizmasıdır" (Burke, Gendreau, Hyde et al. 2013). Bu tanım ile üst sezgisel strateji sezgiselleri seçen, sıralayan bir sezgisel olmanın dışında aynı zamanda öğrenme mekanizması içerebilen genel bir arama metodu olarak nitelendirilmiştir.

Bu tanımdan yola çıkarak üst sezgisellerin sınıflandırmasında birbirinden bağımsız, ortagonal yapıda iki ana kategori (Şekil 3.3) tespit edilebilir (Burke, Hyde, Kendall et

al. 2009). Birinci kategori, daha önceki sınıflandırmada kullanılan *sezgisel seçimi* ve *sezgisel geliştirme* sınıflarını içeren s*ezgisel arama uzayının doğası (yapısı)* kategorisidir. Bu kategorideki iki sınıfın her birini kendi içinde iki alt sınıfa ayırmak mümkündür. Sezgisel seçim metodolojileri, *i) yapılandırmalı (constructive) sezgiseller* ve *ii) dağınık arama – pertürbatif (perturbative) sezgiseller* olarak gruplandırılabilir. Benzer şekilde sezgisel geliştirme metodolojileri sınıfı da aynı iki alt sınıfa (yapılandırmalı ve pertürbatif sezgiseller) indirgenebilir. Birinci kategorideki bu sınıflandırmanın, üst sezgisel çalışma çerçevesinde kullanılan alt seviyeli sezgisellerin doğası ve dolayısıyla çözüm uzayında aramanın nasıl yapıldığı ile ilgili olduğu unutulmamalıdır.




Şekil 3. 3. Üst sezgisel yaklaşımların sınıflandırılması

İkinci kategori, üst sezgiselin öğrenebilen bir arama mekanizması olarak değerlendirilmesinden ortaya çıkmaktadır. Üst sezgisel, eğer arama sürecinde bazı geri bildirimleri kullanabilen bir çözüm süreci olarak değerlendirilirse, böyle durumlarda bir öğrenme algoritması olarak ele alınabilir. Herhangi bir öğrenmenin olmadığı, öğrenmesiz mekanizmalarda ise herhangi bir geri bildirim kullanılmamaktadır. Öğrenmenin söz konusu olduğu durumlarda, öğrenme boyunca ki bilginin kaynağına

göre çevrimiçi – aktif ve çevrimdışı - pasif öğrenme olarak bir ayrım yapılabilir (Burke, Hyde, Kendall et al. 2009; Burke, Gendreau, Hyde et al. 2013).

*Aktif–Çevrimiçi öğrenmeli* üst sezgisellerde üst sezgisel algoritma problemin bir örneğini/bölümünü çözerken öğrenme işleminin gerçekleşmesi söz konusudur. Üst sezgisel kapsamında aktif öğrenmeye örnek olarak sezgisel seçiminde destek - takviye kullanılması ve genel olarak meta sezgisellerin arama uzayı boyunca üst seviyeli arama stratejisi olarak kullanılması gösterilebilir.

*Pasif–Çevrimdışı öğrenmeli* üst sezgisellerdeki ana fikir, daha önce denenmemiş örnekleri çözmede kullanılabilecek bilginin bir eğitim seti örneğinden kurallar ve programlar formunda toplanmasıdır. Üst sezgisel kapsamındaki pasif öğrenme yaklaşımlarına örnek olarak, öğrenen sınıflandırma sistemleri, durum tabanlı çıkarsama ve genetik programlama verilebilir.

Farklı sezgisel arama uzaylarının farklı geri bildirim kaynakları ile ve dolayısıyla farklı makine öğrenme teknikleri ile birlikte kullanılabileceği üst sezgisel yaklaşımların Burke, Gendreau, Hyde et al. (2013) tarafından önerilen sınıflandırması aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Sezgisel arama uzayının doğasına/yapısına göre
    - Sezgisel seçim metodolojileri: var olan sezgisellerin kombinasyonunu üretir:
        - Yapılandırmalı sezgiseller
        - Dağınık - pertürbatif sezgiseller
    - Sezgisel geliştirme metodolojileri: mevcut sezgisellerin temel bileşenlerini kullanarak yeni sezgisel metotlar üretirler
        - Yapılandırmalı sezgiseller
        - Dağınık - pertürbatif sezgiseller
- Öğrenme sırasındaki geri dönüşümün kaynağına göre
    - Aktif - çevrimiçi öğrenmeli üst sezgiseller: problemin verilen örneğini çözerken öğrenen
    - Pasif - çevrimdışı öğrenmeli üst sezgiseller: eğitim örneği kümesinden öğrenen, geliştirilen daha önce görülmemiş örneklere genelleştirilebilen

- Öğrenmesiz üst sezgiseller. Arama sürecinden herhangi bir geri dönüşümün olmadığı durum.

Bu kategoriler mevcut araştırma eğilimlerine göre tanımlanmaktadır. Burada örneğin yapılandırmalı sezgiseller ile beraber pertürbatif sezgiseller veya sezgisel geliştirmeyle beraber sezgisel seçimi gibi hibrid metodolojilerin geliştirilmesini engelleyecek herhangi bir sınırlama yoktur. Son dönemlerde özellikle bu hibrid yaklaşımlar araştırmalarda daha sık kullanılmaya başlanmıştır.

### 3.4.1. Sezgisel Seçim Metodolojileri

Üst sezgisel yaklaşımın ilk uygulamalarında üst sezgisel strateji sezgisel seçimi ve sezgisel geliştirme olmak üzere iki temel grupta kullanılmaktaydı. Her bir gruptaki sezgisel yaklaşımlar yapılandırmalı sezgiseller veya dağınık – pertürbatif sezgiseller olarak alt gruplara ayrılabilir. Sezgisel seçimi görevini yerine getirmek için oluşturulan üst sezgisel seçim stratejileri daha çok ele alınan problemin çözünde kullanılabileceği önceden bilinen daha basit, alt seviyeli sezgisellerin seçimi ve/veya sıralamasını keşfetmeyi amaçlar. Sezgisel seçim metodolojileri *yapılandırmalı* veya *pertürbatif* sezgisel seçim süreçleri olarak ikiye ayrılır.

#### 3.4.1.1. Yapılandırmalı Sezgisellere Dayanan Sezgisel Seçim Teknikleri

Yapılandırmalı sezgisellerde bir çözümün oluşturulması sürecinde aşamalar birbiri ardına, üzerine konarak, bir araya getirilerek arama süreci yürütülür. Genellikle boş bir başlangıç çözümünden başlayarak tam bir çözüme ulaşmak için yapılandırma sezgisellerini zeki şekilde seçme ve kullanma işlemleri gerçekleştirilir. Üst sezgisel mekanizma daha önceden bilinen bir dizi yapılandırma sezgisellerini (genellikle probleme özgü) kullanarak mevcut problem durumu için en uygun sezgiseli belirlemeye çalışır. Bu süreç nihai çözüme ulaşılıncaya kadar devam ettirilir. Burada bütün bir çözüm elde edilmesinin yapılandırma sürecinin doğal bir bitişi olduğu unutulmamalıdır. Bu yüzden, sezgisel tercihlerinin sıralaması sonludur ve ele alınan kombinatöryel problemin boyutuyla sınırlandırılır. Ayrıca, her bir aşamadaki kısmi çözüm ile bu aşamada kullanılan sezgisel arasında bir öğrenme ortaklığının olması mümkündür.

Sezgisellerle ilgili yapılan araştırmalarda problemin sezgisel çözüm uzayının oldukça karmaşık yapılarda olabildiği gözlemlenirken, sezgisel seçim uzayının nispeten daha düzgün olduğu keşfedilmiştir. Sezgisel arama uzayına uygulanabilecek bir komşuluk hareketinin, üst seviyeli aramanın problemin çözüm uzayında zıplama yapabileceğini göstermiştir. Bir sezgisel sıralamasının çözüm uzayının (iyi dağıtılmış çözüm uzaylarında) alt kümelerini kapladığı görülmüştür. Sezgisellerin arama uzayı göreli olarak daha düzgün olduğu (aynı kalitede çözümlerin olduğu çok sayıda plato yapısı içerdiği) görülmüştür. Üst seviyeli sezgiselin sınırlandırılmış çözüm uzayında oldukça hızlı olduğu ve farklı sezgisel sıralamalarından hareket edilmesiyle önceden belirlenen hesaplama zamanında zıplamalar yapabilmesi nedeniyle daha geniş arama yeteneğine sahip olduğu görülmüştür. Bu özelliklere sahip bir üst sezgiselin çeşitli yerel arama teknikleri ile birlikte çalıştırılabilmesinin mümkün olması, daha başarılı sonuçlar alınabileceğini de göstermektedir. Çeşitli üst sezgisel stratejilerin çeşitli komşuluk kabul kriterleri ve yerel arama teknikleri ile farklı öğrenme algoritmaları altında hibridizasyonu ile ilgili çok çeşitli araştırmalar literatür taramasında özetlenmiştir.

#### 3.4.1.2. Pertürbatif Sezgisellere Dayanan Sezgisel Seçim Teknikleri

Pertürbatif sezgisellere dayanan yaklaşımlarda temel hedef kullanılacak sezgiseli otomatik olarak seçip uygulayarak aday çözümün geliştirilmesi yoluyla nihai çözüme ulaşmaktır. Pertürbatif sezgisellere dayanan sezgisel seçim işleminde, sezgisel uzayında arama *çok noktalı* ve *tek noktalı* olmak üzere iki farklı şekilde gerçekleştirilmektedir. *Çok noktalı arama* (çoklu çözümlerle çalışan) gerçekleştiren pertürbatif sezgiselleri seçmek için birkaç üst sezgisel metodoloji kullanılmaktadır. Üst sezgisel yaklaşımla ilgili yapılan çalışmaların büyük bir çoğunluğu ise *tek noktalı aramaya* dayanmaktadır.

Tek noktalı aramaya dayanan üst sezgisel yaklaşımlarda bir aday başlangıç çözümü, durdurma kriteri sağlanıncaya kadar bir dizi başarılı aşamayı tekrar eder. Öncelikle alt seviyeli pertürbatif sezgiseller kümesinden tek bir sezgisel (veya sezgisellerin alt kümesi) seçilir ve daha sonra tek bir aday çözüme uygulanır. Sonrasında ise yeni çözümün kabul edilmesi ya da reddedilmesi kararı verilir (Burke, Gendreau, Hyde et al. 2013).

Tek noktalı arama gerçekleştiren perturbative sezgiselleri seçen üst sezgisel, *sezgisel seçim metodu* ve *komşuluk kabul metodu* olmak üzere iki ayrı bileşeni birleştirir (Bilgin, Ozcan, Korkmaz, 2006; Ozcan, Bilgin, Korkmaz, 2008). Bu iki bileşenin birbirinden ayrı olarak kullanılması ile önemli bir esneklik elde edilmiş olur. Bu sayede bileşenlerden biri diğeri yerine kullanılarak yeni bir üst sezgisel oluşturulabilir. *Sezgisel seçimi* ve *komşuluk kabul* metotlarının farklı kombinasyonları üst sezgisel kapsamında araştırılan konulardandır.

Aktif ve pasif makine öğrenme teknikleri, çözüm aşamalarında hangi sezgiselin kullanılacağına yönelik bilinçli kararlar vermede sezgisel seçim stratejileri için önemli birer araçtır. Herhangi bir öğrenme mekanizması kullanmayan sezgisel seçimi ya rastgele ya da ayrıntılı süreçlere dayanır. Sezgisel seçim süreçlerinde, olası sezgisel komşulukları kümesinde seçim işlemini geliştirmek için öğrenme mekanizmaları kullanılır. Tek noktalı arama temelli kullanılan sezgisel seçim metotlarının büyük bölümü her bir sezgisel için performanslarına bağlı olarak skor değerleri üretirler. Bu skor değerleri her bir adımda aday çözüme uygulanacak sezgiseli seçmek için sistematik olarak bir araya getirilirler. Skora dayalı sezgisel seçim tekniklerinin tümünde; başlangıç skorları, hafıza uzunluğu sabiti, skora bağlı sezgisel seçim stratejisi, pozitif ve negatif ilerleme durumları için skor değeri güncelleme kuralı olmak üzere 5 temel bilgi kullanılır. Tüm alt seviyeli sezgisellere bir başlangıç skor değeri (genellikle sıfır) atanır. Hafıza uzunluğu karar noktasında sezgisel seçimi yapılırken sezgiselin daha önceki performansının etkisini belirler. Verilen skorlar kümesinde sezgisel seçimi *rulet tekerleği*, *max*, *min* stratejileri gibi farklı yollarla yapılabilir (Burke, Gendreau, Hyde et al. 2013).

Üst sezgisellerde genel olarak kullanılan diğer bir öğrenme yöntemi de takviyeli ya da pekiştirmeli öğrenme (reinforcement learning) yaklaşımıdır (detaylı bilgi için Kaelbling, Littman ve Moore (1996) ve Sutton ve Barto (1998)). Pekiştirmeli öğrenme sistemi çevreyle (veya çevrenin modeliyle) etkileşim halindedir ve verilen durumda kullanılan stratejiye göre bir eylem gerçekleştirir. Sistem, problem durumları ve karşılık gelen işlemleri değerlendirerek, deneme yanılmayla hangi işlemlerin gerçekleştirileceğini öğrenmeye çalışır. Sezgiselleri arama sürecindeki bireysel performanslarına göre sezgiselleri ödüllendirme veya cezalandırma işlemi üst sezgisel kapsamında bir

skorlama ve öğrenme mekanizmasıdır. Eğer kullanılan alt seviyeli sezgisel çözümü geliştiriyorsa ödüllendirilir ve skor değeri pozitif olarak güncellenir, gerilemeye neden olan hareketler ise sezgiselin skor değerinin azaltılması yoluyla cezalandırılır. Ödüllendirme ve cezalandırma için kullanılan operatörlerin farklı kombinasyonları tasarlanabilir (Burke, Gendreau, Hyde et al. 2013).

Yerel arama sezgisellerinin en önemli bileşenlerinden birisi de kabul stratejisidir. Literatürde deterministik ve deterministik olmayan olmak üzere iki farklı kabul stratejisi açıklanmıştır. Deterministik kabul stratejileri karar noktasından bağımsız olarak problemin mevcut ve yeni aday çözümlerini kullanarak ulaşılan komşu çözüm değerinin kabulüne veya reddine (aynı girdiler için her seferinde aynı kararı vererek) karar verirler. Deterministik olmayan kabul stratejisi ise aynı girdiler için farklı kararlar geliştirebilirler. deterministik olmayan kabul yöntemlerinin hemen hemen tamamında işlem zamanı veya iterasyon sayısı gibi ilave parametrelere ihtiyaç duyulur.

Tek noktalı arama temelli üst sezgiseller kullanılan yöntemin özelliklerine göre 4 farklı alt bölümde değerlendirilebilir:

- Deterministik kabul kullanan üst sezgiseller
- Öğrenme ve deterministik olmayan kabul metotlarını içermeyen sezgisel seçim metotlarını kullanan üst sezgiseller
- Öğrenme ve deterministik olmayan kabul metotlarını içeren sezgisel seçim metotlarını kullanan üst sezgiseller
- Kabul yöntemlerini ve öğrenme teknikleri karşılaştıran çalışmalar

Probleme bağlı etkili alt seviyeli pertürbatif sezgiselleri, zeki sezgisel seçim ve komşuluk kabul metotlarıyla tek bir çalışma çerçevesinde birleştirmek, güçlü bir arama ve optimizasyon aracı sağlayabilmektedir. Üst sezgiseller herhangi bir türdeki karmaşık gerçek dünya problemlerini çözmede kullanılabilir. Üst sezgisellerin uygulanması kolaydır. Üst sezgisel süreçlerin temel bileşenleri aramayı gerçekleştirmek için sadece problem alanından bağımsız bilgiyle çalıştığından farklı problem alanlarında kullanıldığında bir modifikasyona ihtiyaç duymazlar. Paralel ve dağıtılmış işlem stratejileriyle ilgili çalışmalarda da üst sezgisel yaklaşımlardan faydalanılabilir (tersi durumda geçerlidir). Bu metodolojiler tek amaçlı problemler için olduğu kadar çok

amaçlı problemler içinde kullanılabilir. Şimdiye kadarki deneysel incelemeler pertürbatif sezgiselleri seçen üst sezgisellerin makul zamanda ve makul kalitede çözümler üreten hızlı teknikler olduğunu göstermiştir. Ayrıca, performansları probleme özel sistemlerle kıyaslanabilirdir. Pertürbatif sezgisellere dayanan sezgisel seçim metodolojileri ile ilgili yapılan çalışmalar ve sonuçları ilgili literatür başlığı altında açıklanmıştır.

### 3.4.2. Sezgisel Geliştirme Metodolojileri

Sezgisel seçim metodolojilerinden farklı olarak sezgisel geliştirme de üst sezgisel; önceden tanımlanmış tam bir sezgisel uzayından ziyade sezgisellerin bileşenlerinden oluşan sezgiseller uzayında arama işlemi gerçekleştirilir. Üst sezgisel her iki metodolojide de çalışmasının sonunda çıktı olarak bir çözüm verir ancak sezgisel geliştirme metodolojisindeki çıktı, çözüm üretebilen yeni bir sezgisel ortaya koyar ve bu sezgisel potansiyel olarak yeni problem örnekleri üzerinde tekrar tekrar kullanılabilirdir.

Yeni sezgiseller veya kurallar bütünü üretebilen çeşitli yaklaşımlar literatürde mevcuttur. Bu yaklaşımların en önemlilerinden genetik programlamada Koza (1992) ve Koza ve Poli (2005) çalışmalarında, sezgiselleri otomatik olarak üretmek için bir dizi bilgisayar programını evrimleştiren evrimsel hesaplama teknikleri kullanılmıştır. Bu bakış açısıyla; evrimleştirilen programlar sezgiseller olarak, genetik programlama da sezgisel üretecek üst sezgisel olarak görülebilir. Buna karşın, evrimleştirilen programlar ayrıca problem çözümlerini direkt olarak gösterebildiğinden genetik programlama doğal bir üst sezgisel değildir (Burke, Gendreau, Hyde et al. 2013). Otomatik olarak üretilen sezgiseller sadece tek bir problem için yaratıldıklarından ve daha önce görülmemiş problemlerde kullanılmaya yönelik olmadıklarından bu anlamda "harcanabilir" olabilmektedir. Bu terminoloji ilk olarak Bader-El-Din ve Poli (2007) tarafından kullanılmıştır. Alternatif olarak, belirli bir sınıftaki görülmemiş yeni problemlerde yeniden kullanılabilmesi amaçlı sezgiseller de oluşturulabilir. Üst sezgiselce üretilen tüm sezgisellerin teknik olarak yeniden kullanılabilir olarak tanımlanması, geçerli bir çözüm üretmek için yeni örneklere uygulanabildiği için genel bir durumdur. Bunun yanında, eğer bu üst sezgisel metodoloji yeninden kullanılabilirliği düşünülerek tasarlanmamışsa yeni örnekler üzerinde iyi bir şekilde çalışmayabilirler. Yeniden kullanıldığında başarılı şekilde çalışabilen bir sezgiselin, üst sezgisel tarafından çeşitli

problem örnekleri üzerinde pasif olarak eğitildiği sıkça karşılaşılan bir durumdur (Burke, Gendreau, Hyde et al. 2013).

Otomatik olarak üretilebilen sezgisellerin potansiyel olarak birçok avantajı bulunmaktadır. Problem örneklerinin farklı özelliklere sahip olmaları ve ele alınan örnek için olası en iyi sonucun ideal olarak elde edilebilmesi için ilgili problem için özel olarak hazırlanmış yeni sezgisellere veya daha önce geliştirilmiş sezgisellerin özel versiyonlarına ihtiyaç duyulabilir. Her bir örnek türü için özelleşmiş sezgiseller geliştirmek insan programcılar için verimli bir yol değildir. Bunun gibi, insan yapımı sezgiseller genellikle tek bir problem örneği üzerinde başarılıdır ve verilen problem sınıfında başarılı olabilmek için tasarlanmışlardır. Öte yandan, otomatik sezgisel tasarım süreci her bir problem örneği için etkin maliyetlerle sezgisel tasarlamayı potansiyel olarak mümkün kılmaktadır. Süreç otomatikleştirilmiş olduğundan, insan kaynağına ve zamana daha az ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca geliştirilen sezgiseller daha da özelleştirilmiş olduğundan, oluşturulan sezgisel herhangi bir mevcut insan yapımı sezgiselden daha iyi çözümler üretebilmektedir (Burke, Gendreau, Hyde et al. 2013).

Genetik programlama sezgisel oluşturmak için üst sezgisel olarak kullanılabilen tek metodoloji değildir. Çözmekte olduğu örnekler için sezgiseli iteratif olarak geliştiren, otomatik önceliklendirme optimizasyonu (Joslin and Clements, 1999; Aickelin, Burke, Li, 2009) üst sezgisel olarak ele alınabilir. Örneğin, bir çizelgeleme problemi çözülürken, olayları bazı ölçütlere göre sıralayan çok sayıda iyi bilinen sezgisel kullanılır ve daha sonra oluşturulan bu sıralama kullanılarak çözüm yapılandırılır. Otomatik önceliklendirme optimizayon yaklaşımı bu süreci iteratif olarak yürüterek her bir iterasyonda bulunan çözümü analiz eder. Bu analizin sonuçları bir sonraki iterasyonda olayların adaptif olarak sıralanmasında kullanılabilir. Bu metodoloji her biri farklı bir sezgiseli gösteren olay sıralamaları uzayında bir arama gerçekleştirir.

### 3.5. Literatür Taraması

Evrimsel düşüncenin ve meta sezgisel algoritmaların gelişmesiyle birlikte üst sezgisel strateji de birçok problem alanında etkili şekilde kullanılmıştır. Temel düşüncesi yaklaşık elli yıllık bir geçmişe dayanmasına rağmen üst sezgisel yaklaşım kavramını içeren çalışmalar daha çok 2000'li yılların başından itibaren önemli derecede artmaya

başlamıştır. Burke, Hyde, Kendall vd. (2009) ve Burke, Gendreau, Hyde vd. (2013) çalışmalarında kullanılan sınıflandırmaya uygun olarak, üst sezgisel yaklaşım ile ilgili çalışmalar bu başlık altında özetlenmiştir.

### 3.5.1. Sezgisel Seçim Yaklaşımları

Üst sezgisellerin sınıflandırılmasında birinci derece ayrım noktası arama uzayının yapısı veya doğasına göre yapılan sınıflandırmadır. Sezgisel seçim yaklaşımları bu ilk ayrımın en geniş uygulamalarını içeren bir sınıfıdır. Sezgisel seçim yaklaşımları ile ilgili araştırmalar yapılandırmalı ve pertürbatif sezgisellere dayanan sezgisel seçim yaklaşımları olarak ikiye ayrılabilir.

#### 3.5.1.1. Yapılandırmalı Sezgisellere Dayanan Sezgisel Seçim Yaklaşımları

Yapılandırmalı sezgisel seçim uygulamalarında üst seviyeli strateji olarak çok çeşitli teknikler kullanılmıştır. Aktif öğrenme içeren üst seviyeli stratejiler tepeye tırmanma algoritması, genetik algoritmalar, meta sezgisel yaklaşımlar ve bulanık sistemler olarak gruplandırılabilir. Pasif öğrenme kullanan üst seviyeli stratejiler ise durum tabanlı çıkarsama, öğrenen sınıflandırma sistemleri ve düzensiz (Messy) genetik algoritmalardır. Mevcut yapılandırmalı sezgisellerin etkin bir hibridizasyonunu oluşturmak için zaman çizelgeleme, kesme ve paketleme, üretim çizelgeleme, kısıt sağlama ve araç rotalama problem alanlarında birçok araştırma yapılmıştır. Kullanılan üst sezgisel strateji ve öğrenme yaklaşımına göre problem uygulama alanları ve yapılan araştırmalar aşağıda özetlenmiştir.

***Zaman Çizelgeleme Problemlerine Uygulamalar***

Zaman çizelgeleme problemleri ve grafik boyama (graph coloring) problemleri arasında iyi bilinen bir analoji bulunmaktadır. Bu analojiyi kullanarak, literatürdeki bazı zaman çizelgeleme algoritmaları grafik boyama sezgisellerine dayandırılmıştır. İlk çalışmalar, sınav çizelgesi oluşturmak için gerekli işlemleri evrimleştiren evrimsel algoritmalar kullanmak yerine önerilen gerçek bir zaman çizelgesini evrimleştiren algoritmalar kullanmışlardır (Ross, Hart, Corne, 1997; Terashima-Marin, Ross, Valenzuela-Dendon, 1999). Burada dolaylı bir kromozom gösterimi kullanarak problem için kısıtları sağlayan metotların konfigürasyonunun evrimleştirilmesine çalışılmıştır.

Ahmadi, Barrone, Cheng vd. (2003) çalışmalarında, sınav çizelgelemede kullanılan parametrik sezgisellerin iyi bir kombinasyonunu bulmak için değişken komşuluk arama algoritması kullanmışlardır. Bazı yapılandırma sezgiselleri, ağırlıklandırılmış karar fonksiyonu ve basit grafik boyama sezgisellerine bağlı olarak hazırlanmıştır. Bu alt seviyeli sezgiseller, sınav seçimi, sınav dönemi seçimi ve sınıf seçimi için kullanılmıştır. Üç durumu da kapsayan sezgiseller kümeleri rastgele oluşturulmuştur. Önerilen yaklaşım Nottingham Üniversitesinden elde edilen gerçek veriler üzerinde test edilmiştir. Diğer yaklaşımlarla bir kıyaslama yapılmamış ve diğer veri setlerine uygulaması gösterilmemiştir.

Asmuni, Burke ve Garibaldi (2005) çalışmalarında ders programı hazırlama probleminin çözümü için bulanık sistemlerin kullanılabilmesi potansiyelini incelemişlerdir. Çizelgelenecek olaylar (dersler), *en büyük derece, saturasyon derecesi* ve *en büyük katılım* sezgisellerinin birlikte değerlendirilmesiyle sıralanmışlardır. Bir olayın bulanık ağırlığı çizelgelemesinin ne kadar zor olduğunu göstermiştir. Detaylı aramanın sınırlı bir formu kullanılarak bulanık üyelik fonksiyonlarının en uygun şekli aranmıştır. Olaylar, ağırlıklarına göre azalan sırada sıralanmış ve sırasıyla en düşük ceza değerine sahip son boş sıraya atanmıştır. Algoritma 11 test veri seti üzerinde test edilmiş ve ümit veren sonuçlar elde edilmiştir.

Burke, McCollum, Meisels vd. (2007) çalışmalarında yaygın olarak kullanılan 5 grafik boyama sezgiselini (*en büyük derece, en büyük ağırlıklı derece, boyama derecesi, en büyük katılım* ve *saturasyon derecesi*) kullanan bir üst sezgisel çerçevesi geliştirmişlerdir. Ayrıca *rastgele sıralama* sezgiseli de incelenmiştir. Alt seviyeli sezgisellerin etkin sıralamalarını elde etmek için tabu arama algoritması üst seviyeli arama metodu olarak kullanılmıştır. Bu çalışma ayrıca yapısal üst sezgisellerde iki arama uzayının (sezgiseller uzayı ve problem çözümü) varlığını da göstermektedir. Önerilen yaklaşım, ders ve sınav çizelgeleme test örneklerinin her ikisi ile de test edilerek rekabetçi sonuçlar elde edildiği belirtilmiştir. Bu grafik boyama temelli üst sezgisel daha sonra Qu ve Burke (2009) çalışmasında genişletilerek yaklaşımın genel bir tanımlaması yapılmıştır. Yazarlar ayrıca sezgiseller arama uzayında çalışan bazı üst seviyeli sezgisellerin performansını da karşılaştırmışlardır. Sonuçlara göre sezgisel uzayında belirli bir komşuluk yapısının seçiminin performans üzerinde önemli bir etkisi

bulunmamaktadır. Ayrıca, iteratif yerel arama ve değişken komşuluk arama gibi sezgisel arama uzayını çaprazlamak için tabu arama gibi daha detaylı arama tekniklerinden daha etkili bulunmuştur. Yazarlar, sezgisel arama uzayının daha düz olabileceğini ve geniş düzlükler (platolar – farklı sezgisel sıralamaların benzer kalite çözümler ürettiği alanlar) içerebileceğini belirtmişlerdir.

Qu ve Burke (2009) çalışmasında geliştirilen üst sezgisel yaklaşımın çözüm uzayındaki yerel arama operatörleriyle hibridizasyonu da incelemiştir. Hibridizasyon stratejisinin tüm sistemin performansını büyük oranda attırdığı, kıyaslama örnekleri üzerindeki testlerde en güncel yaklaşımlarla rekabet edebilir olduğu belirlenmiştir. İlave bir çalışmada Ochoa, Qu ve Burke (2009) grafik boyama sezgiselleri arama uzayında çalışmak için uygunluk görünümü (fitness landscapes) kavramını kullanmışlardır. Çalışma sezgisel arama uzayının yapısı ile ilgili Qu ve Burke (2009) tarafından belirtilen bazı gözlemleri desteklemektedir. Özellikle, bu yer şekli görüntüleri yüksek seviyede bir düzgünlüğe (platoların varlığı) sahiptir. Ayrıca, optimal çözümün izole edilmediğini fakat birçok minimum nokta ile çevrili olduğunu gösteren, engebelere rağmen global konveksliği veya büyük vadi yapılarını çağrıştıran özelliklere sahiptir.

Pillay ve Banzhaf (2007) ve Pillay (2008) çalışmalarında, sınav çizelgeleme için sezgisel arama uzayları üzerinde evrimsel algoritmaların performansını incelemişlerdir. İlk çalışmada Pillay ve Banzhaf (2007), popülasyonun her bir elemanı 5 düşük seviyeli sezgiselden (en büyük dereceli, en geniş katılımlı, en büyük ağırlıklı dereceli, saturasyon dereceli ve en yüksek maliyetli) birini gösteren karakterlerden oluşan değişken uzunluktaki bir diziden oluşmaktadır. Yazarlar bu amaçla kullanılan diğer arama metotları kapsamında sistemin yumuşak sınırlarla geçerli sınav çizelgeleri oluşturduğunu rapor etmişlerdir. Ayrıca evrimsel sistemin önceki üst sezgisellerden daha etkin olduğu bir dizi test problemi üzerinde gösterilmiştir. Devamındaki çalışmada Pillay (2008) farklı gösterimlerin evrimsel üst sezgisel sistemin performansı üzerindeki etkilerini incelemiştir. Özellikle, üç alternatif kodlama (sabit uzunluk, değişken uzunluk ve *n*-tekrarlı sezgisel kombinasyonları) test edilmiştir. Sonuçlara göre sabit uzunluklu kodlama çok iyi çalışmamakla birlikte diğer iki kodlamanın performansının probleme bağlı olduğu tespit edilmiştir.

Zaman çizelgeleme problemlerine yukarıda açıklanan aktif öğrenmeli yaklaşımlar dışında pasif öğrenmeyi kullanan çeşitli çözüm yaklaşımları da mevcuttur. Ross, Marin-Blazquez ve Hart (2004) ile Ross ve Marin-Blazquez (2005) çalışmalarında sınav ve sınıf çizelgeleme problemlerine grafik boyama sezgisellerine dayanan düzensiz genetik algoritma üst sezgiseli uygulamışlardır. Buradaki ana fikir çizelgeleme için problem aşamaları ile uygun sezgiseller arasındaki işbirliğini öğrenebilmektir. Sistem özellikle problem durum uzayında işaretlenmiş noktalar kümesini keşfetmeye çalışır. Önerilen yaklaşım sınav ve sınıf çizelgeleme problemleri için iyi bir performans ortaya koyabilen, hızlı ve basit problem çözme algoritmaları geliştirebilme yeteneğine sahiptir.

Burke, Dror, Petrovic vd. (2005) ile Burke, Petrovic ve Qu (2006) çalışmalarında ders ve sınav çizelgeleme problemlerinin çözümü için sezgisel seçici ve bilgi keşfetme tekniği olarak durum tabanlı çıkarsamayı kullanmışlardır. En büyük derece, boyama derecesi, saturasyon derecesi sezgisellerinden oluşan 3 grafik boyama sezgiseli ve tepeye tırmanma sezgiseli alt seviyeli sezgiseller olarak belirlenmiştir. Burke, Petrovic ve Qu (2006) çalışmasında ise problem çözüm durumları arasındaki benzerlikleri değerlendirmede kullanılabilecek en uygun özelliklerin keşfedilmesi için tabu arama algoritması kullanılmıştır. Buradaki amaç, eldeki problem için iyi çözümler oluşturabilecek en iyi sezgiseli seçmek için önceki problem çözüm durumlarından en çok benzeyenini kullanmaktır. Burke, Dror, Petrovic vd. (2005) çalışmasında, Toronto veri setinin çözümü üzerinde alt seviyeli grafik sezgisellerinin (durum tabanlı çıkarsama içeren ve içermeyen) hibridizasyonu için farklı yollar kıyaslanmıştır. Üst sezgisel çalışma çerçevesinde rastgele ya da sistematik hibridizasyonlu sezgiseller yerine bilgi temelli teknikler kullanılmasının daha iyi sonuçlar ürettiği görülmüştür.

***Üretim Çizelgeleme Problemi Uygulamaları***

Parti büyüklüğü kuralları, uygulama kolaylığı ve düşük zaman karmaşıklığı ile üretim çizelgelemede en çok kullanılan sezgisellerdendir. Vaquez-Rodriguez, Petrovic ve Salhi (2007) çalışmasında çok makineli kutu atölyesi (cardbox shop) çizelgeleme probleminin çözümünde farklı parti büyüklüğü kombinasyonlarını ele almıştır. Çalışmada standart genetik algoritma 13 farklı kuralın sıralamasını belirleyecek üst seviyeli arama aracı olarak kullanılmıştır. Üst sezgiselin çizelgeleme boyunca parti büyüklüğü kurallarının etkili hibridizasyonlarını öğrenebilir yeteneğe sahip olduğu gösterilmiştir. Bu yüzden

tüm çizelgeleme sürecine tek bir kuralı uygulamaktan çok daha üstündür. Ayrıca problemin ilk aşamasının çözümünde genetik algoritmanın kullanıldığı hibrid üst sezgisel geliştirilmiştir. Farklı amaç fonksiyonları kullanılarak yapılan deneyler hibrid üst sezgiselin genelliğini ve etkinliğini göstermiştir.

Çok amaçlı atölye çizelgeleme problemi benzer bir yaklaşımla Vazquez-Rodriguez ve Petrovic (2010) çalışmasında ele alınmıştır. Çözümler, makinelerdeki operasyonların sıralanmasında kullanılan ve her seferinde bir tanesinin çağırıldığı parti büyüklüğü kurallarının sıralaması olarak gösterilmiştir. Bu çalışmada kullanılan üst sezgisel, kuralların ve bu kurallar tarafından belirlenecek bir dizi operasyonun en iyi sıralaması için eşzamanlı olarak arama yapabilen hibrid bir metot olarak görülebilir. Bu yöntem, çok amaçlı problemler dikkate alındığından iyi bilinen NSGA-II (Deb, Pratap, Agarwal et al. 2000) seçim mekanizmasını kullanmaktadır. Çok amaçlı atölye çizelgelemenin farklı versiyonları dikkate alındığında, kullanılan yöntem, parti büyüklüğü kurallarına dayanan üst sezgisel yaklaşımlara ve permütasyon gösterimi kullanan geleneksel genetik algoritmalara kıyasla tüm problem örneklerinde daha iyi sonuçlar üretmiştir.

Vaquez-Rodriguez, Petrovic ve Salhi (2007) çalışmasında, verilen parti büyüklüğü kurallarının sıralanmasıyla oluşturulan arama uzayı araştırılarak özellikleri tartışılmıştır. Karar bloğu kavramı tek bir birim (örneğin tek bir sezgisel tarafından çalıştırılma) gibi davranan kararlar kümesini ifade etmek için kullanılmıştır. Daha sonraki Ochoa, Vaquez-Rodriguez, Petrovic et al. 2009) çalışmasında parti büyüklüğü kuralları arama uzayının yapısal analizini göstermişlerdir. Çalışmada iki farklı amaç fonksiyonu ve çeşitli üst sezgisel gösterim boyutları (farklı blok ölçülerinde) ele alınmıştır. Çalışma üretim çizelgeleme probleminde çözümlerin evrimi için sezgisel arama uzaylarının uygunluğunu doğrulamaktadır. Ayrıca, çizelgeleme kurallarının bazı şekil özelliklerinin grafik boyama üst sezgiselleri şekillerine benzediğini fark etmişlerdir (Ochoa, Qu; Burke, 2009). Yapılandırmalı sezgisel arama uzaylarının üst seviyeli arama stratejilerince keşfedilebilecek bazı özellikleri paylaştığı düşünülmüştür.

***Tek Boyutlu Kutu Paketleme Problemi Uygulamaları***

Tek boyutlu kutu paketleme problemini ele alan Ross, Schulenburg, Marin-Blazquez vd. (2002) çalışmasında, problemin mevcut durumu ve farklı düşük seviyeli

sezgisellerin özellikleri arasındaki ilişkiyi sağlayan kuralları öğrenmek için modern bir sınıflandırma sistemi kullanmıştır. Yazarlar daha önceden incelenmiş çok sayıdaki kutu paketleme sezgiselini değerlendirmiş ve kıyaslama seti üzerinde en iyi sonuçları üreten 4 sezgiseli ve birde kendilerinin değiştirerek geliştirdiği bir sezgiseli kullanmışlardır. Sınıflandırma sistemi bir dizi örnek problem seti üzerinde eğitilmiş ve daha önce gösterilmemiş problemler üzerinde iyi bir genellemeye sahip olduğu gösterilmiştir. Benzer uyarlamalarla, (Ross, Marin-Blazquez, Schulenburg et al. 2003) kutu paketleme için problem durumları ve uygun sezgiseller arasındaki etkileşimi öğrenebilmek için düzensiz genetik algoritma üst sezgiseli kullanmışlardır. Yaklaşım tek boyutlu kutu paketleme problemine uygulanmış ve büyük boyutlu kıyaslama problemlerinde sınıflandırma sisteminden elde edilenlerden biraz daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.

Sınıflandırma sistemi yaklaşımı Marin-Blazquez ve Schulenburg (2007) çalışmasında çok adımla yaklaşımlara genişletilmiştir. Yazarlar çok adımlı yaklaşımların çeşitli tür ve boyutlarında alternatif keşfetme/tarama oranları kombinasyonları ile çeşitli ödüllendirme şemalarını test etmişlerdir. Yaklaşım tek boyutlu paketleme problemleri üzerinde de çok büyük kıyaslama kümeleri kullanılarak test edilmiştir. Sınıflandırma sistemi iyi bir genelleştirme yeteneği göstermiş ve NP-zor kıyaslama örneklerinin büyük bölümünde oldukça rekabetçi çözüm süreçleri yaratmıştır. Yazarlar çok adımlı çevrelerin tek adımlı sürecin çok sayıdaki eğitim döngülerinde elde ettiği sonuçlara kıyasla daha iyi sonuçlar elde ettiğini belirtmişlerdir.

***İki Boyutlu Kutu Paketleme ve Stok Kesme Problemi Uygulamaları***

Terashima-Marin, Zarate, Ross et al. (2006) çalışmasında 2 boyutlu stok kesme problemini çözmek için düzensiz genetik algoritma üst sezgiselini kullanmışlardır. Ayrıca yazarlar 2 boyutlu kutu paketleme problemlerinin çözümünde sınıflandırma sistemi üst sezgiselleri ile düzensiz genetik algoritma yaklaşımını karşılaştırmışlar ve her iki yaklaşım için de rekabetçi sonuçlar rapor etmişlerdir. İki boyutlu paketleme problemi için ilave bir zorluk olarak belirlenen şeklin obje içerisine nasıl yerleştirileceği problemi ortaya çıkmıştır. Araştırma kapsamında büyük bir deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. Araştırmada önerilen yaklaşım, algoritmanın eğitilmesinden oluşan öğrenme sürecinden ve test aşamasından sonra genel bir üst sezgisel üretmiştir. Geliştirilen üst sezgisel daha önce görülmemiş problem örneklerine uygulandığında,

birçok problemi her bir örnek için en iyi tek sezgiselin bulduğundan daha iyi çözümlerle çok daha etkili bir şekilde çözdüğü görülmüştür.

Düzensiz genetik algoritma yaklaşımının 2 boyutlu örnekler üzerindeki daha geniş bir incelemesi Terashima-Marin, Ortiz-Bayliss, Ross vd. (2008) çalışmasında gösterilmiştir. Çalışma ayrıca 2 boyutlu (convex polygonal) yapıdaki düzgün olmayan kutu paketleme problemlerine yönelik üst sezgiseller olarak genişletilmiştir. Her iki türdeki problemler için de oldukça teşvik edici sonuçlar rapor edilmiştir.

Garrido ve Riff (2007a; 2007b) çalışmalarında 2 boyutlu çubuk paketleme (strip packing) problemlerinin çözümü için genetik algoritma temelli üst sezgisel yaklaşım önermişlerdir. Bu örnekte sistem tek bir problem örneğini çözmek için evrimleştirilmiştir. Önerilen üst sezgisel, en iyi dolduran, alt sol köşeden dolduran ve BFDH olarak anılan rotasyonlu 4 sezgiselden oluşan alt seviyeli sezgiselleri kullanmıştır. Düzensiz genetik algoritma üst sezgisel yaklaşımı, alt seviyeli sezgiselleri fonksiyonlarına göre aç gözlü, sıralama ve rotasyonel olarak gruplandıran değişken uzunluklu gösterim kullanmıştır. Yazarlar, önerdikleri yaklaşımı seçilen örnekler üzerinde en güncel tekniklerle kıyaslamışlardır. Problem için kullanılan bazı özel algoritmaları bile geride bırakan, çok iyi sonuçlar rapor edilmiştir.

***Diğer Uygulama Örnekleri***

Üst sezgisel yaklaşımla ele alınabilecek önemli problem alanlarından ikisi de kısıt sağlama (constraint satisfaction) ve araç rotalamadır (vehicle routing). (Terashima-Marin, Ross, Farias-Zarate et al. 2008) çalışmasında, kısıt sağlama kapsamında dinamik değişken sıralama probleminin çözümü için üst sezgisel geliştirilmesinde düzensiz genetik algoritma kullanmışlardır. Üretilen evrimleştirilmiş üst sezgiseller rastgele üretilmiş büyük boyutlu kıyaslama problemleriyle test edildiğinde teşvik edici sonuçlar elde edilmiştir.

Garrido ve Castro (2009) çalışmasında ise kapasite sınırlı araç rotalama probleminin çözümünde tepeye tırmanma algoritması temelli üst sezgisel kullanmışlardır. Bu yaklaşım yapılandırmalı ve pertürbatif sezgisellerin her ikisini de birleştirmektedir. Özellikle de alt seviyeli sezgisellerin yapılandırmalı-pertürbatif sıralama uzayını

aramaktadır. Bu sıralamalar kısmi çözümler oluşturmak ve geliştirmek için kullanılmaktadır. 4 yapılandırma sezgiseli (Clarke & Wright, Mole & Jameson, Sweep algorithm and Kilby) ve 4 pertürbatif sezgiseli (2-opt, 3-opt, Or-opt and Van Breedams moves) dikkate alınmıştır. Bu yaklaşım bazı standart güncel kıyaslama teknikleri kullanılarak test edilmiş ve literatürdeki iyi bilinen bazı metotlarla karşılaştırılmıştır. Çeşitli türdeki örneklerin çözümüyle kararlı ve kaliteli çözümler elde edilmiştir. Devamındaki çalışmada yazarlar, dinamik araç rotalama probleminin zor örneklerinin çözümü için evrimsel üst sezgisel kullanmışlardır (Garrido and Riff, 2010). Çalışma yapılandırmalı, pertürbatif ve gürültülü sezgiseller olmak üzere 3 tür alt seviyeli sezgisel içermekte ve kısmi çözümler oluşturma ve geliştirmede bunların çeşitli sıralamalarını evrimleştirmektedir. Üst sezgisel yaklaşımın problemin dinamik yapısına uyum sağlayabildiği ve yüksek kaliteli çözümler ürettiği görülmüştür.

#### 3.5.1.2. Pertürbatif Sezgisellere Dayanan Sezgisel Seçim Yaklaşımları

Pertürbatif sezgisel seçim stratejileri, arama uzayında tarama şekline göre tek noktalı arama ve çok noktalı arama olmak üzere iki grupta incelenebilir. Çok noktalı arama kullanan sınırlı sayıda çalışmaya karşın, tek noktalı arama kullanan çok sayıda araştırma mevcuttur. Tek noktalı arama teknikleri; deterministik veya deterministik olmayan komşuluk kabulü kullanıp kullanmamasına göre ve öğrenme tekniği kullanıp kullanmamasına göre ayrıca alt başlıklarda incelenebilir.

***Deterministik Komşuluk Kabulü Kullanan Üst Sezgiseller***

Cowling, Kendall ve Soubeiga (2000; 2002) çalışmalarında, satış zirvesi ve proje sunum problemi olmak üzere 2 gerçek dünya çizelgeleme problemi üzerinde çeşitli üst sezgisel bileşenler hazırlanarak kıyaslanmıştır. Basit rastgele sezgisel seçim, rastgele gradyen seçim, rastgele permütasyon seçim, rastgele permütasyon gradyan seçim metodu ve açgözlü seçim metotları problem üzerinde kullanılmıştır.

Sezgisel seçim metodu olarak *seçim fonksiyonu,* ilk olarak Cowling, Kendall ve Soubeiga (2000) çalışmasında gösterilmiş, arama süreci boyunca alt seviyeli sezgisellerin seçiminde rehberlik eden skor temelli bir tekniktir. Alt seviyeli sezgiseller; tek başına ne kadar iyi oldukları, daha önce çağrılan sezgiselin ardılı olarak ne kadar iyi oldukları ve sezgiselin son çalıştırılmasından bu yana geçen zamana göre skorlarına

göre adaptif olarak derecelendirir. Ayrıca bir hafıza kullanarak daha önceki süreçlerde başarılı bulunan bir sezgiselin yerel optimumdan kurtulmada kullanımı söz konusu olabilmektedir. Böylece arama süreci çeşitlendirilerek farklı sezgisellerin farklı üstünlüklerinin kullanılması, zayıflıklarının diğer sezgiselin üstünlüğü ile kapatılma ihtimali değerlendirilmiş olmaktadır. Sezgisel seçimine uyarlanması için *max* ve *rulet tekerleği* seçim stratejileri ile test edilen bu yaklaşım daha iyi sonuçlar üretmiştir. Ayrıca araştırmada *tüm komşuluk hareketlerinin kabulü* ve sadece *iyileştiren komşulukların kabulü* olmak üzere iki deterministik kabul kriteri incelenmiştir. En iyi parametre ayarları deneyler süresince manuel ayarlama süreci ile elde edilmiştir. Cowling, Kendall ve Soubeiga (2000) çalışmasındaki deneysel sonuçlar *tüm komşuluk hareketlerinin kabulü* seçim fonksiyonlu üst sezgisellerin ümit verici olduğunu göstermiştir.

Cowling, Kendall ve Soubeiga (2001) çalışmasında her bir adımda pekiştirmeli öğrenme şemasına bağlı olarak tüm parametreleri otomatik olarak güncelleyen daha az parametreli (parameter less) seçim fonksiyonunu önermişlerdir. Cowling, Kendall ve Soubeiga (2002) çalışmasında, daha az parametreli tüm komşulukların kabulü seçim fonksiyonu çalışılan problem üzerinde daha üstün bir performans sergilemiştir. Bu üst sezgiselin tasarımı daha sonra Rattadilok, Gaw ve Kwan (2005) çalışmasında genel amaçlı alt seviyeli sezgiseller için model olarak genişletilmiş ve üst sezgiseller için paralel hesaplama çalışma çerçevesi olarak faydalanılmıştır.

Nareyek (2003) çalışmasında sezgisel seçim metodu olarak pekiştirmeli öğrenme kullanmış ve her bir karar noktasında en uygun sezgiseli nasıl seçtiğini öğrenmeye çalışmıştır. Daha önceki çalışmalara benzer şekilde öğrenme süreci skorlara (ağırlıklar) dayanmaktadır. Her bir sezgisel aynı skor değeri ile başlayarak komşuluk kabul süreci boyunca önceden belirlenmiş bir şemaya göre skorları güncellemektedirler. Bu yaklaşım Orc Quest problemi (Nareyek, 2001) ve değiştirilmiş lojistik alanları problemi üzerinde test edilmiştir. Sonuçlardaki gelişmeyi ödüllendirmek için *düşük oranlı adaptasyon* (toplamsal güncelleme) ile bozulmayı cezalandırmak için *büyük oranlı* (üssel güncelleme) adaptasyonun birlikte kullanılmasının iyi tercih olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, her bir adımda *max* stratejisi ile sezgisel seçmenin, *rulet tekerleği* şemasıyla

sezgisel seçmeyle karşılaştırıldığında genellikle daha iyi sonuçlar ürettiği rapor edilmiştir.

Burke, Kendall ve Soubeiga (2003) çalışmasında *tabu arama* sezgisel seçim metoduyla pekiştirmeli öğrenmeyi göstermişlerdir. Nareyek (2003) çalışmasına benzer olarak, alt seviyeli sezgiseller öğrenilmiş skorlarına göre seçilirler. Algoritma tabu listesinde olmayan en yüksek skora (*max* stratejisi) sahip alt seviyeli sezgiseli deterministik olarak seçmektedir. Seçilen sezgisel ilerleme sağlayıp sağlamadığına bakılmaksızın tüm komşulukların kabulü kriterine göre çalıştırılmıştır. Eğer ilerleme varsa, sezgisel skor attırılır yoksa sadece skor azaltılmakla kalmaz aynı zamanda sezgisel tabu listesine ilave edilir. Kullanılan skor güncelleme şeması toplamalıdır ve ilerleme sağlamayan komşuluklar kabul edildiğinde her seferinde tabu listesi temizlenir. Bu üst sezgisel iki ayrı zaman çizelgeleme probleminin (üniversite ders çizelgeleme ve hemşire nöbet çizelgeleme) çeşitli örnekleri üzerinde değerlendirilmiştir. Sonuçlar en son geliştirilen probleme özgü tekniklerle elde edilen sonuçlarla yarışabilir seviyededir. Bu metodoloji Burke, Landa-Silva ve Soubeiga (2005) çalışmasında, çok amaçlı optimizasyonda kullanılabilecek sabit boyutlu tabu listesi ile genişletilmiştir. Üst sezgisel, her bir amaç için alt seviyeli sezgisellerin bağımsız skorlarını korumuştur. Sonuçlar, önerilen çok amaçlı üst sezgisel çalışma çerçevesinin alan tahsisi ve zaman çizelgeleme problem setinde umut veren arama alanları yönünde aramaya rehberlik ettiğini göstermektedir.

Cowling, Kendall ve Soubeiga (2000) çalışmasındaki aç gözlü metot tanımlamasına göre ilerleme sağlamayan komşu çözümler hiçbir zaman kabul edilmezken, aç gözlü metot kullanılmasına rağmen kötü çözümlerin kabul edilebildiği basit rastgele ve aç gözlü sezgisel seçim metotlarına dayanan bir dizi üst sezgisel, Cowling ve Chakhlevitch (2003) çalışmasında ele alınmıştır. Farklı komşu çözüm kabul kriterleri içeren bu üst sezgisel yaklaşımlar, gerçek dünya personel çizelgeleme problemi üzerinde başarılı çözümler sağlayan 95 alt seviyeli sezgisel ile birlikte değerlendirilmiştir. Bu yaklaşımların dezavantajı olarak; her bir karar noktasında uygulanacak alt seviyeli sezgiseli seçme sürecinde, büyük bir alt seviyeli sezgiseller kümesinden tüm sezgisellerin değerlendirilmesi işlemini içermesi sebebiyle yavaş çalıştığı belirtilmiştir. Bu yüzden Chakhlevitch ve Cowling (2005) çalışmasında, en uygun alt seviyeli sezgisel kümesini seçmek için iki öğrenme stratejisi incelenmiştir. Her bir adımda çözüm

kalitesindeki değişimler sezgiselden kaynaklanan toplam gelişmeyi yansıtması için derlenmiştir. En uygun alt seviyeli sezgisellerin sayısını lineer olarak azaltan *aç gözlü tabu arama (olay temelli tabu listesi)* üst sezgiseli en ümit verici üst sezgisel olarak belirlenmiştir.

***Öğrenmesiz ve* Deterministik Olmayan *Komşuluk Kabulü Kullanarak Sezgisel Seçimi Yapan Üst Sezgiseller***

Ayob ve Kendall (2003) çalışmasında *Monte Carlo komşuluk kabul stratejisi* incelenmiştir. Bu yaklaşımda tüm gelişme sağlayan komşu çözümler direkt olarak kabul edilirken ilerleme sağlamayan komşu çözümler amaç fonksiyonunun gerileme (minimizayon problemleri için) değerine bağlı olarak belirli bir olasılıkla kabul edilebilirler. Yazarlar *tavlama benzetimi* yaklaşımıyla benzerlikler gösteren (Kirkpatrick, Gelatt, Vecchi, 1983; Cerny, 1985) bir fonksiyon (EMCQ) geliştirerek kullanmışlardır. Önerilen yaklaşımla tavlama benzetimi arasındaki fark ise EMCQ fonksiyonunun sıcaklık parametresi ve dolayısıyla soğutma çizelgesi içermemesidir. Basit rastgele ve {Doğrusal, Üssel, EMCQ} kabul fonksiyonlarını birleştiren üst sezgiseller, devre kartı üzerindeki elektronik bileşen yerleştirilmesi çizelgeleme problemine uygulanmıştır. Önerilen yaklaşımın performansı {*basit rastgele, seçim fonksiyonu*} ve {*tüm komşulukların kabulü, sadece ilerleme sağlayan komşulukların kabulü*} kombinasyonunu kullanan üst sezgisel ile karşılaştırılmıştır. Deterministik olmayan kabul stratejisine sahip *basit rasgele – EMCQ* üst sezgiseli, verilen problem örneklerinden öğrenebilen veya öğrenemeyen deterministik kabul stratejisi kullanan üst sezgisellerle karşılaştırıldığında, üstün bir performans gösterdiği belirlenmiştir. Herhangi bir parametre ayarına ihtiyaç duyulmuyor gibi görünse de; daha yavaş bir bilgisayara kıyasla daha hızlı bir bilgisayarda birim zamanda daha fazla komut çalıştırılmıştır. Sonuç olarak, aynı sayıda iterasyonlar için farklı sonuçlar üretilebilmektedir.

Kendall ve Mohamad (2004) çalışmasında, büyük tufan (Great Deluge) kabul kriterinin (Dueck, 1993) bir çeşidi üst sezgisel çalışma çerçevesine eklenmiştir. Bu kabul stratejisinde her bir iterasyonda, her bir adımda doğrusal olarak değişen ve seviye olarak anılan, beklenen amaç değerinden daha kötü olmayan herhangi bir konfigürasyon kabul edilebilmektedir. Burada sezgisel seçimi rastgele gerçekleştirilmektedir. Basit rastgele –

büyük tufan yaklaşımı mobil iletişim endüstrisinden sağlanan gerçek problemler üzerinde test edilmiştir. Yapılandırmalı sezgisellerle ve genetik algoritma yaklaşımlarıyla karşılaştırıldığında rekabetçi sonuçlar elde edilmiştir.

Diğer Kendall ve Mohamad (2004b) çalışmasında, Dueck (1993)'in *kayıttan kayıda gezi kabulü (Record to Record travel acceptance)* kriteri üst sezgisel olarak kullanılabilecek şekilde genişletilmiştir. Bu yaklaşımda yeni aday çözüm, mevcut çözümden verilen sabit bir aralık değeri (sapma) kadar kötü olsa bile kabul edilebilmektedir. *Basit rastgele – kayıttan kayda gezi* üst ezgiseli kanal atama probleminin kıyaslama örnekleri üzerinde de uygulanmıştır. Deneysel sonuçlar üst sezgiselin; tüm komşulukların kabulü, sadece iyileştiren komşulukların kabulü ve EMCQ kabul stratejilerini kullanmakta çok başarılı olduğunu göstermiştir.

Tavlama benzetimi kabul metodunun kullanıldığı üst sezgiseller Bai ve Kendall (2005) çalışmasında incelenmiştir. Bu çözüm yaklaşımı raf alanı tahsis problemi üzerinde değerlendirilmiştir. Tavlama benzetiminde, gelişen çözümler her zaman kabul edilmekte, kötü çözümler ise Metropolis kriterine göre olasılıklı olarak kabul edilebilmektedir. Yazarlar ilgili tavlama benzetimi parametrelerinin otomatik olarak nasıl hesaplanabileceğini tartışmışlardır. Sonuçlar *basit rastgele tavlama benzetimi* sezgiselinin test edilen tüm problem örneklerinde; *basit rastgele sadece gelişen çözümlerin kabulü*, *basit rastgele tüm çözümlerin kabulü*, *aç gözlü sadece gelişen çözümlerin kabulü*, *seçim fonksiyonlu tüm çözümlerin kabulü* ve her biri farklı komşuluk operatörü kullanan iki *evrensel tavlama benzetimi* yaklaşımlarından daha iyi sonuçlar ürettiğini göstermiştir. Başlangıç sıcaklığını belirlemek için iki strateji karşılaştırılmıştır. Birincisi başlangıç sıcaklığını başlangıç amaç değerinin bir fonksiyonu olarak hesaplamakta, ikincisi ise bir dizi rastgele çözümü örneklendirerek amaç fonksiyonundaki en büyük farkı esas alarak hesaplama yapmaktadır. Birinci yaklaşımın, ikinciye göre biraz daha iyi çalıştığı rapor edilmiştir.

Antunes, Lima, Oliveira et al. (2009) çalışmasında elektrik dağıtım hatlarında güç kaybı telafi probleminin çözümü için *çok amaçlı basit rastgele tavlama benzetimi üst sezgiselini* incelemişlerdir. Geçerli bir çözümden diğerine geçebilmek için altı alt seviyeli sezgisel tasarlanmıştır. Tavlama benzetimi, yeni ve eski çözümler arasındaki

baskınlığa bağlı olarak kabul kararını vermektedir. İki amaç değerinin ağırlıklı toplamı kabul olasılık fonksiyonunda kullanılmıştır. Sonuçlar bu üst sezgiselin çok amaçlı genetik algoritmaya göre biraz daha düşük performans gösterdiğini işaret etmiştir.

***Aktif Öğrenme ve Deterministik Olmayan Komşuluk Kabulü Kullanarak Sezgisel Seçimi Yapan Üst Sezgiseller***

Dowsland, Soubeiga ve Burke (2007) çalışmasında, pekiştirmeli öğrenmeli Tabu arama (RLTS) algoritması, yeniden ısıtmalı tavlama benzetimi komşuluk kabulü stratejisi ile hibridize edilmiştir. Önerilen üst sezgisel depolama ve taşıma için taşıyıcı büyüklüğünün belirlendiği paketleme problemine uygulanmıştır. Bir kozmetik şirketinden elde edilen gerçek veriler deneysel verilerin oluşturulmasında temel alınmıştır. Pekiştirmeli öğrenmeli tabu arama – yeniden ısıtmalı tavlama benzetiminden oluşan hibrid yaklaşım daha basit yerel arama stratejisinden (rasgele azaltma) performans olarak daha iyi sonuçlar üretmiştir.

Bai, Blazewicz, Burke vd. (2007) çalışmasında, Burke, Kendall ve Soubeiga (2003), Bai ve Kendall (2005), Dowsland, Soubeiga ve Burke (2007) çalışmalarından geliştirilen farklı üst sezgisel şemalar incelenmiştir. Önerilen üst sezgisel, seçim bileşeni olarak kısa süreli hafıza içeren pekiştirmeli öğrenme mekanizması kullanmaktadır. Kullanılan her bir alt seviyeli sezgisel periyodik olarak güncellenen ağırlıklar (skorlar) almaktadır. Bu ağırlıklar olasılıklara dönüştürüldükten sonra sezgisel rulet tekerleği stratejisine göre seçilir. Önerilen üst sezgisel hemşire çizelgeleme, ders çizelgeleme ve kutu paketleme problemleri üzerinde test edilmiş ve önceki çalışmalarla yapılan karşılaştırmalar kullanılan yaklaşımın ümit verici olduğunu göstermiştir.

Pisinger ve Ropke (2007) çalışmasında, farklı araç rotalama problemleri için uygun bir birleşik metodoloji gösterilmiştir. Üst sezgisel, adaptif sezgisel seçim mekanizmasını doğrusal soğutma oranına sahip standart tavlama benzetimi kabul stratejisiyle birleştirmektedir. Reddedilen bir harekete neden olan sezgiselin mevcut skorunda bir artış yapılmayarak cezalandırılırken, kabul edilen hareketler ise ödüllendirilmektedir. Kabul edilen hareketin sunduğu çözüm yeni bir çözüm ise kabul edilen hareket için ödül oranı yükseltilir. Araştırmada, literatürdeki araç rotalama problemlerinin 5 çeşidini kapsayan standart kıyaslama problemleri üzerinde çok sayıda test gerçekleştirilmiştir.

Sonuçlara göre, kullanılan metodoloji bazı örneklerin bilinen en iyi sonuçlarını geliştirdiğinden önerilen yaklaşım önemli bir gelişim alanı olarak görülmüştür.

Bhanu ve Gopalan (2008) çalışmalarında şebeke ortamında (grid environment) işleri çizelgelemek için genetik algoritma ve genetik algoritmanın tavlama benzetimi, tabu arama ve tepeye tırmanma yaklaşımlarıyla hibrid versiyonlarını, aç gözlü büyük tufan üst sezgiseli altında birleştirmiştir. Üst sezgisel bir dizi küçük problem örneği üzerinde her bir alt seviyeli sezgiselden daha iyi çalışmıştır.

Ozcan, Bykov, Birben vd. (2009) çalışmalarında gecikmeli kabul stratejisi (Burke and Bykov, 2008) olarak anılan kabul kriteri kombinasyonlarıyla en iyi şekilde çalışan farklı sezgisel seçim metotlarını incelemişlerdir. Sonuçlar; aç gözlü, seçim fonksiyonlu, pekiştirmeli öğrenmeli ve tabu aramalı pekiştirmeli öğrenmeli yaklaşımlar ile karşılaştırıldığında, gecikmeli kabul ile birlikte kullanılan basit rastgele sezgisel yaklaşımının en iyi performans gösteren çözüm yaklaşımı olduğunu göstermektedir.

***Karşılaştırma Çalışmaları***

Bilgin, Ozcan ve Korkmaz (2006) çalışmasında, daha önceki çalışmalarda önerilen sezgisel seçim ve kabul stratejilerinin kombinasyonlarıyla ortaya çıkan 35 üst sezgiselin kıyaslandığı deneysel bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Üst sezgisel yaklaşımlar fonksiyon optimizasyon ve zaman çizelgeleme örnekleri üzerinde değerlendirilmiştir. Fonksiyon optimizasyon kıyaslamasında, sezgisel seçim ve kabul stratejisi kombinasyonlarından hiçbirisinin diğerlerinden üstün olamadığı belirlenmiştir. Bunun yanında, *gelişen ve eşit çözümlerin kabulü* stratejisinin daha iyi ortalama performans gösterdiği belirtilmiştir. Ayrıca sezgisel seçim metotları arasındaki performans farklarının kabul kriterleri arasındaki kadar yüksek olmadığı gözlenmiştir. Sınav çizelgeleme örnekleri üzerinde *seçim fonksiyonu – EMCQ* ve *basit rastgele – Büyük tufan* kombinasyonunun diğer üst sezgisel kombinasyonlarından daha iyi çözümler ürettiği belirlenmiştir.

Ozcan, Bilgin ve Korkmaz (2006) çalışmasında farklı üst sezgisel çalışma çerçevelerinin performanslarını incelemiştir. Kıyaslama fonksiyonları üzerinde yapılan deney sonuçlarına göre tekli veya çoklu tepeye tırmanmalı farklı üst seviyeli sezgiseller

kullanmanın üst sezgisel performansı üzerinde pozitif etkisi olduğu öne sürülmüştür. Çalışma çerçevelerinin ortalama performansı dikkate alındığında ise mutasyonel sezgiseller içeren üst sezgisellerin gelecek için daha fazla ümit verici olduğu belirlenmiştir.

Ozcan; Bilgin; Korkmaz (2008) çalışmasında, daha önceki çalışmalarını genişletmişlerdir. Tepeye tırmanmanın ve mutasyonel sezgisellerin küçültülmüş bir kümesinin tekrarlı olarak kullanıldığı fonksiyon optimizasyonu kıyaslama deneyleri gözlemlerine göre; eğer öğrenmeli sezgisel seçim mekanizması kullanılıyorsa bazı alt seviyeli sezgisellerin nadiren seçildiğini belirtmişlerdir. Basit rasgele – gelişen veya eşit komşuluk kabulü üst sezgiselinin gömülü olduğu Ong, Lim, Zhu vd. (2006) çalışmasında, harici seviyeli statik adaptasyon mekanizması olarak kategorize edilen memetik algoritmanın da iyi şekilde çalıştığı belirlenmiştir.

Bai, Burke ve Kendall (2008) çalışmasında taze ürün stoklama ve raf alanı tahsis problemini çözmede çok başlangıçlı genelleştirilmiş indirgenmiş gradyan algoritmasına (multi-start generalised reduced gradient algoriması) karşı hızlı yaklaşımlar kümesinin performansını incelemişlerdir. Üst sezgisellerin karşılaştırması sonucu; tavlama benzetimi temelli üst sezgisellerin, Tabu arama – tüm komşulukların kabul edildiği pekiştirmeli öğrenmeden daha iyi çalıştığı gösterilmiştir. Ayrıca, geleneksel tavlama benzetimi yaklaşımı ve GRASP yaklaşımı benzer performanslar sergilemiştir. Üst sezgisel çalışma çerçevesinde sezgisel seçim bileşeni olarak tabu aramalı pekiştirmeli öğrenme, basit rastgele sezgiselinden biraz daha iyi performans ortaya koymuştur.

Bai, Blazewicz, Burke vd. (2007) çalışmalarında, sezgisel seçimi ve komşuluk kabul metotları içeren, aslında ayrıştırılabilir olan parametre güncelleme probleminin senkronizasyonu üzerinde çalışmışlardır. Burke, Kendall, Sır vd. (2008) *Monte Carlo komşuluk kabul* kriterini kullanan üst sezgisellerin performanslarını karşılaştırmıştır. Sınav çizelgeleme problemleri üzerinde yapılan testlerde, *seçim fonksiyonu – yeniden ısıtmalı tavlama benzetimi*'nin başarısı belirlenmiştir. sezgisel seçimi için *max* stratejisinin daha iyi çalıştığı Nareyek (2003) tarafından gösterilmiştir.

***Çok Noktalı Aramaya Dayanan Üst Sezgiseller***

Cowling, Kendall ve Han (2002) çalışmasında, personel çizelgeleme problemini çözmek için dolaylı (indirect) genetik algoritma geliştirilmiştir. Bu yaklaşım sezgisel seçim mekanizması olarak genetik algoritma kullanan bir üst sezgisel olarak değerlendirilebilir. Popülasyondaki her bir birey hangi sırada hangi alt seviyeli sezgiselin uygulanacağını belirleyen sezgisel seçimlerin bir sırasını vermektedir. Bu yaklaşımın Han ve Kendall (2003) tarafından önerilen geliştirilmiş versiyonunda, uyarlanabilir uzunluklu kromozomların ve yönlendirilmiş operatörlerin kullanılması incelenmiştir. Bu yaklaşım eğitici çizelgeleme problemi üzerinde direkt kodlamalı genetik algoritmalar ve memetik algoritmalarla kıyaslandığında daha iyi sonuçlar üretmiştir. Ayrıca bileşimindeki sezgisellerden de daha başarılı bulunmuştur.

Burke, Kendall, Landa-Silva vd. (2005) ve Chen, Kendall ve Vanden-Berghe (2007) çalışmalarında personel çizelgeleme ve spor müsabakası çizelgeleme problemlerinin çözümünde karınca koloni algoritması üst sezgisel olarak başarılı şekilde kullanılmıştır. Karıncalar, ağ içerisinde rotalarındaki her bir düğümde alt seviyeli sezgiseli uygulamaktadır. Önerilen yaklaşım Chen, Kendall ve Vanden-Berghe (2007) çalışmasındaki spor zaman çizelgelemesi problemine uygulanmış, bazı örnekler üzerinde bilinen en iyi çözümleri geçecek kadar yüksek kaliteli çözümler üretebilme yeteneğine sahip olduğu görülmüştür.

Cranic ve Toulouse (2003) çalışmalarında işbirlikçi arama metotlarını, bilgi paylaşımı yoluyla arama sürecine rehberlik etmede çoklu arama metodolojilerine izin veren paralel stratejiler olarak sınıflandırmıştır. Bu stratejiler çok sayıda alt seviyeli (meta) sezgiseli birleştirmede yaygın olarak kullanılmaya başlanan paralel üst sezgiseller olarak kabul edilebilirler.

Ouelhadj ve Petrovic (2008; 2099) çalışmalarında permütasyon akış tipi atölye problemini çözmede çoklu alt seviyeli sezgiselleri kullanarak bilgi paylaşım sürecinin senkronize ve senkronize olmayan şekilde yapıldığı ajan temelli üst sezgisel çalışma çerçevesi hazırlamışlardır. Yazarlar daha sonra çalışmalarını genişletmişlerdir (Ouelhadj and Petrovic, 2010). Tüm bu çalışmalarda, alt seviyeli sezgisel ajanlar kümesi çoklu aday çözümler üzerinde paralel olarak çalışmıştır. Bir üst sezgisel ajanın koordinasyonu

altında alt seviyeli sezgisellerce bir elit çözümler listesi oluşturulur ve süreç ilerletilir. Sonuçlar, koordinatör üst sezgisel ajanlar ile alt sezgisel ajanlar arasında senkronize olmayan iletişimin kullanıldığı işbirlikçi metodun senkronize iletişimin kullanıldığı durama göre daha üstün çalıştığını göstermiştir.

Meignan, Koukam ve Creput (2010) çalışmasında, *Koalisyon Tabanlı Metasezgisel* olarak adlandırılan kendi kendine uyarlanabilir (self adaptif) ajan temelli yaklaşımı geliştirmişlerdir. Ajanlar çözüm arama uzayını eşzamanlı olarak keşfedebilmek için koalisyon gruplarına ayrılmıştır. Her bir ajan alt seviyeli sezgiseller kümesini kullanarak bir çözümü geliştirmeye çalışmaktadır. Önerilen çalışma çerçevesindeki üst sezgisel seviye *rehber* ve *stratejist* (*Guide* and *Strategist)* rollerin kesişimiyle bağlantılıdır. Burada *rehber (guide)* rolü alt seviyeli sezgiselleri oluşturan, seçen veya çizelgeleyen iken; *stratejist (strategist)* rolü, rehber rolün stratejisini düzenleyen öğrenme mekanizmaları ile ilgilidir. Sezgisel seçimi stratejist tarafından aktif olarak yönetilen, pekiştirmeli öğrenme Pisinger ve Ropke (2007) yaklaşımına göre rehber tarafından gerçekleştirilir. Yazarlar koalisyon temelli meta sezgiselin performansını Christpphides araç rotalama problemi üzerinde incelemişlerdir. Yazarlar çalışmada, başlangıç çözümleri oluşturmak için *yapılandırma sezgisellerini*, *çeşitlendirici* alt seviyeli sezgiseller olarak da *çaprazlama* ve *mutasyon* operatörlerini kullanmışlardır. Sonuçlar, pekiştirmeli öğrenme ve mimetizm kullanımının çözümlerin kalitesini arttırdığını ve koalisyon tabanlı meta sezgiselin tüm çalışmalar olmasa da daha önce önerilen bir çok yaklaşımdan çok daha üstün performans sağladığını göstermektedir.

Biazzini, Banhelyi, Montresor vd. (2009) çalışmasında bağımsız işlemcilerin aynı algoritmayı çalıştırdığı *ada modeline* dayanan *dağıtılmış üst sezgisel* yaklaşımların kıyaslamasını yapmışlardır. Alt seviyeli (meta-) sezgiseller reel parametre optimizasyonu için; diferansiyel evrim, parçacık sürü optimizasyonu ve rastgele örneklemenin altı farklı çeşidini içermektedir. Test sonuçları dağıtılmış üst sezgiselin bir dizi kıyaslama fonksiyonu kümesinde ve haberleşme uydusu yörünge optimizasyonu problemi ile ilgili iki gerçekçi problem üzerinde iyi çalıştığını göstermiştir.

### 3.5.2. Sezgisel Geliştirme Yaklaşımları

Arama uzayının doğası veya yapısına göre yapılan sınıflandırmanın ikinci kategorisi sezgisel geliştirme/üretme yaklaşımlarıdır. Bu tez çalışmasında önerilen çözüm yaklaşımından daha farklı bir araştırma alanı olan sezgisellerin otomatik olarak üretilmesi ile ilgili çalışmalar uygulama alanına göre Burke, Gendreau, Hyde vd. (2013) çalışmasından yararlanılarak (Tablo 3. 1) aşağıda özetlenmiştir.

Sezgisel geliştirme için yapısı gereği en önemli araçların başında genetik programlama gelmektedir. Üretim çizelgeleme problemlerinde sıralama kurallarının evrimleştirilmesinde üst sezgisel olarak genetik programlama yoğun olarak kullanılmaktadır. Araştırmacılar yaptıkları deneyler sonucunda; genetik programlamanın sezgisel bileşenleri birleştirerek ve yeniden düzenleyerek insanlar tarafından geliştirilen sezgisellerden daha üstün sezgiseller oluşturabileceğini belirtmişlerdir (Ho and Tay, 2005; Tay and Ho, 2008; Jakobovic, Jelenkovic, Budin, 2007). Dimopoulos ve Zalzala (2001) ile Geiger, Uzsoy ve Aytug (2006) çalışmalarında da benzer şekilde genetik programlama kullanılarak tek makineli çizelgeleme problemine çözüm aranmıştır.

Burke, Hyde ve Kendall (2006), Burke, Hyde, Kendall vd. (2007a), Burke, Hyde, Kendall vd. (2007b) ve Poli, Woodward ve Burke (2007) çalışmalarında tek boyutlu kutu paketleme problemleri için sezgisellerin geliştirilmesinde genetik programlama üst sezgisel metodolojisini kullanmışlardır. Kumar, Joshi, Banka vd. (2008) çalışmasında iki amaçlı sırt çantası problemi için Allen, Burke, Hyde vd. (2009) çalışmasında ise üç boyutlu sırt çantası problemi için genetik programlama üst sezgiseli kullanmışlardır. İki boyutlu şerit paketleme problemi için yapılandırmalı sezgiseller Burke, Hyde, Kendall vd. (2010) çalışmasında genetik programlama ile evrimleştirilmiştir.

Mantıksal sağlanabilirlik alanında yapılan en önemli çalışmalardan olan Fukunaga (2002; 2004; 2008) araştırmalarında genetik programlama temelli, sezgisel evrimleştirmede insan ile rekabet edebilecek seviyede olduğu belirtilen CLASS sistemi geliştirilmiştir. İç içe geçmiş sezgiselleri kullanarak benzer sonuçlar Bader-El-Din ve Poli (2007) çalışmasında da elde edilmiştir. Bader-El-Din ve Poli (2008) çalışmasında

ise genetik programlamanın takip ettiği geri izleme yöntemiyle mantıksal sağlanabilirlik problemi daha basite indirgenerek çözüm aranmıştır.

Tablo 3. 1. Uygulama alanlarına göre sezgisel geliştirme (üretme) yaklaşımları

| **Uygulama Alanı** | **Kaynaklar** |
|---|---|
| Üretim Çizelgeleme | (Ho and Tay, 2005); (Tay and Ho, 2008)<br>(Jakobovic; Jelenkovic; Budin, 2007)<br>(Dimopoulos and Zalzala, 2001)<br>(Geiger; Uzsoy; Aytug, 2006) |
| Kesme ve Paketleme | (Burke; Hyde; Kendall, 2006)<br>(Burke; Hyde; Kendall et al., 2007a)<br>(Burke; Hyde; Kendall et al., 2007b)<br>(Poli; Woodward; Burke, 2007)<br>(Kumar; Joshi; Banka et al., 2008)<br>(Allen; Burke; Hyde et al., 2009) |
| Mantıksal Sağlanabilirlik (Boolean Satisfiability) | (Fukunaga, 2002, 2004, 2008)<br>(Bader-El-Din and Poli, 2007)<br>(Bader-El-Din and Poli, 2008) |
| Gezgin Satıcı Problemi | (Keller and Poli, 2007b, 2007a, 2008a, 2008b, 2008c)<br>(Oltean and Dimitrescu, 2004), (Runka, 2009) |
| Fonksiyon Optimizasyonu | (Oltean, 2005), (Oltean and Grosan, 2003)<br>(Tavares; Machado; Cardoso et al., 2004) |
| Zaman Çizelgeleme | (Pillay, 2009), (Bader-El-Din and Poli, 2009)<br>(Aickelin; Burke; Li, 2009) |
| Diğer Alanlar | (Drechsler and Becker, 1995)<br>(Drechsler; Göckel; Becker, 1996), (Minton, 1996)<br>(Schmiedle; Drechsler; Grobe et al., 2002)<br>(Stephenson; OReilly; Martin et al., 2003)<br>(Oltean, 2005), (DiGaspero and Schaerf, 2007)<br>(Kumar; Kumar Bal; Rockett, 2009) |

Keller ve Poli (2007a; 2007b) çalışmalarında doğrusal genetik programlama kullanılarak gezgin satıcı problemi için komşulukların tekrarlı araması ve takas sezgisellerinin evrimleştirilmesi yoluyla probleme çözüm aranmıştır. Keller ve Poli (2008a) çalışmasında ise döngü kontrolünün tekrar sayısını belirleyen parametrenin evrimleşmesini ve alt sezgisellerin çağırılma sayısını incelemişlerdir. Keller ve Poli (2008b; 2008c) çalışmalarında önceki çalışmalarındaki kurallarını (grammar) *alt*

*sezgisel bileşen* ekleyerek genişletmişlerdir. Oltean and Dimitrescu (2004) çalışmasında ise gezgin satıcı çizelgesindeki hangi düğümün çözüm turuna ekleneceğine karar verecek fonksiyonları evrimleştirmede *çoklu denklem programlama (Multi expression programming)* kullanarak yapılandırma sezgisellerini evrimleştirmişlerdir. Gezgin satıcı problemi için karınca koloni optimizasyon algoritmasının kenar seçim fonksiyonunun evrimleştirilmesine yönelik bir sistem Runka (2009) tarafından önerilmiştir.

Oltean ve Grosan (2003) çalışmasında evrimsel algoritmalar çoklu denklem programlama ile evrimleştirilirken, Oltean (2005) çalışmasında; fonksiyon optimizasyonu, gezgin satıcı problemi ve kareli (kuadratik) atama problemi üzerinde doğrulaması yapılan, evrimsel algoritmaları evrimleştiren doğrusal genetik programlama üst sezgiseli önerilmiştir. Benzer şekilde evrimsel bir algoritmayı evrimleştirme yöntemi Tavares, Machado, Cardoso vd. (2004) araştırmasında gösterilmiştir.

Sınav çizelgeleme alanında da yoğun olarak genetik programlamaya dayalı üst sezgiseller Bader-El-Din ve Poli (2009) ile Pillay (2009) çalışmalarında detaylı olarak açıklanmıştır. Personel çizelgelemeye yönelik uygulama ise Aickelin; Burke; Li (2009) çalışmasında otomatik önceliklendirme (squeaky Wheel) optimizasyonu ile gerçekleştirilmiştir.

Yukarıdaki açıklananlardan başka çoğunlukla genetik programlama kullanılarak çok çeşitli uygulama alanları için geliştirilen farklı sezgisel üretme yaklaşımları bulunmaktadır. Bu uygulama alanlarından bazıları ikili (0-1) karar şemalarının minimizasyonu (Schmiedle, Drechsler, Grobe et al. 2002), derleyici optimizasyonu (Stephenson, OReilly, Martin et al. 2003), stokastik yerel arama algoritması kod sentezi (DiGaspero and Schaerf, 2007), minimum kapsayan ağaç problemi (Kumar, Kumar Bal, Rockett, 2009) olarak özetlenebilir.

### 3.5.3. Öğrenme Yaklaşımları

Yöneylem araştırması, yapay zekâ ve bilgisayar bilimleri gibi alanlarda geniş olarak çalışılan sezgisel arama teknikleri gibi ileri arama teknolojilerinin geliştirilmesine yönelik çalışmalar arama sürecini yönlendirebilecek öğrenme bileşenlerinin kullanımı

üzerine yoğunlaşmaktadır. Problem çözme ve karar vermeyi iyileştirmek için çeşitli öğrenme yöntemleri ve/veya problemin çözümünün tasarım uzayında arama gerçekleştiren çok sayıda teknik geliştirilmektedir. Bu yaklaşımların bazıları aktif ve pasif yaklaşımlar olarak sınıflandırılabilirler.

***Pasif Yaklaşımlar***

Pasif öğrenme yaklaşımlarının başında algoritma yapılandırma gelmektedir. Algoritma yapılandırma, serbest algoritma parametreleri için uygun değerlerin belirlenmesi ile ilgilidir. Genellikle belirli bir kıyaslama örneği seti üzerinde amaç fonksiyonunun bir performans değeri ürettiği optimizasyon problemi olarak değerlendirilir. Dolayısıyla yapılandırma uzayında arama problemi olarak da kabul edilebilir. Parametrelerin sayısına ve türüne bağlı olarak optimizasyon problemini çözmede kullanılan metotlar *ayrıntılı tarama (exhaustive enumeration), demet araması (beam search)* (Minton, 1996), *deneysel tasarım* (Coy, Golden, Runger et al. 2001; Ridge and Kudenko, 2007), *yarış algoritmaları (racing algorithm)* uygulamaları (Birattari, Stützle, Paquete et al. 2002; Birattari, 2004), *yerel arama* ve *kısmi deneysel tasarım (fractional experimental design)* kombinasyonları (Adenso-Diaz and Laguna, 2006), ve *iteratif yerel arama (iterated local search)* (Hutter, Hoos, leyton-Brown et al. 2009) olarak özetlenebilir.

Meta öğrenme ise bir diğer pasif öğrenme stratejisidir. Meta-öğrenme kavramı Rice (1976) tarafından formüle edilen "problemim için çalışması en iyi olası algoritma hangisidir?" şeklinde ifade edilen algoritmik seçim probleminden esinlenmiştir. Bu problemin öğrenme görevi olarak kabul edilmesi için makine öğrenmesi topluluğu daha çok sınıflandırmayla ilgili öğrenmeye yönelik meta – öğrenme yaklaşımları geliştirmiştir. Meta-öğrenme kavramının Smith-Miles (2008) çalışmasında tartışılan kısıt sağlama ve optimizasyon problem alanlarına genelleştirilmesi konusu üst sezgisel araştırmalarla yakından ilgilidir. Bu genelleştirmenin örnekleri yapay zeka (Horvitz, Ruan, Gomes et al. 2001; Leyton-Brown, Nudelman, Shoham, 2002) ve yöneylem araştırması (Smith-Miles, 2008) alanlarında bulunabilir.

***Aktif Yaklaşımlar***

Birçok problemde yaygın olarak kullanılan *parametre kontrolü*, evrimsel algoritmalar içinde bir tür öğrenme yaklaşımı olarak değerlendirilir. Algoritma yapılandırmaya farklı

bir yaklaşım olan parametre kontrolü olarak isimlendirilen yaklaşımda ana fikir algoritma parametrelerinin aktif olarak çalışma esnasında ayarlanmasıdır. Eiben, Hinterding ve Michalewicz (1999) çalışmasında parametre kontrol mekanizmaları için kullanışlı ve genel olarak kabul görmüş bir sınıflandırma önerilmiş ve evrimsel algoritmalarla beraber bu konunun o tarihe kadar yapılmış detaylı literatür özeti verilmiştir. Parametre kontrolü ile ilgili daha güncel bilgiler Eiben, Michalewicz ve Schoenauer vd. (2007) ile Lobo, Lima ve Michalewicz (2007) çalışmalarında bulunabilir.

Aktif öğrenme yaklaşımı olarak değerlendirilebilecek diğer bir algoritma da *adaptif memetik algoritmalardır*. *Adaptif memetik algoritmalar*, pertürbatif sezgisellere dayanan sezgisel seçim algoritmalarına oldukça yakın bir yaklaşımdır. Bu yaklaşım memes olarak adlandırılan çeşitli yerel arama operatörlerinin adaptif olarak arama süreci boyunca seçildiği yeni nesil hibrid evrimsel algoritmalardandır. Konu ile ilgili detaylı bilgiler Hart, Krasnogor ve Smith (2004), Jakob (2002; 2006), Krasnogor ve Smith (2000; 2001), Krasnogor ve Gustafson (2004), Ong ve Keane (2004), Ong, Lim, Zhu vd. (2006), Smith (2002; 2007), Neri, Toivanen, Cascella vd.( 2007), Neri, Tirronen, Karklainen vd. (2007) çalışmalarında bulunabilir.

Memetik algoritmalarda yerel arama operatörlerinin adaptasyonununun etkin bir sınıflandırması Eiben, Hinterding ve Michalewicz (1999) tarafından önerilen terminoloji kullanılarak Ong, Lim, Zhu vd. (2006) çalışmasında gösterilmiştir. Bu sınıflandırma yerel aramacıların (memes) seçiminde kullanılan adaptasyon mekanizmalarını (statik, adaptif ve kendi kendine adaptif) ve adaptasyon sürecinde (yerel ve global) kullanılan tarihsel bilgi seviyesini incelemiştir. Kendi kendine adaptasyonlu aramada, aramacılar organizmanın bir parçası olarak kodlanır ve standart evrime tabi tutulurlar. Smith (2008) çalışmasında tartışıldığı gibi, kendi kendine adaptasyon düşünceleri memetik algoritmalara iki yolla uygulanmaktadır: *i)*yerel arama operatörü seçimlerinin kendi kendine adaptasyonu (Krasnogor and Smith, 2000; 2001; Krasnogor, Blackburne, Burke et al. 2002) ve *ii)* yerel arama algoritma tanımlarının kendi kendine adaptasyonu (Krasnogor and Gustafson, 2002; 2004; Krasnogor, 2004; Smith, 2002; 2003; 2007). Bu ayrım, üst sezgisellerle ilgili yapılan temel

sınıflandırmada (sezgisel seçimi ve sezgisel üretme metodolojileri) olduğu gibi benzer kökene sahiptir.

Üst sezgisel yaklaşımlarla uyarlanabilir memetik algoritmalar arasındaki temel fark üst sezgisel yaklaşımın birincil arama olarak çözüm uzayında (sezgiseller uzayı) tek noktalı bir arama yürütürken, ikincil arama olarak memetik algoritmanın çözümlerin popülasyonunu sürdürmesidir. Diğer bir farklılık ise memetik algoritmalardaki alt seviyeli sezgiseller genellikle yerel arama sezgiselleri olurken, üst sezgiselde ise öncelikle basit komşuluk operatörleri ele alınır. Bunun yanında, arama boyunca her bir karar noktasındaki küme içinden daha uygun alt seviyeli sezgiselin zeki olarak seçimi için yapılan mücadele bu iki tür algoritma arasındaki güçlü bağlantıyı göstermektedir.

Evrimsel algoritmalarla ilgili güncel araştırma alanlarından birisi de *uyarlanabilir operatör seçimi* olarak anılmaktadır. Amaç farklı türdeki operatörlerin seçiminde otomatikliği sağlayabilecek aktif stratejilerin tasarlanmasıdır. Maturana, Fialho, Saubion vd. (2009) çalışmasında belirtildiği üzere uyarlanabilir operatör seçim yaklaşımları iki temel mekanizmaya sahiptir: birincisi, bir operatör uygulandıktan sonra ona atanacak ödülü belirleyen (kalitesine göre) kredi ataması, ikincisi ise daha önceden hesaplanmış operatör kalitelerine göre bir operatörü seçen operatör seçimi. Bu iki mekanizmanın uygulamalarına (ve kombinasyonuna) yönelik çeşitli yaklaşımlar ortaya konulmuştur (Fialho, Costa, Schoenauer et al. 2008; 2009; Maturana and Saubion, 2008; Maturana, Fialho, Saubion et al. 2009; Maturana, Lardeux, Saubion, 2010).

Uyarlanabilir operatör seçimi, perturbatif sezgisellere dayalı sezgisel seçim ile yakından ilgidir. Aralarındaki fark pertürbatif sezgisellerin popülasyon temelli doğal yapısındadır. Adaptif memetik algoritmalarla bağlantısı da açıktır. Adaptif operatör seçiminde amaç yerel operatörler yerine farklı türdeki operatörler arasından seçim yapmak olmasına rağmen mevcut *kredi atama* ve *oparatör seçim* bileşenlerinin her ikisi ile belirlenen mücadele vardır.

Reaktif arama karmaşık optimizasyon problemlerinin çözümü için alt-sembolik makine öğrenme tekniklerinin arama sezgisellerinin içine entegre edilmesini savunan aktif bir metodolojidir (Battiti and Brunato, 2007; Battiti and Protasi, 1997; Battiti, 1996).

Arama süreci içinde algoritmanın işlem parametrelerini kendi kendine ayarlayabilmesini sağlamak için makine öğrenme bileşeni arama sezgiselinin üzerinde çalışır. Aramanın geçmişini kullanarak verimliliği ve etkinliği arttırmak için öğrenme bileşeni reaktif geri bildirim şeması olarak uygulanır. Bu fikirler temelde tabu arama meta sezgiseline uygulanmaktadır.

Adaptif bir mekanizma içermemesine rağmen, değişken komşuluk araması (Mladenovic and Hansen, 1997) çoklu komşulukların arama gücünü kullanan pertürbatif sezgisellere dayanan sezgisel seçimi ile ilgilidir. Değişken komşuluk araması önceden tanımlanmış sıralamada komşulukları sistematik olarak değiştirir, böylece arama mevcut çözümün artarak uzaklaşan komşuluklarını keşfedebilir. Bu yüzden, değişken komşuluk aramasının çeşitli komşuluk yapılarının davranışlarını kontrol eden yüksek seviyeli önceden tanımlanmış bir sezgisel olduğunu söyleyebiliriz.

İlk olarak Huberman, Lukose ve Hogg (1997) tarafından önerilen algoritma portfolyoları (algorithm portfolios) arama tekniklerinin tasarımının otomatikleştirilmesinin alternatif bir yolunu göstermektedir. Sermaye piyasalarında farklı pazarların birleştirilmesi ile farklı risk dönüş profilleri elde etmek için ekonomideki standart uygulamalar takip edilerek tasarlanmıştır. Algoritma portfolyosu, her bir algoritmaya toplam CPU zamanının belili bir oranını tahsis ederek farklı algoritmaları zaman paylaşımı anlamında eş zamanlı olarak çalıştırır. Birinci algoritma çalışmasını bitirince çözümü rapor ederek portfolyonun tamamlanma zamanını belirlerken, diğerleri de hemen çalışmalarını durdurur. Aktif öğrenmeyi içeren dinamik portfolyolar, Gagliolo ve Schmidhuber (2006) çalışmasında incelenmiştir.

# IV. BÖLÜM:
# STOKASTİK PARALEL MONTAJ HATTI DENGELEME PROBLEMİNİN ÜST SEZGİSEL YAKLAŞIM İLE ÇÖZÜMÜ

Bu bölümde stokastik görev zamanlı paralel MHD problemi modellenerek üst sezgisel yaklaşım ile çözüm arama süreci açıklanmaktadır. Ele alınan problemde görev zamanlarının stokastik olmasından kaynaklanan çevrim zamanı kısıtı ve amaç fonksiyonu revizyonları da bu bölümde gösterilmiştir. Aynı şekilde makine teçhizat maliyetlerinin amaç fonksiyonuna eklenmesi de açıklanmıştır. Üst sezgisel yaklaşımda üst sezgisel olarak kullanılan tavlama benzetimi meta sezgiseli açıklanarak, önerilen üst sezgisel çözüm sürecinin örnek problem üzerinde uygulanması gösterilmiştir.

## 4.1. Stokastik Paralel Montaj Hattı Dengeleme Problemi

Montaj hattı dengeleme problemleri gibi paralel MHD problemi de NP-zor problem sınıfında yer alan kombinatoryal optimizasyon problemlerindendir. Hatta basit MHD problemine göre daha büyük ve karmaşık (birden fazla hattın değerlendirilmesi ile) çözüm uzayına sahip olabilmesi ile daha zor bir problem haline geldiği söylenebilir.

Paralel MHD probleminin çözümüne yönelik iki temel matematiksel programlama modeli mevcuttur. Problemin literatürde ilk olarak açıklandığı Gökçen, Ağpakve Benzer (2006) çalışmasında kullanılan matematiksel model ürünlerin üretileceği hatların önceden bilindiği varsayımı ile görevlerin istasyonlara atanması problemini temel almaktadır. Bu modelin genelleştirilmesiyle Scholl ve Boysen (2009) tarafından sunulan modelde ürünlerin hatlara atanması karar problemi de dikkate alınmaktadır. Böylece ürün – hat atamaları ve görev – istasyon atamalarını içeren iki karar probleminden oluşan çok ürünlü paralel MHD problemi ortaya çıkmıştır.

Her ne kadar Scholl ve Boysen (2009) modeli daha genel bir yaklaşım olsa da, gerek gerçek üretim uygulamalarında 2 hatlı sistemlerin yaygınlığı ve gerekse de çok ürün alternatiflerinin basit kombinasyonla değerlendirilebilme kolaylığı nedeniyle Gökçen, Ağpak ve Benzer (2006) tarafından önerilen model üzerinden problemin incelenmesi anlamlı olabilmektedir.

Bu bölümde, 2.3.1 başlığı altında açıklanan matematiksel modelde görev zamanlarının stokastik olarak değerlendirilmesine yönelik çeşitli modifikasyonlar yapılmıştır. Ayrıca görevlerin gerçekleştirilmesi için gerekli makine ve teçhizat maliyetlerinin biliniyor olması ve problemin çözümünde dikkate alınması durumu için de matematiksel modele çeşitli ilaveler yapılmıştır.

Gökçen, Ağpak ve Benzer (2006) çalışmasında açıklanan matematiksel model eşitlikler (2.1 – 2.7) ile açıklanmıştı. Bu modelde eşitlik (2. 1) ile gösterilen amaç, istasyon sayısının en küçüklenmesidir. Görev – istasyon kısıtları eşitlik (2. 2), çevrim zamanı kısıtı eşitlik (2. 3), komşuluk kısıtları eşitlik (2. 4) ve (2. 5), öncelik ilişkileri kısıtı eşitlik (2. 6) ve değişkenler ise eşitlik (2. 7) ile tanımlanmıştır.

Yukarıda açıklanan matematiksel model, deterministik paralel MHD problemi için geliştirilmiş, görev zamanlarının stokastiklik özelliğini dikkate almayan modeldir. Bu çalışmada görev zamanlarının stokastik olduğu varsayımı ile daha karmaşık bir kombinatoryal optimizasyon problemi olarak *stokastik paralel montaj hattı dengeleme problemi* ele alınmıştır.

MHD problemlerinde geleneksel olarak amaç fonksiyonlarında çevrim zamanı ve istasyon sayısı gibi zaman temelli faktörler kullanılırken, bu faktörlerin birer maliyet unsuruna dönüştürülerek amaç fonksiyonunda yer alması problemin daha gerçekçi şekilde ifade edilmesine yardımcı olabilmektedir (Amen, 2000a; 2000b; 2001). Ayrıca maliyet temelli problemler farklı çözüm yönlendirme kriterlerinden dolayı aynı problemin zaman temelli örneğine göre optimum çözüme ulaşması çok daha zor problemlerdir (Amen, 2006). Ele alınan stokatik paralel MHD problemi için de maliyet temelli bir amaç fonksiyonu kullanmanın daha faydalı olacağı açıktır. Dolayısıyla paralel MHD probleminde istasyon sayısının en küçüklenmesi olan amaç

fonksiyonunun birinci bileşeni istasyon sayısına bağlı olarak ortaya çıkacak maliyetin en küçüklenmesi olacaktır (eşitlik (4.1)). Söz konusu maliyet işçilik maliyetleri ile temsil edilebilmektedir. Burada birim işçilik maliyeti $L$ tüm çalışanlar için aynı sabit işçilik maliyetini göstermektedir.

$c$ *çevrim zamanı*
$L$ birim işçilik maliyeti
K toplam istasyon sayısı

$$\min \mathrm{F1} = [\, c \times L \times K \,] \tag{4.1}$$

Ele alınan stokastik paralel MHD probleminde sadece istasyon sayısının maliyete dönüştürülmesi değil, stokastik görev zamanlarından ve makine/teçhizat maliyetlerinden kaynaklanan değişikliklerin de yapılması gerekmektedir. Bu doğrultuda amaç fonksiyonuna yapılacak ilaveler aşağıda açıklanmıştır.

### 4.1.1. Stokastik Görev Zamanlarının Etkisi

Görev zamanlarının stokastik olması problemin gerçek dünya problemlerine biraz daha yaklaşmasını sağlamaktadır. Montaj hatlarında operasyonları gerçekleştiren birimlerin çoğunlukla insan çalışanlar olduğu düşünüldüğünde, insan davranışları, öğrenme etkileri, malzeme değişkenliği, psiko – sosyolojik ve çevresel faktörler gibi çok sayıda değişkenin operatörün çalışması ve dolayısıyla üretim hızı ve miktarı üzerinde etkili olduğu bilinmektedir. Üretim hızı ve miktarını etkileyebilecek bu tür değişkenliklerin montaj hattı dengeleme analizlerine dâhil edilebilmesi için çeşitli istatistiksel dağılımlar kullanılmıştır. Rastgele bağımsız değişkenler olarak açıklanan görev zamanlarındaki değişkenliğin gösteriminde genel olarak normal dağılım kullanılmaktadır (Moodie and Young, 1965; Arcus, 1966; Kottas and Lau, 1973; 1976; 1981; Silverman and Carter, 1986; Carraway, 1989; Suresh and Sahu, 1994; Erel, Sabuncuoglu, Sekerci, 2005). Görev zamanlarının değişken olarak kabul edilmesiyle klasik basit MHD problemi varsayımlarından farklı olarak aşağıdaki varsayımlar da dikkate alınmalıdır:

- Her bir $h$ hattındaki her bir $j$ görevinin gerçekleştirilebilmesi için gerekli süreyi gösteren $t_{jh}$ değeri, görevin gerçekleştirileceği istasyondan ve zamandan

bağımsızdır ve ortalaması $\mu_{jh}$, varyansı $\sigma_{jh}^2$ olmak üzere normal dağıldığı ($t_{jh}$ ~*Normal* ($\mu_{jh}$, $\sigma_{jh}^2$)) varsayılmıştır.

- Bir görev tamamlanmamış olsa bile, montajı yapılan parça hat üzerinde ilerlemeye devam ederek, öncelik ilişkilerine göre mümkün olan diğer görevlerin tamamlanmasına çalışılır.
- Tüm tamamlanamayan görevler hat dışında tamamlanır. Herhangi bir görevi hat dışında gerçekleştirmenin tahmini maliyeti, görevin hatta tamamlanan bölümünün bir fonksiyonu değildir, bağımsızdır.

Stokastik MHD problemlerinde normal maliyet olarak nitelendirilebilen işçilik maliyetlerine ilave olarak bir ürünün tamamlanmaması durumunda katlanılacak ilave tamamlanmama maliyetleri söz konusu olmaktadır.

Tamamlanmama maliyetinin hesaplanmasında literatürde genel olarak kabul görmüş yaklaşım, görevlerin tamamlanmama olasılıkları ile birim tamamlanmama maliyetinin çarpılmasıdır. Ayrıca bir görevin tamamlanmaması sonucunda ilgili görevin öncelik ilişkilerindeki ardıllarının da tamamlanmaması söz konusu olacağından görevin ve ardıllarının görev süreleri toplamı da maliyet faktörü olarak çarpıma dahil edilmektedir (Kottas and Lau, 1973; 1976; 1981; Erel, Sabuncuoglu, Sekerci, 2005). Paralel MHD problemi için önerilen eşitlik (2. 1)'deki amaç fonksiyonunun yerine, F1 amacına ilave olarak; görev zamanlarının değişkenliğinden kaynaklanan beklenen tamamlanamama maliyetini içerecek şekilde ilave F2 amaç fonksiyonu eşitlik (4.2)'deki gibi olacaktır:

$\phi_{jhk}$ $h$ hattında $k$ istasyonundaki $j$ görevinin tamamlanmama olasılığı

$r$ birim tamamlanmama maliyeti

$F^*_{jh}$ = $h$ hattındaki $j$ görevinin ardılları kümesi

$x_{jhk} = \begin{cases} 1 & \text{h hattındaki j görevi k istasyonuna atanırsa} \\ 0 & \text{diğer durularda} \end{cases}$

$$\min \text{F2} = \sum_{k=1}^{K_{max}} \sum_{h=1}^{H} \sum_{j=1}^{J_h} \left[ \phi_{jhk} \times r \times \left( t_{jh} + \sum_{j \in F^*_{jh}} t_{jh} \right) \times x_{jhk} \right] \quad (4.2)$$

İşçilik maliyetine benzer şekilde $r$ birim tamamlanamama maliyeti de her bir görev için sabit olup fazla mesai örneği gibi normal maliyetlere ilave olarak katlanılacak ilave

maliyet oranını simgelemektedir. Amaç fonksiyonunun tamamlanamama maliyetinin hesaplandığı bölümündeki görevlerin tamamlanamama olasılığının belirlenmesi probleme stokastik nitelik kazandıran en önemli bileşenlerdendir. Görevlerin istasyon içerisindeki sıralarının dahi tamamlanamama olasılığını etkilediği (Kottas and Lau, 1981) düşünüldüğünde her bir görev için tamamlanmama olasılığı Erel, Sabuncuoglu ve Sekerci (2005) çalışmasından geliştirilerek eşitlik (4.3)'deki gibi hesaplanır:

$A_{hjk}^{*}$ *h* hattında *k* istasyonuna *j* görevinden önce atanmış görevler kümesi

$\phi$ hesaplanan olasılık (standart normal dağılımda *x* noktasının solunda kalan alan)

$$\phi_{hjk} = \phi\left(\frac{c-\left(\sum_{i\in A_{hjk}^{*}} t_{hi}\right)}{\sqrt{\sum_{i\in A_{hjk}^{*}} \sigma_{hi}^{2}}}\right) - \phi\left(\frac{c-\left(\left(\sum_{i\in A_{hjk}^{*}} t_{hi}\right)+t_{hj}\right)}{\sqrt{\left(\sum_{i\in A_{hjk}^{*}} \sigma_{hi}^{2}\right)+\sigma_{hj}^{2}}}\right) \qquad i, j=1, 2\ldots J;\ i\neq j \qquad (4.3)$$

Bir *k* istasyonuna atanan *h* hattındaki *j* görevinin tamamlanmama olasılığının hesaplanması *j* görevinin dahil edilmediği ve *j* görevinin dahil edildiği iki olasılık değerinin hesaplanıp farklarının alınmasıyla gerçekleştirilir. *j* görevinin dahil edilmediği birinci olasılık hesabında, *c* çevrim zamanı ile ilgili istasyonda *j* görevinden önce atanmış görevlerin süreleri toplamının farkının; yine aynı görevlerin varyansları toplamının karekköküne oranı hesaplanır. Elde edilen değerin *standart Z* tablosunda gösterdiği olasılık *j* görevi ilgili istasyona dâhil edilmeden, ilgili istasyondaki görevlerin tamamlanmama ihtimalini göstermektedir. İkinci olasılık hesabında ise aynı hesaplama işlemi *j* görevi dâhil edilerek gerçekleştirilir. Sonuçta iki olasılık değerinin farkı *j* görevinin tamamlanmama olasılığını göstermektedir. Burada istasyondaki ardışık görevlerin tamamlanmama olasılıkları birbirinden çıkarılarak her bir görevin tek başına tamamlanmama olasılığı bulunmaktadır. Bir görevin tamamlanmaması ardıllarının da tamamlanmamasına sebep olacağından, hesaplanan bu tamamlanmama olasılıkları görev ve ardıllarının süreleri toplamıyla ve birim tamamlanmama maliyeti ile çarpılarak amaç fonksiyonunda kullanılmaktadır.

Görev zamanlarının bir olasılık dağılımı ile ifade edilmesinden dolayı bir istasyona atanan görevlerin süreleri toplamının çevrim zamanını aşamayacağını gösteren eşitlik

(2. 3)'ün yeniden düzenlenmesi gerekmektedir. Görev zamanlarındaki değişkenliğin bir oranı olarak varyans değerinin de dikkate alınmasıyla, istasyon zamanının çevrim zamanını aşma olasılığının en fazla α olacağı durumda; istasyon zamanının çevrim zamanını aşmaması aşağıdaki eşitlik (4.4) ile gösterilebilmektedir:

$Z_{1-\alpha}$ : istasyon zamanının çevrim zamanını aşmama olasılığına karşılık gelen standart normal değer (önceden belirli güven derecesi)

$$\sum_{h=1}^{H}\sum_{j\epsilon S_k}\left(t_{jh}\times x_{jhk}\right)+z_{1-\alpha}\sqrt{\sum_{h=1}^{H}\sum_{j\epsilon S_k}\left(\sigma_{jh}^{2}\times x_{jhk}\right)}\leq c\times z_k \qquad k=1,\dots,K_{max} \tag{4.4}$$

Amaç fonksiyonu ve çevrim zamanı kısıtlarındaki yukarıda açıklanan değişiklikler ile stokastik paralel MHD problemi modellenmiş olmaktadır. Ele alınan problemin omurgasını oluşturan bu modele ilave olarak makine/teçhizat maliyetlerinin etkisi de incelenmiştir.

### 4.1.2. Makine/Teçhizat Maliyetlerinin Etkisi

Montaj hatları ile ilgili güncel çalışmaların yoğunlaştığı alanlardan birisi de montaj hattı tasarım problemidir. Robotların ve otomatik makinelerin yaygınlaşmasıyla esnek montaj sistemleri yüksek verimlilik seviyelerinde imalat imkanları sağlamaktadır. Birbirleri yerine kullanılabilen farklı görevleri gerçekleştirebilen makine ve teçhizat kullanımı esnek montaj sistemlerinin yaygınlaşmasına yardımcı olurken çabuk değişen müşteri ihtiyaçlarına hızlı tepki verilebilmesini sağlamaktadır. Bu kapsamda montaj hattı tasarımı problemi istasyonlarda kullanılacak teçhizatın seçimi ve görevlerin istasyonlara atanmasından oluşmaktadır. Esnek makine ve teçhizat kullanımıyla bazı görevlerin gerçekleştirilmesinde kullanılabilecek birden fazla makine ve teçhizat alternatifi sunulurken, bazı görevler için ise sadece tek bir makine veya teçhizat alternatifi sunulabilmektedir (Bukchin and Tzur, 2000). Alternatif makine ve teçhizatlar ise genellikle farklı operasyon hızları ve gereklilikleri ile tasarım probleminde verilmesi gereken bir karar olarak ortaya çıkmaktadır.

Makine ve teçhizat maliyetini dikkate alan araştırmaların önemli bir bölümünde birbiri yerine kullanılabilen alternatif makine ve teçhizatın seçimi problemi ve kullanılan bu

makinelere özel çalışma yönü, aparat özellikleri ve değiştirme hızı gibi faktörlerin tasarım problemi kapsamında incelendiği araştırmalar bulunmaktadır. Bu araştırmalardan Graves ve Holmes (1988) çalışmasında aynı hatta çok sayıda ürünün çeşitli teçhizat alternatifleri ile üretilmesi durumunu içeren tasarım problemini ele almışlardır. Önerilen çözüm yaklaşımı tüm iş istasyonları için en iyi teçhizat alternatiflerini deneyip belirleyerek iş istasyonları için en iyi teçhizat kümesini seçmektedir. Daha önceki Graves ve Lamar (1983) çalışmasında da görevlerin önceden sabit bir sıralamasının bilindiği benzer bir problem için tamsayılı programlama yaklaşımı önerilmiştir. Basit MHD probleminin bir uzantısı olarak manuel bir montaj hattında süreç alternatiflerinin değerlendirilmesi Pinto, Dannenbring ve Khumawala (1983) çalışmasında gerçekleştirilmiştir. Esnek bir montaj sistemi olarak robotlardan oluşan bir montaj hattında birbiri yerine kullanılabilen robotların oluşturduğu montaj hattının tasarımı ve dengelenmesi problemi Rubinovitz ve Bukchin (1993) çalışmasında incelenmiştir. Tsai ve Yao (1993) çalışmasında bir ürün ailesinin üretiminde kullanılan esnek robot montaj hattı tasarım problemi ele alınmıştır. Toplam istasyon sayısının en küçüklenmeye çalışıldığı modelde alternatif teçhizatların belirli satın alma maliyetlerine sahip olduğu varsayılmıştır. Önerilen sezgisel yaklaşım talep ve bütçe kısıtlarını da dikkate alarak her bir istasyonda ihtiyaç duyulan robot sayısını ve türünü belirlemektedir. Bukchin ve Tzur (2000) çalışmasında görevleri arasında öncelik ilişkileri bulunan ve görevlerin alternatif esnek montaj makinelerinde gerçekleştirilebildiği, görevler için teçhizat seçimi ve görevlerin istasyonlara atanması problemi ele alınmıştır. Problemin çözümü için dal – sınır algoritmasına dayanan kesin bir çözüm algoritması geliştirilmiş ve uygulamada karşılaşılabilecek boyuttaki problemlerin çözümünde kullanılabileceği belirtilmiştir.

Makine ve teçhizat maliyetlerinin dikkate alındığı araştırma alanlarından birisi de paralel istasyonlu montaj hattı dengeleme problemidir. Paralel istasyon durumunda aynı istasyonda birden fazla makine ve teçhizat kullanımı söz konusu olacağından, makine ve teçhizat maliyetinin dikkate alınması paralel istasyonlu montaj hattı dengeleme problemlerinin önemli bir bileşenidir. Paralel iş istasyonlarını konu alan McMullen ve Frazier (1998), McMullen ve Tarasewich (2003), Ege, Azizoglu ve Ozdemirel (2009) ile Cakir, Altiparmak ve Dengiz (2011) çalışmalarında paralel istasyonlarda kullanılan

makine ve teçhizat sayısına bağlı olarak makine ve teçhizat maliyeti problemin amaç fonksiyonunda yer almıştır.

Paralel istasyon kullanılması veya görevlerin alternatif makine ve teçhizatlarda gerçekleştirilebilmesi durumlarında makine ve teçhizat maliyetleri hat tasarım ve dengeleme sürecinde önemli bir maliyet unsuru olmaktadır. MHD problemlerinin temel varsayımlarından olan ve hem alternatif makine/teçhizat hem de paralel istasyon durumlarında da geçerli olan "hattaki her bir istasyona tek bir makine/teçhizatın atanması" varsayımı makine/teçhizat maliyeti faktörünü sınırlandıran önemli bir kısıttır. Oysaki gerçek uygulamalarda montaj hatlarında bir istasyonda birden fazla makine/teçhizat kullanılabilmektedir. Örneğin bir otomobile cam montajı işleminin yapıldığı bir istasyonda, vakumlu cam taşıyıcı tutacaklar, yapıştırıcı tabancaları ve plastik sıkıştırma çekişleri bir arada aynı istasyonda kullanılmaktadır. Ayrıca farklı operasyonların tek bir makine/teçhizat ile gerçekleştirilebilmesi de mümkündür. Örneğin bir matkap ile parça üzerinde delme işlemi yapıldığı gibi aynı zamanda başka bir parçanın vidalanması işlemi de gerçekleştirilebilmektedir.

Bir montaj hattı tasarımı ve dengeleme probleminde sadece alternatif makine/teçhizat veya paralel iş istasyonu durumlarında makine/teçhizat maliyetini önemli bir maliyet unsuru olarak dikkate almak gerçek dünya uygulamalarından uzaklaşmak anlamına gelecektir. Paralel istasyonlu MHD çalışmalarında amaç fonksiyonunu oluşturan veya bileşenlerinden biri olan makine ve teçhizat maliyetlerinin paralel MHD problemlerinde de dikkate alınması daha gerçekçi bir yaklaşım olacaktır. Bu doğrultuda makine ve teçhizat maliyetlerinin anlamlı bir şekilde dikkate alınabilmesi için "hattaki bir istasyona tek bir teçhizat atanır" varsayımı kaldırılarak her bir görevin gerçekleştirileceği bir makine/teçhizat türü belirlenmelidir. Böylece dengeleme sürecinde makine ve teçhizat türleri ve maliyetleri dikkate alınarak maliyet açısından tasarruf imkânı da sağlanabilecektir. Örneğin; aynı makine/teçhizat ile operasyonları gerçekleştirilebilen görevler aynı istasyona atanarak bir araya geldiğinde, ihtiyaç duyulan kullanılacak makine/teçhizat sayısında azalma (farklı istasyonlara atandığı durumdan daha az sayıda) söz konusu olacaktır. Böyle bir durumda makine/teçhizat maliyetine bağlı olarak önemli tasarruflar söz konusu olabilecektir.

Bu çalışmada MHD problemlerinde geleneksel olarak kullanılan makine ve teçhizatlarla ilgili varsayımlar yerine aşağıdaki varsayımlar kullanılmıştır:

- Farklı görevlerin aynı makine/teçhizatla gerçekleştirilebilmesi yada aynı makine/teçhizat türü ile farklı operasyonların gerçekleştirilebilmesi (örneğin A görevi 1 numaralı makine ile gerçekleştirilirken E görevinin de aynı makine ile gerçekleştirilmesi)
- Her bir görevin maliyeti önceden belirli bir makine/teçhizat türü ile gerçekleştirildiği ve böylece de bir istasyonda atanan görevlere bağlı olarak birden fazla makine/teçhizatın kullanılabileceği ve farklı makine teçhizat türlerinin aynı maliyet değerlerine sahip olabileceği

Makine ve teçhizat maliyetlerinin yukarıdaki varsayımlar dikkate alınarak ele alınan stokastik paralel montaj hattı dengeleme problemine uygulanmasıyla, problemde kullanılan işçilik maliyetleri (F1) ve stokastik görev zamanlarından kaynaklanan tamamlanamama maliyetlerine (F2) ilave olarak; kullanılan makine ve teçhizatın satın alma, işletme, bakım, yıpranma, yedek parça gibi maliyetlerini kapsayan makine ve teçhizat maliyeti (eşitlik (4.5)) de ilave bir maliyet unsuru olarak amaç fonksiyonuna dahil edilmiştir.

$S_k$ : $k$ istasyonuna atanan görevler

$Eq(j)$ : $j$ görevinin gerçekleştirileceği makine/teçhizat türü

$EC_{Ep(j)}$ : $j$ görevinin gerçekleştirilmesinde kullanılan $Eq(j)$ makine/teçhizatının maliyeti

$$\min \mathrm{F}(3) = \sum_{k=1}^{K_{max}} \left( \sum_{j \in S_k} EC_{Eq(j)} - \sum_{i,j \in S_k, i \neq j, \forall\, Eq(i)=Eq(j)} EC_{Eq(i)} \right) \tag{4.5}$$

Stokastik paralel MHD problemi için işçilik maliyetleri, görevlerin tamamlanmama maliyetleri ve makine/teçhizat maliyetlerinin toplanmasıyla elde edilen güncel amaç fonksiyonu eşitlik (4.6)'da tanımlanmıştır.

$$\begin{aligned} \min (\mathrm{F1} + \mathrm{F2} + \mathrm{F3}) = {} & \left[ c \times L \times \left( \sum_{k=\lceil K_{min} \rceil}^{K_{max}} z_k \right) \right] + \\ & \sum_{h=1}^{H} \sum_{k=1}^{K_{max}} \left[ \phi_{jhk} \times r \times \left( t_{jh} + \sum_{j \in F_{hj}^*} t_{jh} \right) \times x_{jhk} \right] + \\ & \sum_{k=1}^{K_{max}} \left( \sum_{j \in S_k} EC_{Eq(j)} - \sum_{i,j \in S_k, i \neq j, \forall\, Eq(i)=Eq(j)} EC_{Eq(i)} \right) \end{aligned} \tag{4.6}$$

## 4.2. Tavlama Benzetimi

Bir çok optimizasyon probleminin polinom zamanlı çözüm algoritmaları ile çözülememesi ve gerçek dünya uygulamalarında optimal çözümünden ziyade kabul edilebilir çözümlerinin kullanılabilir olması yeni çözüm yaklaşımlarının araştırılmasını sağlamaktadır. Çözümü zor optimizasyon problemleri için optimal olmayan fakat yeterince iyi ve daha hızlı sezgisel çözüm yaklaşımlarının geliştirilmesiyle önemli bir araştırma alanı ortaya çıkmıştır. Sezgisel yaklaşımların bir çoğu doğadaki çeşitli olaylardan ilham alınarak optimizasyon problemlerine uyarlanmıştır. Tavlama benzetimi sezgisel yaklaşımı da metal malzemelerin fiziksel tavlama işleminin optimizasyon problemlerine bir uyarlaması olarak stokastik arama sürecini ifade eder.

Fiziksel tavlama sürecinin Monte Carlo tekniğine dayanan benzer bir algoritması ilk olarak Metropolis, Rosenbluth, Rosenbluth vd. (1953) tarafından açıklanmıştır. Bir katı malzemenin ısı banyosunda soğutularak kararlı hale getirilmesi tavlama süreci olarak ifade edilir (Kirkpatrick, Gelatt, Vecchi, 1983). Bu süreçte öncelikle katı malzeme erime noktasını aşacak kadar ısıtılır ve ardından uygun şekilde soğutulur. Sıvı halde atomlar arasındaki kimyasal bağlar çözülür ve eğer yeterince yavaş şekilde soğutulabilirse, büyük kristal yapılar oluşturacak şekilde yeniden bir araya gelebilirler. Katı malzemenin yapısal özellikleri soğutma hızına bağlı olarak değişiklik gösterir. Çok hızlı bir soğutma yapılırsa kristal yapının içeriğinde bozulmalar oluşabilmekte bu da malzemenin dayanımını etkileyebilmektedir. Metropolis algoritması bu fiziksel tavlama sürecinin bir benzetimidir. Tavlama sürecindeki soğutma işlemi Metropolis algoritması tarafından; sonunda donma noktasına ulaşıncaya kadar sıcaklığın azaltılarak kararlı yapıya ulaşılması süreciyle benzetilir.

Katı malzemelerin fiziksel tavlama sürecinin kombinatoryal optimizasyon problemlerine uyarlamasının ilk örnekleri ise Kirkpatrick, Gelatt ve Vecchi (1983) ile ondan bağımsız olarak Cerny (1985) tarafından gösterilmiştir. Fiziksel tavlama sistemi ile kombinatoryal optimizasyon problemi arasında benzerlik kurularak Metropolis algoritması optimizasyon problemlerinin çözümünde kullanılabilir (Aarts, Korst, Michiels, 2005). Tavlama benzetimi uygun çözümlerin aranması ve optimal çözüme odaklanılmasını sağlayacak bir araç olarak değerlendirilmiştir.

Tablo 4. 1. Fiziksel tavlama ve kombinatoryel optimizasyon arasındaki benzerlikler

| **Fiziksel Tavlama** | **Kombinatoryal Optimizasyon** |
|---|---|
| Sistem durumu | Uygun çözümler |
| Enerji | Maliyet |
| Sıcaklık | Kontrol parametresi |
| Durum değişmesi | Komşu çözümler |
| Donma/soğuma durumu | Sezgisel optimal çözüm |

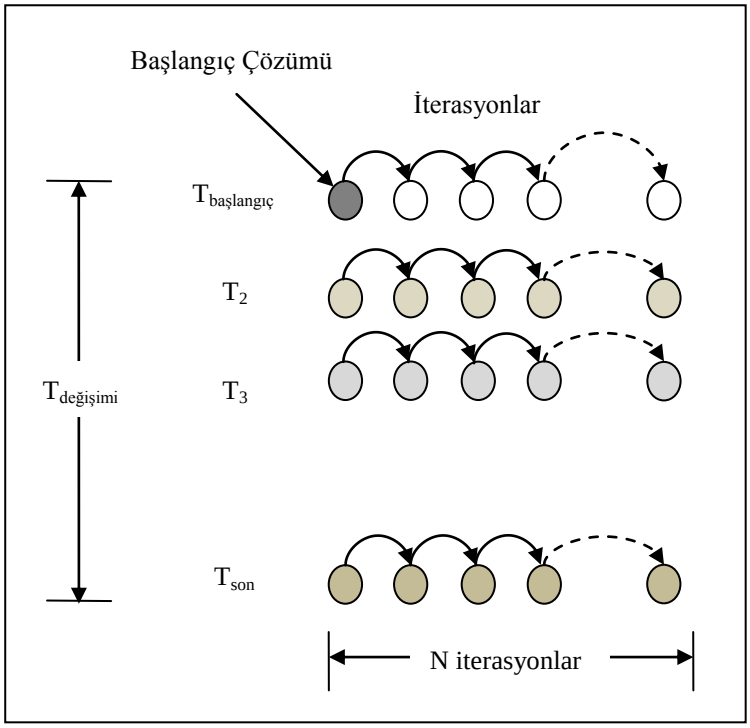
Downsland (1995) çalışmasında fiziksel tavlama süreci ile tavlama benzetimi arasındaki ilişki gösterilmiştir (Tablo 4. 1). Kombinatoryal optimizasyon probleminin her bir uygun çözümü fiziksel sistemin bir durumuna karşılık gelirken, her bir çözümün maliyeti de ilgili sisteminin durumunun enerjisi olarak değerlendirilebilir. Benzer şekilde *T* sıcaklık değeri de optimizasyon probleminin çözüm sürecine bir kontrol parametresi olarak dahil edilebilir. Algoritma çalıştıkça bu *T* sıcaklık değeri belirli bir soğuma oranında sistematik olarak azaltılarak komşu çözümler bulunur. Her bir komşu çözüme geçilmesi tavlama sürecindeki kararlılık durumunun değişmesine karşılık gelmektedir. Tavlama süreci sonunda ulaşılan donma yada katılaşma olarak ifade edilen son aşama, sezgisel olarak bulunan optimal çözümü işaret etmektedir.

Tavlama benzetimi yaklaşımının doğrusal olmayan modellere uygulanabilmesi, çok sayıda kısıt altında kaotik ve gürültülü veriler üzerinde çalışabilmesi yöntemin önemli avantajlarındandır. Ayrıca esnek bir algoritma olarak kolayca farklı problem türlerine uyarlanabilmesi ve global optimum değere yakınsama yeteneği yöntemin güçlü yanlarındadır. Diğer sezgisel algoritmalara kıyasla nispeten daha az sayıda parametre içermesi ve kolay ayarlanabilir olması da diğer avantajlarındandır.

Tavlama benzetiminin en önemli dezavantajlarının başında çözüm kalitesi ve çözüm süresi arasındaki güçlü ilişkidir. Daha iyi çözümler elde etmek için daha algoritmanın uzun süreler çalıştırılması gerekir. Ayrıca meta sezgisel bir algoritma olarak parametrelerin hassas bir şekilde ayarlanması ve probleme bağlı şekilde farklı değişkenler ve parametreler gerektirebilmesi diğer dezavantajlarıdır.

### 4.2.1. Tavlama Benzetimi Yapısı ve Çalışma Mekanizması

Tavlama benzetimi algoritması yerel arama yapabilen meta sezgisel bir algoritmadır. Fiziksel tavlama sürecinin temel faktörlerinden olan sıcaklık, kontrol parametresi olarak tavlama benzetimi algoritmasının da belirleyici unsurlarındandır. Her bir sıcaklık değerinde bir dizi iterasyon boyunca yerel arama yaparak komşu çözümlere ulaşmaya çalışılır. Belirli bir iterasyon sayısı sonunda sıcaklık azaltılarak yeni bir sıcaklık değerinde yeni komşulukların keşfedilmesi gerçekleştirilir (Şekil 4. 1).




Şekil 4. 1. Tavlama Benzetimi Algoritması Yapısı (Gonzales-Garces, 2006)

Tavlama benzetimi sürecinin ilk adımı probleme uygun başlangıç çözümünün oluşturulmasıdır. Rastgele veya önceden bilinen bir kurala göre oluşturulacak başlangıç çözümünde yapılacak küçük pertürbatif değişikliklerle yeni bir uygun çözüm (komşu çözüm) aranmaktadır. Her *T* sıcaklık kontrol parametresi seviyesi için geliştirilen komşu çözüm(ler) değerlendirilerek optimal çözüm aranmaktadır. Eldeki mevcut çözüm ve yeni geliştirilen komşu çözümün değerlendirilmesi, kullanılan amaç fonksiyonlarının karşılaştırılması ile gerçekleştirilmektedir. Her bir komşulukta, yeni bulunan komşu çözümün amaç fonksiyonu değeri ile eldeki mevcut çözümün amaç fonksiyonu değerleri karşılaştırılır ve eğer komşu çözüm daha düşük maliyetli (minimizasyon

problemi için) bir çözüm ise mevcut eldeki çözüm olarak güncellenir. Aksi durumda, yeni bulunan komşu çözümün amaç fonksiyonu değeri eldeki mevcut çözümün amaç fonksiyonu değerinden daha büyükse yine de daha yüksek maliyetli komşu çözümün kabul edilme olasılığı vardır. Metropolis kriterine göre daha kötü bir komşu çözüme geçme hareketi, çözüm sürecinin yerel bir optimum çözüm noktasına takılıp kalmasını engelleyebilecek bir özelliktir. Daha kötü bir komşu çözümün kabul olasılığı amaç fonksiyonundaki değişimin ve sıcaklığın bir fonksiyonudur. Fiziksel tavlama sürecinde, belirli $T$ sıcaklığında malzemenin enerji seviyesindeki yükselme ihtimaline karşılık gelen komşu çözümün kabulü olasılığı eşitlik (4.7)'deki gibi hesaplanır.

$f(S_i)$ : $i$. çözümün amaç fonksiyonu değeri

$T$ : sıcaklık

$P(S_i)$ : Mevcut çözümden daha kötü bir çözüm olan $S_i$ çözümünün kabul olasılığı

$$P(S_i) = exp^{-\frac{f(S_i)-f(S_{i-1})}{T}} \tag{4.7}$$

Hesaplanan bu kabul olasılığı değeri (0,1) aralığında rastgele üretilecek değer ile karşılaştırılır. Eğer rastgele üretilen değer hesaplanan kabul olasılığından küçük ($P(S_i)>rand(0,1)$) ise komşu çözüm, daha yüksek amaç fonksiyonu olmasına rağmen yeni komşu çözüm olarak kabul edilir (eşitlik (4.8)).

$$P(S_i) = \begin{cases} 1 & f(S_i) \le f(S_{i-1}) \\ 1 & exp^{-\frac{f(S_i)-f(S_{i-1})}{T}} > rand(0,1) \quad ve \quad f(S_i) > f(S_{i-1}) \\ 0 & \text{diğer durumlarda} \end{cases} \tag{4.8}$$

Her bir sıcaklık değerinde belirli bir iterasyon sayısı kadar geliştirilen komşu çözümler değerlendirilerek optimal çözüm aranır. Süreç içerisinde $T$ sıcaklık değeri azaltılarak arama sürecinin yakınsaması sağlanır. Süreç $T$ sıcaklık kontrol parametresi nihai değerine ulaşıncaya kadar tekrar edilir (Şekil 4. 2).

Başla

Başlangıç ayarları

$S_0$: başlangıç çözümü
$T_0$: başlangıç sıcaklığı
β : soğutma oranı
i=1: iterasyon sayacı

***Tekrarla***

$S_i \epsilon S$ komşu çözümü
***if*** $\Delta=f(S_i)-f(S_0)<0$
$S_0= S_i$
***Else if*** $exp\left(-\frac{f(S_i)-f(S_0)}{T}\right) > random(0,1)$
$S_0= S_i$
***End***
$T_i= \beta T_0$

***Oluncaya kadar*** durdurma kriteri=1

Son

Şekil 4. 2. Tavlama benzetimi algoritması genel süreci

### 4.2.2. Tavlama Benzetimi Parametreleri (Soğutma Çizelgesi)

Meta sezgisel algoritmalara getirilen en önemli eleştirilerin başında, kullanılan parametreler ve bu parametrelerin değerlerinin ayarlanması gelmektedir. Birçok meta sezgisel, probleme özgü parametrelere ihtiyaç duyabilmektedir. Tavlama benzetimi yaklaşımı da diğer meta sezgisellere kıyasla nispeten daha az sayıda olsa da çeşitli parametreler kullanmaktadır (Aarts, Korst, Michiels, 2005; Gonzales-Garces, 2006). Tavlama benzetimi algoritmasının temel parametreleri *soğutma çizelgesi* olarak isimlendirilir. Soğutma çizelgesi; *başlangıç sıcaklığı*, *bitiş sıcaklığı*, *sıcaklık azaltma fonksiyonu* ve *her bir sıcaklıktaki iterasyon sayısı (Markov zinciri uzunluğu)* olmak üzere 4 parametreden oluşur.

Arama sürecini de yönlendiren sıcaklık parametresi için *$T_0$ başlangıç sıcaklığının* belirlenmesi arama sürecinin etkinliğini önemli derecede etkilemektedir. Başlangıç sıcaklığı neredeyse tüm uygun komşu çözümleri kabul edecek kadar yüksek olmazsa ulaşılacak nihai çözüm başlangıç çözümü ile aynı veya benzer olacaktır. Ancak çok yüksek başlangıç sıcaklıkları da aramanın herhangi bir komşuluğu kabul etmesine ve sürecin rastgele aramaya dönüşmesine neden olabilecektir. Dolayısıyla doğru bir

başlangıç sıcaklığı ile arama sürecine başlamak büyük önem arz etmektedir. Hâlihazırda uygun bir başlangıç sıcaklığının tespit edilmesine yönelik herhangi bir yöntem bulunmamaktadır. Ancak genel olarak amaç fonksiyonundaki maksimum değişimin bilindiği veya tahmin edilebildiği durumlarda uygun bir başlangıç sıcaklığı tahmini yapılabilir (Bai & Kendall, 2005). Başlangıç sıcaklığı amaç fonksiyonundaki ortalama değişim ve başlangıç kabul olasılığının ($X_0$) bir oranı olarak eşitlik (4.9)'daki gibi hesaplanabilir (Van Laarhoven and Aarts, 1997; Gonzales-Garces, 2006).

$$T_0 = -\frac{\bar{\partial} f^+}{\ln(X_0)} \tag{4.9}$$

Amaç fonksiyonundaki ortalama değişim ($\bar{\partial} f^+$) amaç fonksiyonu değerindeki ortalama değişimi ifade etmekte ve ortalama değer yerine maksimum değişim değeri de ($\partial f^{max}$) kullanılabilmektedir (Bai and Kendall, 2005). Amaç fonksiyonundaki bu değişim değerinin hesaplanabilmesi için çözüm sürecinden bağımsız olarak bir dizi rastgele deneme çalıştırması yapılabilir. Benzer şekilde yeterince yüksek teorik bir başlangıç sıcaklığı ile başlatılacak çözüm sürecinin ilk sıcaklık değişim noktasına kadarki yapılan iterasyonlarından elde edilecek amaç fonksiyonu değişim değerleri kullanılarak da başlangıç sıcaklığı ($T_0$) hesaplanabilir ve bu değer algoritmada kullanılmaya başlanabilir. $T_0$ başlangıç sıcaklığının hesaplanmasında, yeteri kadar yüksek sıcaklık değerine ulaşmak için yapılacak denemelerin sayısının nispeten az sayıda olması daha faydalı bulunmuştur (Gonzales-Garces, 2006).

Bitiş sıcaklık değeri $T_{son}$ ise kullanılacak sıcaklık değerlerinin sayısı veya üretilecek çözümlerin sayısı ile belirlenebilir. Aynı zamanda durdurma kriteri olarak da kullanılabilen $T_{son}$ sıcaklık değeri tavlama benzetimi algoritmasının ulaşacağı nihai sıcaklık değeri olarak da nitelendirilir. Klasik tavlama benzetimi algoritmasında sıcaklığın sıfır değerine ulaşması beklenilse de özellikle geometrik soğutma kullanılması durumunda bu mümkün olmayacaktır. Zaten belirli bir düşük sıcaklık seviyesinden itibaren daha düşük seviyedeki tüm sıcaklıklar için daha iyi olmayan hiçbir komşu çözüm kabul edilmemeye başlayacaktır. Dolayısıyla bitiş sıcaklığının yeterince düşük bir sıcaklık değeriyle veya iterasyon sayısıyla sınırlandırılması uygun

olabilmektedir. Bu tez çalışmasında da bitiş sıcaklığı yerine *amaç fonksiyonunda gelişme sağlanamayan iterasyon sayısı* durdurma kriteri olarak kullanılmıştır.

Fiziksel tavlama sürecindeki malzemenin kararlı hale gelmesi için yapılan soğutma işleminin karşılığı olarak tavlama benzetimi algoritmasında da kontrol parametresi olan $T$ sıcaklık değerinin azaltılmasıyla optimal çözüme yakınsama sağlanmaya çalışılır. $T_0$ başlangıç sıcaklığından $T_{son}$ bitiş sıcaklığına kadarki süreçte sıcaklık değerlerindeki azalma, *soğutma oranı* (*SO*) ile belirlenir. Algoritmanın başarısı için büyük önemi sahip soğutma oranı olarak doğrusal veya geometrik soğutma oranları kullanılabilmektedir. Literatürde de sıklıkla kullanılan geometrik soğutma oranı eşitlik (4.10)'da tanımlanmıştır.

$$T_{k+1} = SO \times T_k \qquad 0 < SO < 1 \qquad (4.10)$$

Burada *SO* soğutma oranı olarak kullanılmakta ve genellikle 0.80 ile 0.99 arasındaki değerlerler kullanılmaktadır. Kullanılan *SO* değeri büyüdükçe sıcaklık azalma hızı düşeceğinden, bitiş sıcaklığına veya durdurma kriterine ulaşma daha uzun zaman alacaktır. Tersi durumda ise çözüm uzayı yeterince taranmadan durdurma kriterine hızlı bir şekilde ulaşılması söz konusu olabilecektir. Tavlama benzetimi yaklaşımında soğutma oranı dikkatlice seçilir ve uygulanırsa problemin global optimum değerinin bulunması mümkündür. Fakat böyle bir durumda soğuma çok yavaş gerçekleşeceğinden çok uzun bir çözüm zamanına ihtiyaç doğacaktır. Soğutma oranının olması gerekenden yüksek seçilip sıcaklığın daha hızlı düşürülmesi durumunda ise yerel optimuma takılıp kalınması söz konusu olacaktır. Tavlama benzetimi algoritmalarında soğutma oranının belirlenmesine yönelik yapılan araştırmalarda, soğutma oranının asimptotik bir fonksiyon olması ve hızlı şekilde azalmaması gerektiği belirtilmiştir.

Her bir sıcaklık seviyesinde gerçekleştirilecek iterasyon sayısı (markov zinciri uzunluğu) ise soğutma çizelgesinin son öğesidir. Genellikle önceden belirlenen sayıda iterasyon sayısı her bir sıcaklık seviyesi için kullanılmaktadır. Her bir sıcaklık seviyesinde yapılacak iterasyon sayısı termal dengeye ulaşmayı garanti edecek kadar fazla sayıda olmalıdır (Van Laarhoven and Aarts, 1997; Gonzales-Garces, 2006). Her bir sıcaklık seviyesinde sadece tek bir iterasyon yapılıp soğutma oranın düşük

tutulmasıyla çok sayıda sıcaklık seviyesinin taranması ise diğer bir yaklaşımdır. Araştırmalarda önceden yapılan çalışmalarla elde edilen bilgilere göre iterasyon sayısının belirlenmesi söz konusu olabilmekte veya süreç içerisinde iterasyon sayısının dinamik olarak değişebilmesi yaklaşımlar kullanılmaktadır.

Tavlama benzetimi algoritmasının performansının arttırılmasına yönelik araştırmalar artarak devam etmektedir. Benzer algoritmalarla hibridizasyon, farklı kabul olasılıklarının kullanımı, farklı soğutma şemalarının kullanımı bu konudaki temel araştırma konularını oluşturmaktadır.

### 4.2.3. Tavlama Benzetimi ve Montaj Hattı Dengeleme Uygulamaları

Tavlama benzetimi kullanılarak çözüm aranabilecek kombinatoryal optimizasyon problem sınıfları arasında tesis tasarım ve yerleşim problemleri, ürün sıralama ve çizelgeleme problemleri gösterilebilir. Montaj hattı dengeleme problemlerinin çözümü için de tavlama benzetimi meta sezgiseli kullanılmaktadır. Tavlama benzetimi meta sezgiselinin montaj hatlarındaki ilk uygulamalarından olan Suresh ve Sahu (1994) çalışmasında stokastik montaj hattı dengeleme problemine çözüm aranmıştır. McMullen ve Frazier (1998) çalışmasında paralel istasyonların değerlendirilebildiği çok amaçlı stokastik montaj hattı dengeleme probleminin çözümünde tavlama benzetimi kullanılmıştır. U-tipi montaj hattı dengeleme problemleri ise Erel, Sabuncuoğlu ve Aksu (2001) çalışmasında ele alınmıştır. Düz ve u-tipi montaj hattı dengeleme problemlerinin çok amaçlı çözümüne yönelik geliştirilen tavlama benzetimi algoritması Baykasoglu (2006) çalışmasında gösterilmiştir. Önerilen yaklaşım uygun çözümlerin geliştirilmesinde görev atama kurallarının sıralamasını kullanarak düzgünlük indeksinin ve hat performansının maksimizasyonuna çalışmaktadır. Karma modelli u-tipi montaj hatlarının dengelenmesi ve sıralanması probleminin eş zamanlı çözümünde tavlama benzetimi yaklaşımının kullanılması Kara, Ozcan ve Peker (2007) çalışmasında gösterilmiştir. Özcan, Çerçioğlu, Gökçen vd. (2009) çalışmasında paralel karma modelli montaj hattı dengeleme ve sıralama probleminin tavlama benzetimi algoritması temelli bir yaklaşımla çözümü gösterilmiştir. Daha güncel bir çalışmada Cakir, Altiparmak ve Dengiz (2011) paralel istasyon durumunu ele almışlardır.

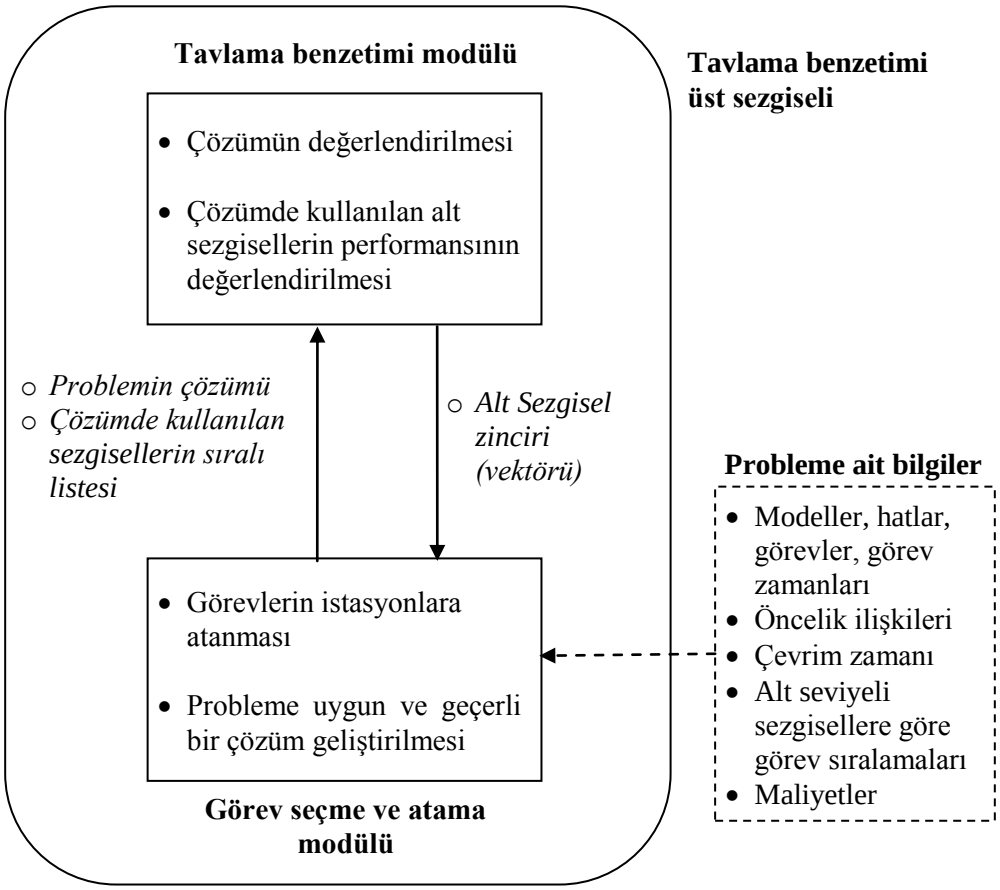
Bu çalışmalar yanında tavlama benzetiminin üst sezgisel yapı olarak kullanıldığı çok sayıda çalışma da mevcuttur. Bu çalışmalardan Bai ve Kendall (2005), Bai, Blazewiczx Burke vd. (2007), Dowsland, Soubeiga ve Burke (2007) araştırmaları temel örnekler olarak gösterilebilir.

### 4.3. Stokastik Paralel MHD Problemi için Tavlama Benzetimi Üst Sezgiseli

Stokastik paralel MHD probleminin çözümü için tavlama benzetimi temelli bir üst sezgisel çözüm yaklaşımı geliştirilmiştir. Problem içerdiği stokastik görev zamanları ve paralel yapıdaki montaj hatları ile NP-zor problem sınıfında yer almaktadır. Ayrıca kullanılan makine ve teçhizatın maliyetlerinin de dikkate alınması problemin çözüm uzayını büyüterek keşfedilmesini zorlaştırmaktadır.

Üst sezgisel yaklaşım problem konusundan bağımsız olarak problemin çözüm uzayından ziyade problemin çözümünde kullanılan sezgisellerin arama uzayında işlem gören üst seviyeli bir yaklaşımdır. Bu nedenle üst sezgisel yaklaşım; karmaşık bir çözüm uzayına sahip olan stokastik paralel MHD probleminin çözümünde özellikle etkili bulunmuştur. Geliştirilen üst sezgisel çözüm yaklaşımı farklı montaj hattı tasarım ve dengeleme problemlerine kolayca uygulanabilme esnekliğine sahiptir.

Geliştirilen tavlama benzetimi temelli üst sezgisel iki modülden oluşmaktadır (Şekil 4. 3). Birincisi, tavlama benzetimi meta sezgiseli prensiplerine göre çalışan, problemin çözümünde kullanılan alt seviyeli sezgiselleri yöneten, geliştirilen çözümü değerlendiren ve kullanılan alt seviyeli sezgisellerin performansını değerlendiren *tavlama benzetimi modülüdür*. İkinci modül ise probleme geçerli ve uygun bir çözüm üreten, görevlerin istasyonlara atamasını yapan, görevlerin seçiminde sıralama sezgisellerini alt seviyeli sezgiseller olarak kullanan *görev seçme ve atama modülüdür*.




Şekil 4. 3. Üst sezgisel yapı ve modülleri arasındaki etkileşim

Önerilen üst sezgisel yaklaşımda *tavlama benzetimi modülü* probleme özel bilgilere (alan bilgisi) ihtiyaç duymamakta sadece alt seviyeli sezgiseller ile ilgilenmektedir. Dolayısıyla diğer MHD problem türlerine veya başka problem alanlarına aynı üst sezgisel yapının uygulanabilmesi mümkündür.

### 4.3.1. Üst Sezgisel Çözüm Süreci ve Çalışma Mekanizması

Makine ve teçhizat maliyetli stokastik paralel MHD probleminin çözümü için geliştirilen üst sezgisel yaklaşımın özet çalışma mekanizması Şekil 4. 4'de gösterilmiştir. Geliştirilen üst sezgisel yaklaşım tavlama benzetimi esasına göre çalışmaktadır. Tavlama benzetimi mekanizması içerisinde görevlerin istasyonlara atamasını gerçekleştiren *görev seçme ve atama modülü*, montaj hattı dengeleme kapsamında iyi bilinen COMSOAL sezgiselinin bir türevidir. Geliştirilen çözümün performansı, amaç fonksiyonuna göre yine bu görev seçme ve atama modülünün içerisinde hesaplanmaktadır. Ancak eldeki mevcut çözümün ve geliştirilen komşu

çözümün performanslarının değerlendirilmesi tavlama benzetimi yapısı içerisinde yapılmaktadır.

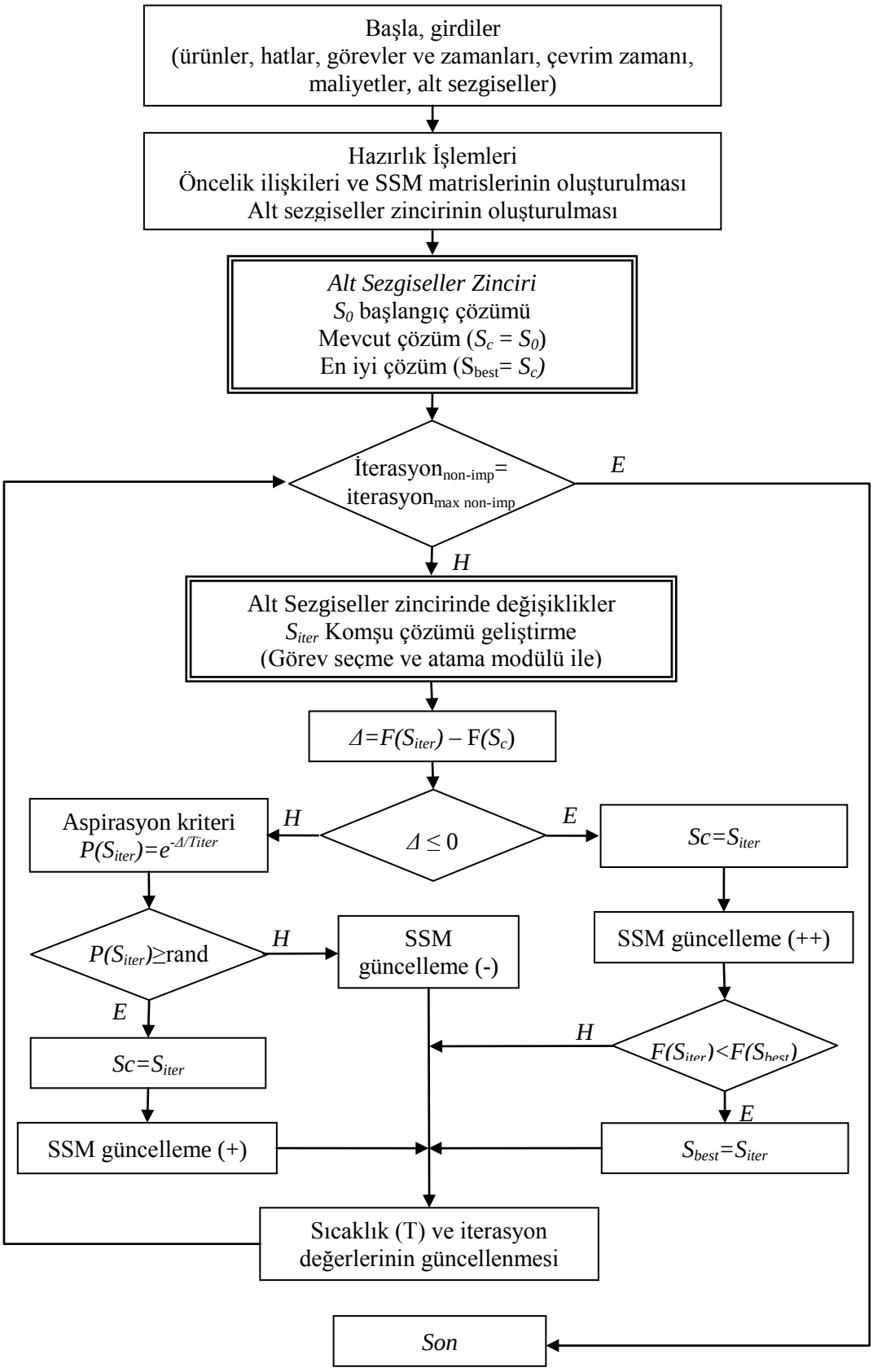
- Başlangıç ayarları ve parametreler
- Başlangıç çözümünde kullanılacak alt sezgiseller zincirinin oluşturulması
- Görev seçme ve atama modülü kullanılarak başlangıç çözümü üretilmesi
- While *gelişme olmayan iterasyon sayısı<maksimum gelişme olmayan iterasyon*
    - Alt sezgiseller zincirinde belirli sayıda alt sezgisel seçimlerin SSM ile değiştirilerek yeni komşu alt sezgiseller zincirinin oluşturulması
    - Görev seçme ve atama modülü ile komşu çözüm üretilmesi
    - Komşu çözümün kalitesinin değerlendirilmesi, eldeki çözümle farkı ($\Delta$) hesaplanması
    - If $\Delta <= 0$
        - Yeni komşu çözümün kabul edilmesi ve parametrelerin güncellenmesi,
        - Sezgiseller seçilebilirlik matrisinin güncellenmesi
        - Eldeki bilinen en iyi çözüm ile karşılaştırma ve güncelleme
    - ElseIf (kabul olasılığı>rastgele sayı)
        - Yeni komşu çözümün kabul edilmesi ve parametrelerin güncellenmesi
        - Sezgiseller seçilebilirlik matrisinin güncellenmesi
    - Else
        - Yeni komşu çözümün reddedilmesi ve parametrelerin güncellenmesi
        - Sezgiseller seçilebilirlik matrisinin güncellenmesi
    - End
    - Sıcaklık, iterasyon ve gelişme sağlanan/sağlanamayan iterasyon sayısı değerlerinin güncellenmesi
- End
- En iyi çözümün problemin çözümü olarak belirlenmesi

Şekil 4. 4. Geliştirilen üst sezgisel çözüm yaklaşımının özet çalışma mekanizması

Süreçte öncelikle sezgisellerin seçilebilirlik matrisi (SSM) üzerinden rulet tekerleği yöntemi ile bir *alt sezgiseller zinciri* belirlenmekte ve bu vektör *görev seçme ve atama modülünde* kullanılarak bir başlangıç çözümü geliştirilmektedir. Başlangıç çözümündeki sezgisel tercihleri belirleyen *alt sezgiseller zincirindeki* belirli sayıdaki alt sezgiseller yine SSM matrisi ve rulet tekerleği ile değiştirilerek bazı elemanları farklı komşu *alt sezgiseller zinciri* elde edilir. Daha sonra *görev seçme ve atama modülü* içerisinde komşu *alt sezgiseller zincirine* göre komşu çözüm üretilerek eldeki mevcut çözüm ile karşılaştırılmaktadır. Eğer yeni geliştirilen komşu çözüm eldeki mevcut

çözümden daha iyi bir amaç fonksiyonu değerine sahip ise direkt olarak yeni mevcut çözüm olarak kabul edilir ve parametreler güncellenir. Aksi takdirde aspirasyon kriterine başvurularak, kötü bir çözüm de olsa yeni mevcut çözüm olarak kabul edilip edilmeyeceğine karar verilir. Komşu çözüm aspirasyon kriteri gereği eldeki mevcut çözüm olarak kabul edilirse parametreler güncellenerek ana döngüye dönülür. Yeni geliştirilen komşu çözüm aspirasyon kriterine göre de kabul edilemez bir çözüm olarak değerlendirilirse, sezgisellerin seçilebilirlik matrisi negatif yönde güncellenerek ana döngüye dönülür. Ana döngü içerisinde sıcaklık, iterasyon ve gelişme sağlanamayan iterasyon sayısı parametreleri güncellenerek, döngü tekrar edilir. Durdurma kriteri sağlanıncaya kadar bu süreç tekrarlanarak probleme çözüm aranır.

Tez çalışması kapsamında geliştirilen üst sezgisel çözüm yaklaşımının akış şeması Şekil 4. 5'de gösterilmiştir. Tavlama benzetimi meta sezgiseli prensiplerine göre çalışan algoritmanın başlangıcında; ürünler, hatlar, görevler, görev zamanları, çevrim zamanı, maliyet bilgileri ve kullanılacak alt sezgisellere ait bilgiler algoritmaya aktarılmaktadır. İkinci aşamada eldeki bilgiler kullanılarak öncelik ilişkileri matrisi ve SSM oluşturulmaktadır. Ayrıca görevlerin alt seviyeli sezgisellere göre sıralamaları yapılarak kaydedilmektedir. Üçüncü aşamada SSM matrisinden rulet tekerleği yöntemiyle bir *alt sezgiseller zinciri* oluşturulur. *Görev seçme ve atama modülünde alt sezgiseller zinciri* ile bir *başlangıç çözümü* ($S_0$) oluşturularak *mevcut çözüm* ($S_c$) ve *en iyi çözüm* ($S_{best}$) olarak da tanımlanmaktadır. Daha sonra durdurma kriteri sağlanıncaya kadar tekrar edilecek iterasyon döngüsüne girilmektedir. *Alt sezgiseller zincirindeki* belirli sayıdaki sezgisel tercihler yine rulet tekerleği yöntemiyle SSM matrisinden değiştirilerek komşu *alt sezgiseller zinciri* elde edilir. Yeni *komşu çözüm* ($S_{iter}$) yine *görev seçme ve atama modülünde alt sezgiseller zinciri* ile geliştirilmektedir. Geliştirilen komşu çözüm ($S_{iter}$) ve eldeki mevcut çözümün ($S_c$) amaç fonksiyonları değerleri arasındaki fark $\Delta = F(S_{iter}) - F(S_c)$ olarak tanımlanır. $\Delta$ değerinin sıfırdan küçük olması (minimizasyon problemi), eldeki mevcut çözümünden ($S_c$) daha iyi bir çözüme ulaşıldığını gösterir ve bu çözüm yeni mevcut çözüm olarak kaydedilir. Aynı şekilde bilinen en iyi çözüm ($S_{best}$) ile karşılaştırılarak güncelleme işlemi yapılır. Başarılı bulunan bu çözümü oluşturan sezgisel seçimleri ödüllendirmek ve yeniden seçilebilirliğini arttırmak için sezgiseller seçilebilirlik matrisinde (SSM) ilgili sezgisellerin değerleri güçlü şekilde arttırılır.




Şekil 4. 5. Üst sezgisel akış şeması

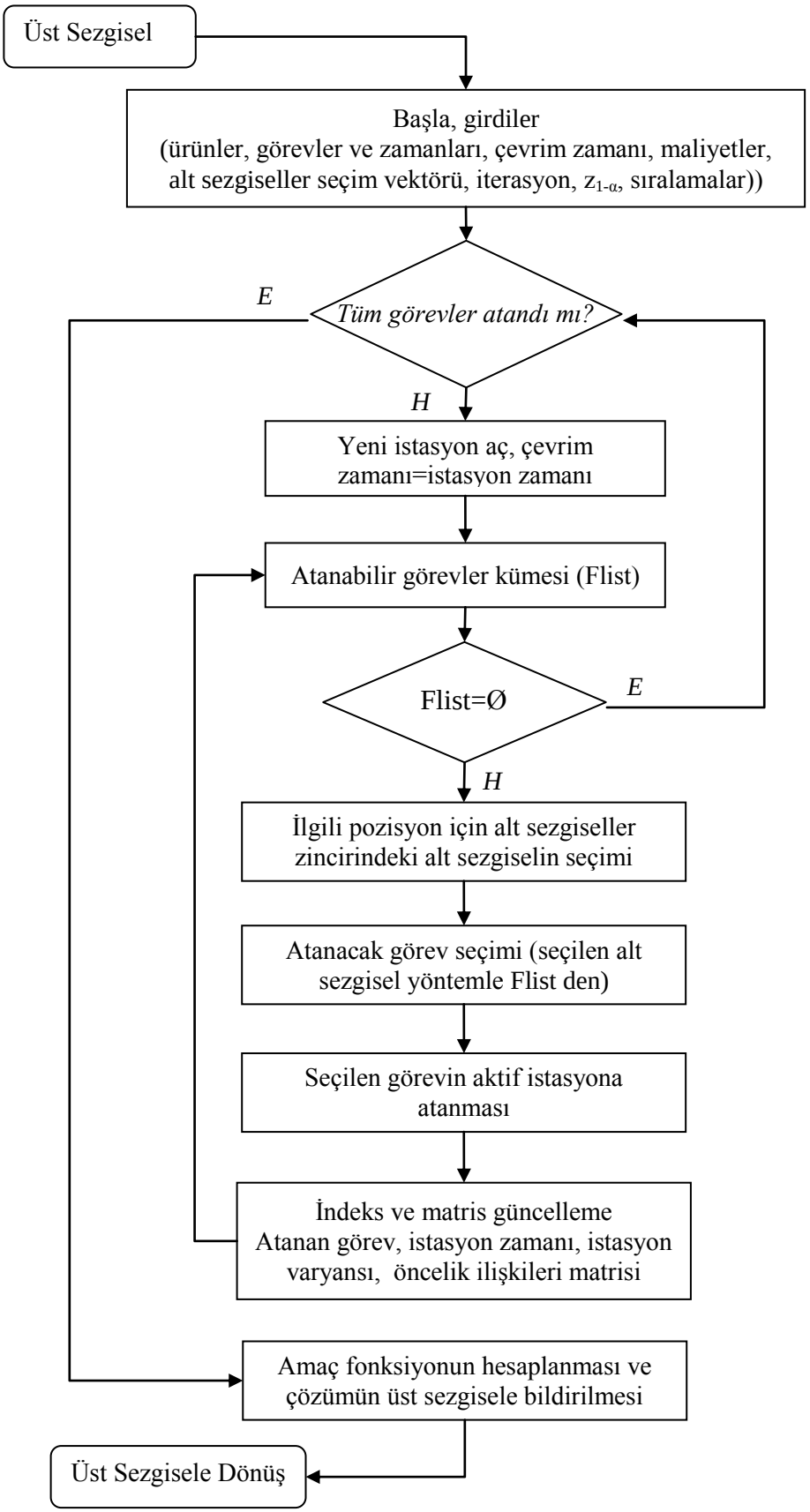
$\Delta$ değerinin sıfırdan büyük olması ise yeni geliştirilen çözümün ($S_{iter}$) eldeki mevcut çözümden ($S_c$) daha kötü bir çözüm olduğunu gösterir. Bu durumda tavlama benzetimi meta sezgiselinin aspirasyon kriteri devreye girer. Aspriasyon kriterine göre hesaplanan *prob*(F*(*$S_{iter}$*)*) olasılığı rastgele üretilen bir sayı ile karşılaştırılır. Bu karşılaştırma sonucu eğer rastgele üretilen sayı hesaplanan aspirasyon olasılığından küçük ise geliştirilen komşu çözüm ($S_{iter}$) daha kötü bir çözüm olmasına rağmen mevcut çözüm ($S_c$) olarak kabul edilir. Olasılıklı kabul durumunda sezgisel tercihlerin SSM değerleri düşük bir oranda da olsa pozitif yönde arttırılır. Ancak aspirasyon kriterine göre de olsa yeni çözümün ($S_{iter}$) kabul edilmemesi durumunda SSM değerleri azaltılarak, bu kötü çözümü veren alt sezgisel tercihlerin cezalandırılmış olması sağlanır. Durdurma kriteri olarak kullanılan en iyi çözümde gelişme sağlanamayan iterasyon sayısı, önceden belirlenen maksimum değerine ulaşıncaya kadar süreç tekrar edilerek optimum çözüme ulaşılmaya çalışılır.

Geliştirilen üst sezgisel yaklaşımda tavlama benzetimi algoritması içerisinde tekrarlı olarak çalışan ve probleme sezgisel olarak çözüm geliştiren, görevlerin istasyonlara atamasını *alt sezgiseller zincirine* göre yapan bir *görev seçme ve atama modülü* bulunmaktadır (Şekil 4. 6). Tavlama benzetimi algoritması içinde çalışan bu modülün en önemli özelliği, atanacak görevin belirlenmesinde alt seviyeli sezgisel kullanılarak alternatifler arasından seçim yapmasıdır. Ayrıca paralel iki montaj hattını birlikte değerlendirerek atanabilecek görevleri öncelik ilişkileri ve çevrim zamanına göre belirlemektedir. Görev seçme ve atama modülü her çalıştırıldığında geçerli ve uygun bir tam çözüm üretilmektedir. Atanabilecek aday görevler arasından *alt sezgiseller zinciri* ile seçim yapılarak ilgili istasyona atanacak görev belirlenmektedir. Eğer birden fazla atanabilecek görevin seçim kriteri (alt sezgisel) açısından farklılıkları yoksa adaylar arasından rastgele seçim yapılmaktadır. Başlangıçta oluşturulan *alt sezgiseller zinciri* her bir iterasyonda belirli bir oranda değiştirilerek çözüm sürecinde komşu çözümlere ulaşılmaya çalışılır. Bu değişim SSM'nin rulet tekerleği yöntemiyle değerlendirilmesiyle gerçekleştirilmektedir.

Tavlama benzetimi modülü ile görev seçme ve atama modüllerinin ortaklaşa kullandığı tek bilgi kaynağı *alt sezgiseller zinciridir*. Bu zincirin oluşturulmasında ise SSM anahtar rol oynayarak belirleyici olmaktadır. Geliştirilen yöntemin de en önemli bileşenlerinden

birisi olan SSM, atama pozisyonları için kullanılan alt seviyeli sezgisellerin başarılarının takip edildiği bir yapı olarak da değerlendirilebilir. İteratif süreç içerisinde başarılı pozisyon – alt sezgisel çiftlerinin değerleri yükselerek, ilgili pozisyon için en uygun alt sezgiseli işaret eder hale gelmektedir.

Görev seçme ve atama modülü, tavlama benzetimi üst sezgiseli döngüsü içerisinde çalışmakta fakat problemi çözmek için üst sezgiselden aldığı tek bilgi *alt sezgiseller zinciridir*. Çıktı olarak ise üretilen geçerli ve uygun çözüm ile birlikte çözümde görevlerin atamasını yapmada kullandığı alt seviyeli sezgisellerin sıralı listesini vermektedir. Görevlerin seçimi sürecinde öncelikle atanabilir görevler kümesi her iki paralel hat birlikte değerlendirilerek bulunmaktadır. Atanabilir görevlerin belirlenmesinde mevcut istasyon süresi ve istasyon zamanının çevrim zamanını aşmama olasılığının standart normal değeri ($z_{1-\alpha}$) oranında istasyon varyansı da dikkate alınarak belirlenmektedir. İstasyon zamanının görev zamanlarından küçük olduğu durumlarda yeni istasyon açılarak süreç sürdürülür. Tüm görevler atandığında amaç fonksiyonuna göre toplam maliyet hesaplanmakta ve çözüm olarak kullanılan sezgisellerin sıralı listesi ile birlikte üst sezgisele gönderilmektedir.




Şekil 4. 6. Görev seçme ve atama modülü akış şeması

Atanabilir görevler kümesinden görev seçmek için alt seviyeli sezgiseller olarak sıralama sezgiselleri kullanılmaktadır. Tez çalışmasında kullanılan alt seviyeli sezgiseller şunlardır:

- En kısa görev zamanı (EkGZ/SPT)
  $EkGZ = \max\{t_{jh}\}, h = 1 \dots H; j = 1 \dots J$ )
- En uzun görev zamanı (EuGZ/LPT)
  $EuGZ = \min\{t_{jh}\}, h = 1 \dots H; j = 1 \dots J$
- En küçük toplam ardıl görevlerin sayısı (EkTAGS/MiTNST)
  $EkTAGS = \min|F_{jh}|, \forall h \in H, j \in F_j$
- En büyük toplam ardıl görevlerin sayısı (EbTAGS/MaTNST)
  $EbTAGS = \max|F_{jh}|, \forall h \in H, j \in F_j$
- En büyük ardıl görevlerin toplam zamanı (EbAGTZ/MaTTST)
  $EbAGTZ = \max(t_{jh} + \sum_{i \in F_j} t_{ih})$ *h=1…H, j=1…J*
- En küçük ardıl görevlerin toplam zamanı (EkAGTZ/MiTTST)
  $EkAGTZ = \min(t_{jh} + \sum_{i \in F_j} t_{ih})$, *h=1…H, j=1…J*
- En büyük toplam öncül görevlerin sayısı (EbTÖGS/MaTNPT)
  $EbT\ddot{O}GS = \max|P_{jh}|, \forall h \in H, j \in P_j$
- En küçük toplam öncül görevlerin sayısı (EkTÖGS/MiTNPT)
  $EkT\ddot{O}GS = \min|P_{jh}|, \forall h \in H, j \in P_j$
- En büyük öncül görevlerin toplam zamanı (EbÖGTZ/MaTTPT)
  $Eb\ddot{O}GTZ = \max(t_{jh} + \sum_{i \in P_j} t_{ih})$, *h=1…H, j=1…J*
- En küçük öncül görevlerin toplam zamanı (EkÖGTZ/MiTTPT)
  $Ek\ddot{O}GTZ = \min(t_{jh} + \sum_{i \in P_j} t_{ih})$, *h=1…H, j=1…J*
- En büyük marjinal maliyet (EbMM – MaMC)
  $EbMM = \max\left\{\left(\phi_{jhk} \times r \times \left(t_{jh} + \sum_{j \in F^*_{jh}} t_{jh}\right) \times c\right); (L \times c)\right\}$ *h=1…H, j=1…J, k=1…K*

Yukarıdaki sıralama sezgiselleri literatürde çeşitli alanlardaki problemlerde (sıralama, çizelgeleme, MHD vs.) yoğun olarak kullanılan ve iyi bilinen seçim ve sıralama kurallarıdır. Sonuncu alt sezgisel olarak tanımlanan en büyük marjinal maliyet sezgiseli

(EbMM) görevlerin stokastik zamanlara sahip olması da dikkate alınarak Kottas ve Lau (1976; 1981) çalışmalarından uyarlanmıştır. Bu alt sezgisel aynı istasyona yeni eklenen görevin getireceği tamamlanmama maliyeti ile ilgili görevin sonraki istasyona atanması ile ortaya çıkacak işçilik maliyetlerini karşılaştırarak karar vermektedir.

### 4.3.2. Çözüm Gösterimi

MHD problemlerini konu alan meta sezgisel araştırmaların birçoğunda çözüm gösterimi standart kodlama ve sıralama kodlaması olmak üzere iki tipte yapılmaktadır. Standart kodlamada, atanan görevler ve görevlerin atandığı istasyon isimleri vektör olarak tanımlanmaktadır. Sıralama kodlamasında ise öncelik ilişkilerine uygun olarak görevlerin sıralaması vektör olarak verilmekte ancak istasyonlar görev sürelerinin ardışık olarak toplanmasıyla ayrıca belirlenmektedir. Geliştirilen üst sezgisel yaklaşımda çözüm kodlaması görevleri ve istasyonları açık olarak belirtecek şekilde matris olarak gösterilmiştir (Şekil 4. 7).

| Görev (*h*,*j*) | İstasyon (*k*) |
|---|---|
| 1,1 | 1 |
| 1,2 | 1 |
| 2,1 | 1 |
| 2,3 | 2 |
| 1,3 | 2 |
| … | … |

Şekil 4. 7. Çözüm gösterimi

Çözüm gösteriminde matris yapısı kullanılarak farklı ürünlerin görevlerinin daha net ayırt edilebilmesi sağlanmıştır. Ayrıca algoritma içerisinde ilave sütunlar kullanılarak görev ve istasyona bağlı maliyetlerin ve diğer hesaplamaların daha kolay ve net yapılması sağlanmıştır.

Görevlerin istasyonlara atanmasında kullanılacak alt sezgiseller başlangıçta bir vektör olarak SSM matrisinden rulet tekerleği yöntemine göre oluşturulmaktadır. Oluşturan bu *alt sezgiseller zincirinin* (Şekil 4. 8) belirli orandaki elemanları, her bir iterasyonda

güncellenmiş SSM matrisinden yine rulet tekerleği yöntemine göre seçilerek değiştirilmektedir. Böylece komşu çözümlere geçme imkânı sağlanmaktadır.

| Sıra 1 | Sıra 2 | Sıra 3 | … | Sıra *n-1* | Sıra *n* |
|---|---|---|---|---|---|
| Alt sezgisel 6 | Alt sezgisel 3 | Alt sezgisel 7 | Alt sezgisel x | Alt sezgisel 2 | Alt sezgisel 3 |

Şekil 4. 8. Sezgisel seçim vektörü (çözüm zinciri)

*Alt sezgiseller zincirinin* oluşturulmasında ve değiştirilmesinde kullanılan temel bileşen ise sezgisellerin seçilebilirlik matrisidir (SSM) (Şekil 4. 9). Görev ataması yapılacak her bir pozisyon için (toplam görev sayısı kadar pozisyon bulunacaktır) kullanılabilecek sezgisellerin gösterildiği *alt sezgiseller zinciri*, SSM matrisi skorlarından sağlanmakta ve çözüme göre güncellenerek kaydedilmektedir.

| | Pozisyon 1 | Pozisyon 2 | Pozisyon 3 | … | Pozisyon N |
|---|---|---|---|---|---|
| EkGZ | 10 | 18 | 10 | … | 16 |
| EuGZ | 15 | 14 | 10 | … | 12 |
| EkTAGS | 12 | 18 | 14 | … | 16 |
| EbTAGS | 16 | 9 | 8 | … | 46 |
| EbAGTZ | 24 | 5 | 6 | … | 24 |
| EkAGTZ | 36 | 5 | 2 | … | 18 |
| EbTÖGS | 4 | 5 | 24 | … | 18 |
| EkTÖGS | 2 | 10 | 14 | … | 42 |
| EbÖGTZ | 22 | 13 | 6 | … | 10 |
| EkÖGTZ | 9 | 36 | 10 | … | 36 |
| EbMM | 14 | 15 | 12 | … | 16 |

Şekil 4. 9. Alt seviyeli sezgisellerin seçilebilirlik matrisinin gösterimi

Başlangıçta birbirine eşit değerden oluşan SSM, iteratif süreç içerisinde kullanılan sezgisel tercihlerine ve çözümün başarısına veya başarısızlığına göre güncellendikçe değerler de birbirinden farklılaşmaktadır. SSM'deki değerler ilgili pozisyona yapılacak atamalarda, alt seviyeli sezgisellerin *alt sezgiseller zincirine* seçilebilme oranlarını göstermektedir. Örneğin, 2 numaralı pozisyona yapılacak bir atamada görev seçiminde kullanılacak alt sezgiselin belirlenmesinde 2 numaralı pozisyona ait sütun vektörü rulet tekerleği prensibine göre değerlendirileceğinden, diğerlerine göre nispeten yüksek skora

(36) sahip olan EkÖGTZ alt sezgiselinin seçilme ihtimali daha yüksek olacaktır. Bir çeşit öğrenme şablonu olarak da nitelendirilebilecek SSM, sürecin otomatikleştirilmesi için de temel araçlardan birisidir. Bai, Blazewicz, Burke vd. (2007) çalışmasında da tavlama benzetimi üst sezgiselinde ağırlıkların veya skorların gösterimi benzer şekilde yapılmış ve yine seçim tekniği olarak rulet tekerleği yöntemi kullanılmıştır.

Rulet tekerleği seçim tekniğinde ilgili pozisyon için alt sezgisellerin SSM değerleri vektör olarak alınarak rulet tekerleği çevrilmektedir. Her bir alt sezgiselin seçilebilirlik değeri toplam vektör değerine oranlanarak bütün içindeki payları hesaplanmaktadır (Şekil 4. 10). Üretilen rastgele sayı hangi aralığa düşüyorsa ilgili aralığın temsil ettiği alt sezgisel görev seçme işlemi için kullanılmak üzere belirlenmiş olur.

| | Poz. 1 | Pozisyon 2 | Poz. 3 | Kümülatif toplam | Oran |
|---|---|---|---|---|---|
| EkGZ | | 18 | | 18 | 18/148=0.122 |
| EuGZ | | 14 | | 32 | 0.216 |
| EkTAGS | | 18 | | 50 | 0.338 |
| EbTAGS | | 9 | | 59 | 0.399 |
| EbAGTZ | | 5 | | 64 | 0.432 |
| EkAGTZ | | 5 | | 69 | 0.466 |
| EbTÖGS | | 5 | | 74 | 0.5 |
| EkTÖGS | | 10 | | 84 | 0.568 |
| EbÖGTZ | | 13 | | 97 | 0.655 |
| EkÖGTZ | | 36 | | 133 | 0.899 |
| EbMM | | 15 | | 148 | 1 |

Şekil 4. 10. Rulet tekerleği seçiminde kullanılan vektör ve hesaplanan oranlar

MHD problemlerinin en önemli kısıtlarından olan öncelik ilişkilerinin gösteriminde yaygın olarak kullanılan matris gösterim yapısı kullanılmıştır. Bu gösterimde satır ve sütunlarda görevler yer almakta ve bir görevin ardılları, görevin bulunduğu satırdaki ardıl görevlere karşılık gelen hücrelere 1 değeri verilmesi ve kalan hücrelerin 0 (sıfır) değeri ile gösterilmesi yoluyla yapılmaktadır (Şekil 4. 11). Öncelik ilişkileri matrisi sadece hemen öncül veya hemen ardıl görevlerin değil, tüm ardıl veya öncül görevlerin bir arada gösterilebildiği bir matristir.

| (Hat,Görev) / (Hat,Görev) | 1,1 | 2,1 | … | 1,2 | 2,2 | … |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1,1 | 0 | 1 | … | 0 | 0 | 0 |
| 2,1 | 0 | 0 | … | 0 | 0 | 0 |
| … | 0 | 0 | … | 0 | 0 | 0 |
| 1,2 | 0 | 0 | … | 0 | 1 | … |
| 2,2 | 0 | 0 | … | 0 | 0 | … |
| … | 0 | 0 | … | 0 | 0 | … |

Şekil 4. 11. Öncelik ilişkileri matrisi

Önerilen çözüm yaklaşımında tavlama benzetimi algoritmasına ait parametreler yanında problemin özelliğinden kaynaklanan çeşitli parametreler de kullanılmaktadır. Ele alınan problemin stokastik özelliğinden dolayı görev zamanları normal dağılıma uygun olarak belirli bir standart sapmaya sahip ortalama değer olarak tanımlanmaktadır. Literatürdeki çalışmalarda standart sapma ortalamanın belirli bir oranı olarak veya ortalamanın belirli bir rastgele değişim katsayısına oranı olarak gösterilmektedir. Ayrıca maliyet temelli bir amaç fonksiyonu kullandığından, işçilik maliyeti (Amen, 2000b; 2006) amaç fonksiyonunun temel öğesi olmaktadır. Hesaplama kolaylığı ve diğer bazı parametrelerin işçilik maliyeti ile ilişkilendirilebilmesi sebebiyle literatürde genel olarak kullanıldığı gibi birim değer üzerinden değerlendirilmiştir. İşçilik maliyetinin birim olarak değerlendirilmesiyle problemin stokastik özelliğinden kaynaklanan görevlerin zamanında tamamlanamaması maliyeti de bu birim işçilik maliyetinin bir oranı olarak kullanılmaktadır (Kottas and Lau, 1981; Silverman and Carter, 1986; Erel, Sabuncuoglu, Sekerci, 2005).

Problemin stokastik olmasının bir etkisi olarak da istasyona atanacak görevlerin sürelerinin eşitlik (4.3)'de belirtildiği gibi ortalama süreler ile belirli bir olasılık değeri oranında standart sapmalarının toplamının çevrim zamanından küçük olması gerekir. Bu durumda 1-α ile gösterilen aşmama olasılığının değeri büyük önem kazanmaktadır. Örneğin %95'lik aşmama olasılığı ($z_{1-\alpha}$ =1.645) ilgili istasyona atanan görevlerin ortalama sürelerinin ve standart sapmalarının toplamının %95 ihtimal ile çevrim zamanını aşmayacağını göstermektedir.

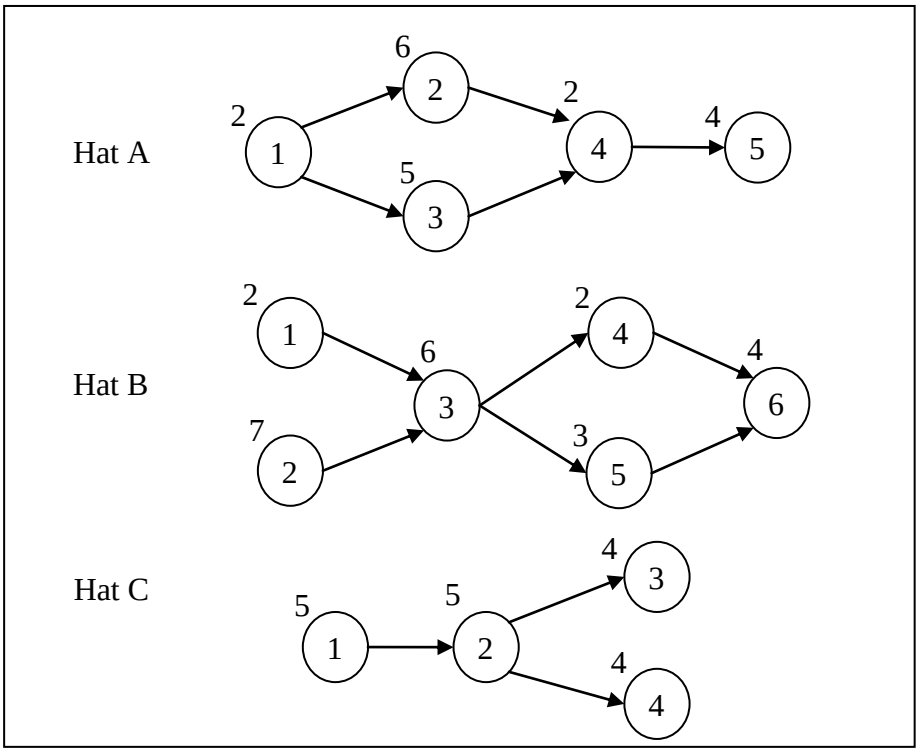
Ele alınan problemin önemli bir öğesi de makine ve teçhizat maliyetidir. Paralel istasyon durumunda olduğu gibi paralel MHD için de makine/teçhizat maliyetlerinin dikkate alınması anlamlı olacaktır. İstasyonların paralelleştirilmesi ile ortaya çıkacak iki katı makine/teçhizat maliyetleri, istasyonların paralel hatları kapsayacak şekilde kullanılmasıyla ortaya çıkacak makine/teçhizat sayılarından ve maliyetlerinden tasarruf etme imkânını ortaya çıkaracaktır. Dolayısıyla makine/teçhizat maliyetleri paralel MHD problemleri için değerlendirilmesi gereken bir maliyet unsuru olmaktadır. Bazı farklı görevlerin gerçekleştirilmesinde aynı makine ve teçhizat kullanılabileceği ve ayrıca bazı farklı makine ve teçhizatların aynı maliyete sahip olabileceği dikkate alınarak bu durum amaç fonksiyonuna maliyet olarak yansıtılmıştır.

Geliştirilen üst sezgisel çözüm yaklaşımında kullanılan parametreler ve bu parametrelerin değerlerinin tespitine yönelik detaylı açıklamalar ve deneysel çalışma 5. bölümde detaylı şekilde açıklanmıştır.

### 4.4. Önerilen Çözüm Yaklaşımının Örnek Problem Üzerinde Uygulanması

Önerilen üst sezgisel çözüm yaklaşımının daha iyi anlaşılması için aşağıdaki örnek paralel MHD problemi olarak gösterilen üç hatlı problemi ele alalım. Problemdeki modellerin sırasıyla A, B, C montaj hatlarında üretileceğini varsayalım. Modellerin öncelik ilişkileri Şekil 4. 12'de gösterilirken; görev zamanları ve varyansları, makine teçhizat türleri ve maliyetleri ise Tablo 4. 2'de gösterilmiştir.

Örnek problemi stokastik görev zamanlı paralel MHD problemi haline getirmek için literatürdeki çalışmalarda olduğu gibi deterministik olarak verilen görev zamanları, ortalama görev zamanı olarak kabul edilmiştir. Ayrıca görev zamanlarının varyanslarının da görev zamanının %15'i ($\sigma_j^2 = t_j \times 0.15$) oranında olduğu kabul edilmiştir. Görevlerin gerçekleştirilmesi için kullanılan makine ve teçhizat türünün ($Eq_j$) ve bunların maliyetlerinin ($EC_{Eq(j)}$) belirlenmesinde daha önceki açıklamalara göre yapılmıştır. Ayrıca istasyon zamanının çevrim zamanını aşmama olasılığı $1\text{-}\alpha=0.95$ ($z_{1-\alpha}=1.645$), birim işçilik maliyeti $L=1$ (birim maliyet), bir görevin tamamlanamaması durumunda katlanılacak tamamlamama maliyetinin işçilik maliyetinin %50 fazlası ($r=L \times 1.5$) olduğu varsayılmıştır. Çevrim zamanı ise $c=10$ olarak kabul edilmiştir.




Şekil 4. 12. Örnek problemdeki modellerin öncelik ilişkileri

Tavlama benzetimine ait parametrelerden başlangıç sıcaklığı $T_0$ değeri önceden yapılan bir dizi deneme çalıştırmasından elde edilen $\partial f_{\max}$ =20 ve başlangıçta çözümlerin %80'inin kabul edilmesini hedefleyen $X_0$ =0.80 değeri ile eşitlik (4.7)'a göre hesaplanmıştır. Soğutma oranı olarak ise eşitlik (4.8)'da verilen geometrik soğutma kuralında *SO*=0.90 olarak kullanılmıştır. En iyi çözümün 500 iterasyon boyunca değişmemesi durdurma kriteri olarak belirlenmiştir. Alt seviyeli sezgisellerin seçilebilirliklerinin takip edildiği SMM matrisinde başlangıçta tüm değerler 10'a eşitlenmiştir. Direkt olarak kabul edilen başarılı çözümler için alt sezgisellerin seçilebilirlik değerleri %9 oranında arttırılırken, aspirasyon kriterine göre kabul edilen çözümler için %2 iyileştirme oranı kullanılmıştır. Reddedilen kötü çözümler için ise %3 cezalandırma oranı kullanılmıştır.

Tablo 4. 2. Örnek probleme ait veriler

| | Hat A | | | | | Hat B | | | | | Hat C | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $t_i$ | $\sigma_i^2$ | $Eq_j$ | $EC_j$ | | $t_i$ | $\sigma_i^2$ | Eq | $Cost_{eq}$ | | $t_i$ | $\sigma_i^2$ | Eq | $Cost_{eq}$ |
| A1 | 2 | 0.30 | 3 | 1 | B1 | 2 | 0.30 | 2 | 4 | C1 | 5 | 0.75 | 2 | 4 |
| A2 | 6 | 0.90 | 2 | 4 | B2 | 7 | 1.05 | 3 | 1 | C2 | 5 | 0.75 | 5 | 1 |
| A3 | 5 | 0.75 | 1 | 3 | B3 | 6 | 0.90 | 1 | 3 | C3 | 4 | 0.60 | 1 | 3 |
| A4 | 2 | 0.30 | 4 | 2 | B4 | 2 | 0.30 | 4 | 2 | C4 | 4 | 0.60 | 4 | 2 |
| A5 | 4 | 0.60 | 3 | 1 | B5 | 3 | 0.45 | 5 | 1 | | | | | |
| | | | | | B6 | 4 | 0.60 | 3 | 1 | | | | | |

$\sigma_j^{2=}$ $t_i$ ×0.15; 1-α=0.95 ($z_{1-\alpha}$=1.645); $L$=1; $r$=$L$×1.5; $\partial f_{\max}$ =20; $X_0$ =0.80;

$$T_0 = -\frac{\partial f}{\ln(X_0)} = -\frac{20}{\ln(0.80)} \cong 90,\ SO=0.90$$

Önerilen üst sezgisel çözüm yaklaşımında iteratif çözüm sürecinin başlangıcında probleme ait yukarıda açıklanan bilgiler, değişkenler ve parametrelerin değerleri belirlenmektedir. Tavlama benzetimi döngüsüne girmeden önce SSM'den *alt sezgiseller zinciri* seçilerek başlangıç çözümü geliştirilmesinde kullanılmıştır. Tavlama benzetimi döngüsünün içerisinde de kullanılan *görev seçme ve atama modülü* ile geliştirilen başlangıç çözümü, eşit değerlere sahip SSM'den rulet tekerleğine göre seçilen *alt sezgiseller zincirine* göre seçildiğinden rastgele başlangıç çözümü niteliğindedir.

Bu örnek çözüm sürecinde, geliştirilen üst sezgisel çözüm yaklaşımının daha iyi anlaşılabilmesi ve amaç fonksiyonları değerlerindeki farkın daha net görülebilmesi için başlangıç çözümü olarak her bir hattın bağımsız olarak dengelendiği ve çevrim zamanı kısıtını sağlayan sıralı atama ile elde edilen $S_1$={A1,A2}; $S_2$={A3,A4}; $S_3$={A5}; $S_4$={B2} $S_5$={B1,B3}; $S_6$={B4,B5}; $S_7$={B6}; $S_8$={C1}; $S_9$={C2}; $S_{10}$={C3,C4} çözümünün elde edildiğini varsayalım. 10 istasyonlu bu çözüme ait istasyonlar, istasyonlardaki görevler, istasyon zamanları, tamamlanamama olasılıkları ve maliyet hesaplamaları Tablo 4. 3'de gösterilmiştir.

Tablo 4. 3'den de görüleceği üzere başlangıç çözümünde 10 adet istasyondan toplam 100 br işçilik (istasyon) maliyeti; 1.665 br tamamlamama maliyeti ve 33 br makine/teçhizat maliyeti ortaya çıkarak toplam maliyet TC=134.665 br olmaktadır. Bu çözümde istasyonların hiçbirinde aynı makine/teçhizatla operasyonu gerçekleştirilen görev bir araya gelmediğinden tasarruf sağlama imkânı olmadan, nispeten yüksek bir makine/teçhizat maliyeti ortaya çıkmıştır. Eğer problem deterministik olsaydı ve makine ve teçhizat maliyetleri dikkate alınmasaydı (paralel MHD problemi), toplam 8 istasyonlu çözümün toplam maliyeti (sadece işçilik maliyeti) 80 br olacaktı.

Tablo 4. 3. Örnek problem uygulaması için başlangıç çözümü maliyetleri

| İstasyon Atamaları | İstasyon Süreleri $T_k = \sum t_{jh} + z_{1-\alpha}\sqrt{\sum \sigma_{jh}^2}$ | $Ø_{hjk}$ tamamlanmama olasılığı | Tamamlanmama maliyeti $IC_{kj} = \left[\phi_{kj} \times r \times \left(t_{hj} + \sum_{j \in F_{hj}^*} t_{hj}\right)\right]$ | Makine / teçhizat türü ($Eq_{hj}$) | Makine / teçhizat maliyeti ($EC_{Eq(hj)}$) | İşçilik maliyeti SC=($c$x$L$x$K$) | Toplam maliyet TC=SC + IC + EC |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $S_1$={A1,A2} | $T_{S1}$= 9.802 | $Ø_{A1}$=0.000<br>$Ø_{A2}$=0.034 | $IC_{A1}$=0<br>$IC_{A2}$=0.612 | $Eq_{S1}$={3,2} | $EC_{S1}$=5 | $SC_{S1}$=10 | 15.612 |
| $S_2$={A3,A4} | $T_{S2}$=8.686 | $Ø_{A3}$=0.000<br>$Ø_{A4}$=0.002 | $IC_{A3}$=0<br>$IC_{A4}$=0.018 | $Eq_{S2}$={1,4} | $EC_{S2}$=5 | $SC_{S2}$=10 | 15.018 |
| $S_3$={A5} | $T_{S3}$=5.274 | $Ø_{A5}$=0.000 | $IC_{A5}$=0 | $Eq_{S3}$={3} | $EC_{S3}$=1 | $SC_{S3}$=10 | 11 |
| $S_4$={B2} | $T_{S4}$=8.686 | $Ø_{B2}$=0.002 | $IC_{B1}$=0.066 | $Eq_{S4}$={3} | $EC_{S4}$=1 | $SC_{S4}$=10 | 11.066 |
| $S_5$={B1,B3} | $T_{S5}$=9.802 | $Ø_{B1}$=0.000<br>$Ø_{B3}$=0.034 | $IC_{B1}$=0<br>$IC_{B3}$=0.765 | $Eq_{S5}$={2,1} | $EC_{S5}$=7 | $SC_{S5}$=10 | 17.765 |
| $S_6$={B4,B5} | $T_{S6}$=6.425 | $Ø_{B4}$=0.000<br>$Ø_{B5}$=0.000 | $IC_{B4}$=0<br>$IC_{B5}$=0 | $Eq_{S6}$={4,5} | $EC_{S6}$=3 | $SC_{S6}$=10 | 13 |
| $S_7$={B6} | $T_{s7}$=5.274 | $Ø_{B6}$=0.000 | $IC_{B6}$=0 | $Eq_{S7}$={3} | $EC_{S7}$=1 | $SC_{S7}$=10 | 11 |
| $S_8$={C1} | $T_{S8}$=6.425 | $Ø_{C1}$=0.000 | $IC_{C1}$=0 | $Eq_{C3}$={2} | $EC_{S8}$=4 | $SC_{S8}$=10 | 14 |
| $S_9$={C2} | $T_{S9}$=6.425 | $Ø_{C2}$=0.000 | $IC_{C2}$=0 | $Eq_{C3}$={5} | $EC_{S9}$=1 | $SC_{S9}$=10 | 11 |
| $S_{10}$={C3,C4} | $T_{S10}$=9.802 | $Ø_{C3}$=0.034 | $IC_{C3}$=0.204 | $Eq_{C3}$={1,4} | $EC_{S10}$=5 | $SC_{S10}$=10 | 15.204 |
| | | | | | | Toplam | 134.665 |

$T_{S1} = (2+6) + 1.645\sqrt{(0.30+0.90)} = 9.802 \leq c = 10$

$\theta_{A2} = \theta\left(\frac{10-2}{\sqrt{0.30}}\right) - \theta\left(\frac{10-(2+6)}{\sqrt{0.30+0.90}}\right) = \theta(14.606) - \theta(1.826) = 0.034$

$IC_{A2} = [0.034 \times 1.5 \times (6 + (2+4))] = 0.612$

$EC_{S1}$ =EC(EqA1)+EC(EqA2)= (1)+(4)=5

Başlangıç çözümü elde edildikten sonra tavlama benzetimi üst sezgiseli iterasyon döngüsüne başlanarak bir komşu çözüm üretilmektedir. Üretilecek komşu çözümde alt sezgiseller zincirinin {EuGZ; EuGZ; EkTAGS; EkGZ; EkÖGTZ; EkAGTZ; EbMM; EbTAGS; EkÖGTZ; EkTÖGS; EbÖGTZ; EuGZ; EbÖGTZ; EkGZ; EbTÖGS} olacak şekilde SSM'den üretildiğini varsayalım. Görev seçme ve atama modülü ile yapılan yeni çözüm geliştirme sürecinde modeller, görevler ve zamanları, çevrim zamanı, maliyetler, alt sezgiseller zinciri ve diğer parametre ve değişken bilgileri üst sezgiselden alınarak atama sürecine başlanır. Atama sürecinin adımları aşağıdaki gibidir:

i) Yeni bir istasyon açılır, istasyon zamanı=çevrim zamanı

ii) Atanabilir görevler kümesi ($F_{list}$) belirlenir. $F_{list}$ belirlenirken öncelik ilişkileri, istasyon zamanı ve görevlerin komşu hatlarda yer alıp almaması kriterleri dikkate alınır. $F_{list}$ =Ø ise şartları sağlayan uygun görev bulunmadığını gösterir. Bu durumda eğer tüm görevler atanmışsa süreç amaç fonksiyonun hesaplanması için (vi) adımına yönlendirilir. Aksi durumda yeni bir istasyon açılarak yeniden $F_{list}$ belirlenir. İlk atanacak görev herhangi bir hatta öncelik ilişkilerini sağlayan görevler arasından seçilebilecektir. Başlangıç adımı için aday görevler ={A1,B1,B2,C1}.

iii) $F_{list}$'den görev seçecek alt seviyeli sezgiselin belirlenmesi. İlgili pozisyon için (ilk görev atanacağı için birinci pozisyon) alt sezgiseller zincirinin birinci elemanı EuGZ – LPT alt sezgiseli, atanabilecek görevler arasından seçim yapmak için kullanılacaktır.

iv) Atanabilir görevler listesindeki aday görevler, EuGZ alt sezgiseline göre değerlendirilir. Aday görevlerden ($t_{A1}$=2; $t_{B1}$=2; $t_{B2}$=7; $t_{C1}$=5) işlem zamanı en büyük olan $t_{B2}$=7 görevi atama için seçilir. Birden fazla aynı koşulu sağlayan görevin olması durumunda aralarından rastgele seçim yapılarak atanacak görev belirlenmektedir.

v) Seçilen görev ilgili istasyona atanarak; istasyon zamanı, öncelik ilişkileri matrisi güncellenir. Atanabilir görevlerin belirleneceği (*ii*) adımına dönülür.

vi) Tüm görevler istasyonlara atandığında amaç fonksiyonu hesaplanarak elde edilen atamalar, kullanılan alt sezgiseller ve amaç fonksiyonu değeri üst sezgisele bildirilir.

Bu adımlara göre yapılan hesaplamalar ve işlemler Tablo 4. 4'de gösterilmektedir.

Tablo 4. 4. Birinci iterasyon görev seçme ve atama işlemleri

| İst. No | Alt sezgisel | Atanan Görev | Atanabilir görevler ($F_{list}$) Öncelik ilişkileri / hat komşuluğu / istasyon zamanı ≤c |
|---|---|---|---|
| 1 | | - | {A1} / Hat1 / (2)+1.645(0.30)$^{1/2}$=2.898 ≤ c=10 **(✓)** |
| | | | {B1} / Hat 2 / (2)+1.645(0.30)$^{1/2}$=2.898 ≤ c=10 **(✓)** |
| | | | {B2} / Hat 2 / (7)+1.645(1.05)$^{1/2}$=8.681 ≤ c=10 **(✓)** |
| | | | {C1} / Hat 3 / (5)+1.645(0.75)$^{1/2}$=6.420 ≤ c=10 **(✓)** |
| | EuGZ | B2 | {A1} / Hat1 / (7+2)+1.645(1.05+0.30)$^{1/2}$=10.906 ≤ c=10 **(x)** |
| | | | {B1} / Hat 2 / (7+2)+1.645(1.05+0.30)$^{1/2}$=10.906 ≤ c=10 **(x)** |
| | | | {C1} / Hat 3 / (7+5)+1.645(1.05+0.75)$^{1/2}$=14.200 ≤ c=10 **(x)** |
| 2 | | | {A1} / Hat1 / (2)+1.645(0.30)$^{1/2}$=2.898 ≤ c=10 **(✓)** |
| | | | {B1} / Hat 2 / (2)+1.645(0.30)$^{1/2}$=2.898 ≤ c=10 **(✓)** |
| | | | {C1} / Hat 3 / (5)+1.645(0.75)$^{1/2}$=6.420 ≤ c=10 **(✓)** |
| | EuGZ | C1 | {A1} / Hat1 **(x)** / (5+2)+1.645(0.75+0.30)$^{1/2}$=8.681 ≤ c=10 **(✓)** |
| | | | {B1} / Hat 2 / (5+2)+1.645(0.75+0.30)$^{1/2}$=8.681 ≤ c=10 **(✓)** |
| | | | {C2} / Hat 3 / (5+5)+1.645(0.75+0.75)$^{1/2}$=12.009 ≤ c=10 **(x)** |
| | EkTAGS | B1 | {A1} / Hat1 **(x)** / (7+2)+1.645(1.05+0.30)$^{1/2}$=10.906 ≤ c=10 **(x)** |
| | | | {B3} / Hat 2 / (7+6)+1.645(1.05+0.90)$^{1/2}$=15.290 ≤ c=10 **(x)** |
| | | | {C2} / Hat 3 / (7+5)+1.645(1.05+0.75)$^{1/2}$=14.200 ≤ c=10 **(x)** |
| 3 | | | {A1} / Hat1 / (2)+1.645(0.30)$^{1/2}$=2.898 ≤ c=10 **(✓)** |
| | | | {B3} / Hat 2 / (6)+1.645(0.90)$^{1/2}$=7.556 ≤ c=10 **(✓)** |
| | | | {C2} / Hat 3 / (5)+1.645(0.75)$^{1/2}$=6.420 ≤ c=10 **(✓)** |
| | EkGZ | A1 | {A2} / Hat1 / (2+6)+1.645(0.30+0.90)$^{1/2}$=9.797 ≤ c=10 **(✓)** |
| | | | {A3} / Hat1 / (2+5)+1.645(0.30+0.75)$^{1/2}$=8.681 ≤ c=10 **(✓)** |
| | | | {B3} / Hat 2 / (2+6)+1.645(0.30+0.90)$^{1/2}$=9.797 ≤ c=10 **(✓)** |
| | | | {C2} / Hat 3 **(x)**/ (2+5)+1.645(0.30+0.75)$^{1/2}$=8.681 ≤ c=10 **(✓)** |
| | EkÖGTZ | A3 | {A2} / Hat1 / (7+6)+1.645(1.05+0.90)$^{1/2}$=15.290 ≤ c=10 **(x)** |
| | | | {B3} / Hat 2 / (7+6)+1.645(1.05+0.90)$^{1/2}$=15.290 ≤ c=10 **(x)** |
| | | | {C2} / Hat 3 **(x)** / (7+5)+1.645(1.05+0.75)$^{1/2}$=14.200 ≤ c=10 **(x)** |
| 4 | | | {A2} / Hat1 / (6)+1.645(0.90)$^{1/2}$=7.556 ≤ c=10 **(✓)** |
| | | | {B3} / Hat 2 / (6)+1.645(0.90)$^{1/2}$=7.556 ≤ c=10 **(✓)** |
| | | | {C2} / Hat 3 / (5)+1.645(0.75)$^{1/2}$=6.420 ≤ c=10 **(✓)** |
| | EkAGTZ | A2 | {A4} / Hat1 / (6+2)+1.645(0.90+0.30)$^{1/2}$=9.797 ≤ c=10 **(✓)** |
| | | | {B3} / Hat 2 / (6+6)+1.645(0.90+0.90)$^{1/2}$=14.200 ≤ c=10 **(x)** |
| | | | {C2} / Hat 3 **(x)** / (6+5)+1.645(0.90+0.75)$^{1/2}$=13.107 ≤ c=10 **(x)** |
| | EbMM | A4 | {A5} / Hat1 / (8+4)+1.645(1.20+0.60)$^{1/2}$=14.200 ≤ c=10 **(x)** |
| | | | {B3} / Hat 2 / (8+6)+1.645(1.20+0.90)$^{1/2}$=16.377 ≤ c=10 **(x)** |
| | | | {C2} / Hat 3 **(x)** / (8+5)+1.645(1.20+0.75)$^{1/2}$=15.290 ≤ c=10 **(x)** |

Tablo 4.4. devamı

| | | | |
|---|---|---|---|
| 5 | | | {A5} / Hat1 / (4)+1.645(0.60)$^{1/2}$=5.270 ≤ c=10 **(✓)** |
| | | | {B3} / Hat 2 / (6)+1.645(0.90)$^{1/2}$=7.556 ≤ c=10 **(✓)** |
| | | | {C2} / Hat 3 / (5)+1.645(0.75)$^{1/2}$=6.420 ≤ c=10 **(✓)** |
| | EbTAGS | B3 | {A5} / Hat1 / (6+4)+1.645(0.90+0.60)$^{1/2}$=12.009 ≤ c=10 **(x)** |
| | | | {B4} / Hat 2 / (6+2)+1.645(0.90+0.30)$^{1/2}$=9.797 ≤ c=10 **(✓)** |
| | | | {B5} / Hat 2 / (6+3)+1.645(0.90+0.45)$^{1/2}$=10.906 ≤ c=10 **(x)** |
| | | | {C2} / Hat 3 / (6+5)+1.645(0.90+0.75)$^{1/2}$=13.107 ≤ c=10 **(x)** |
| | EkÖGTZ | B4 | {A5} / Hat1 / (8+4)+1.645(1.20+0.60)$^{1/2}$=14.200 ≤ c=10 **(x)** |
| | | | {B5} / Hat 2 / (8+3)+1.645(1.20+0.45)$^{1/2}$=13.107 ≤ c=10 **(x)** |
| | | | {C2} / Hat 3 / (8+5)+1.645(1.20+0.75)$^{1/2}$=15.290 ≤ c=10 **(x)** |
| 6 | | | {A5} / Hat1 / (4)+1.645(0.60)$^{1/2}$=5.270 ≤ c=10 **(✓)** |
| | | | {B5} / Hat 2 / (3)+1.645(0.45)$^{1/2}$=4.100 ≤ c=10 **(✓)** |
| | | | {C2} / Hat 3 / (5)+1.645(0.75)$^{1/2}$=6.420 ≤ c=10 **(✓)** |
| | EkTÖGS | C2 | {A5} / Hat1 / (5+4)+1.645(0.75+0.60)$^{1/2}$=10.906 ≤ c=10 **(x)** |
| | | | {B5} / Hat 2 / (5+3)+1.645(0.75+0.45)$^{1/2}$=9.797 ≤ c=10 **(✓)** |
| | | | {C3} / Hat 3 / (5+4)+1.645(0.75+0.60)$^{1/2}$=10.906 ≤ c=10 **(x)** |
| | | | {C4} / Hat 3 / (5+4)+1.645(0.75+0.60)$^{1/2}$=10.906 ≤ c=10 **(x)** |
| | EbÖGTZ | B5 | {A5} / Hat1 **(x)** / (8+4)+1.645(1.20+0.60)$^{1/2}$=14.200 ≤ c=10 **(x)** |
| | | | {B6} / Hat 2 / (8+4)+1.645(1.20+0.60)$^{1/2}$=14.200 ≤ c=10 **(x)** |
| | | | {C3} / Hat 3 / (8+4)+1.645(1.20+0.60)$^{1/2}$=14.200 ≤ c=10 **(x)** |
| | | | {C4} / Hat 3 / (8+4)+1.645(1.20+0.60)$^{1/2}$=14.200 ≤ c=10 **(x)** |
| 7 | | | {A5} / Hat1 / (4)+1.645(0.60)$^{1/2}$=5.270 ≤ c=10 **(✓)** |
| | | | {B6} / Hat 2 / (4)+1.645(0.60)$^{1/2}$=5.270 ≤ c=10 **(✓)** |
| | | | {C3} / Hat 3 / (4)+1.645(0.60)$^{1/2}$=5.270 ≤ c=10 **(✓)** |
| | | | {C4} / Hat 3 / (4)+1.645(0.60)$^{1/2}$=5.270 ≤ c=10 **(✓)** |
| | EuGZ +rastgele | A5 | {B6} / Hat 2 / (4+4)+1.645(0.60+0.60)$^{1/2}$=9.797 ≤ c=10 **(✓)** |
| | | | {C3} / Hat 3 **(x)** / (4+4)+1.645(0.60+0.60)$^{1/2}$=9.797 ≤ c=10 **(✓)** |
| | | | {C4} / Hat 3 **(x)** / (4+4)+1.645(0.60+0.60)$^{1/2}$=9.797 ≤ c=10 **(✓)** |
| | EbÖGTZ | B6 | {C3} / Hat 3 / (8+4)+1.645(1.20+0.60)$^{1/2}$=14.200 ≤ c=10 **(x)** |
| | | | {C4} / Hat 3 / (8+4)+1.645(1.20+0.60)$^{1/2}$=14.200 ≤ c=10 **(x)** |
| 8 | | | {C3} / Hat 3 / (4)+1.645(0.60)$^{1/2}$=5.270 ≤ c=10 **(✓)** |
| | | | {C4} / Hat 3 / (4)+1.645(0.60)$^{1/2}$=5.270 ≤ c=10 **(✓)** |
| | EkGZ | C3 | {C4} / Hat 2 / (4+4)+1.645(0.60+0.60)$^{1/2}$=9.797 ≤ c=10 **(✓)** |
| | EbTÖGS | C4 | - |

Kaynakların (operatörler, makine ve teçhizat) ortak kullanımı ile elde edilen yukarıdaki çözümde S1={B2}, S2={C1,B1}, S3={A1,A3}, S4={A2,A4}, S5={B3,B4}, S6={C2,B5}, S7={A5,B6}, S8={C3,C4} olmak üzere 8 istasyonlu bir çözüm elde edilmiştir. Bu çözümde S2, S6 ve S7 paralel istasyonlar olarak belirlenmiştir. Elde edilen çözümün toplam maliyeti TC=108.527 br olarak bulunmuştur (Tablo 4.5).

Tablo 4. 5. Komşu çözüm maliyetinin hesaplanması

| İstasyon Atamaları | İstasyon Süreleri $T_k = \sum t_{jh} + z_{1-\alpha}\sqrt{\sum \sigma_{jh}^2}$ | $Ø_{hjk}$ tamamlanmama olasılığı | Tamamlanmama maliyeti $IC_{kj} = \left[\phi_{kj} \times r \times \left(t_{hj} + \sum_{j \in F_{hj}^*} t_{hj}\right)\right]$ | Makine / teçhizat türü ($Eq_{hj}$) | Makine / teçhizat maliyeti ($EC_{Eq(hj)}$) | İstasyon maliyeti SC=($cxLxK$) | Toplam maliyet TC=SC + IC + EC |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| S1={B2} | $T_{S1}$= 8.686 | $Ø_{B2}$=0.002 | $IC_{B2}$=0.066 | $Eq_{S1}$={3} | $EC_{S1}$=1 | SC=10 | 11.066 |
| S2={C1,B1} | $T_{S2}$=8. 686 | $Ø_{C1}$=0.000<br>$Ø_{B1}$=0.002 | $IC_{C1}$=0<br>$IC_{B1}$=0.051 | $Eq_{S2}$={2,2} | $EC_{S2}$=4 | SC=10 | 14.051 |
| S3={A1,A3} | $T_{S3}$=9. 802 | $Ø_{A1}$=0.000<br>$Ø_{A3}$=0.002 | $IC_{A1}$=0<br>$IC_{A3}$=0.033 | $Eq_{S3}$={3,1} | $EC_{S3}$=4 | SC=10 | 14.033 |
| S4={A2,A4} | $T_{S4}$=9.802 | $Ø_{A2}$=0.000<br>$Ø_{A4}$=0.034 | $IC_{A2}$=0<br>$IC_{A4}$=0.306 | $Eq_{S4}$={2,4} | $EC_{S4}$=6 | SC=10 | 16.306 |
| S5={B3,B4} | $T_{S5}$=9.802 | $Ø_{B3}$=0.000<br>$Ø_{B4}$=0.034 | $IC_{B3}$=0<br>$IC_{B4}$=0.306 | $Eq_{S5}$={1,4} | $EC_{S5}$=5 | SC=10 | 15.306 |
| S6={C2,B5} | $T_{S6}$=9.802 | $Ø_{C2}$=0.000<br>$Ø_{B5}$=0.034 | $IC_{C2}$=0<br>$IC_{B5}$=0.357 | $Eq_{S6}$={5,5} | $EC_{S6}$=1 | SC=10 | 11.357 |
| S7={A5,B6} | $T_{S7}$=9.802 | $Ø_{A5}$=0.000<br>$Ø_{B6}$=0.034 | $IC_{A4}$=0<br>$IC_{A5}$=0.204 | $Eq_{S7}$={3,3} | $EC_{S7}$=1 | SC=10 | 11.204 |
| S8={C3,C4} | $T_{S8}$=9.802 | $Ø_{C3}$=0.000<br>$Ø_{C4}$=0.034 | $IC_{A4}$=0<br>$IC_{A5}$=0.204 | $Eq_{S8}$={1,4} | $EC_{S7}$=5 | SC=10 | 15.204 |
| | | | | | | | 108.527 |

Maliyet açısından önceki çözüme kıyasla yaklaşık %20 seviyesinde bir maliyet tasarruf sağlanmış olmaktadır. Üstelik 10 istasyonlu bir çözümden 8 istasyonlu bir çözüme ulaşılarak 2 istasyon azaltılmıştır. Ayrıca paralel kullanılan istasyonlardaki görevlerin gerçekleştirileceği makine/teçhizat türleri de aynı olduğu için bu istasyonlarda tek bir makine teçhizat ile her iki görev de gerçekleştirilmekte ve dolayısıyla ilgili makine/teçhizat maliyetinden %50 tasarruf edilmektedir. Maliyet tasarrufu, beklenen tamamlanamama maliyetleri açısından da gerçekleşmiştir. Önceki çözümün tamamlanamama maliyetleri toplamı 1.665 br iken, yeni çözümün tamamlanamama maliyeti 1.527 br seviyesinde (%8 maliyet tasarrufu) gerçekleşmiştir. İstasyon sayısı, tamamlanamama maliyeti ve makine/teçhizat maliyeti ölçütlerinin her üçünde de maliyet tasarrufu sağlanarak oldukça iyi bir çözüme ulaşılmıştır.

Tablo 4. 6. Güncellenmiş SSM Matrisi

| Alt sezgisel | Pozisyon (Görev atama sırası) | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
| EkGZ | 10 | 10 | 10 | **10.9** | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | **10.9** | 10 |
| EuGZ | **10.9** | **10.9** | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | **10.9** | 10 | 10 | 10 |
| EkTAGS | 10 | 10 | **10.9** | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| EbTAGS | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | **10.9** | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| EbAGTZ | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| EkAGTZ | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | **10.9** | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| EbTÖGS | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | **10.9** |
| EkTÖGS | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | **10.9** | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| EbÖGTZ | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | **10.9** | 10 | **10.9** | 10 | 10 |
| EkÖGTZ | 10 | 10 | 10 | 10 | **10.9** | 10 | 10 | 10 | **10.9** | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| EbMM | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | **10.9** | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |

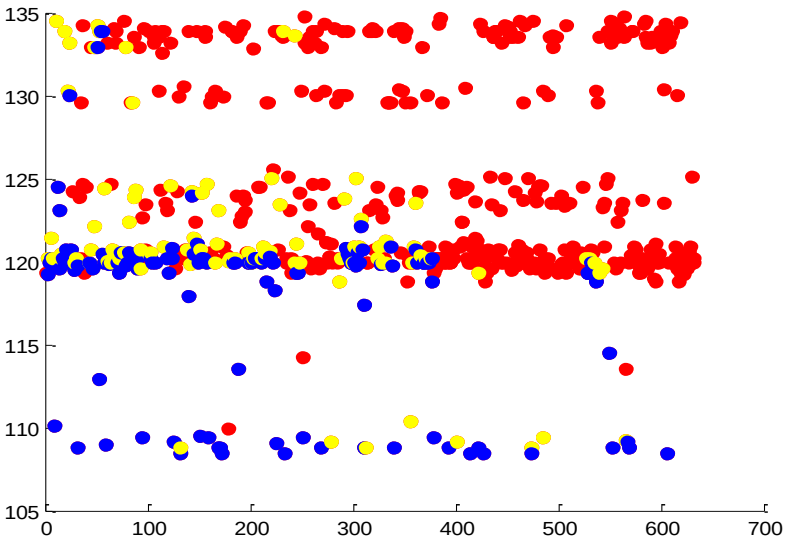
Daha iyi bir çözüme ulaşıldığından, ulaşılan yeni çözüm direkt olarak kabul edilmekte, aspirasyon kriterine başvurulmamaktadır. Bu çözüme ulaşırken kullandığımız alt seviyeli sezgisellerin pozisyon sıralı sıralaması; EuGZ, EuGZ, EkTAGS, EkGZ, EkÖGTZ, EkAGTZ, EbMM, EbTAGS, EkÖGTZ, EkTÖGS, EbÖGTZ, EuGZ, EbÖGTZ, EkGZ, EbTÖGS şeklinde olmuştur. Bu alt seviyeli sezgisellerin SSM matrisindeki değerleri, pozisyon sırasına ve alt seviyeli sezgisele göre pozitif yönlü

olarak %9 oranında iyileştirilerek, komşu çözüme geçilirken kullanılacak alt sezgiseller zincirine seçilme ihtimalleri arttırılmaktadır (Tablo 4. 6).

Yukarıda açıklanan süreç bir iterasyonun gerçekleştirilme adımlarıdır. Sonraki iterasyonda yani yeni bir komşu çözüme geçilirken öncelikle yapılacak işlem alt sezgiseller zincirinin bazı elemanlarının yenilenmesi işlemidir. Bunun için belirtilen orandaki (örnek problem için %50) alt sezgisel zinciri öğelerinden hangilerinin yeniden belirleneceği rastgele olarak tespit edilmektedir. Belirlenen pozisyonlar için kullanılacak yeni alt sezgiseller SSM'den rulet tekerleği yöntemine göre yeniden belirlenerek yeni bir komşu alt sezgiseller zinciri elde edilmiş olur. Elde edilen alt sezgiseller zincirine göre *görev seçme ve atama modülü* ile yeni bir komşu çözüm üretilir. Üretilen yeni komşu çözüm üst sezgisel tarafından değerlendirilerek yeni bir iterasyona başlanır. Süreç bu şekilde durdurma kriteri sağlanıncaya kadar tekrar edilir. Örnek problem olması sebebiyle, sürecin açıklandığı çözüm adımında geliştirilen çözüm, minimum maliyetli bilinen en iyi çözümlerden bir tanesidir.

Tavlama benzetimi üst sezgiseli ile örnek problem için geliştirilen çözümlerin iterasyonlara göre amaç fonksiyonu değerleri Şekil 4. 13'de gösterilmiştir. Burada mavi renkli noktalar direkt olarak kabul edilen iyi komşu çözümleri, sarı renkli noktalar aspirasyon kriterine göre kabul edilen komşu çözümleri ve kırmızı renkli noktalar ise reddedilen komşu çözümleri göstermektedir. Tavlama benzetimi yaklaşımının karakteristiği olan, amaç fonksiyonunda iterasyonlar boyunca düzenli bir azalma eğilimi ve bulunan iyi çözüm değerleri etrafında yoğunlaşma şekilde açık bir şekilde görülmektedir.

Bilgisayarda çalıştırılan tavlama benzetimi üst sezgiseli, en iyi çözüm olarak S1={C1,B1}, S2={A1,A3}, S3={B2}, S4={B3,B4}, S5={A2,A4}, S6={C2,B5}, S7={C3,C4}, S8={B6,A5} çözümünü bulunmuştur. Örnek iterasyon adımında bulunan çözüm ile aynı amaç fonksiyonu değerine sahip olan bu çözüm, en iyi çözümlerden biridir.




Şekil 4. 13. İterasyonlar boyunca amaç fonksiyonunun değişimi

Yukarıdaki örnek problem çözümü ve açıklamalar ışığında, önerilen tavlama benzetimi üst sezgiselinin, birden çok sayıda hatta sahip stokastik görev zamanlı paralel montaj hattı dengeleme problemlerini, makine/teçhizat maliyetleri de dikkate alınarak çözebilme yeteneğine sahip olduğu görülmektedir.

### 4.5. Önerilen Yaklaşımın Literatürdeki Yeri

Bu tez çalışması kapsamında önerilen çözüm yaklaşımında; tavlama benzetimi üst sezgiseli bir dizi sıralama sezgiselinden oluşan alt seviyeli sezgiseller uzayında arama yapmaktadır. Bu durum var olan sezgisellerin (alt seviyeli sezgisel) atama pozisyonları için uygun sırasının araştırılması yani sezgiseller uzayında arama yapılması anlamına gelmektedir. Dolayısıyla probleme çözüm üretecek yeni bir sezgisel oluşturulmasından ziyade ilgili görev seçme sıraları için kullanılacak sezgisellerin seçilmesi (sırasının belirlenmesi) işlemidir. Böylece önerilen yaklaşım, üst sezgisellerin birinci sınıflandırma aşaması olan sezgisel arama uzayının doğası/yapısına göre yapılacak sınıflandırmada sezgisel geliştirme değil sezgisel seçim yaklaşımları sınıfına ait olduğu görülür.

Önerilen çözüm yaklaşımında, görevlerin istasyonlara atanması süreci adım adım ilerleyerek bütün bir çözüm oluşturulmaktadır. Çözüm sürecinde atanacak görevin seçiminde bir sezgisel seçilmekte (rulet tekerleği yöntemine göre) ve o sezgisel

problemin ilgili aşamasında uygulanarak atanacak görev belirlenmektedir. Ayrıca seçilen sezgiselin sonucu (her bir atama pozisyonunda kullanılan sezgisellerin sonuçları) takip edilerek, bütün bir çözüm elde edildikten sonra değerlendirilmektedir. Sürecin bu özellikleri itibariyle, üst sezgisellerin sınıflandırılmasında ikinci aşama olarak geliştirilen üst sezgiselin yapılandırmalı sezgisellerin özelliklerini taşıdığı söylenebilir.

Üst sezgisel yaklaşımlarla ilgili 2000 öncesi yapılan çalışmalarda olduğu gibi sıralama sezgisellerinin seçimi veya kuralların sırasının belirlenmesi, önerilen yaklaşımın da dahil edilebileceği otomatik sezgisel sıralama ile bağdaştırılmıştır. Bu yaklaşımlar için temel motivasyon ise sezgisellerin birleştirilmesinin tek başlarına kullanımlarından daha iyi sonuçlar ürettiğidir (Fisher and Thompson, 1961; 1963; Crowston, Glover, Thompson et al., 1963). Bu tez çalışmasında önerilen çözüm yaklaşımında olduğu gibi Fang, Ross ve Corne (1993; 1994) ile Norenkov ve Goodman (1997) çalışmalarında da sezgisellerin uygun bir sıralamasını bulmak için sezgiseller uzayında arama yapan üst seviyeli sistemler kullanılmıştır. Probleme ait bilgiden bağımsız olarak, alan bilgisi içermeyen bu üst seviyeli stratejide, genetik algoritmalar (Fang, Ross, Corne, 1993; 1994; Hart, Ross, Nelson, 1998; Vazquez-Rodriguez and Petrovic, 2010), tavlama benzetimi (Xu and Qu, 2010; Li and Landa-Silva, 2011; Bai, Blazewicz, Burke et al. 2012), yapay sinir ağları (Li, Burke, Qu, 2010), bal arısı optimizasyonu (Sabar, Ayob, Kendall et al. 2012) gibi çok çeşitli stratejiler kullanılabilmektedir.

Üst sezgisel yaklaşımda, geliştirilen çözüm yöntemlerinin sadece tek bir arama stratejisini esas alarak sınıflandırılmadığı, tersine hibrid yaklaşımların, ortaklaşa kullanılabilen arama stratejilerinin hem daha başarılı olabildiği hem de yeni bakış açıları sağladığı görülmektedir. Dolayısıyla tez çalışması kapsamında önerilen tavlama benzetimi üst sezgiselinin yapılandırmalı sezgisel seçim yaklaşımları sınıfıyla kısıtlamak da doğru olmayacaktır. Nitekim Cowling, Kendall ve Soubeiga (2000), Nareyek (2003), Burke, Kendall ve Soubeiga (2003), Dowsland, Soubeiga ve Burke (2007) ile Pisinger ve Ropke (2007) çalışmalarında tıpkı bu tez çalışmasında olduğu gibi skor temelli bir sezgisel seçim yaklaşımı, rulet tekerleği mekanizması ile kullanılarak pertürbatif sezgisel seçimi gerçekleştirilmiştir. Sezgisel seçiminde bir tür seçilebilirlik ağırlıkları (skor) kullanılması ve bu skorların çözüm kalitesine göre

güncellemesi sezgiseller sıralama uzayında küçük ve yavaş değişiklikler ile pertürbatif arama yapılmasını sağlamaktadır.

Sezgisellerin sıralamasına ait skor değerlerinin güncellemesi esasında bir tür öğrenmeyi işaret etmektedir. Başarılı sezgisellerin tekrar seçilebilirliğinin arttırılması için skor değerlerinin yükseltilmesi ve aksi durumda skor değerlerinin azaltılması aktif öğrenme stratejisinin bir örneğidir. Dolayısıyla tez çalışmasında geliştirilen tavlama benzetimi üst sezgiselinin, aktif öğrenme özellikli sezgisel seçim yaklaşımları sınıfında ve hem yapılandırmalı hem de pertürbatif sezgisel seçim stratejilerine sahip bir çözüm yaklaşımı olduğu söylenebilir.

# V. BÖLÜM:
# PARAMETRE DEĞERLERİNİN TESPİTİNE YÖNELİK DENEYSEL ÇALIŞMA VE ÇÖZÜM SONUÇLARI

Bu bölümde önerilen çözüm yaklaşımının kullandığı parametreler ve bu parametrelerin değerlerinin çözüm süreci üzerindeki etkileri incelenmiştir. Ayrıca önerilen üst sezgisel çözüm yaklaşımı, elde edilen etkili faktörler ve parametre değerleri ile literatürden seçilen test problemleri üzerinde çalıştırılarak sonuçları rapor edilmiştir. Tez çalışması kapsamında geliştirilen çözüm yaklaşımının değerlendirilmesi de yine bu bölümde açıklanmıştır.

## 5.1. Parametreler ve Değerleri

Bu tez çalışmasında paralel MHD problemlerinin çözümü için tavlama benzetimi üst sezgiseli kullanılmıştır. Önerilen çözüm yaklaşımının değerlendirilmesi ve test edilmesi için literatürdeki test problemlerinden faydalanılmıştır. Test problemlerinden küçük (11+10 görevli Jackson problemi), orta (53+51 görevli Hahn problemi) ve büyük (111+107 görevli Arc2 problemi) boyutlu olmak üzere 3 örnek seçilerek deneysel çalışmada kullanılmıştır. Görev zamanları ve öncelik ilişkilerini belirleyen test problemlerine www.assembly-line-balancing.de adresinden ulaşılabilmektedir. Parametre değerlerinin belirlenmesine yönelik yapılan deneylerde çevrim zamanı olarak literatürde ilgili problem için kullanılan en küçük çevrim zamanı değeri; standart sapma oranı olarak rassal (uniform (0, 0.6)) değişim katsayısı ve istasyon zamanını aşmama olasılığı olarak %90 değerleri kullanılmıştır.

Önerilen çözüm süreci içinde problemden kaynaklanan ve çözüm yönteminden kaynaklanan çeşitli parametreler kullanılmaktadır. Kullanılan bu parametreler problemin doğasından/yapısından kaynaklanan parametreler ve çözüm yönteminin doğasından/yapısından kaynaklanan parametreler olmak üzere iki başlıkta incelenmiştir.

- Problemin doğasından/yapısından kaynaklanan parametreler
    - Çevrim zamanı (c)
    - Değişim katsayısı oranı (cv)
    - Çevrim zamanını aşmama olasılığı (1-α)
    - İşçilik birim maliyeti (L)
    - Görevlerin birim tamamlanmama maliyeti (r)
    - Makine/teçhizat maliyeti ($EC_{Eq(j)}$)
- Çözüm yönteminin doğasından/yapısından kaynaklanan parametreler
    - Soğuma oranı (SO)
    - Bir sıcaklık değerindeki iterasyon sayısı (Markov zinciri uzunluğu - MZC)
    - Amaç fonksiyonunda gelişme olmayan iterasyon sayısı (GİS)
    - Çözüm zincirindeki öğelerin değiştirilme oranı (çaprazlama oranı – ÇO)
    - Alt sezgisel tercihlerin ödüllendirilme/cezalandırılma oranı (SSM matrisi güncelleme)

Problem yapısından kaynaklanan parametreler ele alınan MHD problem türüne göre çeşitlilik gösterebilmektedir. Benzer şekilde çözüm yönteminden kaynaklanan parametreler de daha çok çözüm yönteminde kullanılan tavlama benzetimi algoritmasına dayanan parametrelerdir.

### 5.1.1. Problemin Doğasından/Yapısından Kaynaklanan Parametreler ve Değerleri

Genel anlamda montaj hattı dengeleme problemleri, problemin doğasından ve varsayımlarından kaynaklanan çeşitli parametrelere sahip kombinatoryel optimizasyon problemleridir.

Bu parametrelerin başında çevrim zamanı (BMHDP-1 problem türü için) gelmektedir. Probleme geliştirilecek çözümler çevrim zamanına bağlı olup, çevrim zamanının farklı değerleri için farklı çözümler elde edilmektedir. Dolayısıyla çevrim zamanının tek bir parametre değeri olarak ele alınıp ilgili problem örneğini temsil etmesi yerine problemin farklı çevrim zamanları ile çözülerek değerlendirilmesi anlamlı olmaktadır.

Görev zamanlarının değişkenliğinden kaynaklanan stokastik görev zamanlı MHD problemi söz konusu olduğunda ise, görev zamanlarındaki değişkenlikten kaynaklanan sapmanın ölçüsü olarak görev zamanının standart sapması da önemli bir parametre olmaktadır. Literatürdeki çalışmalarda genellikle çevrim zamanının belirli bir oranı (Kottas and Lau, 1981; Silverman and Carter, 1986; Cakir, Altiparmak, Dengiz, 2011) veya görev zamanının belirli bir aralıkta üretilecek rastgele sayı ile çarpımından elde edilecek değerlerle (Sarin; Erel, Dar-El, 1999; Bukchin and Tzur, 2000) gösterilmiştir. Bu çalışmada da belirli bir aralıkta rastgele üretilen bir sayı (*cv* değişim katsayısı) ile görev zamanının çarpımını esas alan, Çerçioğlu (2009) çalışmasında kullanılan aynı yaklaşım benimsenmiştir (eşitlik 5.1)

$$\mu \times cv = \sigma \tag{5.1}$$

Burada değişim katsayısı (*cv*) rastgele üretilmekte olup düşük, rassal ve yüksek olmak üzere 3 kategori belirlenmiştir.

- Düşük değişim katsayısı=$cv_d$=uniform (0, 0.3)
- Rassal değişim katsayısı=$cv_r$=uniform (0, 0.6)
- Yüksek değişim katsayısı=$cv_y$=uniform (0.3, 0.6)

Stokastik problemi deterministik yaklaşımla çözme imkanı sağlayan; istasyona atanan görevlerin sürelerinin toplamının çevrim zamanını aşmamasını belirli olasılık seviyesinde garantileyen, çevrim zamanını aşmama olasılığının ($1-\alpha$) standart normal değeri ($z_{1-\alpha}$) önemli bir parametre olarak ortaya çıkmaktadır. Literatürdeki çalışmalarda %95 ($z_{1-\alpha}$ =1.645) ve %90 ($z_{1-\alpha}=1.282$) çevrim zamanını aşmama olasılıkları kullanılmakta olup bunlara ilave olarak %85 aşmama olasılığı da ($z_{1-\alpha}=1.036$) Çerçioğlu (2009) çalışmasında kullanılmıştır. Bu çalışmada da aynı değerlerdeki çevrim zamanını aşmama olasılıkları temel alınmıştır.

Bu çalışmada kullanılan amaç fonksiyonu maliyet temelli bir amaç fonksiyonu (4.6) olduğundan, *işçilik (L)* ve *tamamlanmama maliyeti (r)* değerlerini belirleyen parametreler söz konusudur. Hemen hemen tüm araştırmalarda olduğu gibi işçilik maliyetleri birim maliyet ($L$=1 birim) olarak kullanılmış ve tamamlanmama maliyeti de işçilik maliyetinin %50 oranında fazlası ($r$=1.5) olarak kabul edilmiştir. Bu

varsayımlarda da yine çevrim zamanında olduğu gibi farklı işçilik ve tamamlanmama maliyetleri için farklı sonuçlar elde edilebilmektedir.

Yukarıdaki parametrelere dair bilgiler zengin MHD literatürü içerisinde kolaylıkla bulunabilmektedir. Makine ve teçhizat türleri ve maliyetleri ise biraz daha incelenmesi gereken bir konudur. Kullanılan makine ve teçhizata yönelik maliyetler, literatürde daha çok paralel istasyonlu MHD problemleri veya alternatifli makine/teçhizat durumunu inceleyen MHD problemleri kapsamında incelenmektedir. Bu konuda detaylı açıklamalar 4.1.2 başlığında bulunmaktadır.

Makine/teçhizat maliyetlerinin belirlenmesinin ilk aşaması her bir görev için o görevi gerçekleştirebilecek makine/teçhizat türünün belirlenmesidir. Makine ve teçhizat türleri literatürdeki Ege, Azizoglu ve Ozdemirel (2009) ile Cakir, Altiparmak ve Dengiz (2011) çalışmalarına benzer şekilde belirlenmiştir. Bu prosedürde [1, Toplam görev sayısı ($n$)] aralığında uniform dağılıma göre bir $d$ makine/teçhizat türü sayısı ($d>n/2$) üst değeri belirlenmiş, sonra her bir görev için [1,$d$] aralığında rastgele eşit olasılıkla makine/teçhizat türleri belirlenmiştir. Böylece her bir görev için ilgili görevin gerçekleştirileceği bir makine/teçhizat türü belirlenmiş olmaktadır. Farklı bazı görevlerin aynı makine/teçhizat ile gerçekleştirilebileceği kabulü de mümkün olabilmiştir. İkinci aşama ise her bir makine/teçhizat türü için bir maliyet değeri belirlenmesidir. Burada, standart işçilik maliyetinin belirlenmesinde kullanılan "bir istasyondaki görevlerden en zor olanının gerçekleştirilmesi için gerekli olan işçilik niteliği/maliyetinden en büyük olanı tüm görevler için kullanılır" ilkesine benzer ve uygun olarak; aynı makine/teçhizat türü ile gerçekleştirilen görevlerden büyük olanın görev zamanı, ilgili makine/teçhizat türü maliyetinin belirlenmesinde gösterge değer olarak alınmıştır. Görev zamanı büyük olan görevlerin daha zor ve daha çok maliyet gerektirdiği düşünülerek, her bir makine/teçhizat türü için daha anlamlı bir maliyet değerine ulaşılma imkanı sağlanmıştır. [$1,max(t_j)$] aralığında eşit olasılıklı rastgele değer üretilerek her bir makine/teçhizat türü için maliyet belirlenmiş olmaktadır. Maliyet belirlenmesinde görev zamanının gösterge ve üst sınır olarak kullanılması, hem her bir görevin zorluk düzeyinin maliyete yansıtılmasını sağlamış hem de işçilik ve tamamlanmama maliyet birim değerleriyle kıyaslanabilir uygun bir değer üretilmesini sağlamıştır. Bu çalışma kapsamında kullanılan literatürdeki paralel MHD test

problemlerinin hepsi 2 hatlı problemler olduğundan ve ikinci hatta ait bilgiler birinci hattan üretildiğinden, makine teçhizat türlerinin sayısı ilgili problemin birinci hattına ait bilgiler esas alınarak geliştirilmiş ve ikinci hatta da aynen uygulanmıştır.

Yukarıda açıklanan çevrim zamanı, değişim katsayısı oranı, çevrim zamanını aşmama olasılığı, işçilik maliyeti, tamamlanmama maliyeti ve makine/teçhizat maliyeti parametrelerinin her birinin değerindeki bir değişikliğin yeni ve başka bir problemi ve çözüm uzayını işaret edeceği unutulmamalıdır. Dolayısıyla bu parametreler ve değerleri için tek bir uygun değer kullanmak yerine bu parametrelerin her birinin değerleri için ortaya çıkacak farklı problemlerin ayrı ayrı değerlendirilmesi daha anlamlı olacaktır. İşçilik maliyeti, tamamlanmama maliyeti ve makine/teçhizat maliyetleri değerleri problemler için bir kere belirlenmiş ve diğer tüm örnekler için sabit alınmıştır. Bu parametrelerin değerleri gerçek dünya uygulamalarına olabildiğince yakın değerler olarak belirlenmiş ve farklı değerlerin farklı problemlere işaret edeceğinden hareketle herhangi bir değerler kümesinin değerlendirilmesine ihtiyaç duyulmamıştır.

### 5.1.2. Çözüm Yönteminin Doğasından/Yapısından Kaynaklanan Parametreler ve Değerleri

Problemin doğasından/yapısından kaynaklanan parametreler yanında çözüm yönteminden kaynaklanan çeşitli parametreler de söz konusudur. Önerilen çözüm yaklaşımının tavlama benzetimi prensiplerini esas alan bir üst sezgisel olması sebebiyle tavlama benzetimi meta sezgiselinin kendine has parametreleri; soğuma oranı, Markov zinciri uzunluğu (bir sıcaklık seviyesindeki iterasyon sayısı) ve durdurma kriteri olarak kullanılan gelişme olmayan çözüm sayısı parametreleri temel tavlama benzetimi parametreleridir. Bunlara ilave olarak komşu çözüme geçmek için eldeki alt sezgiseller zinciri öğelerinin kaç tanesinin (% kaçının) değiştirileceğini gösteren çaprazlama oranı (ÇO) parametresi ve eldeki çözüm ve yeni komşu çözümün karşılaştırılması sonucu başarı veya başarısızlığa göre alt sezgisel tercihleri işaret eden SSM matrisinde yapılacak iyileştirme veya cezalandırma oranlarını gösteren; çok güçlendirme (SSM++), güçlendirme (SSM+) ve cezalandırma (SSM-) parametreleri de kullanılan diğer parametrelerdir. Bu parametrelerin alabileceği değerlere yönelik literatürdeki benzer çalışmalardan elde edilen bilgiler ve problemin ve çözüm yaklaşımının sınırlarını ve potansiyelini deneme amaçlı yapılan ön çalışmalardan edinilen deneyimler dikkate

alınmıştır. Yapılan ön deneme çalıştırmaları sonucunda belirlenen parametreler ve seviyeleri Tablo 5. 1'de gösterilmiştir.

Tablo 5. 1. Parametreler ve değerleri

| Parametre | Seviye 1 | Seviye 2 | Seviye 3 |
|---|---|---|---|
| Soğuma Oranı (SO) | 0.05 | 0.10 | - |
| Belirli bir sıcaklık seviyesindeki iterasyon sayısı (Markov zinciri uzunluğu – MZU) | 30 | 50 | 70 |
| Gelişme olmayan iterasyon sayısı (GİS) | 1000 | 1500 | 2000 |
| Çözüm zincirindeki öğelerin değiştirilme oranı (çaprazlama oranı – ÇO) | %20 | %33 | %50 |
| Alt sezgiseller SSM matrisi güncelleme (çok güçlendirme SSM++) | %5 | %10 | %15 |
| Alt sezgiseller SSM matrisi güncelleme (güçlendirme SSM+) | %1 | %3 | %5 |
| Alt sezgiseller SSM matrisi güncelleme (cezalandırma SSM-) | %94 | %96 | %98 |

Belirlenen bu parametre seviyelerinden hangilerinin problemin çözümünde etkili ve yeterli olduğunun belirlenmesine yönelik bir deney çalışması yapılmıştır. Parametre sayısının ve seviyelerinin (2 seviyeli 1 parametre, 3 seviyeli 6 parametre, toplam 7 parametre) fazla olmasından dolayı tam faktöryel (full factorial) deney çalışmasından önce Taguchi deney tasarımı kullanılarak faktör ve seviye sayısının azaltılması hesaplama ve zaman kolaylığı sağlamıştır.

### 5.2. Taguchi Deney Tasarımı

Deney tasarımı, bir sistemin girdileri üzerinde yapılacak bir değişikliğin sistemin çıktıları üzerinde yaratacağı değişkenliğin incelenmesi olarak açıklanabilir (Besterfield, Besterfield, Besterfield et al. 1995). Deney tasarımı, çıktılar üzerindeki değişkenliğin doğru şekilde analiz edilmesi için girdilerin ve diğer etkenlerin doğru şekilde planlanmasını amaçlar.

Problemin çözümü üzerinde direkt olarak etkili olabilen bu faktörlerin tespiti ve ideal değerlerin kullanılması büyük önem arz etmektedir. Tam faktöryel deney tasarımı ile etkili olabilecek tüm faktörler her bir düzeylerine göre tek tek detaylı olarak incelenerek

çözüm üzerinde etkili olanlar net bir şekilde tespit edilebilir. Ancak faktör ve düzey sayısının fazla olduğu durumlarda bu süreç oldukça zaman alıcı ve maliyetli olabilmektedir. Böyle durumlarda Taguchi deney tasarımı kullanılarak hızlı ve etkili deneyler gerçekleştirilebilmektedir. Yapılması gereken deney sayısında ciddi bir azalma sağlayan bu yöntemin esas amacı hedef değer etrafındaki değişkenliğin azaltılmasıdır.

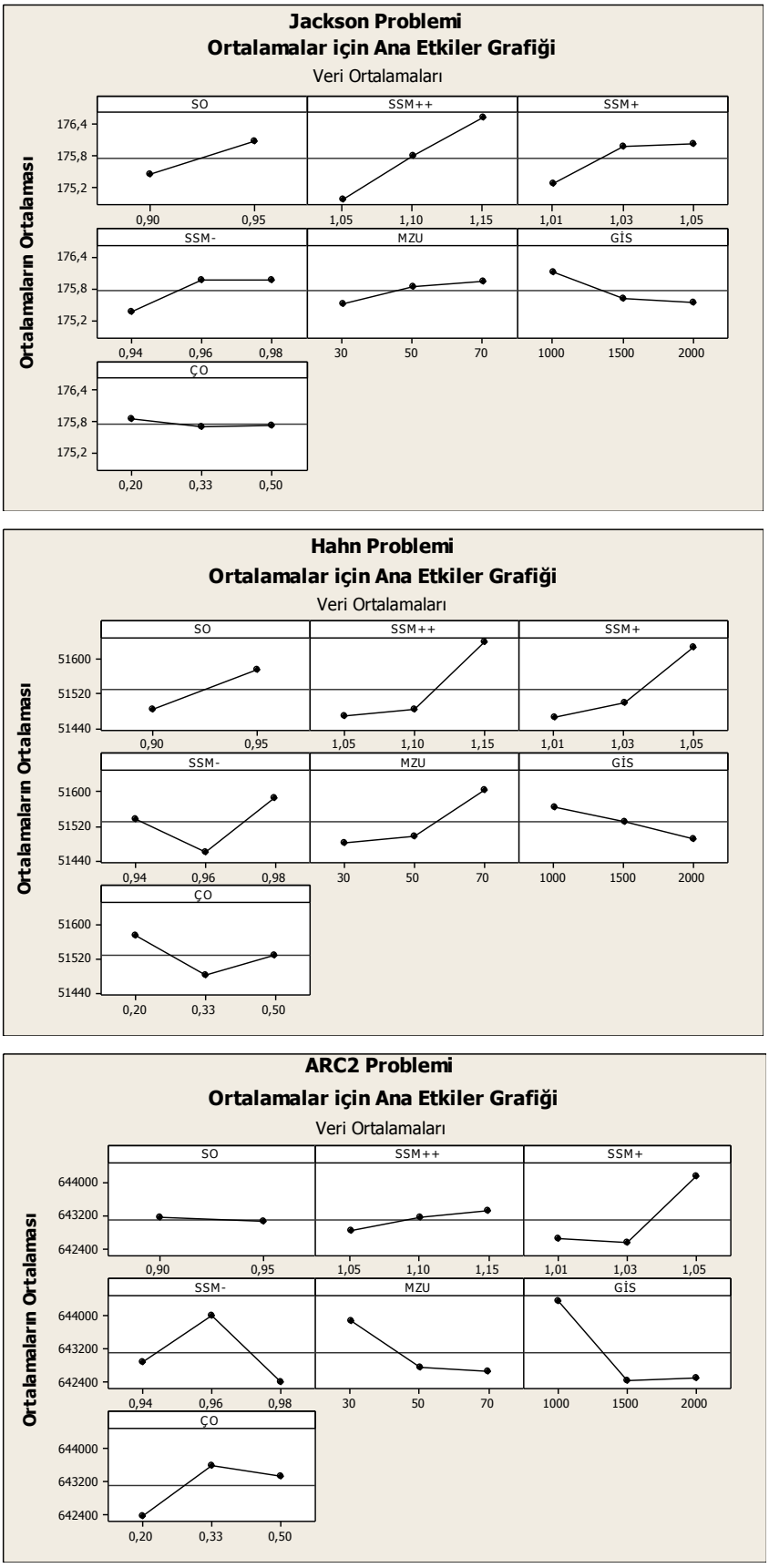
Yukarıda açıklanan parametreler ve seviyelerine göre eğer tam faktöryel deney yapılacak olsaydı $2^1x3^6$=1458 deney sonucunun gözlenmesi gerekirdi. Ancak Taguchi deney tasarımında L36 Taguchi deney matrisi ile 36 deney sonucu ile güvenilir sonuçlar elde edilmesi mümkün olabilmektedir.

Deney tasarımında, önerilen üst sezgisel çözüm yaklaşımının amaç fonksiyonu olan eşitlik (4.4) ile hesaplanan maliyet değeri, performans kriteri olarak kullanılmıştır. Literatürden seçilen küçük, orta ve büyük boyutlu problemler üzerinde deneyler gerçekleştirilmiştir. Deney parametreleri dışında kalan; çevrim zamanı (c) değeri için literatürde her bir problem için kullanılan çevrim zamanlarından en küçüğü (eşitlik (4.4) şartını sağlayan), değişim katsayısı oranı için rassal değişim katsayısı ($0<cv_r<0.6$), çevrim zamanını aşmama olasılığı için ise %90 aşmama olasılığı kullanılmıştır. Deney matrisinin oluşturulması ve yapılan deneylerin sonuçlarının analizi Minitab 16 programı yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Taguchi L36 deney matrisi ve deney sonuçları (her bir parametre seti için 10 çalıştırmanın ortalaması) aşağıda Tablo 5. 2'de gösterilmiştir.

Taguchi deney sonuçlarının analizi ile faktörlerin performans kriteri üzerindeki etkililik sıralaması ile faktörlerin ve düzeylerinin etkileri elde edilmektedir. Taguchi ana etkiler grafikleri, faktörlerin seviyelerine göre performans kriteri üzerindeki etkilerini göstermektedir. Ana etkiler grafiğinde eğimi yüksek olan faktörlerin performans kriteri üzerindeki etkileri daha fazladır. Taguchi deney sonuçlarının analizi ile küçük boyutlu Jackson, orta boyutlu Hahn ve büyük boyutlu Arc2 problemlerine ait ana etkiler grafikleri Şekil 5. 1'de görülmektedir.

Tablo 5. 2. L36 Taguchi L36 deney matrisi ve deney sonuçları

| SO | SSM++ | SSM+ | SSM- | MZU | GİS | ÇO | Jackson (c=14) | Hahn (c=2806) | Arc2 (c=10578) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0.95 | 1.05 | 1.01 | 0.98 | 30 | 1000 | 0.2 | 175.09 | 51400.63 | 642145.00 |
| 0.95 | 1.1 | 1.03 | 0.96 | 50 | 1500 | 0.33 | 175.97 | 51421.58 | 643336.00 |
| 0.95 | 1.15 | 1.05 | 0.94 | 70 | 2000 | 0.5 | 176.94 | 52023.63 | 643817.41 |
| 0.95 | 1.05 | 1.01 | 0.98 | 30 | 1500 | 0.33 | 174.91 | 51523.90 | 643245.20 |
| 0.95 | 1.1 | 1.03 | 0.96 | 50 | 2000 | 0.5 | 175.78 | 51223.31 | 641854.18 |
| 0.95 | 1.15 | 1.05 | 0.94 | 70 | 1000 | 0.2 | 176.97 | 51759.50 | 643074.70 |
| 0.95 | 1.05 | 1.01 | 0.96 | 70 | 1000 | 0.33 | 175.35 | 51403.18 | 645379.71 |
| 0.95 | 1.1 | 1.03 | 0.94 | 30 | 1500 | 0.5 | 176.06 | 51369.69 | 641136.38 |
| 0.95 | 1.15 | 1.05 | 0.98 | 50 | 2000 | 0.2 | 177.52 | 52090.82 | 643429.85 |
| 0.95 | 1.05 | 1.01 | 0.94 | 50 | 1000 | 0.5 | 174.86 | 51662.36 | 643556.45 |
| 0.95 | 1.1 | 1.03 | 0.98 | 70 | 1500 | 0.2 | 176.87 | 51857.40 | 640845.65 |
| 0.95 | 1.15 | 1.05 | 0.96 | 30 | 2000 | 0.33 | 176.39 | 51443.30 | 647358.12 |
| 0.95 | 1.05 | 1.03 | 0.94 | 30 | 2000 | 0.33 | 174.97 | 51467.74 | 643609.42 |
| 0.95 | 1.1 | 1.05 | 0.98 | 50 | 1000 | 0.5 | 176.87 | 51545.74 | 645143.46 |
| 0.95 | 1.15 | 1.01 | 0.96 | 70 | 1500 | 0.2 | 176.44 | 51660.61 | 640269.92 |
| 0.95 | 1.05 | 1.03 | 0.94 | 50 | 1000 | 0.2 | 175.35 | 51432.57 | 641565.69 |
| 0.95 | 1.1 | 1.05 | 0.98 | 70 | 1500 | 0.33 | 176.62 | 51655.78 | 642258.26 |
| 0.95 | 1.15 | 1.01 | 0.96 | 30 | 2000 | 0.5 | 176.33 | 51424.76 | 643220.53 |
| 0.9 | 1.05 | 1.03 | 0.98 | 70 | 2000 | 0.5 | 174.81 | 51447.13 | 641869.31 |
| 0.9 | 1.1 | 1.05 | 0.96 | 30 | 1000 | 0.2 | 176.94 | 51612.57 | 646218.28 |
| 0.9 | 1.15 | 1.01 | 0.94 | 50 | 1500 | 0.33 | 174.65 | 51527.00 | 641919.11 |
| 0.9 | 1.05 | 1.03 | 0.96 | 70 | 2000 | 0.2 | 174.70 | 51336.10 | 641698.49 |
| 0.9 | 1.1 | 1.05 | 0.94 | 30 | 1000 | 0.33 | 174.67 | 51486.06 | 647635.68 |
| 0.9 | 1.15 | 1.01 | 0.98 | 50 | 1500 | 0.5 | 175.82 | 51329.65 | 642240.24 |
| 0.9 | 1.05 | 1.05 | 0.96 | 30 | 1500 | 0.5 | 174.53 | 51609.97 | 644290.38 |
| 0.9 | 1.1 | 1.01 | 0.94 | 50 | 2000 | 0.2 | 175.06 | 51521.12 | 641564.42 |
| 0.9 | 1.15 | 1.03 | 0.98 | 70 | 1000 | 0.33 | 177.52 | 51862.38 | 642835.54 |
| 0.9 | 1.05 | 1.05 | 0.96 | 50 | 1500 | 0.2 | 175.55 | 51401.85 | 643908.92 |
| 0.9 | 1.1 | 1.01 | 0.94 | 70 | 2000 | 0.33 | 174.77 | 51183.37 | 641095.09 |
| 0.9 | 1.15 | 1.03 | 0.98 | 30 | 1000 | 0.5 | 176.39 | 51616.22 | 644092.38 |
| 0.9 | 1.05 | 1.05 | 0.94 | 70 | 1500 | 0.5 | 174.73 | 51570.04 | 642553.87 |
| 0.9 | 1.1 | 1.01 | 0.98 | 30 | 2000 | 0.2 | 174.45 | 51396.30 | 640469.80 |
| 0.9 | 1.15 | 1.03 | 0.96 | 50 | 1000 | 0.33 | 178.07 | 51489.89 | 644403.58 |
| 0.9 | 1.05 | 1.05 | 0.98 | 50 | 2000 | 0.33 | 174.71 | 51334.13 | 640209.95 |
| 0.9 | 1.1 | 1.01 | 0.96 | 70 | 1000 | 0.5 | 175.50 | 51521.90 | 646424.16 |
| 0.9 | 1.15 | 1.03 | 0.94 | 30 | 1500 | 0.2 | 175.36 | 51452.09 | 643265.69 |




Şekil 5. 1. Taguchi ana etkiler grafikleri

Ana etkiler grafiklerinde faktörlerin bir seviyesinden diğerine performans kriterinin nasıl değiştiği görülebilmektedir. Örneğin Şekil 5. 1'de Arc2 probleminin ana etkiler grafiğinde, SSM- faktörünün birinci seviyesi (0.94) ortalamanın altında iyi bir sonucu gösterirken, faktörün ikinci seviyesine (0.96) gelinirken performans kriteri sonucunun arttığı ve ortalamanın üzerinde daha başarısız bir değere işaret etmektedir. Üçüncü seviye doğru ise performans kriteri sonucu azalarak ortalamanın ve birinci seviye sonucunun altında oldukça başarılı bir değere ulaşmaktadır. Dolayısıyla SSM- faktörünün Arc2 problemi için en başarılı seviyesi üçüncü seviye (0.98) değeridir. Ana etkiler grafiklerinden Jackson probleminin çaprazlama oranı (ÇO) faktörü grafiği incelendiğinde grafiğin eğiminin oldukça düşük olduğu ve performans kriteri sonucu üzerinde neredeyse etkisiz olduğu görülmektedir. Aynı problemin SSM++ ana etkiler grafiğinin eğiminin ise oldukça yüksek olduğu ve dolayısıyla performans kriteri sonucu üzerinde oldukça etkili olduğu görülmektedir.

Ana etkiler grafiğine göre Jackson ve Hahn problemlerinin her ikisi içinde SO değeri birinci seviye (0.90) değerinde performans kriterini en küçüklerken, Arc2 probleminde SO faktörünün eğimi düşük olduğu için faktörün seviyeleri arasında performans kriterini etkileyecek anlamlı bir farklılık bulunmamaktadır. Dolayısıyla SO faktörü için birinci seviyesi olan SO=0.90 değeri çözüm yöntemi için sabit değer olarak seçilebilir. Benzer şekilde sezgisel seçilebilirlik matrisini çok güçlendirme (SSM++) faktörü içinde birinci seviyesi olan SSM++=1.05 değeri (her üç problem de de aynı seviye) sabit değer olarak seçilmiştir. Aynı durum gelişme olmayan iterasyon sayısı (GİS) faktörüne uyarlanırsa GİS=2000 iterasyon değeri sabit değer olarak belirlenebilir. Her ne kadar Arc2 probleminde faktörün ikinci seviye değeri az farkla daha küçük performans sonucu değeri sağlıyorsa da eğimin düşük olması, faktör seviyelerinin (2 ve 3 seviyeler) performans üzerindeki etkilerinin birbirine çok yakın olduğunu gösterir. Ayrıca durdurma kriteri olarak daha büyük sayıda gelişme olmayan iterasyon sayısının seçimi Arc2 gibi büyük boyutlu problemlerde çözüm uzayının daha derinlemesine araştırılmasına da yardımcı olacaktır.

Tablo 5. 3. Taguchi faktör sıralaması

| | Seviye | SO | SSM++ | SSM+ | SSM- | MZU | GİS | ÇO |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Jackson | 1 | 175.5 | 175.0 | 175.3 | 175.4 | 175.5 | 176.1 | 175.9 |
| | 2 | 176.1 | 175.8 | 176.0 | 176.0 | 175.9 | 175.6 | 175.7 |
| | 3 | - | 176.5 | 176.0 | 176.0 | 175.9 | 175.5 | 175.7 |
| | Fark | 0.6 | 1.6 | 0.8 | 0.6 | 0.4 | 0.6 | 0.1 |
| | Sıralama | 3 | 1 | 2 | 4 | 6 | 5 | 7 |
| Hahn | 1 | 51483 | 51466 | 51463 | 51538 | 51484 | 51566 | 51577 |
| | 2 | 51576 | 51483 | 51498 | 51462 | 51498 | 51532 | 51483 |
| | 3 | - | 51640 | 51628 | 51588 | 51607 | 51491 | 51529 |
| | Fark | 93 | 174 | 165 | 126 | 123 | 75 | 94 |
| | Sıralama | 6 | 1 | 2 | 3 | 4 | 7 | 5 |
| ARC2 | 1 | 643150 | 642836 | 642627 | 642899 | 643891 | 644373 | 642371 |
| | 2 | 643069 | 643165 | 642543 | 644030 | 642761 | 642439 | 643607 |
| | 3 | - | 643327 | 644158 | 642399 | 642677 | 642516 | 643350 |
| | Fark | 80 | 491 | 1616 | 1631 | 1214 | 1934 | 1236 |
| | Sıralama | 7 | 6 | 3 | 2 | 5 | 1 | 4 |

Taguchi deney çalışması sonucunda faktörlerin performans kriteri üzerindeki etkinliklerine göre sıralaması Tablo 5. 3'de gösterilmiştir. Ana etkiler grafiği ve faktör sıralama sonuçlarına göre performans kriterini (toplam maliyeti) en küçükleyen faktör seviyeleri ve değerleri Tablo 5. 4'de gösterilmiştir. Tek bir çevrim zamanı ve tamamlanmama olasılığı değeri için yapılan Taguchi deneyi, farklı çevrim zamanı ve tamamlanmama olasılığı değerleri için de gerçekleştirilmiş ve çözüm yönteminin tutarlılığını gösteren, mevcut Taguchi deney sonuçlarıyla uyumlu sonuçlara ulaşılmıştır.

Tablo 5. 4. Taguchi deney analizi sonuçlarına göre faktörler seviyeleri ve değerleri

| **Faktör** | **Seviye** | **Değer** |
|---|---|---|
| **SO** | **1** | **0.90** |
| **SSM++** | **1** | **1.05** |
| SSM+ | 1,2 | 1.01; 1.03 |
| SSM- | 2,3 | 0.96; 0.98 |
| MZU | 1,3 | 30; 70 |
| **GİS** | **3** | **2000** |
| ÇO | 2,3 | 0.33; 0.50 |

Taguchi deney analizi sonucunda küçük, orta ve büyük boyutlu tüm problemler için performans kriterini en iyileyecek SO=0.90, SSM++=1.05 ve GİS=2000 faktör değerleri

belirlenmiştir. Diğer faktörler ve seviyelerinin belirlenmesi için tam faktöryel deney tasarımı gerçekleştirilmiştir.

### 5.3. Tam Faktöryel Deney Tasarımı

Stokastik paralel montaj hattı dengeleme probleminin çözümünde kullanılan parametrelerden 3 tanesinin değerleri (SO=0.90; SSM++=1.05 ve GİS=2000); küçük, orta ve büyük boyutlu test problemleri üzerinde yapılan Taguchi deney tasarımı çalışması ile belirlenmişti. Geriye kalan 4 parametrenin performans kriterini (toplam maliyetin en küçüklenmesi) en iyileyecek seviyelerinin tespiti için faktöryel deney tasarımı gerçekleştirilmiştir. Faktöryel deney çalışması ile bu 4 faktörün ikişer seviyesi seçilerek $2^4$=16 deney ve 10 tekrarlı çalıştırma ile toplam 160 deney yapılarak oldukça sağlam ve güvenilir bir deney yapılması sağlanmıştır.

Taguchi deney çalışması sonucu elde edilen Tablo 5. 4'de gösterilen faktörler ve seviyelerinden; birden fazla seviye ile gösterilen parametreler çözüm üzerinde en etkili 2 seviyeleri ile tam faktöryel deneye dahil edilmiştir. Tam faktöryel deneye dahil edilen parametreler ve seviyeleri Tablo 5. 5'de görülmektedir.

Tablo 5. 5. Faktöryel deney parametreleri ve seviyeleri

| Parametre | SSM+ | SSM- | MZU | ÇO |
|---|---|---|---|---|
| Seviye 1 | 1.01 | 0.96 | 30 | 0.33 |
| Seviye 2 | 1.03 | 0.98 | 70 | 0.50 |

Faktöryel deney tasarımının analizi sonucunda ANOVA tablosu, ana etkiler grafikleri, etkileşim grafikleri, standartlaştırılmış etkilerin normal şeması ve pareto şeması elde edilir. ANOVA tablosu performans kriteri üzerindeki ana etkilerin ve etkileşimlerin özetini göstermektedir. ANOVA tablosundaki *p* değerleri incelenerek ilgili faktörün veya etkileşimin performans kriteri üzerinde anlamlı bir etkisinin ($p<0.05$) olup olmadığına karar verilebilir. Tablo 5. 6'da gösterilen ANOVA tablosu incelendiğinde Jackson probleminde MZU (p=0.009) faktörünün, Hahn probleminde SSM- (p=0.017) faktörlerinin performans kriteri üzerinde anlamlı bir etkisi olduğu görülür. Büyük boyutlu Arc2 probleminde ise faktörlerin ve etkileşimlerin performans kriteri üzerinde anlamlı bir etkisi bulunmamaktadır.

Tablo 5. 6. Faktöryel deney analizi ANOVA tablosu

| | | Ser. Der. | Sıralı KT | Ayar. KT | Ayar. KO | F | P |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Jackson Problemi** | Ana Etkiler | 4 | 12.305 | 12.305 | 3.07621 | 2.90 | 0.024 |
| | SSM+ | 1 | 1.611 | 1.611 | 1.61078 | 1.52 | 0.220 |
| | SSM- | 1 | 2.530 | 2.530 | 2.52973 | 2.39 | 0.125 |
| | MZU | 1 | 7.390 | 7.390 | 7.39044 | 6.97 | **0.009** |
| | CO | 1 | 0.774 | 0.774 | 0.77391 | 0.73 | 0.394 |
| | 2-Yönlü Etkileşim | 6 | 7.900 | 7.900 | 1.31673 | 1.24 | 0.289 |
| | SSM+ x SSM- | 1 | 0.412 | 0.412 | 0.41227 | 0.39 | 0.534 |
| | SSM+ x MZU | 1 | 0.226 | 0.226 | 0.22562 | 0.21 | 0.645 |
| | SSM+ x CO | 1 | 0.019 | 0.019 | 0.01946 | 0.02 | 0.892 |
| | SSM- x MZU | 1 | 3.085 | 3.085 | 3.08545 | 2.91 | 0.090 |
| | SSM- x CO | 1 | 2.700 | 2.700 | 2.70046 | 2.55 | 0.113 |
| | MZU x CO | 1 | 1.457 | 1.457 | 1.45709 | 1.37 | 0.243 |
| **Hahn Problemi** | Ana Etkiler | 4 | 588168 | 588168 | 147042 | 1.63 | 0.169 |
| | SSM+ | 1 | 330 | 330 | 330 | 0.00 | 0.952 |
| | SSM- | 1 | 525644 | 525644 | 525644 | 5.83 | **0.017** |
| | MZU | 1 | 30644 | 30644 | 30644 | 0.34 | 0.561 |
| | CO | 1 | 31551 | 31551 | 31551 | 0.35 | 0.555 |
| | 2-Yönlü Etkileşim | 6 | 297920 | 297920 | 49563 | 0.55 | 0.769 |
| | SSM+ x SSM- | 1 | 32177 | 32177 | 32177 | 0.36 | 0.551 |
| | SSM+ x MZU | 1 | 871 | 871 | 871 | 0.01 | 0.922 |
| | SSM+ x CO | 1 | 46414 | 46414 | 46414 | 0.52 | 0.474 |
| | SSM- x MZU | 1 | 23107 | 23107 | 23107 | 0.26 | 0.613 |
| | SSM- x CO | 1 | 53130 | 53130 | 53130 | 0.59 | 0.444 |
| | MZU x CO | 1 | 142221 | 142221 | 142221 | 1.58 | 0.211 |
| **Arc2 Problemi** | Ana Etkiler | 4 | 50673467 | 50673467 | 12668367 | 0.89 | 0.474 |
| | SSM+ | 1 | 4623811 | 4623811 | 4623811 | 0.32 | 0.570 |
| | SSM- | 1 | 19359600 | 19359600 | 19359600 | 1.35 | 0.246 |
| | MZU | 1 | 2804949 | 2804949 | 2804949 | 0.20 | 0.658 |
| | CO | 1 | 23885108 | 23885108 | 23885108 | 1.67 | 0.198 |
| | 2-Yönlü Etkileşir | 6 | 133704627 | 133704627 | 22284105 | 1.56 | 0.163 |
| | SSM+ x SSM- | 1 | 46561315 | 46561315 | 16561315 | 3.26 | 0.073 |
| | SSM+ x MZU | 1 | 167960 | 167960 | 167960 | 0.01 | 0.914 |
| | SSM+ x CO | 1 | 46429483 | 46429483 | 46429483 | 3.25 | 0.074 |
| | SSM- x MZU | 1 | 24943321 | 24943321 | 24943321 | 1.74 | 0.189 |
| | SSM- x CO | 1 | 10917346 | 10917346 | 10917346 | 0.76 | 0.384 |
| | MZU x CO | 1 | 4685202 | 4685202 | 4685202 | 0.33 | 0.568 |

Daha görsel ve açıklanabilir bilgiler sunan ana etkiler grafikleri Jackson problemi için Şekil 5. 2'de, diğer Hahn ve Arc2 problemleri için Ek 1'de gösterilmiştir. Ana etkiler grafiklerinde MZU parametresi için tüm problem türlerinde aynı olmak üzere performans kriterini en iyileyen değerin MZU=30 olduğu görülür. Ancak bu faktörlerden MZU faktörünün sadece Jackson probleminde performans kriteri üzerinde anlamlı bir etkiye sahip olduğu ($p>0.05$), diğer problem örneklerinde anlamlı bir etkinin söz konusu olmadığı varyans analizi sonuçlarından görülmektedir.

SSM+ faktörü açısından kararlı bir durum söz konusu değildir. Jackson probleminde faktör 2. Seviyesinde performans kriterini en iyilerken, Hahn ve Arc2 problemlerinde birinci seviyesinde performans kriterini en iyilemektedir. Hahn probleminde eğim çok düşük olduğu için seviyeler arasında net bir farklılaşma bulunmamaktadır.

SSM- faktörü açısından ise küçük boyutlu Jackson Arc2 problemlerinde SSM-=0.96 seviyesi performans kriterini en iyileyen bir etkiye sahiptir. Hahn probleminde ise SSM-=0.98 seviyesi istatistiksel olarak anlamlı da olacak şekilde performans kriterini etkilemektedir. Jackson probleminin diğer problemlere göre daha küçük çözüm uzayına sahip olmasından dolayı başarılı çözüme ulaşmanın kolay olması ve ulaşılan çözüme hızlı şekilde odaklanılması için (bir nevi hızlı soğuma) SSM- değerinin düşük seviyeden değerlendirilmesinin anlamlı olduğuna işaret etmektedir. Arc2 probleminde ise çözüm uzayının çok daha büyük olmasından dolayı, çözüm uzayında daha fazla yeni alan keşfetmek amacıyla arama sürecinde zıplama yapabilmenin bir aracı olarak düşük seviyeli SSM- faktörü etkili olabilmektedir.

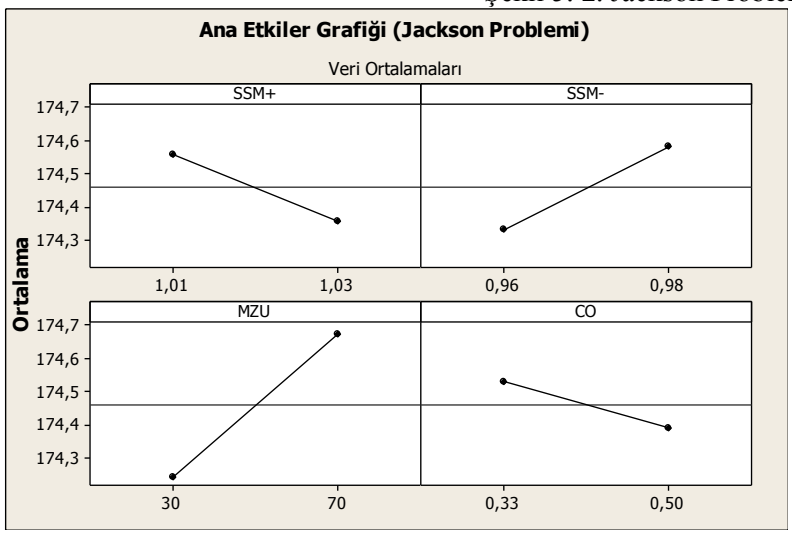
ÇO parametresi küçük boyutlu Jackson ve orta boyutlu Hahn problemlerinde performans kriterini ÇO=0.50 değerinde en iyilerken etkisinin sınırlı olduğu doğrunun eğiminden ve varyans analizi sonuçlarından anlaşılmaktadır. Büyük boyutlu Arc2 probleminde ise yine sınırlı bir etkiye sahip de olsa ÇO=0.33 değerinin performans kriterini en iyilediği görülmektedir.

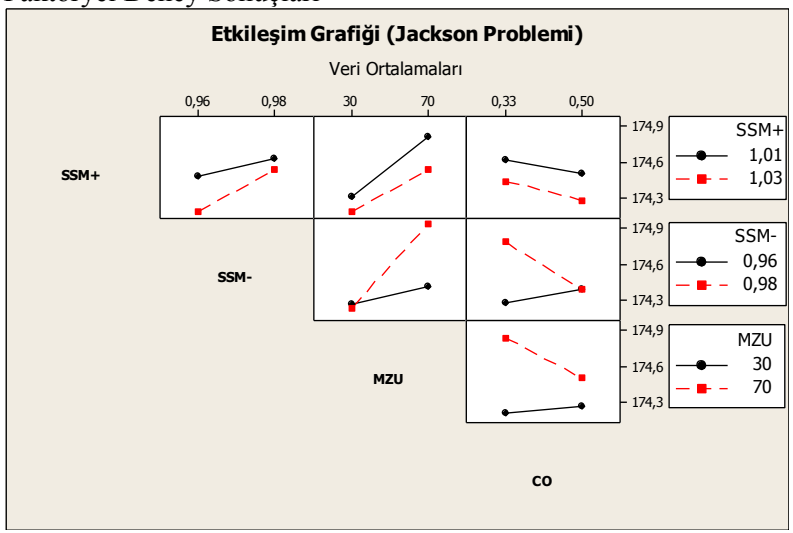
Ana etkiler grafiklerine göre SSM+, SSM- ve ÇO faktörleriyle ilgili çelişkili bir durum söz konusudur. Her ne kadar Arc2 probleminde varyans analizi sonuçlarına göre anlamlı

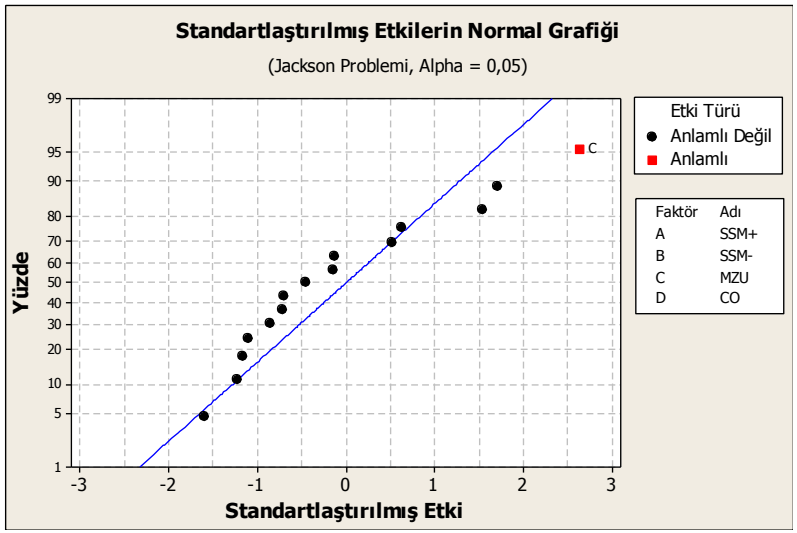
hiçbir etki bulunmasa da bu sorunun anlaşılmasının en iyi yollarından birisi Şekil 5. 2 ve Ek 1'de gösterilen etkileşim grafiklerinin incelenmesidir. Etkileşim grafiklerinde faktör seviyelerini gösteren doğruların kesişmesi, bir faktörün alacağı seviyeye göre diğer faktörün seviyesinin değişebileceğini veya performans kriteri üzerindeki etkisinin değişebileceğini göstermektedir. Örneğin, Şekil 5. 2'de Jackson problemi için etkileşim grafiğinde SSM- & ÇO faktörlerinin etkileşim grafiği incelendiğinde; SSM-=0.96 seviyesinde kullanıldığında, ÇO=0.33 seviyesinin performans kriterini en iyilediği ancak SSM-=0.98 seviyesinde alınırsa bu kez de ÇO=0.50 seviyesinde performans kriterinin en iyi değerine ulaştığı görülür. SSM- & MZU etkileşiminde ise SSM- faktörü hangi seviyedeki değerini alırsa alsın MZU faktörünün birinci seviyedeki değerini alacağı ancak performans kriteri üzerindeki etkisinin az da olsa farklı olacağı görülmektedir. Hahn ve Arc2 problemlerinin etkileşim grafiklerinde de bazı kesişmeler söz konusudur ancak ANOVA sonuçlarına göre bu faktörlerin hiç birinin anlamlı bir etkisi yoktur. Burada dikkat edilmesi gereken nokta grafiklerde gösterilen ikili etkileşimler dışında üçlü ve dörtlü etkileşimlerin de varlığıdır. Şekil 5. 2'deki etkilerin normal ve pareto grafikleri Hahn probleminde SSM- & MZU & ÇO üçlü etkileşiminin, Arc2 probleminde ise SSM+ & SSM- & MZU üçlü etkileşiminin anlamlı etkileşimler olduğunu göstermektedir.

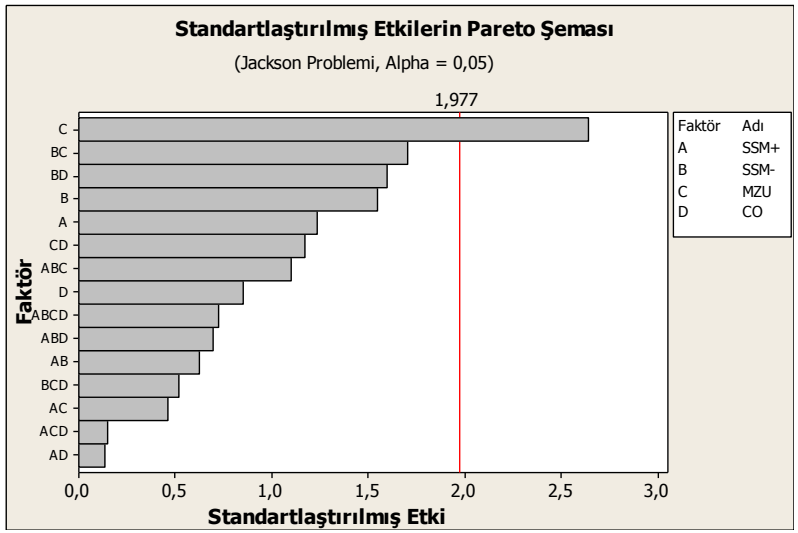
Etkilerin Normal, yarı normal ve Pareto grafikleri önemli etkilerin görsel olarak belirlenmesine imkan sağlar ve çeşitli etkilerin göreli şiddetlerinin karşılaştırılmasına yardımcı olur. Faktör seviyelerinin standartlaştırılmış etkilerinin normal eğri etrafında dağılımı ve pareto şeması olarak gösterimleri de Şekil 5. 2 ve Ek 1'de görülmektedir. Varyans analizi sonucu anlamlı etkiye sahip oldukları belirlenen faktörlerin normal eğriden oldukça uzakta oldukları görülmektedir. Pareto şemasında da ANOVA tablosundan da belirlenen anlamlı etkiye sahip faktörler gösterilmektedir.

Şekil 5. 2. Jackson Problemi Faktöryel Deney Sonuçları



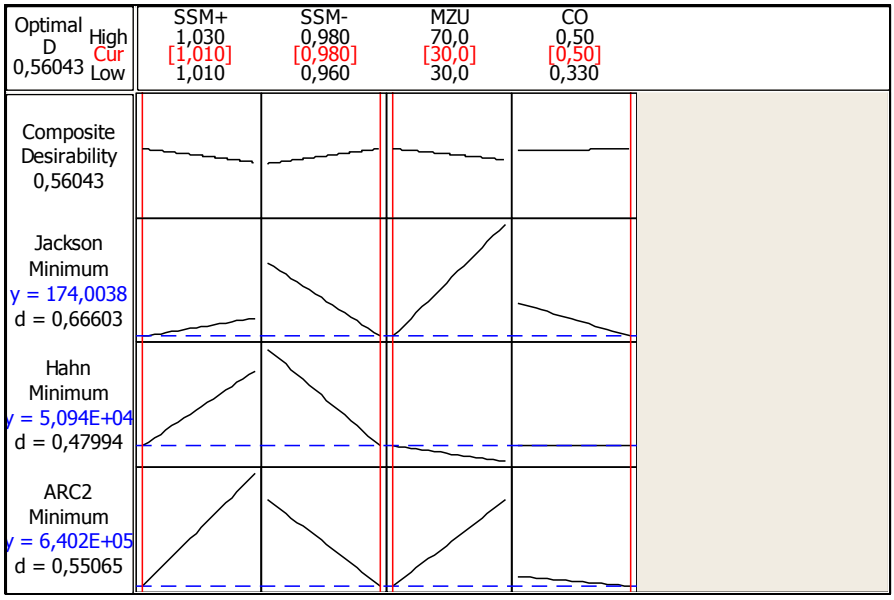



Deney tasarımı performans kriterini en iyileyecek optimal şartların belirlenmesini içerir. Yukarıda açıkladığımız tam faktöryel deney tasarımı sonucunda faktörlerden sadece MZU=30 faktör seviyesi tüm problem türlerinde aynı seviyeyi göstermiştir. Diğer faktörleri için etkileşimlerden kaynaklanan bir çelişki söz konusudur. Deney sonuçlarına göre tüm faktörlerin seviyelerini eş zamanlı olarak performans kriteri açısından en iyileyecek kombinasyonun bulunması için faktörler ve seviyeleri arasında bir değiş-tokuş söz konusu olabilmektedir. Ayrıca bir problem çözümü için tasarım değişkenlerinin optimal ayarları bir başka çözüm için optimalden uzak veya fiziksel olarak imkansız olabilir. Minitab sonuç optimizasyon modülü çeşitli sonuçlar içerisinde bir uzlaşma noktası aranmasına izin veren bir uygulamadır. Bu modül ile faktör seviyelerinin performans kriteri sonucuna etkisi eş zamanlı olarak görülebilir. Ayrıca eğer faktörlere dair bir önem sırası ve ağırlık söz konusu olursa, bu durumun da dikkate alınması mümkün olabilmektedir.

Minitab sonuç optimizasyon modülünde analize başlamadan önce hazırlık işlemlerinin yapılması gerekir. Bizim problemimizde performans kriterimiz toplam maliyetin en küçüklenmesi olduğundan amaç olarak en küçükleme seçilir. Performans kriterini en iyileyecek bir hedef en küçük değer ve üst sınır her bir problem için belirlenir. Hedef değerin en küçük değeri için deney çalıştırmaları boyunca elde edilen sonuçlardan en küçüğü, üst sınır için ise en büyüğü kullanılmıştır. Bu değerlerin belirttiği aralık bütünleşik arzu edilebilirlik seviyesini belirleyerek sonuç optimizasyon grafiklerinin sağa yada sola çarpıklığını ve/veya basıklığının göstergeleri olacaktır. Ayrıca faktörlerin seviyelerinin incelendiği küçük, orta ve büyük boyutlu problemler arasında bir önem durumu da tanımlanabilmektedir. Tam faktöryel deney sonucunda elde edilen deney sonuçları ile sonuç optimizasyon modülü çalıştırılmış ve Şekil 5. 3'de gösterilen grafik elde edilmiştir.




Şekil 5. 3. Faktöryel Deney Parametre Seviyeleri için Sonuç Optimizasyon Grafiği

Şekil 5. 3'de gösterilen grafiğe göre SSM+=1.01, SSM-=0.98, MZU=30 ve ÇO=0.50 değerlerine sahip seviyelerinde kullanılırsa bütünleşik arzu edilebilirlik seviyesi d=0.56043 değerinde olacaktır. Böylece problem boyutundan bağımsız olarak aynı parametre değerleri tüm problemler üzerinde uygulanabilecektir. Bütünleşik arzu edilebilirlik seviyesi hazırlık aşamasında girilen hedef minimum ve üst sınır değerlerine bağlıdır. Buradaki d=0.56043 değeri, sonuç optimizasyon modülü ile belirlenen parametre seviyeleri kullanılarak elde edilecek sonuçların, her üç problem örneği için elde edilen sonuçların ortalamasından daha iyi sonuçlara ulaşılacağını göstermektedir. Ayrıca anlamlı bir etkileşim olmasa da belirlenen parametre seviyelerinin Arc2 problemi için d=0.55065 seviyesinde bir arzu edilebilirliğe ulaşması büyük bir boyutlu bir problemin çözümünde önemli bir başarıya işaret etmektedir. Problemlerin boyutunun farklı olmasından dolayı çözüm uzaylarında arama yapmanın zorluğunun da farklı olacağı düşünüldüğünde, problemlere öncelikler atanabilmektedir. Çözüm uzayı büyülüklerine göre problemlere öncelikler atandığında da yukarıda elde edilen aynı sonuca ulaşıldığı görülmüştür.

### 5.4. Test Problemlerinin Çözüm Sonuçları

Stokastik paralel MHD probleminin üst sezgisel yaklaşım ile çözümü için geliştirilen tavlama benzetimi üst sezgiselinin kullandığı parametreler ve parametrelerin değerleri

deneysel çalışma ile belirlenmiştir. Taguchi ve tam faktöryel deneyleri sonucu aşağıdaki parametre değerlerine ulaşılmıştır:

- Soğuma oranı SO=0.90
- Markov zinciri uzunluğu MZU=30
- Gelişme olmayan iterasyon sayısı GİS=2000
- Çözüm zincirindeki öğelerin değiştirilme – çaprazlama oranı ÇO=0.50
- Alt sezgiseller SSM matrisini çok güçlendirme SSM++=1.05
- Alt sezgiseller SSM matrisini güçlendirme SSM+=1.01
- Alt sezgiseller SSM matrisini cezalandırma SSM-=0.98

Önerilen üst sezgisel yaklaşımın, belirlenen bu parametre değerleri ile stokastik paralel MHD problemlerini etkili şekilde çözebildiği belirlenmiştir.

Literatürde MHD problemleri ile ilgili çok sayıda araştırma ve bu araştırmalarda kıyaslamalar yapılabilmesi için standart test problemleri mevcuttur. Paralel MHD problemi için de 2 modelli ve öncelik ilişkileri ve görev zamanları belirli test problemleri www.assembly-line-balancing.de internet adresinde mevcuttur. Ancak bu paralel MHD problem setinde görev zamanları deterministik olarak yer almaktadır. Ayrıca makine/teçhizat maliyetleri mevcut test problemi setlerinden hiçbirinde bulunmamaktadır. Dolayısıyla paralel MHD standart test problemleri setinde 2 tür güncelleme işlemi yapılması gerekmiştir.

Birinci olarak deterministik görev zamanlarının stokastik yapıya dönüştürülmesi için Çerçioğlu (2009) çalışmasındaki aynı yaklaşım kullanılarak düşük, rassal ve yüksek varyans değerleri belirlenerek problem stokastik yapıya dönüştürülmüştür. İkinci olarak ise 5.1.1. başlığında açıklandığı şekilde görevler için makine/teçhizat türleri ve maliyetleri belirlenmiştir. Sonraki çalışmalara kıyaslama imkânı sağlayabilmek amacıyla kullanılan test problemleri veri seti Ek 2'de verilmiştir.

Üst sezgisel yaklaşımın belirlenen parametre değerleri ile test problemlerinin farklı çevrim zamanı (c), istasyon zamanını aşmama olasılığı (1-α) ve varyans seviyeleri ($\sigma^2$) için 10 çalıştırma yapılarak elde edilen çözüm sonuçları Merten problemi için Tablo 5. 7'de, diğer test problemleri için Ek2'de verilmiştir.

Tablo 5. 7. Mertens Problemi Sonuçları

| c | 1-α | $\sigma^2$ | min K | min F | ort F |
|---|---|---|---|---|---|
| 12 | 0,85 | Düşük | 6 | 98,77 | 98,81 |
| 12 | 0,85 | Rassal | 6 | 105,01 | 105,16 |
| 12 | 0,85 | Yüksek | 8 | 123,15 | 123,18 |
| 12 | 0,9 | Düşük | 6 | 100,89 | 100,95 |
| 12 | 0,9 | Rassal | 7 | 112,66 | 112,82 |
| 12 | 0,9 | Yüksek | 8 | 123,09 | 123,14 |
| 12 | 0,95 | Düşük | 6 | 100,76 | 100,77 |
| 12 | 0,95 | Rassal | 7 | 112,88 | 112,90 |
| 12 | 0,95 | Yüksek | 9 | 136,04 | 136,07 |
| 14 | 0,85 | Düşük | 5 | 88,04 | 88,47 |
| 14 | 0,85 | Rassal | 5 | 97,24 | 97,44 |
| 14 | 0,85 | Yüksek | 5 | 98,16 | 98,37 |
| 14 | 0,9 | Düşük | 5 | 92,10 | 92,61 |
| 14 | 0,9 | Rassal | 5 | 100,15 | 100,46 |
| 14 | 0,9 | Yüksek | 6 | 110,17 | 110,20 |
| 14 | 0,95 | Düşük | 5 | 93,28 | 93,29 |
| 14 | 0,95 | Rassal | 6 | 112,45 | 112,48 |
| 14 | 0,95 | Yüksek | 7 | 126,15 | 126,16 |
| 16 | 0,85 | Düşük | 4 | 82,71 | 82,71 |
| 16 | 0,85 | Rassal | 5 | 96,91 | 96,92 |
| 16 | 0,85 | Yüksek | 5 | 98,72 | 98,84 |
| 16 | 0,9 | Düşük | 4 | 86,58 | 87,06 |
| 16 | 0,9 | Rassal | 5 | 97,10 | 97,11 |
| 16 | 0,9 | Yüksek | 5 | 97,88 | 98,47 |
| 16 | 0,95 | Düşük | 5 | 95,69 | 95,90 |
| 16 | 0,95 | Rassal | 5 | 97,10 | 97,11 |
| 16 | 0,95 | Yüksek | 5 | 103,53 | 103,93 |
| 20 | 0,85 | Düşük | 3 | 79,67 | 79,69 |
| 20 | 0,85 | Rassal | 4 | 97,60 | 97,61 |
| 20 | 0,85 | Yüksek | 4 | 97,78 | 97,79 |
| 20 | 0,9 | Düşük | 4 | 98,04 | 98,08 |
| 20 | 0,9 | Rassal | 4 | 97,60 | 97,60 |
| 20 | 0,9 | Yüksek | 4 | 97,78 | 97,79 |
| 20 | 0,95 | Düşük | 4 | 97,32 | 97,32 |
| 20 | 0,95 | Rassal | 4 | 97,60 | 97,61 |
| 20 | 0,95 | Yüksek | 4 | 97,78 | 97,78 |

Amaç fonksiyonunun işçilik maliyetleri, tamamlanmama maliyetleri ve makine/teçhizat maliyetlerinin toplamından oluştuğu unutulmamalıdır. Tabloda verilen amaç fonksiyonunun en küçük ve ortalama değerlerinin birbirine oldukça yakın değerler olması üst sezgisel çözüm yaklaşımının kararlı bir yapıda çalıştığının göstergelerindendir.

# VI. BÖLÜM:
# ÜST SEZGİSEL ÇÖZÜM YAKLAŞIMININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu bölümde, önerilen üst sezgisel çözüm yaklaşımı; çalışma mekanizması ve dayandığı temel varsayımlar açısından, çözüm performansı açısından ve algoritmik özellikler açısından değerlendirilmiştir.

## 6.1. Üst Sezgisel Çalışma Mekanizması Açısından Değerlendirme

Problemin çözümü için geliştirilen üst sezgisel yaklaşımın temel düşüncesi, istasyonlara atanacak görevlerin seçiminde basit alt seviyeli sıralama sezgisellerinin etkin şekilde kullanılabileceği varsayımıydı. Bu düşünceden hareketle, her bir atama sırasında, ilgili pozisyon için en iyi alternatif görevi seçebilecek bir alt sezgiselin aranması ve arama süreci boyunca da en iyi alternatif alt sezgiselin iterasyonlar boyunca öğrenilerek belirlenebileceği hipotezi esas alınmaktadır. Yani alt seviyeli sezgisellerin öyle bir sıralaması vardır ki, bu sıralama seçilebilir görevler kümesine uygulanarak probleme optimal yada optimale yakın çözümler bulunabilecektir. Geliştirilen tavlama benzetimi üst sezgiselinde, alt sezgisellerin pozisyonlara (sıralamaya) bağlı olarak seçimi ise sezgisellerin seçilebilirlik matrisi (skor matrisi) yardımıyla yapılmaktadır. Hipotezi tersten düşündüğümüzde de, iterasyonlar sonucunda evrimleşerek nihai halini alan SSM matrisinin işaret ettiği pozisyon-alt sezgisel çiftleri probleme uygulandığında, üst sezgiselin bulduğu sonucun bulunabiliyor olması gerekir. Bu durum gerçekleştiğinde önerilen yaklaşımın ve temel hipotezin doğru ve başarılı şekilde çalıştığı söylenebilir. 4.4. başlığında açıklanan örnek problemi ele alacak olursak, problemin üst sezgisel ile çözümüne ait SSM matrisi Tablo 6. 1'de görülmektedir. SSM matrisindeki her bir pozisyona ait en yüksek değerlerin gösterdiği (aynı şartları sağlayan görevler arasından rastgele seçim yapılmaktadır) alt sezgiseller kullanılarak optimal çözümlerden birine ulaşılabilmektedir. Ulaşılan S1={C1,B1}, S2={A1,A3}, S3={B2}, S4={B3,B4},

S5={A2,A4}, S6={C2,B5}, S7={C3,C4}, S8={ B6,A5 } çözümü örnek problem için aynı amaç değerini veren bilinen en iyi çözümlerden bir tanesidir.

SSM matrisindeki değerlerin farklılaşması ile tercihlerin belirgin hale gelmesi ve optimal çözüme bu tercihler ile ulaşılabilmesi, başlangıçtaki hipotezimizin işe yarayabileceğini göstermektedir. Ancak, özellikle problem boyutu büyüdükçe ve atama zincirinin uzunluğu arttıkça, öğrenme etkisinin zayıfladığı yapılan denemelerden görülmüştür. Bunun yanında örneklerin çoğunda iterasyonlar sonucu elde edilen nihai SSM matrislerindeki alt sezgisel tercihlerinin istisna sayılabilecek birkaç durum dışında optimal çözüme götürmediği de diğer bir önemli gözlemdir. Tabi ki arama süreci içerisinde, SSM matrisindeki değerler değişirken, değerlerin bir noktasındaki tercihler algoritmayı optimal çözüme götürmüştür ancak, hipotezin genellenmesi mümkün görünmemektedir. Aslında ihtiyacımız olanda süreç sonunda değil süreç içerisinde bir yönlendirmedir ki, bunun da başarılı olabildiği görülmüştür.

Tablo 6. 1. Örnek problemin çözümü sonucunda elde edilen nihai SSM matrisi

| Alt sezgisel | Pozisyon (Görev atama sırası) 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| EkGZ | 15.15 | 18.59 | 39.79 | **3.98E+07** | 41.40 | 73.44 | 38.41 | 51.64 | 130.22 | 185.83 | 25.73 | 23.01 | 30.84 | 28.46 | 14.99 |
| EuGZ | 25.27 | **1.25E+07** | 58.16 | 24.08 | **8.15E+06** | **7.62E+07** | 42.16 | **3.74E+04** | 20.97 | 162.73 | 19.24 | 36.85 | 40.52 | 34.97 | 14.30 |
| EkTAGS | **3.11E+09** | 18.52 | 105.99 | 25.41 | 35.42 | 16.96 | 12.79 | 880.76 | **2.26E+03** | 32.95 | 53.93 | **3.45E+06** | 22.20 | 31.34 | 23.31 |
| EbTAGS | 20.78 | 22.17 | **5.81E+05** | 15.87 | 22.85 | 26.91 | **1.27E+06** | 31.74 | 106.73 | 19.51 | 21.31 | 34.11 | 21.31 | 34.84 | 38.82 |
| EbAGTZ | 13.31 | 31.19 | 23.40 | 23.26 | 38.68 | 112.65 | 52.67 | 44.09 | 58.03 | 36.98 | 27.93 | 33.69 | 40.67 | 17.24 | 142.71 |
| EkAGTZ | 44.71 | 68.95 | 67.02 | 32.95 | 42.61 | 17.14 | 242.43 | 24.42 | 55.98 | 27.44 | 45.22 | 29.91 | 37.92 | 32.26 | 19.16 |
| EbTÖGS | 30.02 | 21.73 | 36.20 | 29.12 | 27.54 | 43.23 | 20.97 | 105.19 | 63.09 | 29.12 | **1.52E+07** | 69.85 | 44.91 | **3.16E+08** | 18.03 |
| EkTÖGS | 15.67 | 63.25 | 27.44 | 94.61 | 101.10 | 21.34 | 20.37 | 102.97 | 56.17 | **4.23E+05** | 49.11 | 27.19 | 18.86 | 15.04 | 31.29 |
| EbÖGTZ | 11.69 | 58.88 | 21.85 | 28.86 | 35.68 | 18.79 | 30.40 | 18.23 | 189.34 | 26.44 | 24.91 | 71.47 | 50.82 | 21.89 | 50.63 |
| EkÖGTZ | 14.48 | 16.21 | 47.71 | 31.12 | 22.73 | 12.96 | 28.29 | 68.95 | 70.71 | 39.96 | 98.07 | 54.02 | 47.38 | 14.15 | 15.28 |
| EbMM | 15.84 | 68.95 | 80.19 | 25.32 | 18.25 | 16.75 | 150.72 | 23.47 | 183.13 | 72.28 | 14.15 | 25.14 | **9.98E+06** | 20.85 | **8.02E+07** |

| Pozisyon | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Alt Sezgisel | EkTAGS | EuGZ | EkGZ | EkGZ | EuGZ | EuGZ | EbTAGS | EuGZ | EkTAGS | EkTÖGS | EbTÖGS | EkTAGS | EbMM | EbTÖGS | EbMM |
| Atanabilir Görevler | A1, B1, B2, C1 | B1 | A1, B2, C2 | A2, A3 | A2, B2, C2 | A2, B3, C2 | B4 | A2, B5,C2 | A4 | A5, B5, C2 | B5 | A5, B6, C3, C4 | B6, C4 | A5,B6 | A5 |
| Seçilen Görev | C1 | B1 | A1 | A3 | B2 | B3 (Rastgele) | B4 | A2 | A4 | C2 | B5 | C3 (Rastgele) | C4 (Rastgele) | B6 | A5 |

## 6.2. Test Problemlerinin Çözüm Sonuçlarının Kıyaslanması

Stokastik paralel MHD problemi için önerilen tavlama benzetimi üst sezgiseli örnek problem üzerinde denenerek doğru şekilde çalıştığı gösterilmişti. Önerilen yaklaşımın doğru çalışmasının yanında etkinliği ve çözüm geliştirme potansiyelinin değerlendirilmesi için literatürdeki test problemleri üzerindeki performansının karşılaştırılması anlamlı olacaktır. Ancak başlıca bilimsel yayınların MHD araştırmalarının taranması sonucu makine/teçhizat maliyetli stokastik paralel MHD probleminin ele alındığı ve çözüm geliştirildiği bir araştırmaya ulaşmak mümkün olamamıştır. Ancak literatürde halihazırda stokastik basit MHD ve deterministik paralel MHD problemleriyle ilgili araştırmalar mevcuttur. Ayrıca Çerçioğlu (2009) tez çalışmasında makine/teçhizat maliyetleri dikkate alınmasa da stokastik paralel MHD problemi ele alınmış ve test problemlerinin sonuçları gösterilmiştir. Önerilen yaklaşımın etkinliğinin karşılaştırılması için çözüm yaklaşımında gerekli modifikasyonlar (stokastik tek modelli yapı, deterministik paralel MHD yapısı ve stokastik paralel MHD yapısı) yapılarak bu araştırmalar ve sonuçlarıyla bilgi amaçlı da olsa karşılaştırmalar yapmak mümkündür. Bu doğrultuda önerilen tavlama benzetimi üst sezgiselinde basit modifikasyonlar ile makine teçhizat maliyeti içermeyen; stokastik basit MHD, deterministik paralel MHD ve stokastik paralel MHD problemlerinin sonuçları elde edilerek önceki çalışmalarla karşılaştırılmıştır.

### 6.2.1. Stokastik Tek Modelli (Basit) MHD Problemi Açısından Karşılaştırma

Literatürdeki stokastik basit MHD problemleri ile ilgili çalışmalar 2.5.2. başlığında açıklanmıştı. Bu çalışmalardan, diğer birçok araştırmanın kaynağını da oluşturan temel çalışmaların başında Kottas ve Lau (1981) gelmektedir. Ayrıca Erel, Sabuncuoglu ve Sekerci (2005) çalışması da daha önceki çalışmalarda ele alınan aynı problemi esas alan ve daha başarılı sonuçlar üreten bir çözüm yaklaşımını ortaya koymaktadır. Bu araştırmalarca ortaya konan temel prensipler ve özellikler stokastik yapıya sahip hemen hemen tüm MHD problemlerinde ortak şekilde kullanılmaktadır. Dolayısıyla stokastik yapıdaki MHD problemleri için bu çalışmalar ile kıyaslamalar yapmak anlamlı olabilmektedir.

Bu tez çalışmasında önerilen tavlama benzetimi üst sezgiselinin stokastik basit MHD açısından etkinliğinin değerlendirilebilmesi için Kottas ve Lau (1981) ile Erel, Sabuncuoğlu ve Sekerci (2005) çalışmalarından elde edilen sonuçlarla karşılaştırma yapılmıştır. Bunun için paralel MHD problem yapısı için geliştirilen üst sezgisel algoritma tek modelli modelli MHD problemini çözebilecek şekilde, paralel yapıdaki 2.hatta dair bilgilerin dikkate alınmaması yoluyla kolayca modifiye edilerek basitleştirilmiştir. Problemle ilgili istasyon açma maliyeti, tamamlanamama maliyeti gibi parametreler için diğer iki çalışmada kullanılan aynı değerler esas alınmıştır.

Kıyaslama yapılan Erel, Sabuncuoglu ve Sekerci (2005) çalışmasında istasyon zamanının çevrim zamanını aşmamasının belirli bir olasılık değerinde garanti altına alınmasını sağlayan çevrim zamanını aşmama olasılığı yapısı kullanılmamış, görev seçiminde öncelikli faktör olarak sadece öncelik ilişkileri kullanılmıştır. Görev sıralaması belirlendikten sonra görevlerin zamanlarına ve çevrim zamanına göre istasyonlar belirlenerek, görevlerin tamamlanmama maliyetleri hesaplanmıştır. Dolayısıyla daha adil ve eşit şartlarda karşılaştırma yapabilmek için önerilen üst sezgisel yaklaşımda kullanılan (1-α) olasılık değeri %50 ihtimalden az olmamak kaydıyla manuel olarak denenerek bulunmuştur. Benzer şekilde, atanabilecek görevlerin seçiminde de 1-α seviyesine göre hesaplanan istasyon zamanından ziyade öncelik ilişkilerine göre adayların belirlendiği modifikasyon yapılmıştır. Tamamlanma olasılıklarının hesaplanmasında ise Erel, Sabuncuoglu ve Sekerci (2005) çalışmasında izlenilen ve bu çalışmada da kullanılan aynı yöntem benimsenmiştir. Üst sezgisel yaklaşımın temel özeliklerini bozmayan bu modifikasyon ile daha adil ve geçerli bir kıyaslama söz konusu olabilmektedir. Elde edilen sonuçların diğer iki çalışma ile karşılaştırması Tablo 6.2'de gösterilmiştir.

Tablo 6. 2'de verilen 72 problemden sadece 9'unde önceki çalışmaların daha iyi sonuçlar verdiği, diğer 63 problemde ise üst sezgisel yaklaşımın daha başarılı olduğu görülmektedir. Ayrıca önceki çalışmaların en fazla %6,8 civarında üst sezgiselden daha başarılı olabildiği görülmüştür. Üst sezgiselin geliştirdiği çözümler incelendiğinde %21.5' i bulan başarılı sonuçlar görülürken, bazı problem örneklerinde istasyon sayısından tasarruf da sağlanmıştır.

Tablo 6. 2. Literatürdeki stokastik basit MHD sonuçları ile karşılaştırma

| Problem | Çevrim zamanı | IC | σ | Demet Araması (Erel et al. 2005) | | Kottas &Lau | | Üst Sezgisel | | | % Gelişme |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | İst. Sayısı | Maliyet | İst. Sayısı | Maliyet | İst. Sayısı | Maliyet | Ø(1-α) | |
| Jackson 11 Görevli | 10 | 1.5 | 0.15 | 6 | 61.96 | 7 | 70.64 | 6 | 60.89 | 50.00 | 1.72 |
| | | | 0.25 | 6 | 67.23 | 7 | 75.55 | 6 | 66.69 | 57.93 | 0.80 |
| | | 5 | 0.15 | 6 | 65.34 | 7 | 72.09 | 6 | 62.98 | 50.00 | 3.61 |
| | | | 0.25 | 6 | 88.03 | 8 | 88.96 | 6 | 79.43 | 57.93 | **9.77** |
| | 15 | 1.5 | 0.15 | 3 | 59.13 | 4 | 60.28 | 4 | 60.00 | 57.93 | **-1.47** |
| | | | 0.25 | 4 | 62.75 | 4 | 62.83 | 4 | 61.83 | 57.93 | 1.47 |
| | | 5 | 0.15 | 4 | 60.93 | 4 | 64.59 | 4 | 60.00 | 57.93 | 1.53 |
| | | | 0.25 | 4 | 70.87 | 5 | 76.58 | 4 | 66.08 | 57.93 | **6.75** |
| | 20 | 1.5 | 0.15 | 3 | 60.7 | 3 | 60.85 | 3 | 60.00 | 90.32 | 1.15 |
| | | | 0.25 | 3 | 61.63 | 3 | 61.83 | 3 | 60.71 | 90.32 | 1.49 |
| | | 5 | 0.15 | 3 | 60.23 | 3 | 60.23 | 3 | 60.00 | 90.32 | 0.38 |
| | | | 0.25 | 3 | 63.42 | 3 | 64.83 | 3 | 62.54 | 90.32 | 1.39 |
| Mitchell 21 Görevli | 20 | 1.5 | 0.15 | 7 | 140.43 | 7 | 140.83 | 6 | 129.74 | 61.79 | **7.61** |
| | | | 0.25 | 7 | 146.88 | 7 | 148.44 | 6 | 135.15 | 50.00 | **7.99** |
| | | 5 | 0.15 | 7 | 140.65 | 7 | 140.95 | 7 | 140.58 | 90.15 | 0.05 |
| | | | 0.25 | 8 | 165.79 | 8 | 170.39 | 8 | 150.86 | 78.81 | 9.00 |
| | 30 | 1.5 | 0.15 | 4 | 122.57 | 4 | 123.77 | 4 | 122.31 | 75.80 | 0.21 |
| | | | 0.25 | 4 | 125.99 | 4 | 131.74 | 4 | 125.32 | 57.93 | 0.53 |
| | | 5 | 0.15 | 5 | 150.18 | 5 | 155.58 | 4 | 127.69 | 78.81 | **14.97** |
| | | | 0.25 | 5 | 151.52 | 5 | 151.66 | 5 | 150.12 | 78.81 | 0.92 |
| | 40 | 1.5 | 0.15 | 3 | 122.24 | 3 | 126.94 | 3 | 120.41 | 84.13 | 1.50 |
| | | | 0.25 | 3 | 123.14 | 3 | 123.8 | 3 | 123.08 | 61.79 | 0.05 |
| | | 5 | 0.15 | 3 | 122.4 | 3 | 122.72 | 3 | 120.80 | 72.57 | 1.31 |
| | | | 0.25 | 4 | 160.97 | 4 | 160.38 | 3 | 134.03 | 81.59 | **16.43** |
| Sawyer 30 Görevli | 40 | 1.5 | 0.15 | 10 | 406.32 | 10 | 420.62 | 10 | 403.41 | 50.00 | 0.72 |
| | | | 0.25 | 11 | 467.13 | 11 | 471.85 | 11 | 465.37 | 50.00 | 0.38 |
| | | 5 | 0.15 | 11 | 441.95 | 11 | 454.05 | 11 | 440.00 | 50.00 | 0.44 |
| | | | 0.25 | 12 | 500.23 | 12 | 508.7 | 12 | 505.06 | 65.54 | **-0.96** |
| | 70 | 1.5 | 0.15 | 5 | 371.06 | 5 | 373.95 | 5 | 368.70 | 57.93 | 0.63 |
| | | | 0.25 | 5 | 384.52 | 5 | 392.45 | 5 | 391.13 | 50.00 | **-1.72** |
| | | 5 | 0.15 | 6 | 423.15 | 6 | 422.67 | 6 | 417.86 | 50.00 | 1.14 |
| | | | 0.25 | 6 | 431.73 | 6 | 434.59 | 6 | 430.59 | 90.32 | 0.26 |
| | 100 | 1.5 | 0.15 | 4 | 404.28 | 4 | 403.31 | 4 | 400.00 | 93.32 | 0.82 |
| | | | 0.25 | 4 | 404.84 | 4 | 406.16 | 4 | 401.53 | 90.32 | 0.82 |
| | | 5 | 0.15 | 4 | 400.4 | 4 | 400.53 | 4 | 400.00 | 93.32 | 0.10 |
| | | | 0.25 | 4 | 407.89 | 4 | 408.68 | 4 | 404.69 | 90.32 | 0.78 |

Tablo 6.2 devamı

| | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Kilbridge 45 Görevli | 100 | 1.5 | 0.15 | 7 | 709.69 | 7 | 712.6 | 6 | 646.78 | 84.13 | **8.86** |
| | | | 0.25 | 7 | 708.19 | 7 | 713.94 | 7 | 708.45 | 72.57 | -0.04 |
| | | 5 | 0.15 | 7 | 705.92 | 7 | 707.07 | 7 | 700.21 | 91.92 | 0.81 |
| | | | 0.25 | 7 | 715.21 | 7 | 719.82 | 7 | 731.65 | 72.57 | **-2.30** |
| | 150 | 1.5 | 0.15 | 4 | 608.21 | 4 | 609.95 | 4 | 605.16 | 53.98 | 0.50 |
| | | | 0.25 | 5 | 756.27 | 5 | 757.06 | 5 | 636.40 | 53.98 | **15.85** |
| | | 5 | 0.15 | 5 | 755 | 5 | 753.95 | 4 | 617.19 | 53.98 | **18.14** |
| | | | 0.25 | 5 | 756.82 | 5 | 760.98 | 5 | 738.33 | 53.98 | 2.44 |
| | 200 | 1.5 | 0.15 | 3 | 603.42 | 3 | 604.31 | 3 | 602.65 | 83.89 | 0.13 |
| | | | 0.25 | 3 | 618.06 | 3 | 619.98 | 3 | 616.03 | 50.00 | 0.33 |
| | | 5 | 0.15 | 3 | 609.6 | 3 | 611.53 | 3 | 609.58 | 78.81 | 0.00 |
| | | | 0.25 | 4 | 806.7 | 4 | 808.88 | 3 | 684.57 | 72.57 | **15.14** |
| Warnecke 58 Görevli | 500 | 1.5 | 0.15 | 4 | 2005.36 | 4 | 2017.01 | 4 | 2000.20 | 90.32 | 0.26 |
| | | | 0.25 | 4 | 2008.47 | 4 | 2021.55 | 4 | 2005.50 | 93.32 | 0.15 |
| | | 5 | 0.15 | 4 | 2004.28 | 4 | 2004.37 | 4 | 2002.10 | 93.32 | 0.11 |
| | | | 0.25 | 4 | 2015.53 | 4 | 2017.59 | 4 | 2006.50 | 94.52 | 0.45 |
| | 600 | 1.5 | 0.15 | 3 | 1800.41 | 3 | 1807.98 | 3 | 1800.00 | 93.32 | 0.02 |
| | | | 0.25 | 3 | 1803.42 | 3 | 1805.97 | 3 | 1801.97 | 93.32 | 0.08 |
| | | 5 | 0.15 | 3 | 1800.31 | 3 | 1805.64 | 3 | 1800.00 | 94.52 | 0.02 |
| | | | 0.25 | 3 | 1812.15 | 3 | 1816.77 | 3 | 1806.54 | 93.32 | 0.31 |
| | 700 | 1.5 | 0.15 | 3 | 2106.24 | 3 | 2105.22 | 3 | 2101.67 | 90.32 | 0.17 |
| | | | 0.25 | 3 | 2105.63 | 3 | 2109.98 | 3 | 2101.96 | 93.32 | 0.17 |
| | | 5 | 0.15 | 3 | 2103.09 | 3 | 2106.59 | 3 | 2101.35 | 94.52 | 0.08 |
| | | | 0.25 | 3 | 2121.4 | 3 | 2107.2 | 3 | 2106.79 | 94.52 | 0.02 |
| Tonge 70 Görevli | 800 | 1.5 | 0.15 | 5 | 4006.04 | 5 | 4007.36 | 5 | 4004.97 | 95.54 | 0.03 |
| | | | 0.25 | 5 | 4044.19 | 6 | 4843.51 | 5 | 4175.41 | 50.00 | **-3.24** |
| | | 5 | 0.15 | 5 | 4030.83 | 5 | 4091.74 | 5 | 4026.28 | 93.32 | 0.11 |
| | | | 0.25 | 5 | 4174.48 | 5 | 4297.41 | 5 | 4261.75 | 59.87 | **-2.09** |
| | 1000 | 1.5 | 0.15 | 4 | 4003.69 | 4 | 4010 | 4 | 4000.27 | 90.32 | 0.09 |
| | | | 0.25 | 4 | 4016.54 | 4 | 4028.21 | 4 | 4026.23 | 90.32 | **-0.24** |
| | | 5 | 0.15 | 4 | 4050.62 | 4 | 4095.63 | 4 | 4000.07 | 90.32 | 1.25 |
| | | | 0.25 | 4 | 4100 | 4 | 4136 | 4 | 4091.02 | 65.54 | 0.22 |
| | 1200 | 1.5 | 0.15 | 4 | 4801.93 | 4 | 4801.32 | 3 | 3769.08 | 57.93 | **21.50** |
| | | | 0.25 | 4 | 4802.06 | 4 | 4816.6 | 3 | 4289.50 | 57.93 | **10.67** |
| | | 5 | 0.15 | 3 | 3885.45 | 4 | 4823.26 | 3 | 4141.30 | 53.98 | **-6.58** |
| | | | 0.25 | 4 | 4912.99 | 4 | 4931 | 4 | 4818.89 | 89.97 | 1.92 |

* Koyu renkli gösterilen değerler, önemli derece fark olan problem örneklerini göstermektedir.

Önerilen üst sezgisel yaklaşımın doğrulanması için stokastik tek modelli MHD problemi ile yapılan kıyaslamalarda, önerilen yaklaşımın genel olarak daha başarılı sonuçlar ürettiği ve dolayısıyla doğru ve başarılı bir şekilde çalıştığı görülmektedir. Ayrıca üst sezgisel yaklaşım ile elde edilen sonuçların herhangi bir özel ayarlama ve/vaya detaylı arama yapılmadan, mevcut aynı parametreler ile en fazla 10 çalıştırma

yapılarak elde edilen sonuçlar olduğu unutulmamalıdır. Çeşitli özel ayarlamalar ve çalıştırma sayısının arttırılmasıyla literatürdeki çalışmaların gerisinde kalan problemler için de daha başarılı sonuçlar elde edilebilmesi mümkündür.

### 6.2.2. Deterministik Paralel MHD Problemi Açısından Karşılaştırma

Paralel MHD probleminin Gökçen, Ağpak ve Benzer (2006) (GÖK) tarafından tanımlanmasından itibaren Scholl ve Boysen (2009) (matematiksel model için MOD ve ABSOLOM çözüm yaklaşımı için ABS), Özcan, Çerçioğlu, Gökçen vd. (2009) (tabu arama - TS) ve Özbakır, Baykasoglu, Gorkemli vd. (2011) (karınca koloni optimizasyonu – ACO) tarafından önerilen çözüm yaklaşımları ile geliştirilen üst sezgisel (ÜS) sonuçlarının kıyaslamaları yapılmıştır.

Görev zamanlarının deterministik olarak kabul edilmesi ve makine teçhizat maliyetleri olmadan, amaç fonksiyonunun düzgünlük indeksinin düzenlenmiş bir versiyonu olarak kullanıldığı önerilen üst sezgisel çözüm yaklaşımının, aynı test problemleri üzerinde çalıştırılmasıyla Tablo 6. 3'de gösterilen sonuçlar elde edilmiştir.

Karşılaştırma sonuçları incelendiğinde, önerilen üst sezgisel çözüm yaklaşımın özellikle küçü ve orta boyutlu problemlerde bilinen en iyi sonuçlara ulaştığı yada en fazla bir istasyon fazlasıyla çözüm bulduğu görülmektedir. Büyük boyutlu problemlerde ise bir çok problem örneğinde yine en fazla bir istasyon farkla bilinen en iyi çözümlere yaklaştığı görülmüştür. Sadece önerilen yaklaşımın doğrulanması amaçlı ve herhangi bir özel ayarlama yapmadan yapılan bu karşılaştırmalarda üst sezgisel yaklaşımın oldukça rekabetçi ve ümit verici sonuçlar ürettiği görülmektedir.

Tablo 6. 3. Deterministik paralel MHD sonuçları ile karşılaştırma

| Test Problemi | Görev Sayısı (Hat1 & Hat2) | Çevrim Zamanı | Teorik min. İst. Sayısı | Bağımsız İst. Sayısı | GÖK | MOD | ABS | TS | ACO | ÜS |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Merten | 7 | 9 | 6 | 4+3 | 7 | 7 | 7 | - | 7 | 7 |
| | | 11 | 5 | 3+3 | 5 | 5 | 5 | - | 5 | 5 |
| | 6 | 13 | 5 | 3+2 | 5 | 5 | 5 | - | 5 | 5 |
| | | 17 | 4 | 2+2 | 4 | 4 | 4 | - | 4 | 4 |
| Jaeschke | 9 | 9 | 8 | 5+4 | 8 | 8 | 8 | - | 8 | 8 |
| | | 11 | 7 | 4+4 | 7 | 7 | 7 | - | 7 | 7 |
| | 8 | 13 | 6 | 3+3 | 6 | 6 | 6 | - | 6 | 6 |
| | | 15 | 5 | 3+3 | 5 | 5 | 5 | - | 5 | 5 |
| | | 17 | 4 | 3+2 | 4 | 4 | 4 | - | 4 | 4 |
| Jackson | 11 | 8 | 11 | 7+6 | 13 | 13 | 13 | - | 13 | 13 |
| | | 10 | 9 | 5+5 | 9 | 9 | 9 | - | 9 | 9 |
| | 10 | 13 | 7 | 4+4 | 7 | 7 | 7 | - | 7 | 7 |
| | | 15 | 6 | 4+3 | 6 | 6 | 6 | - | 6 | 6 |
| | | 19 | 5 | 3+3 | 5 | 5 | 5 | - | 5 | 5 |
| Roszieg | 25 | 14 | 18 | 10+10 | 18 | 20 | 18 | - | 18 | 18 |
| | | 16 | 16 | 8+8 | 16 | 16 | 16 | - | 16 | 16 |
| | 24 | 17 | 15 | 8+8 | 15 | 16 | 15 | - | 15 | 15 |
| | | 22 | 12 | 6+6 | 12 | 12 | 12 | - | 12 | 12 |
| | | 30 | 9 | 5+5 | 9 | 9 | 9 | - | 9 | 9 |
| Sawyer | 30 | 25 | 26 | 14+13 | 26 | 28 | 26 | - | 26 | **27** |
| | | 27 | 24 | 13+12 | 25 | 26 | 24 | - | 24 | **25** |
| | 28 | 30 | 22 | 12+11 | 22 | 23 | 22 | - | 22 | 22 |
| | | 36 | 18 | 10+9 | 18 | 19 | 18 | - | 18 | 18 |
| | | 41 | 16 | 8+8 | 16 | 16 | 16 | - | 16 | 16 |
| | | 54 | 12 | 7+6 | 12 | 12 | 12 | - | 12 | 12 |
| Kilbridge | 45 | 57 | 20 | 10+10 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 |
| | | 79 | 14 | 7+7 | 14 | 15 | 14 | 14 | 14 | 14 |
| | 43 | 92 | 12 | 6+6 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 |
| | | 110 | 10 | 6+5 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| | | 138 | 8 | 4+4 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 |
| | | 184 | 6 | 3+3 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 |
| Hahn | 53 | 2004 | 14 | 8+7 | 14 | 17 | 14 | 14 | 14 | 14 |
| | | 2338 | 12 | 7+7 | 12 | 15 | 12 | 12 | 12 | 12 |
| | 51 | 2806 | 10 | 6+5 | 10 | 11 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| | | 3507 | 8 | 5+4 | 8 | 9 | 8 | 8 | 8 | 8 |
| | | 4676 | 6 | 4+3 | 6 | 7 | 6 | 6 | 6 | 6 |
| Tonge | 70 | 160 | 43 | 23+22 | 45 | 46 | 44 | - | 44 | **45** |
| | | 168 | 41 | 22+22 | 43 | 45 | 42 | - | 42 | **43** |
| | 66 | 207 | 34 | 18+17 | 34 | 35 | 34 | - | 34 | 34 |
| | | 234 | 30 | 16+15 | 30 | 32 | 30 | - | 30 | 30 |
| | | 270 | 26 | 14+13 | 26 | 27 | 26 | - | 26 | 26 |
| | | 293 | 24 | 13+12 | 24 | 25 | 24 | - | 24 | 24 |
| Wee-Mag | 75 | 28 | 105 | 63+60 | 123 | 123 | 123 | 123 | 123 | 123 |
| | | 29 | 102 | 63+60 | 123 | 123 | 123 | 123 | 123 | 123 |
| | 71 | 31 | 95 | 62+60 | 121 | 122 | 121 | 121 | 121 | 121 |
| | | 33 | 89 | 61+59 | 119 | 120 | 119 | 119 | 119 | 119 |
| | | 34 | 87 | 61+59 | 119 | 120 | 119 | 119 | 119 | 119 |
| | | 41 | 72 | 59+57 | 116 | 116 | 116 | 116 | 116 | 116 |
| | | 42 | 70 | 55+53 | 107 | 108 | 107 | 107 | 107 | 107 |

| | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 43 | 69 | 50+48 | 98 | 98 | 98 | 98 | 98 | 98 |
| | | 49 | 60 | 32+31 | 62 | 63 | 62 | 63 | 62 | **63** |
| | | 54 | 55 | 31+30 | 60 | 61 | 60 | 60 | 60 | 60 |
| Arcusl | 83 | 3786 | 39 | 21+19 | 40 | 42 | 40 | 40 | 40 | 40 |
| | | 3985 | 37 | 20+19 | 38 | 40 | 37 | 38 | 38 | **38** |
| | | 4206 | 35 | 19+17 | 36 | 38 | 36 | 36 | 36 | 36 |
| | | 4454 | 33 | 18+17 | 34 | 35 | 34 | 34 | 34 | 34 |
| | | 4732 | 31 | 17+16 | 32 | 33 | 32 | 32 | 32 | 32 |
| | 79 | 5853 | 25 | 14+12 | 26 | 26 | 25 | 26 | 25 | **26** |
| | | 6842 | 22 | 12+11 | 22 | 23 | 22 | 22 | 22 | 22 |
| | | 7571 | 20 | 11+10 | 20 | 21 | 20 | 20 | 20 | 20 |
| | | 8412 | 18 | 10+9 | 18 | 19 | 18 | 18 | 18 | 18 |
| | | 10816 | 14 | 8+7 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 |
| Lutz2 | 89 | 11 | 86 | 49+46 | 90 | 97 | 88 | - | 89 | **89** |
| | | 12 | 79 | 44+41 | 82 | 88 | 79 | - | 80 | **82** |
| | | 13 | 73 | 40+38 | 75 | 81 | 73 | - | 73 | **75** |
| | | 14 | 68 | 37+35 | 71 | 79 | 69 | - | 68 | **71** |
| | | 15 | 63 | 34+32 | 64 | 68 | 63 | - | 63 | **65** |
| | 85 | 16 | 59 | 31+30 | 60 | 66 | 59 | - | 59 | **60** |
| | | 17 | 56 | 29+28 | 56 | 60 | 56 | - | 56 | **57** |
| | | 19 | 50 | 26+25 | 50 | 53 | 50 | - | 50 | **51** |
| | | 20 | 47 | 25+24 | 48 | 51 | 47 | - | 48 | **48** |
| Lutz3 | 89 | 75 | 43 | 23+22 | 45 | 46 | 44 | 44 | 44 | 44 |
| | | 79 | 41 | 22+22 | 43 | 45 | 41 | 42 | 41 | **42** |
| | | 83 | 39 | 21+21 | 40 | 43 | 39 | 40 | 39 | **40** |
| | 85 | 87 | 37 | 20+19 | 38 | 40 | 37 | 38 | 38 | **38** |
| | | 92 | 35 | 19+18 | 36 | 37 | 35 | 36 | 35 | **36** |
| Mukherje | 94 | 176 | 47 | 25+24 | 48 | 49 | 48 | 48 | 47 | **48** |
| | | 183 | 45 | 24+23 | 46 | 47 | 45 | 46 | 45 | **46** |
| | | 192 | 43 | 23+21 | 44 | 44 | 43 | 44 | 43 | **44** |
| | | 201 | 41 | 22+20 | 42 | 44 | 41 | 42 | 41 | **42** |
| | | 211 | 39 | 21+19 | 40 | 40 | 39 | 40 | 39 | **40** |
| | | 222 | 37 | 20+18 | 38 | 40 | 38 | 38 | 37 | **38** |
| | | 234 | 35 | 19+18 | 36 | 37 | 36 | 36 | 35 | **36** |
| | 90 | 248 | 33 | 18+17 | 34 | 35 | 33 | 34 | 33 | **34** |
| | | 263 | 31 | 17+16 | 32 | 33 | 32 | 32 | 32 | 32 |
| | | 281 | 29 | 16+15 | 30 | 31 | 30 | 30 | 29 | **30** |
| | | 301 | 27 | 15+14 | 28 | 29 | 28 | 28 | 28 | 28 |
| | | 324 | 26 | 14+13 | 26 | 27 | 26 | 26 | 26 | 26 |
| | | 351 | 24 | 13+12 | 24 | 25 | 24 | 24 | 24 | 24 |
| Arcus2 | 111 | 5785 | 52 | 27+28 | 55 | 54 | 53 | 54 | 53 | 53 |
| | | 6016 | 50 | 26+27 | 53 | 52 | 51 | 51 | 51 | 51 |
| | | 6267 | 48 | 25+26 | 50 | 50 | 49 | 50 | 49 | 49 |
| | 107 | 6540 | 46 | 24+25 | 48 | 50 | 47 | 48 | 47 | 47 |
| | | 6837 | 44 | 23+24 | 46 | 48 | 45 | 45 | 45 | 45 |
| | | 7162 | 42 | 22+22 | 44 | 44 | 43 | 43 | 43 | 43 |

### 6.2.3. Stokastik Paralel MHD Problemi Açısından Karşılaştırma

Çerçioğlu (2009) tarafından hazırlanan tez ile stokastik paralel MHD problemi ele alınmıştır. Çalışmada doğrusal dönüşüm ve doğrusal yaklaşım olmak üzere iki matematiksel programlama yaklaşımı açıklanmış ancak sadece doğrusal dönüşüm metodu ile en büyük Jackson problemi boyutunda, doğrusal yaklaşım metodu ile ise en fazla Sawyer problemi boyutundaki problemlere çözüm bulunabildiği belirtilmiştir. Çalışmada 3 seçim kriterli ($r$, $c^*$ ve $cv$ seçim kriterleri) bir sezgisel yöntem de sunulmuştur. Bu sezgiselden başka birde maliyete yönelik bir sezgisel daha açıklanmıştır. Çalışmada matematiksel programlama modelleri sonuçları için 72000 sn limiti kullanılmış, sezgisel yaklaşımlar için ise 20000 iterasyon limiti kullanılmıştır. Sezgisel yöntemlerde 5 çalıştırma sonucunda elde edilen en iyi sonuç rapor edilmiştir. Bu tez çalışmasında da maliyet temelli bir amaç fonksiyonu kullandığımız düşünüldüğünde özellikle maliyete yönelik sezgisel ile kıyaslamalar oldukça anlamlı olacaktır.

Makine ve teçhizat maliyetleri olmadan, işçilik ve tamamlanmama maliyetlerinin dikkate alındığı, amaç fonksiyonu ve diğer tüm kriter ve hesaplamalar Çerçioğlu (2009) çalışması ile aynı şekilde kullanılarak test problemlerine çözümler üretilmiştir. Ancak ilgili çalışmada görev zamanlarının standart sapma değeri rastgele üretildiğinden ve test problemleri verilerinden sadece Jackson problemi verileri rapor edildiğinden sadece Jackson problemi için birebir aynı veriler kullanılmış, diğer problemler için aynı yaklaşımla standart sapma değerleri üretilmiştir. Üst sezgisel yaklaşım ile Çerçioğlu (2009) çalışmasında sunulan test problemleri sonuçları Ek 3'de görülmektedir. Test problemlerinin sonuçlarına ait özet bilgiler Tablo 6. 4'de özetlenmiştir. Tabloda daha az istasyon sayısı ile çözüm geliştirilen problem örneği sayıları gösterilirken, çözüm yöntemlerinin aynı istasyon sayısı değerini bulması durumunda tamamlanmama maliyeti açısından daha düşük tamamlanmama maliyeti için çözüm bulunan problem örneği sayısı parantez içerisindeki değerler ile gösterilmiştir.

Tablo 6. 4. Stokastik paralel MHD sonuçları ile karşılaştırma

| Örnek Problem | Problem Örneği Sayısı | Mat. Prog. Modelinin Üst Sezgiselden daha başarılı olduğu örnek sayısı | Üst sezgiselin Mat. Prog. Modelinden daha başarılı olduğu örnek sayısı | Çercioglu (2009) sezgisellerinin Üst Sezgiselden daha başarılı olduğu örnek sayısı | Üst Sezgiselin Çercioglu (2009) sezgisellerinden daha başarılı olduğu örnek sayısı | Üst Sezgiselin teorik min istasyon sayısı (K) ulaştığı örnek sayısı |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Mertens | 36 | 17 | 1 | 2(31) | 3(0) | 12 |
| Jaeschke | 45 | 13 | 2 | 0 (24) | 21(0) | 23 |
| Jackson | 45 | 8 | 25 | 0(30) | 5(10) | 11 |
| Roszieg | 45 | 3 | 29 | 8(25) | 3(9) | 3 |
| Sawyer | 54 | 4 | 16 | 0(19) | 26(9) | 4 |
| Kilbridge | 54 | | | 0(2) | 2 (50) | 20 |
| Hahn | 63 | | | 2(10) | 18 (43) | 22 |
| Tonge | 54 | | | 0(0) | 19 (35) | 1 |
| Wee-Mag | 90 | | | 29(23) | 38(0) | 0 |
| Lutz2 | 81 | | | 0(0) | 65 (16) | 0 |
| Lutz3 | 45 | | | 0(0) | 21 (24) | 0 |
| Mukherje | 117 | | | 0(0) | 35(82) | 1 |
| Arc1 | 90 | | | 0(0) | 26 (64) | 5 |
| Arc2 | 54 | | | 1(0) | 37 (16) | 0 |
| Toplam | 857 | 45 | 73 | 42(164) | 319 (358) | 102 |

Literatürdeki test problemlerinin çeşitli çevrim zamanlarında, 3 farklı tamamlanmama olasılığı (%85, %90, %95) ve 3 farklı varyans seviyesi (düşük, rassal, yüksek) için toplam 857 problemden oluşan stokastik paralel MHD problemi ile yapılan karşılaştırmada;

- Matematiksel programlama modelinin 72000 sn limiti içerisinde çözüm üretebildiği 195 problemden 45'inde (%23) matematiksel model daha az sayıda istasyon sayısı bulurken, üst sezgisel 73 problemde (%37) daha az istasyon sayısına sahip sonuç üretmiştir
- Tamamlanmama maliyeti dikkate alınmadan sadece istasyon sayıları açısından kıyaslama yapıldığında, toplam 857 problemden sadece 42 problem örneğinde (%4.9) Çercioğlu (2009) çalışmasında açıklanan sezgisel yaklaşımlar üst sezgiselden daha başarılı olurken, 319 problem örneğinde (%37.2) üst sezgisel daha başarılı olmuştur. Burada Çerçioğlu (2009) sezgiselleri, hem istasyon sayısının minimizasyonu amaçlı basit sezgisellerin hem de maliyet tabanlı sezgiselin sonuçlarını içermektedir.
- İstasyon sayısının tüm yaklaşımlarda eşit olarak bulunduğu durumda, hesaplanan tamamlanmama maliyeti açısından kıyaslama yapıldığında; 164 problem örneğinde (%31.4) Çerçioğlu (2009) daha düşük maliyetli çözümler bulurken, 358 problem örneğinde (%68.6) üst sezgisel daha başarılı sonuçlar üretmiştir. Tamamlanmama maliyetleri açısından dikkat çeken bir nokta da Çerçioğlu (2009) sezgisellerinin maliyet başarısının özellikle küçük boyutlu problemlerde olması, büyük boyutlu problemlerde ise üst sezgiselin önemli farklarla daha başarılı olmasıdır. Bunun nedeni olarak işçilik maliyeti ve tamamlanmama maliyet arasındaki marjinal etkileşimin küçük boyutlu problemlerde sonuca daha kolay yansıması olarak gösterilebilir. Problem boyutu büyüdükçe bu marjinal etkileşimin ileriki istasyonlara etkisi çok daha büyük maliyetler olarak gerçekleşebildiğinden, üst sezgisel bu açıdan da oldukça faydalı bulunmuştur.
- Toplam 857 problem örneğinden 102'inde (%12) üst sezgisel yaklaşım teorik minimum istasyon sayısında çözümler üretebilmiştir.
- Üst sezgiselin daha az sayıda istasyon sayısı ürettiği durumlarda (özellikle büyük boyutlu problemlerde), istasyon sayıları arasındaki fark 5 istasyona kadar

çıkabilmektedir. Bu durum üst sezgiselin nispeten büyük çözüm uzaylarında daha etkin arama yapabildiğini göstermektedir.

Kıyaslama tabloları ile ilgili önemli husus da Çerçioğlu (2009) çalışmasındaki verilerin kayıtlı olmamasından dolayı, prosedüre uygun olarak üretilse dahi varyanslardaki farklılaşmanın sonuca önemli etkisinin söz konusu olabileceğidir. Özellikle Wee-mag probleminin sonuçlarında (az sayıda da olsa Arc1 ve Arc2 problemlerinde de) şüpheler (farklı varyans seviyeleri için aynı istasyon sayısı gibi) bulunmaktadır. Rastgele üretilen varyans oranlarındaki farklılıklardan ya da yazım hatasından kaynaklanabilecek basit hataların (Ek 2 deki tablolarda kırmızı renk ile işaretlenmiştir) olabileceği görülmektedir. Dolayısıyla üst sezgiselin gerçek başarı oranının daha da yüksek olması kuvvetle muhtemeldir.

Sonuçlardan da görüldüğü üzere, stokastik paralel MHD problemi açısından Çerçioğlu (2009) çalışmasında rapor edilen sonuçlarla kıyaslandığında, üst sezgisel yaklaşım oldukça başarılı sonuçlar üretmiştir. Hatta 102 problem örneğinde teorik minimum istasyon sayısı değerine ulaşmıştır. Aynı istasyon sayısına sahip çözümlerde tamamlanmama maliyeti açısından küçük boyutlu problemlerde Çercioğlu (2009) sonuçları nispeten az farklarla daha başarılı olurken, büyük boyutlu problemlerde üst sezgisel yaklaşım oldukça büyük farklarla daha düşük tamamlanmama maliyeti sunmuştur.

### 6.3. Sezgisel Algoritmaların Özellikleri Açısından Değerlendirme

Sezgisel algoritmalar, optimum çözümü garanti edemeyen ancak optimum çözüme yakınsama özelliğine sahip, hesaplama süreci nispeten kolay ve hızlı algoritmalardır. Sezgisel algoritmaların etkinliğinin değerlendirilmesinde çözüm kalitesi, hesaplama zamanı, kolay kodlanabilmesi ve uygulanabilirliği, esneklik, dinçlik (robustness), basitlik ve analiz edilebilirlik ve etkileşimli hesaplama ve teknoloji değişimleri (Karaboğa, 2004) gibi kriterler kullanılabilmektedir. Bu kriterler doğruluk, kararlılık, ölçeklenebilirlik ve dinçlik olmak üzere (Younas, Kamrani, Schulte et al. to appear) 4 başlıkta aşağıdaki gibi incelenmiştir.

### 6.3.1. Doğruluk ve Esneklik

Önerilen üst sezgisel yaklaşımın doğruluğu ve esnekliğine yönelik değerlendirmelerde literatürdeki diğer çalışmalarla yapılan karşılaştırmalar kullanılabilir. Stokastik paralel MHD problemlerinin çözümü için geliştirilen tavlama benzetimi üst sezgiselinin, algoritmanın ana yapısında değişiklik yapmadan sadece parametre ve karar değeri değişiklikleriyle kolayca stokastik basit MHD ve deterministik paralel MHD problemlerine uygulanabilmesi, algoritmanın esnekliğinin önemli bir göstergesidir. Elde edilen sonuçların mevcut literatürdeki sonuçların birçoğuyla örtüştüğü ve yarışabilir seviyede olması da algoritmanın doğruluğunun önemli bir işaretidir.

### 6.3.2. Kararlılık

Önerilen üst sezgisel çözüm yaklaşımının kararlılığının (stabilitiy) analiz edilmesi için (Younas, Kamrani, Schulte et al. to appear) çalışmasına benzer şekilde, küçük, orta ve büyük boyutlu problemler üzerinde her seferinde 10 kez çalıştırılarak sonuçlar ve işlem zamanı kaydedilmiştir. Her bir çalıştırmada elde edilen sonucun, bu 10 çalıştırmanın en iyi sonucundan yüzdesel farklarının ortalaması ortalama sapma (*ortSapma*) olarak isimlendirilmiştir. $S_i$, $i$. çalıştırmanın çözüm değeri, $S_b$ problem için bulunan en iyi çözüm değeri ve $\sigma$ standart sapma olmak üzere, $ortSapma$, $sapma_i$ ve $\sigma$ eşitlik (6.1-3) deki gibi hesaplanmaktadır.

$$ortSapma = \frac{1}{10}\sum_{i=1}^{10} sapma_i \tag{6.1}$$

$$sapma_i = ((S_b - S_i)/S_b) \times 100 \tag{6.2}$$

$$\sigma = \sqrt{1/10\sum_{i=1}^{10}(sapma_i - ortSapma)^2} \tag{6.3}$$

Küçük (Jackson), orta (Hahn) ve büyük (Arc2) boyutlu problemlerin 10 çalıştırma sonucunda elde edilen sonuçlarına göre hesaplanan ortalama sapma (%) ve standart sapma (%) değerleri Tablo 6.5'de görülmektedir.

Tablo 6. 5. Kararlılık analizi için ortalama sapma (%) ve standart sapma (%)

| | **Jackson Problemi** | | **Hahn Problemi** | | **Arc2 Problemi** | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Problem** | **(%) ort sapma** | **σ (%)** | **(%) ort sapma** | **σ (%)** | **(%) ort sapma** | **σ (%)** |
| Problem1 | 3.21 | 1.79 | 1.02 | 0.68 | 2.09 | 0.91 |
| Problem2 | 1.48 | 0.62 | 0.99 | 0.53 | 2.15 | 0.85 |
| Problem3 | 0.72 | 0.31 | 1.08 | 0.60 | 1.99 | 0.82 |
| Problem4 | 3.02 | 1.87 | 1.31 | 0.76 | 1.21 | 0.58 |
| Problem5 | 0.92 | 0.58 | 1.11 | 0.70 | 1.89 | 0.83 |
| Problem6 | 0.58 | 0.32 | 0.85 | 0.43 | 3.30 | 1.07 |
| Problem7 | 2.66 | 1.60 | 1.33 | 0.78 | 2.01 | 0.76 |
| Problem8 | 1.71 | 0.67 | 0.76 | 0.62 | 2.10 | 0.94 |
| Problem9 | 0.64 | 0.23 | 0.63 | 0.43 | 2.56 | 1.05 |
| Problem10 | 1.75 | 0.58 | 0.95 | 0.48 | 1.66 | 0.78 |
| Problem11 | 1.92 | 1.04 | 0.70 | 0.49 | 1.93 | 0.84 |
| Problem12 | 1.90 | 1.13 | 0.61 | 0.56 | 2.17 | 0.99 |
| Problem13 | 1.76 | 0.87 | 0.66 | 0.55 | 1.97 | 0.93 |
| Problem14 | 1.83 | 1.10 | 0.51 | 0.30 | 1.90 | 0.70 |
| Problem15 | 1.77 | 1.07 | 0.82 | 0.49 | 2.97 | 0.85 |
| Problem16 | 2.20 | 1.01 | 1.08 | 0.63 | 1.54 | 0.73 |
| Problem17 | 2.34 | 1.23 | 0.57 | 0.31 | 1.43 | 0.71 |
| Problem18 | 0.41 | 0.23 | 0.51 | 0.27 | 2.20 | 0.92 |
| Problem19 | 6.02 | 1.99 | 0.78 | 0.66 | 2.04 | 0.86 |
| Problem20 | 1.07 | 0.63 | 0.97 | 0.48 | 2.42 | 1.29 |
| Problem21 | 0.96 | 0.43 | 0.75 | 0.37 | 2.11 | 0.92 |
| Problem22 | 5.40 | 2.74 | 1.20 | 0.75 | 2.11 | 0.86 |
| Problem23 | 1.66 | 0.75 | 1.22 | 0.67 | 1.69 | 0.92 |
| Problem24 | 2.27 | 0.64 | 0.38 | 0.35 | 1.97 | 0.97 |
| Problem25 | 6.84 | 2.31 | 1.22 | 0.74 | 1.85 | 0.81 |
| Problem26 | 2.34 | 1.05 | 1.96 | 0.86 | 3.04 | 1.25 |
| Problem27 | 1.93 | 0.61 | 0.75 | 0.37 | 2.17 | 0.92 |
| Problem28 | 1.11 | 0.57 | 0.93 | 0.54 | 2.32 | 1.14 |
| Problem29 | 1.57 | 0.88 | 0.72 | 0.54 | 1.55 | 0.86 |
| Problem30 | 1.00 | 0.53 | 1.12 | 0.53 | 2.17 | 0.94 |
| Problem31 | 1.30 | 0.39 | 1.22 | 0.64 | 1.88 | 0.85 |
| Problem32 | 1.75 | 1.02 | 0.61 | 0.43 | 2.34 | 0.90 |
| Problem33 | 0.99 | 0.59 | 0.87 | 0.48 | 2.13 | 0.98 |
| Problem34 | 0.73 | 0.41 | 0.72 | 0.44 | 2.13 | 0.92 |
| Problem35 | 1.96 | 1.41 | 1.06 | 0.65 | 2.75 | 1.17 |
| Problem36 | 1.00 | 0.69 | 0.99 | 0.41 | 1.92 | 0.97 |
| Problem37 | 4.15 | 1.61 | 1.16 | 0.52 | 3.57 | 1.31 |
| Problem38 | 1.69 | 0.85 | 1.75 | 1.32 | 2.03 | 0.91 |
| Problem39 | 0.58 | 0.35 | 1.21 | 0.65 | 3.56 | 1.12 |
| Problem40 | 3.36 | 2.38 | 0.62 | 0.46 | 2.51 | 1.02 |

Tablo 6.5 devamı

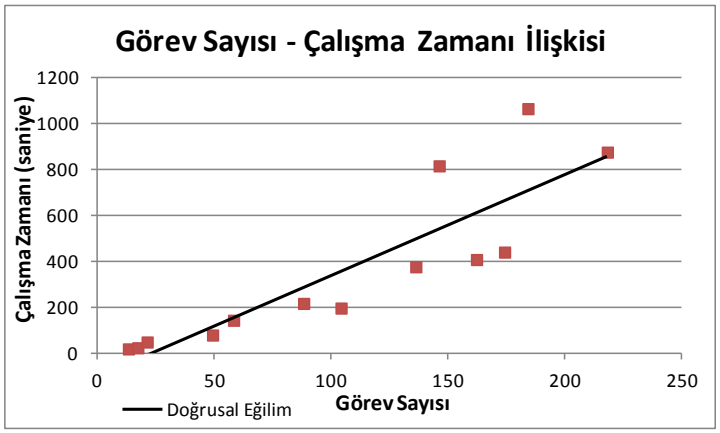
| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Problem41 | 1.33 | 0.77 | 1.25 | 0.87 | 2.36 | 1.03 |
| Problem42 | 0.88 | 0.37 | 0.53 | 0.39 | 1.73 | 0.88 |
| Problem43 | 4.33 | 1.88 | 1.55 | 0.65 | 1.97 | 0.93 |
| Problem44 | 1.40 | 0.59 | 1.04 | 0.89 | 1.48 | 0.71 |
| Problem45 | 0.85 | 0.52 | 0.46 | 0.30 | 3.40 | 1.16 |
| Problem46 | | | 1.22 | 0.91 | 3.52 | 1.39 |
| Problem47 | | | 0.94 | 0.46 | 1.71 | 0.77 |
| Problem48 | | | 0.88 | 0.64 | 1.41 | 0.79 |
| Problem49 | | | 2.10 | 0.91 | 2.69 | 0.97 |
| Problem50 | | | 0.68 | 0.38 | 1.98 | 0.91 |
| Problem51 | | | 1.16 | 0.62 | 2.19 | 0.79 |
| Problem52 | | | 0.74 | 0.41 | 2.45 | 1.16 |
| Problem53 | | | 1.55 | 0.84 | 2.12 | 0.92 |
| Problem54 | | | 1.92 | 0.90 | 2.22 | 0.78 |
| Problem55 | | | 0.69 | 0.40 | | |
| Problem56 | | | 0.51 | 0.33 | | |
| Problem57 | | | 0.92 | 0.42 | | |
| Problem58 | | | 0.49 | 0.32 | | |
| Problem59 | | | 0.52 | 0.28 | | |
| Problem60 | | | 0.70 | 0.50 | | |
| Problem61 | | | 0.40 | 0.29 | | |
| Problem62 | | | 0.41 | 0.22 | | |
| Problem63 | | | 0.46 | 0.30 | | |

Problemlerin isimlendirilmesinde çevrim zamanı, tamamlanma olasılıkları ve varyans tipi kullanılmış ancak her bir problemin farklı çevrim zamanlarının olması sebebiyle problem numarası ile isimlendirilmiştir. Problemler, her bir çevrim zamanı (c), tamamlanmama olasılığı (1-α) ve varyans kategorisine (düşük, rassal ve yüksek) göre Ek 2'deki sıralarıyla aynı olacak şekilde sıralanmış olarak problem numarasına göre gösterilmiştir.

Tablodan da görüldüğü üzere önerilen çözüm yaklaşımı oldukça küçük σ değerleri ile kararlı bir özellik göstermektedir. Jackson problemi için en büyük ortalama sapma %6.84, standart sapma ise %2.74 olarak bulunmuştur. Hahn probleminde en büyük ortalama sapma %2.10, σ=%1.32; Arc2 probleminde ise sırasıyla %3.58 ve %1.39 olarak bulunmuştur. Oldukça düşük ortalama sapma ve standart sapma değerleri önerilen üst sezgisel yaklaşımın problem boyutundan bağımsız olarak kararlı bir şekilde çalıştığını göstermektedir.

### 6.3.3. Ölçeklenebilirlik

Geliştirilen bir algoritma eğer büyük boyutlu problemlere uygulandığında da başarılı oluyor ve etkili çözümler üretebiliyorsa, algoritmanın ölçeklenebilirliğinden (scalability) söz edilebilmektedir (Younas, Kamrani, Schulte et al. to appear). Tablo 6. 5'de verilen sonuçlardan da görüldüğü üzere, problem türü ve problem boyutundan bağımsız olarak, önerilen tavlama benzetimi üst sezgiseli büyük boyutlu problemlerde de en fazla %3.58 ortalama sapma ve %1.39 standart sapma ile sonuçlar üretmektedir. Hatta standart sapma oranları incelendiğinde problem boyutu büyüdükçe standart sapmanın azaldığı dolayısıyla büyük boyutlu problemde daha başarılı sonuçlar elde edildiği görülebilmektedir.




Şekil 6. 1. Görev sayısı ve algoritmanın çalışma zamanı arasındaki ilişki

Önerilen çözüm yaklaşımının ölçeklenebilirliğinin yani problem boyutundan bağımsız olarak çözüm üretebilme yeteneğini, problem boyutu ve çözüm için harcanan zaman arasındaki ilişki incelenerek de araştırılabilir. MHD problemlerinde problemin çözüm uzayının büyüklüğünün en önemli ölçütlerinin başında görev sayısı gelmektedir. Problem boyutu büyüdükçe çözüm zamanının da artması beklenen olağan bir durumdur ancak daha da önemlisi problem boyutundaki büyümeden daha az bir artış oranıyla çözüm zamanının artmasıdır. Şekil 6. 1'de gösterilen görev sayısı ve çalışma zamanı grafiğinde; görev sayısı artarak problem boyutu büyüdüğünde çalışma zamanının ortalama olarak doğrusal şekilde arttığı, üstel bir artışın söz konusu olmadığı görülmektedir.

### 6.3.4. Dinçlik – Sağlamlık

Bir algoritmanın sağlamlığı (robustness), girdi verilerinin farklı bir dağılım gibi aynı nitelikte fakat farklı özelliklerde olması durumunda da optimal veya optimale yakın değerler üretebilme yeteneği olarak açıklanabilir. Ele alınan stokastik paralel MHD probleminde ve diğer stokastik MHD problemlerinde görev zamanları normal dağılım ile gösterilmektedir. Zaten başka bir dağılımın (uniform gibi) kullanılması da gerçek yaşama uygun bir durum olmamaktadır Dolayısıyla görev zamanları açısından girdi verisinin dağılımının değiştirilmesi anlamlı bir durum olmamaktadır. Ancak önerilen çözüm yaklaşımında girdi olarak görev zamanlarından başka birde çözüm yaklaşımının gerektirdiği parametreler kullanılmaktadır. Sonuçta bu parametreler farklı değerler alabilmekte ve dolayısıyla çözüme etki edebilmektedir. Dolayısıyla parametrelerin farklı değerleri için çözüm sonucunun nasıl değişeceği, algoritmanın sağlamlığının bir göstergesi olarak değerlendirilebilir.

Deneysel çalışma bölümünde parametre değerlerinin belirlenmesine yönelik deneyler detaylı olarak açıklanmıştır. Tam faktöryel deney çalışmasında sonuç optimizasyon modülü ile parametrelerin farklı değerlerinin etkileri birlikte değerlendirilebilmekte ve farklı parametrelerin birlikte arzu edilebilirlik dereceleri belirlenebilmektedir. Sonuç optimizasyon modülünde minimum ve maksimum değerler değişmeksizin, sadece parametre değerlerinin değişmesiyle elde edilmesi beklenen sonuç değerleri ve arzu edilebilirlik değeri hesaplanabilmektedir. Sonuç optimizasyon modülü ile tüm parametrelerin her iki seviyesi için bulunan F amaç fonksiyonu değerinin ortalama sapma ve standart sapma değerleri Tablo 6. 6'da gösterilmiştir.

Tablo 6. 6. Parametrelerin farklı değerleri için ortalama sapma ve standart sapma

| | Jackson | | Hahn | | Arc2 | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Ort sapma | σ | Ort sapma | σ | Ort sapma | σ |
| min F | 0,003 | 0,009 | 0,003 | 0,007 | 0,006 | 0,010 |

Tablodan da görüldüğü üzere tüm problem türlerinde parametrelerin her iki seviyelerinden elde edilen amaç fonksiyonu değerlerindeki değişim, oldukça küçük ortalama sapma ve standart sapma değerlerine sahiptir. Dolayısıyla önerilen üst sezgisel

algoritmanın sağlam şekilde çalıştığı, girdilerdeki değişimin algoritmanın performansını neredeyse etkilenemediği söylenebilir.

### 6.4. Amaç Fonksiyonu Bileşenlerinin Çözümü Yönlendirebilme Etkisi

Paralel montaj hattı yapılarında makine/teçhizat sayısından ve dolayısıyla maliyetlerinden tasarruf edebilme imkanı ortaya çıkabileceği önceki başlıklarda açıklanmıştı. Önerilen üst sezgisel yaklaşımın, makine/teçhizat maliyetlerindeki değişime ne kadar duyarlı olarak çalıştığını gösterebilmek için Jackson probleminin c=14 çevrim zamanı, 1-α=0.95 tamamlanma olasılığı ve $\sigma^2$=rassal varyans durumu için yapılan tek bir çalıştırmadan elde edilen sonuçların, amaç fonksiyonuna göre sıralanmış ilk 20 sonucu Tablo 6. 7'de gösterilmiştir.

Tablo 6. 7. Amaç fonksiyonu bileşenleri ve maliyet değerleri

| İterasyon no | İstasyon sayısı | F1 İşçilik Maliyeti | F2 Tamamlanmama maliyeti | F3 Makine/techizat maliyeti | F1+F2+F3 Toplam Maliyet |
|---|---|---|---|---|---|
| 2043 | 9 | 126 | 6,792 | 37,703 | 170,496 |
| 2046 | 9 | 126 | 8,547 | 37,703 | 172,250 |
| 1321 | 9 | 126 | 12,812 | 35,073 | 173,885 |
| 3821 | 9 | 126 | 8,849 | 39,745 | 174,594 |
| 2505 | 9 | 126 | 8,862 | 39,745 | 174,608 |
| 738 | 9 | 126 | 9,335 | 39,420 | 174,755 |
| 1684 | 9 | 126 | 7,435 | 41,388 | 174,823 |
| 644 | 9 | 126 | 7,598 | 41,388 | 174,986 |
| 163 | 9 | 126 | 7,679 | 41,388 | 175,067 |
| 614 | 9 | 126 | 8,075 | 41,388 | 175,463 |
| 3113 | 9 | 126 | 10,202 | 39,420 | 175,623 |
| 1010 | 9 | 126 | 8,398 | 41,388 | 175,786 |
| 3231 | 9 | 126 | 8,458 | 41,388 | 175,846 |
| 3374 | 9 | 126 | 10,113 | 39,745 | 175,859 |
| 2267 | 9 | 126 | 10,155 | 39,745 | 175,900 |
| 3095 | 9 | 126 | 10,160 | 39,745 | 175,905 |
| 4016 | 9 | 126 | 13,931 | 36,060 | 175,992 |
| 589 | 9 | 126 | 10,362 | 39,745 | 176,107 |
| 1758 | **8** | **112** | **17,547** | **46,645** | **176,192** |
| 202 | **8** | **112** | **17,547** | **46,645** | **176,192** |

Tablodan da görüldüğü üzere, daha az sayıda istasyonlu (8 istasyon) çözüm bulunmasına rağmen, amaç fonksiyonu değeri daha düşük çıkan 9 istasyonlu çözüm en iyi çözüm olarak bulunmuştur. Tablo daha detaylı incelendiğinde, istasyon sayısındaki artış işçilik maliyetini c=14 çevrim zamanı kadar arttırmış, buna karşın istasyon sayısı arttığı için görevlerin atanabileceği zaman aralığı da arttığı için görevlerin tamamlanmama maliyetleri azalmıştır (8 istasyonlu çözümlerin tamamlanmama maliyetleri daha yüksektir). Makine teçhizat maliyetleri açısından ise tamamlanmama maliyetinde olduğu gibi daha fazla istasyonlu durumda (9 istasyon) daha düşük makine teçhizat maliyetine ulaşılabilmiştir. İstasyon sayısındaki artıştan kaynaklanan işçilik maliyetlerindeki artış, tamamlanmama maliyeti ve makine/teçhizat maliyetindeki azalış ile ikame edilerek, daha yüksek istasyon sayılı ancak daha düşük tamamlanmama ve makine/teçhizat maliyetli bir çözüme ulaşılmıştır.

Tamamlanmama maliyetlerindeki azalış istasyon sayısının artışı sebebiyle daha geniş bir zaman aralığında görevlerin atanabilmesi ile açıklanabilir. Benzer şekilde makine/teçhizat maliyetlerindeki azalış da yine istasyon sayısındaki artışla ortaya çıkan atama esnekliği sonucu, aynı makine teçhizatı kullanan görevlerin aynı istasyona düşmesi sonucu makine/teçhizat maliyetlerinden sağlanan tasarruf ile gerçekleşmiştir.

Aynı durum diğer problem örneklerinde de gözlemlenebilmektedir. Özellikle de çevrim zamanın düşük değerleri ve tamamlanma olasılığının yüksek değerleri için daha yüksek istasyon sayısında daha düşük amaç fonksiyonu elde edilebilmektedir. Buradaki diğer bir önemli faktör de varyans oranıdır. Özellikle rassal ve yüksek varyans durumlarının bu sonucu etkilediği görülmüştür.

### 6.5. Makine/Teçhizat Maliyetlerinin Etkisi

Makine/teçhizat maliyetlerinin çözümü yönlendirebilme özelliğini daha detaylı incelemenin diğer bir yolu da elde edilen görev – istasyon atamalarının ve maliyetin incelenmesidir. Aynı makine/teçhizat ile işlem görebilecek görevlerin aynı istasyona atanması durumunda makine/teçhizat sayısından ve maliyetinden tasarruf edilebileceği açıklanmıştı. Bu durumu daha detaylı olarak incelemek için örnek bir problemin görev – istasyon atamaları incelenebilir. Jackson probleminin c=16 çevrim zamanı, cv=rassal

değişim katsayısı ve 1-α=0.90 tamamlanma olasılığı için elde edilen sonuçları Tablo 6. 8'de gösterilmiştir. Burada sol taraftaki alanda, önerilen üst sezgiselin makine/teçhizat maliyetlerini dikkate almadan ürettiği çözüm görülürken, sağ tarafta makine/teçhizat maliyetleri de amaç fonksiyonuna dahil edilerek elde edilen çözüm görülmektedir.

Tablo 6. 8. Makine/teçhizat maliyetlerinin etkisi

| k | j | $t_j$ | $Eq_j$ | $EC(Eq_j)$ | EC(k) | | k | j | $t_j$ | $Eq_j$ | $EC(Eq_j)$ | EC(k) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | A1 | 6 | 1 | 1.0076 | 1.353 | | 1 | B1 | 6 | 1 | 1.0076 | 1.353 |
| | B1 | 6 | 1 | 1.0076 | | | | A1 | 6 | 1 | 1.0076 | |
| | B2 | 2 | 4 | 0.3454 | | | | A2 | 2 | 4 | 0.3454 | |
| 2 | B4 | 7 | 9 | 1.6431 | 7.17 | | 2 | B4 | 7 | 9 | 1.6431 | 3.611 |
| | B5 | 1 | 5 | 0.2701 | | | | A6 | 2 | 10 | 1.3523 | |
| | B3 | 5 | 3 | 5.2564 | | | | A5 | 1 | 5 | 0.2701 | |
| | A5 | 1 | 5 | 0.2701 | | | | B2 | 2 | 4 | 0.3454 | |
| 3 | A4 | 7 | 9 | 1.6431 | 6.68 | | | B6 | 2 | 10 | 1.3523 | |
| | B6 | 2 | 10 | 1.3523 | | | 3 | A3 | 5 | 3 | 5.2564 | 5.256 |
| | B7 | 3 | 2 | 3.6847 | | | | A8 | 6 | 3 | 5.2564 | |
| 4 | A3 | 5 | 3 | 5.2564 | 9.287 | | 4 | A10 | 5 | 2 | 3.6847 | 5.328 |
| | B9 | 5 | 2 | 3.6847 | | | | A4 | 7 | 9 | 1.6431 | |
| | A2 | 2 | 4 | 0.3454 | | | 5 | A7 | 3 | 2 | 3.6847 | 5.328 |
| 5 | B8 | 6 | 3 | 5.2564 | 10.29 | | | A9 | 5 | 2 | 3.6847 | |
| | B10 | 5 | 2 | 3.6847 | | | | A11 | 4 | 9 | 1.6431 | |
| | A6 | 2 | 10 | 1.3523 | | | 6 | B3 | 5 | 3 | 5.2564 | 5.257 |
| 6 | A8 | 6 | 3 | 5.2564 | 8.941 | | | B8 | 6 | 3 | 5.2564 | |
| | A10 | 5 | 2 | 3.6847 | | | | B5 | 1 | 5 | 0.2701 | |
| 7 | A7 | 3 | 2 | 3.6847 | 5.328 | | 7 | B7 | 3 | 2 | 3.6847 | 3.685 |
| | A9 | 5 | 2 | 3.6847 | | | | B9 | 5 | 2 | 3.6847 | |
| | A11 | 4 | 9 | 1.6431 | | | | B10 | 5 | 2 | 3.6847 | |
| 7 istasyon; 112+3.6957+(49.02)=115.6957 (164.71) | | | | | 49.02 | | 7 istasyon; 112+13.9833+30.0871=156.0704 | | | | | 30.09 |

Makine/teçhizat maliyetlerinin amaç fonksiyonunu dahil edilmeyerek üst sezgisel tarafından dikkate alınmaması sağlandığında, görev – istasyon atamalarının maliyetinin (işçilik + tamamlanmama maliyetleri) 115.6957 br olduğu, bu maliyete 49.02 birimlik makine/teçhizat maliyetleri eklendiğinde toplam maliyetin 164.71 br olduğu görülmektedir. Amaç fonksiyonundan da anlaşılacağı üzere üst sezgisel, istasyon sayısını en küçükleyerek işçilik maliyetlerini azaltmaya çalışmış ve aynı zamanda tamamlanmama maliyetlerini en küçüklemek içinde istasyonların sonuna atanan (özellikle baştaki istasyonlarda) görevlerin mümkün olduğunca küçük zamanlı görevler olması sağlanmıştır.

Amaç fonksiyonuna makine/teçhizat maliyetlerinin dahil edilerek üst sezgisel tarafından geliştirilen çözümde ise maliyeti daha büyük oranda etkileyen işçilik maliyetlerinin en küçüklenmesi için yine aynı istasyon sayısındaki çözüme ulaşılmıştır. Amaç fonksiyonunu en fazla etkileyen ikinci faktör makine/teçhizat maliyetleri olduğundan, amaç fonksiyonunun en küçüklenmesi için makine/teçhizat maliyetlerinden tasarruf etmeye çalışılmıştır. Bunun için özellikle yüksek makine/teçhizat maliyetine sahip makine/teçhizat türlerinin ve dolayısıyla gerçekleştirdikleri görevlerin aynı istasyona atanmasına çalışılmıştır. Böylece 30.09 birimlik makine/teçhizat maliyetine ulaşılarak diğer çözüme göre 19.02 birim tasarruf edilmiştir. Bu maliyet tasarrufunun gerçekleşmesi için tamamlanmama maliyetinden az da olsa fedakârlıkta bulunulmuş önceki çözüme göre yaklaşık 10 br daha yüksek tamamlanmama maliyetli bir çözüm geliştirilmiştir. Toplam maliyet açısında bakıldığında makine/teçhizat maliyetlerinin dikkate alınmasıyla 8.6396 birim maliyet tasarrufu sağlanmıştır.

Örnek çözüm ve açıklamalardan da anlaşıldığı üzere, üst sezgisel yaklaşım, amaç fonksiyonu bileşenlerinin tümünü etkili şekilde dikkate almakta ve buna uygun çözümler üretmektedir.

# 7. BÖLÜM: SONUÇ VE ÖNERİLER

## 7.1. Çalışmanın Sonuçları ve Katkıları

Günümüz montaj hattı uygulamalarının birçoğunun iki veya daha fazla montaj hattından oluştuğu bilinmektedir. Teknolojik imkânların artması ve ekonomik kalkınmayla beraber daha yüksek hacimli üretim ve yüksek talebin karşılanması için aynı veya benzer ürünleri üreten montaj hatlarının sayıları da artabilmektedir. Birbirine paralel konumdaki montaj hatlarının birlikte değerlendirilerek ortak kaynak kullanımı ile dengelenmesiyle, bağımsız dengelemeden daha yüksek verimlilik seviyeleri yakalamak mümkün olabilmektedir. Ancak hatların sayısı arttıkça problem boyutu da büyüdüğünden problemin çözümü de zorlaşmaktadır. Üstelik problemin gerçek dünya uygulamalarına daha da yaklaşması için görev zamanlarının stokastik olarak değerlendirilmesi çözüm uzayını daha da karmaşık hale getirmektedir.

Montaj hatlarının orta ve uzun dönemli planlamanın parçası olduğu düşünüldüğünde, sadece dengeleme problemi olara değil montaj hattını oluşturan işçi, makine ve teçhizat gibi faktörleri de dikkate alan tasarım problemi olarak incelenmesi daha da anlamlı olmaktadır. Nitekim bazı görevlerin aynı makine ve teçhizatla yapılabildiği ve/veya bir makine/teçhizat türü ile birden fazla operasyon gerçekleştirilebildiği düşünüldüğünde, makine ve teçhizat sayılarının ve dolayısıyla maliyetlerinin de probleme dahil edilmesi anlamlı olmaktadır.

Bu tez çalışmasında makine ve teçhizat maliyetlerinin dikkate alındığı, görev zamanlarının stokastik olarak değerlendirildiği paralel MHD problemi ele alınmıştır. Problemin NP-zor yapısından dolayı, matematiksel programlama yöntemiyle deterministik paralel MHD probleminin çözümünün dahi uzun süreler gerektirmesinden dolayı sezgisel yöntemlerin kullanılması öncelik arz etmektedir. MHD problemi ile

ortak kökene sahip çizelgeleme problemlerinde oldukça başarılı bulunan üst sezgisel yaklaşımın stokastik paralel MHD probleminin çözümünde de etkin olarak kullanılabileceği görülmüştür.

Problemin çözümü için tavlama benzetimi temelli bir üst sezgisel algoritma geliştirilmiştir. Geliştirilen üst sezgisel 11 adet basit sıralama sezgiselini problemin çözümünde çeşitli aşamalarda kullanmaktadır. Üst sezgisel, alt sezgisellerin uygun sırasını ararken, alt sezgiseller problemin çözüm uzayında arama yapmaktadır. Yani üst sezgisel probleme ait alan bilgisinden bağımsız olarak çalışmakta sadece alt sezgiseller uzayında arama yapmaktadır. Bu durumun potansiyel olarak arama süreci hızlandırma ve daha düz ve basit çözüm uzayında arama imkanı sağlayabilmektedir. Geliştirilen üst sezgiselde, üretilen çözümlerin değerlendirilmesi için işçilik maliyetleri, tamamlanmama maliyetleri ve makine/teçhizat maliyetlerinin toplamından oluşan maliyet temelli bir amaç fonksiyonu kullanılmıştır.

Üst sezgisel yaklaşım diğer meta sezgisellere göre daha esnek yapıda ve daha az parametre gerektirse de, temel alınan yakınsama algoritmasının ihtiyaç duyduğu parametreler ile çalışmaktadır. Bu kapsamda tavlama benzetimi ve çözüm sürecinden kaynaklanan parametrelerin en iyi değerlerinin belirlenmesine yönelik deneysel çalışma yapılmıştır. Yapılan deneysel çalışmayla;

- Soğuma oranı (SO) parametresi için 0.90 değeri,
- SSM matrisinin çok güçlendirilmesi için (SSM++) 1.05 değeri,
- SSM matrisinin kısmen güçlendirilmesi için (SSM+) 1.01 değeri;
- SSM matrisinin cezalandırılması için (SSM-) 0.98 değeri,
- Bir sıcaklık seviyesindeki iterasyon sayısının yani Markov zinciri uzunluğunun (MZU) 30 iterasyon,
- Algoritmanın durdurma kriteri olarak gelişme sağlanamayan iterasyon sayısı (GİS) olarak 2000 iterasyon,
- Başlangıç çözüm zincirindeki öğelerin kaç tanesinin değiştirileceğinin oransal olarak gösterildiği çaprazlama oranı (ÇO) değeri olarak %50 değişim oranı belirlenmiştir.

Literatürde makine ve teçhizat maliyetlerini dikkate alan stokastik paralel MHD problemi sonuçları bulunmadığından, önerilen üst sezgisel yaklaşımın değerlendirilmesi için benzer problemlerle kıyaslamalar yapılmıştır. Bunun için üst sezgisel yapının esnekliğinden de faydalanılarak algoritma stokastik basit MHD, deterministik paralel MHD ve stokastik paralel MHD problemleri çözecek şekilde temel yapıyı bozmadan modifiye edilmiştir. Literatürde sonuçları rapor edilen bu türdeki çalışmalarla yapılan kıyaslamalar sonucunda;

- Stokastik basit MHD probleminde olarak literatürde sonuçları rapor edilen 72 problemden 63 tanesinde daha başarılı sonuçlara ulaşılmıştır. Önceki çalışmaların başarılı olduğu örneklerde en fazla %6.58 oranında dahi iyi sonuçlar mevcut iken, üst sezgisel %21.5 oranında daha iyi sonuçlara ulaşmıştır. Ayrıca birim tamamlanmama maliyetinin daha yüksek olduğu durumlarda üst sezgiselin önceki çalışmalara göre daha düşük maliyetli başarılı sonuçlar ürettiği gözlenmiştir.
- Deterministik paralel MHD probleminin literatürdeki mevcut 5 araştırmayla sonuçları kıyaslanmıştır. Herhangi bir özel ayarlama ve yüksek tekrar sayıları olmadan elde edilen sonuçlar üst sezgiselin 95 örnek problemin 66'sında literatürdeki sonuçlarla aynı istasyon sayısını bulabildiğini göstermiştir.
- Toplam 857 problemden oluşan stokastik paralel MHD problemi ile yapılan karşılaştırmada; üst sezgisel yaklaşım problemlerin %12'sinde teorik minimum istasyon sayısında çözümler üretmiştir. Ayrıca problemlerin %37.2'sinde Çerçioğlu (2009) çalışmasındaki sezgisellerden daha az sayıda istasyon sayısına sahip çözümler sunmuştur. Bulunan istasyon sayıları incelendiğinde üst sezgiselin özellikle büyük boyutlu problemlerde 5 istasyona kadar daha az sayıda istasyonlu çözümler üretebildiği görülmüştür.
- Aynı istasyon sayısına sahip çözümler arasında tamamlanmama maliyetleri karşılaştırıldığında ise üst sezgiselin, aynı istasyon sayısına sahip çözümlerden %68.6'sında daha düşük maliyetli çözümler geliştirdiği görülmüştür.
- Algoritmik özellikler açısından yapılan değerlendirmelerde önerilen üst sezgisel yaklaşımın düşük ortalama sapma ve standart sapma değerleri ile ölçeklenebilir, kararlı ve sağlam bir yapıda olduğu görülmüştür.
- Tez çalışmasında üst sezgisel çalışma mekanizması ile ilgili "öğrenme sonucu alt sezgisellerin öyle bir sıralamasına ulaşılabilir ki bu sıralama probleme

uygulandığında bilinen en iyi sonuçlara ulaşılabilir" hipotezi, süreç sonunda olmasa bile sürecin bir anındaki SSM matrisinin değerleriyle bu sonuca ulaşılabileceği anlaşılmıştır.

Sonuç olarak önerilen üst sezgisel çözüm yaklaşımının makine/teçhizat maliyetli stokastik paralel MHD probleminin çözümünde etkin olarak kullanılabileceği yapılan karşılaştırma ve değerlendirmelerden anlaşılmıştır. Ayrıca bu çalışma üst sezgisel yaklaşımın MHD problemlerine uygulandığı ilk araştırma olarak literatürde yer alacaktır. Tez çalışması süresince, tez çalışmasından geliştirilmiş 2 adet bildiri uluslar arası sempozyumlarda sunulmuş ve bir adet makale de SCI indeksli bilimsel derginin değerlendirme sürecinde bulunmaktadır.

### 7.2. Gelecekteki Çalışmalara Öneriler

Bu tez çalışması MHD genel problem alanı içerisinde sınırlı sayıda paralel MHD araştırması mevcut iken stokastik görev zamanlarının ve makine teçhizat maliyetlerinin dikkate alındığı bilinen ilk çalışmadır. Özellikle de makine/teçhizat maliyetlerinin değerlerinin belirlenmesine yönelik yapılacak araştırmalar literatüre yeni katkılarda bulunacaktır. Ayrıca stokastik paralel yapıda olup karma modellerin üretildiği MHD problemlerinin incelenmesi de önemli bir araştırma konusu olacaktır.

Problemin çözüm yöntemi olarak kullanılan üst sezgisel yaklaşımın performansı, gelecekte yapılacak meta sezgisel algoritmalarla elde edilecek sonuçlarla karşılaştırılabilecektir. Bu kapsamda gerek tek başına meta sezgisel tekniklerin gerekse de hibrid yaklaşımların veya farklı üst sezgisel yapıların kullanılarak probleme çözüm geliştirilmesi kıyaslama ve performans değerlendirme imkanlarını arttıracaktır.

**Kaynakça**

Aarts, E., Korst, J., & Michiels, W. (2005). Simulated Annealing. E. K. Burke, & G. Kendall içinde, *Search Methodologies Introductory Tutorials in Optimization and Decision Support Techniques* (s. 187-210). Nottingham: Springer Science.

Adenso-Diaz, B., & Laguna, M. (2006). Fine-tuning of algorithms using fractional experimental design and local search. *Operational Research, 54* (1), 99-114.

Agnetis, A., Ciancimino, A., Lucertini, M., & Pizzichella, M. (1995). Balancing flexible lines for car components assembly. *International Journal of Production Research, 33*, 333-350.

Agrawal, P. K. (1985). The related activity concept in assembly line balancing . *International Journal of Production Research, 23*, 403-421.

Ağpak, K., & Gökçen, H. (2007). A chance-constrained approach to stochastic line balancing problem. *European Journal of Operational Research, 180*, 1098-115.

Ahmadi, R. H., & Wurgaft, H. (1994). Design for synchronized flow manufacturing. *Management Science, 40*, 1469-1483.

Ahmadi, R. H., Dasu, S., & Tang, C. S. (1992). The Dynamic Line Allocation Problem. *Management Science, 38* (9), 1341-1353.

Ahmadi, S., Barrone, P., Cheng, P., Burke, E., Cowling, P., & McCollum, B. (2003). Perturbation based variable neighbourhood search in heuristic space for eşamination timetabling problem. U. o. Nottingham (Dü.), *Proceedings of Multidisciplinary International Scheduling: Theory and Applications (MISTA 2003)* içinde, (s. 155-171). Nottingham.

Aickelin, U., Burke, E. K., & Li, J. (2009). An evolutionary squeaky wheel optimization approach to personnel scheduling. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 13* (2), 433-443.

Ajenblit, D., & Wainwright, R. (1998). Applying genetic algorithms to the U-shaped assembly line balancing problem. *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Evolutionary Computation*, (s. 96-101). Anchorage, AK.

Akagi, F., Osaki, H., & Kikuchi, S. (1983). A method for assembly line balancing with more than one qorker in each station. *International Journal of Production Research, 21*, 755-770.

Allen, S., Burke, E. K., Hyde, M. R., & Kendall, G. (2009). Evolving reusable 3d packing heuristics with genetic programming. *Proceedings of the ACM Genetic*

*and Evolutionary Computation Conference (GECCO'09)*, (s. 931-938). Montreal, Canada.

Amen, M. (2000a). An exact method for cost-oriented assembly line balancing. *International Journal of Production Economics, 64*, 187-195.

Amen, M. (2006). Cost-oriented assembly line balancing: Model formulations, solution difficulty, upper and lower bounds. *European Journal of Operational Research, 168* (3), 747-770.

Amen, M. (2001). Heuristic methods for cost-oriented assembly line balancing: A comparison on solution quality and computing time. *International Journal of Production Economics, 69*, 255-264.

Amen, M. (2000b). Heuristic methods for cost-oriented assembly line balancing: A survey. *International Journal of Production Economics, 68* (1), 1-14.

Antunes, C. H., Lima, P., Oliveira, E., & Costa, D. F. (2009). A multi-objective simulated annealing approach to eractive power compensation. *Proceedings of the 8th Meta-heuristic International Conference*.

Arcus, A. L. (1966). COMSOAL: A computer method of sequencing operations for assembly lines. *International Journal of Production Research, 4*, 259-277.

Asmuni, H., Burke, E., & Garibaldi, J. (2005). Fuzzy multiple heuristic ordering for course timetabling. *Proceedings of the 5th United Kingdom Workshop on Computational Intelligence (UKCI 2005)*, (s. 302-309). London.

Ayob, M., & Kendall, G. (2003). A monte carlo hyper-heuristic to optimise component placement sequencing for multi head placement machine. *Proceedings of the International Conference on Intelligent Technologies (InTech'03)*, (s. 132-141). Chiang Mai, Thailand.

Bader-El-Din, M. B., & Poli, R. (2008). An incremental approach for improving local search heuristics. *Proceedings of the 8th European Conference on Evolutionary Computation in Combinatorial Optimization (EvoCOP'08)*, (s. 194-205). Naples, Italy.

Bader-El-Din, M. B., & Poli, R. (2007). Generating sat local-search heuristics using a gp hyper-heuristic framework. *Proceedings of the 8th International Conference on Artificial Evolution*, (s. 37-49).

Bader-El-Din, M. B., & Poli, R. (2009). Grammer-based genetic programming for timetabling. *Proceedings of the IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC'09)*, (s. 2532-2539). Trondheim, Norway.

Bai, R., & Kendall, G. (2005). An investigation of automated planograms using a simulated annealing based hyper-heuristics. T. Ibaraki, K. Nonobe, & M. Yagiura içinde, *Metaheuristics: Profress as a Real Problem Solver* (Cilt 32, s. 87-108). Springer.

Bai, R., Blazewicz, J., Burke, E. K., Kendall, G., & McCollum, B. (2007). *A simulated annealing hyper-heuristic methodology for flexible decision support.* University of Nottigham, School of CSiT. Nottingham: University of Nottigham.

Bai, R., Blazewicz, J., Burke, E. K., Kendall, G., & McCollum, B. (2012). A simulated annealing hyper-heuristic methodology for flexible decision support. *4OR - A Quarterly Journal of Operations Research, 10* (1), 43-66.

Bai, R., Burke, E. K., & Kendall, G. (2008). Heuristic, meta-heuristic and hyper-heuristic approaches for fresh produce inventory control and shelf space allocation. *Journal of the Operational Research Society, 59*, 1387-1397.

Bai, R., Burke, E. K., Kendall, G., & McCollum, B. (2007). Memory length in hyper-heuristics: An empirical study. *Proceedings of the 2007 IEEE Symposium on Computational Intelligence in Scheduling (CISched2007).* Honolulu, Hawaii.

Baker, K. (1974). *Introduction to Sequencing and Scheduling.* New York: Wiley.

Baker, K. R., Powell, S. G., & Pyke, D. F. (1990). Buffered and unbuffered assembly systems with variable processing times. *Journal of Manufacturing and Operations Management* (3), 200-223.

Bard, J. F. (1989). Assembly line balancing with parallel workstations and dead time. *International Journal of Production Research, 27*, 1005-1018.

Bard, J. F., Dar-El, E., & Shtub, A. (1992). An analytic framework for sequencing mixed model assembly lines. *International Journal of Production Research, 30*, 35-48.

Bartholdi, J. J. (1993). Balancing two-sided assembly lines: A case study. *International Journal of Production Research, 31*, 2447-2461.

Battaia, O., & Dolgui, A. (2013). A taxonomy of line balancing problems and their solution approaches. *International Journal of Production Economics, 142* (2), 259-277.

Battiti, R. (1996). Reactive search: Toward self-tuning heuristics. V. J. Rayward-Smith, I. H. Osman, C. R. Reeves, & G. D. Smith içinde, *Modern Heuristic Search Methods* (s. 61-83). Chichester: John Wiley & Sons Ltd.

Battiti, R., & Brunato, M. (2007). Reactive search: Machine learning for memory-based heuristics. T. F. Gonzalez içinde, *Approximation algorithms and Metaheuristics* (s. 1-17). Washington: Taylor and Francis Books (CRC press).

Battiti, R., & Protasi, M. (1997). Reactive search, a history-sensitive heuristic for MAX-SAT. *ACM Journal of Experimental Algorithms, 2* (2).

Battiti, R., Brunato, M., & Mascia, F. (2008). Reactive Search and Intelligent Optimization. *Operations Research Computer Science Interfaces Series* (Cilt 45). içinde Springer.

Bautista, J., Suarez, R., Mateo, M., & Companys, R. (2000). local search heuristics for the assembly line balancing problem with incompatibilities between tasks. *Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and automation*, (s. 2404-2409). San Francisco, CA.

Baybars, İ. (1986). A Survey of Exact Algorithms for the Simple Assembly Line Balancing Problems. *Management Science , 32* (8), 909-932.

Baykasoglu, A. (2006). Multi-rule multi-objective simulated annealing algorithm for straight and U type assembly line balancing problems. *Journal of Intelligent Manufacturing, 17*, 217-232.

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.

Besterfield, D. H., Besterfield, C., Besterfield, G. H., & Besterfield, M. (1995). *Total Quality Management.* New Jersey: Prentice Hall.

Bhanu, S. M., & Gopalan, N. (2008). A hyper-heuristic approach for efficient resource scheduling in grid. *International Journal of Computers, Communications & Control , 3*, 249-258.

Biazzini, M., Banhelyi, B., Montresor, A., & Jelasity, M. (2009). Distributed hyper-heuristics for real parameter optimization. *GECCO'09: Proceedings of the 11th Annual conference on Genetic and evolutionary computation* (s. 1339-1346). New York, NY, USA: ACM.

Bilgin, B., Ozcan, E., & Korkmaz, E. E. (2006). An experimental study on hyper-heuristics and final exam scheduling. *Proceedings of International Conference on the Practice and Theory of Automated Timetabling (PATAT'06)*, (s. 123-140).

Birattari, M. (2004). *The problem of tuning metaheuristics as seen from a machine learning perspective.* PhD thesis, Universite libre de Bruxelles.

Birattari, M., Stützle, T., Paquete, L., & Varrentrapp, K. (2002). A racing algorithm for configuring metaheuristics. *Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO 2002)* (s. 11-18). New York, USA: Morgan Kaufmann.

Blumenfeld, D. E., Burns, L. D., & Daganzo, C. F. (1985). Analyzing trade-offs between transportation, inventory and production costs on freight networks. *Transportation Research Part B: Methodological , 19* (5), 361-380.

Boucher, T. O. (1987). Choice of assembly line design under task learning. *International Journal of Production Research , 25*, 513-524.

Boysen, N., & Fliedner, M. (2008). A versatile algorithm for assembly line balancing. *European Journal of Operational Research , 184* (1), 39-56.

Boysen, N., Fliedner, M., & Scholl, A. (2007). A classification of assembly line balancing problems. *European Journal of Operational Research* (2), 674-693.

Boysen, N., Fliedner, M., & Scholl, A. (2008). Assembly line balancing: Which model to use when? *International Journal of Production Economics , 111*, 509-528.

Buckhin, J. (1998). A comparative study of performance measures for throughput of a mixed model assembly line in a JIT environment. *International Journal of Production Research , 36*, 2669-2685.

Bukchin, J., & Masin, M. (2004). Multi-objective design of team oriented assembly systems. *European Journal of Operational Research , 156*, 326-352.

Bukchin, J., & Tzur, M. (2000). Design of flexible assembly line to minimize equipment cost. *IIE Transactions , 32*, 585-598.

Bukchin, J., Dar-El, E. M., & Rubinovitz, J. (2002). Mixed-model assembly line design in a make-to-order environment. *Computers and Industrial Engineering , 41*, 405-421.

Bukchin, J., Dar-El, E., & Rubinovitz, J. (1997). Team oriented assembly system design: A new approach. *International Journal of Production Economics , 51*, 47-57.

Bukchin, Y., & Rabinowitch, I. (2006). A branch-and-bound based solution approach for the mixed-model assembly line-balancing problem for minimazing stations and task duplication costs. *European Journal of Operational Research , 174*, 492-508.

Burke, E. K., & Bykov, Y. (2008). A late acceptance strategy in hill-climbing for exam timetabling problems. *Conference on the Practice and Theory of Automated Timetabling (PATAT 2008).*

Burke, E. K., Curtois, T., Hyde, M., Kendall, G., Ochoa, G., Petrovic, S., et al. (2010). Iterated Local Search vs. Hyper-heuristics: Towards General-purpose Search Algorithms. *IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC 2010)* (s. 3073-3080). IEEE PRess.

Burke, E. K., Dror, M., Petrovic, S., & Qu, R. (2005). Hybrid Graph Heuristics within a Hyper-heuristic Approach to Exam Timetabling Problems. *The Next Wave in Computing, Optimization, and Decision Technologies* (s. 79-91). içinde Springer.

Burke, E. K., Gendreau, M., Hyde, M., Kendall, G., Ochoa, G., Ozcan, E., et al. (2013). Hyper-heuristics: A Survey of the State of the Art. *Journal of the Operational Research Society , 64* (12), 1695-1724.

Burke, E. K., Hart, E., Kendall, G., Newall, J., Ross, P., & Schulenburg, S. (2003). Hyper-heuristics: An emerging direction in modern search technology. F. Glover, & G. Kochenberger içinde, *Handbook of Metaheuristics* (s. 457-474). Kluwer.

Burke, E. K., Hyde, M. R., & Kendall, G. (2006). Evolving bin packing heuristics with genetic programming. T. Runarsson, H. G. Beyer, E. K. Burke, J. JMerelo-Guervos, D. Whitley, & X. Yao içinde, *Proceedings of the 9th International Conference on Parallel Problem Solving from Nature (PPSN'06)* (s. 860-869). Reykjavik, Iceland.

Burke, E. K., Hyde, M. R., Kendall, G., & Woodward, J. (2007a). Automatic heuristic generation with genetic programming: Evolving a jack-of-all-trades or a master of one. *Proceedings of the 9th ACM Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO'07)*, (s. 1559-1565). London, UK.

Burke, E. K., Hyde, M. R., Kendall, G., & Woodward, J. (2007b). The scalability of evolved on line bin packing heuristics. *Proceedings of the IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC'07)*, (s. 2530-2537). Singapore.

Burke, E. K., Hyde, M., Kendall, G., & Woodward, J. (2010). A genetic programing hyper-heuristic approach for evolving two dimensional strip packing heuristics. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation , 14* (6), 942-958.

Burke, E. K., Hyde, M., Kendall, G., Ochoa, G., Ozcan, E., & Woodward, J. (2009). A Classification of Hyper-heuristic Approaches. *Handbook of Metaheuristics (International Series in Operations Research & Management Science* (s. 449-468). içinde Springer.

Burke, E. K., Hyde, M., Kendall, G., Ochoa, G., Ozcan, E., & Woodward, J. (2010). A Classification of Hyper-heuristic Approaches. M. Gendreau, & J.-Y. Potvin içinde, *Handbook of Metaheuristics, International Series in Operations Research & Management Science* (Cilt 146). Springer US.

Burke, E. K., Kendall, G., Landa-Silva, J. D., O'Brien, R., & Soubeiga, E. (2005). An ant algorithm hyperheuristic for the project presentation scheduling problem. *Proceedings of the 2005 IEEE Congress on Evolutionary Computation*, *3*, s. 2263-2270. Edinburg, Scotland.

Burke, E. K., Kendall, G., Sır, M. M., & Ozcan, E. (2008). Monte carlo hyper-heuristics for examination timetabling. *Conference on the Practice and Theory of Automated Timetabling (PATAT 2008).*

Burke, E. K., Landa-Silva, J. D., & Soubeiga, E. (2005). Multi-objective Hyper-heuristic Approaches for Space Allocation and Timetabling. *Meta-heuristics: Progress as Real Problem Solvers* (s. 129-158). içinde Springer.

Burke, E. K., MacCarthy, B. L., Petrovic, S., & Qu, R. (2002). Knowledge Discovery in a Hyper-Heuristic for Course Timetabling using Case Based Reasoning. *Fourth International Conference on the Practice and Theory of Automated Timetabling PATAT'02*. Ghent, Belgium.

Burke, E. K., MacCarthy, B. L., Petrovic, S., & Qu, R. (2001). Multi-retrieval in a structured case based reasoning approach for course timetabling problems. IT technical report, School of Computer Science, University of Nottingham.

Burke, E., Dror, M., Petrovic, S., & Qu, R. (2005). Hybrid Graph Heuristics within a Hyper-heurisitc Approach to Exam Timetabling problems. *The Next Wave in Computing, Optimazation, and Decision Technologies* (s. 79-91). içinde Springer.

Burke, E., Hyde, M., Kendall, G., Ochoa, G., Ozcan, E., & Woodward, J. (2009). A Classification of Hyper-heuristic Approaches. I. S. Science (Dü.) içinde, *Handbook of Metaheuristics* (2nd Edition b., s. 449-468). Springer.

Burke, E., Hyde, M., Kendall, G., Ochoa, G., Ozcan, E., & Woodward, J. (2009). Exploring hyper-heuristic methodologies with genetic programming. C. Mumford, & L. Jain içinde, *Computational Intelligence: Collaboration, Fusion and Emergence, Intelligent Systems Reference library* (s. 177-201). Springer.

Burke, E., Kendall, G., & Soubeiga, E. (2003). A tabu search hyperheuristic for timetabling and rostering. *Journal of Heuristics , 9* (6), 451-470.

Burke, E., McCollum, B., Meisels, A., Petrovic, S., & Qu, R. (2007). A graph-based hyper-heuristic for educational timetabling problems. *European Journal of Operational Research , 176*, 177-192.

Burke, E., Petrovic, S., & Qu, R. (2006). Case based heuristic selection for timetabling problems. *Journal of Scheduling , 9* (2), 115-132.

Burns, L. D., & Daganzo, C. F. (1987). Assembly line job sequencing principles. *International Journal of Production Research , 25*, 71-99.

Buxey, G. M. (1974). Assembly Line Balancing with Multiple Stations. *Management Science , 20* (6), 1010-1021.

Buxey, G. M., Slack, N. D., & Wild, R. (1973). Production Flow Line System Design - A Review. *AIIE Transactions , March*, 37-48.

Buzacott, J. A. (1990). Abandoning the moving assembly line: Models of human operators and job sequencing. *International Journal of Production Research , 28*, 821-839.

Buzacott, J. A. (1968). Prediction of the efficiency of production systems without an internal storage. *International Journal of Production Research* (6), 173-188.

Cakir, B., Altiparmak, F., & Dengiz, B. (2011). Multi-objective optimization of a stochastic assembly line balancing: A hybrid simulated annealing algorithm. *Computers & Industrial Engineering , 60*, 376-384.

Carnahan, B., Norman, B., & Redfern, M. (2001). Incorporating physical demand criteria into assembly line balancing. *IIE Transactions , 33*, 875-887.

Carraway, R. (1989). A dynamic programming approach to stochastic assembly line balancing. *Management Science , 35*, 459-471.

Carraway, R. L. (1989). A Dynamic Programming Approach to Stochastic Assembly Line Balancing. *Management Science , 35* (4), 459-471.

Carter, J., & Silverman, F. (1984). A cost-effective approach to stochastic line balancing with off-line repairs. *Journal of Operations Management , 4*, 145-157.

Cerny, V. (1985). Thermodynamical approach to the traveling salesman problem: an efficient simulation algorithm. *Journal of Optimization Theory and Applications , 45*, 41-51.

Cerny, V. (1985). Thermodynamical approach to the traveling salesman problem: an efficient simulation algorithm. *Journal of Optimization Theory and Applications , 45*, 41-51.

Chakhlevitch, K., & Cowling, P. (2005). Choosing the fittest subset of low level heuristics in a hyperheuristic framework. *Lecture Notes in Computer Science , 3448*, 25-33.

Chakhlevitch, K., & Cowling, P. (2008). Hyperheuristics: Recent developments. C. Cotta, M. Sevaux, & K. Sörensen içinde, *Adaptive and Multilevel Metaheuristics, Studies in Computational Intelligence* (Cilt 136, s. 3-29). Springer.

Chakravarty, A. K. (1988). Line balancing with task learning effects. *IIE Transactions , 20*, 186-193.

Chakravarty, A. M., & Shtub, A. (1988). Modelling the effects of learning and job enlargement on assembly systems with parallel lines. *International journal of Production Research , 26*, 267-281.

Chakravarty, A., & Shtub, A. (1986b). Dynamic manning of long cycle assembly lines with learning effect. *IIE Transactions , 18*, 392-397.

Chand, S., & Zeng, T. (2001). A Comparison of U-line and Straight-line Performances Under Stochastic Task Times. *Manufacturing & Service Operations Management , 3* (2), 138-150.

Chase, R. B. (1974). Survey of paced assembly lines. *Industrial Engineering , 6* (2), 14-18.

Chen, P. C., Kendall, G., & Vanden-Berghe, G. (2007). An ant based hyper-heuristic for the travelling tournament problem. *Proceedings of IEEE Symposium of Computational Intelligence in Scheduling (CISched 2007)*, (s. 19-26). Hawaii.

Chiang, W. C., & Urban, T. L. (2006). The stochastic U-line balancing problem: A heuristic procedure. *International Journal of Operational Research , 175* (3), 1767-1781.

Chiang, W. C., Kouvelis, P., & Urban, T. L. (2007). Line balancing in a just in time production environment: Balancing multiple U-lines. *IIE Transactions , 39*, 347-359.

Cowling, P., & Chakhlevitch, K. (2003). Hyperheuristics for managing a large collection of low level heuristics to schedule personnel. *Proceedings of the IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC2003)* (s. 1214-1221). Canberra, Australia: IEEE Computer Society Press.

Cowling, P., Kendall, G., & Han, L. (2002). An investigation of a hyperheuristic genetic algorithm applied to a trainer scheduling problem. *Proceedings of the Congress on Evolutionary Computation (CEC'2002)*, (s. 1185-1190). Honolulu, Hawaii.

Cowling, P., Kendall, G., & Soubeiga, E. (2000). A hyperheuristic approach for scheduling a sales summit. *Third International Conference on the Practice And Theory of Automated Timetabling, PATAT 2000* (s. 176-190). Konstanz, Germany: Springer.

Cowling, P., Kendall, G., & Soubeiga, E. (2001). A parameter-free hyperheuristic for scheduling a sales summit. *Proceedings of the 4th Metaheuristic International Conference*, (s. 127-131).

Cowling, P., Kendall, G., & Soubeiga, E. (2002). Hyperheuristics: A tool for rapid prototyping in scheduling and optimisation. S. Cagoni, J. Gottlieb, E. Hart, M. Middendorf, & R. Goenther içinde, *Applications of Evolutionary Computing: Proceedings of Evo Workshops 2002* (s. 1-10). Kinsale, Ireland: Springer-Verlag.

Coy, S., Golden, B. L., Runger, G. C., & Wasil, E. A. (2001). Using experimental design to find effective parameter settings for heuristics. *Journal of Heuristics , 7* (1), 77-97.

Cranic, T., & Toulouse, M. (2003). Parallel strategies for meta-heuristics. F. Glover, & G. Kochenberger içinde, *Handbook in Meta-heuristics* (s. 475-513). Kluwer Academic Publishers.

Cross, S. E., & Walker, E. (1994). Dart: applying knowledge-based planning and scheduling to crisis action planning. M. Zweben, & M. S. Fox içinde, *Intelligent Scheduling*. Morgan Kaufmann.

Crowston, W., Glover, F., Thompson, G., & Trawick, J. (1963). *Probabistic and parametric learning combinations of local job shop scheduling rules.* Pittsburgh: Carnegie Mellon university.

Çerçioğlu, H. (2009). *Stokastik Paralel Montaj Hattı Dengeleme Problemi için Yeni Modeller.* Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Endüstri Mühendisliği Doktora Tezi. Ankara: Yayınlanmamış Doktora Tezi.

Daganzo, C. F., & Blumenfeld, D. E. (1994). Assembly system design principles and tradeoffs. *International Journal of Production Research , 32*, 669-681.

Dar-El, M. (1974). Solving large single model assembly line balancing problems - a comparative study. *AIIE Transactions , 7*, 302-315.

Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., & Meyarivan, T. (2000). A fast elitist multi-objective genetic algorithm: Nsga-ii. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation , 6*, 182-197.

Deckro, R. F. (1989). Balancing cycle time and workstations. *IIE Transactions , 21*, 106-111.

Denzinger, J., Fuchs, M., & Fuchs, M. (1997). High Performance ATP Systems by Combinin Several AI Methods. *Proceedings of the 15ths International Joint Conference on Artificial Intelligence*, (s. 102-107). Nagoya, Japan.

DiGaspero, L., & Schaerf, A. (2007). Easysyn++: A tool for automatic synthesis of stochastic local search algorithms. T. Stutzle, M. Birattari, & H. Hoos içinde, *Proceedings of the International Workshop on Engineering Stochastic Local Search Algorithms (SLS 2007)* (s. 177-181).

Dimopoulos, C., & Zalzala, A. M. (2001). Investigating the use of genetic programming for a classic one-machine scheduling problem. *Advances in Engineering Software , 32* (6), 489-498.

Dobson, G., & Yano, C. A. (1994). Cyclic scheduling to minimize inventory in a batch flow line. *European Journal of Operational Research , 75*, 441-461.

Doerr, K. H., Klastorin, T. D., & Magazine, M. J. (2000). Synchronous unpaced flow lines with worker differences and overtime cost. *Management Science , 46* (3), 421-435.

Dolgui, A., Ereemev, A., Kolokolov, A., & Sigaev, V. (2002b). A genetic algorithm for allocation of buffer storage capacities in production line with unreliable machines. *Journal of Mathematical Modelling and Algorithms* (1), 89-104.

Dolgui, A., Finel, B., Guschinsky, N., Levin, G., & Vernadat, F. (2002a). *A heuristic approach for transfer lines balancing.* France: University of Technology of Troyes.

Dolgui, A., Guschinski, N., & Levin, G. (1999). On problem of optimal design of transfer lines with parallel and sequential operations. *Proceedings of the 7th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, 1*, s. 329-334. Barcelona, Spain.

Dolgui, A., Guschinsky, N., & Levin, G. (2001b). A mixed integer program for balancing of transfer line with grouped operations. *Proceedings of the 28th International Conference on Computer and Industrial Engineering*, (s. 541-547). Florida, USA.

Dolgui, A., Guschinsky, N., & Levin, G. (2001a). Decomposition methods to optimize transfer line with parallel and sequential machining. *Proceedings of the 2nd IFAC Conference: Management and control of production and logistics. 3*, s. 983-988. Grenoble, France, 2000: Elsevier, Amsterdam.

Dolgui, A., Guschinsky, N., & Levin, G. (2003). Optimal design of automated transfer lines with blocks of parallel operations. *Proceedings of the 15th IFAC World Congress.* Barcelona, Spain, 2002: Elsevier, Amsterdam.

Dolgui, A., Guschinsky, N., Levin, G., & Harrath, Y. (2001c). Optimal design of a class of transfer lines with parallel operations. *Manufacturing, modeling, management and control, A Proceedings volume from the IFAC Symposium* (s. 36-41). Patras, Greece, 2000: Elsevier, Amsterdam.

Dorndorf, U., & pesch, E. (1995). Evolution based learning in a job shop scheduling environment. *Computers and Operations Research , 22* (1), 25-40.

Downsland, K. A. (1995). Simulated Annealing. C. R. Reeves içinde, *In Modern Heuristic Techniques for Combinatorial Problems.* McGraw-Hill.

Dowsland, K. A., Soubeiga, E., & Burke, E. K. (2007). A simulated annealing hyper-heuristic for determining shipper sizes. *European Journal of Operational Research , 179* (3), 759-774.

Drechsler, R., & Becker, B. (1995). Learning heuristics by genetic algorithms. *Proceedings of the ASP Design Automation Conference*, (s. 349-352). Mukuhari, Japan.

Drechsler, R., & Becker, B. (1995). Learning heuristics by Genetic Algorithms. *Proceedings of the ASP Design Automation Conference*, (s. 349-352). Mukuhari, Japan.

Drechsler, R., Göckel, N., & Becker, B. (1996). Learning heuristics for obdd minimization by evolutionary algorithms. *Proceedings of the 4th International Conference on Parallel Problem Solving from Nature (PPSN'96)*, (s. 730-739). Berlin, Germany.

Drechsler, R., Göckel, N., & Becker, B. (1996). Learning heuristics for obdd minimization by evolutionary algorithms. *Proceedings of the 4th International Conference on Parallel Problem Solving from Nature (PPSN'96)*, (s. 730-739). Berlin, Germany.

Driscolla, J., & Abdel-Shafi, A. A. (1985). A simulation approach to evaluating assembly line balancing solutions. *International Journal of Production Research , 23* (5), 975-985.

Dudley, N. A. (1963). Work Time distributions. *International Journal of Production Research , 2* (2), 137-144.

Dueck, G. (1993). New optimization heuristics: The great deluge algorithm and the record-to record travel. *Journal of Computational Physics , 104*.

Ege, Y., Azizoglu, M., & Ozdemirel, N. E. (2009). Assembly line balancing with station paralleling. *Computers & Industrial Engineering , 57*, 1218-1225.

Eiben, A. E., Michalewicz, Z., Schoenauer, M., & Simth, J. E. (2007). Prameter Control in Evolutionary Algorithms. *Parameter Setting in Evolutionary Algorithms* (s. 19-46). içinde Springer.

Eiben, A. E., Michalewicz, Z., Schoenauer, M., & Smith, J. (2007). Parameter Setting in Evolutionary Algorithms. *Parameter Control in Evolutionary Algorithms* (s. 19-46). içinde Springer.

Eiben, A., Hinterding, R., & Michalewicz, Z. (1999). Parameter control in Evolutionary Algorithms. *IEEE Transactions on Evlutionary Computation , 3* (2), 124.

Ellegard, K., & Jonsson, D. (1992). Reflective production in the final assembly of motor vehicles: an emerging Swedish challenge. *International journal of Operations and Production Management , 12*, 117-133.

Erel, E., & Gökçen, H. (1999). Shortest-route formulation of mixed-model assembly line balancing problem. *European Journal of Operational Research , 116*, 194-204.

Erel, E., & Sarin, S. C. (1998). A survey of the assembly line balancing procedures. *Production Planning & Control , 9* (5), 414-434.

Erel, E., & Sarin, S. C. (1998). A survey of the assembly line balancing procedures. *Production Planning & Control , 9* (5), 414-434.

Erel, E., Sabuncuoglu, I., & Sekerci, H. (2005). Stochastic Assembly Line Balancing Using Beam Search. *International Journal of Production Research , 43* (7), 1411-1426.

Erel, E., Sabuncuoğlu, İ., & Aksu, B. A. (2001). Balancing of U-type assembly systems using simulated annealing. *International Journal of Production Research , 39* (13), 3003-3015.

Ersoy, E., Ozcan, E., & Etaner-Uyar, A. S. (2007). Memetic algorithms and hperhill-climbers. P. Baptiste, G. Kendall, A. M. Kordon, & F. Sourd içinde, *MISTA 2007: 3rd Multidisciplinary International Scheduling Conference: Theory and Applications* (s. 159-166).

Esmaeilian, G. R., Ismail, N., Sulaiman, S., Ahmad, M., & Hamedi, M. (2009). Allocating and Balancing of Mixed Model Production Through the Parallel Assembly Lines. *European Journal of Scientific Research , 31* (4), 616-631.

Esmaeilian, G. R., Sulaiman, S., Ismail, N., Ahmad, M., & Hamedi, M. (2008). Application of MATLAB to create initial solution for tabu search in parallel assembly line balancing. *International Journal of Computer Science and Network Security , 8* (10), 132-136.

Esmaeilian, G. R., Sulaiman, S., Ismail, N., Hamedi, M., & Ahmad, M. H. (2011). A tabu search approach for mixed-model parallel assembly line balancing problem (type II). *International Journal of Industrial and Systems Engineering , 8* (4), 407-431.

Falkenauer, E. (1997). A grouping genetic algorithm for line balancing with resource dependent task times. *Proceedings of the Fourth International Conference on Neural Information Processing* (s. 464-468). Dundedin, New Zeland: University of Otago.

Fang, H., Ross, P., & Corne, D. (1993). A promising genetic algorithm approach to job shop scheduling, rescheduling, and open-shop scheduling problems. S. Forrest (Dü.), *Fifth International Conference on Genetic Algorithms* içinde (s. 375-382). San Mateo: Morgan Kaufmann.

Fang, H.-L., Ross, P. M., & Corne, D. (1994). A Promising Hybrid GA/Heuristic Approach for Open Shop Scheduling Problems. *11th European Conference on Artificial Intelligence* (s. 590-594). John Wiley and Sons Ltd.

Feo, T. A., & Resende, M. G. (1995). Greedy randomized adaptive search procedures. *Journal of Global Optimization , 6*, 109-133.

Fialho, A., Costa, L., Schoenauer, M., & Sebag, M. (2008). Extreme value based adaptive operator selection. *Proceedings of the 10th international conference on Parallel Problem Solving from Nature* (s. 175-184). Berlin: Springer-Verlag.

Fialho, A., Da Costa, L., Schoenauer, M., & Sebag, M. (2009). Extreme: dynamic multi-armed bandits for adaptive operator selection. *Proceedings of the 11th Annual Conference Companion on Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO 09)* (s. 2213-2216). New York: ACM.

Fialho, A., Da Costa, L., Schoenauer, M., & Sebag, M. (2009). Extreme: dynamic multi-armed bandits for adaptive operator selection. *GECCO'09: Proceedings of the 11th Annual Conference Companion on Genetic and Evolutionary Computation Conference* (s. 2213-2216). New York, USA: ACM.

Fisher, H., & Thompson, G. (1961). Probabilistic learning combinations of local job-shop scheduling rules. *Factory Scheduling Conference.* Carnegie Institue of Technology.

Fisher, H., & Thompson, G. (1963). Probabilistic learning combinations of local job-shop scheduling rules. J. Muth, & G. Thompson içinde, *Industrial Scheduling* (s. 225-251). New Jersey: Prentice-Hall.

Freeman, D. R., & Jucker, J. V. (1967). The line balancing problem. *Journal of Industrial Engineering , 18*, 361-364.

Freiheit, T., Koren, Y., & Hu, S. J. (2004b). Productivity of parallel production lines with unreliable Machines and material handling. *IEEE transactions on Automation science and engineering , 1* (1), 98-103.

Freiheit, T., Shpitalni, M., & Hu, S. J. (2004a). Productivity of Paced Parallel-Serial Manufacturing Lines With and Without Crossover. *Journal of Manufacturing Science and Engineering , 126* (2), 361-367.

Freisleben, B., & Hartfelder, M. (1993). OPtimization of genetic algorithms by genetic algorithms. R. Albrecht, N. Steele, & C. Reeves içinde, *Artificial Neural Nets and Genetic Algorithms* (s. 392-399). Wien: Springer Verlag.

Fukunaga, A. S. (2002). Automated discovery of composite sat vaiable-selection heuristics. *Eighteenth national conference on Artificial intelligence*, (s. 641-648). Edmonton, Alberta, Canada.

Fukunaga, A. S. (2008). Automated discovery of local search heuristics for satisfiability testing. *Evolutionary Computaiton , 16* (1), 1-31.

Fukunaga, A. S. (2004). Evolving local search heuristic for SAT using genetic programming. *Proceedings of the ACM Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO'04)* (s. 483-494). Seattle, USA: Springer-Verlag.

Gagliolo, M., & Schmidhuber, J. (2006). Dynamic algorithm portfolios. *Proceedings AI and MATH 06, Ninth International Symposium on Artificial Intelligence ad Mathematics.* Fort Lauderdale, Florida.

Garrido, P., & Castro, C. (2009). Stable solving of cvrps using hyperheuristics. *Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO'09)* (s. 255-262). Montreal: ACM press.

Garrido, P., & Riff, M. (2007a). An evolutionary hyperheuristic to solve strip-packing problems. *Intelligent Data Engineering and Automated Learning - IDEAL 2007 Proceedings, Lecture Notes in Computer Science. 4881*, s. 406-415. Springer.

Garrido, P., & Riff, M. (2007b). Collaboration between hyperheuristics to solve strip-packing problems. *12th International Fuzzy Systems Association World Congress Proceedings, Lecture Notes in Computer Science. 4529*, s. 698-707. Springer.

Garrido, P., & Riff, M. (2010). Dvrp: A hard dynamic combinatorial opmisitaion problem tackled by an evolutionary hyper-heuristics. *Journal of Heuristics , 16* (6), 795-834.

Geiger, C. D., Uzsoy, R., & Aytug, H. (2006). Rapid modeling and discovery of priority dispatching rules: An autonomous learning approach. *Journal of Scheduling , 9* (1), 7-34.

Geoffrion, A. M., & Graves, G. W. (1976). Scheduling parallel production lines with changeover costs: Practical application of a quadratic assignment/LP approach. *Operations Research , 24*, 595-610.

Ghosh, S., & Gagnon, R. J. (1989). A comprehensive literature review and analysis of the design, balancing and scheduling of assembly systems. *International journal of Production Research , 27* (4), 637-670.

Ghosh, S., & Gagnon, R. J. (1989). A comprehensive literature review and analysis of the design, balancing and scheduling of assembly systems. *International Journal of Production Research , 27*, 637-670.

Giffler, B., & Thompson, G. L. (1960). Algorithms for solving production scheduling problems. *Operations Research , 8* (4), 487-503.

Globerson, S., & Tamir, A. (1980). The relationship between job design, human behaviour and system response. *International Journal of Production Research , 18* (3), 391-400.

Glover, F. (1986). Future paths for integer programming and links to artificial intelligence. *Comput Oper Res , 13* (5), 533-549.

Gonzales-Garces, A. M. (2006). *Development of a Methodology to Solve the Line Balancing Problem with Parallel Workstations.* Mayagüez, Puerto Rico: University of Puerto Rico, Industrial Engineering.

Gökcen, H., & Baykoc, Ö. (1999). A new line remedial policy for the paced lines with stochastic task times. *International Journal of Production Economics , 58*, 191-197.

Gökçen, H., & Ağpak, K. (2004). Hat Dengelemede Yeni Bir Felsefe Paralel Montaj Hatlarının Eş Zamanlı Dengelenmesi. *Teknoloji , 7* (1), 181-188.

Gökçen, H., & Erel, E. (1998). Binary integer formulation for mixed-model assembly line balancing problem. *Computers and Industrial Engineering , 34*, 451-461.

Gökçen, H., Ağpak, K., & Benzer, R. (2006). Balancing of parallel assembly lines. *International Journal of Production Economics , 103* (2), 600-609.

Gratch, J., & Chien, S. (1996). Adaptive problem-solving for large-scale scheduling problems: a case study. *Journal of Artificial Intelligence Research , 4*, 365-396.

Gratch, J., Chein, S., & de Jong, G. (1993). Learning search control knowledge for deep space network scheduling. *Proceedings of the Tenth International Conference on Machine Learning*, (s. 135-142).

Graves, S. C., & Lamar, B. W. (1983). An integer programming procedure for assembly system design problems. *Operations Research , 31*, 522-545.

Graves, S., & Holmes, C. (1988). Equipment selection ad task assignment for multiproduct assembly system design. *International Journal of Flexible Manufacturing Systems , 1*, 31-50.

Grefenstette, J. (1986). Optimization of control parameters for genetic algorithms. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics SMC , 16* (1), 122-128.

Guerriero, F., & Miltenburg, J. (2003). The stochastic U-line balancing problem. *Naval Research Logistics , 50*, 31-57.

Han, L., & Kendall, G. (2003). Guided operators for a hyper-heuristic genetic algorithm. *Proceedings of AI-2003: Advances in Artificial Intelligence* (s. 807-820). Perth, Australia: The 16th Australian Conference on Artificial Intelligence (AI03).

Hart, E., & Ross, P. M. (1998). A heuristic combination method for solving job-shop scheduling problems. A. E. Eiben, T. Back, M. Schoenauer, & H.-P. Schwefel içinde, *Parallel Problem Solving from Nature V* (s. 845-854). Springer-Verlag.

Hart, E., Ross, P. M., & Nelson, J. (1998). Solving a real-world problem using an evolving heuristically driven schedule builder. *Evolutionary Computation , 6* (1), 61-80.

Hart, W., Krasnogor, N., & Smith, J. (2004). *Recent advances in Memetic Algorithms.* Berlin, Heidelberg, New York: Springer.

Henig, M. (1986). Extensions of the dynamic programming method in the deterministic and stochastic assembly line balancing problems. *Computers and Operations Research , 13*, 443-449.

Hillier, F. S., & So, K. C. (1993). Some data for applying the bowl phenomenon to large production line systems. *International Journal of Production Research* (31), 811-822.

Hillier, F. S., & So, K. C. (1991). The effect of machine breakdowns and interstage storage on the performance of production line systems. *International Journal of Production Research* (29), 2043-2055.

Ho, N. B., & Tay, J. C. (2005). Evolving dispatching rules for solving the flexible job-shop problem. *Proceedings of the IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC'05)*, (s. 2848-2855). Edinburgh, UK.

Horvitz, E., Ruan, Y., Gomes, C. P., Kautz, H. A., Selman, B., & Chickering, D. M. (2001). A bayesian approach to tackling hard computational problems. *UAI'01: Proceedings of the 17th Conference in Uncertainty in Artificial Intelligence* (s. 235-244). San Fransisco, CA, USA: Morgan Kaufmann Publishers Inc.

Huberman, B. A., Lukose, R. M., & Hogg, T. (1997). An economics approach to hard computational problems. *Science , 275*, 51-54.

Hutter, F., Hoos, H., leyton-Brown, K., & Stützle, T. (2009). Paramils: an automatic algorithm configuration framework. *Journal of Artificial Intelligence Research (JAIR) , 36*, 267-306.

Ignall, E. J. (1965). A review of assembly line balancing. *Journal of Industrial Engineering , 16*, 244-254.

Inman, R. R., & Leon, M. (1994). Scheduling duplicate serial stations in transfer lines. *International Journal of Production Research , 32*, 2631-2644.

Iskander, W. H., & Chou, J. (1990). Unbalanced production line scheduling with partial job specialization. *Naval Research Logistics , 37*, 789-805.

Jacob, W. (2006). Towards an adaptive multimeme algorithm for parameter optimisation suiting the engineers' needs. *Parallel Problem Solving from Nature - PPSN IX, 9th International Conference* (s. 132-141). Reykjavik, Iceland: Springer.

Jakob, W. (2002). HyGLEAM - an approach to generally applicable hybridization of evolutionary algorithms. *Parallel Problem Solving from Nature - PPSN VII* (s. 527-536). içinde Berlin: Springer.

Jakobovic, D., Jelenkovic, L., & Budin, L. (2007). Genetic programming heuristics for multiple machine scheduling. *Proceedings of the European Conference on Genetic Programming (EUROGP'07),* (s. 321-330). Valencia, Spain.

Jin, M., & Wu, S. D. (2003). A new heuristic method for mixed model assembly line balancing problem. *Computers and Industrial Engineering , 44*, 159-169.

Johnson, D. S. (1973). *Near-optimal bin-packing algorithms.* Cambridge: PhD thesis, MIT department of Mathematics.

Johnson, R. (1991). Balancing assembly lines for teams and work groups. *International Journal of Production Research , 29*, 1205-1214.

Johnson, R. V. (1983). A branch and bound algorithm for assembly line balancing problems with formulation irregularities. *Management Science , 29*, 1309-1324.

Joslin, D., & Clements, D. (1999). "Squeaky wheel" optimization. *Journal of Artificial Intelligence Research , 10*, 353-373.

Julstrom, B. (1995). What have you done for me lately? Adapting operator probabilities in a steady-state genetic algorithm. *Proceedings of the Sixth ınternational Conference on Genetic Algorithms* (s. 81-87). San Francisco, CA: Morgan Kaufmann.

Kaelbling, L. P., littman, M. L., & Moore, A. W. (1996). Reinforcement learning: a survey. *Journal of Artificial Intelligence Research , 4*, 237-285.

Kahraman, B. (2013). Sosyolojiye Giris. *Sosyolojik çalışmalar* , 1-15.

Kao, E. (1976). A preference order dynamic program for stochastic assembly line balancing. *Management Science , 22*, 1097-1104.

Kao, E. (1979). Computational experience with a stochastic assembly line balancing algorithm. *Computers and Operations Research , 6*, 79-86.

Kao, E., & Queyranne, M. (1982). On dynamic programming methods for assembly line balancing. *Operations Research , 30*, 375-390.

Kara, Y., Ozcan, U., & Peker, A. (2007). An approach for balancing and sequencing mixed-model JIT u-lines. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology , 32* (11-12), 1218-1231.

Karaboğa, D. (2004). *Yapay Zeka Optimizasyon Algoritmaları.* Atlas yayın dağıtım.

Karp, R. M. (1972). Reducibility Among Combinatorial Problems. R. E. Miller, & J. W. Thatcher içinde, *Complexity of Computer Computation* (s. 85-103). New York: Plenum Press.

Keller, R. E., & Poli, R. (2007a). Cost-benefit investigation of a genetic-programming hyper heuristic. *Proceedingss of the 8th International Conference on Aritificial Evolution*, (s. 13-24). Tours, France.

Keller, R. E., & Poli, R. (2007b). Linear genetic programming of parsimonious metaheristics. *Proceedings of the IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC'07)*, (s. 4508-4515). Singapore.

Keller, R. E., & Poli, R. (2008c). Self-adaptive hyperheuristic and greedy search. *2008 IEEE World Congress on Computational Intelligence (WCCI'08).* Hong Kong.

Keller, R. E., & Poli, R. (2008a). Subheuristic search and scalability in a hyperheuristic. *Proceedings of the 10th annual conference on Genetic and Evolutionary Computation (GECCO'08)*, (s. 609-610).

Keller, R. E., & Poli, R. (2008b). Toward subheuristic search. *2008 IEEE World Congress on Computational Intelligence (WCCI'08).* Hong Kong.

Kendall, G., & Mohamad, M. (2004). Channel assignment in cellular communication using a great deluge hyper-heuristic. *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Network (ICON2004)*, (s. 769-773). Singapore.

Kendall, G., & Mohamad, M. (2004b). Channel assignment optimisation using a hyper-heuristic. *Proceedings of the 2004 IEEE Conference on Cybernetic and Intelligent Systems (CIS2004)*, (s. 790-795). Singapore.

Kenyon, C. (1996). Best-fit bin-packing with random order. *Proceedings of teh Seventh Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms*, (s. 359-364).

Kilbridge, M. D., & Wester, L. (1961). The Balance Delay Problem. *Management Science , 8* (1), 69-84.

Kim, Y. K., Kim, J. Y., & Kim, Y. (2000b). A coevolutionary algorithm for balancing and sequencing in mixed model assembly lines. *Applied Intelligence , 13*, 247-258.

Kim, Y. K., Kim, J. Y., & Kim, Y. (2006). An endosymbiotic evolutionary algorithm for the integration of balancing and sequencing in mixed-model U-lines. *European Journal of Operational Research , 168*, 838-852.

Kim, Y. K., Kim, S. J., & Kim, J. Y. (2000c). Balancing and sequencing mixed-model U-lines with a co-evolutionary algorithm. *Production Planning and Control , 11*, 754-764.

Kim, Y. K., Kim, Y., & Kim, Y. J. (2000a). Two-sided assembly line balancing: a genetic algorithm approach. *Production Planning and Control , 11*, 44-53.

Kim, Y., Kim, Y., & Kim, Y. (2000a). Two-sided assembly line balancing: a genetic algorithm approach. *Production Planning and Control , 11*, 44-53.

Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D., & Vecchi, M. P. (1983). Optimization by simulated annealing. *Science , 220*, 671-680.

Koren, Y., Hu, S. J., & Weber, T. W. (1998). Impact of Manufacturing System Configuration on Performance. *47* (1), 369-372.

Kottas, J. F., & Lau, H.-S. (1973). A cost-oriented approach to stochastic line balancing. *AIIE Transactions , 5*, 164-171.

Kottas, J., & Lau, H. (1981). A stochastic line balancing procedure. *International Journal of Production Research , 19*, 177-193.

Kottas, J., & Lau, H. (1976). A total operating cost model for paced lines with stochastic task times. *AIIE Transactions , 8*, 234-240.

Koza, J. R. (1994). *Genetic Programming II: automatic discovery of reusable programs.* Cambridge, Massachusetts: The MIT Press.

Koza, J. R. (1992). *Genetic programming: on the programming of computers by means of natural selection.* Boston, Massachusetts: The MIT Press.

Koza, J. R., & Poli, R. (2005). Genetic programming. E. K. Burke, & G. Kendall içinde, *Search Methodologies: Introductory Tutorials in Optimization and Decision Support Techniques* (s. 127-164). Boston: Kluwer.

Krasnogor, N. (2004). Self generating metaheuristics in bioinformatics: The proteins structure comparison case. *Genetic Programming and Evolvable Machines , 5* (2), 181-201.

Krasnogor, N., & Gustafson, S. (2004). A study on the use of "self-generation" in memetic algorithms. *Natural Computing , 3* (1), 53-76.

Krasnogor, N., & Gustafson, S. (2002). Toward truly "memetic" memetic algorithms: discussion and proofs of concept. D. Corne, G. Fogel, W. Hart, J. Knowles, N. Krasnogor, R. Roy, et al. içinde, *Advances in Nature-Inspired Computation: The PPSN VII Workshops* (s. 9-10). Reading, UK: University of Reading.

Krasnogor, N., & Smith, J. E. (2000). A memetic algorithm with self-adaptive local search: TSP as a case study. *Proceedings of the 2000 Genetic and Evolutionary Computation Conference.* Morgan Kaufmann.

Krasnogor, N., & Smith, J. E. (2001). Emergence of profitable search strategies based on a simple inheritance mechanism. *Proceedings of the 2001 Genetic and Evolutionary Computation Conference.* Morgan Kaufmann.

Krasnogor, N., Blackburne, B. P., Burke, E. K., & Hirst, J. (2002). Multimeme algorithms for protein structure. *Proceedings of the Parallel Problem Solving from Nature VII* (s. 769-778). Springer-Verlag.

Kumar, R., Joshi, A. H., Banka, K. K., & Rockett, P. I. (2008). Evolution of hyperheuristics for the biobjective 0/1 knapsack problem by multiobjective genetic programming. *Proceedings of the 10th ACM Conference on Genetic and Evolutionary Computation (GECCO'08)*, (s. 1227-1234). Atlanta, USA.

Kumar, R., Kumar Bal, B., & Rockett, P. I. (2009). Multiobjective genetic programming approach to evolving heuristics for the bounded diameter minimum

spannig tree problem. *Proceedings of the ACM Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO'09)*, (s. 309-316). Montreal, Canada.

Lan, C.-H. (2007). The design of multiple production lines under deadline constraint. *International Journal of Production Economics , 106* (1), 191-203.

Lau, H.-S., & Shtub, A. (1987). An exploratory study on stopping a paed line when incompletions occur. *IIE Transactions , 19*, 463-467.

Lee, T., Kim, Y., & Kim, Y. (2001). Two-sided assembly line balancing to maximize work relatedness and slackness. *Computers and Industrial Engineering , 40*, 273-292.

Lehman, M. (1969). On criteria for assigning models to assembly lines. *International journal of production research , 7*, 269-285.

Leyton-Brown, K., Nudelman, E., & Shoham, Y. (2002). Learning the empirical hardness of optimization problems: The case of combinatorial auctions. *Lecture Notes in Computer Science , 2470*, 556-572.

Li, H., & Landa-Silva, D. (2011). An Adaptive Evolutionary Multi-objective Approach Based on Simulated Annealing. *Evolutionary computation , 19* (4), 561-595.

Li, J. (2004). Modeling and analysis of manufacturing systems with parallel lines. *IEEE Transactions on Automatic Control , 49* (10), 1824-1832.

Li, J., Burke, E. K., & Qu, R. (2010). Integrating neural networks and logistic regression to underpin hyper-heuristic search. *Knowledge-Based Systems , 24*, 322-330.

Lobo, F. G., lima, C. F., & Michalewicz, Z. (2007). *Parameter Setting in Evolutionary Algorithms* (Cilt 54). Springer.

Lobo, F., & Goldberg, D. (1997). Decision making in a hybrid genetic algorithm. *Proc. IEEE International Conference on Evolutionary Computation*, (s. 121-125).

Lundy, M., & Mees, A. (1986). Convergence of an annealing algorithm. *Mathematical Programming , 34*, 111-124.

Lusa, A. (2008). A survey of the literature on the multiple or parallel assembly line balancing problem. *European Journal of Industrial Engineering , 2* (1), 50-72.

Lutz, C., Davis, K., & Turner, C. (1994). Development of operator assignment schedules: A DSS approach. *Omega , 22*, 57-67.

Lyu, J. (1997). A Single-Run Optimization Algorithm for Stochastic Assembly Line Balancing Problems. *Journal of Manufacturing Systems , 16* (3), 204-210.

Macaskill, J. L. (1972). Production-line balances for mixed-model lines. *Management Science , 19*, 423-434.

Malakooti, B. (1991). A multiple criteria decision making approach for the assembly line balancing problem. *International Journal of Production Research , 29*, 1979-2001.

Malakooti, B. (1994). Assembly line balancing with buffers by multiple criteria optimization. *International Journal of Production Research* (32), 2159-2178.

Malakooti, B., & Kumar, A. (1996). An expert system for solving multi-objective assembly line balancing problems. *International Journal of Production Research , 34*, 2533-252.

Marin-Blazquez, J., & Schulenburg, S. (2007). A hyper-heuristic framework with XCS: Learning to create novel problem-solving algorithms constructed from simpler algoritmic ingredients. *IWLCS, Lecture Notes in Computer Science* (Cilt 4399, s. 193-218). içinde Springer.

Martin, G. (1994). Optimal design of production lines. *International Journal of Production Research , 32*, 989-1000.

Matanachai, S., & Yano, C. A. (2001). Balancing mixed-model assembly lines to reduce work overload. *IIE Transactions , 33*, 29-42.

Mather, H. (1989). *Competitive manufacturing.* Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.

Maturana, J., & Saubion, F. (2008). A compass to guide genetic algorithms. *Proceedings of the 10th international conference on Parallel Problem Solving from Nature* (s. 256-265). Berlin: Springer-Velag.

Maturana, J., Fialho, A., Saubion, F., Schoenauer, M., & Sebag, M. (2009). Extreme compass and dynamic multi-armed bandits for adaptive operator selection. *IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC'09)*, (s. 365-372).

Maturana, J., Fialho, A., Saubion, F., Schoenauer, M., & Sebag, M. (2009). Extreme compass and dynamic multi-armed bandits for adaptive operator selection. *proceedings of IEEE congress on Evolutionary Computation CEC'09*, (s. 365-372).

Maturana, J., Lardeux, F., & Saubion, F. (2010). Autonomous operator management for evolutionary algorithms. *Journal of Heuristics , 16* (6), 808-909.

McMullen, P. R., & Frazier, G. V. (1997). A heuristic for solving mixed-model line balancing problems with stochastic task durations and parallel stations. *International Journal of Production Economics , 51*, 177-190.

McMullen, P., & Frazier, G. (1998). Using simulated annealing to solve a multiobjective assembly line balancing problem with parallel workstations. *International Journal of Production Research , 36*, 2717-2741.

McMullen, P., & Tarasewich, P. (2003). Using ant techniques to solve the assembly line balancing problem. *IIE Transactions , 35*, 605-617.

Meignan, D., Koukam, A., & Creput, J. C. (2010). Coalition-based metaheuristic: A self-adaptive metaheuristic using reinforcement learning and mimetism. *Journal of Heuristics , 16* (6), 859-879.

Merengo, C., Nava, F., & Pozetti, A. (1999). Balancing and sequencing manual mixed-model assembly lines. *International Journal of Production Research* (37), 2835-2860.

Merten, P. (1967). Assembly line balancing by partial enumeration. *Ablauf-und Planungforschung , 8*, 428-433.

Metropolis, M., Rosenbluth, A., Rosenbluth, M., Teller, A., & Teller, E. (1953). Equation of state calculations by fast computing machines. *Journal of Chemical Physics , 21*, 1087-1092.

Miltenburg, J. (2002). Balancing and scheduling mixed-model U-shaped production lines. *International Journal of Flexible Manufacturing Systems , 14*, 119-151.

Miltenburg, J. (1998). Balancing U-lines in a multiple U-line facility. *European Journal of Operational Research , 109* (1), 1-23.

Miltenburg, J. (2000). The effect of breakdowns on U-shaped production lines. *International Journal of Production Research , 38* (2), 353-364.

Miltenburg, J., & Wijngaard, J. (1994). The U-line Line Balancing Problem. *Management Science , 40* (10), 1378-1388.

Minton, S. (1996). Automatically configuring constraint satisfaction problems: a case study. *Constraints , 1* (1), 7-43.

Minton, S. (1988). *Learning Search Control Knowledge: An Explanation-based Approach.* Kluwer.

Mladenovic, N., & Hansen, P. (1997). Variable neighborhood search. *Computers and Operations Research , 24* (11), 1097-1100.

Monden, Y. (1998). *Toyota Production System - An integrated approach to just-in-time* (3rd edition ed.). Dordrecht: Kluwer.

Moodie, C. L., & Young, H. H. (1965). A heuristic method of assembly line balancing for assumptions of constant or variable work element times. *Journal of Industrial Engineering , 16*, 23-29.

Nadler, G., & Smith, W. D. (1963). Manufacturing Progress Functions For Types Of Processes. *International Journal of Production Research , 2* (2), 115-135.

Nakade, K., Ohno, K., & Shanthikumar, J. G. (1997). Bounds and approximations for cycle times of a U-shaped production line. *Operations Research Letters , 21* (4), 191-200.

Nareyek, A. (2001). An empirical analysis of weight-adaptation strategies for neighborhoods of heuristics. *Metaheuristic International Conference MIC'2001*, (s. 211-215). Porto, Portugal.

Nareyek, A. (2003). Choosing search heuristics by non-stationary reinforcement learning. M. G. Resende, & J. P. de Sousa içinde, *Metaheuristics: Computer Decision-Making* (s. 523-544). Kluwer.

Neri, F., Tirronen, V., Karklainen, T., & Rossi, T. (2007). Fitness diversity based adaptation in multimeme algorithms: A comparative study. *IEEE Congress on Evolutionary Computation* (s. 2374-2381). IEEE.

Neri, F., Toivanen, J., Cascella, G. L., & Ong, Y. S. (2007). An adaptive multimeme algorithm for designing HIV multidrug therapies. *IEEE/ACM Trans Comput Bioglogy Bioinform , 4* (2), 264-278.

Nicosia, G., Pacciarelli, D., & Pacifici, A. (2002). Optimally balancing assembly lines with defferent workstations. *Discrete Applied Mathematics , 118*, 99-113.

Nkasu, M., & Leung, K. (1995). A stochastic approach to assembly line balancing. *International Journal of Production Research , 33*, 975-991.

Norenkov, I., & Goodman, E. (1997). Solving scheduling problems via evolutionary methods for rule sequence optimization. *2nd World Conference on soft Computing, WSC2.*

Ochoa, G., Qu, R., & Burke, E. (2009). Analyzing the landscape of a graph based hyper-heuristic for timetabling problems. *Proceedings of Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO 2009).* Montreal.

Ochoa, G., Vaquez-Rodriguez, J., Petrovic, S., & Burke, E. (2009). Dispatching rules for production scheduling: a hyper-heuristic landscape analysis. *IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC 2009).* Montreal.

Oltean, M. (2005). Evolving evolutionary algorithms using linear genetic programming. *Evolutionary Computation , 13* (3), 387-410.

Oltean, M., & Dimitrescu, D. (2004). Evolving TSP heuristics using multi expression programming. *Proceedings of the 4th International Conference on Computational Science (ICCS'04)*, (s. 670-673). Krakow, Poland.

Oltean, M., & Grosan, C. (2003). Evolving evolutionary algorithms using multi expression programming. W. Banzhaf, T. Christaller, P. Dittrich, J. T. Kim, & J. Ziegler içinde, *Proceedings of the 7th European Conference on Artificial Life* (s. 651-658). Dortmund, Germany.

Ong, Y. S., & Keane, A. J. (2004). Meta-lamarckian learning in memetic algorithms. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation , 8*, 99-110.

Ong, Y. S., Lim, M. H., Zhu, N., & Wong, K. W. (2006). Classification of Adaptive Memetic Algorithms: a Comparative Study. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics , 36* (1), 141-152.

Ouelhadj, D., & Petrovic, S. (2010). A cooperative distributed hyper-heuristic framework. *Journal of Heuristics , 16* (6), 835-857.

Ouelhadj, D., & Petrovic, S. (2008). A cooperative distributed hyper-heuristic framework for scheduling. *Proceedings of the IEEE International Conference on Man, Cybernetics, and Systems*, (s. 1232-1238).

Ouelhadj, D., & Petrovic, S. (2009). Asynchronous cooperative hyper-heuristic search. *Proceedings of the International Conference on Artificial Intelligence*, (s. 78-84).

Ozbakır, L., Baykasoglu, A., Gorkemli, B., & Gorkemli, L. (2011). Multiple-colony ant algorithm for parallel assembly line balancing problem. *Applied Soft Computing , 11*, 3186-3198.

Ozcan, E., Bilgin, B., & Korkmaz, E. E. (2008). A Comprehensive Survey of Hyperheuristics. *Intelligent Data Analysis , 12* (1), 1-21.

Ozcan, E., Bilgin, B., & Korkmaz, E. E. (2006). Hill climbers and mutational heuristics in hyperheuristics. *Proceedings of the 9th International Conference on Parallel Problem Solving from Nature (PPSN 2006), Lecture Notes in Computer Science, 4193*, s. 202-211. Reykjavik, Iceland.

Ozcan, E., Bykov, Y., Birben, M., & Burke, E. K. (2009). Examination timetabling using late acceptance hyper-heuristics. *Proceedings of IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC2009)*, (s. 997-1004).

Özcan, U., & Toklu, B. (2009). Balancing of mixed-model two-sided assembly lines. *Computers and Industrial Engineering , 57*, 217-227.

Özcan, U., Çerçioğlu, H., Gökçen, H., & Toklu, B. (2009). A tabu search algorithm for the parallel assembly line balancing problem. *Gazi University Journal of Science , 22* (4), 313-323.

Özcan, U., Çerçioğlu, H., Gökçen, H., & Toklu, B. (2009). Balancing and sequencing of parallel mixed-model assembly lines. *International Journal of Production Research* , 1-25.

Özcan, U., Çerçioğlu, H., Gökçen, H., & Toklu, B. (2010). Balancing and sequencing of parallel mixed-model assembly lines. *International Journal of Production Research , 48* (17), 5089-5113.

Park, K., Park, S., & Kim, W. (1997). A heuristic for an assembly line balancing problem with incompatibility, range, and partial precedence constraints. *Computers and Industrial Engineering , 32*, 321-332.

Pastor, R., & Corominas, A. (2000). Assembly line balancing with incompatibilities and bounded workstation loads. *Recerca Operativa , 2000*, 23-45.

Petrovic, S., & Qu, R. (2002). Case-Based Reasoning as a Heuristic Selector in a Hyper-Heuristic for Course Timetabling. *Sixth International Conference on Knowledge-Based Intelligent Information&Engineering Systems (KES'2002).* Crema, Italy.

Pike, R., & Martin, G. E. (1994). The bowl phenomenon in unpaced lines. *International Journal of Production Research , 32*, 483-499.

Pillay, N. (2008). An analysis of representations for hyper-heuristics for the uncapacitated examination timetabling problem in a genetic programming system. S. A. Information (Dü.), *Proceedings of the 2008 Annual Conference of the South African Institute of Computer Scientists and Information Technologists on IT Research in Developing Countries, SAICSIT Conf. 2008.* içinde *338*, s. 188-192. Wilderness, South Africa: ACM International Conference Proceeding Series.

Pillay, N. (2009). Evolving hyper-heuristics for the uncapacitated examination timetabling problem. *Proceedings of the 4th Multidisciplinary International*

*Conference on Scheduling: Theory and Applications (MISTA'09)*, (s. 447-457). Dublin, Ireland.

Pillay, N., & Banzhaf, W. (2007). A genetic programming approach to the generation of hyper-heuristics for the uncapacitated examination timetabling problem. J. Neves, M. Santos, & J. Machado içinde, *Lecture Notes in Computer Science: Progress in Artificial Intelligence* (Cilt 4874, s. 223-234). Springer.

Pine, B. J. (1993). *Mass customization: The new frontier in business competition.* Boston, Massachusetts: Harvard Business School Press.

Pinnoi, A., & Wilhelm, W. (1997). A family of hierarchical models for assembly system design. *International Journal of Production Research , 35*, 252-280.

Pinnoi, A., & Wilhelm, W. (1998). Assembly system design: A branch and cut approach. *Management Science , 44*, 103-118.

Pinnoi, A., & Wilhelm, W. E. (1997). A family of hierarchical models for the design of deterministic assembly systems. *International Journal of Production Research , 35* (1), 253-280.

Pinto, P. A., Dannenbring, D. G., & Khumawala, B. M. (1975). A branch and bound algorithm for assembly line balancing with paralleling of stations. *International Journal of Production Research , 13*, 183-196.

Pinto, P. A., Dannenbring, D. G., & Khumawala, B. M. (1981). Branch and bound and heuristic procedures for assembly line balancing with paralleling of stations. *International Journal of Production Research , 19*, 565-576.

Pinto, P. A., Dannenbring, D., & Khumawala, B. (1983). Assembly line balancing with processing alternatives: an application. *Management Science , 29*, 817-830.

Pisinger, D., & Ropke, S. (2007). A general heuristic for vehicle routing problems. *Computers and Operations Research , 34*, 2403-2435.

Pitsoulis, L. S., & Resende, M. G. (2001). Greedy randomized adaptive search procedures. P. Pardalos, & M. G. Resende içinde, *Handbook of Applied Optimization* (s. 168-181). OUP.

Poli, R., Woodward, J. R., & Burke, E. K. (2007). A histogram-matching approach to the evolution of bin-packing strategies. *Proceedings of the Congress on Evolutionary Computation (CEC'07)*, (s. 3500-3507). Singapore.

Powell, S. G. (1994). Buffer allocation in unbalanced three-station serial lines. *International Journal of Production Research* (32), 2201-2217.

Qu, R., & Burke, E. (2009). Hybridisations within a graph based hyper-heuristic framework for univeersity timetabling problems. *Journal of the Operational Research Society , 60*, 1273-1285.

Rachamadugu, R., & Talbot, B. (1991). Improving the equality of workload assignments in assembly lines. *International Journal of Production Research , 29*, 619-633.

Raouf, A., & Tsui, C. (1982). A new method for assembly line balancing having stochastic work elements. *Computers and Industrial Engineering , 6*, 131-148.

Rattadilok, P., Gaw, A., & Kwan, R. S. (2005). Distrubuted choice function hyper-heuristics for timetabling and scheduling. E. K. Burke, & M. Trick içinde, *The Practice and Theory of Automated Timetabling V: Selected Papers from the 5th International Conference on the Practice and Theory of Automated Timetabling* (Cilt 3616, s. 51-70). Springer.

Rechenberg, I. (1973). *Evolution strategy: Optimization of technical systems by means of biological evolution.* Stuttgart: Fromman-Holzboog.

Reeve, N., & Thomas, W. (1973). Balancing stochastic assembly lines. *AIIE Transactions , 5*, 223-229.

Rekiek, B., de Lit, P., & Delchambre, A. (2002a). Hybrid assembly line design and user's preferences. *International Journal of Production Research , 40*, 1095-1011.

Rekiek, B., Dolgui, A., Delchambre, A., & Bratcu, A. (2002). State of art of optimization methods for assembly line design. *Annual Reviews in Control , 26* (2), 163-174.

Rice, J. R. (1976). The algorithm selection problem. *Advances in Comput , 15*, 65-118.

Ridge, E., & Kudenko, D. (2007). Analyzing heuristic performance with response surface models: prediction, optimization and robustness. *Proceedings of the 9th annual conference on Genetic and evolutionary computation (GECCO'07). 1*, s. 150-157. ACM Press.

Robinson, L. W., McClaion, J. O., & Thomas, L. J. (1990). The good, the bad and the ugly: Quality on an assembly line. *International Journal of Production Research , 28*, 963-980.

Rosenberg, O., & Ziegler, H. (1992). A comparison of heuristic algorithms for cost-oriented assembly line balancing. *Zeitschrift für Operations Research , 36*, 477-495.

Rosenblatt, M., & Carlson, R. (1985). Designing a production line to maximize profit. *IIE Transactions , 17*, 117-121.

Ross, P. (2005). Hyper-heuristics. E. Burke, & G. Kendall içinde, *Search Methodologies: Introductory Tutorials in Optimization and Decision Support Techniques* (s. 529-556). Springer.

Ross, P., & Marin-Blazquez, J. (2005). Constructive hyper-heuristics in class timetabling. *IEEE Congress on Evolutionary Computation* (s. 1493-1500). IEEE.

Ross, P., Hart, E., & Corne, D. (1997). Some observations about GA-based exam timetabling. *Practice and Theory of Automated Timetabling II: Second International Conference, PATAT 1997* (s. 115-129). Springer-Verlag.

Ross, P., Marin-Blazquez, J., & Hart, E. (2004). Hyper-heuristics applied to class and exam timetabling problems. *Proceedings of the 2004 IEEE Congress on Evolutionary Computation* (s. 1691-1698). Portland: IEEE Press.

Ross, P., Marin-Blazquez, J., Schulenburg, S., & Hart, E. (2003). Learning a procedure that can solve hard bin-packing problems: A new ga-based approach to hyper-heuristics. *Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO 2003)* (s. 1295-1306). Springer.

Ross, P., Schulenburg, S., Marin-Blazquez, J., & Hart, E. (2002). Hyper-heuristics: learning to combine simple heuristics in bin-packing problem. *Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO'02).* Morgan-Kauffman.

Rubinovitz, J., & Bukchin, J. (1993). RALB - A heuristic algorithm for design and balancing of robotic assembly lines. *Annals of the CIRP , 42*, 497-500.

Runka, A. (2009). Evolving an edge selection formula for ant colony optimization. *Proceedings of the ACM Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO'09)*, (s. 1075-1081). Montreal, Canada.

Sabar, N. R., Ayob, M., Kendall, G., & Qu, R. (2012). A Honey-bee Mating Optimization Algorithm for Educational Timetabling Problems. *European Journal of Operational Research , 216* (3), 533-543.

Sarin, S., & Erel, E. (1990). Development of cost model for the single-model stochastic assembly line balancing problem. *International Journal of Production Research , 28*, 1305-1316.

Sarin, S., Erel, E., & Dar-El, E. (1999). A methodology for solving single-model, stochastic assembly line balancing problem. *Omega , 27*, 525-535.

Sarker, B. R., & Shanthikumari, J. G. (1983). A generalized approach for serial or parallel line balancing. *International Journal of Production Research , 21* (1), 109-133.

Sawik, T. (2002). Monolithic vs. hierarchical balancing and scheduling of a flexible assembly line. *European Journal of Operational Research , 143*, 115-124.

Schaffer, J. D. (1996). Combinatorial Optimization by Genetic Algorithms: The Value of The phenotype/Genotype Distinction. *First International Conference on Evolutionary Computing and its Application (EvCA'96)* (s. 110-120). Moscow: Institute for High Performance Computer Systems of the Russian Academy of Sciences.

Schmiedle, F., Drechsler, N., Grobe, D., & Drechsler, R. (2002). Heuristic learning based on genetic programming. *Genetic Programming and Evolvable Machines , 4*, 363-388.

Scholl, A. (1999). *Balancing and sequencing assembly lines* (2nd Edition b.). Heidelberg: Physica.

Scholl, A. (1999). *Balancing and Sequencing Assembly Lines* (2. Baskı ed.). Heidelberg: Physica.

Scholl, A., & Becker, C. (2006). State-of-the-art exact and heuristic solution procedures for simple assembly line balancing. *European Journal of Operational Research , 168*, 666-693.

Scholl, A., & Becker, C. (2006). State-of-the-art exact and Heuristic Solution Procedures for simple Assembly Line Balancing. *European Journal of Operational Research , 168*, 666-693.

Scholl, A., & Boysen, N. (2009). Designing parallel assembly lines with split workplaces: Model and optimization procedure. *International Journal of Production Economics* .

Scholl, A., & Boysen, N. (2008). *The multiproduct parallel assembly lines balancing problem: Model and optimization procedure.* Friedrich-Schiller-University Jena. Jena: School of Economics and Business Administration Friedrich-Schiller-University Jena www.jbe.uni-jena.de.

Scholl, A., & Klein, R. (1997). SALOME: A bidirectional branch and bound procedure for assembly line balancing. *INFORMS Journal on Computing , 9*, 319-334.

Scholl, A., & Klein, R. (1999). ULINO: Optimally balancing U-shaped JIT assembly lines. *International Journal of Production Research , 37* (4), 721-736.

Scholl, A., Klein, R., & Domschke, W. (1998). Pattern based vocabulary building for effectively sequencing mixed model assembly lines. *Journal of Heuristics , 4*, 359-381.

Schöniger, J., & Spingler, J. (1989). Planung der montageanlage. *Technica , 14*, 27-32.

Schrage, L., & Baker, K. (1978). Dynamic programming solution of sequencing problems with precedence constraints. *Operations Research , 26*, 444-449.

Seneta, E. (1981). *Non-negative Matrices and Markov Chains* (2nd Edition b.). New York: Springer.

Shaw, P. (1998). Using constraint programming and local search methods to solve vehicle routing problems. *Proceedings of International Conference on Principles and Practice of Constraint Programming (CP'98). 1520*, s. 417-431. Springer.

Shin, D. (1990). An Efficient Heuristic for Solving Stochastic Assembly Line Balancing Problems. *Computers & Industrial Engineering , 18* (3), 285-295.

Shtub, A. (1984). The effect of incompletion cost on line balancing with multiple mannig of work stations. *International Journal of Production Research , 22*, 235-245.

Shtub, A., & Dar-El, E. M. (1989). A Methodology for the selection of assembly systems. *International Journal of Production Research , 27* (1), 175-186.

Silverman, F., & Carter, J. (1986). A cost-based methdodology for stochastic line balancing with intermittent line stoppages. *Management Science , 32*, 455-463.

Smith, J. (2002). Co-evolving memetic algorithms: Initial investigations. *Parallel Problem Solving from Nature PPSN VII* (s. 537-546). Berlin/Heidelberg: Springer.

Smith, J. E. (2007). Co-evolving memetic algorithms: A review and progress report. *IEEE Transactions in Systems, Man and Cybernetics , 37* (1), 6-17.

Smith, J. E. (2003). Protein structure prediction with co-evolving memetic algorithms. *Proceedings of Congress on Evolutionary Computation CEC'03, 4*, s. 2346-2353.

Smith, J. (2008). Self-Adaptation in Evolutionary Algorithms for Combinatorial Optimisation. *Adaptive and Multilevel Metaheuristics* (s. 31-57). içinde Springer.

Smith, J., & Fogarty, T. (1997). Operator and parameter adaptation in genetic algorithms. *Soft Computing* , 81-87.

Smith-Miles, K. A. (2008). Cross-disciplinary perspectives on meta-learning for algorithm selection. *ACM Computing Surveys , 41* (6), 1-25.

Smith-Miles, K. A. (2008). Towards insightful algorithm selection for optimisation using meta-learning concepts. *IEEE International Joint Conference on Neural Networks IJCNN 2008*, (s. 4118-4124).

Sniedovich, M. (1981). Analysis of a preference order assembly line problem. *Management Science , 27*, 1067-1080.

Sotskov, Y., Dolgui, A., & Portmann, M.-C. (2006). Stability analysis of optimal balance for assembly line with fixed cycle time. *European Journal of Operational Research , 168*, 783-797.

Sparling, D. (1998). Balancing JIT production units: The N U-line balancing problem. *Information Systems and Operational Research , 36*, 215-237.

Sparling, D., & Miltenburg, J. (1998). The mixed-model U-line balancing problem . *International Journal of Production Research , 36* (2), 485-501.

Sphicas, G., & Silverman, F. (1976). Deterministic equivalents for stochastic assembly line balancing. *AIIE Transactions , 8*, 280-282.

Spicer, P., Koren, Y., Shpitalni, M., & Yip-Hoi, D. (2002). Design Principles for Machining System Configurations . *CIRP Annals - Manufacturing Technology , 51* (1), 275-280.

Stephenson, M., OReilly, U., Martin, M., & Amarasinghe, S. (2003). Meta optimization: Improving complier heuristics with machine learning. *Proceedings of the Conference on Programming Language Design and Implementation*, (s. 77-90). San Diego, CA, USA.

Storer, R., Wu, S., & Vaccari, R. (1992). New search spaces for sequencing problems with application to job shop scheduling. *Management Science , 38* (10), 1495-1509.

Storer, R., Wu, S., & Vaccari, R. (1992). New search spaces for sequencing problems with application to job shop scheduling. *Management Science , 38* (10), 1495-1509.

Storer, R., Wu, S., & Vaccari, R. (1995). Problem and heuristic space search for job shop scheduling. *ORSA Journal of Computing , 7* (4), 453-467.

Storer, R., Wu, S., & Vaccari, R. (1995). Problem and heuristic space search strategies for job shop scheduling. *ORSA Journal of Computing , 7* (4), 453-467.

Suhail, A. (1983). Reliability and optimization considerations in a conveyor-paced assembly line system. *International Journal of Production Research* (21), 627-640.

Sumichrast, R. S., & Russell, R. S. (1990). Evaluating mixed-model assembly line sequencing heuristics for just-in-time production systems. *Journal of Operations Management* (9), 371-390.

Sumichrast, R. T., Russell, R. S., & Taylor, B. W. (1992). A comparative analysis of sequencing procedures for mixed-model assembly lines in a just-in-time production system. *International Journal of Production Research* (30), 199-214.

Suresh, G., & Sahu, S. (1994). Stochastic assembly line balancing using simulated annealing. *International Journal of Production Research , 32*, 1801-1810.

Suresh, G., Vinod, V., & Sahu, S. (1996). Genetic algorithm for assembly line balancing. *Production Planning and Control , 7*, 38-46.

Sutton, R. S., & Barto, A. G. (1998). *Reinforcement Learning: An Introduction.* MIT Press.

Süer, G. A. (1998). Designing parallel assembly lines. *Computers & Industrial Engineering , 35* (3-4), 467-470.

Süer, G. A., & Dagli, C. H. (1994). A knowledge-based system for selection of resource allocation rules and algorithms. In A. Mital, & S. Anand, *Handbook of Expert Systems Applications in Manufacturing: Structures and Rules* (1st edition ed., pp. 108-129). Springer.

Talbot, F. B., & Patterson, J. H. (1984). An Integer Programming Algorithm with Network Cuts for Solving the Assembly Line Balancing Problems. *Management Science , 30* (1), 85-99.

Tavares, J., Machado, P., Cardoso, A., Pereira, F. B., & Costa, E. (2004). On the evolution of evolutionary algorithms. *Proceedings of the European Conference on Genetic Programming (EUROGP'04)*, (s. 389-398). Coimbra, Portugal.

Tay, J. C., & Ho, N. B. (2008). Evolving dispatching rules using genetic programming for solving multi-objective flexible job-shop problems. *Computers and Industrial Engineering , 54* (3), 453-473.

Terashima-Marin, H., Ortiz-Bayliss, J., Ross, P., & Valenzuela-Dendon, M. (2008). Hyper-heuristics for the dynamic variable ordering in constraint satisfaction problems. *Genetic and Evolutionary Computation Conference GECCO 2008* (s. 571-578). ACM press.

Terashima-Marin, H., Ross, P. M., & Valenzuela-Dendon, M. (1999). Evolution of constraint satisfaction strategies in examination timetabling. *Proceedings of the GECCO-99 Genetic and Evolutionary Computation Conference* (pp. 635-642). Morgan Kaufmann.

Terashima-Marin, H., Ross, P., Farias-Zarate, C., Lopez-Camacho, E., & Valenzuela-Rendon, M. (2008). Generalized hyper-heuristics for solving regular and irregular bin packing problems. *Annals of Operations Research , 1* (1), 1-10.

Terashima-Marin, H., Zarate, C., Ross, P., & Valenzuela-Dendon, M. (2007). Comparing two models to generate hyper-heuristics for the 2d-regular bin-packing problem. *Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO 2007)* (s. 2182-2189). ACM press.

Terashima-Marin, H., Zarate, C., Ross, P., & Valenzuela-Rendon, M. (2006). A ga-based method to produce generalized hyper-heuristics for the 2d-regular cutting stock problem. *GECCO'06: Proceedings of the 8th annual conference on Genetic and evolutionary computation* (s. 591-598). New York: ACM press.

Thabtah, F., & Cowling, P. (2008). Mining the data from a hyperheuristic approach using associative classification. *Expert Systems with Applications: An International Journal , 34* (2), 1093-1101.

Thomopoulos, N. T. (1970). Mixed model line balancing with smoothed station assignments. *Management Science , 16*, 593-603.

Thomopoulos, T. N. (1967). Line balancing — sequencing for mixed-model assembly. *Management Science , 14*, B59-B75.

Thompson, J., & Dowsland, K. (1996). General cooling schedules for a simulated annealing based timetabling system. E. K. Burke içinde, *Practice and Theory of Automated Timetabling* (Cilt 1153, s. 345-363). Springer.

Tsai, D. M., & Yao, M. J. (1993). A line-balanced-base capacity planning procedure for series-type robotic assembly line. *International Journal of Production Research , 31*, 1901-1920.

Tsai, L. -H. (1995). Mixed-model sequencing to minimize utility work and the risk of conveyor stoppage. *Managemenet Science , 41*, 485-495.

Tsujimura, Y., Gen, M., & Kubota, E. (1995). Solving fuzzy assembly-line balancing problem with genetic algorithms. *Computers and Industrial Engineering , 29*, 543-547.

Tuson, A., & Ross, P. (1998). Adapting operator settings in genetic algorithms. *Evolutionary Computation , 6*, 161-184.

Urban, T. L. (1998). Note. Optimal Balancing of U-Shaped Assembly Lines. *Management Science , 44* (5), 738-741.

Urban, T. L., & Chiang, W. C. (2006). An optimal piecewise-linear program for the U-line balancing problem with stochastic task times. *European Journal of Operational Research , 168* (3), 771-782.

Van Laarhoven, P., & Aarts, E. (1997). *Simulated Annealing: Theory and Applications.* Kluwer Academic Publishers.

van Zante- de Fokkert, J. I., & de Kok, A. G. (1995). *The Mixed and Multi Model Line Balancing Problem: A Comparison.* Eindhoven University of Technology, Graduate School of Industrial Engineering and Management Science. Eindhoven: Department of Operations Planning and Control.

Van Zante-de Fokert, J., & de Kok, T. G. (1997). The mixed and multi model line balancing problem: A comparison. *European Journal of Operational Research , 100*, 399-412.

Vaquez-Rodriguez, J., Petrovic, S., & Salhi, A. (2007). A combined meta-heuristic with hyper-heuristic approach to the scheduling of the hybrid flow shop with sequence dependent setup times and uniform machines. *3rd Multidisciplinary International Scheduling Conference: Theory and Applications (MISTA 2007).*

Vaquez-Rodriguez, J., Petrovic, S., & Salhi, A. (2007). An investigation of hyper-heuristic search spaces. *IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC 2007)*, (s. 3776-3783).

Vazquez-Rodriguez, J., & Petrovic, S. (2010). A new dispatching rule based genetic algorithm for the multi-objective job shop problem. *Journal of Heuristics , 16* (6), 771-793.

Vilarinho, P. M., & Simaria, A. S. (2002). A two-stage heuristic method for balancing mixed model assembly lines with parallel workstations. *International Journal of Production Research , 40*, 1405-1420.

Wah, B., & Ieumwananonthachai, A. (1999). Teacher: A genetics-based system for learning and for generalizing heuristics. X. Yao içinde, *Evolutionary Computation* (s. 124-170). World Scientific Publishing.

Wah, B., Ieumwananonthachai, A., Chu, L., & Aizawa, A. (1995). Genetics-based learning of new heuristics: Rational scheduling of experiments and generalization. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering , 7* (5), 763-785.

Wang, F., & Wilson, R. C. (1986). Comparative analyses of fixed and removable item mişed model assembly lines. *IIE Transactions , 18*, 313-317.

Wee, T. S., & Magazine, M. J. (1982). Assembly line balancing as generalized bin packing. *Operations Research Letters , 1/2*, 56-58.

Wee, T. S., & Magazine, M. J. (1982). Assembly Line Balancing as Generalized Bin Packing. *Operations Research Letters , 1* (2), 56-58.

Wild, R. (1972). *Mass-Production Management: The Design and Operation of Production Flow-Line Systems.* London: Wiley.

Wilson, J. (1986). Formulation of a problem involving assembly lines with multiple mannig of work stations. *International Journal of Production Research , 24*, 59-63.

Wolpert, D., & MacReady, W. G. (1997). No Free Lunch Theorems for Optimization. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* , 67-82.

Wyman, F. P., & Moberly, L. E. (1971). An application of simulation to compare production line configurations with failures and repairs. *Proceedings of the 5th conference on winter simulation*, (pp. 187-196).

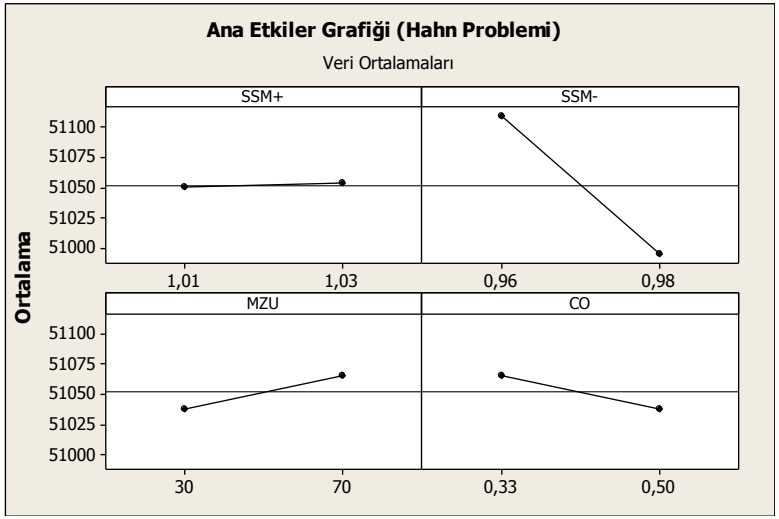
Xu, Y., & Qu, R. (2010). Solving multi-objective multicast routing problems by evolutionary multi-objective simulated annealing algorithms with variable neighbourhoods. *Journal of the Operational Research Society , 62*, 313-325.

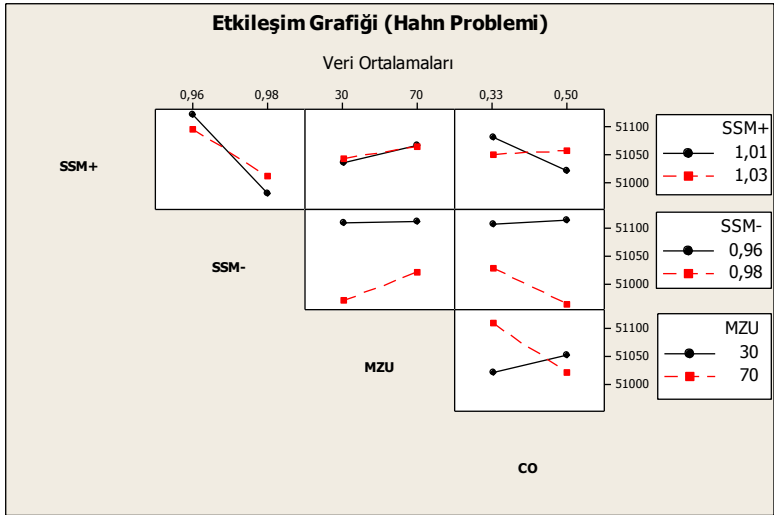
Yano, C. A., & Bolat, A. (1989). Survey, development and application of algorithms for sequencing paced assembly lines. *Journal of Manufacturing and Operations Management* (2), 172-198.

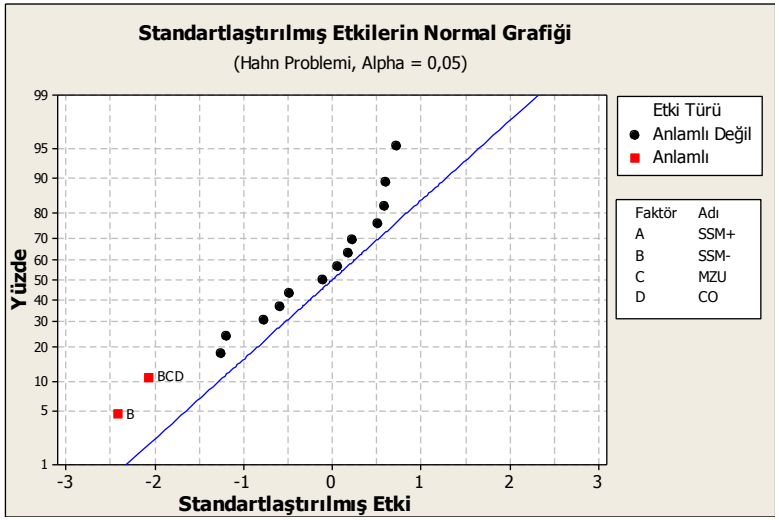
Younas, I., Kamrani, F., Schulte, C., Ayani, R., & Schubert, J. (to appear). Efficient Genetic Algorithms for Optimal Assignment of Tasks to Teams of Agents. *European Journal of Operations Research* .

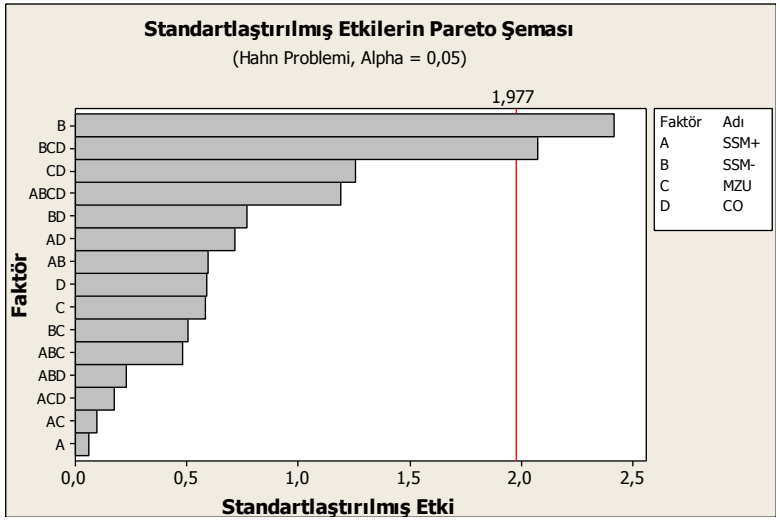
Zapfel, G. (1975). *Ausgewahlte fertigungswirtschaftliche Optimierungsprobleme von Fliebfertigungssystemen.* Berlin.

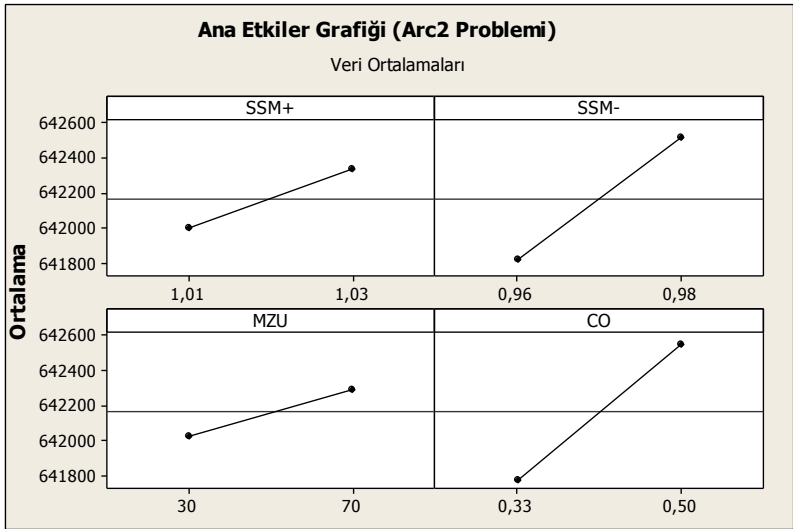
Ek 1. Tam Faktöryel Deney Sonuçları

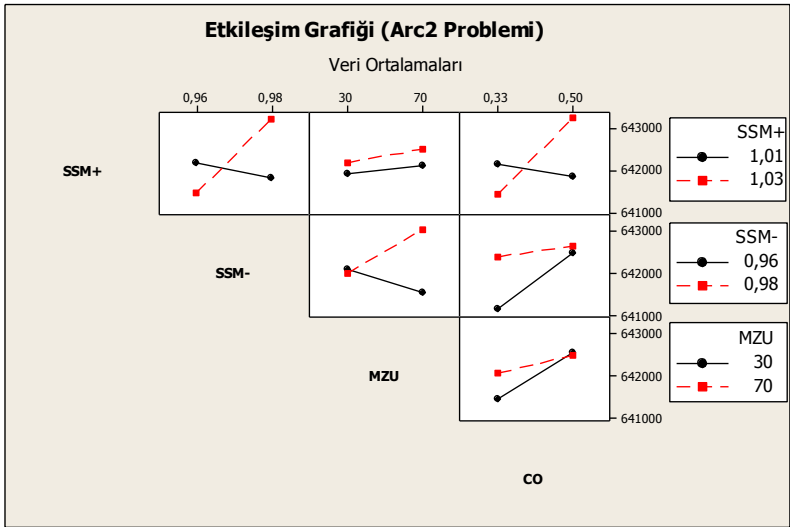


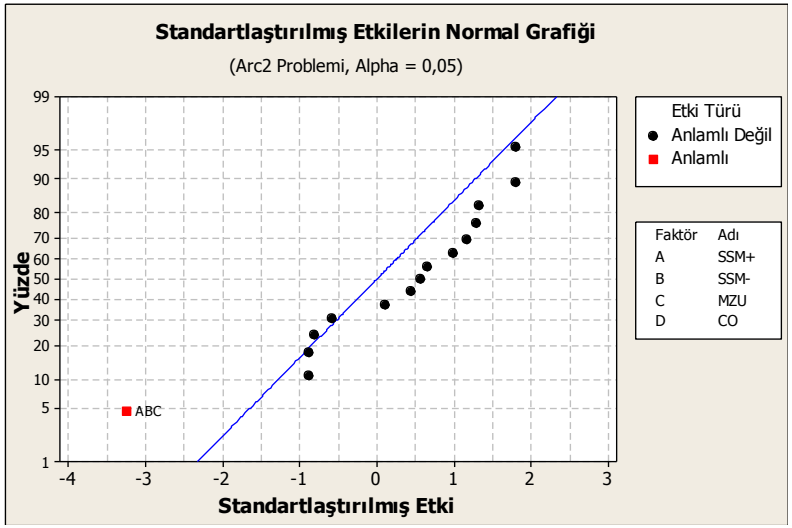



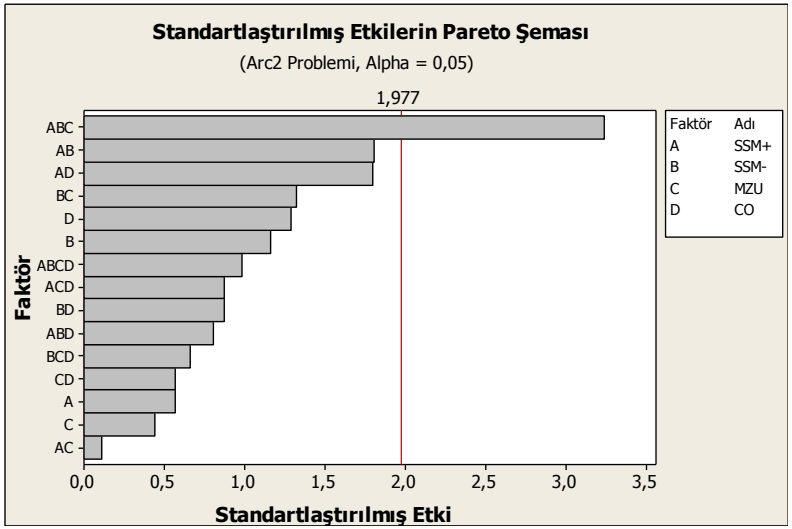




Ana Etkiler Grafiği (Arc2 Problemi)
Veri Ortalamaları
SSM+
SSM-
MZU
CO
Ortalama
642600
642400
642200
642000
641800
1,01
1,03
0,96
0,98
30
70
0,33
0,50


Etkileşim Grafiği (Arc2 Problemi)
Veri Ortalamaları
0,96
0,98
30
70
0,33
0,50
SSM+
SSM-
MZU
CO
643000
642000
641000
SSM+
1,01
1,03
SSM-
0,96
0,98
MZU
30
70


Standartlaştırılmış Etkilerin Normal Grafiği
(Arc2 Problemi, Alpha = 0,05)
Yüzde
99
95
90
80
70
60
50
40
30
20
10
5
1
ABC
-4
-3
-2
-1
0
1
2
3
Standartlaştırılmış Etki
Etki Türü
Anlamlı Değil
Anlamlı
Faktör Adı
A SSM+
B SSM-
C MZU
D CO


Standartlaştırılmış Etkilerin Pareto Şeması
(Arc2 Problemi, Alpha = 0,05)
1,977
Faktör
ABC
AB
AD
BC
D
B
ABCD
ACD
BD
ABD
BCD
CD
A
C
AC
0,0
0,5
1,0
1,5
2,0
2,5
3,0
3,5
Standartlaştırılmış Etki
Faktör Adı
A SSM+
B SSM-
C MZU
D CO

**Ek 2: Test Problemlerinin Üst Sezgisel Yaklaşım Çözüm Sonuçları**

| Jaeschke Problemi | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| c | 1-α | $\sigma^2$ | min K | min F | Ort F |
| 11 | 0,85 | Düşük | 8 | 123,23 | 123,46 |
| 11 | 0,85 | Rassal | 9 | 146,00 | 146,00 |
| 11 | 0,85 | Yüksek | 11 | 165,77 | 165,77 |
| 11 | 0,9 | Düşük | 8 | 122,44 | 122,92 |
| 11 | 0,9 | Rassal | 11 | 161,21 | 161,42 |
| 11 | 0,9 | Yüksek | 12 | 177,89 | 177,89 |
| 11 | 0,95 | Düşük | 8 | 126,93 | 128,02 |
| 11 | 0,95 | Rassal | 12 | 169,09 | 169,89 |
| 11 | 0,95 | Yüksek | 13 | 187,71 | 187,71 |
| 13 | 0,85 | Düşük | 7 | 118,26 | 119,73 |
| 13 | 0,85 | Rassal | 7 | 129,75 | 132,71 |
| 13 | 0,85 | Yüksek | 8 | 145,07 | 145,76 |
| 13 | 0,9 | Düşük | 7 | 119,99 | 120,17 |
| 13 | 0,9 | Rassal | 8 | 138,84 | 138,99 |
| 13 | 0,9 | Yüksek | 8 | 151,00 | 152,06 |
| 13 | 0,95 | Düşük | 7 | 116,02 | 116,10 |
| 13 | 0,95 | Rassal | 9 | 152,79 | 152,89 |
| 13 | 0,95 | Yüksek | 10 | 171,38 | 171,38 |
| 15 | 0,85 | Düşük | 6 | 118,00 | 118,00 |
| 15 | 0,85 | Rassal | 7 | 135,70 | 136,52 |
| 15 | 0,85 | Yüksek | 7 | 138,10 | 139,58 |
| 15 | 0,9 | Düşük | 6 | 118,00 | 118,00 |
| 15 | 0,9 | Rassal | 7 | 136,13 | 136,91 |
| 15 | 0,9 | Yüksek | 7 | 136,78 | 137,18 |
| 15 | 0,95 | Düşük | 6 | 119,06 | 119,08 |
| 15 | 0,95 | Rassal | 7 | 137,64 | 137,82 |
| 15 | 0,95 | Yüksek | 8 | 151,97 | 152,01 |
| 17 | 0,85 | Düşük | 5 | 109,63 | 109,71 |
| 17 | 0,85 | Rassal | 5 | 126,76 | 127,42 |
| 17 | 0,85 | Yüksek | 6 | 134,27 | 134,43 |
| 17 | 0,9 | Düşük | 5 | 109,65 | 109,72 |
| 17 | 0,9 | Rassal | 6 | 130,12 | 130,43 |
| 17 | 0,9 | Yüksek | 6 | 135,28 | 135,65 |
| 17 | 0,95 | Düşük | 5 | 111,96 | 112,02 |
| 17 | 0,95 | Rassal | 6 | 133,96 | 134,09 |
| 17 | 0,95 | Yüksek | 7 | 147,77 | 148,39 |
| 19 | 0,85 | Düşük | 4 | 111,09 | 111,24 |
| 19 | 0,85 | Rassal | 5 | 124,75 | 124,89 |
| 19 | 0,85 | Yüksek | 5 | 125,54 | 125,72 |
| 19 | 0,9 | Düşük | 5 | 119,92 | 119,93 |
| 19 | 0,9 | Rassal | 5 | 124,07 | 124,35 |
| 19 | 0,9 | Yüksek | 5 | 128,76 | 129,13 |
| 19 | 0,95 | Düşük | 5 | 119,92 | 119,92 |
| 19 | 0,95 | Rassal | 5 | 124,47 | 124,82 |
| 19 | 0,95 | Yüksek | 6 | 141,55 | 141,59 |

| Jackson Problemi | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **c** | **1-α** | **cv** | **min K** | **min F** | **ort F** |
| 14 | 0,85 | Düşük | 8 | 140,77 | 142,98 |
| 14 | 0,85 | Rassal | 9 | 171,57 | 173,11 |
| 14 | 0,85 | Yüksek | 10 | 189,30 | 190,29 |
| 14 | 0,9 | Düşük | 8 | 142,93 | 143,10 |
| 14 | 0,9 | Rassal | 9 | 174,10 | 174,62 |
| 14 | 0,9 | Yüksek | 10 | 196,05 | 196,79 |
| 14 | 0,95 | Düşük | 8 | 141,24 | 142,81 |
| 14 | 0,95 | Rassal | 10 | 185,24 | 185,39 |
| 14 | 0,95 | Yüksek | 12 | 217,95 | 218,05 |
| 16 | 0,85 | Düşük | 7 | 142,51 | 143,65 |
| 16 | 0,85 | Rassal | 7 | 153,54 | 154,80 |
| 16 | 0,85 | Yüksek | 8 | 174,79 | 175,17 |
| 16 | 0,9 | Düşük | 7 | 142,20 | 143,05 |
| 16 | 0,9 | Rassal | 8 | 162,88 | 163,21 |
| 16 | 0,9 | Yüksek | 9 | 188,82 | 189,38 |
| 16 | 0,95 | Düşük | 7 | 141,84 | 142,21 |
| 16 | 0,95 | Rassal | 8 | 167,45 | 169,75 |
| 16 | 0,95 | Yüksek | 10 | 200,35 | 201,07 |
| 19 | 0,85 | Düşük | 6 | 141,76 | 142,48 |
| 19 | 0,85 | Rassal | 6 | 146,75 | 150,24 |
| 19 | 0,85 | Yüksek | 7 | 171,15 | 172,69 |
| 19 | 0,9 | Düşük | 6 | 139,35 | 141,71 |
| 19 | 0,9 | Rassal | 6 | 156,70 | 158,86 |
| 19 | 0,9 | Yüksek | 7 | 168,05 | 170,51 |
| 19 | 0,95 | Düşük | 6 | 139,23 | 140,62 |
| 19 | 0,95 | Rassal | 7 | 164,17 | 164,56 |
| 19 | 0,95 | Yüksek | 8 | 181,52 | 183,84 |
| 21 | 0,85 | Düşük | 5 | 130,59 | 131,28 |
| 21 | 0,85 | Rassal | 6 | 158,78 | 159,56 |
| 21 | 0,85 | Yüksek | 6 | 159,20 | 160,27 |
| 21 | 0,9 | Düşük | 5 | 129,60 | 130,84 |
| 21 | 0,9 | Rassal | 6 | 153,48 | 155,01 |
| 21 | 0,9 | Yüksek | 6 | 159,15 | 160,30 |
| 21 | 0,95 | Düşük | 5 | 130,66 | 131,13 |
| 21 | 0,95 | Rassal | 6 | 156,17 | 156,61 |
| 21 | 0,95 | Yüksek | 7 | 176,51 | 178,69 |
| 25 | 0,85 | Düşük | 4 | 120,30 | 123,57 |
| 25 | 0,85 | Rassal | 5 | 152,80 | 154,44 |
| 25 | 0,85 | Yüksek | 5 | 154,26 | 154,45 |
| 25 | 0,9 | Düşük | 4 | 120,07 | 122,90 |
| 25 | 0,9 | Rassal | 5 | 152,10 | 152,44 |
| 25 | 0,9 | Yüksek | 5 | 153,63 | 154,00 |
| 25 | 0,95 | Düşük | 4 | 125,19 | 126,03 |
| 25 | 0,95 | Rassal | 5 | 151,12 | 151,46 |
| 25 | 0,95 | Yüksek | 6 | 177,71 | 178,57 |

| Roszieg Problemi | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **c** | **cv** | **Düşük-α** | **min K** | **min F** | **Ort F** |
| 30 | 0,85 | Düşük | 10 | 407,23 | 410,05 |
| 30 | 0,85 | Rassal | 11 | 455,86 | 460,95 |
| 30 | 0,85 | Yüksek | 11 | 481,21 | 482,94 |
| 30 | 0,9 | Düşük | 10 | 400,16 | 405,36 |
| 30 | 0,9 | Rassal | 11 | 451,64 | 458,11 |
| 30 | 0,9 | Yüksek | 11 | 494,01 | 496,21 |
| 30 | 0,95 | Düşük | 10 | 395,98 | 401,45 |
| 30 | 0,95 | Rassal | 12 | 469,08 | 472,18 |
| 30 | 0,95 | Yüksek | 12 | 488,43 | 497,07 |
| 32 | 0,85 | Düşük | 9 | 394,71 | 396,76 |
| 32 | 0,85 | Rassal | 10 | 458,98 | 468,10 |
| 32 | 0,85 | Yüksek | 10 | 468,69 | 472,10 |
| 32 | 0,9 | Düşük | 9 | 390,46 | 392,53 |
| 32 | 0,9 | Rassal | 10 | 460,91 | 463,20 |
| 32 | 0,9 | Yüksek | 11 | 471,00 | 473,57 |
| 32 | 0,95 | Düşük | 9 | 399,51 | 402,00 |
| 32 | 0,95 | Rassal | 11 | 458,48 | 459,96 |
| 32 | 0,95 | Yüksek | 11 | 492,15 | 497,66 |
| 33 | 0,85 | Düşük | 9 | 399,81 | 403,61 |
| 33 | 0,85 | Rassal | 10 | 464,51 | 467,94 |
| 33 | 0,85 | Yüksek | 10 | 453,98 | 459,75 |
| 33 | 0,9 | Düşük | 9 | 391,78 | 395,04 |
| 33 | 0,9 | Rassal | 10 | 456,49 | 460,20 |
| 33 | 0,9 | Yüksek | 10 | 474,17 | 476,48 |
| 33 | 0,95 | Düşük | 9 | 388,43 | 391,76 |
| 33 | 0,95 | Rassal | 11 | 462,49 | 465,85 |
| 33 | 0,95 | Yüksek | 11 | 473,12 | 476,97 |
| 38 | 0,85 | Düşük | 8 | 388,87 | 393,41 |
| 38 | 0,85 | Rassal | 8 | 426,46 | 428,71 |
| 38 | 0,85 | Yüksek | 8 | 462,70 | 464,36 |
| 38 | 0,9 | Düşük | 8 | 388,23 | 390,88 |
| 38 | 0,9 | Rassal | 9 | 448,57 | 452,63 |
| 38 | 0,9 | Yüksek | 9 | 452,76 | 456,59 |
| 38 | 0,95 | Düşük | 8 | 382,24 | 385,36 |
| 38 | 0,95 | Rassal | 9 | 438,04 | 443,62 |
| 38 | 0,95 | Yüksek | 9 | 458,61 | 462,85 |
| 46 | 0,85 | Düşük | 6 | 364,53 | 369,21 |
| 46 | 0,85 | Rassal | 7 | 423,83 | 426,65 |
| 46 | 0,85 | Yüksek | 7 | 433,51 | 436,76 |
| 46 | 0,9 | Düşük | 6 | 370,15 | 371,59 |
| 46 | 0,9 | Rassal | 7 | 413,03 | 417,27 |
| 46 | 0,9 | Yüksek | 7 | 414,04 | 419,96 |
| 46 | 0,95 | Düşük | 7 | 399,04 | 401,12 |
| 46 | 0,95 | Rassal | 7 | 414,17 | 417,52 |
| 46 | 0,95 | Yüksek | 8 | 461,36 | 461,81 |

| Sawyer Problemi | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **c** | **1-α** | **cv** | **min K** | **min F** | **ort F** |
| 46 | 0,85 | Düşük | 16 | 1079,24 | 1093,98 |
| 46 | 0,85 | Rassal | 18 | 1232,29 | 1238,40 |
| 46 | 0,85 | Yüksek | 19 | 1354,98 | 1364,20 |
| 46 | 0,9 | Düşük | 17 | 1096,72 | 1107,18 |
| 46 | 0,9 | Rassal | 19 | 1226,97 | 1237,38 |
| 46 | 0,9 | Yüksek | 21 | 1357,67 | 1364,90 |
| 46 | 0,95 | Düşük | 17 | 1082,05 | 1096,37 |
| 46 | 0,95 | Rassal | 20 | 1243,10 | 1249,99 |
| 46 | 0,95 | Yüksek | 22 | 1397,24 | 1405,68 |
| 50 | 0,85 | Düşük | 15 | 1070,97 | 1080,39 |
| 50 | 0,85 | Rassal | 16 | 1216,42 | 1224,48 |
| 50 | 0,85 | Yüksek | 18 | 1312,89 | 1325,55 |
| 50 | 0,9 | Düşük | 15 | 1057,19 | 1067,20 |
| 50 | 0,9 | Rassal | 17 | 1207,60 | 1219,18 |
| 50 | 0,9 | Yüksek | 19 | 1324,81 | 1335,62 |
| 50 | 0,95 | Düşük | 16 | 1073,17 | 1081,14 |
| 50 | 0,95 | Rassal | 18 | 1216,31 | 1235,24 |
| 50 | 0,95 | Yüksek | 20 | 1352,59 | 1359,63 |
| 55 | 0,85 | Düşük | 13 | 1049,29 | 1057,08 |
| 55 | 0,85 | Rassal | 15 | 1171,01 | 1178,79 |
| 55 | 0,85 | Yüksek | 16 | 1268,94 | 1281,69 |
| 55 | 0,9 | Düşük | 14 | 1036,41 | 1054,29 |
| 55 | 0,9 | Rassal | 15 | 1181,80 | 1191,61 |
| 55 | 0,9 | Yüksek | 16 | 1289,04 | 1298,79 |
| 55 | 0,95 | Düşük | 14 | 1035,63 | 1040,79 |
| 55 | 0,95 | Rassal | 16 | 1190,06 | 1200,86 |
| 55 | 0,95 | Yüksek | 18 | 1322,04 | 1334,86 |
| 66 | 0,85 | Düşük | 11 | 992,11 | 1006,30 |
| 66 | 0,85 | Rassal | 12 | 1123,16 | 1127,82 |
| 66 | 0,85 | Yüksek | 13 | 1208,23 | 1211,81 |
| 66 | 0,9 | Düşük | 11 | 988,47 | 996,77 |
| 66 | 0,9 | Rassal | 12 | 1133,27 | 1141,00 |
| 66 | 0,9 | Yüksek | 13 | 1187,28 | 1200,30 |
| 66 | 0,95 | Düşük | 11 | 1019,69 | 1031,12 |
| 66 | 0,95 | Rassal | 13 | 1131,82 | 1146,11 |
| 66 | 0,95 | Yüksek | 14 | 1223,36 | 1236,74 |
| 75 | 0,85 | Düşük | 10 | 996,92 | 1004,89 |
| 75 | 0,85 | Rassal | 10 | 1096,44 | 1109,83 |
| 75 | 0,85 | Yüksek | 11 | 1152,25 | 1155,55 |
| 75 | 0,9 | Düşük | 10 | 970,98 | 992,11 |
| 75 | 0,9 | Rassal | 11 | 1093,89 | 1100,16 |
| 75 | 0,9 | Yüksek | 11 | 1175,93 | 1190,82 |
| 75 | 0,95 | Düşük | 10 | 969,98 | 985,62 |
| 75 | 0,95 | Rassal | 11 | 1104,01 | 1109,99 |
| 75 | 0,95 | Yüksek | 12 | 1200,47 | 1203,96 |
| 99 | 0,85 | Düşük | 7 | 919,78 | 924,45 |
| 99 | 0,85 | Rassal | 8 | 1046,83 | 1048,42 |

Sawyer problemi sonuçları devamı

| c | 1-α | cv | min K | min F | ort F |
|---|---|---|---|---|---|
| 99 | 0,85 | Yüksek | 8 | 1052,60 | 1062,59 |
| 99 | 0,9 | Düşük | 7 | 915,47 | 931,54 |
| 99 | 0,9 | Rassal | 8 | 1024,71 | 1030,21 |
| 99 | 0,9 | Yüksek | 8 | 1093,07 | 1107,21 |
| 99 | 0,95 | Düşük | 8 | 988,73 | 991,20 |
| 99 | 0,95 | Rassal | 8 | 1027,82 | 1042,18 |
| 99 | 0,95 | Yüksek | 9 | 1111,65 | 1120,04 |

**Kilbridge Problemi**

| c | 1-α | cv | min K | min F | ort F |
|---|---|---|---|---|---|
| 95 | 0,85 | Düşük | 13 | 1746,04 | 1750,69 |
| 95 | 0,85 | Rassal | 14 | 1929,71 | 1935,52 |
| 95 | 0,85 | Yüksek | 15 | 2068,03 | 2074,79 |
| 95 | 0,9 | Düşük | 13 | 1729,45 | 1734,17 |
| 95 | 0,9 | Rassal | 14 | 1968,57 | 1975,13 |
| 95 | 0,9 | Yüksek | 16 | 2094,59 | 2105,55 |
| 95 | 0,95 | Düşük | 14 | 1779,01 | 1785,70 |
| 95 | 0,95 | Rassal | 15 | 1915,59 | 1927,40 |
| 95 | 0,95 | Yüksek | 17 | 2118,34 | 2135,34 |
| 132 | 0,85 | Düşük | 9 | 1657,36 | 1665,61 |
| 132 | 0,85 | Rassal | 10 | 1821,83 | 1830,92 |
| 132 | 0,85 | Yüksek | 10 | 1914,93 | 1932,25 |
| 132 | 0,9 | Düşük | 10 | 1716,64 | 1735,43 |
| 132 | 0,9 | Rassal | 10 | 1784,65 | 1790,53 |
| 132 | 0,9 | Yüksek | 11 | 1951,62 | 1952,17 |
| 132 | 0,95 | Düşük | 10 | 1703,67 | 1707,44 |
| 132 | 0,95 | Rassal | 11 | 1883,76 | 1889,35 |
| 132 | 0,95 | Yüksek | 12 | 2017,47 | 2034,60 |
| 153 | 0,85 | Düşük | 8 | 1625,74 | 1637,21 |
| 153 | 0,85 | Rassal | 9 | 1839,99 | 1848,28 |
| 153 | 0,85 | Yüksek | 9 | 1877,98 | 1881,10 |
| 153 | 0,9 | Düşük | 8 | 1610,38 | 1617,85 |
| 153 | 0,9 | Rassal | 9 | 1814,07 | 1821,25 |
| 153 | 0,9 | Yüksek | 9 | 1815,44 | 1822,54 |
| 153 | 0,95 | Düşük | 8 | 1575,27 | 1593,91 |
| 153 | 0,95 | Rassal | 9 | 1772,04 | 1775,36 |
| 153 | 0,95 | Yüksek | 10 | 1945,65 | 1951,25 |
| 183 | 0,85 | Düşük | 7 | 1645,66 | 1648,64 |
| 183 | 0,85 | Rassal | 7 | 1679,17 | 1688,51 |
| 183 | 0,85 | Yüksek | 7 | 1760,19 | 1771,83 |
| 183 | 0,9 | Düşük | 7 | 1638,83 | 1644,98 |
| 183 | 0,9 | Rassal | 7 | 1674,58 | 1681,24 |
| 183 | 0,9 | Yüksek | 8 | 1859,09 | 1877,41 |
| 183 | 0,95 | Düşük | 7 | 1620,19 | 1625,54 |
| 183 | 0,95 | Rassal | 8 | 1803,09 | 1822,95 |

Kilbridge problemi sonuçları devamı

| c | 1-α | cv | min K | min F | ort F |
|---|---|---|---|---|---|
| 183 | 0,95 | Yüksek | 8 | 1850,28 | 1853,07 |
| 230 | 0,85 | Düşük | 6 | 1704,20 | 1709,67 |
| 230 | 0,85 | Rassal | 6 | 1747,30 | 1753,36 |
| 230 | 0,85 | Yüksek | 6 | 1765,95 | 1771,38 |
| 230 | 0,9 | Düşük | 6 | 1695,20 | 1708,51 |
| 230 | 0,9 | Rassal | 6 | 1715,17 | 1726,49 |
| 230 | 0,9 | Yüksek | 6 | 1724,53 | 1734,60 |
| 230 | 0,95 | Düşük | 6 | 1673,44 | 1677,38 |
| 230 | 0,95 | Rassal | 6 | 1693,43 | 1696,59 |
| 230 | 0,95 | Yüksek | 6 | 1703,37 | 1711,74 |
| 307 | 0,85 | Düşük | 4 | 1487,96 | 1507,80 |
| 307 | 0,85 | Rassal | 4 | 1529,44 | 1539,83 |
| 307 | 0,85 | Yüksek | 5 | 1848,70 | 1851,98 |
| 307 | 0,9 | Düşük | 4 | 1492,14 | 1502,17 |
| 307 | 0,9 | Rassal | 4 | 1525,26 | 1528,92 |
| 307 | 0,9 | Yüksek | 5 | 1831,75 | 1842,00 |
| 307 | 0,95 | Düşük | 4 | 1468,15 | 1484,85 |
| 307 | 0,95 | Rassal | 5 | 1820,47 | 1824,52 |
| 307 | 0,95 | Yüksek | 5 | 1818,88 | 1822,88 |

**Hahn Problemi**

| c | 1-α | cv | min K | min F | ort F |
|---|---|---|---|---|---|
| 2806 | 0,85 | Düşük | 11 | 49072,33 | 49205,12 |
| 2806 | 0,85 | Rassal | 12 | 52493,99 | 52658,98 |
| 2806 | 0,85 | Yüksek | 13 | 56785,84 | 57042,76 |
| 2806 | 0,9 | Düşük | 11 | 46852,89 | 47166,39 |
| 2806 | 0,9 | Rassal | 12 | 51099,37 | 51156,96 |
| 2806 | 0,9 | Yüksek | 13 | 54873,26 | 55095,10 |
| 2806 | 0,95 | Düşük | 12 | 46917,90 | 47132,38 |
| 2806 | 0,95 | Rassal | 12 | 50031,27 | 50179,23 |
| 2806 | 0,95 | Yüksek | 14 | 58775,05 | 58780,72 |
| 3157 | 0,85 | Düşük | 10 | 46830,23 | 46971,48 |
| 3157 | 0,85 | Rassal | 10 | 50916,85 | 51015,39 |
| 3157 | 0,85 | Yüksek | 11 | 56521,90 | 56646,69 |
| 3157 | 0,9 | Düşük | 10 | 45263,96 | 45678,36 |
| 3157 | 0,9 | Rassal | 11 | 50981,21 | 51201,46 |
| 3157 | 0,9 | Yüksek | 12 | 55837,67 | 55959,96 |
| 3157 | 0,95 | Düşük | 10 | 45610,99 | 45683,10 |
| 3157 | 0,95 | Rassal | 11 | 49896,74 | 50016,52 |
| 3157 | 0,95 | Yüksek | 12 | 54148,48 | 54314,70 |
| 3507 | 0,85 | Düşük | 9 | 44719,91 | 45150,84 |
| 3507 | 0,85 | Rassal | 9 | 48058,50 | 48098,14 |
| 3507 | 0,85 | Yüksek | 10 | 53324,73 | 53434,91 |
| 3507 | 0,9 | Düşük | 9 | 43925,74 | 44592,32 |
| 3507 | 0,9 | Rassal | 9 | 47865,70 | 47964,82 |

Hahn problemi sonuçları devamı

| c | 1-α | cv | min K | min F | ort F |
|---|---|---|---|---|---|
| 3507 | 0,9 | Yüksek | 10 | 51084,83 | 51158,95 |
| 3507 | 0,95 | Düşük | 9 | 43218,43 | 43375,87 |
| 3507 | 0,95 | Rassal | 10 | 48748,97 | 48765,73 |
| 3507 | 0,95 | Yüksek | 11 | 53098,25 | 53448,22 |
| 3789 | 0,85 | Düşük | 8 | 45525,92 | 45742,01 |
| 3789 | 0,85 | Rassal | 8 | 48556,01 | 48688,73 |
| 3789 | 0,85 | Yüksek | 9 | 51380,77 | 51390,21 |
| 3789 | 0,9 | Düşük | 8 | 44260,92 | 44270,48 |
| 3789 | 0,9 | Rassal | 9 | 47705,77 | 47829,10 |
| 3789 | 0,9 | Yüksek | 9 | 50495,92 | 50542,01 |
| 3789 | 0,95 | Düşük | 8 | 43966,75 | 44168,59 |
| 3789 | 0,95 | Rassal | 9 | 46378,26 | 46509,23 |
| 3789 | 0,95 | Yüksek | 10 | 51193,83 | 51263,62 |
| 4676 | 0,85 | Düşük | 7 | 44788,32 | 44835,59 |
| 4676 | 0,85 | Rassal | 7 | 45711,53 | 45792,87 |
| 4676 | 0,85 | Yüksek | 7 | 47248,28 | 47348,70 |
| 4676 | 0,9 | Düşük | 7 | 43430,52 | 43971,34 |
| 4676 | 0,9 | Rassal | 7 | 44208,42 | 44340,96 |
| 4676 | 0,9 | Yüksek | 7 | 49836,12 | 50069,17 |
| 4676 | 0,95 | Düşük | 7 | 43062,54 | 43193,64 |
| 4676 | 0,95 | Rassal | 7 | 45323,10 | 45365,48 |
| 4676 | 0,95 | Yüksek | 8 | 49571,93 | 49599,47 |
| 4735 | 0,85 | Düşük | 6 | 44520,33 | 44799,28 |
| 4735 | 0,85 | Rassal | 7 | 45923,89 | 46229,91 |
| 4735 | 0,85 | Yüksek | 7 | 47695,07 | 47835,72 |
| 4735 | 0,9 | Düşük | 7 | 44554,18 | 44593,17 |
| 4735 | 0,9 | Rassal | 7 | 44629,72 | 44849,10 |
| 4735 | 0,9 | Yüksek | 7 | 49562,16 | 49641,40 |
| 4735 | 0,95 | Düşük | 7 | 43632,00 | 43676,10 |
| 4735 | 0,95 | Rassal | 7 | 45298,27 | 45329,93 |
| 4735 | 0,95 | Yüksek | 8 | 50388,30 | 50437,14 |
| 6314 | 0,85 | Düşük | 5 | 42953,20 | 43127,12 |
| 6314 | 0,85 | Rassal | 5 | 43161,16 | 43221,33 |
| 6314 | 0,85 | Yüksek | 5 | 43450,79 | 43548,54 |
| 6314 | 0,9 | Düşük | 5 | 42183,19 | 42211,29 |
| 6314 | 0,9 | Rassal | 5 | 42101,08 | 42141,13 |
| 6314 | 0,9 | Yüksek | 6 | 49438,27 | 49448,87 |
| 6314 | 0,95 | Düşük | 5 | 40729,16 | 40752,02 |
| 6314 | 0,95 | Rassal | 5 | 40770,53 | 40874,16 |
| 6314 | 0,95 | Yüksek | 6 | 48251,90 | 48300,42 |

| Tonge Problemi | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **c** | **1-α** | **cv** | **Min K** | **min F** | **ort F** |
| 289 | 0,85 | Düşük | 28 | 12948,88 | 13044,97 |
| 289 | 0,85 | Rassal | 30 | 14981,79 | 15083,90 |
| 289 | 0,85 | Yüksek | 34 | 17544,01 | 17774,23 |
| 289 | 0,9 | Düşük | 28 | 12705,98 | 12781,18 |
| 289 | 0,9 | Rassal | 31 | 14625,40 | 14736,93 |
| 289 | 0,9 | Yüksek | 35 | 16904,38 | 16923,56 |
| 289 | 0,95 | Düşük | 29 | 12517,96 | 12545,89 |
| 289 | 0,95 | Rassal | 33 | 14052,27 | 14200,85 |
| 289 | 0,95 | Yüksek | 38 | 16395,80 | 16437,07 |
| 304 | 0,85 | Düşük | 26 | 12978,60 | 13038,63 |
| 304 | 0,85 | Rassal | 28 | 14814,99 | 15008,35 |
| 304 | 0,85 | Yüksek | 32 | 17191,36 | 17362,57 |
| 304 | 0,9 | Düşük | 26 | 12482,14 | 12656,57 |
| 304 | 0,9 | Rassal | 29 | 14356,88 | 14394,85 |
| 304 | 0,9 | Yüksek | 33 | 16525,97 | 16615,99 |
| 304 | 0,95 | Düşük | 27 | 12398,20 | 12411,73 |
| 304 | 0,95 | Rassal | 31 | 14016,90 | 14066,88 |
| 304 | 0,95 | Yüksek | 35 | 16076,56 | 16122,02 |
| 374 | 0,85 | Düşük | 21 | 12470,66 | 12478,93 |
| 374 | 0,85 | Rassal | 22 | 14280,56 | 14329,29 |
| 374 | 0,85 | Yüksek | 24 | 15943,11 | 16129,52 |
| 374 | 0,9 | Düşük | 21 | 12203,58 | 12262,67 |
| 374 | 0,9 | Rassal | 23 | 13700,13 | 13741,93 |
| 374 | 0,9 | Yüksek | 26 | 15677,60 | 15741,67 |
| 374 | 0,95 | Düşük | 22 | 11911,49 | 11989,69 |
| 374 | 0,95 | Rassal | 24 | 13198,87 | 13262,94 |
| 374 | 0,95 | Yüksek | 27 | 15085,68 | 15205,16 |
| 423 | 0,85 | Düşük | 19 | 12255,42 | 12375,60 |
| 423 | 0,85 | Rassal | 20 | 13667,29 | 13769,98 |
| 423 | 0,85 | Yüksek | 21 | 15444,32 | 15510,51 |
| 423 | 0,9 | Düşük | 19 | 11919,71 | 11947,38 |
| 423 | 0,9 | Rassal | 20 | 13303,21 | 13326,56 |
| 423 | 0,9 | Yüksek | 22 | 14968,26 | 14986,21 |
| 423 | 0,95 | Düşük | 19 | 11507,88 | 11520,15 |
| 423 | 0,95 | Rassal | 21 | 12943,09 | 12976,22 |
| 423 | 0,95 | Yüksek | 24 | 14455,17 | 14585,21 |
| 488 | 0,85 | Düşük | 16 | 11845,28 | 11875,94 |
| 488 | 0,85 | Rassal | 17 | 13169,04 | 13218,56 |
| 488 | 0,85 | Yüksek | 18 | 14598,54 | 14728,47 |
| 488 | 0,9 | Düşük | 16 | 11409,79 | 11515,11 |
| 488 | 0,9 | Rassal | 17 | 12835,35 | 12859,37 |
| 488 | 0,9 | Yüksek | 19 | 14252,88 | 14324,50 |
| 488 | 0,95 | Düşük | 16 | 11398,31 | 11464,06 |
| 488 | 0,95 | Rassal | 18 | 12508,91 | 12532,58 |
| 488 | 0,95 | Yüksek | 20 | 14060,29 | 14067,25 |

Tonge problemi sonuçları devamı

| c | 1-α | cv | min K | min F | ort F |
|---|---|---|---|---|---|
| 529 | 0,85 | Düşük | 15 | 11824,96 | 11927,07 |
| 529 | 0,85 | Rassal | 15 | 13077,25 | 13146,47 |
| 529 | 0,85 | Yüksek | 16 | 14391,57 | 14474,87 |
| 529 | 0,9 | Düşük | 15 | 11683,81 | 11684,62 |
| 529 | 0,9 | Rassal | 16 | 12531,84 | 12576,04 |
| 529 | 0,9 | Yüksek | 17 | 13878,71 | 13884,66 |
| 529 | 0,95 | Düşük | 15 | 11201,97 | 11238,78 |
| 529 | 0,95 | Rassal | 16 | 12290,60 | 12335,78 |
| 529 | 0,95 | Yüksek | 18 | 13795,84 | 13812,30 |

**Wee-Mag Problemi**

| c | 1-α | cv | min K | min F | ort F |
|---|---|---|---|---|---|
| 52 | 0,85 | Düşük | 75 | 5963,21 | 5974,14 |
| 52 | 0,85 | Rassal | 96 | 6912,03 | 6918,29 |
| 52 | 0,85 | Yüksek | 116 | 8007,23 | 8014,49 |
| 52 | 0,9 | Düşük | 81 | 6017,32 | 6019,47 |
| 52 | 0,9 | Rassal | 98 | 6968,25 | 6985,34 |
| 52 | 0,9 | Yüksek | 118 | 8025,68 | 8027,14 |
| 52 | 0,95 | Düşük | 89 | 6288,61 | 6294,77 |
| 52 | 0,95 | Rassal | 101 | 7064,42 | 7073,53 |
| 52 | 0,95 | Yüksek | 119 | 8052,58 | 8052,82 |
| 53 | 0,85 | Düşük | 70 | 5772,56 | 5820,34 |
| 53 | 0,85 | Rassal | 91 | 6864,50 | 6869,11 |
| 53 | 0,85 | Yüksek | 113 | 7954,41 | 7963,96 |
| 53 | 0,9 | Düşük | 76 | 5896,07 | 5916,13 |
| 53 | 0,9 | Rassal | 96 | 6927,84 | 6939,66 |
| 53 | 0,9 | Yüksek | 118 | 8097,99 | 8103,73 |
| 53 | 0,95 | Düşük | 84 | 6151,03 | 6158,78 |
| 53 | 0,95 | Rassal | 99 | 7031,52 | 7034,69 |
| 53 | 0,95 | Yüksek | 118 | 8087,59 | 8088,90 |
| 54 | 0,85 | Düşük | 66 | 5582,49 | 5625,59 |
| 54 | 0,85 | Rassal | 88 | 6813,19 | 6832,79 |
| 54 | 0,85 | Yüksek | 110 | 7939,80 | 7945,63 |
| 54 | 0,9 | Düşük | 72 | 5770,43 | 5784,53 |
| 54 | 0,9 | Rassal | 93 | 6918,29 | 6922,45 |
| 54 | 0,9 | Yüksek | 117 | 8132,51 | 8137,26 |
| 54 | 0,95 | Düşük | 79 | 5995,24 | 6005,34 |
| 54 | 0,95 | Rassal | 99 | 7048,52 | 7051,66 |
| 54 | 0,95 | Yüksek | 118 | 8153,29 | 8158,74 |
| 56 | 0,85 | Düşük | 65 | 5545,37 | 5570,93 |
| 56 | 0,85 | Rassal | 81 | 6565,02 | 6598,83 |
| 56 | 0,85 | Yüksek | 101 | 7733,78 | 7736,73 |
| 56 | 0,9 | Düşük | 66 | 5518,29 | 5527,05 |
| 56 | 0,9 | Rassal | 88 | 6829,04 | 6840,55 |

Wee-mag problemi sonuçları devamı-1

| c | 1-α | cv | min K | min F | ort F |
|---|---|---|---|---|---|
| 56 | 0,9 | Yüksek | 112 | 8092,27 | 8109,85 |
| 56 | 0,95 | Düşük | 70 | 5666,36 | 5706,69 |
| 56 | 0,95 | Rassal | 94 | 7019,70 | 7022,67 |
| 56 | 0,95 | Yüksek | 118 | 8325,91 | 8330,34 |
| 58 | 0,85 | Düşük | 62 | 5555,64 | 5573,00 |
| 58 | 0,85 | Rassal | 73 | 6497,04 | 6546,42 |
| 58 | 0,85 | Yüksek | 92 | 7347,67 | 7354,17 |
| 58 | 0,9 | Düşük | 63 | 5473,09 | 5505,16 |
| 58 | 0,9 | Rassal | 82 | 6691,23 | 6698,76 |
| 58 | 0,9 | Yüksek | 105 | 7967,58 | 7983,31 |
| 58 | 0,95 | Düşük | 66 | 5488,18 | 5496,70 |
| 58 | 0,95 | Rassal | 90 | 6957,04 | 6960,46 |
| 58 | 0,95 | Yüksek | 116 | 8429,48 | 8431,36 |
| 59 | 0,85 | Düşük | 62 | 5507,63 | 5519,35 |
| 59 | 0,85 | Rassal | 70 | 6405,98 | 6412,27 |
| 59 | 0,85 | Yüksek | 83 | 7241,66 | 7251,11 |
| 59 | 0,9 | Düşük | 63 | 5488,65 | 5491,04 |
| 59 | 0,9 | Rassal | 79 | 6612,16 | 6617,47 |
| 59 | 0,9 | Yüksek | 101 | 7841,97 | 7856,06 |
| 59 | 0,95 | Düşük | 64 | 5472,83 | 5474,08 |
| 59 | 0,95 | Rassal | 87 | 6897,42 | 6901,62 |
| 59 | 0,95 | Yüksek | 115 | 8472,46 | 8472,49 |
| 61 | 0,85 | Düşük | 61 | 5528,30 | 5548,54 |
| 61 | 0,85 | Rassal | 67 | 6230,84 | 6271,15 |
| 61 | 0,85 | Yüksek | 72 | 6949,25 | 6985,64 |
| 61 | 0,9 | Düşük | 62 | 5500,33 | 5509,20 |
| 61 | 0,9 | Rassal | 72 | 6422,43 | 6432,15 |
| 61 | 0,9 | Yüksek | 92 | 7556,15 | 7563,06 |
| 61 | 0,95 | Düşük | 62 | 5421,04 | 5452,15 |
| 61 | 0,95 | Rassal | 82 | 6769,27 | 6780,13 |
| 61 | 0,95 | Yüksek | 108 | 8296,99 | 8299,53 |
| 62 | 0,85 | Düşük | 60 | 5494,79 | 5495,57 |
| 62 | 0,85 | Rassal | 65 | 6204,78 | 6228,18 |
| 62 | 0,85 | Yüksek | 72 | 6782,91 | 6838,86 |
| 62 | 0,9 | Düşük | 61 | 5469,98 | 5494,67 |
| 62 | 0,9 | Rassal | 70 | 6324,32 | 6326,05 |
| 62 | 0,9 | Yüksek | 86 | 7378,79 | 7415,40 |
| 62 | 0,95 | Düşük | 61 | 5457,64 | 5472,05 |
| 62 | 0,95 | Rassal | 79 | 6715,70 | 6728,21 |
| 62 | 0,95 | Yüksek | 106 | 8208,24 | 8224,59 |
| 63 | 0,85 | Düşük | 60 | 5457,21 | 5492,38 |
| 63 | 0,85 | Rassal | 64 | 6190,62 | 6204,10 |
| 63 | 0,85 | Yüksek | 68 | 6818,46 | 6833,07 |
| 63 | 0,9 | Düşük | 60 | 5445,21 | 5469,15 |
| 63 | 0,9 | Rassal | 68 | 6293,26 | 6294,97 |
| 63 | 0,9 | Yüksek | 81 | 7239,82 | 7251,91 |
| 63 | 0,95 | Düşük | 61 | 5450,29 | 5458,48 |

Wee-mag problemi sonuçları devamı-2

| c | 1-α | cv | min K | min F | ort F |
|---|---|---|---|---|---|
| 63 | 0,95 | Rassal | 78 | 6611,93 | 6614,66 |
| 63 | 0,95 | Yüksek | 102 | 8104,43 | 8137,44 |
| 69 | 0,85 | Düşük | 57 | 5558,21 | 5572,05 |
| 69 | 0,85 | Rassal | 60 | 6098,31 | 6109,22 |
| 69 | 0,85 | Yüksek | 62 | 6580,34 | 6621,58 |
| 69 | 0,9 | Düşük | 58 | 5590,92 | 5594,32 |
| 69 | 0,9 | Rassal | 60 | 6069,40 | 6077,50 |
| 69 | 0,9 | Yüksek | 64 | 6544,39 | 6550,73 |
| 69 | 0,95 | Düşük | 58 | 5560,19 | 5578,82 |
| 69 | 0,95 | Rassal | 64 | 6199,54 | 6208,43 |
| 69 | 0,95 | Yüksek | 75 | 7104,48 | 7112,41 |

**Lutz2 Problemi**

| c | 1-α | cv | min K | min F | ort F |
|---|---|---|---|---|---|
| 20 | 0,85 | Düşük | 58 | 2167,35 | 2185,24 |
| 20 | 0,85 | Rassal | 67 | 2727,36 | 2747,56 |
| 20 | 0,85 | Yüksek | 73 | 3228,41 | 3230,48 |
| 20 | 0,9 | Düşük | 59 | 2090,15 | 2090,47 |
| 20 | 0,9 | Rassal | 71 | 2478,13 | 2499,45 |
| 20 | 0,9 | Yüksek | 77 | 2896,31 | 2916,47 |
| 20 | 0,95 | Düşük | 61 | 1963,65 | 1964,90 |
| 20 | 0,95 | Rassal | 74 | 2370,92 | 2377,62 |
| 20 | 0,95 | Yüksek | 84 | 2701,11 | 2703,86 |
| 21 | 0,85 | Düşük | 56 | 2164,19 | 2179,78 |
| 21 | 0,85 | Rassal | 63 | 2662,74 | 2688,96 |
| 21 | 0,85 | Yüksek | 68 | 3193,90 | 3194,70 |
| 21 | 0,9 | Düşük | 56 | 2018,38 | 2042,31 |
| 21 | 0,9 | Rassal | 65 | 2467,64 | 2478,96 |
| 21 | 0,9 | Yüksek | 72 | 2853,14 | 2854,62 |
| 21 | 0,95 | Düşük | 57 | 1943,30 | 1944,39 |
| 21 | 0,95 | Rassal | 70 | 2318,96 | 2326,03 |
| 21 | 0,95 | Yüksek | 79 | 2628,13 | 2634,18 |
| 22 | 0,85 | Düşük | 52 | 2096,83 | 2134,42 |
| 22 | 0,85 | Rassal | 60 | 2668,42 | 2672,76 |
| 22 | 0,85 | Yüksek | 64 | 3104,07 | 3110,87 |
| 22 | 0,9 | Düşük | 53 | 2019,54 | 2031,62 |
| 22 | 0,9 | Rassal | 63 | 2440,69 | 2445,86 |
| 22 | 0,9 | Yüksek | 68 | 2841,61 | 2847,15 |
| 22 | 0,95 | Düşük | 54 | 1927,21 | 1928,41 |
| 22 | 0,95 | Rassal | 66 | 2293,26 | 2298,17 |
| 22 | 0,95 | Yüksek | 73 | 2583,91 | 2586,03 |
| 23 | 0,85 | Düşük | 50 | 2074,86 | 2103,38 |
| 23 | 0,85 | Rassal | 56 | 2584,80 | 2596,92 |
| 23 | 0,85 | Yüksek | 58 | 2978,49 | 2985,18 |
| 23 | 0,9 | Düşük | 50 | 2007,88 | 2009,82 |
| 23 | 0,9 | Rassal | 60 | 2415,48 | 2416,89 |

Lutz2 problemi sonuçları devamı

| c | 1-α | cv | Min K | min F | ort F |
|---|---|---|---|---|---|
| 23 | 0,9 | Yüksek | 65 | 2749,75 | 2761,33 |
| 23 | 0,95 | Düşük | 53 | 1899,30 | 1902,63 |
| 23 | 0,95 | Rassal | 61 | 2276,69 | 2281,40 |
| 23 | 0,95 | Yüksek | 69 | 2549,95 | 2552,06 |
| 24 | 0,85 | Düşük | 48 | 2050,57 | 2079,64 |
| 24 | 0,85 | Rassal | 54 | 2563,27 | 2574,38 |
| 24 | 0,85 | Yüksek | 57 | 3013,89 | 3020,13 |
| 24 | 0,9 | Düşük | 48 | 1981,61 | 1983,02 |
| 24 | 0,9 | Rassal | 56 | 2381,03 | 2386,85 |
| 24 | 0,9 | Yüksek | 62 | 2677,30 | 2679,16 |
| 24 | 0,95 | Düşük | 49 | 1874,31 | 1888,80 |
| 24 | 0,95 | Rassal | 60 | 2252,11 | 2254,72 |
| 24 | 0,95 | Yüksek | 66 | 2514,84 | 2521,36 |
| 25 | 0,85 | Düşük | 45 | 2103,88 | 2104,60 |
| 25 | 0,85 | Rassal | 51 | 2491,78 | 2527,35 |
| 25 | 0,85 | Yüksek | 54 | 2840,44 | 2876,42 |
| 25 | 0,9 | Düşük | 46 | 1954,91 | 1966,23 |
| 25 | 0,9 | Rassal | 53 | 2363,62 | 2372,27 |
| 25 | 0,9 | Yüksek | 57 | 2661,45 | 2670,49 |
| 25 | 0,95 | Düşük | 47 | 1865,08 | 1873,68 |
| 25 | 0,95 | Rassal | 56 | 2219,91 | 2222,36 |
| 25 | 0,95 | Yüksek | 63 | 2463,23 | 2464,37 |
| 26 | 0,85 | Düşük | 45 | 1982,89 | 2022,65 |
| 26 | 0,85 | Rassal | 48 | 2509,77 | 2512,95 |
| 26 | 0,85 | Yüksek | 51 | 2811,10 | 2818,47 |
| 26 | 0,9 | Düşük | 45 | 1951,51 | 1954,66 |
| 26 | 0,9 | Rassal | 50 | 2343,89 | 2345,35 |
| 26 | 0,9 | Yüksek | 55 | 2608,08 | 2615,70 |
| 26 | 0,95 | Düşük | 45 | 1827,46 | 1842,28 |
| 26 | 0,95 | Rassal | 54 | 2177,84 | 2187,97 |
| 26 | 0,95 | Yüksek | 59 | 2450,29 | 2454,28 |
| 28 | 0,85 | Düşük | 40 | 2028,66 | 2039,57 |
| 28 | 0,85 | Rassal | 44 | 2450,12 | 2452,75 |
| 28 | 0,85 | Yüksek | 46 | 2780,42 | 2786,89 |
| 28 | 0,9 | Düşük | 40 | 1909,48 | 1914,17 |
| 28 | 0,9 | Rassal | 47 | 2275,46 | 2282,01 |
| 28 | 0,9 | Yüksek | 48 | 2538,25 | 2548,53 |
| 28 | 0,95 | Düşük | 42 | 1804,83 | 1825,19 |
| 28 | 0,95 | Rassal | 48 | 2141,31 | 2155,35 |
| 28 | 0,95 | Yüksek | 53 | 2363,21 | 2371,47 |
| 29 | 0,85 | Düşük | 39 | 2022,88 | 2031,87 |
| 29 | 0,85 | Rassal | 42 | 2459,43 | 2473,34 |
| 29 | 0,85 | Yüksek | 44 | 2708,87 | 2730,34 |
| 29 | 0,9 | Düşük | 39 | 1924,29 | 1924,83 |
| 29 | 0,9 | Rassal | 44 | 2262,55 | 2279,89 |
| 29 | 0,9 | Yüksek | 47 | 2508,54 | 2519,77 |

| Lutz3 Problemi | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **c** | **1-α** | **cv** | **min K** | **min F** | **ort F** |
| 143 | 0,85 | Düşük | 26 | 6210,37 | 6212,75 |
| 143 | 0,85 | Rassal | 28 | 7158,79 | 7178,24 |
| 143 | 0,85 | Yüksek | 29 | 8023,17 | 8068,89 |
| 143 | 0,9 | Düşük | 26 | 5950,80 | 5958,29 |
| 143 | 0,9 | Rassal | 28 | 6832,05 | 6834,17 |
| 143 | 0,9 | Yüksek | 31 | 7542,65 | 7552,61 |
| 143 | 0,95 | Düşük | 27 | 5738,31 | 5758,15 |
| 143 | 0,95 | Rassal | 30 | 6453,32 | 6497,69 |
| 143 | 0,95 | Yüksek | 32 | 7079,98 | 7104,56 |
| 151 | 0,85 | Düşük | 24 | 6046,49 | 6094,59 |
| 151 | 0,85 | Rassal | 26 | 7201,18 | 7216,03 |
| 151 | 0,85 | Yüksek | 28 | 7750,49 | 7816,74 |
| 151 | 0,9 | Düşük | 25 | 5863,70 | 5942,24 |
| 151 | 0,9 | Rassal | 27 | 6701,85 | 6755,11 |
| 151 | 0,9 | Yüksek | 29 | 7421,16 | 7433,77 |
| 151 | 0,95 | Düşük | 25 | 5628,01 | 5650,82 |
| 151 | 0,95 | Rassal | 28 | 6351,16 | 6364,41 |
| 151 | 0,95 | Yüksek | 30 | 6996,43 | 6998,03 |
| 158 | 0,85 | Düşük | 23 | 6099,75 | 6112,54 |
| 158 | 0,85 | Rassal | 25 | 6863,98 | 6886,39 |
| 158 | 0,85 | Yüksek | 26 | 7652,85 | 7670,72 |
| 158 | 0,9 | Düşük | 23 | 5861,08 | 5871,53 |
| 158 | 0,9 | Rassal | 25 | 6701,64 | 6721,04 |
| 158 | 0,9 | Yüksek | 27 | 7213,85 | 7215,64 |
| 158 | 0,95 | Düşük | 24 | 5583,27 | 5588,74 |
| 158 | 0,95 | Rassal | 26 | 6309,62 | 6320,95 |
| 158 | 0,95 | Yüksek | 29 | 6871,77 | 6900,26 |
| 166 | 0,85 | Düşük | 22 | 5948,43 | 6019,12 |
| 166 | 0,85 | Rassal | 23 | 6770,24 | 6878,42 |
| 166 | 0,85 | Yüksek | 25 | 7583,61 | 7599,62 |
| 166 | 0,9 | Düşük | 22 | 5724,72 | 5743,20 |
| 166 | 0,9 | Rassal | 24 | 6392,63 | 6474,36 |
| 166 | 0,9 | Yüksek | 26 | 7189,95 | 7201,50 |
| 166 | 0,95 | Düşük | 23 | 5579,64 | 5600,91 |
| 166 | 0,95 | Rassal | 25 | 6259,73 | 6266,19 |
| 166 | 0,95 | Yüksek | 27 | 6791,49 | 6811,38 |
| 176 | 0,85 | Düşük | 21 | 5960,36 | 6001,12 |
| 176 | 0,85 | Rassal | 22 | 6750,80 | 6826,43 |
| 176 | 0,85 | Yüksek | 23 | 7380,30 | 7393,93 |
| 176 | 0,9 | Düşük | 21 | 5656,33 | 5685,32 |
| 176 | 0,9 | Rassal | 23 | 6474,67 | 6495,61 |
| 176 | 0,9 | Yüksek | 24 | 7048,45 | 7051,53 |
| 176 | 0,95 | Düşük | 21 | 5495,58 | 5526,67 |
| 176 | 0,95 | Rassal | 23 | 6148,97 | 6159,17 |
| 176 | 0,95 | Yüksek | 25 | 6676,78 | 6693,30 |

| Mukherje Problemi | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **c** | **1-α** | **cv** | **min K** | **min F** | **ort F** |
| 305 | 0,85 | Düşük | 30 | 17536,66 | 17644,36 |
| 305 | 0,85 | Rassal | 33 | 20086,15 | 20185,21 |
| 305 | 0,85 | Yüksek | 35 | 21634,93 | 21837,26 |
| 305 | 0,9 | Düşük | 31 | 16764,29 | 16779,55 |
| 305 | 0,9 | Rassal | 34 | 19157,94 | 19205,80 |
| 305 | 0,9 | Yüksek | 37 | 20803,35 | 20852,26 |
| 305 | 0,95 | Düşük | 32 | 16016,64 | 16042,05 |
| 305 | 0,95 | Rassal | 36 | 18016,59 | 18075,85 |
| 305 | 0,95 | Yüksek | 40 | 19578,91 | 19735,56 |
| 317 | 0,85 | Düşük | 29 | 17548,80 | 17603,44 |
| 317 | 0,85 | Rassal | 31 | 20040,00 | 20049,46 |
| 317 | 0,85 | Yüksek | 34 | 21583,55 | 21598,92 |
| 317 | 0,9 | Düşük | 30 | 16620,58 | 16718,35 |
| 317 | 0,9 | Rassal | 33 | 19037,66 | 19047,28 |
| 317 | 0,9 | Yüksek | 35 | 20498,68 | 20549,56 |
| 317 | 0,95 | Düşük | 30 | 15870,73 | 15915,70 |
| 317 | 0,95 | Rassal | 35 | 17927,37 | 18010,25 |
| 317 | 0,95 | Yüksek | 38 | 19517,29 | 19563,07 |
| 333 | 0,85 | Düşük | 28 | 17463,88 | 17463,96 |
| 333 | 0,85 | Rassal | 30 | 19616,34 | 19710,48 |
| 333 | 0,85 | Yüksek | 32 | 21032,04 | 21165,61 |
| 333 | 0,9 | Düşük | 28 | 16247,93 | 16345,78 |
| 333 | 0,9 | Rassal | 31 | 18573,76 | 18680,19 |
| 333 | 0,9 | Yüksek | 33 | 20014,71 | 20126,15 |
| 333 | 0,95 | Düşük | 29 | 15720,25 | 15757,71 |
| 333 | 0,95 | Rassal | 33 | 17846,83 | 17869,44 |
| 333 | 0,95 | Yüksek | 35 | 19269,63 | 19354,12 |
| 348 | 0,85 | Düşük | 26 | 16818,11 | 16889,73 |
| 348 | 0,85 | Rassal | 28 | 19239,18 | 19329,28 |
| 348 | 0,85 | Yüksek | 30 | 20896,59 | 20947,58 |
| 348 | 0,9 | Düşük | 27 | 16437,13 | 16465,35 |
| 348 | 0,9 | Rassal | 30 | 18346,84 | 18448,85 |
| 348 | 0,9 | Yüksek | 32 | 19797,72 | 19896,16 |
| 348 | 0,95 | Düşük | 27 | 15452,58 | 15481,23 |
| 348 | 0,95 | Rassal | 31 | 17555,82 | 17568,87 |
| 348 | 0,95 | Yüksek | 34 | 18752,54 | 18882,03 |
| 366 | 0,85 | Düşük | 25 | 16626,24 | 16750,42 |
| 366 | 0,85 | Rassal | 27 | 19029,34 | 19180,78 |
| 366 | 0,85 | Yüksek | 28 | 20494,85 | 20527,53 |
| 366 | 0,9 | Düşük | 25 | 16049,86 | 16147,72 |
| 366 | 0,9 | Rassal | 28 | 18103,81 | 18155,72 |
| 366 | 0,9 | Yüksek | 30 | 19409,10 | 19526,71 |

Mukherje problemi sonuçları devamı-1

| c | 1-α | cv | min K | min F | ort F |
|---|---|---|---|---|---|
| 366 | 0,95 | Düşük | 26 | 15345,08 | 15396,42 |
| 366 | 0,95 | Rassal | 29 | 17231,66 | 17288,59 |
| 366 | 0,95 | Yüksek | 32 | 18679,88 | 18736,24 |
| 385 | 0,85 | Düşük | 24 | 16466,14 | 16693,85 |
| 385 | 0,85 | Rassal | 25 | 18890,64 | 18959,29 |
| 385 | 0,85 | Yüksek | 27 | 20035,65 | 20088,10 |
| 385 | 0,9 | Düşük | 24 | 15954,81 | 15959,91 |
| 385 | 0,9 | Rassal | 26 | 17874,90 | 17994,21 |
| 385 | 0,9 | Yüksek | 28 | 18985,87 | 19020,25 |
| 385 | 0,95 | Düşük | 24 | 15347,61 | 15429,11 |
| 385 | 0,95 | Rassal | 28 | 17254,51 | 17266,20 |
| 385 | 0,95 | Yüksek | 30 | 18436,71 | 18458,78 |
| 406 | 0,85 | Düşük | 22 | 16431,10 | 16574,31 |
| 406 | 0,85 | Rassal | 24 | 18387,22 | 18487,57 |
| 406 | 0,85 | Yüksek | 25 | 19620,61 | 19664,20 |
| 406 | 0,9 | Düşük | 23 | 15551,48 | 15710,98 |
| 406 | 0,9 | Rassal | 25 | 17740,82 | 17762,40 |
| 406 | 0,9 | Yüksek | 26 | 18822,08 | 18887,02 |
| 406 | 0,95 | Düşük | 23 | 15040,03 | 15044,26 |
| 406 | 0,95 | Rassal | 26 | 17036,21 | 17058,55 |
| 406 | 0,95 | Yüksek | 28 | 18174,01 | 18178,66 |
| 430 | 0,85 | Düşük | 21 | 16206,46 | 16274,36 |
| 430 | 0,85 | Rassal | 23 | 18260,85 | 18285,77 |
| 430 | 0,85 | Yüksek | 24 | 19205,32 | 19421,32 |
| 430 | 0,9 | Düşük | 21 | 15520,78 | 15533,46 |
| 430 | 0,9 | Rassal | 23 | 17416,36 | 17485,42 |
| 430 | 0,9 | Yüksek | 25 | 18306,74 | 18447,26 |
| 430 | 0,95 | Düşük | 22 | 14829,74 | 14928,15 |
| 430 | 0,95 | Rassal | 24 | 16828,55 | 16897,29 |
| 430 | 0,95 | Yüksek | 26 | 17855,23 | 17898,83 |
| 455 | 0,85 | Düşük | 20 | 16152,24 | 16246,04 |
| 455 | 0,85 | Rassal | 21 | 17433,93 | 17605,02 |
| 455 | 0,85 | Yüksek | 22 | 19140,14 | 19144,91 |
| 455 | 0,9 | Düşük | 20 | 15303,98 | 15330,64 |
| 455 | 0,9 | Rassal | 22 | 17058,76 | 17106,75 |
| 455 | 0,9 | Yüksek | 23 | 18083,83 | 18126,45 |
| 455 | 0,95 | Düşük | 21 | 14811,17 | 14902,94 |
| 455 | 0,95 | Rassal | 23 | 16488,69 | 16488,79 |
| 455 | 0,95 | Yüksek | 25 | 17687,35 | 17716,98 |
| 487 | 0,85 | Düşük | 19 | 15768,61 | 15917,96 |
| 487 | 0,85 | Rassal | 20 | 17623,12 | 17624,11 |
| 487 | 0,85 | Yüksek | 21 | 18545,60 | 18610,91 |
| 487 | 0,9 | Düşük | 19 | 15184,17 | 15279,80 |

Mukherje problemi sonuçları devamı-2

| c | 1-α | cv | min K | min F | ort F |
|---|---|---|---|---|---|
| 487 | 0,9 | Rassal | 20 | 16846,67 | 16948,48 |
| 487 | 0,9 | Yüksek | 22 | 17960,20 | 18007,00 |
| 487 | 0,95 | Düşük | 19 | 14558,14 | 14619,82 |
| 487 | 0,95 | Rassal | 21 | 16097,32 | 16152,03 |
| 487 | 0,95 | Yüksek | 23 | 17401,15 | 17433,61 |
| 522 | 0,85 | Düşük | 17 | 15458,30 | 15503,96 |
| 522 | 0,85 | Rassal | 18 | 17096,71 | 17209,80 |
| 522 | 0,85 | Yüksek | 19 | 18029,80 | 18090,68 |
| 522 | 0,9 | Düşük | 18 | 15110,65 | 15201,54 |
| 522 | 0,9 | Rassal | 19 | 16537,06 | 16582,20 |
| 522 | 0,9 | Yüksek | 20 | 17326,23 | 17361,46 |
| 522 | 0,95 | Düşük | 18 | 14522,61 | 14560,68 |
| 522 | 0,95 | Rassal | 20 | 16154,44 | 16166,43 |
| 522 | 0,95 | Yüksek | 21 | 17023,03 | 17063,55 |
| 561 | 0,85 | Düşük | 16 | 15292,82 | 15375,25 |
| 561 | 0,85 | Rassal | 17 | 16941,60 | 16985,99 |
| 561 | 0,85 | Yüksek | 18 | 17753,31 | 17805,37 |
| 561 | 0,9 | Düşük | 16 | 14624,96 | 14718,54 |
| 561 | 0,9 | Rassal | 18 | 16380,55 | 16432,83 |
| 561 | 0,9 | Yüksek | 18 | 16961,56 | 17053,69 |
| 561 | 0,95 | Düşük | 17 | 14322,83 | 14439,65 |
| 561 | 0,95 | Rassal | 18 | 15648,00 | 15701,16 |
| 561 | 0,95 | Yüksek | 20 | 16815,47 | 16861,19 |
| 608 | 0,85 | Düşük | 15 | 15313,96 | 15342,85 |
| 608 | 0,85 | Rassal | 16 | 16598,24 | 16632,63 |
| 608 | 0,85 | Yüksek | 16 | 17034,51 | 17163,04 |
| 608 | 0,9 | Düşük | 15 | 14725,82 | 14809,54 |
| 608 | 0,9 | Rassal | 16 | 15815,59 | 15901,81 |
| 608 | 0,9 | Yüksek | 17 | 16713,36 | 16713,48 |
| 608 | 0,95 | Düşük | 15 | 14154,50 | 14197,46 |
| 608 | 0,95 | Rassal | 17 | 15586,34 | 15653,77 |
| 608 | 0,95 | Yüksek | 18 | 16453,35 | 16474,05 |

**Arc1 Problemi**

| c | 1-α | cv | min K | min F | ort F |
|---|---|---|---|---|---|
| 5853 | 0,85 | Düşük | 28 | 269509,8 | 269544,9 |
| 5853 | 0,85 | Rassal | 31 | 314433,3 | 316546,0 |
| 5853 | 0,85 | Yüksek | 33 | 344575,4 | 347412,5 |
| 5853 | 0,9 | Düşük | 29 | 261396,8 | 263741,0 |
| 5853 | 0,9 | Rassal | 32 | 300527,1 | 303148,8 |
| 5853 | 0,9 | Yüksek | 35 | 335273,1 | 335292,3 |
| 5853 | 0,95 | Düşük | 29 | 259037,7 | 259642,4 |

Arc1 problemi sonuçları devamı-1

| c | 1-α | cv | min K | min F | ort F |
|---|---|---|---|---|---|
| 5853 | 0,95 | Rassal | 33 | 292709,6 | 294019,2 |
| 5853 | 0,95 | Yüksek | 37 | 321850,2 | 323113,8 |
| 6161 | 0,85 | Düşük | 27 | 265403,9 | 268379,6 |
| 6161 | 0,85 | Rassal | 29 | 309070,7 | 309103,7 |
| 6161 | 0,85 | Yüksek | 31 | 339440,6 | 339447,2 |
| 6161 | 0,9 | Düşük | 27 | 264149,6 | 264595,8 |
| 6161 | 0,9 | Rassal | 30 | 299251,1 | 300488,7 |
| 6161 | 0,9 | Yüksek | 32 | 328791,0 | 328946,8 |
| 6161 | 0,95 | Düşük | 28 | 255098,1 | 255632,3 |
| 6161 | 0,95 | Rassal | 32 | 290014,0 | 291612,0 |
| 6161 | 0,95 | Yüksek | 35 | 317096,7 | 317542,8 |
| 6502 | 0,85 | Düşük | 25 | 261759,6 | 264497,1 |
| 6502 | 0,85 | Rassal | 27 | 309394,0 | 309428,1 |
| 6502 | 0,85 | Yüksek | 29 | 331748,3 | 331751,6 |
| 6502 | 0,9 | Düşük | 26 | 252680,2 | 256948,9 |
| 6502 | 0,9 | Rassal | 28 | 293542,6 | 295378,5 |
| 6502 | 0,9 | Yüksek | 30 | 321944,8 | 322153,0 |
| 6502 | 0,95 | Düşük | 26 | 250604,3 | 253618,4 |
| 6502 | 0,95 | Rassal | 30 | 285836,1 | 287312,4 |
| 6502 | 0,95 | Yüksek | 32 | 315135,3 | 315386,6 |
| 6886 | 0,85 | Düşük | 24 | 263120,0 | 264588,5 |
| 6886 | 0,85 | Rassal | 26 | 304955,9 | 305593,5 |
| 6886 | 0,85 | Yüksek | 28 | 321904,6 | 324858,3 |
| 6886 | 0,9 | Düşük | 24 | 255249,7 | 256272,7 |
| 6886 | 0,9 | Rassal | 26 | 289868,3 | 291653,6 |
| 6886 | 0,9 | Yüksek | 28 | 312788,8 | 314570,9 |
| 6886 | 0,95 | Düşük | 25 | 252771,4 | 253396,3 |
| 6886 | 0,95 | Rassal | 28 | 285454,3 | 286618,5 |
| 6886 | 0,95 | Yüksek | 30 | 307186,4 | 309185,7 |
| 7315 | 0,85 | Düşük | 22 | 259860,2 | 259913,2 |
| 7315 | 0,85 | Rassal | 24 | 290119,3 | 292444,9 |
| 7315 | 0,85 | Yüksek | 25 | 318443,1 | 319090,7 |
| 7315 | 0,9 | Düşük | 23 | 255298,6 | 255867,9 |
| 7315 | 0,9 | Rassal | 25 | 284117,5 | 285537,2 |
| 7315 | 0,9 | Yüksek | 27 | 310093,9 | 310440,1 |
| 7315 | 0,95 | Düşük | 23 | 245516,2 | 246276,1 |
| 7315 | 0,95 | Rassal | 26 | 281341,8 | 281610,5 |
| 7315 | 0,95 | Yüksek | 28 | 299183,5 | 300903,0 |
| 9049 | 0,85 | Düşük | 18 | 253940,5 | 254085,9 |
| 9049 | 0,85 | Rassal | 19 | 279819,7 | 281815,3 |
| 9049 | 0,85 | Yüksek | 20 | 299775,3 | 300128,5 |
| 9049 | 0,9 | Düşük | 18 | 244995,0 | 245790,7 |
| 9049 | 0,9 | Rassal | 20 | 272833,6 | 275362,2 |
| 9049 | 0,9 | Yüksek | 21 | 292325,1 | 293258,4 |
| 9049 | 0,95 | Düşük | 18 | 244416,6 | 245051,0 |
| 9049 | 0,95 | Rassal | 20 | 265261,3 | 267469,7 |
| 9049 | 0,95 | Yüksek | 22 | 285918,0 | 287339,7 |

Arc1 problemi sonuçları devamı-2

| c | 1-α | cv | min K | min F | ort F |
|---|---|---|---|---|---|
| 10578 | 0,85 | Düşük | 15 | 242661,7 | 243858,0 |
| 10578 | 0,85 | Rassal | 16 | 265791,0 | 268996,3 |
| 10578 | 0,85 | Yüksek | 17 | 281011,9 | 284134,1 |
| 10578 | 0,9 | Düşük | 15 | 240743,8 | 240942,3 |
| 10578 | 0,9 | Rassal | 16 | 268248,6 | 268975,8 |
| 10578 | 0,9 | Yüksek | 17 | 274602,6 | 277665,7 |
| 10578 | 0,95 | Düşük | 16 | 241129,2 | 241497,0 |
| 10578 | 0,95 | Rassal | 17 | 257351,6 | 258462,5 |
| 10578 | 0,95 | Yüksek | 18 | 274943,3 | 276214,1 |
| 11705 | 0,85 | Düşük | 14 | 245765,3 | 246770,7 |
| 11705 | 0,85 | Rassal | 14 | 267579,6 | 268502,4 |
| 11705 | 0,85 | Yüksek | 15 | 278227,5 | 279145,9 |
| 11705 | 0,9 | Düşük | 14 | 236081,9 | 237728,6 |
| 11705 | 0,9 | Rassal | 15 | 261013,0 | 262363,7 |
| 11705 | 0,9 | Yüksek | 15 | 273403,7 | 275176,7 |
| 11705 | 0,95 | Düşük | 14 | 230092,1 | 230796,3 |
| 11705 | 0,95 | Rassal | 15 | 254114,3 | 254693,7 |
| 11705 | 0,95 | Yüksek | 16 | 267363,2 | 268473,7 |
| 13005 | 0,85 | Düşük | 12 | 234849,4 | 235710,8 |
| 13005 | 0,85 | Rassal | 13 | 252867,1 | 254892,3 |
| 13005 | 0,85 | Yüksek | 13 | 264765,7 | 265680,1 |
| 13005 | 0,9 | Düşük | 12 | 232794,0 | 233801,6 |
| 13005 | 0,9 | Rassal | 13 | 250656,6 | 250945,0 |
| 13005 | 0,9 | Yüksek | 14 | 268968,1 | 270308,6 |
| 13005 | 0,95 | Düşük | 13 | 236269,6 | 236641,1 |
| 13005 | 0,95 | Rassal | 14 | 251469,7 | 253183,4 |
| 13005 | 0,95 | Yüksek | 14 | 268458,6 | 271206,3 |
| 15747 | 0,85 | Düşük | 10 | 229704,7 | 230455,0 |
| 15747 | 0,85 | Rassal | 11 | 252850,2 | 254519,0 |
| 15747 | 0,85 | Yüksek | 11 | 256841,0 | 258929,7 |
| 15747 | 0,9 | Düşük | 10 | 223626,5 | 224247,4 |
| 15747 | 0,9 | Rassal | 11 | 249508,4 | 249812,4 |
| 15747 | 0,9 | Yüksek | 11 | 254294,8 | 255014,8 |
| 15747 | 0,95 | Düşük | 10 | 224610,7 | 225223,5 |
| 15747 | 0,95 | Rassal | 11 | 238659,1 | 240556,0 |
| 15747 | 0,95 | Yüksek | 12 | 257767,9 | 258044,8 |

**Arc2 Problemi**

| c | 1-α | cv | min ist | min F | Avg F |
|---|---|---|---|---|---|
| 10512 | 0,85 | Düşük | 33 | 584085,5 | 584882,0 |
| 10512 | 0,85 | Rassal | 36 | 651176,3 | 652618,9 |
| 10512 | 0,85 | Yüksek | 38 | 714322,1 | 719492,2 |
| 10512 | 0,9 | Düşük | 33 | 569212,5 | 570040,4 |
| 10512 | 0,9 | Rassal | 38 | 636760,6 | 640535,9 |
| 10512 | 0,9 | Yüksek | 40 | 704123,5 | 706662,6 |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 10512 | 0,95 | Düşük | 34 | 561798,4 | 562551,5 |
| 10512 | 0,95 | Rassal | 38 | 627576,1 | 630145,9 |
| 10512 | 0,95 | Yüksek | 44 | 701173,9 | 701209,7 |
| 10932 | 0,85 | Düşük | 31 | 578878,5 | 580685,1 |
| 10932 | 0,85 | Rassal | 34 | 637872,9 | 641862,8 |
| 10932 | 0,85 | Yüksek | 36 | 717832,8 | 718104,5 |
| 10932 | 0,9 | Düşük | 32 | 567695,9 | 567914,7 |
| 10932 | 0,9 | Rassal | 35 | 630040,2 | 634115,6 |
| 10932 | 0,9 | Yüksek | 39 | 697371,6 | 697653,3 |
| 10932 | 0,95 | Düşük | 33 | 551989,8 | 553262,4 |
| 10932 | 0,95 | Rassal | 37 | 616004,3 | 617591,8 |
| 10932 | 0,95 | Yüksek | 42 | 690005,7 | 694049,3 |
| 11388 | 0,85 | Düşük | 30 | 568169,6 | 570092,6 |
| 11388 | 0,85 | Rassal | 32 | 640972,1 | 643927,3 |
| 11388 | 0,85 | Yüksek | 35 | 699693,0 | 704309,1 |
| 11388 | 0,9 | Düşük | 31 | 554296,5 | 555269,1 |
| 11388 | 0,9 | Rassal | 33 | 625027,8 | 627840,8 |
| 11388 | 0,9 | Yüksek | 37 | 683059,4 | 686500,9 |
| 11388 | 0,95 | Düşük | 31 | 549901,0 | 551885,5 |
| 11388 | 0,95 | Rassal | 35 | 612815,4 | 612969,7 |
| 11388 | 0,95 | Yüksek | 40 | 680350,5 | 681032,6 |
| 11884 | 0,85 | Düşük | 29 | 569111,5 | 570444,8 |
| 11884 | 0,85 | Rassal | 31 | 633144,4 | 633655,2 |
| 11884 | 0,85 | Yüksek | 33 | 691050,5 | 693222,2 |
| 11884 | 0,9 | Düşük | 29 | 554391,0 | 556223,1 |
| 11884 | 0,9 | Rassal | 32 | 620300,2 | 621682,6 |
| 11884 | 0,9 | Yüksek | 35 | 673874,9 | 675136,7 |
| 11884 | 0,95 | Düşük | 30 | 547741,6 | 549213,0 |
| 11884 | 0,95 | Rassal | 33 | 609750,7 | 611082,4 |
| 11884 | 0,95 | Yüksek | 38 | 667274,7 | 669630,3 |
| 12424 | 0,85 | Düşük | 27 | 555854,8 | 559052,5 |
| 12424 | 0,85 | Rassal | 29 | 632689,1 | 633090,4 |
| 12424 | 0,85 | Yüksek | 31 | 688115,9 | 694045,7 |
| 12424 | 0,9 | Düşük | 28 | 543096,1 | 548029,9 |
| 12424 | 0,9 | Rassal | 30 | 611688,8 | 613559,8 |
| 12424 | 0,9 | Yüksek | 33 | 666447,1 | 669405,6 |
| 12424 | 0,95 | Düşük | 28 | 540063,3 | 541874,9 |
| 12424 | 0,95 | Rassal | 32 | 605861,9 | 606808,4 |
| 12424 | 0,95 | Yüksek | 35 | 662153,8 | 663110,0 |
| 13014 | 0,85 | Düşük | 26 | 550932,7 | 551545,3 |
| 13014 | 0,85 | Rassal | 28 | 615453,7 | 617753,8 |
| 13014 | 0,85 | Yüksek | 30 | 671099,8 | 673484,0 |
| 13014 | 0,9 | Düşük | 26 | 547508,4 | 550264,0 |
| 13014 | 0,9 | Rassal | 29 | 600604,5 | 605179,4 |
| 13014 | 0,9 | Yüksek | 31 | 659153,5 | 663170,5 |
| 13014 | 0,95 | Düşük | 27 | 528170,6 | 529810,7 |
| 13014 | 0,95 | Rassal | 30 | 595277,7 | 596798,6 |
| 13014 | 0,95 | Yüksek | 34 | 652864,9 | 652911,5 |

**Ek 3: Stokastik Paralel Montaj Hattı Dengeleme Problemi Kıyaslama Sonuçları**

Mertens Problemi

| | | | Mat. Prog. Çözümü İstasyon Sayısı | | | Sezgisel Yaklaşım istasyon sayısı | | | | Maliyete Yönelik Sezgisel | | | | | | Üst Sezgisel Yaklaşım | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | | | | İstasyon sayısı | | Tamamlanmama maliyeti | | | | | | |
| c | 1-α | cv | Kmin | DYM sonuc | DDM sonuc | Kmin | r | c* | cv | Kmin | Bulunan | MYS | r | C* | cv | Kmin | Bulunan İst. Say. | Tamamlanma maliyeti |
| 12 | 0,85 | d | 5 | 6 | 6 | 5 | 6 | 6 | 6 | 5 | 6 | 0,05 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 5 | 6 | 0,70 |
| 12 | 0,85 | r | 5 | 6 | 6 | 5 | 6 | 6 | 6 | 5 | 7 | 0,18 | 0,17 | 0,17 | 0,17 | 5 | 6 | 2,45 |
| 12 | 0,85 | y | 5 | 6 | 6 | 6 | 7 | 7 | 7 | 6 | 7 | 0,15 | 0,14 | 0,14 | 0,17 | 5 | 8 | 0,76 |
| 12 | 0,90 | d | 5 | 6 | 6 | 5 | 6 | 6 | 6 | 5 | 7 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 5 | 6 | 0,68 |
| 12 | 0,90 | r | 5 | 6 | 6 | 5 | 7 | 7 | 7 | 5 | 7 | 0,18 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 5 | 7 | 0,79 |
| 12 | 0,90 | y | 5 | 6 | 6 | 6 | 8 | 8 | 8 | 6 | 8 | 0,07 | 0,06 | 0,06 | 0,07 | 6 | 8 | 0,76 |
| 12 | 0,95 | d | 5 | 7 | 6 | 5 | 6 | 6 | 6 | 5 | 6 | 0,03 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 5 | 6 | 0,60 |
| 12 | 0,95 | r | 5 | 7 | 6 | 6 | 7 | 7 | 7 | 6 | 7 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 6 | 7 | 0,70 |
| 12 | 0,95 | y | 5 | 7 | 6 | 6 | 9 | 9 | 9 | 6 | 9 | 0,07 | 0,06 | 0,06 | 0,03 | 6 | 9 | 0,19 |
| 14 | 0,85 | d | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 0,08 | 0,03 | 0,03 | 0,06 | 5 | 5 | 0,28 |
| 14 | 0,85 | r | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 6 | 0,01 | 0,19 | 0,19 | 0,14 | 5 | 5 | 1,80 |
| 14 | 0,85 | y | 5 | 5 | 5 | 5 | 6 | 6 | 6 | 5 | 6 | 0,24 | 0,21 | 0,21 | 0,14 | 5 | 5 | 2,87 |
| 14 | 0,90 | d | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 0,08 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 5 | 5 | 0,28 |
| 14 | 0,90 | r | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 6 | 0,01 | 0,17 | 0,17 | 0,25 | 5 | 5 | 1,95 |
| 14 | 0,90 | y | 5 | 5 | 5 | 5 | 6 | 6 | 6 | 5 | 6 | 0,18 | 0,17 | 0,17 | 0,12 | 5 | 6 | 1,08 |
| 14 | 0,95 | d | 5 | 6 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 0,03 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 5 | 5 | 0,28 |
| 14 | 0,95 | r | 5 | 6 | 5 | 5 | 6 | 6 | 6 | 5 | 6 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 5 | 6 | 0,33 |

Mertens problemi sonuçları devamı

| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 14 | 0,95 | y | 5 | 6 | 5 | 5 | 7 | 7 | 7 | 5 | 7 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,03 | 5 | 7 | 0,39 |
| 16 | 0,85 | d | 4 | 5 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 5 | 0,29 | 0,22 | 0,22 | 0,25 | 4 | 4 | 0,82 |
| 16 | 0,85 | r | 4 | 5 | 4 | 4 | 5 | 5 | 5 | 4 | 5 | 0,08 | 0,07 | 0,07 | 0,07 | 4 | 5 | 0,28 |
| 16 | 0,85 | y | 4 | 5 | 4 | 4 | 5 | 5 | 5 | 4 | 5 | 0,12 | 0,12 | 0,12 | 0,11 | 4 | 5 | 0,64 |
| 16 | 0,90 | d | 4 | 5 | 4 | 4 | 5 | 5 | 5 | 4 | 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 | 4 | 0,98 |
| 16 | 0,90 | r | 4 | 5 | 4 | 4 | 5 | 5 | 5 | 4 | 5 | 0,08 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 4 | 5 | 0,29 |
| 16 | 0,90 | y | 4 | 5 | 4 | 4 | 5 | 5 | 5 | 4 | 5 | 0,12 | 0,11 | 0,11 | 0,1 | 4 | 5 | 0,65 |
| 16 | 0,95 | d | 4 | 5 | 5 | 4 | 5 | 5 | 5 | 4 | 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 | 5 | 0,01 |
| 16 | 0,95 | r | 4 | 5 | 5 | 4 | 5 | 5 | 5 | 4 | 5 | 0,02 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 4 | 5 | 0,29 |
| 16 | 0,95 | y | 4 | 5 | 5 | 5 | 6 | 6 | 6 | 5 | 6 | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 0,03 | 4 | 5 | 0,66 |
| 20 | 0,85 | d | 3 | 4 | 3 | 3 | 3 | 3 | 4 | 3 | 4 | 0,01 | 0,3 | 0,3 | 0 | 3 | 3 | 1,55 |
| 20 | 0,85 | r | 3 | 4 | 3 | 3 | 4 | 4 | 4 | 3 | 4 | 0,08 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 3 | 4 | 0,15 |
| 20 | 0,85 | y | 3 | 4 | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 0,1 | 0,11 | 0,11 | 0,15 | 3 | 4 | 0,31 |
| 20 | 0,90 | d | 3 | 4 | 3 | 3 | 3 | 3 | 4 | 3 | 4 | 0,01 | 0,3 | 0,3 | 0 | 3 | 4 | 0,00 |
| 20 | 0,90 | r | 3 | 4 | 3 | 3 | 4 | 4 | 4 | 3 | 4 | 0,08 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 3 | 4 | 0,14 |
| 20 | 0,90 | y | 3 | 4 | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 0,1 | 0,11 | 0,11 | 0,1 | 4 | 4 | 0,32 |
| 20 | 0,95 | d | 3 | 4 | 4 | 3 | 4 | 4 | 4 | 3 | 4 | 0,01 | 0 | 0 | 0 | 3 | 4 | 0,00 |
| 20 | 0,95 | r | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 0,08 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 4 | 4 | 0,10 |
| 20 | 0,95 | y | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 0,03 | 0,05 | 0,05 | 0,12 | 4 | 4 | 0,34 |

Jaeschke Problemi

| | | | Mat. Prog. Çözümü istasyon sayısı | | | Sezgisel Yaklaşım istasyon sayısı | | | | Maliyete Yönelik Sezgisel | | | | | | Üst Sezgisel Yaklaşım | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | | | | İstasyon sayısı | | Tamamlanmama maliyeti | | | | | | |
| c | 1-α | cv | Kmin | DYM sonuc | DDM sonuc | Kmin | r | c* | cv | Kmin | Bulunan | MYS | r | C* | cv | Kmin | Bulunan İst. Say. | Tamamlanma maliyeti |
| 11 | 0,85 | d | 7 | 8 | 8 | 7 | 8 | 8 | 8 | 7 | 8 | 0,23 | 0,16 | 0,16 | 0,16 | 7 | 8 | 0,74 |
| 11 | 0,85 | r | 7 | 8 | 8 | 7 | 9 | 9 | 10 | 7 | 10 | 0,31 | 0,49 | 0,49 | 0,31 | 7 | 9 | 3,39 |
| 11 | 0,85 | y | 7 | 8 | 8 | 7 | 10 | 10 | 10 | 7 | 10 | 0,82 | 0,82 | 0,82 | 0,82 | 7 | 10 | 3,62 |
| 11 | 0,90 | d | 7 | 8 | 8 | 1 | 8 | 8 | 8 | 7 | 8 | 0,2 | 0,13 | 0,13 | 0,13 | 7 | 8 | 0,78 |
| 11 | 0,90 | r | 7 | 8 | 8 | 7 | 10 | 10 | 10 | 7 | 10 | 0,31 | 0,15 | 0,15 | 0,31 | 7 | 9 | 3,39 |
| 11 | 0,90 | y | 7 | 8 | 8 | 8 | 11 | 11 | 11 | 8 | 11 | 0,35 | 0,35 | 0,35 | 0,35 | 8 | 10 | 3,62 |
| 11 | 0,95 | d | 7 | 9 | 8 | 7 | 8 | 8 | 8 | 7 | 8 | 0,11 | 0,11 | 0,11 | 0,11 | 7 | 8 | 0,74 |
| 11 | 0,95 | r | 7 | 9 | 8 | 7 | 11 | 11 | 11 | 7 | 11 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 8 | 9 | 3,50 |
| 11 | 0,95 | y | 7 | 9 | 8 | 8 | 13 | 13 | 13 | 8 | 13 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 8 | 10 | 3,62 |
| 13 | 0,85 | d | 6 | 7 | 7 | 6 | 7 | 7 | 7 | 6 | 7 | 0,02 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 6 | 7 | 0,06 |
| 13 | 0,85 | r | 6 | 7 | 7 | 6 | 7 | 7 | 8 | 6 | 8 | 0,19 | 0,48 | 0,48 | 0,19 | 6 | 7 | 3,05 |
| 13 | 0,85 | y | 6 | 7 | 7 | 6 | 8 | 8 | 8 | 6 | 8 | 0,38 | 0,33 | 0,33 | 0,33 | 6 | 7 | 5,07 |
| 13 | 0,90 | d | 6 | 7 | 7 | 6 | 7 | 7 | 7 | 6 | 7 | 0,02 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 6 | 7 | 0,06 |
| 13 | 0,90 | r | 6 | 7 | 7 | 6 | 7 | 7 | 8 | 6 | 8 | 0,19 | 0,48 | 0,48 | 0,19 | 6 | 7 | 3,00 |
| 13 | 0,90 | y | 6 | 7 | 7 | 6 | 8 | 8 | 8 | 6 | 9 | 0,29 | 0,39 | 0,39 | 0,39 | 7 | 7 | 5,07 |
| 13 | 0,95 | d | 6 | 7 | 7 | 6 | 7 | 7 | 7 | 6 | 7 | 0,02 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 6 | 7 | 0,06 |
| 13 | 0,95 | r | 6 | 7 | 7 | 6 | 8 | 8 | 8 | 6 | 8 | 0,09 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 7 | 7 | 2,99 |

Jaeschke problemi sonuçları devamı-1

| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 13 | 0,95 | y | 6 | 7 | 7 | 7 | 9 | 9 | 9 | 7 | 10 | 0,17 | 0,23 | 0,23 | 0,23 | 7 | 7 | 5,07 |
| 15 | 0,85 | d | 5 | 6 | 6 | 5 | 6 | 6 | 6 | 5 | 6 | 0,22 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 5 | 5 | 3,40 |
| 15 | 0,85 | r | 5 | 6 | 6 | 5 | 6 | 6 | 6 | 5 | 7 | 0,18 | 0,63 | 0,63 | 0,63 | 5 | 6 | 2,40 |
| 15 | 0,85 | y | 5 | 6 | 6 | 6 | 7 | 7 | 7 | 6 | 7 | 0,46 | 0,43 | 0,43 | 0,43 | 6 | 6 | 4,21 |
| 15 | 0,90 | d | 5 | 6 | 6 | 5 | 6 | 6 | 6 | 5 | 6 | 0,22 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 5 | 6 | 0,12 |
| 15 | 0,90 | r | 5 | 6 | 6 | 5 | 7 | 7 | 7 | 5 | 7 | 0,17 | 0,08 | 0,08 | 0,1 | 6 | 6 | 2,32 |
| 15 | 0,90 | y | 5 | 6 | 6 | 6 | 7 | 7 | 7 | 6 | 8 | 0,09 | 0,37 | 0,37 | 0,41 | 6 | 6 | 4,36 |
| 15 | 0,95 | d | 5 | 6 | 6 | 5 | 6 | 6 | 6 | 5 | 6 | 0,15 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 5 | 6 | 0,12 |
| 15 | 0,95 | r | 5 | 6 | 6 | 6 | 7 | 7 | 8 | 6 | 8 | 0,02 | 0,08 | 0,08 | 0,02 | 6 | 6 | 2,38 |
| 15 | 0,95 | y | 5 | 6 | 6 | 6 | 7 | 7 | 7 | 6 | 8 | 0,09 | 0,28 | 0,28 | 0,28 | 6 | 6 | 4,21 |
| 17 | 0,85 | d | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 6 | 0,11 | 0,13 | 0,13 | 0,07 | 5 | 5 | 0,09 |
| 17 | 0,85 | r | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 6 | 0,38 | 0,55 | 0,55 | 0,55 | 5 | 5 | 2,56 |
| 17 | 0,85 | y | 5 | 5 | 5 | 5 | 6 | 6 | 6 | 5 | 6 | 0,58 | 0,43 | 0,43 | 0,45 | 5 | 6 | 1,33 |
| 17 | 0,90 | d | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 6 | 0,11 | 0,07 | 0,07 | 0,17 | 5 | 5 | 0,09 |
| 17 | 0,90 | r | 5 | 5 | 5 | 5 | 6 | 6 | 6 | 5 | 7 | 0,11 | 0,13 | 0,13 | 0,13 | 5 | 5 | 2,44 |
| 17 | 0,90 | y | 5 | 5 | 5 | 5 | 6 | 6 | 6 | 5 | 7 | 0,34 | 0,33 | 0,33 | 0,33 | 5 | 6 | 1,33 |
| 17 | 0,95 | d | 5 | 6 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 6 | 0,11 | 0,05 | 0,05 | 0,04 | 5 | 5 | 0,09 |
| 17 | 0,95 | r | 5 | 6 | 5 | 5 | 6 | 6 | 6 | 5 | 7 | 0,1 | 0,13 | 0,13 | 0,13 | 5 | 5 | 2,56 |
| 17 | 0,95 | y | 5 | 6 | 5 | 5 | 7 | 7 | 7 | 5 | 7 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 5 | 6 | 1,33 |
| 19 | 0,85 | d | 4 | 5 | 4 | 4 | 5 | 5 | 5 | 4 | 5 | 0,51 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 4 | 4 | 1,43 |

Jaeschke problemi sonuçları devamı-2

| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 19 | 0,85 | r | 4 | 5 | 4 | 4 | 5 | 5 | 5 | 4 | 5 | 0,54 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 4 | 5 | 0,60 |
| 19 | 0,85 | y | 4 | 5 | 4 | 4 | 5 | 5 | 5 | 4 | 5 | 0,61 | 0,37 | 0,37 | 0,37 | 5 | 5 | 1,70 |
| 19 | 0,90 | d | 4 | 5 | 4 | 4 | 5 | 5 | 5 | 4 | 5 | 0,51 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 4 | 4 | 1,24 |
| 19 | 0,90 | r | 4 | 5 | 4 | 4 | 5 | 5 | 5 | 4 | 5 | 0,54 | 0,08 | 0,08 | 0,09 | 5 | 5 | 0,64 |
| 19 | 0,90 | y | 4 | 5 | 4 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 6 | 0,28 | 0,45 | 0,45 | 0,48 | 5 | 5 | 1,69 |
| 19 | 0,95 | d | 4 | 5 | 5 | 4 | 5 | 5 | 5 | 4 | 5 | 0,09 | 0 | 0 | 0 | 4 | 4 | 1,24 |
| 19 | 0,95 | r | 4 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 6 | 0,06 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 5 | 5 | 0,60 |
| 19 | 0,95 | y | 4 | 5 | 5 | 5 | 6 | 6 | 6 | 5 | 6 | 0,18 | 0,1 | 0,1 | 0,11 | 5 | 5 | 1,68 |

Jackson Problemi

| | | | Mat. Prog. Çözümü İstasyon Sayısı | | | Sezgisel Yaklaşım istasyon sayısı | | | | Maliyete Yönelik Sezgisel | | | | | | Üst Sezgisel Yaklaşım | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | | | | İstasyon sayısı | | Tamamlanmama maliyeti | | | | | | |
| c | 1-α | cv | Kmin | DYM sonuc | DDM sonuc | Kmin | r | c* | cv | Kmin | Bulunan | MYS | r | C* | cv | Kmin | Bulunan İst. Say. | Tamamlanma maliyeti |
| 14 | 0,85 | d | 7 | 8 | 8* | 7 | 8 | 8 | 8 | 7 | 8 | 0,32 | 0,14 | 0,14 | 0,14 | 7 | 8 | 0,04 |
| 14 | 0,85 | r | 7 | 8 | 8* | 7 | 9 | 9 | 9 | 7 | 9 | 0,36 | 0,33 | 0,33 | 0,33 | 7 | 9 | 2,31 |
| 14 | 0,85 | y | 7 | 8 | 8* | 8 | 10 | 10 | 10 | 8 | 10 | 0,58 | 0,56 | 0,56 | 0,58 | 8 | 10 | 3,20 |
| 14 | 0,90 | d | 7 | 8 | 8* | 7 | 8 | 8 | 8 | 7 | 8 | 0,32 | 0,14 | 0,14 | 0,14 | 7 | 8 | 0,05 |
| 14 | 0,90 | r | 8 | 10 | 9* | 8 | 9 | 9 | 9 | 8 | 10 | 0,23 | 0,28 | 0,28 | 0,28 | 8 | 9 | 2,21 |
| 14 | 0,90 | y | 8 | 10 | 9* | 8 | 11 | 11 | 11 | 8 | 11 | 0,44 | 0,43 | 0,43 | 0,43 | 8 | 10 | 3,18 |
| 14 | 0,95 | d | 8 | 12 | 10* | 7 | 9 | 9 | 9 | 7 | 9 | 0,02 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 7 | 8 | 0,06 |

| Jackson problemi sonuçlar devamı-1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 14 | 0,95 | r | 8 | 12 | 10* | 8 | 10 | 10 | 10 | 8 | 10 | 0,21 | 0,21 | 0,21 | 0,21 | 8 | 10 | 0,99 |
| 14 | 0,95 | y | 8 | 12 | 10* | 8 | 13 | 13 | 13 | 8 | 13 | 0,13 | 0,13 | 0,13 | 0,13 | 8 | 12 | 1,17 |
| 16 | 0,85 | d | 7 | 9 | 8* | 6 | 7 | 7 | 7 | 6 | 7 | 0,3 | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 6 | 7 | 0,06 |
| 16 | 0,85 | r | 7 | 9 | 8* | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 8 | 0,51 | 0,8 | 0,8 | 0,67 | 7 | 7 | 3,37 |
| 16 | 0,85 | y | 7 | 9 | 8* | 7 | 8 | 8 | 8 | 7 | 9 | 0,52 | 0,73 | 0,73 | 0,73 | 7 | 8 | 3,67 |
| 16 | 0,90 | d | 7 | 10 | 10* | 6 | 7 | 7 | 7 | 6 | 7 | 0,3 | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 6 | 7 | 0,05 |
| 16 | 0,90 | r | 7 | 10 | 10* | 7 | 8 | 8 | 8 | 7 | 8 | 0,25 | 0,17 | 0,17 | 0,17 | 7 | 8 | 1,03 |
| 16 | 0,90 | y | 7 | 10 | 10* | 7 | 9 | 9 | 9 | 7 | 9 | 0,56 | 0,56 | 0,56 | 0,56 | 7 | 9 | 1,88 |
| 16 | 0,95 | d | 7 | 12 | 11* | 6 | 7 | 7 | 7 | 6 | 8 | 0,01 | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 6 | 7 | 0,05 |
| 16 | 0,95 | r | 7 | 12 | 11* | 7 | 9 | 9 | 9 | 7 | 9 | 0,15 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 7 | 8 | 0,99 |
| 16 | 0,95 | y | 7 | 12 | 11* | 7 | 10 | 10 | 10 | 7 | 10 | 0,17 | 0,16 | 0,16 | 0,17 | 7 | 10 | 0,80 |
| 19 | 0,85 | d | 6 | 7 | 6 | 5 | 6 | 6 | 6 | 5 | 6 | 0,65 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 5 | 6 | 0,00 |
| 19 | 0,85 | r | 6 | 7 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 7 | 0,24 | 0,65 | 0,65 | 0,47 | 6 | 6 | 1,84 |
| 19 | 0,85 | y | 6 | 7 | 6 | 6 | 7 | 7 | 7 | 6 | 7 | 0,31 | 0,31 | 0,31 | 0,31 | 6 | 7 | 1,80 |
| 19 | 0,90 | d | 6 | 7 | 6 | 5 | 6 | 6 | 6 | 5 | 6 | 0,18 | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 5 | 6 | 0,00 |
| 19 | 0,90 | r | 6 | 7 | 6 | 6 | 6 | 6 | 7 | 6 | 7 | 0,24 | 0,51 | 0,51 | 0,1 | 6 | 6 | 2,00 |
| 19 | 0,90 | y | 6 | 7 | 6 | 6 | 7 | 7 | 7 | 6 | 8 | 0,13 | 0,31 | 0,31 | 0,31 | 6 | 7 | 1,81 |
| 19 | 0,95 | d | 6 | 8 | 7* | 5 | 6 | 6 | 6 | 5 | 6 | 0,12 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 5 | 6 | 0,00 |
| 19 | 0,95 | r | 6 | 8 | 7* | 6 | 7 | 7 | 7 | 6 | 7 | 0,21 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 6 | 7 | 0,44 |
| 19 | 0,95 | y | 6 | 8 | 7* | 6 | 8 | 8 | 8 | 6 | 8 | 0,13 | 0,13 | 0,13 | 0,13 | 6 | 8 | 0,69 |
| 21 | 0,85 | d | 5 | 7 | 6* | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 6 | 0,78 | 0,45 | 0,45 | 0,33 | 5 | 5 | 0,07 |
| 21 | 0,85 | r | 5 | 7 | 6* | 5 | 6 | 6 | 6 | 5 | 6 | 0,29 | 0,23 | 0,23 | 0,23 | 5 | 6 | 0,57 |
| 21 | 0,85 | y | 5 | 7 | 6* | 5 | 6 | 6 | 6 | 5 | 6 | 0,54 | 0,54 | 0,54 | 0,54 | 5 | 6 | 1,81 |
| 21 | 0,90 | d | 5 | 7 | 6* | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 6 | 0,08 | 0,16 | 0,16 | 0,19 | 5 | 5 | 0,11 |
| 21 | 0,90 | r | 5 | 7 | 6* | 5 | 6 | 6 | 6 | 5 | 6 | 0,29 | 0,23 | 0,23 | 0,23 | 5 | 6 | 0,51 |

| Jackson problemi sonuçları devamı-2 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 21 | 0,90 | y | 5 | 7 | 6* | 5 | 6 | 6 | 6 | 5 | 7 | 0,11 | 0,52 | 0,52 | 0,52 | 5 | 6 | 1,72 |
| 21 | 0,95 | d | 6 | 8 | 7* | 5 | 5 | 5 | 6 | 5 | 6 | 0,07 | 0,15 | 0,15 | 0 | 5 | 5 | 0,06 |
| 21 | 0,95 | r | 6 | 8 | 7* | 5 | 6 | 6 | 6 | 5 | 7 | 0,18 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 5 | 6 | 0,49 |
| 21 | 0,95 | y | 6 | 8 | 7* | 6 | 7 | 7 | 7 | 6 | 7 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 6 | 7 | 0,55 |
| 25 | 0,85 | d | 4 | 5 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 5 | 0,51 | 0,32 | 0,32 | 0,32 | 4 | 4 | 0,10 |
| 25 | 0,85 | r | 4 | 5 | 4 | 4 | 5 | 5 | 5 | 4 | 5 | 0,63 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 4 | 5 | 0,39 |
| 25 | 0,85 | y | 4 | 5 | 4 | 4 | 5 | 5 | 5 | 4 | 5 | 0,37 | 0,37 | 0,37 | 0,37 | 4 | 5 | 1,16 |
| 25 | 0,90 | d | 4 | 5 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 5 | 0,51 | 0,32 | 0,32 | 0,32 | 4 | 4 | 0,18 |
| 25 | 0,90 | r | 4 | 6 | 5* | 4 | 5 | 5 | 5 | 4 | 5 | 0,79 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 4 | 5 | 0,32 |
| 25 | 0,90 | y | 4 | 5 | 4 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 6 | 0,38 | 0,53 | 0,53 | 0,53 | 5 | 5 | 1,19 |
| 25 | 0,95 | d | 4 | 5 | 5 | 4 | 5 | 5 | 5 | 4 | 5 | 0,11 | 0 | 0 | 0 | 4 | 4 | 0,10 |
| 25 | 0,95 | r | 4 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 6 | 0,03 | 0,11 | 0,11 | 0,09 | 5 | 5 | 0,29 |
| 25 | 0,95 | y | 4 | 5 | 5 | 5 | 6 | 6 | 6 | 5 | 6 | 0,13 | 0,13 | 0,13 | 0,13 | 5 | 6 | 0,24 |

Roszieg Problemi

| | | | Mat. Prog. Çözümü İstasyon Sayısı | | | Sezgisel Yaklaşım İstasyon Sayısı | | | | Maliyete Yönelik Sezgisel | | | | | | Üst Sezgisel Yaklaşım | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | | | | İstasyon Sayısı | | Tamamlanmama Maliyeti | | | | | | |
| c | 1-α | cv | Kmin | DYM sonuc | DDM sonuc | Kmin | r | c* | cv | Kmin | Bulunan | MYS | r | C* | cv | Kmin | Bulunan İst. Say. | Tamamlanma Maliyeti |
| 30 | 0,85 | d | 9 | 10 | 10 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 10 | 2,75 | 4,97 | 4,97 | 5,2 | 9 | 10 | 0,75 |
| 30 | 0,85 | r | 9 | 10 | 10 | 9 | 10 | 10 | 10 | 9 | 11 | 2,88 | 6,75 | 6,75 | 7,99 | 9 | 11 | 3,30 |
| 30 | 0,85 | y | 9 | 10 | 10 | 9 | 11 | 11 | 11 | 9 | 11 | 7,31 | 5,19 | 5,19 | 6,23 | 9 | 11 | 5,09 |
| 30 | 0,90 | d | 9 | 10 | 10 | 9 | 10 | 10 | 10 | 9 | 10 | 2,67 | 2,43 | 2,43 | 2,45 | 9 | 10 | 0,59 |
| 30 | 0,90 | r | 9 | 12 | 0 | 9 | 11 | 11 | 11 | 9 | 11 | 1,86 | 1,62 | 1,62 | 1,66 | 9 | 11 | 3,18 |
| 30 | 0,90 | y | 9 | 12 | 0 | 9 | 11 | 11 | 12 | 9 | 12 | 2,49 | 2,01 | 2,01 | 2,97 | 9 | 11 | 5,55 |

Roszieg problemi sonuçları devamı-1

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 30 | 0,95 | d | 9 | 13 | 0 | 9 | 10 | 10 | 10 | 9 | 10 | 0,05 | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 9 | 10 | 0,44 |
| 30 | 0,95 | r | 9 | 13 | 0 | 9 | 11 | 11 | 11 | 9 | 12 | 0,68 | 1,97 | 1,97 | 1,95 | 10 | 12 | 1,34 |
| 30 | 0,95 | y | 9 | 13 | 0 | 10 | 13 | 13 | 13 | 10 | 13 | 1,33 | 1,11 | 1,11 | 1,11 | 10 | 12 | 2,91 |
| 32 | 0,85 | d | 9 | 13 | 0 | 8 | 9 | 9 | 9 | 8 | 9 | 1,94 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 8 | 9 | 1,10 |
| 32 | 0,85 | r | 9 | 13 | 0 | 9 | 10 | 10 | 10 | 9 | 10 | 7,18 | 3,38 | 3,38 | 3,44 | 9 | 10 | 4,03 |
| 32 | 0,85 | y | 9 | 13 | 0 | 9 | 10 | 10 | 10 | 9 | 11 | 3,91 | 6,6 | 6,6 | 6,6 | 9 | 10 | 5,23 |
| 32 | 0,90 | d | 9 | 13 | 0 | 8 | 9 | 9 | 9 | 8 | 9 | 0,4 | 0,21 | 0,21 | 0,2 | 8 | 9 | 1,04 |
| 32 | 0,90 | r | 9 | 13 | 0 | 9 | 10 | 10 | 10 | 9 | 10 | 4,85 | 3,27 | 3,27 | 3,34 | 9 | 10 | 3,87 |
| 32 | 0,90 | y | 9 | 13 | 0 | 9 | 11 | 11 | 11 | 9 | 11 | 3,83 | 2,85 | 2,85 | 3,06 | 9 | 11 | 2,57 |
| 32 | 0,95 | d | 9 | 0 | 0 | 8 | 9 | 9 | 9 | 8 | 9 | 0,39 | 0,19 | 0,19 | 0,2 | 9 | 9 | 0,98 |
| 32 | 0,95 | r | 9 | 0 | 0 | 9 | 11 | 11 | 11 | 9 | 11 | 0,48 | 0,45 | 0,45 | 0,46 | 9 | 11 | 1,24 |
| 32 | 0,95 | y | 9 | 15 | 0 | 9 | 12 | 12 | 12 | 9 | 12 | 1,19 | 0,76 | 0,76 | 1,24 | 9 | 11 | 2,68 |
| 33 | 0,85 | d | 9 | 12 | 0 | 8 | 9 | 9 | 9 | 8 | 9 | 0,68 | 0,11 | 0,11 | 0,1 | 8 | 9 | 0,70 |
| 33 | 0,85 | r | 9 | 12 | 0 | 8 | 9 | 9 | 9 | 8 | 10 | 4,08 | 6,43 | 6,43 | 6,32 | 8 | 10 | 3,06 |
| 33 | 0,85 | y | 9 | 12 | 0 | 9 | 10 | 10 | 10 | 9 | 10 | 5,58 | 4,5 | 4,5 | 4,83 | 9 | 10 | 4,07 |
| 33 | 0,90 | d | 9 | 13 | 0 | 8 | 9 | 9 | 9 | 8 | 9 | 0,46 | 0,07 | 0,07 | 0,05 | 8 | 9 | 0,47 |
| 33 | 0,90 | r | 9 | 13 | 0 | 9 | 10 | 10 | 10 | 9 | 10 | 3,42 | 2,09 | 2,09 | 2,18 | 9 | 10 | 2,44 |
| 33 | 0,90 | y | 9 | 13 | 0 | 9 | 10 | 10 | 10 | 9 | 11 | 2,68 | 5,23 | 5,23 | 6,46 | 9 | 10 | 4,24 |
| 33 | 0,95 | d | 9 | 0 | 0 | 8 | 9 | 9 | 9 | 8 | 9 | 0,45 | 0,06 | 0,06 | 0,05 | 8 | 9 | 0,42 |
| 33 | 0,95 | r | 9 | 0 | 0 | 9 | 10 | 10 | 10 | 9 | 10 | 2,79 | 1,61 | 1,61 | 2,18 | 9 | 11 | 0,85 |
| 33 | 0,95 | y | 9 | 17 | 0 | 9 | 11 | 11 | 11 | 9 | 12 | 1,53 | 1,72 | 1,72 | 1,75 | 9 | 11 | 1,58 |
| 38 | 0,85 | d | 7 | 9 | 0 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 8 | 3,06 | 5,15 | 5,15 | 4,88 | 7 | 8 | 0,70 |
| 38 | 0,85 | r | 7 | 9 | 0 | 7 | 8 | 8 | 8 | 7 | 9 | 3,66 | 2,88 | 2,88 | 2,87 | 7 | 8 | 4,09 |
| 38 | 0,85 | y | 7 | 9 | 0 | 7 | 9 | 9 | 9 | 7 | 9 | 4,22 | 3,37 | 3,37 | 3,49 | 7 | 8 | 6,49 |
| 38 | 0,90 | d | 7 | 9 | 0 | 7 | 8 | 8 | 8 | 7 | 8 | 3,06 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 7 | 8 | 0,33 |
| 38 | 0,90 | r | 7 | 9 | 0 | 7 | 8 | 8 | 8 | 7 | 9 | 2,64 | 3,6 | 3,6 | 4,03 | 8 | 9 | 1,16 |
| 38 | 0,90 | y | 7 | 9 | 0 | 8 | 9 | 9 | 9 | 8 | 9 | 4,08 | 2,93 | 2,93 | 2,93 | 8 | 9 | 1,87 |
| 38 | 0,95 | d | 8 | 10 | 0 | 7 | 8 | 8 | 8 | 7 | 8 | 0,64 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 7 | 8 | 0,18 |
| 38 | 0,95 | r | 8 | 10 | 0 | 8 | 9 | 9 | 9 | 8 | 9 | 0,86 | 0,49 | 0,49 | 0,49 | 8 | 9 | 0,92 |
| 38 | 0,95 | y | 8 | 13 | 0 | 8 | 9 | 9 | 9 | 8 | 10 | 1,28 | 2,82 | 2,82 | 3,3 | 8 | 9 | 1,95 |
| 46 | 0,85 | d | 8 | 10 | 0 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 7 | 1,42 | 0,93 | 0,93 | 1,54 | 6 | 6 | 1,07 |

Roszieg problemi sonuçları devamı-2

| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 46 | 0,85 | r | 8 | 12 | 0 | 6 | 7 | 7 | 7 | 6 | 7 | 4,01 | 2,26 | 2,26 | 2,26 | 6 | 7 | 1,65 |
| 46 | 0,85 | y | 6 | 7 | 7 | 6 | 7 | 7 | 7 | 6 | 7 | 8,73 | 5,11 | 5,11 | 5,06 | 6 | 7 | 2,33 |
| 46 | 0,90 | d | 6 | 7 | 7 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 7 | 1,42 | 0,93 | 0,93 | 1,3 | 6 | 6 | 1,07 |
| 46 | 0,90 | r | 6 | 7 | 7 | 6 | 7 | 7 | 7 | 6 | 7 | 4,01 | 2,06 | 2,06 | 2,04 | 6 | 7 | 1,25 |
| 46 | 0,90 | y | 6 | 7 | 7 | 6 | 7 | 7 | 7 | 6 | 7 | 5,6 | 3,6 | 3,6 | 3,71 | 6 | 7 | 2,20 |
| 46 | 0,95 | d | 6 | 7 | 7 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 7 | 0,59 | 0,93 | 0,93 | 0,92 | 6 | 7 | 0,10 |
| 46 | 0,95 | r | 6 | 7 | 7 | 6 | 7 | 7 | 7 | 6 | 8 | 1,78 | 0,93 | 0,93 | 0,95 | 6 | 7 | 1,19 |
| 46 | 0,95 | y | 6 | 7 | 7 | 7 | 8 | 8 | 8 | 7 | 8 | 0,73 | 0,45 | 0,45 | 0,44 | 7 | 8 | 0,68 |

Sawyer Problemi

| | | | Mat. Prog. Çözümü İstasyon Sayısı | | | Sezgisel Yaklaşım İstasyon Sayısı | | | | Maliyete Yönelik Sezgisel | | | | | | Üst Sezgisel Yaklaşım | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | | | | İstasyon Sayısı | | Tamamlanmama Maliyeti | | | | | | |
| c | 1-α | cv | Kmin | DYM sonuc | DDM sonuc | Kmin | r | c* | cv | Kmin | Bulunan | MYS | r | C* | cv | Kmin | Bulunan İst. Say. | Tamamlanma Maliyeti |
| 46 | 0,85 | d | 15 | 16 | 0* | 15 | 16 | 16 | 16 | 15 | 16 | 7,01 | 6,91 | 6,91 | 6,35 | 15 | 16 | 8,79 |
| 46 | 0,85 | r | 15 | 17 | 0* | 15 | 18 | 18 | 18 | 15 | 18 | 6,16 | 12,48 | 12,48 | 12,63 | 15 | 18 | 15,23 |
| 46 | 0,85 | y | 15 | 0 | 0* | 15 | 19 | 19 | 19 | 15 | 20 | 10,84 | 14,49 | 14,49 | 14,19 | 15 | 19 | 24,56 |
| 46 | 0,90 | d | 15 | 24 | 0* | 15 | 16 | 16 | 16 | 15 | 17 | 1,48 | 2,01 | 2,01 | 1,88 | 15 | 16 | 10,19 |
| 46 | 0,90 | r | 15 | 24 | 0* | 15 | 19 | 19 | 19 | 15 | 19 | 5,45 | 6,32 | 6,32 | 5,62 | 15 | 19 | 9,13 |
| 46 | 0,90 | y | 15 | 24 | 0* | 15 | 21 | 21 | 21 | 15 | 21 | 6,96 | 6,41 | 6,41 | 6,5 | 15 | 20 | 18,98 |
| 46 | 0,95 | d | 16 | 26 | 0* | 15 | 17 | 17 | 17 | 15 | 17 | 1,49 | 1,92 | 1,92 | 1,45 | 15 | 17 | 2,45 |
| 46 | 0,95 | r | 16 | 26 | 0* | 16 | 23 | 23 | 23 | 16 | 23 | 3,26 | 3,34 | 3,34 | 3,37 | 15 | 20 | 5,24 |
| 46 | 0,95 | y | 16 | 26 | 0* | 16 | 23 | 23 | 23 | 16 | 23 | 3,26 | 3,34 | 3,34 | 3,37 | 16 | 22 | 9,50 |
| 50 | 0,85 | d | | | | 13 | 15 | 15 | 15 | 13 | 15 | 3,47 | 4,7 | 4,7 | 2,46 | 13 | 15 | 5,59 |

Sawyer problemi sonuçları devamı-1

| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 50 | 0,85 | r | | | | 14 | 17 | 17 | 17 | 14 | 17 | 7,55 | 6,99 | 6,99 | 5,76 | 14 | 16 | 17,50 |
| 50 | 0,85 | y | | | | 14 | 18 | 18 | 18 | 14 | 18 | 9,32 | 10,5 | 10,5 | 10,86 | 14 | 17 | 24,99 |
| 50 | 0,90 | d | | | | 14 | 15 | 15 | 15 | 14 | 15 | 4,33 | 4,25 | 4,25 | 4,25 | 14 | 15 | 4,24 |
| 50 | 0,90 | r | | | | 14 | 18 | 18 | 18 | 14 | 18 | 4,1 | 4,6 | 4,6 | 3,83 | 14 | 17 | 8,70 |
| 50 | 0,90 | y | | | | 14 | 19 | 19 | 19 | 14 | 19 | 6,99 | 6,88 | 6,88 | 7,16 | 14 | 18 | 18,90 |
| 50 | 0,95 | d | | | | 14 | 16 | 16 | 16 | 14 | 16 | 0,53 | 0,92 | 0,92 | 0,57 | 14 | 15 | 0,97 |
| 50 | 0,95 | r | | | | 14 | 19 | 19 | 19 | 14 | 19 | 1,85 | 1,91 | 1,91 | 1,73 | 14 | 18 | 5,14 |
| 50 | 0,95 | y | | | | 15 | 21 | 21 | 21 | 15 | 21 | 2,66 | 2,74 | 2,74 | 2,71 | 15 | 20 | 7,17 |
| 55 | 0,85 | d | | | | 12 | 14 | 14 | 14 | 12 | 14 | 1,1 | 2,87 | 2,87 | 1,87 | 12 | 13 | 9,22 |
| 55 | 0,85 | r | | | | 13 | 15 | 15 | 15 | 13 | 15 | 10,14 | 8,78 | 8,78 | 8,4 | 13 | 14 | 10,96 |
| 55 | 0,85 | y | | | | 13 | 16 | 16 | 16 | 13 | 16 | 12,96 | 11,32 | 11,32 | 10,45 | 13 | 15 | 26,38 |
| 55 | 0,90 | d | | | | 12 | 14 | 14 | 14 | 12 | 14 | 1,1 | 1,7 | 1,7 | 1,96 | 12 | 13 | 2,20 |
| 55 | 0,90 | r | | | | 13 | 15 | 15 | 16 | 13 | 16 | 4,59 | 4,68 | 4,68 | 4,18 | 13 | 15 | 10,10 |
| 55 | 0,90 | y | | | | 13 | 17 | 17 | 17 | 13 | 17 | 6,08 | 5,78 | 5,78 | 6,64 | 13 | 16 | 16,14 |
| 55 | 0,95 | d | | | | 12 | 14 | 14 | 14 | 12 | 14 | 1,04 | 1,58 | 1,58 | 1,24 | 12 | 14 | 1,75 |
| 55 | 0,95 | r | | | | 13 | 17 | 17 | 17 | 13 | 17 | 2,02 | 1,84 | 1,84 | 1,77 | 13 | 16 | 4,59 |
| 55 | 0,95 | y | | | | 13 | 19 | 19 | 19 | 13 | 19 | 2,27 | 2,71 | 2,71 | 2,52 | 13 | 18 | 5,82 |
| 66 | 0,85 | d | 11 | 15 | 0* | 10 | 11 | 11 | 11 | 10 | 11 | 4,24 | 3,81 | 3,81 | 3,37 | 10 | 11 | 3,94 |
| 66 | 0,85 | r | 11 | 15 | 0* | 11 | 12 | 12 | 12 | 11 | 12 | 8,36 | 8,26 | 8,26 | 7,57 | 11 | 12 | 8,86 |
| 66 | 0,85 | y | 11 | 15 | 0* | 11 | 13 | 13 | 13 | 11 | 13 | 10,23 | 9,53 | 9,53 | 9,17 | 11 | 13 | 11,22 |
| 66 | 0,90 | d | 11 | 16 | 0* | 10 | 11 | 11 | 11 | 10 | 11 | 6,24 | 5,24 | 5,24 | 4,53 | 10 | 11 | 3,73 |
| 66 | 0,90 | r | 11 | 16 | 0* | 11 | 13 | 13 | 13 | 11 | 13 | 5,6 | 5,02 | 5,02 | 4,37 | 11 | 12 | 9,36 |
| 66 | 0,90 | y | 11 | 16 | 0* | 11 | 14 | 14 | 14 | 11 | 14 | 7,49 | 6,37 | 6,37 | 5,92 | 11 | 13 | 10,95 |

Sawyer problemi sonuçları devamı-2

| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 66 | 0,95 | d | 11 | 18 | 0* | 10 | 12 | 12 | 12 | 10 | 12 | 0,3 | 0,33 | 0,33 | 0,21 | 10 | 11 | 4,91 |
| 66 | 0,95 | r | 11 | 18 | 0* | 11 | 14 | 14 | 14 | 11 | 14 | 1,51 | 1,78 | 1,78 | 1,84 | 11 | 13 | 3,15 |
| 66 | 0,95 | y | 11 | 18 | 0* | 11 | 15 | 15 | 15 | 11 | 15 | 3 | 2,74 | 2,74 | 2,77 | 11 | 14 | 5,82 |
| 75 | 0,85 | d | | | | 9 | 10 | 10 | 10 | 9 | 10 | 4,42 | 1,36 | 1,36 | 1,34 | 9 | 10 | 2,38 |
| 75 | 0,85 | r | | | | 9 | 11 | 11 | 10 | 9 | 11 | 7,63 | 5,58 | 5,58 | 4,95 | 9 | 10 | 14,03 |
| 75 | 0,85 | y | | | | 10 | 11 | 11 | 11 | 10 | 11 | 12,23 | 11,33 | 11,33 | 11,54 | 10 | 11 | 11,41 |
| 75 | 0,90 | d | | | | 9 | 10 | 10 | 10 | 9 | 10 | 1,21 | 1,32 | 1,32 | 0,9 | 9 | 10 | 1,30 |
| 75 | 0,90 | r | | | | 10 | 11 | 11 | 11 | 10 | 11 | 6,8 | 4,63 | 4,63 | 4,1 | 9 | 11 | 4,08 |
| 75 | 0,90 | y | | | | 10 | 12 | 12 | 12 | 10 | 12 | 5,09 | 5,15 | 5,15 | 5,04 | 10 | 11 | 11,57 |
| 75 | 0,95 | d | | | | 9 | 10 | 10 | 10 | 9 | 10 | 1,02 | 0,95 | 0,95 | 0,77 | 9 | 10 | 0,98 |
| 75 | 0,95 | r | | | | 10 | 12 | 12 | 12 | 10 | 12 | 2,17 | 2,01 | 2,01 | 1,92 | 10 | 11 | 3,86 |
| 75 | 0,95 | y | | | | 10 | 12 | 12 | 12 | 10 | 12 | 5,09 | 5,38 | 5,38 | 5,27 | 10 | 12 | 4,99 |
| 99 | 0,85 | d | 7 | 8 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 13,23 | 11,50 | 11,50 | 10,66 | 7 | 7 | 3,84 |
| 99 | 0,85 | r | 7 | 8 | 7 | 7 | 8 | 8 | 8 | 7 | 8 | 9,85 | 6,05 | 6,05 | 4,70 | 7 | 8 | 4,76 |
| 99 | 0,85 | y | 7 | 8 | 7 | 7 | 8 | 8 | 8 | 7 | 8 | 13,80 | 12,40 | 12,40 | 12,03 | 8 | 8 | 8,66 |
| 99 | 0,90 | d | 7 | 8 | 0* | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 11,76 | 10,01 | 10,01 | 8,53 | 7 | 7 | 4,43 |
| 99 | 0,90 | r | 7 | 8 | 0* | 7 | 8 | 8 | 8 | 7 | 8 | 7,63 | 4,91 | 4,91 | 4,53 | 7 | 8 | 3,53 |
| 99 | 0,90 | y | 7 | 8 | 0* | 7 | 9 | 9 | 9 | 7 | 9 | 7,23 | 4,31 | 4,31 | 4,12 | 8 | 8 | 9,74 |
| 99 | 0,95 | d | 7 | 8 | 0* | 7 | 8 | 8 | 8 | 7 | 8 | 0,92 | 0,28 | 0,28 | 0,07 | 7 | 8 | 0,18 |
| 99 | 0,95 | r | 7 | 8 | 0* | 7 | 9 | 9 | 9 | 7 | 9 | 1,59 | 1,09 | 1,09 | 0,83 | 7 | 8 | 3,11 |
| 99 | 0,95 | y | 7 | 8 | 0* | 8 | 9 | 9 | 9 | 8 | 9 | 3,35 | 3,26 | 3,26 | 3,19 | 8 | 9 | 2,28 |

Kilbridge Problemi

| | | | Sezgisel Yaklaşım İstasyon Sayısı | | | | Maliyete Yönelik Sezgisel | | | | | | Üst Sezgisel Yaklaşım | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | İstasyon Sayısı | | Tamamlanmama Maliyeti | | | | | | |
| c | 1-α | cv | Kmin | r | c* | cv | Kmin | Bulunan | MYS | r | C* | cv | Kmin | Bulunan İst. Say. | Tamamlanmama Maliyeti |
| 95 | 0,85 | d | 12 | 13 | 13 | 13 | 12 | 13 | 36,39 | 21,18 | 21,18 | 15,19 | 12 | 13 | 7,13 |
| 95 | 0,85 | r | 13 | 14 | 14 | 14 | 13 | 14 | 50,51 | 48,75 | 47,22 | 40,34 | 13 | 14 | 17,06 |
| 95 | 0,85 | y | 13 | 15 | 15 | 15 | 13 | 15 | 46,11 | 43,97 | 43,97 | 44,75 | 13 | 15 | 24,69 |
| 95 | 0,90 | d | 12 | 13 | 13 | 13 | 12 | 13 | 18,80 | 18,55 | 18,55 | 14,09 | 12 | 13 | 6,48 |
| 95 | 0,90 | r | 13 | 15 | 15 | 15 | 13 | 15 | 25,50 | 21,38 | 21,38 | 15,80 | 13 | 14 | 17,15 |
| 95 | 0,90 | y | 13 | 16 | 16 | 16 | 13 | 16 | 29,89 | 27,41 | 25,93 | 23,22 | 13 | 16 | 17,99 |
| 95 | 0,95 | d | 12 | 14 | 14 | 14 | 12 | 14 | 6,12 | 2,91 | 2,70 | 1,87 | 12 | 14 | 1,52 |
| 95 | 0,95 | r | 13 | 16 | 16 | 16 | 13 | 16 | 14,03 | 9,14 | 9,14 | 7,07 | 13 | 15 | 7,16 |
| 95 | 0,95 | y | 13 | 17 | 17 | 17 | 13 | 17 | 14,65 | 13,07 | 13,07 | 12,04 | 13 | 17 | 12,51 |
| 132 | 0,85 | d | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 77,69 | 53,23 | 53,23 | 45,41 | 9 | 9 | 7,89 |
| 132 | 0,85 | r | 9 | 10 | 10 | 10 | 9 | 10 | 54,24 | 37,56 | 37,56 | 26,7 | 9 | 10 | 8,96 |
| 132 | 0,85 | y | 9 | 10 | 10 | 10 | 9 | 11 | 57,27 | 44,46 | 43,79 | 37,38 | 9 | 10 | 21,40 |
| 132 | 0,90 | d | 9 | 10 | 10 | 10 | 9 | 10 | 18,5 | 3,88 | 3,88 | 3,23 | 9 | 10 | 2,39 |
| 132 | 0,90 | r | 9 | 10 | 10 | 10 | 9 | 10 | 50,89 | 41,51 | 41,51 | 36,54 | 9 | 10 | 7,34 |
| 132 | 0,90 | y | 9 | 11 | 11 | 11 | 9 | 11 | 34,26 | 26,96 | 26,96 | 20,25 | 9 | 11 | 8,65 |
| 132 | 0,95 | d | 9 | 10 | 10 | 10 | 9 | 10 | 11,58 | 2,01 | 2,01 | 1,32 | 9 | 10 | 1,07 |
| 132 | 0,95 | r | 9 | 11 | 11 | 11 | 9 | 11 | 16,82 | 9,04 | 9,04 | 6,18 | 9 | 11 | 2,74 |
| 132 | 0,95 | y | 10 | 12 | 12 | 12 | 10 | 12 | 16,87 | 9,66 | 9,66 | 7,96 | 10 | 12 | 3,68 |

Kilbridge problemi sonuçları devamı-1

| | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 153 | 0,85 | d | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 33,56 | 36,42 | 36,42 | 29,26 | 8 | 8 | 3,51 |
| 153 | 0,85 | r | 8 | 9 | 9 | 9 | 8 | 9 | 48,99 | 32,08 | 32,08 | 18,93 | 8 | 9 | 9,14 |
| 153 | 0,85 | y | 8 | 9 | 9 | 9 | 8 | 9 | 61,33 | 41,63 | 41,63 | 33,85 | 8 | 9 | 10,91 |
| 153 | 0,90 | d | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 26,79 | 22 | 22 | 22,47 | 8 | 8 | 2,70 |
| 153 | 0,90 | r | 8 | 9 | 9 | 9 | 8 | 9 | 38,52 | 21,07 | 21,07 | 13,75 | 8 | 9 | 5,13 |
| 153 | 0,90 | y | 8 | 9 | 9 | 9 | 8 | 9 | 51,77 | 37,93 | 37,93 | 33,99 | 8 | 9 | 8,94 |
| 153 | 0,95 | d | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 11,66 | 14,27 | 14,27 | 12,08 | 8 | 8 | 1,97 |
| 153 | 0,95 | r | 8 | 9 | 9 | 9 | 8 | 9 | 23,16 | 14,74 | 13,22 | 10,81 | 8 | 9 | 2,45 |
| 153 | 0,95 | y | 8 | 10 | 10 | 10 | 8 | 10 | 22,1 | 10,72 | 10,72 | 8,88 | 8 | 10 | 3,16 |
| 183 | 0,85 | d | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 31,17 | 43,98 | 43,98 | 15,64 | 7 | 7 | 2,29 |
| 183 | 0,85 | r | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 57,77 | 66,32 | 66,32 | 66,47 | 7 | 7 | 6,93 |
| 183 | 0,85 | y | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 8 | 65,83 | 38,49 | 38,49 | 83,36 | 7 | 7 | 15,41 |
| 183 | 0,90 | d | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 27,11 | 23,99 | 23,99 | 14,96 | 7 | 7 | 1,80 |
| 183 | 0,90 | r | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 8 | 43,13 | 49,07 | 49,07 | 47,92 | 7 | 7 | 5,14 |
| 183 | 0,90 | y | 7 | 8 | 8 | 8 | 7 | 8 | 36,83 | 25,1 | 24,23 | 16,88 | 7 | 8 | 5,61 |
| 183 | 0,95 | d | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 13,11 | 13,24 | 13,24 | 4,8 | 7 | 7 | 0,65 |
| 183 | 0,95 | r | 7 | 8 | 8 | 8 | 7 | 8 | 20,96 | 7,97 | 7,97 | 3,15 | 7 | 8 | 1,61 |
| 183 | 0,95 | y | 7 | 8 | 8 | 8 | 7 | 8 | 20,08 | 12,85 | 12,8 | 10,33 | 7 | 8 | 2,84 |
| 230 | 0,85 | d | 5 | 6 | 6 | 6 | 5 | 6 | 49,37 | 8,28 | 8,28 | 3,72 | 5 | 6 | 2,30 |
| 230 | 0,85 | r | 5 | 6 | 6 | 6 | 5 | 6 | 67,25 | 31,56 | 31,56 | 15,6 | 5 | 6 | 5,30 |
| 230 | 0,85 | y | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 69,41 | 70,62 | 70,62 | 70,4 | 6 | 6 | 7,01 |

| Kilbridge problemi sonuçları devamı-2 | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 230 | 0,90 | d | 5 | 6 | 6 | 6 | 5 | 6 | 44,05 | 4,7 | 4,7 | 2,11 | 5 | 6 | 1,40 |
| 230 | 0,90 | r | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 47,15 | 42,71 | 42,71 | 28,55 | 6 | 6 | 3,17 |
| 230 | 0,90 | y | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 45,66 | 45,85 | 45,85 | 49,17 | 6 | 6 | 4,48 |
| 230 | 0,95 | d | 5 | 6 | 6 | 6 | 5 | 6 | 13,99 | 1,82 | 1,63 | 0,25 | 5 | 6 | 0,69 |
| 230 | 0,95 | r | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 27,53 | 18,54 | 18,22 | 13,69 | 6 | 6 | 1,51 |
| 230 | 0,95 | y | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 7 | 24,69 | 23,05 | 23,05 | 23,25 | 6 | 6 | 2,84 |
| 307 | 0,85 | d | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 5 | 63,39 | 56,39 | 51,17 | 13,51 | 4 | 4 | 1,57 |
| 307 | 0,85 | r | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 5 | 79,9 | 71,3 | 71,3 | 61,21 | 4 | 4 | 3,63 |
| 307 | 0,85 | y | 4 | 5 | 5 | 5 | 4 | 5 | 72,82 | 37,44 | 37,44 | 34,47 | 4 | 5 | 5,11 |
| 307 | 0,90 | d | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 5 | 31,85 | 33,19 | 33,19 | 13,51 | 4 | 4 | 0,80 |
| 307 | 0,90 | r | 4 | 5 | 5 | 4 | 4 | 5 | 44,66 | 20,87 | 20,65 | 58 | 4 | 4 | 3,35 |
| 307 | 0,90 | y | 4 | 5 | 5 | 5 | 4 | 5 | 52,45 | 19,03 | 19,03 | 22,4 | 4 | 5 | 3,56 |
| 307 | 0,95 | d | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 5 | 23,24 | 10,87 | 10,87 | 5,2 | 4 | 4 | 0,36 |
| 307 | 0,95 | r | 4 | 5 | 5 | 5 | 4 | 5 | 21,75 | 6,41 | 6,41 | 3,41 | 4 | 5 | 1,18 |
| 307 | 0,95 | y | 4 | 5 | 5 | 5 | 4 | 5 | 22,66 | 10,22 | 10,22 | 8,31 | 4 | 5 | 1,25 |

Hahn Problemi

| | | | Sezgisel Yaklaşım İstasyon Sayısı | | | | Maliyete Yönelik Sezgisel | | | | | | Üst Sezgisel Yaklaşım | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | İstasyon Sayısı | | Tamamlanmama Maliyeti | | | | | | |
| c | 1-α | cv | Kmin | r | c* | cv | Kmin | Bulunan | MYS | r | C* | cv | Kmin | Bulunan İst. Say. | Tamamlanmama Maliyeti |
| 2806 | 0,85 | d | 10 | 11 | 11 | 11 | 10 | 11 | 24309,37 | 24368,61 | 24368,61 | 16630,53 | 10 | 11 | 157,58 |
| 2806 | 0,85 | r | 11 | 13 | 13 | 13 | 11 | 14 | 50555,71 | 43664,87 | 43664,87 | 45133,59 | 10 | 11 | 764,76 |
| 2806 | 0,85 | y | 11 | 13 | 13 | 13 | 11 | 14 | 50555,71 | 43664,87 | 43664,87 | 45133,59 | 11 | 12 | 814,90 |
| 2806 | 0,90 | d | 10 | 11 | 11 | 11 | 10 | 11 | 24128,24 | 14305,99 | 14305,99 | 14954,04 | 10 | 11 | 152,20 |
| 2806 | 0,90 | r | 11 | 13 | 13 | 14 | 11 | 14 | 29839,46 | 29814,31 | 29814,31 | 29097,85 | 11 | 12 | 220,33 |
| 2806 | 0,90 | y | 11 | 13 | 13 | 14 | 11 | 14 | 29839,46 | 29814,31 | 29814,31 | 29097,85 | 11 | 13 | 562,95 |
| 2806 | 0,95 | d | 10 | 11 | 11 | 11 | 10 | 11 | 11394,82 | 8653,09 | 8653,09 | 8534,25 | 10 | 12 | 63,94 |
| 2806 | 0,95 | r | 11 | 15 | 15 | 15 | 11 | 15 | 17130,55 | 11022,50 | 11022,50 | 10989,76 | 11 | 12 | 225,38 |
| 2806 | 0,95 | y | 11 | 15 | 15 | 15 | 11 | 15 | 17130,55 | 11022,50 | 11022,50 | 10989,76 | 11 | 14 | 482,66 |
| 3157 | 0,85 | d | 9 | 10 | 10 | 10 | 9 | 10 | 28750,78 | 2948,28 | 2948,28 | 2948,28 | 9 | 10 | 112,22 |
| 3157 | 0,85 | r | 9 | 11 | 11 | 11 | 9 | 11 | 49668,82 | 23220,11 | 23220,11 | 23456,43 | 9 | 10 | 195,54 |
| 3157 | 0,85 | y | 9 | 11 | 11 | 11 | 9 | 12 | 39136,08 | 37754,44 | 37754,44 | 37725,06 | 9 | 11 | 369,36 |
| 3157 | 0,90 | d | 9 | 10 | 10 | 10 | 9 | 10 | 28594,83 | 4235,67 | 4235,67 | 4235,67 | 9 | 10 | 78,29 |
| 3157 | 0,90 | r | 9 | 12 | 12 | 12 | 9 | 12 | 29490,69 | 12856,87 | 12856,87 | 14576,47 | 9 | 10 | 277,71 |
| 3157 | 0,90 | y | 10 | 11 | 11 | 11 | 10 | 11 | 59663,86 | 53633,36 | 53633,36 | 52929,67 | 10 | 11 | 468,18 |
| 3157 | 0,95 | d | 9 | 10 | 10 | 10 | 9 | 10 | 9208,36 | 3614,03 | 3614,03 | 3416,36 | 9 | 10 | 47,42 |
| 3157 | 0,95 | r | 10 | 13 | 13 | 13 | 10 | 13 | 17015,85 | 13224,92 | 13224,92 | 13331,48 | 10 | 11 | 73,96 |
| 3157 | 0,95 | y | 10 | 13 | 13 | 13 | 10 | 13 | 17015,85 | 13224,92 | 13224,92 | 13331,48 | 10 | 12 | 233,49 |

Hahn problemi sonuçları devamı-1

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 3507 | 0,85 | d | 8 | 9 | 9 | 9 | 8 | 9 | 36966,18 | 6008,20 | 6008,20 | 6735,55 | 8 | 9 | 72,13 |
| 3507 | 0,85 | r | 8 | 9 | 9 | 9 | 8 | 10 | 20066,47 | 71753,99 | 71753,99 | 78299,03 | 8 | 9 | 164,01 |
| 3507 | 0,85 | y | 9 | 10 | 10 | 10 | 9 | 10 | 60988,54 | 31328,95 | 31328,95 | 32247,17 | 9 | 10 | 256,65 |
| 3507 | 0,90 | d | 8 | 9 | 9 | 9 | 8 | 9 | 37297,42 | 4549,30 | 4549,30 | 4757,28 | 8 | 9 | 56,66 |
| 3507 | 0,90 | r | 9 | 10 | 10 | 10 | 9 | 10 | 18539,69 | 12870,29 | 12870,29 | 14603,21 | 9 | 9 | 166,47 |
| 3507 | 0,90 | y | 9 | 10 | 10 | 10 | 9 | 10 | 28184,58 | 24501,48 | 24501,48 | 24214,28 | 9 | 10 | 226,69 |
| 3507 | 0,95 | d | 8 | 9 | 9 | 9 | 8 | 9 | 15722,85 | 2939,64 | 2939,64 | 2778,54 | 8 | 9 | 31,19 |
| 3507 | 0,95 | r | 9 | 11 | 11 | 11 | 9 | 11 | 26245,66 | 11909,98 | 11909,98 | 12646,79 | 9 | 10 | 42,58 |
| 3507 | 0,95 | y | 9 | 11 | 11 | 11 | 9 | 11 | 26245,66 | 11909,98 | 11909,98 | 12646,79 | 9 | 11 | 99,77 |
| 3789 | 0,85 | d | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 92577,75 | 86602,64 | 86602,64 | 51593,15 | 8 | 8 | 86,73 |
| 3789 | 0,85 | r | 8 | 9 | 9 | 9 | 8 | 10 | 7725,96 | 11327,24 | 11327,24 | 9780,64 | 8 | 8 | 259,35 |
| 3789 | 0,85 | y | 8 | 9 | 9 | 9 | 8 | 9 | 38732,11 | 35877,55 | 35877,55 | 36127,94 | 8 | 9 | 226,36 |
| 3789 | 0,90 | d | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 9 | 8460,73 | 46513,70 | 46513,70 | 40305,54 | 8 | 8 | 63,89 |
| 3789 | 0,90 | r | 8 | 9 | 9 | 9 | 8 | 10 | 3777,09 | 10871,03 | 10871,03 | 12868,75 | 8 | 9 | 67,00 |
| 3789 | 0,90 | y | 8 | 9 | 9 | 9 | 8 | 10 | 27606,76 | 50463,83 | 50463,83 | 44980,72 | 8 | 9 | 185,98 |
| 3789 | 0,95 | d | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 9 | 13361,42 | 27012,48 | 27012,48 | 29820,04 | 8 | 8 | 52,23 |
| 3789 | 0,95 | r | 8 | 9 | 9 | 10 | 8 | 10 | 4476,17 | 28049,93 | 28049,93 | 4017,01 | 8 | 9 | 53,05 |
| 3789 | 0,95 | y | 8 | 10 | 10 | 10 | 8 | 10 | 21849,67 | 12053,79 | 12053,79 | 12185,71 | 8 | 10 | 79,44 |
| 4676 | 0,85 | d | 6 | 7 | 7 | 7 | 6 | 7 | 27500,95 | 13139,44 | 13139,44 | 13139,44 | 6 | 7 | 41,55 |
| 4676 | 0,85 | r | 6 | 7 | 7 | 7 | 6 | 7 | 81668,58 | 40948,45 | 40948,45 | 41255,72 | 6 | 7 | 93,63 |
| 4676 | 0,85 | y | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 8 | 17858,40 | 87228,68 | 87228,68 | 89098,58 | 7 | 7 | 216,48 |
| 4676 | 0,90 | d | 6 | 7 | 7 | 7 | 6 | 7 | 23731,41 | 8577,76 | 8577,76 | 8577,76 | 6 | 7 | 33,93 |
| 4676 | 0,90 | r | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 59867,84 | 57787,45 | 57787,45 | 53170,93 | 7 | 7 | 59,69 |

Hahn problemi sonuçları devamı-2

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 4676 | 0,90 | y | 7 | 8 | 8 | 8 | 7 | 8 | 14554,04 | 10937,06 | 10937,06 | 11410,36 | 7 | 7 | 337,44 |
| 4676 | 0,95 | d | 6 | 7 | 7 | 7 | 6 | 7 | 12899,24 | 4003,43 | 4003,43 | 4005,92 | 6 | 7 | 16,17 |
| 4676 | 0,95 | r | 7 | 8 | 8 | 8 | 7 | 8 | 14080,46 | 5361,14 | 5361,14 | 4345,55 | 7 | 7 | 36,30 |
| 4676 | 0,95 | y | 7 | 8 | 8 | 8 | 7 | 8 | 28070,67 | 7341,20 | 7341,20 | 7339,07 | 7 | 8 | 41,05 |
| 4735 | 0,85 | d | 6 | 7 | 7 | 7 | 6 | 7 | 20325,92 | 13392,26 | 13392,26 | 14717,04 | 6 | 6 | 207,63 |
| 4735 | 0,85 | r | 6 | 7 | 7 | 7 | 6 | 7 | 72660,90 | 35014,48 | 35014,48 | 35353,29 | 7 | 7 | 96,99 |
| 4735 | 0,85 | y | 6 | 7 | 7 | 7 | 6 | 8 | 16474,81 | 55454,21 | 55454,21 | 55454,21 | 7 | 7 | 209,52 |
| 4735 | 0,90 | d | 6 | 7 | 7 | 7 | 6 | 7 | 17347,36 | 6872,78 | 6872,78 | 8378,31 | 6 | 7 | 25,82 |
| 4735 | 0,90 | r | 6 | 7 | 7 | 7 | 6 | 7 | 58771,18 | 26658,73 | 26658,73 | 27200,73 | 7 | 7 | 58,48 |
| 4735 | 0,90 | y | 7 | 8 | 8 | 8 | 7 | 8 | 13536,72 | 10658,20 | 10658,20 | 11487,19 | 7 | 7 | 162,73 |
| 4735 | 0,95 | d | 6 | 7 | 7 | 7 | 6 | 7 | 8236,69 | 2018,88 | 2018,88 | 2018,88 | 6 | 7 | 15,43 |
| 4735 | 0,95 | r | 7 | 8 | 8 | 8 | 7 | 8 | 12175,78 | 5084,96 | 5084,96 | 4976,16 | 7 | 7 | 35,08 |
| 4735 | 0,95 | y | 7 | 8 | 8 | 8 | 7 | 8 | 12050,11 | 7127,06 | 7127,06 | 6985,78 | 7 | 8 | 37,59 |
| 6314 | 0,85 | d | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 65068,49 | 47032,85 | 47032,85 | 51113,97 | 5 | 5 | 61,89 |
| 6314 | 0,85 | r | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 6 | 39662,39 | 68780,61 | 68780,61 | 71432,53 | 5 | 5 | 58,22 |
| 6314 | 0,85 | y | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 6 | 89599,64 | 84468,09 | 84468,09 | 84468,09 | 5 | 5 | 107,20 |
| 6314 | 0,90 | d | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 54444,17 | 31693,27 | 31693,27 | 33479,16 | 5 | 5 | 21,01 |
| 6314 | 0,90 | r | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 6 | 32217,48 | 34972,31 | 34972,31 | 53005,23 | 5 | 5 | 37,49 |
| 6314 | 0,90 | y | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 6 | 58837,77 | 64409,54 | 64409,54 | 67708,24 | 5 | 6 | 77,13 |
| 6314 | 0,95 | d | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 27818,61 | 8394,76 | 8394,76 | 13806,99 | 5 | 5 | 10,29 |
| 6314 | 0,95 | r | 5 | 6 | 6 | 6 | 5 | 6 | 24197,49 | 5856,04 | 5856,04 | 5042,66 | 5 | 5 | 25,36 |
| 6314 | 0,95 | y | 5 | 6 | 6 | 6 | 5 | 6 | 6756,93 | 3219,77 | 3219,77 | 3219,77 | 5 | 6 | 30,39 |

Tonge Problemi

| | | | Sezgisel Yaklaşım İstasyon Sayısı | | | | Maliyete Yönelik Sezgisel | | | | | | Üst Sezgisel Yaklaşım | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | İstasyon Sayısı | | Tamamlanmama Maliyeti | | | | | | |
| c | 1-α | cv | Kmin | r | c* | cv | Kmin | Bulunan | MYS | r | C* | cv | Kmin | Bulunan İst. Say. | Tamamlanmama Maliyeti |
| 289 | 0,85 | d | 25 | 28 | 28 | 28 | 25 | 28 | 1219,41 | 1088,35 | 1088,35 | 782,19 | 25,00 | 27 | 83,63 |
| 289 | 0,85 | r | 25 | 30 | 30 | 30 | 25 | 30 | 1231,41 | 1556,63 | 1556,63 | 1440,08 | 25,00 | 29 | 155,88 |
| 289 | 0,85 | y | 26 | 32 | 32 | 32 | 26 | 33 | 1744,01 | 2190,97 | 2190,97 | 2332,99 | 26,00 | 32 | 251,11 |
| 289 | 0,90 | d | 25 | 28 | 28 | 28 | 25 | 29 | 521,27 | 1287,76 | 1287,76 | 1259,60 | 25,00 | 27 | 75,32 |
| 289 | 0,90 | r | 25 | 31 | 31 | 31 | 25 | 32 | 681,00 | 1104,71 | 1104,71 | 915,21 | 25,00 | 30 | 110,51 |
| 289 | 0,90 | y | 26 | 34 | 34 | 34 | 26 | 35 | 1355,09 | 1537,24 | 1537,24 | 1599,38 | 26,00 | 34 | 176,52 |
| 289 | 0,95 | d | 25 | 29 | 29 | 30 | 25 | 30 | 266,96 | 246,23 | 246,23 | 213,30 | 25,00 | 28 | 35,30 |
| 289 | 0,95 | r | 26 | 33 | 33 | 33 | 26 | 33 | 606,82 | 463,78 | 463,78 | 438,17 | 26,00 | 32 | 47,62 |
| 289 | 0,95 | y | 26 | 37 | 37 | 37 | 26 | 38 | 548,76 | 750,47 | 750,47 | 652,72 | 26,00 | 37 | 107,76 |
| 304 | 0,85 | d | 24 | 26 | 26 | 26 | 24 | 26 | 1054,49 | 1687,55 | 1687,55 | 1518,34 | 24,00 | 25 | 60,37 |
| 304 | 0,85 | r | 24 | 28 | 28 | 28 | 24 | 28 | 1238,30 | 1992,21 | 1992,21 | 1767,64 | 24,00 | 27 | 209,14 |
| 304 | 0,85 | y | 24 | 30 | 30 | 30 | 24 | 31 | 2134,74 | 2552,21 | 2552,21 | 2304,24 | 24,00 | 30 | 251,40 |
| 304 | 0,90 | d | 24 | 27 | 27 | 27 | 24 | 27 | 826,95 | 709,61 | 709,61 | 585,25 | 24,00 | 26 | 54,44 |
| 304 | 0,90 | r | 24 | 30 | 30 | 30 | 24 | 30 | 967,68 | 943,17 | 943,17 | 768,70 | 24,00 | 28 | 81,59 |
| 304 | 0,90 | y | 25 | 32 | 32 | 32 | 25 | 33 | 1113,54 | 1413,06 | 1413,06 | 1249,39 | 25,00 | 32 | 162,71 |
| 304 | 0,95 | d | 24 | 28 | 28 | 28 | 24 | 28 | 335,96 | 298,31 | 298,31 | 267,11 | 24,00 | 27 | 20,96 |
| 304 | 0,95 | r | 25 | 31 | 31 | 31 | 25 | 32 | 350,00 | 567,14 | 567,14 | 593,76 | 24,00 | 30 | 51,31 |
| 304 | 0,95 | y | 25 | 35 | 35 | 35 | 25 | 36 | 563,05 | 696,23 | 696,23 | 661,04 | 25,00 | 35 | 88,85 |
| 374 | 0,85 | d | 19 | 21 | 21 | 21 | 19 | 21 | 1189,29 | 1333,58 | 1333,58 | 952,51 | 19,00 | 21 | 50,82 |
| 374 | 0,85 | r | 20 | 22 | 22 | 23 | 20 | 23 | 1173,95 | 2689,27 | 2689,27 | 790,37 | 20,00 | 22 | 107,58 |

Tonge problemi sonuçları devamı-1

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 374 | 0,85 | y | 20 | 24 | 24 | 24 | 20 | 24 | 2390,17 | 1913,14 | 1913,14 | 1656,21 | 20,00 | 24 | 156,41 |
| 374 | 0,90 | d | 19 | 21 | 21 | 22 | 19 | 22 | 752,11 | 456,54 | 456,54 | 358,88 | 19,00 | 21 | 34,16 |
| 374 | 0,90 | r | 20 | 23 | 23 | 23 | 20 | 24 | 867,14 | 1326,10 | 1326,10 | 1255,81 | 20,00 | 23 | 64,70 |
| 374 | 0,90 | y | 20 | 25 | 25 | 25 | 20 | 26 | 907,47 | 1427,77 | 1427,77 | 1346,90 | 20,00 | 25 | 122,18 |
| 374 | 0,95 | d | 20 | 22 | 22 | 22 | 20 | 22 | 403,91 | 416,55 | 416,55 | 408,98 | 19,00 | 21 | 41,89 |
| 374 | 0,95 | r | 20 | 25 | 25 | 25 | 20 | 25 | 355,85 | 340,38 | 340,38 | 308,87 | 20,00 | 24 | 30,16 |
| 374 | 0,95 | y | 20 | 27 | 27 | 27 | 20 | 28 | 485,05 | 680,78 | 680,78 | 659,38 | 20,00 | 27 | 59,58 |
| 423 | 0,85 | d | 17 | 18 | 18 | 19 | 17 | 19 | 936,98 | 801,59 | 801,59 | 433,98 | 17,00 | 18 | 50,54 |
| 423 | 0,85 | r | 17 | 20 | 20 | 20 | 17 | 20 | 1374,61 | 1186,57 | 1186,57 | 1063,33 | 17,00 | 19 | 113,67 |
| 423 | 0,85 | y | 18 | 21 | 21 | 21 | 18 | 21 | 2200,18 | 1820,91 | 1820,91 | 1805,93 | 18,00 | 21 | 141,14 |
| 423 | 0,90 | d | 17 | 19 | 19 | 19 | 17 | 19 | 926,29 | 566,04 | 566,04 | 371,53 | 17,00 | 18 | 56,49 |
| 423 | 0,90 | r | 18 | 20 | 20 | 20 | 18 | 21 | 749,09 | 1427,67 | 1427,67 | 1261,25 | 17,00 | 20 | 56,55 |
| 423 | 0,90 | y | 18 | 22 | 22 | 22 | 18 | 22 | 1385,64 | 1199,82 | 1199,82 | 1018,71 | 18,00 | 22 | 90,80 |
| 423 | 0,95 | d | 17 | 19 | 19 | 20 | 17 | 20 | 344,60 | 775,26 | 775,26 | 94,63 | 17,00 | 19 | 11,96 |
| 423 | 0,95 | r | 18 | 21 | 21 | 21 | 18 | 21 | 638,05 | 748,27 | 748,27 | 672,88 | 18,00 | 21 | 26,54 |
| 423 | 0,95 | y | 18 | 23 | 23 | 23 | 18 | 24 | 577,17 | 904,25 | 904,25 | 837,26 | 18,00 | 23 | 43,11 |
| 488 | 0,85 | d | 15 | 16 | 16 | 16 | 15 | 16 | 1310,37 | 1000,10 | 1000,10 | 689,94 | 15,00 | 16 | 36,06 |
| 488 | 0,85 | r | 15 | 17 | 17 | 17 | 15 | 17 | 1585,23 | 1287,19 | 1287,19 | 996,41 | 15,00 | 17 | 68,17 |
| 488 | 0,85 | y | 15 | 18 | 18 | 18 | 15 | 18 | 2000,19 | 1743,76 | 1743,76 | 1501,85 | 15,00 | 18 | 110,61 |
| 488 | 0,90 | d | 15 | 16 | 16 | 16 | 15 | 16 | 1044,83 | 944,43 | 944,43 | 835,71 | 15,00 | 16 | 22,93 |
| 488 | 0,90 | r | 15 | 17 | 17 | 18 | 15 | 18 | 852,38 | 1658,85 | 1658,85 | 385,45 | 15,00 | 17 | 49,41 |
| 488 | 0,90 | y | 15 | 19 | 19 | 19 | 15 | 19 | 1071,51 | 1056,63 | 1056,63 | 806,55 | 16,00 | 19 | 71,06 |
| 488 | 0,95 | d | 15 | 17 | 17 | 17 | 15 | 17 | 365,60 | 179,20 | 179,20 | 122,95 | 15,00 | 16 | 17,09 |
| 488 | 0,95 | r | 15 | 18 | 18 | 18 | 15 | 18 | 664,90 | 554,05 | 554,05 | 438,64 | 15,00 | 18 | 20,75 |
| 488 | 0,95 | y | 16 | 20 | 20 | 20 | 16 | 20 | 602,39 | 489,71 | 489,71 | 433,03 | 16,00 | 20 | 38,08 |

| Tonge problemi sonuçları devamı-2 | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 529 | 0,85 | d | 14 | 15 | 15 | 15 | 14 | 15 | 1381,95 | 727,66 | 727,66 | 465,45 | 14,00 | 14 | 80,21 |
| 529 | 0,85 | r | 14 | 15 | 15 | 16 | 14 | 16 | 1370,81 | 1245,92 | 1245,92 | 822,75 | 14,00 | 15 | 77,32 |
| 529 | 0,85 | y | 14 | 16 | 16 | 16 | 14 | 16 | 2982,30 | 2490,38 | 2490,38 | 2202,75 | 15,00 | 16 | 119,76 |
| 529 | 0,90 | d | 14 | 15 | 15 | 15 | 14 | 15 | 1010,76 | 429,79 | 429,79 | 403,21 | 14,00 | 15 | 22,05 |
| 529 | 0,90 | r | 14 | 16 | 16 | 16 | 14 | 16 | 986,53 | 920,95 | 920,95 | 717,55 | 14,00 | 16 | 39,94 |
| 529 | 0,90 | y | 14 | 17 | 17 | 17 | 14 | 17 | 1453,51 | 1248,94 | 1248,94 | 1071,15 | 15,00 | 17 | 71,33 |
| 529 | 0,95 | d | 14 | 15 | 15 | 15 | 14 | 15 | 693,60 | 459,76 | 459,76 | 476,57 | 14,00 | 15 | 9,75 |
| 529 | 0,95 | r | 14 | 17 | 17 | 17 | 14 | 17 | 487,83 | 319,48 | 319,48 | 229,48 | 14,00 | 16 | 25,84 |
| 529 | 0,95 | y | 15 | 18 | 18 | 18 | 15 | 18 | 715,38 | 592,62 | 592,62 | 467,36 | 15,00 | 18 | 39,20 |

Wee-Mag Problemi

| | | | Sezgisel Yaklaşım İstasyon Sayısı | | | | Maliyete Yönelik Sezgisel | | | | | | Üst Sezgisel Yaklaşım | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | İstasyon Sayısı | | Tamamlanmama Maliyeti | | | | | | |
| c | 1-α | cv | Kmin | r | c* | cv | Kmin | Bulunan | MYS | r | C* | cv | Kmin | Bulunan İst. Say. | Tamamlanmama Maliyeti |
| 52 | 0,85 | d | 58 | 69 | 69 | 69 | 58 | 72 | 15,61 | 35,06 | 35,06 | 27,16 | 58 | 71 | 132,69 |
| 52 | 0,85 | r | 59 | 96 | 96 | 96 | 59 | 97 | 24,3 | 27,01 | 27,01 | 27,73 | 59 | 93 | 85,90 |
| 52 | 0,85 | y | 59 | 116 | 116 | 116 | 59 | 116 | 16,72 | 14,15 | 14,15 | 13,66 | 59 | 116 | 47,00 |
| 52 | 0,90 | d | 58 | 73 | 73 | 74 | 58 | 76 | 7,25 | 23,83 | 23,83 | 16,11 | 58 | 79 | 73,07 |
| 52 | 0,90 | r | 59 | 100 | 100 | 101 | 59 | 101 | 12,27 | 14,03 | 14,03 | 16,5 | 59 | 97 | 59,09 |
| 52 | 0,90 | y | 60 | 118 | 118 | 118 | 60 | 118 | 10,41 | 10,34 | 10,34 | 10,34 | 60 | 118 | 34,00 |

Wee-mag problemi sonuçları devamı-1

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 52 | 0,95 | d | 58 | 80 | 80 | 80 | 58 | 83 | 3,09 | 9,97 | 9,97 | 8,22 | 59 | 88 | 22,72 |
| 52 | 0,95 | r | 60 | 105 | 105 | 105 | 60 | 106 | 5,19 | 7,29 | 7,29 | 6,01 | 60 | 100 | 35,47 |
| 52 | 0,95 | y | 61 | 119 | 119 | 119 | 61 | 119 | 7,2 | 7,27 | 7,27 | 7,27 | 61 | 119 | 30,43 |
| 53 | 0,85 | d | 57 | 66 | 66 | 67 | 57 | 68 | 16,51 | 40,48 | 40,48 | 22,56 | 57 | 67 | 154,01 |
| 53 | 0,85 | r | 58 | 92 | 92 | 92 | 58 | 94 | 24,81 | 37,25 | 37,25 | 26,41 | 58 | 89 | 101,05 |
| 53 | 0,85 | y | 58 | 114 | 114 | 114 | 58 | 114 | 21,06 | 21,15 | 21,15 | 21,07 | 58 | 113 | 55,93 |
| 53 | 0,90 | d | 57 | 69 | 69 | 70 | 57 | 73 | 8,02 | 20,51 | 20,51 | 13,21 | 57 | 73 | 87,67 |
| 53 | 0,90 | r | 58 | 97 | 97 | 98 | 58 | 98 | 12,49 | 16,12 | 16,12 | 12,53 | 58 | 95 | 56,23 |
| 53 | 0,90 | y | 59 | 118 | 118 | 118 | 59 | 118 | 8,18 | 8,84 | 8,84 | 8,84 | 59 | 118 | 28,25 |
| 53 | 0,95 | d | 57 | 77 | 77 | 77 | 57 | 79 | 2,53 | 8,38 | 8,38 | 6,67 | 57 | 83 | 27,09 |
| 53 | 0,95 | r | 59 | 102 | 102 | 102 | 59 | 103 | 7,5 | 7,4 | 7,4 | 6,66 | 59 | 99 | 32,90 |
| 53 | 0,95 | y | 60 | 119 | 119 | 119 | 60 | 119 | 6,79 | 6,37 | 6,37 | 6,37 | 60 | 118 | 27,56 |
| 54 | 0,85 | d | 56 | 64 | 64 | 64 | 56 | 66 | 14,54 | 39,3 | 39,3 | 29,35 | 56 | 65 | 140,65 |
| 54 | 0,85 | r | 57 | 87 | 87 | 88 | 57 | 90 | 23,39 | 48,46 | 48,46 | 54,63 | 57 | 85 | 115,33 |
| 54 | 0,85 | y | 57 | 111 | 111 | 111 | 57 | 111 | 24,48 | 25,63 | 25,63 | 25,36 | 57 | 109 | 64,53 |
| 54 | 0,90 | d | 56 | 67 | 67 | 67 | 56 | 69 | 10,55 | 21,19 | 21,19 | 34,57 | 56 | 70 | 90,18 |
| 54 | 0,90 | r | 57 | 96 | 96 | 96 | 57 | 97 | 13,17 | 14,56 | 14,56 | 15,36 | 57 | 92 | 61,54 |
| 54 | 0,90 | y | 58 | 117 | 117 | 117 | 58 | 117 | 7,69 | 7,76 | 7,76 | 7,76 | 58 | 116 | 31,54 |
| 54 | 0,95 | d | 56 | 72 | 72 | 74 | 56 | 75 | 4,17 | 10,48 | 10,48 | 7,25 | 56 | 79 | 30,21 |
| 54 | 0,95 | r | 58 | 101 | 101 | 101 | 58 | 100 | 5,19 | 6,34 | 6,34 | 7,56 | 58 | 97 | 27,58 |

Wee-mag problemi sonuçları devamı-2

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 54 | 0,95 | y | 58 | 118 | 118 | 118 | 58 | 118 | 5,77 | 5,67 | 5,67 | 5,5 | 58 | 118 | 21,93 |
| 56 | 0,85 | d | 54 | 62 | 62 | 62 | 54 | 63 | 41,39 | 33,65 | 33,65 | 38,06 | 54 | 62 | 117,78 |
| 56 | 0,85 | r | 55 | 77 | 77 | 78 | 55 | 81 | 22,81 | 50,68 | 50,68 | 39,42 | 55 | 77 | 141,13 |
| 56 | 0,85 | y | 55 | 102 | 102 | 102 | 55 | 103 | 22,11 | 19,18 | 19,18 | 21,86 | 55 | 100 | 93,33 |
| 56 | 0,90 | d | 54 | 63 | 63 | 63 | 54 | 64 | 22,54 | 22,76 | 22,76 | 12,43 | 54 | 64 | 83,32 |
| 56 | 0,90 | r | 55 | 87 | 87 | 88 | 55 | 90 | 14,97 | 35,82 | 35,82 | 24,89 | 55 | 86 | 72,57 |
| 56 | 0,90 | y | 56 | 113 | 113 | 113 | 56 | 113 | 13,43 | 14,81 | 14,81 | 14,36 | 56 | 112 | 36,25 |
| 56 | 0,95 | d | 54 | 67 | 67 | 68 | 54 | 69 | 3,25 | 8,6 | 8,6 | 7,8 | 54 | 69 | 40,31 |
| 56 | 0,95 | r | 56 | 96 | 96 | 96 | 56 | 98 | 5,27 | 6,8 | 6,8 | 9,06 | 56 | 93 | 25,75 |
| 56 | 0,95 | y | 56 | 118 | 118 | 118 | 56 | 118 | 4,17 | 4,18 | 4,18 | 4,18 | 56 | 118 | 14,94 |
| 58 | 0,85 | d | 52 | 61 | 61 | 61 | 52 | 62 | 20,73 | 25,1 | 25,1 | 24,66 | 52 | 61 | 102,16 |
| 58 | 0,85 | r | 53 | 68 | 68 | 69 | 53 | 71 | 47,66 | 57,13 | 57,13 | 66,43 | 53 | 70 | 161,96 |
| 58 | 0,85 | y | 53 | 92 | 92 | 92 | 53 | 95 | 23,09 | 44,93 | 44,93 | 44,06 | 53 | 89 | 131,92 |
| 58 | 0,90 | d | 52 | 61 | 61 | 61 | 52 | 63 | 13,98 | 23,31 | 23,31 | 16,81 | 52 | 62 | 76,18 |
| 58 | 0,90 | r | 53 | 80 | 80 | 80 | 53 | 83 | 13,91 | 26,08 | 26,08 | 25,24 | 53 | 79 | 87,37 |
| 58 | 0,90 | y | 54 | 107 | 107 | 107 | 54 | 107 | 13,52 | 13,08 | 13,08 | 13,28 | 54 | 104 | 56,48 |
| 58 | 0,95 | d | 52 | 63 | 63 | 64 | 52 | 64 | 10,09 | 12,11 | 12,11 | 5,93 | 53 | 65 | 41,11 |
| 58 | 0,95 | r | 54 | 90 | 90 | 90 | 54 | 92 | 7,04 | 12,6 | 12,6 | 13,26 | 54 | 89 | 27,47 |
| 58 | 0,95 | y | 54 | 116 | 116 | 116 | 54 | 116 | 3,73 | 3,68 | 3,68 | 3,68 | 54 | 116 | 13,84 |
| 59 | 0,85 | d | 51 | 60 | 60 | 60 | 51 | 62 | 10,86 | 27,04 | 27,04 | 26,24 | 52 | 61 | 76,02 |

Wee-mag problemi sonuçları devamı-3

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 59 | 0,85 | r | 52 | 67 | 67 | 67 | 52 | 70 | 37,11 | 52,93 | 52,93 | 56,93 | 53 | 67 | 170,26 |
| 59 | 0,85 | y | 52 | 85 | 85 | 86 | 52 | 88 | 34,34 | 50,45 | 50,45 | 51,80 | 54 | 82 | 161,27 |
| 59 | 0,90 | d | 51 | 61 | 61 | 61 | 51 | 62 | 13,73 | 14,92 | 14,92 | 15,32 | 52 | 61 | 58,93 |
| 59 | 0,90 | r | 52 | 76 | 76 | 77 | 52 | 80 | 16,74 | 28,28 | 28,28 | 25,89 | 53 | 75 | 92,21 |
| 59 | 0,90 | y | 53 | 103 | 103 | 103 | 53 | 104 | 13,30 | 13,29 | 13,29 | 13,29 | 54 | 100 | 59,61 |
| 59 | 0,95 | d | 51 | 62 | 62 | 62 | 51 | 63 | 7,70 | 9,55 | 9,55 | 9,49 | 52 | 63 | 35,74 |
| 59 | 0,95 | r | 53 | 87 | 87 | 87 | 53 | 89 | 6,42 | 11,23 | 11,23 | 16,35 | 53 | 86 | 29,58 |
| 59 | 0,95 | y | 54 | 114 | 114 | 114 | 54 | 114 | 5,57 | 6,11 | 6,11 | 6,11 | 54 | 115 | 13,43 |
| 61 | 0,85 | d | 49 | 60 | 60 | 60 | 49 | 61 | 6,80 | 14,48 | 14,48 | 14,28 | 50 | 60 | 56,02 |
| 61 | 0,85 | r | 50 | 63 | 63 | 64 | 50 | 66 | 64,74 | 63,00 | 63,00 | 64,00 | 51 | 64 | 164,13 |
| 61 | 0,85 | y | 51 | 74 | 74 | 74 | 51 | 78 | 45,27 | 65,83 | 65,83 | 63,70 | 52 | 71 | 204,33 |
| 61 | 0,90 | d | 50 | 60 | 60 | 60 | 50 | 61 | 9,20 | 11,54 | 11,54 | 12,21 | 50 | 60 | 42,35 |
| 61 | 0,90 | r | 51 | 69 | 69 | 68 | 51 | 72 | 21,56 | 33,68 | 33,68 | 33,13 | 51 | 70 | 104,47 |
| 61 | 0,90 | y | 51 | 94 | 94 | 94 | 51 | 96 | 15,39 | 30,36 | 30,36 | 29,96 | 52 | 90 | 83,75 |
| 61 | 0,95 | d | 50 | 61 | 61 | 60 | 50 | 62 | 3,65 | 6,29 | 6,29 | 6,63 | 50 | 61 | 28,07 |
| 61 | 0,95 | r | 51 | 81 | 81 | 82 | 51 | 84 | 6,44 | 12,61 | 12,61 | 12,58 | 51 | 80 | 34,91 |
| 61 | 0,95 | y | 52 | 111 | 111 | 111 | 52 | 110 | 4,96 | 5,20 | 5,20 | 5,20 | 52 | 108 | 19,34 |
| 62 | 0,85 | d | 49 | 59 | 59 | 59 | 49 | 61 | 24,65 | 24,25 | 24,25 | 27,60 | 49 | 60 | 41,19 |
| 62 | 0,85 | r | 49 | 62 | 62 | 62 | 49 | 64 | 50,79 | 62,00 | 62,00 | 62,00 | 50 | 62 | 150,17 |
| 62 | 0,85 | y | 50 | 70 | 70 | 70 | 50 | 74 | 50,18 | 65,54 | 65,54 | 67,78 | 51 | 67 | 202,17 |

Wee-mag problemi sonuçları-4

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 62 | 0,90 | d | 49 | 60 | 60 | 60 | 49 | 61 | 4,04 | 9,05 | 9,05 | 8,94 | 49 | 60 | 36,30 |
| 62 | 0,90 | r | 50 | 66 | 66 | 67 | 50 | 69 | 29,83 | 40,34 | 40,34 | 47,54 | 50 | 67 | 103,77 |
| 62 | 0,90 | y | 50 | 89 | 89 | 88 | 50 | 90 | 17,43 | 38,29 | 38,29 | 33,65 | 51 | 84 | 98,90 |
| 62 | 0,95 | d | 49 | 60 | 60 | 60 | 49 | 61 | 4,97 | 6,65 | 6,65 | 7,89 | 49 | 61 | 25,92 |
| 62 | 0,95 | r | 50 | 78 | 78 | 78 | 50 | 81 | 5,74 | 11,15 | 11,15 | 11,42 | 50 | 79 | 40,09 |
| 62 | 0,95 | y | 51 | 107 | 107 | 107 | 51 | 107 | 4,39 | 7,33 | 7,33 | 6,41 | 51 | 105 | 22,13 |
| 63 | 0,85 | d | 48 | 59 | 59 | 59 | 48 | 60 | 19,21 | 13,13 | 13,13 | 12,87 | 48 | 59 | 32,01 |
| 63 | 0,85 | r | 49 | 62 | 62 | 62 | 49 | 63 | 49,27 | 62,00 | 62,00 | 62,00 | 50 | 61 | 146,89 |
| 63 | 0,85 | y | 49 | 67 | 67 | 67 | 49 | 70 | 52,24 | 67,00 | 67,00 | 67,00 | 50 | 65 | 201,17 |
| 63 | 0,90 | d | 48 | 59 | 59 | 59 | 48 | 60 | 14,32 | 13,70 | 13,70 | 12,50 | 48 | 60 | 28,84 |
| 63 | 0,90 | r | 49 | 64 | 64 | 66 | 49 | 67 | 34,07 | 42,95 | 42,95 | 47,67 | 50 | 65 | 103,10 |
| 63 | 0,90 | y | 50 | 82 | 82 | 82 | 50 | 85 | 24,03 | 45,84 | 45,84 | 35,00 | 50 | 79 | 116,33 |
| 63 | 0,95 | d | 48 | 60 | 60 | 60 | 48 | 61 | 1,71 | 5,17 | 5,17 | 4,06 | 48 | 60 | 20,41 |
| 63 | 0,95 | r | 49 | 75 | 75 | 76 | 49 | 78 | 6,64 | 9,56 | 9,56 | 11,16 | 50 | 75 | 43,09 |
| 63 | 0,95 | y | 50 | 104 | 104 | 104 | 50 | 105 | 5,61 | 7,02 | 7,02 | 7,17 | 50 | 101 | 27,50 |
| 69 | 0,85 | d | 44 | 54 | 54 | 55 | 44 | 55 | 10,08 | 12,82 | 12,82 | 26,74 | 44 | 56 | 24,69 |
| 69 | 0,85 | r | 44 | 58 | 58 | 58 | 44 | 60 | 49,63 | 58,00 | 58,00 | 49,51 | 45 | 58 | 87,96 |
| 69 | 0,85 | y | 45 | 61 | 61 | 60 | 45 | 61 | 74,89 | 60,00 | 60,00 | 60,00 | 46 | 60 | 139,28 |
| 69 | 0,90 | d | 44 | 56 | 56 | 55 | 44 | 56 | 7,67 | 6,45 | 6,45 | 6,99 | 44 | 57 | 20,60 |
| 69 | 0,90 | r | 45 | 59 | 59 | 59 | 45 | 61 | 39,98 | 30,41 | 30,41 | 30,45 | 45 | 59 | 73,06 |

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 69 | 0,90 | y | 45 | 64 | 64 | 63 | 45 | 65 | 43,80 | 55,88 | 55,88 | 55,88 | 46 | 62 | 127,95 |
| 69 | 0,95 | d | 44 | 56 | 56 | 56 | 44 | 57 | 1,91 | 8,93 | 8,93 | 3,34 | 44 | 58 | 10,41 |
| 69 | 0,95 | r | 45 | 63 | 63 | 63 | 45 | 65 | 11,46 | 17,19 | 17,19 | 16,82 | 45 | 63 | 42,90 |
| 69 | 0,95 | y | 46 | 78 | 78 | 77 | 46 | 81 | 10,05 | 17,20 | 17,20 | 19,52 | 46 | 74 | 56,33 |

Lutz2 Problemi

| | | | Sezgisel Yaklaşım İstasyon Sayısı | | | | Maliyete Yönelik Sezgisel | | | | | | Üst Sezgisel Yaklaşım | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | İstasyon Sayısı | | Tamamlanmama Maliyeti | | | | | | |
| c | 1-α | cv | Kmin | r | c* | cv | Kmin | Bulunan | MYS | r | C* | cv | Kmin | Bulunan İst. Say. | Tamamlanmama Maliyeti |
| 20 | 0,85 | d | 48 | 56 | 56 | 56 | 48 | 57 | 978,65 | 1283,63 | 1411,99 | 1224,52 | 48 | 55 | 28,24 |
| 20 | 0,85 | r | 49 | 65 | 65 | 65 | 49 | 67 | 2655,67 | 4157,41 | 3949,54 | 4005,98 | 49 | 63 | 40,66 |
| 20 | 0,85 | y | 49 | 70 | 70 | 69 | 49 | 70 | 4681,33 | 2667,40 | 2587,38 | 4403,19 | 49 | 67 | 46,21 |
| 20 | 0,90 | d | 48 | 58 | 58 | 58 | 48 | 60 | 225,00 | 1242,44 | 1304,56 | 805,23 | 48 | 57 | 13,97 |
| 20 | 0,90 | r | 49 | 69 | 69 | 69 | 49 | 71 | 2598,42 | 2348,55 | 2583,41 | 2525,11 | 49 | 67 | 20,94 |
| 20 | 0,90 | y | 50 | 76 | 76 | 76 | 50 | 79 | 1736,32 | 2838,00 | 2696,10 | 3068,34 | 50 | 72 | 32,71 |
| 20 | 0,95 | d | 49 | 60 | 60 | 61 | 49 | 62 | 104,88 | 1047,83 | 1016,40 | 227,48 | 49 | 59 | 6,07 |
| 20 | 0,95 | r | 50 | 76 | 76 | 75 | 50 | 77 | 545,33 | 607,01 | 637,36 | 1099,74 | 50 | 72 | 11,38 |
| 20 | 0,95 | y | 51 | 85 | 85 | 85 | 51 | 87 | 1321,60 | 1082,83 | 1191,11 | 1062,75 | 51 | 81 | 14,96 |
| 21 | 0,85 | d | 46 | 53 | 53 | 53 | 46 | 54 | 2081,91 | 1420,20 | 1349,19 | 1701,86 | 46 | 53 | 17,44 |
| 21 | 0,85 | r | 47 | 61 | 61 | 61 | 47 | 62 | 3992,56 | 3538,54 | 3432,38 | 3837,00 | 47 | 59 | 35,08 |
| 21 | 0,85 | y | 47 | 65 | 65 | 65 | 47 | 67 | 2543,58 | 3599,66 | 3779,64 | 4067,70 | 47 | 63 | 42,10 |
| 21 | 0,90 | d | 46 | 54 | 54 | 54 | 46 | 56 | 418,79 | 1185,89 | 1304,48 | 1023,31 | 46 | 53 | 12,88 |

| Lutz2 problemi sonuçları devamı-1 | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 21 | 0,90 | r | 47 | 65 | 65 | 65 | 47 | 66 | 1901,46 | 2468,93 | 2345,48 | 3037,88 | 47 | 63 | 19,53 |
| 21 | 0,90 | y | 47 | 70 | 70 | 70 | 47 | 73 | 2169,55 | 2791,15 | 2707,42 | 2147,92 | 48 | 68 | 30,85 |
| 21 | 0,95 | d | 46 | 57 | 57 | 57 | 46 | 58 | 109,67 | 290,50 | 305,03 | 513,26 | 46 | 56 | 5,16 |
| 21 | 0,95 | r | 48 | 70 | 70 | 70 | 48 | 72 | 625,21 | 1014,21 | 1115,63 | 1095,82 | 48 | 67 | 9,86 |
| 21 | 0,95 | y | 48 | 79 | 79 | 79 | 48 | 82 | 760,38 | 987,15 | 937,79 | 1219,88 | 48 | 76 | 13,03 |
| 22 | 0,85 | d | 44 | 50 | 50 | 51 | 44 | 52 | 800,11 | 3571,28 | 3464,14 | 737,52 | 44 | 50 | 18,97 |
| 22 | 0,85 | r | 45 | 58 | 58 | 58 | 45 | 59 | 2734,56 | 2676,55 | 2810,38 | 3174,02 | 45 | 56 | 34,04 |
| 22 | 0,85 | y | 45 | 62 | 62 | 62 | 45 | 63 | 3878,70 | 3566,90 | 3923,59 | 3661,10 | 45 | 59 | 41,85 |
| 22 | 0,90 | d | 44 | 52 | 52 | 52 | 44 | 52 | 999,97 | 436,14 | 414,33 | 448,26 | 44 | 51 | 12,83 |
| 22 | 0,90 | r | 45 | 61 | 61 | 61 | 45 | 63 | 1137,26 | 2204,29 | 2138,16 | 2655,05 | 45 | 59 | 21,69 |
| 22 | 0,90 | y | 45 | 66 | 66 | 66 | 45 | 68 | 1916,03 | 1654,02 | 1736,72 | 1987,69 | 45 | 64 | 26,43 |
| 22 | 0,95 | d | 44 | 53 | 53 | 53 | 44 | 54 | 303,29 | 312,31 | 343,54 | 500,28 | 44 | 53 | 5,50 |
| 22 | 0,95 | r | 45 | 66 | 66 | 68 | 45 | 68 | 935,49 | 1248,27 | 1185,86 | 625,89 | 45 | 64 | 9,86 |
| 22 | 0,95 | y | 46 | 74 | 74 | 75 | 46 | 76 | 796,72 | 1129,49 | 1095,61 | 734,54 | 46 | 71 | 13,07 |
| 23 | 0,85 | d | 42 | 48 | 48 | 48 | 42 | 49 | 500,59 | 1676,36 | 1760,18 | 1434,02 | 42 | 47 | 24,90 |
| 23 | 0,85 | r | 43 | 54 | 54 | 54 | 43 | 55 | 3708,50 | 4483,66 | 4932,03 | 5421,00 | 43 | 53 | 33,60 |
| 23 | 0,85 | y | 43 | 58 | 58 | 58 | 43 | 60 | 3209,64 | 3237,37 | 3075,50 | 2734,18 | 43 | 56 | 39,49 |
| 23 | 0,90 | d | 42 | 49 | 49 | 49 | 42 | 50 | 301,54 | 1193,34 | 1157,54 | 773,11 | 42 | 49 | 9,11 |
| 23 | 0,90 | r | 43 | 57 | 57 | 57 | 43 | 59 | 891,89 | 2932,50 | 3079,13 | 1078,05 | 43 | 56 | 20,78 |
| 23 | 0,90 | y | 43 | 62 | 62 | 62 | 43 | 63 | 2513,20 | 2338,58 | 2572,44 | 2134,55 | 43 | 60 | 24,55 |
| 23 | 0,95 | d | 42 | 51 | 51 | 51 | 42 | 51 | 286,05 | 245,56 | 233,28 | 245,08 | 42 | 50 | 6,32 |
| 23 | 0,95 | r | 43 | 62 | 62 | 63 | 43 | 64 | 705,23 | 1169,95 | 1134,85 | 950,68 | 43 | 60 | 8,99 |
| 23 | 0,95 | y | 44 | 69 | 69 | 68 | 44 | 70 | 993,55 | 874,49 | 918,21 | 1560,65 | 44 | 67 | 12,78 |
| 24 | 0,85 | d | 40 | 46 | 46 | 46 | 40 | 47 | 603,95 | 1839,50 | 2023,45 | 1300,22 | 40 | 45 | 19,24 |
| 24 | 0,85 | r | 41 | 52 | 52 | 51 | 41 | 52 | 3531,01 | 2949,67 | 2802,19 | 4864,16 | 41 | 50 | 28,64 |

| Lutz2 problemi sonuçları devamı-2 | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 24 | 0,85 | y | 41 | 55 | 55 | 54 | 41 | 55 | 4767,57 | 3048,28 | 2956,83 | 4388,50 | 41 | 53 | 39,47 |
| 24 | 0,90 | d | 40 | 47 | 47 | 47 | 40 | 47 | 519,40 | 656,59 | 689,42 | 770,17 | 40 | 46 | 13,41 |
| 24 | 0,90 | r | 41 | 54 | 54 | 54 | 41 | 55 | 2256,83 | 2808,78 | 3089,66 | 2686,43 | 41 | 53 | 20,47 |
| 24 | 0,90 | y | 42 | 58 | 58 | 59 | 42 | 60 | 1496,35 | 2984,26 | 2835,05 | 1478,34 | 42 | 57 | 29,17 |
| 24 | 0,95 | d | 41 | 48 | 48 | 48 | 41 | 49 | 137,84 | 759,65 | 736,86 | 992,49 | 41 | 48 | 5,42 |
| 24 | 0,95 | r | 42 | 58 | 58 | 59 | 42 | 60 | 523,31 | 1034,54 | 1086,27 | 963,99 | 42 | 57 | 9,76 |
| 24 | 0,95 | y | 42 | 65 | 65 | 65 | 42 | 67 | 598,82 | 1078,04 | 1185,84 | 1066,06 | 42 | 63 | 13,16 |
| 25 | 0,85 | d | 39 | 44 | 44 | 44 | 39 | 45 | 411,69 | 1235,66 | 1173,88 | 1194,09 | 39,00 | 43 | 19,70 |
| 25 | 0,85 | r | 39 | 49 | 49 | 49 | 39 | 50 | 2471,43 | 3007,18 | 2916,96 | 2636,01 | 40,00 | 48 | 32,00 |
| 25 | 0,85 | y | 40 | 52 | 52 | 52 | 40 | 52 | 4854,79 | 3740,91 | 3927,96 | 3555,07 | 41,00 | 51 | 40,40 |
| 25 | 0,90 | d | 39 | 45 | 45 | 45 | 39 | 45 | 788,08 | 541,37 | 595,51 | 624,81 | 39,00 | 44 | 11,87 |
| 25 | 0,90 | r | 40 | 51 | 51 | 52 | 40 | 52 | 1886,11 | 2911,21 | 2765,65 | 1598,35 | 40,00 | 50 | 23,79 |
| 25 | 0,90 | y | 40 | 55 | 55 | 55 | 40 | 56 | 3115,51 | 2558,90 | 2482,13 | 2987,17 | 41,00 | 54 | 27,01 |
| 25 | 0,95 | d | 39 | 46 | 46 | 47 | 39 | 47 | 145,42 | 326,35 | 342,67 | 229,25 | 39,00 | 46 | 4,41 |
| 25 | 0,95 | r | 40 | 56 | 56 | 56 | 40 | 57 | 1040,20 | 906,87 | 997,56 | 1180,26 | 40,00 | 54 | 9,73 |
| 25 | 0,95 | y | 41 | 62 | 62 | 61 | 41 | 64 | 510,08 | 602,81 | 572,67 | 1199,12 | 41,00 | 60 | 10,82 |
| 26 | 0,85 | d | 37 | 42 | 42 | 42 | 37 | 43 | 496,87 | 1405,59 | 1363,42 | 1283,99 | 38,00 | 42 | 13,53 |
| 26 | 0,85 | r | 38 | 47 | 47 | 47 | 38 | 47 | 4801,67 | 2774,04 | 2912,74 | 2780,93 | 39,00 | 46 | 28,40 |
| 26 | 0,85 | y | 38 | 49 | 49 | 50 | 38 | 51 | 2902,41 | 5822,24 | 6404,46 | 3164,59 | 39,00 | 49 | 35,32 |
| 26 | 0,90 | d | 37 | 43 | 43 | 43 | 37 | 43 | 1243,99 | 615,32 | 584,55 | 567,73 | 38,00 | 42 | 13,73 |
| 26 | 0,90 | r | 38 | 49 | 49 | 49 | 38 | 50 | 1781,95 | 2260,44 | 2373,46 | 2561,70 | 39,00 | 48 | 19,39 |
| 26 | 0,90 | y | 38 | 52 | 52 | 52 | 38 | 53 | 2567,83 | 3142,82 | 3048,54 | 3246,20 | 39,00 | 52 | 22,76 |
| 26 | 0,95 | d | 37 | 44 | 44 | 44 | 37 | 45 | 98,60 | 476,13 | 523,74 | 767,39 | 38,00 | 44 | 4,10 |
| 26 | 0,95 | r | 39 | 53 | 53 | 53 | 39 | 54 | 664,73 | 1073,22 | 1019,56 | 914,72 | 39,00 | 51 | 11,05 |
| 26 | 0,95 | y | 39 | 58 | 58 | 58 | 39 | 60 | 943,43 | 1060,07 | 1028,27 | 1019,95 | 39,00 | 56 | 11,80 |

| Lutz2 problemi sonuçları devamı-3 | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 28 | 0,85 | d | 35 | 39 | 39 | 39 | 35 | 39 | 2522,66 | 1235,18 | 1296,94 | 1079,88 | 35,00 | 38 | 19,32 |
| 28 | 0,85 | r | 35 | 44 | 44 | 44 | 35 | 44 | 1479,51 | 2599,25 | 2859,18 | 2228,49 | 36,00 | 42 | 30,11 |
| 28 | 0,85 | y | 35 | 45 | 45 | 45 | 35 | 46 | 5003,42 | 4809,06 | 4568,61 | 4342,49 | 36,00 | 45 | 32,19 |
| 28 | 0,90 | d | 35 | 40 | 40 | 40 | 35 | 40 | 924,21 | 555,69 | 539,02 | 801,13 | 35,00 | 39 | 9,23 |
| 28 | 0,90 | r | 35 | 45 | 45 | 45 | 35 | 46 | 1037,99 | 2433,92 | 2555,62 | 2160,08 | 36,00 | 44 | 19,10 |
| 28 | 0,90 | y | 36 | 48 | 48 | 48 | 36 | 49 | 2926,64 | 2701,23 | 2971,35 | 3124,45 | 36,00 | 47 | 24,14 |
| 28 | 0,95 | d | 35 | 41 | 41 | 41 | 35 | 41 | 850,75 | 341,48 | 324,41 | 243,14 | 35,00 | 40 | 5,92 |
| 28 | 0,95 | r | 36 | 48 | 48 | 48 | 36 | 49 | 357,13 | 1124,78 | 1091,04 | 924,00 | 36,00 | 47 | 8,53 |
| 28 | 0,95 | y | 36 | 52 | 52 | 53 | 36 | 53 | 997,99 | 1204,39 | 1264,61 | 777,59 | 36,00 | 51 | 10,53 |
| 29 | 0,85 | d | 33 | 37 | 37 | 37 | 33 | 37 | 1703,13 | 1878,94 | 2066,83 | 2198,49 | 34,00 | 37 | 11,70 |
| 29 | 0,85 | r | 34 | 41 | 41 | 42 | 34 | 42 | 2081,38 | 5267,03 | 5003,68 | 1808,37 | 35,00 | 41 | 22,43 |
| 29 | 0,85 | y | 34 | 43 | 43 | 43 | 34 | 45 | 1994,16 | 4638,88 | 4499,71 | 4088,71 | 35,00 | 43 | 31,45 |
| 29 | 0,90 | d | 34 | 38 | 38 | 38 | 34 | 38 | 1041,29 | 830,01 | 871,51 | 794,77 | 34,00 | 38 | 6,81 |
| 29 | 0,90 | r | 34 | 44 | 44 | 44 | 34 | 44 | 977,91 | 1759,57 | 1935,53 | 1493,88 | 35,00 | 42 | 19,50 |
| 29 | 0,90 | y | 35 | 46 | 46 | 46 | 35 | 47 | 1673,29 | 3157,65 | 2999,77 | 2653,63 | 35,00 | 45 | 23,99 |
| 29 | 0,95 | d | 34 | 39 | 39 | 39 | 34 | 39 | 1311,26 | 561,33 | 544,49 | 511,24 | 34,00 | 39 | 3,70 |
| 29 | 0,95 | r | 35 | 46 | 46 | 46 | 35 | 47 | 445,92 | 1228,98 | 1290,43 | 1234,41 | 35,00 | 45 | 9,33 |
| 29 | 0,95 | y | 35 | 50 | 50 | 50 | 35 | 51 | 761,02 | 1425,23 | 1567,75 | 1126,21 | 35,00 | 49 | 11,86 |

Lutz3 Problemi

| | | | Sezgisel Yaklaşım İstasyon Sayısı | | | | Maliyete Yönelik Sezgisel | | | | | | Üst Sezgisel Yaklaşım | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | İstasyon Sayısı | | Tamamlanmama Maliyeti | | | | | | |
| c | 1-α | cv | Kmin | r | c* | cv | Kmin | Bulunan | MYS | r | C* | cv | Kmin | Bulunan İst. Say. | Tamamlanmama Maliyeti |
| 143 | 0,85 | d | 23 | 25 | 25 | 25 | 23 | 25 | 13990,40 | 10034,27 | 10034,27 | 14239,78 | 23 | 25 | 28,77 |
| 143 | 0,85 | r | 24 | 27 | 27 | 27 | 24 | 27 | 17273,27 | 12136,20 | 12136,20 | 12831,50 | 24 | 27 | 44,36 |
| 143 | 0,85 | y | 24 | 29 | 29 | 29 | 24 | 30 | 11932,14 | 13366,62 | 13366,62 | 14572,30 | 24 | 28 | 89,82 |
| 143 | 0,90 | d | 23 | 26 | 26 | 26 | 23 | 26 | 5895,72 | 3324,74 | 3324,74 | 5135,66 | 23 | 25 | 34,34 |
| 143 | 0,90 | r | 24 | 28 | 28 | 28 | 24 | 29 | 3937,55 | 8376,74 | 8376,74 | 7296,07 | 24 | 28 | 29,03 |
| 143 | 0,90 | y | 24 | 30 | 30 | 31 | 24 | 31 | 7971,89 | 12733,64 | 12733,64 | 6466,47 | 24 | 30 | 46,33 |
| 143 | 0,95 | d | 23 | 27 | 27 | 27 | 23 | 26 | 2754,70 | 829,14 | 829,14 | 1085,78 | 23 | 26 | 9,18 |
| 143 | 0,95 | r | 24 | 30 | 30 | 30 | 24 | 30 | 2910,16 | 3055,00 | 3055,00 | 3117,66 | 24 | 29 | 17,67 |
| 143 | 0,95 | y | 24 | 33 | 33 | 33 | 24 | 33 | 3911,72 | 3609,56 | 3609,56 | 3544,10 | 24 | 32 | 25,95 |
| 151 | 0,85 | d | 22 | 24 | 24 | 24 | 22 | 24 | 11130,03 | 5956,96 | 5956,96 | 6550,57 | 22 | 24 | 19,78 |
| 151 | 0,85 | r | 22 | 26 | 26 | 26 | 22 | 26 | 7334,19 | 7704,85 | 7704,85 | 6965,26 | 22 | 25 | 50,55 |
| 151 | 0,85 | y | 23 | 27 | 27 | 27 | 23 | 28 | 10921,54 | 18376,51 | 18376,51 | 17414,93 | 23 | 27 | 60,86 |
| 151 | 0,90 | d | 22 | 24 | 24 | 25 | 22 | 24 | 7317,33 | 5511,23 | 5511,23 | 2326,32 | 22 | 24 | 16,88 |
| 151 | 0,90 | r | 23 | 27 | 27 | 27 | 23 | 27 | 5484,73 | 4738,17 | 4738,17 | 5051,80 | 23 | 26 | 29,19 |
| 151 | 0,90 | y | 23 | 29 | 29 | 29 | 23 | 29 | 8284,53 | 6654,20 | 6654,20 | 6768,71 | 23 | 28 | 46,11 |
| 151 | 0,95 | d | 22 | 25 | 25 | 25 | 22 | 25 | 2066,90 | 1685,56 | 1685,56 | 1503,15 | 22 | 25 | 5,90 |
| 151 | 0,95 | r | 23 | 28 | 28 | 28 | 23 | 28 | 3583,16 | 3230,17 | 3230,17 | 2792,78 | 23 | 27 | 18,64 |
| 151 | 0,95 | y | 23 | 31 | 31 | 31 | 23 | 31 | 3608,19 | 2634,22 | 2634,22 | 3788,73 | 23 | 30 | 23,78 |
| 158 | 0,85 | d | 21 | 23 | 23 | 23 | 21 | 23 | 11770,44 | 4674,49 | 4674,49 | 4142,27 | 21 | 23 | 20,30 |
| 158 | 0,85 | r | 21 | 24 | 24 | 25 | 21 | 25 | 11833,81 | 16805,60 | 16805,60 | 7408,42 | 21 | 24 | 42,48 |

Lutz3 problemi sonuçları devamı-1

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 158 | 0,85 | y | 22 | 26 | 26 | 26 | 22 | 26 | 16936,40 | 12513,16 | 12513,16 | 11576,53 | 22 | 25 | 76,02 |
| 158 | 0,90 | d | 21 | 23 | 23 | 23 | 21 | 23 | 4780,18 | 3987,17 | 3987,17 | 4802,00 | 21 | 23 | 15,18 |
| 158 | 0,90 | r | 22 | 25 | 25 | 26 | 22 | 25 | 9852,81 | 7919,34 | 7919,34 | 4755,90 | 22 | 25 | 25,49 |
| 158 | 0,90 | y | 22 | 27 | 27 | 27 | 22 | 28 | 6962,30 | 10772,08 | 10772,08 | 12226,05 | 22 | 26 | 37,42 |
| 158 | 0,95 | d | 21 | 24 | 24 | 24 | 21 | 24 | 3046,48 | 1106,23 | 1106,23 | 1135,32 | 21 | 24 | 4,82 |
| 158 | 0,95 | r | 22 | 27 | 27 | 27 | 22 | 27 | 3504,36 | 1920,00 | 1920,00 | 1920,43 | 22 | 26 | 13,28 |
| 158 | 0,95 | y | 22 | 29 | 29 | 29 | 22 | 29 | 4670,74 | 3832,70 | 3832,70 | 4861,99 | 22 | 28 | 24,80 |
| 166 | 0,85 | d | 20 | 22 | 22 | 22 | 20 | 22 | 5328,01 | 3314,02 | 3314,02 | 3747,69 | 20 | 21 | 36,68 |
| 166 | 0,85 | r | 20 | 23 | 23 | 23 | 20 | 23 | 16114,58 | 8322,77 | 8322,77 | 10863,59 | 20 | 23 | 37,42 |
| 166 | 0,85 | y | 21 | 25 | 25 | 25 | 21 | 25 | 12723,88 | 9418,58 | 9418,58 | 9722,99 | 21 | 24 | 59,17 |
| 166 | 0,90 | d | 20 | 22 | 22 | 22 | 20 | 22 | 3734,06 | 3735,28 | 3735,28 | 4137,79 | 20 | 22 | 11,88 |
| 166 | 0,90 | r | 21 | 24 | 24 | 24 | 21 | 24 | 6991,40 | 6192,58 | 6192,58 | 6145,35 | 21 | 23 | 22,45 |
| 166 | 0,90 | y | 21 | 26 | 26 | 26 | 21 | 26 | 11676,03 | 6757,88 | 6757,88 | 7090,80 | 21 | 25 | 40,24 |
| 166 | 0,95 | d | 20 | 22 | 22 | 23 | 20 | 23 | 2804,38 | 5245,31 | 5245,31 | 1050,97 | 20 | 22 | 9,95 |
| 166 | 0,95 | r | 21 | 25 | 25 | 26 | 21 | 25 | 3539,73 | 2981,79 | 2981,79 | 1663,44 | 21 | 24 | 9,92 |
| 166 | 0,95 | y | 21 | 28 | 28 | 28 | 21 | 28 | 3478,20 | 2313,36 | 2313,36 | 2452,51 | 21 | 27 | 18,05 |
| 176 | 0,85 | d | 19 | 20 | 20 | 21 | 19 | 20 | 17010,60 | 11351,19 | 11351,19 | 2966,99 | 19 | 20 | 25,24 |
| 176 | 0,85 | r | 19 | 22 | 22 | 22 | 19 | 22 | 13535,47 | 7307,73 | 7307,73 | 7565,87 | 19 | 21 | 53,88 |
| 176 | 0,85 | y | 19 | 23 | 23 | 23 | 19 | 24 | 14720,45 | 11143,05 | 11143,05 | 9864,01 | 19 | 23 | 46,29 |
| 176 | 0,90 | d | 19 | 21 | 21 | 21 | 19 | 21 | 4438,98 | 2049,57 | 2049,57 | 1853,18 | 19 | 21 | 9,06 |
| 176 | 0,90 | r | 19 | 22 | 22 | 22 | 19 | 23 | 5846,05 | 8914,21 | 8914,21 | 9152,51 | 19 | 22 | 23,39 |
| 176 | 0,90 | y | 20 | 24 | 24 | 24 | 20 | 24 | 7329,53 | 6703,65 | 6703,65 | 6648,71 | 20 | 24 | 29,86 |
| 176 | 0,95 | d | 19 | 21 | 21 | 21 | 19 | 21 | 2920,71 | 1821,98 | 1821,98 | 1804,59 | 19 | 21 | 5,62 |
| 176 | 0,95 | r | 20 | 23 | 23 | 23 | 20 | 24 | 4056,64 | 4893,09 | 4893,09 | 6081,98 | 20 | 23 | 12,07 |
| 176 | 0,95 | y | 20 | 26 | 26 | 26 | 20 | 26 | 3958,46 | 3005,17 | 3005,17 | 2821,86 | 20 | 25 | 18,03 |

Mukherje Problemi

| | | | Sezgisel Yaklaşım İstasyon Sayısı | | | | Maliyete Yönelik Sezgisel | | | | | | Üst Sezgisel Yaklaşım | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | İstasyon Sayısı | | Tamamlanmama Maliyeti | | | | | | |
| c | 1-α | cv | Kmin | r | c* | cv | Kmin | Bulunan | MYS | r | C* | cv | Kmin | Bulunan İst. Say. | Tamamlanmama Maliyeti |
| 305 | 0,85 | d | 28 | 30 | 30 | 30 | 28 | 30 | 5977,18 | 7278,18 | 7278,18 | 7384,16 | 28 | 30 | 92,98 |
| 305 | 0,85 | r | 28 | 33 | 33 | 33 | 28 | 34 | 8895,01 | 8960,69 | 8960,69 | 9212,2 | 28 | 32 | 239,19 |
| 305 | 0,85 | y | 28 | 36 | 36 | 36 | 28 | 36 | 9154,7 | 8924,06 | 8924,06 | 9214,33 | 28 | 34 | 278,63 |
| 305 | 0,90 | d | 28 | 31 | 31 | 31 | 28 | 31 | 4229,73 | 3743,47 | 3743,47 | 3309,13 | 28 | 30 | 80,33 |
| 305 | 0,90 | r | 28 | 34 | 34 | 34 | 28 | 35 | 6371,72 | 6593,9 | 6593,9 | 6188,76 | 28 | 34 | 124,69 |
| 305 | 0,90 | y | 29 | 37 | 37 | 37 | 29 | 37 | 8679,54 | 7415,37 | 7415,37 | 7860,84 | 29 | 36 | 181,92 |
| 305 | 0,95 | d | 28 | 32 | 32 | 32 | 28 | 32 | 1710,67 | 2044,92 | 2044,92 | 1863,25 | 28 | 31 | 32,58 |
| 305 | 0,95 | r | 29 | 40 | 40 | 40 | 29 | 40 | 3340,87 | 3174,68 | 3174,68 | 3211,3 | 29 | 36 | 62,43 |
| 305 | 0,95 | y | 29 | 40 | 40 | 40 | 29 | 40 | 3340,87 | 3174,68 | 3174,68 | 3211,3 | 29 | 39 | 111,12 |
| 317 | 0,85 | d | 27 | 29 | 29 | 29 | 27 | 29 | 7273,3 | 7277,03 | 7277,03 | 7040,05 | 27 | 29 | 87,85 |
| 317 | 0,85 | r | 27 | 31 | 31 | 31 | 27 | 32 | 9055,45 | 10980 | 10980 | 12460,3 | 27 | 31 | 191,80 |
| 317 | 0,85 | y | 27 | 34 | 34 | 33 | 27 | 34 | 11431,3 | 10119,9 | 10119,9 | 12235,9 | 27 | 33 | 238,08 |
| 317 | 0,90 | d | 27 | 30 | 30 | 30 | 27 | 30 | 3865,9 | 3764,52 | 3764,52 | 3574,39 | 27 | 29 | 62,11 |
| 317 | 0,90 | r | 27 | 33 | 33 | 33 | 27 | 34 | 5038,21 | 5995,22 | 5995,22 | 5738,66 | 27 | 32 | 137,86 |
| 317 | 0,90 | y | 28 | 36 | 36 | 36 | 28 | 36 | 6993,82 | 6739,49 | 6739,49 | 6618,63 | 28 | 35 | 149,37 |
| 317 | 0,95 | d | 27 | 30 | 30 | 30 | 27 | 30 | 2849,72 | 2442,72 | 2442,72 | 2938,37 | 27 | 30 | 27,86 |
| 317 | 0,95 | r | 27 | 35 | 35 | 35 | 27 | 36 | 2366,87 | 2635,41 | 2635,41 | 2337,08 | 28 | 34 | 64,35 |
| 317 | 0,95 | y | 28 | 38 | 38 | 38 | 28 | 39 | 2514,26 | 3437,88 | 3437,88 | 3025,5 | 28 | 37 | 85,21 |
| 333 | 0,85 | d | 25 | 28 | 28 | 28 | 25 | 28 | 7218,68 | 5417,91 | 5417,91 | 5434,92 | 25 | 27 | 90,71 |

| Mukherje problemi sonuçları devamı-1 | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 333 | 0,85 | r | 26 | 30 | 30 | 30 | 26 | 30 | 9351,73 | 8105,09 | 8105,09 | 8644,49 | 26 | 30 | 148,95 |
| 333 | 0,85 | y | 26 | 32 | 32 | 32 | 26 | 33 | 9347,69 | 9592,08 | 9592,08 | 9157,65 | 26 | 31 | 236,18 |
| 333 | 0,90 | d | 25 | 28 | 28 | 28 | 25 | 28 | 5021,61 | 5280,73 | 5280,73 | 5419,2 | 25 | 28 | 50,72 |
| 333 | 0,90 | r | 26 | 31 | 31 | 31 | 26 | 31 | 7217,62 | 5542,31 | 5542,31 | 5750,8 | 26 | 31 | 101,54 |
| 333 | 0,90 | y | 26 | 34 | 34 | 34 | 26 | 34 | 6299,86 | 6821,89 | 6821,89 | 6640,17 | 26 | 33 | 139,06 |
| 333 | 0,95 | d | 26 | 29 | 29 | 29 | 26 | 29 | 2144,41 | 1851,75 | 1851,75 | 1929,01 | 26 | 28 | 39,00 |
| 333 | 0,95 | r | 26 | 33 | 33 | 33 | 26 | 34 | 2754,37 | 2841,28 | 2841,28 | 2620,84 | 26 | 32 | 75,10 |
| 333 | 0,95 | y | 27 | 36 | 36 | 36 | 27 | 37 | 3002,79 | 3634,72 | 3634,72 | 3661,35 | 27 | 35 | 87,58 |
| 348 | 0,85 | d | 24 | 27 | 27 | 27 | 24 | 27 | 6611,64 | 5331,95 | 5331,95 | 4674,08 | 24 | 26 | 78,52 |
| 348 | 0,85 | r | 25 | 29 | 29 | 29 | 25 | 29 | 8272,24 | 8390,21 | 8390,21 | 7941,37 | 25 | 28 | 158,52 |
| 348 | 0,85 | y | 25 | 30 | 30 | 30 | 25 | 30 | 11240,5 | 10883,2 | 10883,2 | 10847,1 | 25 | 30 | 184,44 |
| 348 | 0,90 | d | 24 | 27 | 27 | 27 | 24 | 27 | 5309,57 | 3791,17 | 3791,17 | 3615,96 | 24 | 26 | 84,92 |
| 348 | 0,90 | r | 25 | 29 | 29 | 30 | 25 | 30 | 5989,85 | 8460,22 | 8460,22 | 4700 | 25 | 29 | 108,12 |
| 348 | 0,90 | y | 25 | 32 | 32 | 32 | 25 | 33 | 5375,25 | 6465,83 | 6465,83 | 5846,18 | 25 | 31 | 153,02 |
| 348 | 0,95 | d | 24 | 28 | 28 | 28 | 24 | 28 | 1862,01 | 1486,9 | 1486,9 | 1646,4 | 24 | 27 | 25,71 |
| 348 | 0,95 | r | 25 | 31 | 31 | 31 | 25 | 32 | 2246,97 | 2905,55 | 2905,55 | 2955,78 | 25 | 31 | 46,43 |
| 348 | 0,95 | y | 25 | 34 | 34 | 35 | 25 | 35 | 3040,64 | 3813,54 | 3813,54 | 2940,98 | 25 | 34 | 66,04 |
| 366 | 0,85 | d | 23 | 25 | 25 | 25 | 23 | 25 | 7197,75 | 5943,45 | 5943,45 | 5680,01 | 23 | 25 | 69,52 |
| 366 | 0,85 | r | 23 | 27 | 27 | 27 | 23 | 27 | 9593,23 | 9497,89 | 9497,89 | 8964,45 | 23 | 27 | 132,90 |
| 366 | 0,85 | y | 24 | 28 | 28 | 28 | 24 | 29 | 9166,36 | 12825,5 | 12825,5 | 12972,3 | 24 | 28 | 194,58 |
| 366 | 0,90 | d | 23 | 25 | 25 | 25 | 23 | 25 | 5275,51 | 4701,36 | 4701,36 | 5310,07 | 23 | 25 | 45,82 |
| 366 | 0,90 | r | 24 | 28 | 28 | 28 | 24 | 28 | 5539,43 | 5713,9 | 5713,9 | 5160,6 | 24 | 28 | 89,66 |
| 366 | 0,90 | y | 24 | 30 | 30 | 30 | 24 | 30 | 6152,13 | 6581,35 | 6581,35 | 6549,91 | 24 | 30 | 116,21 |
| 366 | 0,95 | d | 23 | 26 | 26 | 26 | 23 | 26 | 2395,33 | 1277,27 | 1277,27 | 1467,87 | 23 | 26 | 19,10 |
| 366 | 0,95 | r | 24 | 30 | 30 | 30 | 24 | 30 | 2850,82 | 2519,18 | 2519,18 | 2236,25 | 24 | 29 | 46,04 |

Mukherje problemi sonuçları devamı-2

| | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 366 | 0,95 | y | 24 | 32 | 32 | 32 | 24 | 33 | 2955,45 | 3456,77 | 3456,77 | 3647,55 | 24 | 32 | 60,70 |
| 385 | 0,85 | d | 22 | 24 | 24 | 24 | 22 | 24 | 8010,61 | 5168,57 | 5168,57 | 5130,21 | 22 | 23 | 105,50 |
| 385 | 0,85 | r | 22 | 25 | 25 | 25 | 22 | 25 | 11814,90 | 11305,72 | 11305,72 | 11278,67 | 23 | 25 | 147,29 |
| 385 | 0,85 | y | 23 | 27 | 27 | 27 | 23 | 27 | 10088,39 | 9580,61 | 9580,61 | 9532,87 | 23 | 27 | 157,82 |
| 385 | 0,90 | d | 22 | 24 | 24 | 24 | 22 | 24 | 5225,91 | 3620,46 | 3620,46 | 3439,84 | 22 | 24 | 44,81 |
| 385 | 0,90 | r | 22 | 27 | 27 | 27 | 22 | 27 | 5123,60 | 5380,40 | 5380,40 | 5179,86 | 23 | 26 | 94,58 |
| 385 | 0,90 | y | 23 | 28 | 28 | 28 | 23 | 28 | 6650,79 | 6580,02 | 6580,02 | 7018,07 | 23 | 28 | 112,02 |
| 385 | 0,95 | d | 22 | 25 | 25 | 25 | 22 | 25 | 2473,79 | 1538,23 | 1538,23 | 1610,43 | 22 | 24 | 28,40 |
| 385 | 0,95 | r | 23 | 28 | 28 | 28 | 23 | 28 | 2622,53 | 2618,61 | 2618,61 | 2469,85 | 23 | 28 | 38,54 |
| 385 | 0,95 | y | 23 | 30 | 30 | 30 | 23 | 31 | 4079,54 | 3608,39 | 3608,39 | 3441,87 | 23 | 30 | 56,30 |
| 406 | 0,85 | d | 21 | 22 | 22 | 22 | 21 | 22 | 12086,62 | 8335,96 | 8335,96 | 8229,41 | 21 | 22 | 72,38 |
| 406 | 0,85 | r | 21 | 24 | 24 | 24 | 21 | 24 | 9215,60 | 8822,32 | 8822,32 | 9604,81 | 22 | 24 | 121,77 |
| 406 | 0,85 | y | 21 | 25 | 25 | 25 | 21 | 25 | 10787,13 | 10569,62 | 10569,62 | 10087,32 | 22 | 25 | 166,04 |
| 406 | 0,90 | d | 21 | 23 | 23 | 23 | 21 | 23 | 5393,65 | 2931,73 | 2931,73 | 2202,59 | 21 | 23 | 41,39 |
| 406 | 0,90 | r | 21 | 25 | 25 | 25 | 21 | 25 | 5559,80 | 5086,08 | 5086,08 | 5527,97 | 22 | 25 | 73,68 |
| 406 | 0,90 | y | 22 | 27 | 27 | 27 | 22 | 27 | 5964,70 | 5785,75 | 5785,75 | 5521,98 | 22 | 26 | 118,40 |
| 406 | 0,95 | d | 21 | 23 | 23 | 23 | 21 | 23 | 2888,72 | 2281,59 | 2281,59 | 2225,48 | 21 | 23 | 20,84 |
| 406 | 0,95 | r | 22 | 26 | 26 | 26 | 22 | 26 | 2211,84 | 2867,33 | 2867,33 | 2760,34 | 22 | 26 | 40,64 |
| 406 | 0,95 | y | 22 | 28 | 28 | 28 | 22 | 29 | 2463,89 | 3931,36 | 3931,36 | 4249,28 | 22 | 28 | 55,56 |
| 430 | 0,85 | d | 20 | 21 | 21 | 21 | 20 | 21 | 8657,52 | 5919,92 | 5919,92 | 5926,82 | 20 | 21 | 61,81 |
| 430 | 0,85 | r | 20 | 23 | 23 | 23 | 20 | 23 | 7898,60 | 8582,05 | 8582,05 | 8522,64 | 20 | 22 | 208,19 |
| 430 | 0,85 | y | 20 | 24 | 24 | 24 | 20 | 24 | 10629,70 | 9077,43 | 9077,43 | 8793,37 | 21 | 24 | 140,09 |
| 430 | 0,90 | d | 20 | 21 | 21 | 21 | 20 | 21 | 7550,02 | 6959,20 | 6959,20 | 6619,39 | 20 | 21 | 43,91 |
| 430 | 0,90 | r | 20 | 23 | 23 | 23 | 20 | 24 | 5255,77 | 7312,38 | 7312,38 | 8816,28 | 20 | 23 | 81,41 |
| 430 | 0,90 | y | 20 | 25 | 25 | 25 | 20 | 25 | 6635,30 | 5938,92 | 5938,92 | 5624,97 | 21 | 25 | 91,89 |
| 430 | 0,95 | d | 20 | 22 | 22 | 22 | 20 | 22 | 2145,03 | 1530,81 | 1530,81 | 1447,08 | 20 | 22 | 17,81 |
| 430 | 0,95 | r | 20 | 24 | 24 | 25 | 20 | 25 | 2698,66 | 4327,88 | 4327,88 | 2292,64 | 20 | 24 | 44,49 |

Mukherje problemi sonuçları devamı-3

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 430 | 0,95 | y | 21 | 27 | 27 | 27 | 21 | 27 | 3251,96 | 2848,81 | 2848,81 | 2375,15 | 21 | 26 | 55,58 |
| 455 | 0,85 | d | 19 | 20 | 20 | 20 | 19 | 20 | 8480,63 | 4694,62 | 4694,62 | 4316,98 | 19 | 20 | 57,09 |
| 455 | 0,85 | r | 19 | 21 | 21 | 21 | 19 | 21 | 10640,93 | 11012,59 | 11012,59 | 9541,54 | 19 | 21 | 98,49 |
| 455 | 0,85 | y | 19 | 22 | 22 | 22 | 19 | 22 | 11953,03 | 11887,43 | 11887,43 | 12081,15 | 20 | 22 | 151,96 |
| 455 | 0,90 | d | 19 | 20 | 20 | 20 | 19 | 20 | 6172,27 | 4559,92 | 4559,92 | 4905,62 | 19 | 20 | 34,83 |
| 455 | 0,90 | r | 19 | 22 | 22 | 22 | 19 | 22 | 6718,36 | 5139,61 | 5139,61 | 5253,52 | 19 | 22 | 73,18 |
| 455 | 0,90 | y | 19 | 23 | 23 | 23 | 19 | 23 | 7389,24 | 6545,58 | 6545,58 | 6326,26 | 20 | 23 | 96,44 |
| 455 | 0,95 | d | 19 | 21 | 21 | 21 | 19 | 21 | 3005,20 | 1368,13 | 1368,13 | 1207,75 | 19 | 21 | 15,17 |
| 455 | 0,95 | r | 19 | 23 | 23 | 23 | 19 | 23 | 3119,86 | 3019,51 | 3019,51 | 3010,38 | 19 | 23 | 35,77 |
| 455 | 0,95 | y | 20 | 25 | 25 | 25 | 20 | 25 | 3511,68 | 3058,13 | 3058,13 | 3078,05 | 20 | 25 | 40,97 |
| 487 | 0,85 | d | 17 | 18 | 18 | 18 | 17 | 18 | 11093,28 | 8839,37 | 8839,37 | 9854,85 | 18 | 18 | 78,21 |
| 487 | 0,85 | r | 18 | 20 | 20 | 20 | 18 | 20 | 10067,19 | 9000,22 | 9000,22 | 8668,83 | 18 | 20 | 100,04 |
| 487 | 0,85 | y | 18 | 21 | 21 | 21 | 18 | 21 | 10630,89 | 8584,52 | 8584,52 | 8201,68 | 18 | 21 | 124,25 |
| 487 | 0,90 | d | 18 | 19 | 19 | 19 | 18 | 19 | 5855,79 | 2912,94 | 2912,94 | 2237,92 | 18 | 19 | 33,48 |
| 487 | 0,90 | r | 18 | 21 | 21 | 21 | 18 | 21 | 6765,88 | 5499,21 | 5499,21 | 4945,48 | 18 | 20 | 78,81 |
| 487 | 0,90 | y | 18 | 22 | 22 | 22 | 18 | 22 | 6152,07 | 6021,03 | 6021,03 | 5793,78 | 18 | 21 | 121,26 |
| 487 | 0,95 | d | 18 | 19 | 19 | 19 | 18 | 19 | 2500,33 | 1682,80 | 1682,80 | 1547,90 | 18 | 19 | 16,19 |
| 487 | 0,95 | r | 18 | 21 | 21 | 21 | 18 | 22 | 2875,75 | 3651,04 | 3651,04 | 4454,62 | 18 | 21 | 38,99 |
| 487 | 0,95 | y | 18 | 23 | 23 | 23 | 18 | 23 | 3322,06 | 2515,14 | 2515,14 | 2603,28 | 18 | 23 | 38,62 |
| 522 | 0,85 | d | 16 | 17 | 17 | 17 | 16 | 17 | 8280,40 | 5735,68 | 5735,68 | 5388,76 | 16 | 17 | 52,14 |
| 522 | 0,85 | r | 17 | 18 | 18 | 18 | 17 | 18 | 10664,05 | 9760,24 | 9760,24 | 9594,51 | 17 | 18 | 106,53 |
| 522 | 0,85 | y | 17 | 19 | 19 | 19 | 17 | 20 | 10920,64 | 11579,48 | 11579,48 | 11195,36 | 17 | 19 | 114,36 |
| 522 | 0,90 | d | 16 | 17 | 17 | 18 | 16 | 18 | 4834,68 | 7523,86 | 7523,86 | 2148,54 | 16 | 17 | 42,32 |
| 522 | 0,90 | r | 17 | 19 | 19 | 19 | 17 | 19 | 6521,47 | 4996,57 | 4996,57 | 4818,58 | 17 | 19 | 58,00 |
| 522 | 0,90 | y | 17 | 20 | 20 | 20 | 17 | 20 | 7390,08 | 5788,00 | 5788,00 | 5601,13 | 17 | 20 | 77,37 |
| 522 | 0,95 | d | 16 | 18 | 18 | 18 | 16 | 18 | 3148,47 | 1084,36 | 1084,36 | 1105,95 | 16 | 18 | 14,06 |
| 522 | 0,95 | r | 17 | 20 | 20 | 20 | 17 | 20 | 3169,96 | 2469,04 | 2469,04 | 2420,80 | 17 | 20 | 28,25 |

| Mukherje problemi sonuçları devamı-4 | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 522 | 0,95 | y | 17 | 21 | 21 | 21 | 17 | 21 | 3810,92 | 3192,46 | 3192,46 | 3007,57 | 17 | 21 | 38,76 |
| 561 | 0,85 | d | 15 | 16 | 16 | 16 | 15 | 16 | 8585,09 | 4627,41 | 4627,41 | 4681,68 | 15 | 16 | 42,41 |
| 561 | 0,85 | r | 15 | 17 | 17 | 17 | 15 | 17 | 12209,17 | 7547,70 | 7547,70 | 7003,59 | 16 | 17 | 81,80 |
| 561 | 0,85 | y | 16 | 18 | 18 | 18 | 16 | 18 | 10386,15 | 8540,02 | 8540,02 | 7457,02 | 16 | 18 | 108,49 |
| 561 | 0,90 | d | 15 | 16 | 16 | 16 | 15 | 16 | 7561,64 | 3188,39 | 3188,39 | 2927,22 | 15 | 16 | 32,14 |
| 561 | 0,90 | r | 16 | 18 | 18 | 18 | 16 | 18 | 7719,22 | 5020,38 | 5020,38 | 4307,06 | 16 | 17 | 56,89 |
| 561 | 0,90 | y | 16 | 18 | 18 | 18 | 16 | 18 | 7841,79 | 7909,92 | 7909,92 | 8033,26 | 16 | 18 | 84,43 |
| 561 | 0,95 | d | 15 | 17 | 17 | 17 | 15 | 17 | 3807,35 | 1218,78 | 1218,78 | 880,05 | 15 | 16 | 15,20 |
| 561 | 0,95 | r | 16 | 18 | 18 | 18 | 16 | 18 | 3826,83 | 2723,69 | 2723,69 | 2622,04 | 16 | 18 | 29,30 |
| 561 | 0,95 | y | 16 | 20 | 20 | 20 | 16 | 20 | 3857,14 | 2414,90 | 2414,90 | 2562,03 | 16 | 19 | 49,36 |
| 608 | 0,85 | d | 14 | 15 | 15 | 15 | 14 | 15 | 8893,62 | 3274,42 | 3274,42 | 3153,05 | 14 | 15 | 37,53 |
| 608 | 0,85 | r | 14 | 16 | 16 | 16 | 14 | 16 | 12712,92 | 7549,46 | 7549,46 | 6991,31 | 15 | 16 | 73,33 |
| 608 | 0,85 | y | 14 | 16 | 16 | 16 | 14 | 16 | 11336,14 | 9637,41 | 9637,41 | 9513,19 | 15 | 16 | 108,09 |
| 608 | 0,90 | d | 14 | 15 | 15 | 15 | 14 | 15 | 7373,15 | 2394,41 | 2394,41 | 1873,38 | 14 | 15 | 24,91 |
| 608 | 0,90 | r | 14 | 16 | 16 | 16 | 14 | 16 | 7271,32 | 4259,67 | 4259,67 | 4821,39 | 15 | 16 | 49,98 |
| 608 | 0,90 | y | 15 | 17 | 17 | 17 | 15 | 17 | 7564,41 | 5583,26 | 5583,26 | 5167,43 | 15 | 17 | 55,58 |
| 608 | 0,95 | d | 14 | 15 | 15 | 15 | 14 | 15 | 3310,81 | 1735,98 | 1735,98 | 1897,22 | 14 | 15 | 13,41 |
| 608 | 0,95 | r | 15 | 17 | 17 | 17 | 15 | 17 | 3222,11 | 2308,62 | 2308,62 | 1679,80 | 15 | 17 | 22,62 |
| 608 | 0,95 | y | 15 | 18 | 18 | 18 | 15 | 18 | 3152,73 | 2608,85 | 2608,85 | 2165,65 | 15 | 18 | 29,89 |

Arc1 Problemi

| | | | Sezgisel Yaklaşım İstasyon Sayısı | | | | Maliyete Yönelik Sezgisel | | | | | | Üst Sezgisel Yaklaşım | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | İstasyon Sayısı | | Tamamlanmama Maliyeti | | | | | | |
| c | 1-α | cv | Kmin | r | c* | cv | Kmin | Bulunan | MYS | r | C* | cv | Kmin | Bulunan İst. Say. | Tamamlanmama Maliyeti |
| 5853 | 0,85 | d | 26 | 28 | 28 | 28 | 26 | 28 | 46197,5 | 27531,2 | 27993,4 | 23860,9 | 25 | 28 | 1231,73 |
| 5853 | 0,85 | r | 26 | 31 | 31 | 31 | 26 | 31 | 31355 | 27310 | 28996,8 | 26244,3 | 26 | 30 | 3044,99 |
| 5853 | 0,85 | y | 26 | 32 | 32 | 32 | 26 | 32 | 50622,3 | 42631,7 | 46551,4 | 41938,3 | 25 | 32 | 3821,49 |
| 5853 | 0,90 | d | 26 | 29 | 29 | 29 | 26 | 29 | 9907,55 | 9018,28 | 9018,28 | 8928,86 | 26 | 28 | 1250,24 |
| 5853 | 0,90 | r | 26 | 32 | 32 | 32 | 26 | 32 | 18942,3 | 25867,7 | 36605,5 | 26927,2 | 26 | 31 | 2113,32 |
| 5853 | 0,90 | y | 26 | 34 | 34 | 34 | 26 | 34 | 25405,7 | 24992,7 | 27264,9 | 25142,2 | 25 | 34 | 2291,50 |
| 5853 | 0,95 | d | 26 | 30 | 30 | 30 | 26 | 30 | 4956,81 | 2987,48 | 3428,19 | 3074,17 | 26 | 29 | 491,41 |
| 5853 | 0,95 | r | 26 | 34 | 34 | 34 | 26 | 34 | 8232,03 | 9623,29 | 10277,4 | 9492,45 | 26 | 33 | 940,03 |
| 5853 | 0,95 | y | 24 | 27 | 27 | 27 | 24 | 27 | 19331,9 | 15115,2 | 15175,9 | 12933,9 | 25 | 36 | 1497,01 |
| 6161 | 0,85 | d | 24 | 27 | 27 | 27 | 24 | 27 | 19331,86 | 15115,17 | 15175,87 | 12933,91 | 24 | 26 | 1797,16 |
| 6161 | 0,85 | r | 25 | 29 | 29 | 29 | 25 | 29 | 44145,37 | 33440,32 | 34735,86 | 36125,13 | 25 | 28 | 2355,07 |
| 6161 | 0,85 | y | 25 | 30 | 30 | 30 | 25 | 30 | 34448,38 | 46478,57 | 46478,57 | 55521,95 | 24 | 30 | 3685,46 |
| 6161 | 0,90 | d | 24 | 27 | 27 | 27 | 24 | 27 | 18352,17 | 12597,63 | 12626,54 | 12309,87 | 24 | 27 | 738,46 |
| 6161 | 0,90 | r | 25 | 30 | 30 | 30 | 25 | 30 | 12742,01 | 21306,83 | 22298,34 | 19798,87 | 25 | 29 | 2624,65 |
| 6161 | 0,90 | y | 25 | 32 | 32 | 32 | 25 | 32 | 28754,37 | 24162,57 | 24177,89 | 23834,08 | 24 | 32 | 2162,87 |
| 6161 | 0,95 | d | 25 | 28 | 28 | 28 | 25 | 28 | 11847,64 | 5478,75 | 6523,71 | 5249,56 | 24 | 27 | 694,74 |
| 6161 | 0,95 | r | 25 | 32 | 32 | 32 | 25 | 32 | 7689,46 | 10815,51 | 11276,22 | 10271,10 | 25 | 31 | 924,77 |
| 6161 | 0,95 | y | 25 | 34 | 34 | 35 | 25 | 34 | 9007,76 | 9169,43 | 9595,50 | 8422,99 | 24 | 34 | 1273,60 |
| 6502 | 0,85 | d | 23 | 27 | 25 | 25 | 23 | 25 | 17670,30 | 23645,83 | 25418,69 | 25842,89 | 23 | 25 | 1164,53 |
| 6502 | 0,85 | r | 23 | 25 | 27 | 27 | 23 | 27 | 21345,09 | 25575,84 | 41824,20 | 28320,55 | 23 | 27 | 2298,52 |

Arc1 problemi sonuçları devamı-1

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 6502 | 0,85 | y | 24 | 29 | 29 | 29 | 24 | 29 | 36536,27 | 32533,13 | 33945,09 | 32805,92 | 23 | 28 | 3562,76 |
| 6502 | 0,90 | d | 23 | 26 | 26 | 26 | 23 | 26 | 6861,54 | 8030,65 | 8755,26 | 8109,65 | 23 | 25 | 1226,63 |
| 6502 | 0,90 | r | 24 | 28 | 28 | 28 | 24 | 29 | 25558,06 | 32963,64 | 34266,63 | 13918,01 | 24 | 28 | 1439,26 |
| 6502 | 0,90 | y | 24 | 30 | 30 | 30 | 24 | 30 | 24386,66 | 22917,60 | 22917,60 | 23212,69 | 23 | 30 | 2007,94 |
| 6502 | 0,95 | d | 23 | 26 | 26 | 26 | 23 | 26 | 7552,22 | 10470,95 | 12894,89 | 10117,28 | 23 | 26 | 336,91 |
| 6502 | 0,95 | r | 24 | 30 | 30 | 30 | 24 | 30 | 6855,58 | 8915,16 | 8957,46 | 8534,86 | 24 | 29 | 906,39 |
| 6502 | 0,95 | y | 24 | 32 | 32 | 32 | 24 | 32 | 8876,00 | 12906,15 | 12906,15 | 12013,75 | 23 | 32 | 1104,64 |
| 6886 | 0,85 | d | 22 | 24 | 24 | 24 | 22 | 24 | 41204,33 | 14190,25 | 16349,68 | 17791,54 | 22 | 23 | 1855,04 |
| 6886 | 0,85 | r | 22 | 26 | 26 | 26 | 22 | 26 | 27710,17 | 24858,73 | 26646,55 | 27902,90 | 22 | 25 | 2497,54 |
| 6886 | 0,85 | y | 22 | 27 | 27 | 27 | 22 | 27 | 43833,75 | 36381,82 | 38850,81 | 36302,91 | 21 | 26 | 2652,59 |
| 6886 | 0,90 | d | 22 | 24 | 24 | 24 | 22 | 24 | 12050,01 | 16879,33 | 17749,21 | 17575,33 | 22 | 24 | 596,27 |
| 6886 | 0,90 | r | 22 | 27 | 26 | 26 | 22 | 26 | 20406,68 | 16832,16 | 40184,54 | 37699,23 | 22 | 26 | 1484,20 |
| 6886 | 0,90 | y | 23 | 28 | 28 | 28 | 23 | 28 | 17750,96 | 26730,49 | 27628,45 | 29004,48 | 21 | 28 | 1877,62 |
| 6886 | 0,95 | d | 22 | 25 | 25 | 25 | 22 | 25 | 3111,83 | 3642,56 | 3989,21 | 3533,11 | 22 | 24 | 564,01 |
| 6886 | 0,95 | r | 23 | 28 | 28 | 28 | 23 | 28 | 14038,01 | 8998,30 | 8998,30 | 10355,88 | 22 | 27 | 935,11 |
| 6886 | 0,95 | y | 23 | 30 | 30 | 30 | 23 | 30 | 13559,72 | 12301,90 | 12496,68 | 11796,22 | 21 | 30 | 947,87 |
| 7315 | 0,85 | d | 21 | 23 | 23 | 23 | 21 | 23 | 17306,35 | 12168,17 | 12168,17 | 11602,99 | 20 | 22 | 1000,17 |
| 7315 | 0,85 | r | 21 | 24 | 24 | 24 | 21 | 24 | 47367,60 | 32161,56 | 32323,84 | 31845,86 | 21 | 24 | 1731,18 |
| 7315 | 0,85 | y | 21 | 25 | 25 | 25 | 21 | 25 | 42523,55 | 42039,96 | 42686,02 | 41082,36 | 20 | 25 | 2555,53 |
| 7315 | 0,90 | d | 21 | 23 | 23 | 23 | 21 | 23 | 13889,17 | 8456,16 | 9251,24 | 9866,49 | 21 | 22 | 1062,26 |
| 7315 | 0,90 | r | 21 | 25 | 25 | 25 | 21 | 25 | 17254,33 | 16333,30 | 17508,37 | 18326,07 | 21 | 24 | 1799,73 |
| 7315 | 0,90 | y | 21 | 26 | 26 | 26 | 21 | 26 | 28558,74 | 28906,97 | 31515,02 | 28197,77 | 20 | 26 | 1712,67 |
| 7315 | 0,95 | d | 21 | 23 | 23 | 24 | 21 | 23 | 14031,26 | 10759,66 | 10759,66 | 2899,09 | 21 | 23 | 275,18 |
| 7315 | 0,95 | r | 21 | 26 | 26 | 26 | 21 | 26 | 11504,45 | 10304,83 | 10622,80 | 11346,12 | 21 | 26 | 523,46 |
| 7315 | 0,95 | y | 22 | 28 | 28 | 28 | 22 | 28 | 13734,91 | 11165,86 | 11867,80 | 11856,66 | 20 | 28 | 834,98 |

Arc1 problemi sonuçları devamı-2

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 9049 | 0,85 | d | 17 | 18 | 18 | 18 | 17 | 18 | 13687,87 | 12538,49 | 14815,88 | 8375,41 | 17 | 18 | 642,74 |
| 9049 | 0,85 | r | 17 | 19 | 19 | 19 | 17 | 19 | 33345,28 | 28676,33 | 28676,33 | 27049,54 | 17 | 19 | 1563,04 |
| 9049 | 0,85 | y | 17 | 20 | 20 | 20 | 17 | 20 | 51062,82 | 41568,53 | 43159,40 | 47074,94 | 16 | 20 | 1929,79 |
| 9049 | 0,90 | d | 17 | 18 | 18 | 18 | 17 | 18 | 8417,77 | 10474,73 | 10474,73 | 7923,93 | 17 | 18 | 460,62 |
| 9049 | 0,90 | r | 17 | 20 | 20 | 20 | 17 | 20 | 22975,57 | 21828,25 | 22762,31 | 17737,55 | 17 | 19 | 1338,08 |
| 9049 | 0,90 | y | 17 | 21 | 21 | 21 | 17 | 21 | 38098,88 | 19132,07 | 20904,58 | 19826,07 | 16 | 20 | 1805,51 |
| 9049 | 0,95 | d | 17 | 18 | 18 | 18 | 17 | 19 | 2153,92 | 18273,21 | 20579,49 | 17613,65 | 17 | 18 | 361,41 |
| 9049 | 0,95 | r | 17 | 21 | 21 | 21 | 17 | 21 | 11695,48 | 7881,93 | 7881,93 | 6726,34 | 17 | 20 | 596,43 |
| 9049 | 0,95 | y | 17 | 22 | 22 | 22 | 17 | 22 | 14505,83 | 11231,44 | 11787,09 | 9999,18 | 16 | 22 | 577,07 |
| 10578 | 0,85 | d | 14 | 15 | 15 | 15 | 14 | 15 | 20362,2 | 20280,7 | 22317 | 17539,9 | 14 | 15 | 638,75 |
| 10578 | 0,85 | r | 15 | 16 | 16 | 16 | 15 | 16 | 40203,8 | 32204,1 | 33014,9 | 29300,4 | 15 | 16 | 1333,00 |
| 10578 | 0,85 | y | 15 | 17 | 17 | 17 | 15 | 17 | 46456,7 | 32728,4 | 33899,4 | 31159,1 | 14 | 17 | 1645,90 |
| 10578 | 0,90 | d | 14 | 15 | 15 | 15 | 14 | 15 | 20757,9 | 23284,2 | 24627 | 20679,9 | 14 | 15 | 568,50 |
| 10578 | 0,90 | r | 15 | 17 | 17 | 17 | 15 | 17 | 24972 | 16445,9 | 17672,8 | 15360,7 | 15 | 16 | 1230,86 |
| 10578 | 0,90 | y | 15 | 17 | 17 | 17 | 15 | 17 | 40027,1 | 28701,6 | 30946 | 29939,5 | 14 | 17 | 1364,91 |
| 10578 | 0,95 | d | 14 | 16 | 16 | 16 | 14 | 16 | 5919,28 | 2905,9 | 3409,76 | 2176,99 | 14 | 16 | 157,09 |
| 10578 | 0,95 | r | 15 | 17 | 17 | 17 | 15 | 17 | 18673 | 12261,4 | 12882,7 | 11178,1 | 15 | 17 | 436,08 |
| 10578 | 0,95 | y | 15 | 18 | 18 | 18 | 15 | 18 | 12338,6 | 13100 | 13700,7 | 13693,4 | 14 | 18 | 650,10 |
| 11705 | 0,85 | d | 13 | 14 | 14 | 14 | 13 | 14 | 55433,3 | 15084,5 | 18014,4 | 11726,8 | 13 | 14 | 475,40 |
| 11705 | 0,85 | r | 13 | 15 | 14 | 15 | 13 | 15 | 41465,9 | 27991,8 | 76510,4 | 27406,3 | 13 | 14 | 1579,94 |
| 11705 | 0,85 | y | 13 | 15 | 15 | 15 | 13 | 15 | 49973,9 | 36009 | 36997,6 | 34475,7 | 13 | 15 | 1463,77 |
| 11705 | 0,90 | d | 13 | 14 | 14 | 14 | 13 | 14 | 13854,3 | 7239,34 | 9496,48 | 7445,53 | 13 | 14 | 294,41 |
| 11705 | 0,90 | r | 13 | 15 | 15 | 15 | 13 | 15 | 29530,8 | 19269,5 | 19269,5 | 20585,6 | 13 | 15 | 764,03 |
| 11705 | 0,90 | y | 13 | 15 | 15 | 15 | 13 | 15 | 43555,2 | 43316,5 | 43316,5 | 43826,1 | 13 | 15 | 1508,02 |
| 11705 | 0,95 | d | 13 | 14 | 14 | 14 | 13 | 14 | 3913,1 | 4358,82 | 4901,12 | 3974,3 | 13 | 14 | 135,56 |

Arc1 problemi sonuçları devamı-3

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 11705 | 0,95 | r | 13 | 16 | 16 | 16 | 13 | 16 | 17693,7 | 7555,44 | 8455,5 | 6642,77 | 13 | 15 | 452,29 |
| 11705 | 0,95 | y | 14 | 16 | 16 | 16 | 14 | 16 | 16337,5 | 16205,3 | 16508,3 | 15913,5 | 13 | 16 | 608,61 |
| 13005 | 0,85 | d | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 33872,3 | 52305,1 | 57502,7 | 46990,7 | 12 | 12 | 629,14 |
| 13005 | 0,85 | r | 12 | 13 | 13 | 13 | 12 | 13 | 45138 | 28635,4 | 34219,8 | 30727,5 | 12 | 13 | 1045,46 |
| 13005 | 0,85 | y | 12 | 13 | 13 | 13 | 12 | 13 | 55371,3 | 52720,1 | 55000,4 | 57147 | 12 | 13 | 1638,35 |
| 13005 | 0,90 | d | 12 | 13 | 13 | 13 | 12 | 12 | 32297,3 | 7999,54 | 10147,9 | 6211,54 | 12 | 12 | 556,68 |
| 13005 | 0,90 | r | 12 | 13 | 13 | 13 | 12 | 13 | 27364,7 | 30777 | 31193,8 | 28503 | 12 | 13 | 699,63 |
| 13005 | 0,90 | y | 12 | 14 | 14 | 14 | 12 | 14 | 32594,7 | 21819,4 | 22553,3 | 22058,4 | 12 | 14 | 820,22 |
| 13005 | 0,95 | d | 12 | 13 | 13 | 13 | 12 | 13 | 17615,9 | 3586,3 | 3684,77 | 2687,34 | 12 | 13 | 122,07 |
| 13005 | 0,95 | r | 12 | 14 | 14 | 14 | 12 | 14 | 16743,2 | 7623,01 | 7623,01 | 10365,5 | 12 | 14 | 297,74 |
| 13005 | 0,95 | y | 12 | 15 | 14 | 15 | 12 | 14 | 26219,8 | 8513,57 | 9148,68 | 7622,88 | 12 | 14 | 817,03 |
| 15747 | 0,85 | d | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 57972,5 | 48908,8 | 55970,9 | 47819,2 | 10 | 10 | 391,39 |
| 15747 | 0,85 | r | 10 | 11 | 11 | 11 | 10 | 11 | 59632,6 | 30208,7 | 32717,3 | 30938,9 | 10 | 11 | 838,71 |
| 15747 | 0,85 | y | 10 | 11 | 11 | 11 | 10 | 11 | 57363,7 | 35977,9 | 36854,6 | 33691,1 | 10 | 11 | 1057,94 |
| 15747 | 0,90 | d | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 25264,4 | 29669,7 | 30956,1 | 34311,2 | 10 | 10 | 283,32 |
| 15747 | 0,90 | r | 10 | 11 | 11 | 11 | 10 | 11 | 43530 | 20364,7 | 21701,7 | 20835,2 | 10 | 11 | 500,49 |
| 15747 | 0,90 | y | 10 | 11 | 11 | 11 | 10 | 11 | 43585,3 | 28005,9 | 28420 | 29228,9 | 10 | 11 | 781,09 |
| 15747 | 0,95 | d | 10 | 10 | 11 | 11 | 10 | 11 | 17937,8 | 2572,24 | 27262 | 2645,24 | 10 | 10 | 217,55 |
| 15747 | 0,95 | r | 10 | 11 | 11 | 11 | 10 | 12 | 21263,2 | 23373,1 | 24251,9 | 16649,6 | 10 | 11 | 265,89 |
| 15747 | 0,95 | y | 10 | 12 | 12 | 12 | 10 | 12 | 16945,2 | 10760,1 | 11400,1 | 10260,6 | 10 | 12 | 303,36 |

Arc2 Problemi

| | | | Sezgisel Yaklaşım İstasyon Sayısı | | | | Maliyete Yönelik Sezgisel | | | | | | Üst Sezgisel Yaklaşım | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | İstasyon Sayısı | | Tamamlanmama Maliyeti | | | | | | |
| c | 1-α | cv | Kmin | r | c* | cv | Kmin | Bulunan | MYS | r | C* | cv | Kmin | Bulunan İst. Say. | Tamamlanmama Maliyeti |
| 10512 | 0,85 | d | 30 | 33 | 33 | 33 | 30 | 33 | 59882,28 | 56448,32 | 56448,32 | 59355,04 | 30 | 32 | 4164,27 |
| 10512 | 0,85 | r | 30 | 36 | 36 | 36 | 30 | 37 | 95365,74 | 127261,9 | 127261,9 | 130759,5 | 30 | 34 | 6496,29 |
| 10512 | 0,85 | y | 30 | 38 | 38 | 38 | 30 | 39 | 126375,2 | 139387,4 | 139387,4 | 143040,7 | 30 | 37 | 11433,17 |
| 10512 | 0,90 | d | 30 | 33 | 33 | 33 | 30 | 33 | 50684,68 | 56134,21 | 56134,21 | 30524,9 | 30 | 33 | 2140,96 |
| 10512 | 0,90 | r | 30 | 38 | 38 | 38 | 30 | 38 | 72689,29 | 79580,63 | 79580,63 | 80190,1 | 30 | 36 | 4889,63 |
| 10512 | 0,90 | y | 31 | 41 | 41 | 41 | 31 | 42 | 86814,81 | 99022,84 | 99022,84 | 95651,39 | 31 | 39 | 6931,66 |
| 10512 | 0,95 | d | 30 | 34 | 34 | 34 | 30 | 34 | 23998,54 | 27560,69 | 27560,69 | 27560,69 | 30 | 34 | 1098,22 |
| 10512 | 0,95 | r | 31 | 41 | 41 | 41 | 31 | 41 | 23982,86 | 31920,66 | 31920,66 | 31920,66 | 31 | 38 | 2658,54 |
| 10512 | 0,95 | y | 31 | 44 | 44 | 44 | 31 | 45 | 31417,95 | 38454,59 | 38454,59 | 47319,67 | 31 | 43 | 4360,25 |
| 10932 | 0,85 | d | 28 | 31 | 31 | 32 | 28 | 31 | 144068 | 115015,4 | 115015,4 | 52293,26 | 28 | 31 | 3606,07 |
| 10932 | 0,85 | r | 29 | 35 | 35 | 35 | 29 | 35 | 99733,74 | 126327 | 126327 | 132267,5 | 29 | 33 | 7292,61 |
| 10932 | 0,85 | y | 29 | 36 | 36 | 36 | 29 | 37 | 96992,89 | 170429,4 | 170429,4 | 182026,2 | 29 | 36 | 9479,63 |
| 10932 | 0,90 | d | 29 | 32 | 32 | 32 | 29 | 32 | 57270,58 | 40349,64 | 40349,64 | 42991,62 | 29 | 31 | 3389,95 |
| 10932 | 0,90 | r | 29 | 36 | 36 | 36 | 29 | 37 | 50220,76 | 76203,11 | 76203,11 | 76704,22 | 29 | 34 | 5520,51 |
| 10932 | 0,90 | y | 29 | 38 | 38 | 38 | 29 | 39 | 37939,27 | 18503,82 | 18503,82 | 21528,44 | 30 | 38 | 6542,49 |
| 10932 | 0,95 | d | 29 | 33 | 33 | 33 | 29 | 33 | 38330,45 | 20754,69 | 20754,69 | 37875,12 | 29 | 32 | 1436,14 |
| 10932 | 0,95 | r | 30 | 39 | 39 | 39 | 30 | 39 | 41108 | 36323,83 | 36323,83 | 38119,32 | 29 | 36 | 2726,51 |
| 10932 | 0,95 | y | 30 | 42 | 42 | 42 | 30 | 43 | 37889,17 | 49987,15 | 49987,15 | 49987,15 | 30 | 41 | 3677,08 |
| 11388 | 0,85 | d | 27 | 30 | 30 | 30 | 27 | 30 | 69929,31 | 73876,5 | 73876,5 | 69957,68 | 27 | 29 | 5726,47 |
| 11388 | 0,85 | r | 28 | 33 | 33 | 33 | 28 | 34 | 119995,5 | 129287,9 | 129287,9 | 134023,2 | 28 | 32 | 6019,29 |

| Arc2 problemi sonuçları devamı-1 | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 11388 | 0,85 | y | 28 | 35 | 35 | 35 | 28 | 36 | 144538,2 | 125854,9 | 125854,9 | 125854,9 | 28 | 34 | 10015,63 |
| 11388 | 0,90 | d | 27 | 31 | 31 | 31 | 27 | 31 | 44742,7 | 36006,16 | 36006,16 | 29356,99 | 27 | 30 | 2272,17 |
| 11388 | 0,90 | r | 28 | 35 | 35 | 35 | 28 | 35 | 76901,2 | 76218,11 | 76218,11 | 78720,63 | 28 | 33 | 4189,11 |
| 11388 | 0,90 | y | 28 | 36 | 36 | 37 | 28 | 37 | 117832,3 | 73210,65 | 73210,65 | 84396,41 | 28 | 36 | 6575,65 |
| 11388 | 0,95 | d | 28 | 32 | 32 | 32 | 28 | 31 | 37178,95 | 15395,32 | 15395,32 | 15101,76 | 28 | 31 | 1094,65 |
| 11388 | 0,95 | r | 28 | 37 | 37 | 37 | 28 | 37 | 28929,8 | 32203,72 | 32203,72 | 30987,94 | 28 | 35 | 1928,06 |
| 11388 | 0,95 | y | 29 | 40 | 40 | 39 | 29 | 41 | 34129,42 | 39457,36 | 39457,36 | 39457,36 | 29 | 39 | 3467,29 |
| 11884 | 0,85 | d | 26 | 29 | 29 | 29 | 26 | 29 | 63140,83 | 69848,6 | 69848,6 | 77828,11 | 26 | 28 | 3876,26 |
| 11884 | 0,85 | r | 27 | 32 | 32 | 32 | 27 | 32 | 154104 | 95202,76 | 95202,76 | 101309,1 | 27 | 30 | 7211,05 |
| 11884 | 0,85 | y | 27 | 33 | 33 | 33 | 27 | 34 | 54456,12 | 73925,76 | 73925,76 | 23708,97 | 27 | 32 | 11741,48 |
| 11884 | 0,90 | d | 26 | 29 | 29 | 30 | 26 | 29 | 59981,34 | 101525,8 | 101525,8 | 21311,28 | 26 | 29 | 2014,80 |
| 11884 | 0,90 | r | 27 | 33 | 33 | 33 | 27 | 33 | 86369 | 67974,68 | 67974,68 | 74135,85 | 27 | 31 | 5033,15 |
| 11884 | 0,90 | y | 27 | 35 | 35 | 35 | 27 | 36 | 95335,39 | 81029,29 | 81029,29 | 81029,29 | 27 | 34 | 6802,00 |
| 11884 | 0,95 | d | 26 | 30 | 30 | 30 | 26 | 30 | 35160,19 | 31870,7 | 31870,7 | 9521,59 | 26 | 29 | 2027,42 |
| 11884 | 0,95 | r | 27 | 35 | 35 | 35 | 27 | 35 | 26652,43 | 40077,25 | 40077,25 | 39921,75 | 27 | 33 | 2190,44 |
| 11884 | 0,95 | y | 28 | 37 | 37 | 38 | 28 | 38 | 32625,58 | 35530,66 | 35530,66 | 36113,97 | 28 | 37 | 3187,48 |
| 12424 | 0,85 | d | 25 | 27 | 27 | 27 | 25 | 27 | 134902 | 91599,5 | 91599,5 | 88935,27 | 25 | 27 | 2932,35 |
| 12424 | 0,85 | r | 26 | 30 | 30 | 30 | 26 | 31 | 112026,9 | 142585,1 | 142585,1 | 117671 | 25 | 29 | 5463,90 |
| 12424 | 0,85 | y | 26 | 31 | 31 | 31 | 26 | 32 | 108040,7 | 186979,7 | 186979,7 | 124549,3 | 26 | 31 | 8388,40 |
| 12424 | 0,90 | d | 25 | 28 | 28 | 28 | 25 | 28 | 85424,53 | 44886,34 | 44886,34 | 44886,34 | 25 | 27 | 2865,53 |
| 12424 | 0,90 | r | 26 | 32 | 32 | 32 | 26 | 32 | 84173,49 | 55122,35 | 55122,35 | 56252,14 | 26 | 30 | 3753,21 |
| 12424 | 0,90 | y | 26 | 33 | 33 | 33 | 26 | 34 | 76763,62 | 88489,24 | 88489,24 | 82323,15 | 26 | 33 | 5276,68 |
| 12424 | 0,95 | d | 25 | 29 | 29 | 29 | 25 | 29 | 48101,59 | 19587,8 | 19587,8 | 19261,41 | 25 | 28 | 1093,07 |
| 12424 | 0,95 | r | 26 | 33 | 33 | 33 | 26 | 34 | 44311,91 | 27254,88 | 27254,88 | 27764,95 | 26 | 32 | 1681,79 |
| 12424 | 0,95 | y | 26 | 36 | 36 | 36 | 26 | 36 | 53898,46 | 40106,37 | 40106,37 | 38349,28 | 26 | 35 | 3112,40 |

| Arc2 problemi sonuçları devmaı-2 | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 13014 | 0,85 | d | 24 | 26 | 26 | 26 | 24 | 26 | 158909,38 | 71998,37 | 71998,37 | 70619,28 | 24 | 26 | 2586,51 |
| 13014 | 0,85 | r | 24 | 29 | 29 | 29 | 24 | 29 | 153548,95 | 112113,43 | 112113,43 | 120204,74 | 25 | 27 | 7184,21 |
| 13014 | 0,85 | y | 25 | 30 | 30 | 30 | 25 | 31 | 157544,44 | 125081,81 | 125081,81 | 122489,68 | 25 | 29 | 8816,10 |
| 13014 | 0,90 | d | 24 | 26 | 26 | 27 | 24 | 26 | 138474,49 | 26797,52 | 26797,52 | 19968,00 | 24 | 26 | 2110,74 |
| 13014 | 0,90 | r | 25 | 30 | 30 | 30 | 25 | 30 | 104618,37 | 73653,48 | 73653,48 | 75601,34 | 25 | 28 | 4407,22 |
| 13014 | 0,90 | y | 25 | 32 | 32 | 32 | 25 | 32 | 105390,15 | 77636,89 | 77636,89 | 77636,89 | 25 | 31 | 5104,79 |
| 13014 | 0,95 | d | 24 | 27 | 27 | 27 | 24 | 27 | 35392,88 | 23393,33 | 23393,33 | 21639,93 | 24 | 27 | 827,36 |
| 13014 | 0,95 | r | 25 | 34 | 34 | 34 | 25 | 34 | 45255,37 | 27905,32 | 27905,32 | 27905,32 | 25 | 30 | 1659,07 |
| 13014 | 0,95 | y | 25 | 32 | 32 | 32 | 25 | 32 | 46962,58 | 27699,86 | 27699,86 | 31139,96 | 25 | 33 | 2978,79 |

# ÖZGEÇMİŞ

## KİŞİSEL BİLGİLER


| | |
|---|---|
| Adı Soyadı | : Gökhan SEÇME |
| Uyruğu | : Türkiye (T.C.) |
| Doğum Tarihi ve Yeri | : 20.11.1979, Kayseri |
| e-posta | : gsecme@nevsehir.edu.tr |
| Yazışma Adresi | : Nevşehir Üniversitesi, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, Avanos yolu üzeri, 50300, Nevşehir |


## EĞİTİM BİLGİLERİ

| Derece | Kurum | Mezuniyet |
|---|---|---|
| Yüksek Lisans | EÜ Sosyal Bilimler Enstitüsü | 2006 |
| Lisans | EÜ Mühendislik Fakültesi | 2001 |
| Lise | Sami Yangın Anadolu Tic. L. | 1996 |

## İŞ BİLGİLERİ

| Yıl | Kurum | Görev |
|---|---|---|
| 2007 – Halen | Nevşehir Ü. İİBF | Arş. Gör. |
| 2001 – 2007 | Erciyes Ü. Nevşehir İİBF | Arş. Gör. |

## YABANCI DİL

İngilizce

## YAYINLAR

**A. Uluslararası Hakemli Dergilerde Yayımlanan Makaleler (SSCI, SCI-Expanded veya AHCI kapsamındaki dergilerde):**

Çoban, O., Seçme, G., 2005. Prediction of socio-economical consequences of privatization at the firm level with fuzzy cognitive mapping. *Information Sciences,* 169, pp. 131-154.

Seçme, G., Özbakır, L., A Hyper Heuristic Approach to Stochastic Parallel Assembly Line Balancing Problem with Machine/Equipment Costs, in review.

**B. İlgili Alanda Önde Gelen Ülkelerin Hakemli Bilimsel/Mesleki Dergilerinde Yayımlanmış Olan Makaleler:**

Çoban, O., Yalçın Seçme, N., Seçme, G., Özesmi, U., 2006. An Empirical Analysis of Firms' strategies in the Turkish Automobile Market, Economic and Business Review, Vol. 8, No 2, pp:117-141.

Çoban, O., Seçme, G., Yalçın, N., 2003. Analysis of Consumer Behavior in The Market For Used Cars Through Fuzzy Cognitive Mapping Method: The Case of Nevşehir. *IJCI Proceedings of International Conference on Signal Processing,* Volume:1, Number:2, pp:406-423.

**C. Uluslararası Bilimsel Toplantılarda Sunulan ve Bildiri Kitabında (Proceedings) Basılan Bildiriler:**

Çoban, O., Seçme, G., 2002. Socio-Economic Manipulation of Privatization: An Empirical Analysis at the Firm Level with Fuzzy Cognitive Mapping. 6. International Congress of Economics, Middle East Techniqual University, 11-14 October 2002, Ankara, Turkey.

Çoban, O., Seçme G., Yalçın, N., Consumer Behavior in Used Car Market with Fuzzy Cognitive Mapping, The Case of Nevşehir. International Symposium of Signal Processing, 2003, Çanakkale, Turkey.

Yalçın Seçme, N., Seçme G., Çoban O., Özesmi U., Firm Strategies in Non-cooperative Games: A Contribution to the Game Theory with Fuzzy Cognitive Mapping,. 11$^{th}$ IFAC Symposium Computational Economics & Financial and Industrial Systems CEFIS 2007, Doğuş University, October 9-11, 2007, İstanbul, Turkey.

Seçme, G., Ozbakır, L., Özcan, E., 2012. Hyper Heurisitc Approach to Parallel Assembly Line Balancing Problems, ECCO XXV – 25th Conferance of European Chapter on Combinatorial Optimization, 26-28 April 2012, Antalya.

Seçme, G., Ozbakır, L., Özcan, E., 2013. Hyper Heurisitc Approach to Stochastic Parallel Assembly Line Balancing Problems, International IIE Conference & 33.YA-EM kongresi, 26-28 Haziran 2013, İstanbul.