

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

104335

ATÖLYE TİPİ ÇİZELGELEME İÇİN UZMAN-TABU  
ARAMA MODELİ

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU  
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

DOKTORA TEZİ

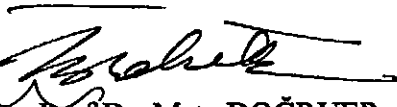
Endüstri Yük. Müh. Faruk GEYİK

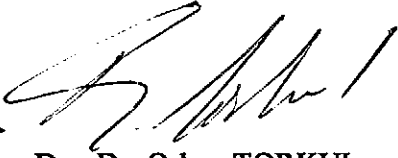
104335

Enstitü Anabilim Dalı: ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez 23/06/2000 tarihinde aşağıdaki juri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.

  
Prof. Dr. Harun TAŞKIN  
Başkan

  
Prof. Dr. Mete DOĞRUER  
Juri Üyesi

  
Doç. Dr. Orhan TORKUL  
Juri Üyesi

  
Yrd. Doç. Dr. Şeref SAGIROĞLU  
Juri Üyesi

  
Yrd. Doç. Dr. İ. Hakkı CEDİMOĞLU  
Juri Üyesi (Tez Danışmanı)

## ÖNSÖZ

Bir işletme için üretim çizelgeleme, mevcut rekabet ortamında, pazarda kalabilmek için bir gereksinimdir. Çünkü onlar müşterilerine teahhüt ettikleri teslim tarihini karşılamak durumundadırlar. Eğer bunu yapamazlarsa, önemli satış kayıplarına uğrayabilirler. Aynı zamanda, kaynaklarını etkin kullanabilmek ve atölye düzeyinde kontrolü sağlamak için de faaliyetlerini çizelgelemek, yani somut bir plana koymak zorundadırlar. Ancak çizelgeleme probleminin zor problemler sınıfına girmesinden dolayı, kesin çözüm bulmak zordur ve genellikle sezgisel yöntemlerle çözüm aranmaktadır. Ancak çözüm kalitesi yeterince iyi olmamaktadır. Muhtemelen bu yüzden, çok önemli bir fonksiyon olmasına rağmen, çizelgeleme uygulamada yeterince yer almamaktadır.

Bilgisayar imkanlarının artışıyla orantılı olarak yapay zeka ve zeki arama yöntemleriyle, çizelgeleme gibi zor problemlerle uğraşma imkanları da artmaktadır. Bu tezin amacı bahsedilen imkanları kullanarak, üretim çizelgeleme çözümlerini iyileştirmektir. Bu amaçla ilgili konular incelenerek, bir üretim çizelgeleme modeli sunulmuştur.

Tüm bu çalışmaları yaparken, bana her zaman destek olan ve yardımlarını esirgemeyen, başta tez danışmanım, SAÜ Öğretim üyelerinden Sn. Yrd.Doç.Dr. İsmail Hakkı CEDİMOĞLU olmak üzere, bu çalışmaya katkılarından dolayı SAÜ Endüstri Mühendisliği Bölüm Başkanı Sn. Prof.Dr. Harun TAŞKIN'a, Sn. Doç.Dr. Orhan TORKUL'a, Marmara Üniversitesi Öğretim Üyesi Sn. Prof.Dr. Mete DOĞRUER'e ve Erciyes Üniversitesi Öğretim Üyesi Sn. Yrd.Doç.Dr. Şeref SAĞIROĞLU'na; bugüne kadar eğitimime katkısı olan tüm insanlara teşekkürü bir borç bilir, derin saygı ve sevgilerimi sunarım.

Son olarak, maddi ve manevi destek ve ilgilerini hiç esirgemeyen eşim Şengül Hanım'ı, Oğlum Ahmet Kaan'ı, Sevgili Annem'i, Muhterem Babam Fuat GEYİK'i ve ailemin tüm fertlerini şükran ve minnetle anmayı bir borç bilirim.

Haziran 2000, Adapazarı

Faruk GEYİK



# İÇİNDEKİLER

|                       |      |
|-----------------------|------|
| ÖNSÖZ.....            | i    |
| İÇİNDEKİLER.....      | ii   |
| SİMGELER LİSTESİ..... | vi   |
| ŞEKİLLER LİSTESİ..... | viii |
| TABLolar LİSTESİ..... | x    |
| ÖZET.....             | xv   |
| SUMMARY.....          | xvii |

## BÖLÜM 1

|   |    |
|---|----|
| GİRİŞ.....                                      | 1  |
| 1.1. Üretim Sistemi ve Modelleri.....           | 1  |
| 1.2. Çizelgeleme, Üretimdeki Yeri ve Önemi..... | 4  |
| 1.3. Çizelgemeyi Etkileyen Unsurlar.....        | 6  |
| 1.4. Çizelgelemede Amaçlar.....                 | 9  |
| 1.5. Araştırmanın Amaçları.....                 | 11 |
| 1.6. Araştırmanın Kapsamı.....                  | 11 |
| 1.7. Tezin Düzeni.....                          | 12 |

## BÖLÜM 2

|   |    |
|---|----|
| GENEL İŞ-ATÖLYESİ ÇİZELGELEME PROBLEMİ.....       | 13 |
| 2.1. Tanım.....                                   | 13 |
| 2.2. Varsayımlar.....                             | 13 |
| 2.3. Problemin Matematik İfadesi.....             | 14 |
| 2.4. Problemin Görsel Temsili.....                | 15 |
| 2.4.1. Gantt diyagramı gösterimi.....             | 15 |
| 2.4.2. Kritik yol diyagramı gösterimi.....        | 16 |
| 2.5. Çizelge Üretimi ve Tipleri.....              | 18 |
| 2.6. Çizelgeleme Problemlerinin Kompleksliği..... | 21 |
| 2.7. Önemli Terim ve Tanımlar.....                | 21 |

## BÖLÜM 3

|   |    |
|---|----|
| MEVCUT ÇÖZÜM YAKLAŞIMLARI.....  | 24 |
| 3.1. Çizelgeleme Yaklaşımlarının Sınıflandırılması.....               | 24 |
| 3.2. Analitik Yöntemler.....  | 24 |
| 3.2.1. Dal-sınır algoritmalarıyla iş-atölyesi probleminin çözümü..... | 26 |
| 3.3. Öncelik Sevketme Kuralları.....                                  | 29 |
| 3.4. Fırsatçı Algoritmalar.....                                       | 31 |
| 3.5. Yapay Zeka Yaklaşımları.....                                     | 32 |
| 3.5.1. Uzman sistemler.....   | 33 |
| 3.5.2. Yapay sinir ağları.....  | 38 |

|   |    |
|---|----|
| 3.5.2.1. Hopfield ağıları .....                               | 38 |
| 3.5.2.2. Hatayı geriye-yayma ağıları .....                    | 39 |
| 3.5.3. Çeşitli yaklaşımlar .....                              | 40 |
| 3.5.4. Karma yapılar .....                                    | 42 |
| 3.6. Yerel Arama Algoritmaları .....                          | 45 |
| 3.6.1. GRASP .....  | 47 |
| 3.6.2. Eşik algoritmaları .....                               | 47 |
| 3.7. Zeki Arama Yöntemleri .....                              | 49 |
| 3.7.1. Genetik algoritmalar .....                             | 49 |
| 3.7.2. Benzetimli tavlama .....                               | 51 |
| 3.7.3. Tabu arama .....                                       | 54 |
| 3.8. Çizgeleme ve Çözüm Yaklaşımlarına İlişkin Bulgular ..... | 57 |

#### BÖLÜM 4

|  |    |
|--|----|
| UZMAN SİSTEMLER .....                          | 62 |
| 4.1. Giriş .....                               | 62 |
| 4.2. Uzman Sistem Yapısı .....                 | 62 |
| 4.2.1. Sorgulama düzeneği .....                | 62 |
| 4.2.2. Bilgi tabanı .....                      | 66 |
| 4.2.3. Kullanıcı arayüzü .....                 | 67 |
| 4.3. Bilgi Temsili .....                       | 67 |
| 4.3.1. Kural-tabanlı bilgi temsili .....       | 67 |
| 4.3.2. Çatılar ve anlamsal ağılar .....        | 68 |
| 4.3.3. Bilgi temsil şeklinin seçimi .....      | 69 |
| 4.4. Bilgi Kazanımı .....                      | 70 |
| 4.5. Bir Uzman Sistemin Kuruluş Adımları ..... | 72 |

#### BÖLÜM 5

|  |    |
|--|----|
| TABU ARAMA .....                               | 74 |
| 5.1. Giriş .....                               | 74 |
| 5.2. Tabu Arama Algoritması .....              | 75 |
| 5.3. Komşuluk Yapıları .....                   | 76 |
| 5.3.1. N1 komşuluğu .....                      | 77 |
| 5.3.2. N2 komşuluğu .....                      | 78 |
| 5.3.3. N3 komşuluğu .....                      | 79 |
| 5.3.4. N4 Komşuluğu .....                      | 80 |
| 5.3.5. N5 Komşuluğu .....                      | 81 |
| 5.4. Hafıza Yapıları .....                     | 82 |
| 5.5. Tabu Listesi .....                        | 84 |
| 5.5.1. Tabu listesinin düzenlenmesi .....      | 84 |
| 5.5.2. Tabu listesi uzunluğu .....             | 84 |
| 5.5.3. Dinamik tabu listesi .....              | 85 |
| 5.5.4. Tabu durumu tesbiti .....               | 86 |
| 5.6. Aspirasyon Ölçütü .....                   | 86 |
| 5.7. Seçkin Adaylar Listesi Taktikleri .....   | 88 |
| 5.8. Yoğunlaşma ve Genişletme Taktikleri ..... | 88 |
| 5.8.1. Yoğunlaşma taktikleri .....             | 88 |
| 5.8.2. Genişletme taktikleri .....             | 90 |

|   |            |
|---|------------|
| 5.8.3. Yoğunlaşma ve genişletme taktiklerinin beraber kullanılması..... | 91         |
| 5.9. Durdurma Ölçütü.....   | 92         |
| 5.10. Tahmin Teknikleri.....  | 92         |
| 5.11. Tabu Aramanın Karakteristik Özellikleri.....                      | 94         |
| <b>BÖLÜM 6</b>  |            |
| <b>UZMAN-TABU ÇİZELGELEME MODELİ.....</b>                               | <b>97</b>  |
| 6.1. Kullanılan Yazılım.....  | 97         |
| 6.2. Uzman Çizelgeleme Modülünün Yapısı.....                            | 98         |
| 6.2.1. Bilgi Tabanı.....  | 100        |
| 6.2.2. Algoritma tabanı.....  | 102        |
| 6.2.3. Sorgulama mekanizması.....                                       | 104        |
| 6.3. Tabu Arama Çizelgeleme Modülü.....                                 | 105        |
| 6.3.1. Test problemleri ve test istatistiği.....                        | 112        |
| 6.3.2. Komşuluk yapısı seçimi.....                                      | 114        |
| 6.3.3. Tabu durumu tesbiti.....   | 116        |
| 6.3.4. Tabu listesi uzunluğu.....                                       | 116        |
| 6.3.5. Aspirasyon ölçütü.....   | 121        |
| 6.3.6. Aday listesi taktiği.....  | 123        |
| 6.3.7. Yoğunlaşma taktiği.....  | 125        |
| 6.3.8. Genişletme taktiği.....  | 128        |
| 6.3.9. İterasyon sayısı.....  | 130        |
| <b>BÖLÜM 7</b>  |            |
| <b>DENEY ÇALIŞMASI.....</b>   | <b>133</b> |
| 7.1. Deney Tasarımı.....  | 133        |
| 7.1.1. Atölye özellikleri.....  | 133        |
| 7.1.2. İş özellikleri.....  | 133        |
| 7.1.3. Çizelgeleme özellikleri.....                                     | 134        |
| 7.2. Yöntem Karşılaştırmaları.....                                      | 134        |
| 7.3. İstatistik Test Yöntemi.....                                       | 135        |
| 7.4. Uzman Sistem ile Basit Öncelik Kurallarının Karşılaştırılması..... | 136        |
| 7.5. Tabu Arama Yöntemine İlişkin Karşılaştırmalar.....                 | 145        |
| 7.4. Deney Sonuçları.....   | 156        |
| <b>BÖLÜM 8</b>  |            |
| <b>SONUÇLAR.....</b>  | <b>158</b> |
| <b>BÖLÜM 9</b>  |            |
| <b>TARTIŞMA VE ÖNERİLER.....</b>  | <b>160</b> |
| 9.1. Araştırmanın Katkıları.....  | 160        |
| 9.2. Bulunan Sonuçların Analizi.....                                    | 161        |
| 9.3. Gelecekteki Muhtemel Çalışma Konuları.....                         | 162        |
| <b>KAYNAKLAR.....</b>   | <b>164</b> |

|  |     |
|--|-----|
| EK-A Test Problemleri Üretme Pascal Programı Kodu .....      | 175 |
| EK-B Örnek Çözüm Çıktısı .....                               | 177 |
| EK-C FG01-90 Test Problemleri İçin $C_{max}$ Değerleri ..... | 179 |
| EK-D Eşlendirilmiş t-Testi Formülasyonu .....                | 180 |
| ÖZGEÇMİŞ .....   | 181 |



## SİMGELER LİSTESİ

|           |   |
|-----------|---|
| $P_i$     | $i$ işinin toplam işlem süresi              |
| $P_{ik}$  | $i$ işinin $k$ . operasyonunun işlem süresi |
| $r_i$     | $i$ işinin hazır zamanı                     |
| $d_i$     | $i$ işinin teslim tarihi                    |
| $k$       | teslim tarihi sıklığı katsayısı             |
| $s_i$     | $i$ işinin aylak zamanı                     |
| $a_i$     | $i$ işinin akış tahsisatı                   |
| $C_i$     | $i$ işinin tamamlanma zamanı                |
| $C_{max}$ | maksimum tamamlanma süresi                  |
| $L_i$     | $i$ işinin gecikmesi                        |
| $T_i$     | $i$ işinin pozitif gecikmesi                |

## Kısaltmalar

|        |  |
|--------|--|
| SAT    | Sabit Tatsisatlı Teslim Tarihi Atama Yöntemi     |
| EAT    | Eşit AylakTatsisatlı Teslim Tarihi Atama Yöntemi |
| TİT    | Toplam İş Tatsisatlı Teslim Tarihi Atama Yöntemi |
| BBİ    | Bilgisayar Bütünleşik İmalat                     |
| TZÜ    | Tam Zamanında                                    |
| OÜT    | Optimal Üretim Tablolama                         |
| YZ     | Yapay Zeka                                       |
| US     | Uzman Sistem                                     |
| YSA    | Yapay Sinir Ağı                                  |
| TA     | Tabu Arama                                       |
| GA     | Genetik Algoritma                                |
| BT     | Benzetimli Tavlama                               |
| SPT    | En Kısa İşlem Zamanı                             |
| EDD    | En Erken Teslim Tarihi                           |
| MST    | Minimum Aylak Zaman                              |
| SPRO   | Operasyon Başına Bağlı Operasyon Sayısı          |
| SPRW   | Operasyon Başına Bağlı İş Miktarı                |
| MOD    | Değiştirilmiş Operasyon Teslim Tarihi            |
| MDD    | Değiştirilmiş Teslim Tarihi                      |
| COVERT | Fazla Mesai Maliyeti                             |
| ATC    | Görünen Gecikme Maliyeti                         |
| LTWK   | En Az toplam İşlem Süresi                        |



|      |  |
|------|--|
| MWKR | En Çok Kalan Bağlı İş Miktarı  |
| LWKR | En Az Kalan Bağlı İş Miktarı   |
| MPNR | En Çok Kalan Bağlı Operasyon Sayısı  |
| MRI% | Başlangıç Çözümünü İyileştirme Yüzdesi   |
| MRE% | Optimum Çözümünden Nisbi Sapma Yüzdesi   |
| MEN  | Ortalama Değerlendirilen Komşu Sayısı  |
| MMN  | Ortalama Taşıma Sayısı   |
| TIME | Ortalama Problem Çözüm Süresi (saniye)   |
| LBE  | Optimum Çözümü Bulunan Problem Sayısı  |
| LBI  | Bilinenden Daha İyi Çözümü Bulunan Problem Sayısı  |
| MIMN | Ortalama İyileştiren Taşıma Sayısı   |
| MIM% | Ortalama İyileştiren Taşıma Yüzdesi  |
| IB%  | Ortalama En İyi Çözümün Bulunduğu İterasyon Sayısı Yüzdesi   |
| MMT  | Ortalama Taşıma Süresi (saniye)  |
| MN   | Ortalama Komşu Sayısı  |
| HM   | Hamming Mesafesi   |
| MPI% | Uzman-Başlangıçlı Tabu Aramanın Basit Öncelik Kuralı Başlangıçlı Tabu Aramadan Daha İyi Olma Yüzdesi |



## ŞEKİLLER LİSTESİ

|            |  |     |
|------------|--|-----|
| Şekil 1.1  | Üretim sistemi.....  | 2   |
| Şekil 1.2. | Bir imalat sisteminde çizelgelemenin yeri.....   | 6   |
| Şekil 2.1  | Gantt diyagramı örneği .....   | 16  |
| Şekil 2.2  | Tablo 2.1`deki problemin kritik-yol diyagramı.....   | 17  |
| Şekil 2.3  | Tablo 2.1`deki probleme ait olurlu bir çizelge.....  | 17  |
| Şekil 2.4  | Çizelge tipleri: (a) yarı-aktif çizelge, (b) aktif çizelge ve (c) gecikmesiz çizelge ..... | 20  |
| Şekil 3.1  | Komşuluk arama algoritması.....  | 45  |
| Şekil 3.2  | Genetik algoritma adımları.....  | 50  |
| Şekil 3.3  | Benzetimli tavlama algoritması.....  | 52  |
| Şekil 4.1  | Bir uzman sistemin temel parçaları .....   | 63  |
| Şekil 4.2  | Temel usavurma şekilleri.....  | 64  |
| Şekil 4.3  | İleriye-doğru çıkarım örneği.....  | 65  |
| Şekil 4.4  | Derinlemesine ve yanlamasına arama taktikleri .....  | 66  |
| Şekil 5.1  | Genel bir tabu arama algoritması.....  | 75  |
| Şekil 5.2  | Genel komşuluk yapısı .....  | 76  |
| Şekil 5.3  | N1 komşuluk yapısı örneği.....   | 78  |
| Şekil 5.4  | N2 komşuluk yapısı örneği.....   | 78  |
| Şekil 5.5  | N3 komşuluk yapısı örneği.....   | 79  |
| Şekil 5.6  | N4 komşuluk yapısı örneği.....   | 80  |
| Şekil 5.7  | N5 komşuluk yapısı örneği.....   | 81  |
| Şekil 6.1  | Gecikmesiz çizelge üreticinin yalancı-program kodu .....                                   | 98  |
| Şekil 6.2  | a- Bilgi tabanı: Atölye ve iş durumu tesbit kuralları .....                                | 101 |
| Şekil 6.2  | b- Bilgi tabanı: Performans ölçütü tesbit kuralları .....                                  | 101 |
| Şekil 6.2  | c- Bilgi tabanı: Çizelgeleme kuralları .....   | 101 |
| Şekil 6.3  | İleri-doğru çıkarımlı sorgulama düzeneği yalancı-program kodu .....                        | 104 |
| Şekil 6.4  | Tabu arama modülü akış diyagramı .....   | 106 |
| Şekil 6.5  | Tabu arama modülü yalancı-program kodu .....   | 107 |
| Şekil 6.6  | Kritik yol hesaplama yordamının yalancı-program kodu.....                                  | 108 |
| Şekil 6.7  | G1 komşuluğu yordamının yalancı-program kodu .....   | 110 |

## TABLolar LİSTESİ

|               |   |     |
|---------------|---|-----|
| Tablo 2.1     | 4x3 iş-atölyesi çizelgeleme problemi verileri.....  | 15  |
| Tablo 6.1     | Literatürdeki bazı test problemlerine ait çeşitli bilgiler .....  | 113 |
| Tablo 6.2     | Komşuluk yapılarına ait MRE değerleri.....  | 115 |
| Tablo 6.3     | Komşuluk yapılarının karşılaştırılması: eşlendirilmiş-t testi istatistiği. ...  | 115 |
| Tablo 6.4     | Komşuluk yapılarının ürettiği tabu arama parametre değerleri.....   | 116 |
| Tablo 6.5     | Tabu listesi uzunluğu yöntemleri.....   | 117 |
| Tablo 6.6     | Tabu listesi uzunluğu yöntemlerine ait MRE değerleri.....   | 118 |
| Tablo 6.7     | Tabu listesi uzunluğu yöntemlerinin karşılaştırılması.....  | 120 |
| Tablo 6.8     | Tabu listesi uzunluklarının ürettiği tabu arama parametre değerleri .....   | 120 |
| Tablo 6.9     | İkincil aspirasyon kriteri yöntemlerine ait MRE değerleri.....  | 122 |
| Tablo 6.10    | İkincil aspirasyon kriteri yöntemlerinin karşılaştırılması.....   | 122 |
| Tablo 6.11    | İkincil aspirasyon kriterlerinin ürettiği tabu arama parametre değerleri.   | 122 |
| Tablo 6.12    | Seçkin çözümler listesi yöntemlerine ait MRE değerleri.....   | 124 |
| Tablo 6.13    | Seçkin çözümler listesi yöntemlerinin karşılaştırılması.....  | 124 |
| Tablo 6.14    | Seçkin çözümler listesi yöntemlerinin ürettiği tabu arama parametre değerleri .....   | 125 |
| Tablo 6.15    | Yoğunlaşma taktiklerinin ürettiği tabu arama parametre değerleri.....   | 126 |
| Tablo 6.16    | Yoğunlaşma taktiklerine ait MRE değerleri.....  | 127 |
| Tablo 6.17    | Yoğunlaşma taktiklerinin karşılaştırılması.....   | 127 |
| Tablo 6.18    | Taşıma mesafesi yöntemlerine ait MRE değerleri.....   | 128 |
| Tablo 6.19    | Taşıma mesafesi yöntemlerinin karşılaştırılması .....   | 129 |
| Tablo 6.20    | Taşıma mesafesi yöntemlerinin ürettiği tabu arama parametre değerleri .....   | 129 |
| Tablo 6.21    | İyileştirmeyen taşımaları cezalandırmayla genişletme yöntemlerinin ürettiği tabu arama parametre değerleri .....  | 130 |
| Tablo 6.22 a- | İterasyon sayısı yöntemleri: Tekrarlı iterasyon tipleri.....  | 132 |
| Tablo 6.22 b- | İterasyon sayısı yöntemleri: Dinamik iterasyon tipleri .....  | 132 |
| Tablo 6.22 c- | İterasyon sayısı yöntemleri: Sabit iterasyon tipleri.....   | 132 |
| Tablo 7.1     | Çeşitli öncelik sevketme kuralları ile uzman sistemin FG01-30 problemleri üzerinde $k=1.5$ için ürettiği ortalama akış değerleri.....   | 136 |
| Tablo 7.2     | Birinci sistem durumu için uzman sistem ile diğer öncelik sevketme kurallarının ürettiği ortalama akış değerleri karşılaştırması: eşlendirilmiş-t testi istatistiği .....           | 137 |
| Tablo 7.3     | Çeşitli öncelik sevketme kuralları ile uzman sistemin FG31-60 problemleri üzerinde $k=1.5$ için ürettiği ortalama pozitif gecikme değerleri .....                                   | 137 |
| Tablo 7.4     | İkinci sistem durumu için uzman sistem ile diğer öncelik sevketme kurallarının ürettiği ortalama pozitif gecikme değerleri karşılaştırması: eşlendirilmiş-t testi istatistiği ..... | 138 |

|            |   |     |
|------------|---|-----|
| Tablo 7.5  | Çeşitli öncelik sevketme kuralları ile uzman sistemin FG61-90 problemleri üzerinde $k=1.5$ için ürettiği ortalama pozitif gecikme değerleri .....   | 138 |
| Tablo 7.6  | Üçüncü sistem durumu için uzman sistem ile diğer öncelik sevketme kurallarının ürettiği ortalama pozitif gecikme değerleri karşılaştırması: eşlendirilmiş-t testi istatistiği .....             | 139 |
| Tablo 7.7  | Çeşitli öncelik sevketme kuralları ile uzman sistemin FG01-30 problemleri üzerinde $k=3$ için ürettiği ortalama akış değerleri .....  | 139 |
| Tablo 7.8  | Dördüncü sistem durumu için uzman sistem ile diğer öncelik sevketme kurallarının ürettiği ortalama akış değerleri karşılaştırması: eşlendirilmiş-t testi istatistiği .....                      | 140 |
| Tablo 7.9  | Çeşitli öncelik sevketme kuralları ile uzman sistemin FG31-60 problemleri üzerinde $k=3$ için ürettiği maksimum tamamlanma zamanı değerleri .....   | 140 |
| Tablo 7.10 | Beşinci sistem durumu için uzman sistem ile diğer öncelik sevketme kurallarının ürettiği maksimum tamamlanma zamanı değerleri karşılaştırması: eşlendirilmiş-t testi istatistiği.....           | 141 |
| Tablo 7.11 | Çeşitli öncelik sevketme kuralları ile uzman sistemin FG61-90 problemleri üzerinde $k=3$ için ürettiği maksimum tamamlanma zamanı değerleri .....   | 141 |
| Tablo 7.12 | Altıncı sistem durumu için uzman sistem ile diğer öncelik sevketme kurallarının ürettiği maksimum tamamlanma zamanı değerleri karşılaştırması: eşlendirilmiş-t testi istatistiği.....           | 142 |
| Tablo 7.13 | Çeşitli öncelik sevketme kuralları ile uzman sistemin FG01-30 problemleri üzerinde $k=4.5$ için ürettiği maksimum tamamlanma zamanı değerleri.....  | 142 |
| Tablo 7.14 | Yedinci sistem durumu için uzman sistem ile diğer öncelik sevketme kurallarının ürettiği maksimum tamamlanma zamanı değerleri karşılaştırması: eşlendirilmiş-t testi istatistiği.....           | 145 |
| Tablo 7.15 | Çeşitli öncelik sevketme kuralları ile uzman sistemin FG31-60 problemleri üzerinde $k=4.5$ için ürettiği maksimum tamamlanma zamanı değerleri.....  | 143 |
| Tablo 7.16 | Sekizinci sistem durumu için uzman sistem ile diğer öncelik sevketme kurallarının ürettiği maksimum tamamlanma zamanı değerleri karşılaştırması: eşlendirilmiş-t testi istatistiği.....         | 144 |
| Tablo 7.17 | Çeşitli öncelik sevketme kuralları ile uzman sistemin FG61-90 problemleri üzerinde $k=4.5$ için ürettiği ortalama makine boş-bekleme oranı değerleri.....                                       | 144 |
| Tablo 7.18 | Dokuzuncu sistem durumu için uzman sistem ile diğer öncelik sevketme kurallarının ürettiği ortalama makine boş bekleme oranı değerleri karşılaştırması: eşlendirilmiş-t testi istatistiği ..... | 145 |
| Tablo 7.19 | Uzman- ve SPT-başlangıçlı tabu arama yöntemlerinin FG01-30 problemleri için ürettiği ortalama akış süresi değerleri .....   | 147 |
| Tablo 7.20 | Uzman- ve SPT-başlangıçlı tabu arama yöntemlerinin birinci sistem durumu için ürettiği ortalama akış süresi değerleri için eşlendirilmiş-t testi istatistiği.....                               | 147 |
| Tablo 7.21 | Uzman- ve SPT-başlangıçlı tabu arama yöntemlerinin birinci sistem durumu için ürettiği tabu arama parametre değerleri.....  | 147 |

|   |     |
|---|-----|
| Tablo 7.22 Uzman- ve SPT-başlangıçlı tabu arama yöntemlerinin FG01-30 problemleri için ürettiği ortalama akış süresi değerleri .....  | 147 |
| Tablo 7.23 Uzman- ve SPT-başlangıçlı tabu arama yöntemlerinin dördüncü sistem durumu için ürettiği ortalama akış süresi değerleri için eşlendirilmiş-t testi istatistiği .....        | 147 |
| Tablo 7.24 Uzman ve SPT-başlangıçlı tabu arama yöntemlerinin dördüncü sistem durumu için ürettiği tabu arama parametre değerleri .....  | 147 |
| Tablo 7.25 Uzman- ve EDD-başlangıçlı tabu arama yöntemlerinin FG31-60 problemleri için ürettiği ortalama akış süresi değerleri .....  | 149 |
| Tablo 7.26 Uzman- ve EDD-başlangıçlı tabu arama yöntemlerinin ikinci sistem durumu için ürettiği ortalama pozitif gecikme değerleri için eşlendirilmiş-t testi istatistiği .....      | 149 |
| Tablo 7.27 Uzman- ve EDD-başlangıçlı tabu arama yöntemlerinin ikinci sistem durumu için ürettiği tabu arama parametre değerleri .....   | 149 |
| Tablo 7.28 Uzman- ve EDD-başlangıçlı tabu arama yöntemlerinin FG61-90 problemleri için ürettiği ortalama akış süresi değerleri .....  | 149 |
| Tablo 7.29 Uzman- ve EDD-başlangıçlı tabu arama yöntemlerinin üçüncü sistem durumu için ürettiği ortalama pozitif gecikme değerleri için eşlendirilmiş-t testi istatistiği .....      | 149 |
| Tablo 7.30 Uzman ve EDD-başlangıçlı tabu arama yöntemlerinin üçüncü sistem durumu için ürettiği tabu arama parametre değerleri .....  | 149 |
| Tablo 7.31 Uzman- ve SPT-başlangıçlı tabu arama yöntemlerinin FG31-60 problemleri için ürettiği maksimum tamamlanma zamanı değerleri .....  | 151 |
| Tablo 7.32 Uzman- ve SPT-başlangıçlı tabu arama yöntemlerinin beşinci sistem durumu için ürettiği maksimum tamamlanma zamanı değerleri için eşlendirilmiş-t testi istatistiği .....   | 151 |
| Tablo 7.33 Uzman- ve SPT-başlangıçlı tabu arama yöntemlerinin beşinci sistem durumu için ürettiği tabu arama parametre değerleri .....  | 151 |
| Tablo 7.34 Uzman- ve SPT-başlangıçlı tabu arama yöntemlerinin FG61-90 problemleri için ürettiği maksimum tamamlanma zamanı değerleri .....  | 151 |
| Tablo 7.35 Uzman- ve SPT-başlangıçlı tabu arama yöntemlerinin altıncı sistem durumu için ürettiği maksimum tamamlanma zamanı değerleri için eşlendirilmiş-t testi istatistiği .....   | 151 |
| Tablo 7.36 Uzman ve SPT-başlangıçlı tabu arama yöntemlerinin altıncı sistem durumu için ürettiği tabu arama parametre değerleri .....   | 151 |
| Tablo 7.37 Uzman- ve SPT-başlangıçlı tabu arama yöntemlerinin FG01-30 problemleri için ürettiği maksimum tamamlanma zamanı değerleri .....  | 153 |
| Tablo 7.38 Uzman- ve SPT-başlangıçlı tabu arama yöntemlerinin yedinci sistem durumu için ürettiği maksimum tamamlanma zamanı değerleri için eşlendirilmiş-t testi istatistiği .....   | 153 |
| Tablo 7.39 Uzman- ve SPT-başlangıçlı tabu arama yöntemlerinin yedinci sistem durumu için ürettiği tabu arama parametre değerleri .....  | 153 |
| Tablo 7.40 Uzman- ve SPT-başlangıçlı tabu arama yöntemlerinin FG31-60 problemleri için ürettiği maksimum tamamlanma zamanı değerleri .....  | 153 |
| Tablo 7.41 Uzman- ve SPT-başlangıçlı tabu arama yöntemlerinin sekizinci sistem durumu için ürettiği maksimum tamamlanma zamanı değerleri için eşlendirilmiş-t testi istatistiği ..... | 153 |

|            |  |     |
|------------|--|-----|
| Tablo 7.42 | Uzman ve SPT-başlangıçlı tabu arama yöntemlerinin sekizinci sistem durumu için ürettiği tabu arama parametre değerleri.....  | 153 |
| Tablo 7.43 | Uzman- ve SPT-başlangıçlı tabu arama yöntemlerinin FG61-90 problemleri için ürettiği ortalama makine boş bekleme oranı değerleri..   | 155 |
| Tablo 7.44 | Uzman- ve SPT-başlangıçlı tabu arama yöntemlerinin dokuzuncu sistem durumu için ürettiği ortalama makine boş bekleme oranı değerleri için eşlendirilmiş-t testi istatistiği..... | 155 |
| Tablo 7.45 | Uzman- ve SPT-başlangıçlı tabu arama yöntemlerinin dokuzuncu sistem durumu için ürettiği tabu arama parametre değerleri .....  | 155 |
| Tablo A.1  | FG01-90 test problemlerinin üretilmesinde kullanılan kök sayılar.....  | 176 |
| Tablo A.2  | FG30 problemine ait proses verileri (makine nosu ve işlem süresi).....   | 176 |
| Tablo B.1  | FG30 problemi çözümü: Makine operasyon sıraları.....   | 177 |
| Tablo B.2  | FG30 problemi çözümü: Operasyon başlama ve tamamlanma zamanları.....   | 177 |
| Tablo C.1  | FG01-90 test problemleri $C_{max}$ değerleri.....  | 177 |



## ÖZET

**Anahtar Kelimeler :** üretim çizelgeleme, uzman sistemler, tabu arama

Bu tezde genel iş-atölyesi çizelgeleme probleminin çözüm kalitesinin iyileştirilmesi incelenmiştir. Bu amaçla genel olarak kesin çözüm arayan analitik yöntemler; yaklaşık çözüm arayan basit sezgisel yöntemler, çeşitli yapay zeka teknikleri, ve komşuluk aramasına dayalı yerel ve zeki arama yöntemleri analiz edilerek iki aşmalı bir çizelgeleme modeli tasarlanmıştır. Amaçlanan çizelgeleme modelinin ilk aşamasında, uzman sistem yöntemliliği kullanılarak iyi bir başlangıç çizelgesi elde edilmektedir. Bunun için, 24 kuraldan oluşan bir çizelgeleme bilgi tabanı oluşturulmuştur. Uzman sistem bu bilgi tabanından, atölye iş yükü ve iş teslim tarihi verisini kullanarak önce atölye sistem durumunu ve başarı ölçütünü belirlemekte, sonra bir çizelgeleme kuralı önermektedir. İkinci aşamada, uzman sistem tarafından üretilen başlangıç çizelgesi, aynı başarı ölçütü altında, tabu arama yöntemiyle iyileştirilmektedir. Tabu arama yöntemi mevcut bir çözümün komşularını artımlı arayarak ve aramanın hikayesini hafızasında tutarak, çözüm uzayındaki daha iyi çözümleri bulabilme yeteneği gösteren zeki bir arama yordamıdır.

Bu çalışmada zeki aramanın gereklerini yeterince yerine getirebilen bir tabu arama çizelgeci tasarlamak için, başta komşuluk yapıları, tabu listesi, seçkin çözümler listesi, aspirasyon ölçütü, yoğunlaşma ve çeşitlendirme taktikleri ile artım ve durdurma düzenekleri olmak üzere, çeşitli taktik ve parametreler üzerinde deneyler yapılmıştır. Bu deneylerde literatürde yer alan ve en iyi veya alt sınır çözümleri bilinen 38 test problemi kullanılmıştır. Sonra atölye yükü ve iş teslim tarihi açısından 9 farklı sistem durumu içeren bir deney düzeneği oluşturulmuş ve bunun üzerinde amaçlanan çizelgeleme modeli test edilmiştir. Son olarak, uzman sistemin basit öncelik kurallarına göre daha iyi olduğu, tabu arama yönteminin uzman sistemle üretilen başlangıç çizelgelerini iyileştirdiği, uzman sistemin basit öncelik kurallarına göre daha iyi bir başlangıç çizelgeci olduğu gibi bazı önemli sonuçlar bulunmuş ve uzman-tabu arama çizelgeleme modelinin olurluluğu istatistiki olarak gösterilmiştir.

Amaçlanan çizelgeleme modelin tabu arama modülünde henüz geliştirilebilecek bazı unsurlar olması nedeniyle modelin gelecekte iyileştirilmesi mümkündür. Ayrıca tabu arama tekniğinin esnek yapısı nedeniyle hem çizelgeleme probleminin her türüne hem de diğer eniyileme problemlerine rahatlıkla uygulanabilir olması nedeniyle, bu tekniğin gelecekte önemli uygulamalarının olacağı vurgulanmaktadır.

# EXPERT-TABU SEARCH FOR JOB-SHOP SCHEDULING

## SUMMARY

**Keywords :** production scheduling, expert systems, tabu search

The aim of this thesis is to develop a scheduling model using the intelligent problem solving approaches for deterministic job-shop scheduling. To do this, first of all the properties of the problem were examined and the current solution approaches in literature reviewed. The literature review revealed that the scheduling model must contain the approaches using the intelligent problem solving methodology with the ability to explore the search space widely. Thus, expert systems and tabu search issues are dealt with in more detail.

The target scheduling system predicts that an expert system module is will produce an initial solution which will then be improved by a tabu search module. The reason why the scheduling system contains expert systems is that they can produce solutions different from the classic methods and can manage the multi-criteria in scheduling environment. Similarly, tabu search has the ability to provide the search facilities which are more comprehensive and more effective.

The scheduling system was developed step by step. In the first phase, in order to produce an initial solution, a prototype of the expert system which has a knowledge base managing the simple priority dispatching rules was developed. In the second phase, a tabu search framework was built and some of their important parameters' values were fixed by using some benchmark problems. In the final phase, an experimental design taking in the consideration the combination of different values of shop load and job due dates yielded nine system states. For each system state thirty test problems were generated. The test problems produced were solved by three methods. These are several simple priority dispatching rules, the expert system prototype, and the tabu search module with initial expert system solution. Next, the results obtained from each method were statistically analysed and and interpreted.

The experimental results indicated that the solutions of the tabu search method numerically are 16.74% better than that of the simple priority dispatching rules and only approximately 5% worse than that of the optimal. This showed that the expert systems are superior to the simple priority dispatching rules and that the tabu search method with initial expert system solution produces near-optimal solutions. Consequently, the feasibility of the target scheduling system has been statistically proven.



## BÖLÜM 1. GİRİŞ

Bu bölüm, çizelgeleme konusuna hazırlık olması bakımından, önce çizelgelemenin içinde yer aldığı muhtemelen en önemli alan olan imalatı açıklamaktadır. Daha sonra çizelgelemenin önemi, yeri ve gereklerini açıklamaktadır. Ayrıca bu tezin kapsamı ve amaçları da bu bölüm sonunda sunulmaktadır.

### 1.1 Üretim Sistemi ve Modelleri

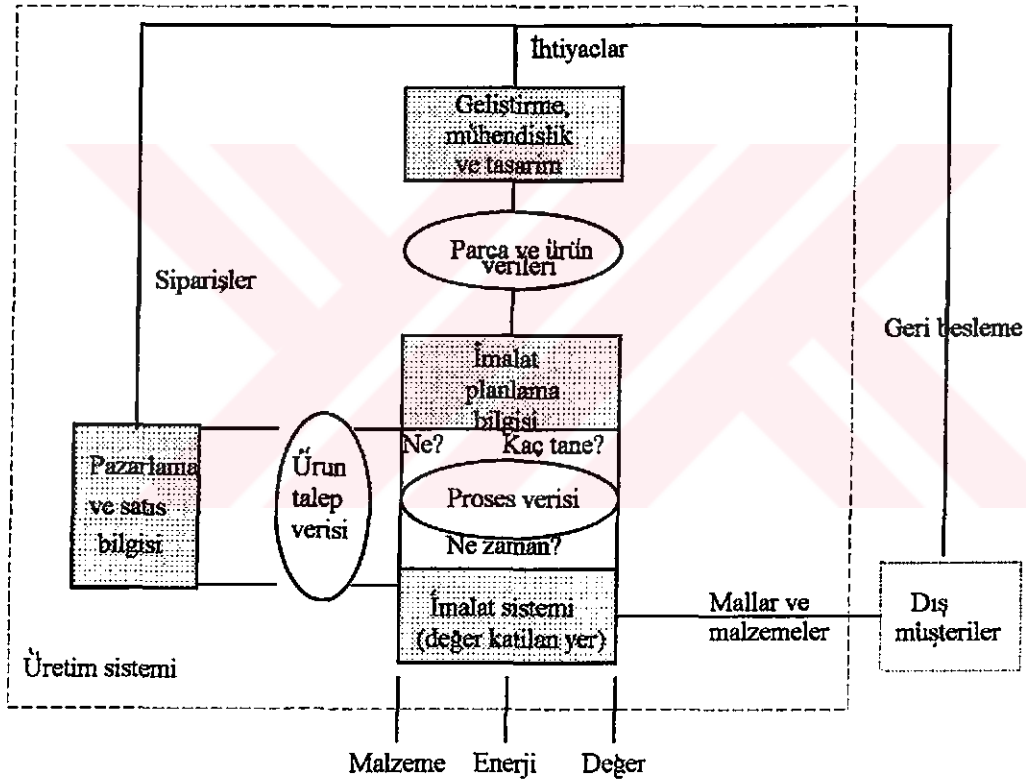
İmalat hammadde, malzeme veya yarı-mamüllere fiziki dönüştürmelerle değer katma işlemidir. İmalat sistemi bu işlemleri ve bu işlemlerin yerine getirilmesini düzenleyen bütün ekipmanları içine alır. Üretim sistemi ise daha geniş bir terimdir; insan, para, ekipmanlar, malzeme, tedarikçiler, pazar, yönetim ve imalat sistemini içine alır. O imalat sistemine hizmet eder. Yani imalat sistemi malzeme akışı sağlarken üretim sistemi malzeme akışını kontrol eder. Bu kontrol işlevleri kalite kontrol, üretim kontrol, envanter kontrol ve bakım kontrolüdür. Şekil 1.1'de görüldüğü gibi, üretim sistemi temel olarak imalat sisteminin görevini yerine getirebilmesi için onun girdilerini sağlamaktadır. İmalat sisteminin bu temel girdilerini imalat için gerekli fiziki elemanlar ile talep, toplu planlama ve süreç bilgileri teşkil etmektedir. Sistemin çıktıları ise imal edilmiş mallar ve malzemelerdir.

Üretimi genel anlamda kesikli-parça imalatı ve sürekli-madde üretimi olarak ayırmak mümkündür. Bunlardan sürekli üretimde, planlama nisbeten kolaydır ve genelde bir dengeleme probleminden söz edilebilir. Ancak kesikli-parça imalatında planlama daha zordur ve genelde bir çizelgeleme probleminden söz edilebilir.

Kesikli-parça imalatının yapıldığı atölyeler genel olarak tek tezgah atölyeleri, akış atölyeleri, iş atölyeleri ve esnek imalat sistemleri şeklinde tasnif edilebilir. Eğer bütün

partiler iş istasyonlarına aynı sıra ile uğrarlarsa, bu sistem “akış tipi” olarak adlandırılır. Diğer taraftan her parça kendi rotasına sahip ise bu bir “atölye tipi” olarak adlandırılır.

Atölye tipi üretim çok çeşitli parçaların küçük-orta miktarda işlendiği, genel amaçlı ekipmanlardan oluşan bir atölye türüdür. İşçilerin çeşitli görevleri yerine getirebilmesi için oldukça yüksek bir uzmanlık seviyesine sahip olması gerekir (Black, 1991). Atölye tipi üretimdeki işlemlerin öncelik ilişkileri, genellikle işten işe değiştiğinden dolayı, atölyedeki iş akışı tek yönlü değildir. Aynı zamanda işler çok büyük çeşitlilik gösterir. Bu yüzden, üretim faaliyetlerinin hepsinin koordine edilip bir zaman ölçeği üzerinde projelendirilmesi olan çizelgeleme, atölye tipi üretim ortamında tabii olarak zordur (Baker, 1994).



Şekil 1.1 Üretim sistemi (Black, 1991)

İmalat sistemleri arasında en yaygın olanı atölye tipi olanıdır. Onun kendi tasarım özelliğinden dolayı, atölye tipi üretim bütün sistemler içinde maliyet etkinliğinin en düşük olduğu imalat tipidir. Çünkü tipik bir atölyede harcanan zaman bileşenlerine bakıldığında

sadece %5'inin tezgahlarda geçtiği, geriye kalanın ise bekleme ve taşımada geçtiği görülmektedir. Ayrıca tezgahda harcanan zamanın da sadece %30-40'ının doğrudan süreç ile, yani şekil değiştirerek değer katmakla geçtiği görülmektedir (Black, 1991). Sonuç olarak, sekiz saatlik bir vardiya için verimli zamanın ancak %2'lerde kaldığı ortaya çıkmaktadır. Dolayısıyla imalat sistemlerinin verimliliklerini arttırmaya dönük faaliyetler; mesela çizelgeleme, genel verimlilik üzerinde çok önemli iyileştirmeler sağlayacaktır.

İmalat işlemi yerine getirilirken kıt kaynaklar kullanılır; bununla beraber müşteri istekleri, tercihler v.b. gibi belli koşulların sağlanması istenir. Dolayısıyla üretimin verimli yapılması ve bazı başarı ölçütlerini sağlaması gereklidir. Sonuç olarak, kıt kaynakların etkin olarak kullanılmasını ve müşteri isteklerinin yerine getirilmesi için somut planlar yapılmalı ve bu planların gerçekleşip gerçekleşmediği kontrol edilmelidir. İlâveten bugünün küresel rekabet koşulları da göz önüne alındığında bu gereksinim katlanarak artmaktadır. Bu yüzden, üretimi layıkıyla yapabilecek; yani malzeme, tezgah ve insangücü kaynaklarını istenen miktarlarda, istenen kalitede, istenen zamanda ve en düşük maliyetle bir araya getirecek bir üretim yönetimi işlevine ihtiyaç vardır.

Üretim yönetimi işlevinin en önemli faaliyeti üretim planlaması ve kontrolüdür. Bu faaliyet genel olarak üretim için gerekli olan araçların tesbiti, değerlendirmesi ve düzenlenmesini içerir. Onun amacı kaynakları tam yerinde kullanarak verimliliği sağlamaktır. Tabii olarak, üretimin tipi bu faaliyetlerin yerine getirilmesi şeklini etkilemektedir. Dolayısıyla üretim planlaması ve kontrolü faaliyetleri üretim tipine göre değişmektedir.

Üretim planlaması ve kontrolü faaliyetleri, Suer ve Dagli (1992)'de de belirtildiği gibi, hiyerarşik bir düzendedir. Bu hiyerarşinin üç katmanı vardır: stratejik seviye, taktik seviye ve operasyonel seviye. Stratejik planlama üretilecek ürünlere, kullanılacak ekipmana, uzun-dönem malzeme planlarına, kaynakların büyüklükleri ve yerleşimleri gibi şeylere ilişkin karar vermeyi işaret eder. Taktik planlama seviyesi stratejik planlamadan daha kısa dönemde yer alan faaliyetlerle uğraşır. O stratejik planlama müddetince amaçları kararlaştırmaya ve ana hatları çizmeye çabalar. İşgücü seviyesi, vardiya sayısı, üretim oranı ve envanter seviyeleri kararları bu türdendir. Bu hiyerarşinin en alt ya da en son seviyesi olan operasyonel seviyede ise atölye düzeyi kontrol ve detaylı çizelgeleme kararları yer alır. Bu kararlar her bir tezgah için üretim çizelgelerini ve herbir ürün, altmontaj ve bileşen için de

parti hacimlerini bulmaktır.

## 1.2 Çizelgeleme, Üretimdeki Yeri ve Önemi

Çizelgeleme zaman düzleminde yapılması gereken görevler için bir veya daha fazla amacı en iyileyecek şekilde kıt kaynakların tahsis edilmesiyle ilgilidir. Burada kıt kaynaklar bir atölyedeki tezgahlar, bir hava alanındaki pistler, bir inşaattaki çalışanlar, bir bilgisayarın işlem üniteleri v.b. olabilir. Görevler ise üretimdeki işlemler, hava alanındaki iniş ve kalkışlar, inşaatın inşaat safhaları ve bilgisayar programlarının çalıştırılması v.b. olabilir. Görevlerin bir öncelik seviyesi, mümkün en erken başlama ve en geç tamamlanma zamanları olabilir. Amaçlar ise yapılacak olan son görevin tamamlanma zamanının en aza indirilmesi, geciken görev sayısının en aza indirilmesi v.b. olabilir (Pinedo, 1995). Bu amaçlar aşağıda detaylı olarak açıklanmaktadır.

Üretim çizelgeleme, ürünlerin imalatı için kaynakların zaman bazında tahsisinin etkinliğiyle ilgilidir. Üretim çizelgelemenin amacı üretim kısıtlarını sağlayacak ve üretim maliyetlerini en iyileyecek şekilde bu ortak kaynakların kullanım sırasını ve atama yönünü bulmaktır (Radommer ve White, 1988).

Üretim çizelgeleme probleminde iki tür olurluluk kısıtından bahsedilebilir: (i) tezgah kapasitesi kısıtları ve (ii) teknolojik kısıtlar. Baker (1994)'e göre, çizelgeleme probleminin çözümü bu iki tip kısıtın olurlu bir çözümdür. Sonuçta elde edilen çözüm şu iki soruyu cevaplayabilmelidir: (i) yerine getirilecek her bir görev için hangi kaynak tahsis edilecek? ve (ii) her bir görev ne zaman yerine getirilecek? Dolayısıyla, geleneksel olarak, çoğu çizelgeleme problemi kısıtlara bağlı en iyileme problemi olarak görülmektedir; öyleki bunlar bazen sıfır tahsisat (matematik programlama ile çözülebilir), bazen de sıfır sıralamadır.

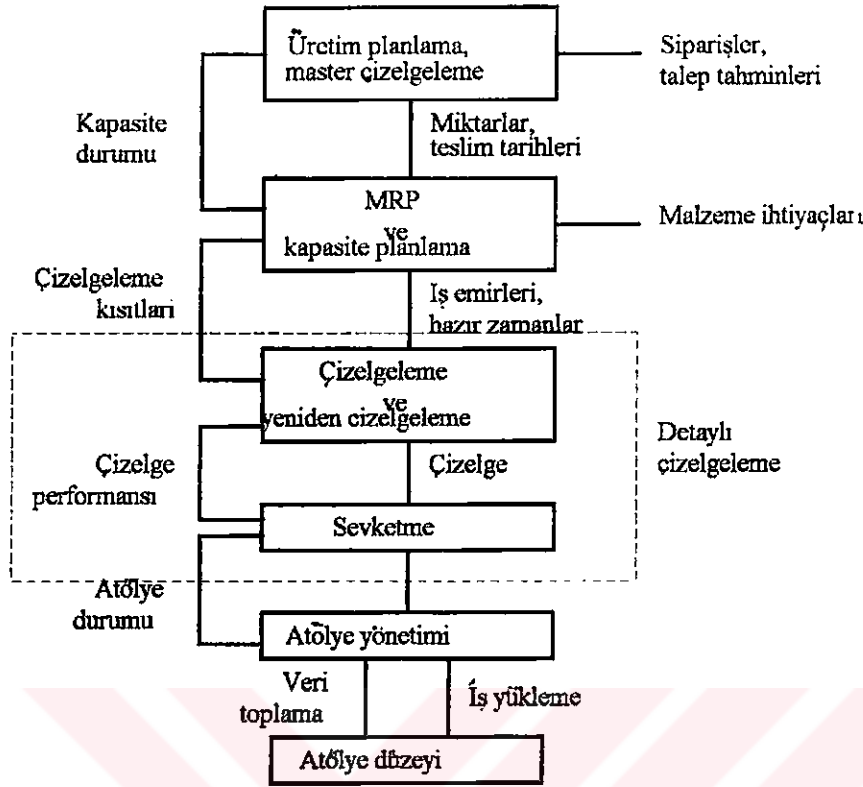
Daha açık bir ifadeyle, çizelgeleme problemi zamanlaması bakımından iki ayrı adıma ayrılmıştır (Fox ve Smith, 1984). Süreç rotalarının seçimi tipik olarak planlama işleminin sonucu iken, zamanların ve kaynakların atanması tipik olarak çizelgelemenin gayesidir. Gerçekten, planlama ve çizelgeleme arasındaki ayrılık bir dereceye kadar açık seçik

belirgin değildir. Çünkü rotalama yardımcı çizelgeyi oluşturmaksızın yapılamayabilir. Bir süreç rotalamanın geçerliliği seçilen herbir işlemin olurluluğuna bağlıdır ve verilen bir işlemin kaynak gereksinimleri ancak o işlemin zamanı esnasında sağlayabiliyorsa olurludur. Böylece, geçerli bir süreç rotalamanın belirlenmesi, rotalamadaki herbir işlem için kaynak ve zamanın öncelikle atanmasını içine alır.

Şekil 1.2'de bir imalat sistemini oluşturan işlevler arasındaki bilgi akışı görülmektedir. Burada çizelgeleme işlevinin diğer önemli imalat işlevleriyle sıkı bir etkileşim içerisinde olduğu görülmektedir. Çizelgeleme öncelikle uzun- ve orta-dönem üretim planlama işlevinden bilgi almaktadır. Şöyleki, uzun- ve orta-dönem üretim planlama envanter seviyeleri, talep tahminleri ve kaynak kapasitesi gereksinimlerini göz önüne alarak, en üst-seviyede ürün karışımı ve uzun-dönem kaynak tahsisine karar verir. Bu kararlar çizelgeleme işlevi üzerinde birinci dereceden etkilidir. Çünkü içerisinde süreç planları, iş-hazır zamanları ve teslim tarihlerini içeren iş emirleri vardır. Ayrıca çizelgeleme işlevi atölye düzeyi kontrol işleviyle etkileşerek, önce atölye yükü, tezgah yükü, tezgah-hazır zamanları v.b. gibi atölye durumu bilgilerini alır ve sonra atölye için iş yükünü içeren çizelgeyi üretir. Bu yüzden, atölye düzeyindeki tezgah bozulmaları v.b. gibi beklenmedik olaylar da çizelgeleme üzerinde büyük bir etkiye sahip olabilir.

Sonuç olarak daha iyi üretim çizelgeleri, kaynak verimliliğindeki kazanca ve işlem yönetimindeki ilgili etkinliklere bağlı olarak rekabet etme avantajı sağlar. Aynı zamanda yeni imalat teknolojileri kaynak kullanımının yoğunluğu ve çeşitliliğinden dolayı koordinasyon gereksinmesi gibi yeni üretim problem alanları oluşturmuştur. Dolayısıyla bunlarla uğraş zaruridir.

Etkin bir üretim sisteminin fonksiyonları içinde çizelgelemenin önemi gittikçe artmaktadır. Çünkü artan küresel rekabet yüzünden pazar koşulları sürekli değiştiğinden dolayı, ileri imalat süreç teknolojileri ve imalat sistemlerinin kurulması, taktik ve yöntemlerin hızla geliştirilmesi gerekmektedir. Bu durum küçük envanter seviyeleri ve en az gereksiz kaynak kullanımı sağlayan, ama aynı zamanda müşteri memnuniyetini sağlayan bir sistemin gerekliliğini ortaya çıkarır. Bu da ancak etkin, verimli ve doğru bir çizelgelemeyle mümkündür. Sonuç olarak, bir imalat sisteminin etkinlik ve verimliliğini, üretim planlama ve çizelgelemenin belirlediği ileri sürülebilir.



Şekil 1.2 Bir imalat sisteminde çizelgelemenin yeri (Pinedo, 1995)

### 1.3 Çizelgemeyi Etkileyen Unsurlar

Yukarıdaki açıklamalardan anlaşılacağı gibi, üretim çizelgeleme yalnız bir fonksiyon değildir; onu etkileyen pek çok unsur vardır. Mesela, Radommer ve White (1988)'e göre üretim çizelgeleri iş öncelikleri, teslim tarihi gerekleri, serbest bırakma tarihleri, maliyet sınırlamaları, üretim seviyeleri, lot-hacmi sınırlamaları, tezgah mevcudluğu, tezgah kabiliyeti, işlem öncelikleri, kaynak gereksinimleri ve kaynak mevcudiyeti gibi faktörlerden etkilenir. Daha spesifik olarak, Askin ve Iyer (1993) bir imalat hücresini çizelgelemek için seçilen stratejik yaklaşımın (öncelik kuralları v.b. gibi) çizelge en büyük tamamlanma zamanı üzerinde önemli bir etki yapabildiğini; bununla beraber, en iyi çizelgeleme politikasının servis zamanı dağılımlarına, tezgah kullanımına ve parti (lot) hacmine ciddi olarak bağlı olduğunu belirtmektedir. Benzer şekilde, Taşgetiren ve diğerleri (1995a) çizelgelemede öncelik kuralı kadar teslim tarihi oluşturma yönteminin de atölye başarısını etkilediği gerçeğini vurgulamaktadır.

Bu belirtilen unsurlara ilaveten, çizelge üretimini aslında ilk önce etkileyen temel unsur süreç planlama işlemidir (Geyik ve Cedimoglu, 1999). Aynı zamanda, çağdaş yaklaşımda bilgisayar bütünleşik sistemlerin gelişimi önemli ölçüde artmaktadır. Bu yaklaşım içerisinde, Huang ve diğerleri (1995) doğru bir bilgisayar bütünleşik imalat (BBI) sistemini başarmak için süreç planlama ile çizelgelemenin bütünleştirilmesi gereğini ortaya koymuştur. Bunu sağlamak için de, süreç planlama ile çizelgelemeyi bir tek optimizasyon görevi içinde birleştiren ve bunlar arasındaki etkileşimin en üst seviyeden başlayıp en alt seviyede bittiği yenilikçi bir yöntem geliştirmişlerdir. Yazarlar bu yaklaşımın probleminin hesap karmaşıklığını büyük oranda azalttığını bildirmektedir.

Üretim çizelgelerini etkilediği belirtilen unsurlar çizelgelemenin amacını da doğal olarak belirlemiş olmaktadır. Bu yüzden çizelge başarı ölçütü, tipik olarak, görev gereği (için) envanter tutma, üretim çevrim sıklığı, üretim-seviye gereksinimlerinin yerine getirilmesi ve teslim tarihini sağlama arasındaki dengeleri içine alır.

Fox ve Smith (1984)'e göre, gerçek imalat ortamları incelendiğinde varılan sonuç şudur: Çizelgelemenin amacı yalnızca teslim tarihlerini karşılamak değildir; aynı zamanda, fabrikanın değişik bölümlerinde meydana gelen birçok kısıt da yerine getirilmelidir. Çizelgeleme fabrikanın diğer kısımlarındaki faaliyetlerden bağımsız, farklı bir fonksiyon değildir; fabrikadaki başka yerlerde verilen kararlara oldukça bağlıdır.

Bu bakımdan çizelgelemede öncelikle *organizasyonel hedefler* gelmektedir (Fox ve Smith, 1984). Bunlar temel olarak aşağıdaki şekildedir.

- **Teslim tarihleri:** Bir fabrikanın asıl kaygısı teslim tarihlerini karşılamaktır. Bir siparişin gecikmesi müşteri memnuniyetini etkiler.
- **Yarı mamüller (süreç-içi-envanter):** Yarı mamül envanteri önemli bir yatırımı temsil eder. Bu yatırımın karşılığı bitmiş ürünün dağıtımından önce geri kazanılamaz. Bu yüzden, süreç-içi-envanter süresinin azaltılması istenir.
- **Kaynak seviyeleri:** Personel, ham madde, takım v.b. gibi kaynaklar kısıtlarla ilişkilidir. Mesela, işçi seviyesinin bir ay müddetince sabit kalması veya hammadde envanterinin

iki günü çıkaracak şekilde sınırlandırılması istenebilir.

- **Maliyetler:** Malzeme, ücretler ve fırsat maliyeti gibi maliyetlerin azaltılması önemli bir hedef olabilir. Ayrıca bu, işgücünün sabitleştirilmesi gibi diğer hedeflerin gerçekleştirilmesine de yardımcı olabilir.
- **Üretim seviyesi:** Üst planlama fabrikadaki her maliyet merkezi için üretim hedeflerini belirleyerek şu iki fonksiyonu birleştirir: fabrikanın birincil imkanlarının tayini ve ilk bütçenin belirlenmesi. Bu faaliyetin bir sonucu, fabrikanın çeşitli alanlarında çalışacak iş vardiyaları tahmin edilebilir.
- **Atölye durağanlığı:** Bu çizelgeleme için düzenleme sayısının ve bu düzenlemeler sebebiyle hazırlıktaki karışıklık miktarının bir fonksiyonudur. Atölye durağanlığı hazırlık zamanı ve fabrikadaki değişiklik iletişimi için zamanın bir aracıdır.

Ticari çizelgeleme sistemleri incelendiğinde görülmektedir ki, onların çoğu teslim tarihlerini tam karşılama vurgusu ile sadece basit kapasite analizi sağlamaktadır. Herhangi bir ilave kısıt kullanımı ve sunumu için genel imkanlar sağlama çok az veya hiç göz önüne alınmamıştır. Bundan başka, bu sistemler parti merkezlidir ve haftalık veya aylık çalışılacağı düşünülmüştür; yani, bu sistemler gerçek-zamanda kontrol sağlamazlar. Diğer taraftan, yönetim bilimi araştırması yapay problemler için ya optimal sonuçlar bulmaya odaklanmış veya teslim tarihlerini karşılamak ya da imkanların kullanımını enyüksek yapmaya odaklanmıştır. Aynı zamanda, bu çözümler gerçek hayattaki çizelgeleme problemi için doyurucu bulunmamaktadır (Fox ve Smith, 1984).

Üretim, bir periyot için bir defa çizelgelandikten sonra, bir gözlem ve kontrol fonksiyonu gerektirir. Bu fonksiyon çizelge ile iş sırası durumu ve çizelge ile tezgah durumunun mukayese edilmesiyle yerine getirilir. Üretimin gözlenmesi ve kontrolü her ne zaman mümkün olursa, teslim tarihlerinin karşılanması veya kaynak kullanımını maksimize etmek için gibi, birkaç amaç tarafından potansiyel olarak etkilenir.

Kesikli parça imalatında, üretim çizelgeleme işlemini genellikle tecrübeli insan çizelgeciler (uzmanlar) tarafından, tecrübeye dayanan bir hüner çalışması olarak kabul edilir. Bununla beraber, büyük işletmelerde insan çizelgecilere yardım etmek için hammaddeleri ve



süreç-içi envanteri izleyen çeşitli veritabanı sistemleri mevcuttur. Aynı zamanda, bu veritabanı sistemlerinin çoğu, bazı yönleriyle çizelge üretimini otomatikleştiren programları da içine alabilmektedir. Bunların başlıcaları malzeme ihtiyaç planlama (MİP), tam zamanında üretim (TZÜ) ve optimal üretim tabloları (OÜP) gibi üretim planlama ve kontrol felsefeleri olarak sayılabilir.

#### 1.4 Çizelgelemede Amaçlar

Çizelgeleme belli bir veya birden çok başarı ölçütünü iyileştirmek üzere yapılır. Bu başarı ölçütlerinin herbirisinin belli ekonomik anlamları ve değerleri vardır. Dolayısıyla belli başarı ölçütlerini iyileştiren çizelgeler üretmek herşeyden önce ekonomik bir icaptır. Ancak bütün ölçütlerin aynı anda iyileştirilmesi mümkün değildir. Çünkü bunlar çoğu zaman çatışan amaçlardır. Zaten bütün başarı ölçütleri her zaman aynı önemde değildir. Bunların nisbi önemi belli sistem durumlarına göre değişmektedir.

Akış sürelerinin minimizasyonu ölçütü, muhtemelen atölye tipi çizelgelemede en sık dikkate alınandır. Akış süreleri birim zamanda tamamlanan iş miktarıyla ilgilidir.  $n$ -işli bir modelde iş miktarı sabit olduğundan çizelge en büyük tamamlanma süresi enküçülenerek birim zamanda tamamlanan iş miktarı ençoklanmış olmaktadır. Ortalama akış süresinin en aza indirilmesi yanında çizelge en büyük tamamlanma zamanının en aza indirilmesi parti çevrim süresinin kısaltılmasını, sonuç olarak da üretim artışını sağlayacaktır.

Bir diğer önemli başarı ölçütü teslim tarihlerini karşılamadır. Çizelgeleme amacı iş teslim tarihlerini karşılamak olduğunda, en önemli başarı ölçütleri geç kalan işler oranı veya ortalama iş pozitif gecikmesi olması muhtemeldir. Bu ölçütler teslim tarihi bilgisini kullanan sevketme taktiklerini ön plana çıkarır. Birden fazla faktör başarıyı etkileyebileceğinden dolayı, Baker (1994)'e göre, pozitif gecikme ölçütleri ortalama akış süresi en aza indirilmesinden çok daha fazla zor bir problem olarak gözükmektedir.

Teslim tarihi bilgilerine dayanarak öncelik saptamada üç temel yaklaşım vardır. Bunlar atama ya da tahsisata (allocation) dayalı öncelikler, serbestlik süresine dayalı öncelikler ve orana dayalı önceliklerdir. Bir işin tahsisatı ( $a_j$ ) onun hazır zamanı ( $r_j$ ) ve teslim tarihi ( $d_j$ )

arasındaki süredir. Zaman ( $t$ ) geçtikçe bir işin kalan tahsisatı daralır. Bu o işin acilliğini belirler ( $a_j(t)=d_j-t$ ). Karar verilirken bütün işler için zaman ( $t$ ) aynı olduğundan, önceliği etkileyen husus  $d_j$ 'dir. Bu yüzden en erken teslim tarihi kuralı (EDD), Baker'a göre, atamaya dayalı en basit kuraldır.

Bir işin aylak zamanı, o işin tahsisatından onun işlem süresinin ( $p_j$ ) çıkarılması olan işin kalan tahsisatına ( $s_j=a_j(t) - p_j$ ) eşittir. En basit aylak-tabanlı kural en az aylak zaman (MST) kuralıdır. Bazen, teslim tarihi bilgisini kesinlikle kullanmamasına rağmen, en kısa işlem süresi (SPT) kuralı da teslim tarihini karşılamada etkindir.

Oran-tabanlı yaklaşımlar aylak-tabanlı yaklaşımlara benzer. Şöyleki, mesela kritik oran kuralı ya  $a_j(t)/p_j$  ya da kalan tahsisatın kalan iş miktarına oranlanmasıyla elde edilir ve en küçük orana öncelik verilir. Acilliği ölçmede kalan iş miktarı yanında bir işin kalan işlem sayısı da kullanılabilir. Bu, işlem başına kalan tahsisat (SPRO) ya da işlem başına kalan aylak zaman (SPRW) kurallarını ortaya çıkarmaktadır. (Baker, 1994)

Bir çizelgenin teslim tarihlerini karşılamadaki başarıyı, teslim tarihlerinin ne kadar dar veya geniş olduğuna bağlıdır. Ayrıca, Taşgetiren ve diğerleri (1995a)'nın belittiğine göre, öncelik kurallarının nisbi başarıyı da teslim tarihi darlık faktöründen etkilenir. Dar teslim tarihlerinde bir kural iyi sonuç verirken, geniş teslim tarihlerinde başka bir kural daha iyi sonuç vermektedir.

Taşgetiren ve diğerleri (1995a)'nın belittiğine göre, Cheng (1988), Baker (1984), Miyazaki (1981) ve Gee ve Smith (1993) gibi bazı araştırmacılar, hem teslim tarihi oluşturma yönteminin, hem de öncelik kuralının atölye başarısını etkilediğini gösterdiler. İş bilgilerine dayanan bu faktörler, işin toplam işlem zamanı, işin toplam işlem sayısı ve işin sistemdeki kuyruk zamanıdır. Bu faktörlerden yararlanılarak geliştirilen üç temel teslim tarihi atama yöntemi *sabit tahsisatlı* (SAT), *eşit aylak tahsisatlı* (EAT) ve *toplam iş tahsisatlı* (TIT) atama yöntemleridir. Bu yöntemlerin formülleri aşağıda görülmektedir. Burada  $\gamma$  sabit tahsisat miktarını,  $\beta$  aylak tahsisat miktarını ve  $k$  toplam iş miktarı tahsisat katsayısını gösteren sabitlerdir.

$$\text{SAT için: } d_j = r_j + Y$$

$$\text{EAT için: } d_j = r_j + p_j + \beta$$

$$\text{TİT için: } d_j = r_j + k^* p_j$$

Taşgetiren ve diğerleri (1995 a) teslim tarihi oluşturma yöntemlerini karşılaştırmış ve sonuç olarak ortalama pozitif gecikme başarı ölçütü kullanıldığında teslim tarihini TİT yöntemi ile oluşturmanın daha uygun olacağını belirtmektedir. Ayrıca, yazarlar teslim tarihine dayalı önceliklendirmenin akış zamanına göre önceliklendirmeden daha iyi bir yaklaşım olduğunu ve öncelik kurallarının nisbi başarılarının atölye yükü ve kullanılan teslim tarihi oluşturma yönteminden etkilendiğini de gözlemlemişlerdir.

## 1.6 Araştırmanın Amaçları

Black (1991)'ın da belirttiği gibi, atölye tipi üretimde maliyet etkinliği çok düşüktür. Bu yüzden iyi bir çizelgeleme modeli imalat sisteminin üretim verimliliğini arttıracaktır. Buna ilaveten, iyi çizelgeleme müşteri istekleri ve tercihler gibi rekabet için gerekli bazı koşulların sağlanmasını da arttıracaktır. Çizelgeleme üretim yönetiminin çok önemli bir faaliyeti olduğundan dolayı, literatürde genişçe yer almaktadır. Ancak atölye çizelgeleme probleminin matematiksel zorluğundan dolayı, çok yeterince iyi çözümler üretilmemektedir.

Bu araştırmanın temel amacı, genel atölye tipi çizelgeleme çözümlerini iyileştirmek olduğu için, iyi bir başlangıç çizelgesi kuran ve problem çözüm uzayında daha geniş bir arama düzeneği oluşturarak onu iyileştiren bir çizelgeleme modeli kurulması öngörülmüştür. Bunun üzerine, *uzman sistemler* tekniği ile iyi bir başlangıç çizelgesi elde eden ve *tabu arama* tekniği ile onu iyileştiren bütünlük bir çizelgeleme modeli kurulması amaçlanmıştır. Tezin amacı bu bütünlük çizelgeleme modelini sunmaktır.

## 1.7 Araştırmanın Kapsamı

Bu araştırmanın kapsamı (i) genel atölye tipi çizelgeleme problem alanı tanımlamak, (ii) bu

alanda kullanılabilen yaklaşımların genel bir sunumunu yapmak, (iii) uzman sistemler ve tabu arama yaklaşımlarını kullanarak bir prototip çizelgeleme sistemi oluşturmak ve (iv) oluşturulan çizelgeleme sisteminin olurluluğunu test etmekle sınırlıdır.

## 1.8 Tezin Düzeni

Tezin birinci ve ikinci bölümlerinde genel olarak çizelgeleme probleminin önemi, yeri ve yapısı ortaya konmaya çalışılmaktadır. Üçüncü bölümde çizelgeleme problemine uygulanan mevcut çözüm yaklaşımları ve ilgili literatür sunulmaktadır. Dördüncü bölümde uzman sistemler yaklaşımı detaylı olarak açıklanmaktadır. Beşinci bölümde tabu arama tekniğini ilgili yaklaşım, taktik ve parametrelerle beraber genişçe açıklanmaktadır. Altıncı bölümde amaçlanan çizelgeleme sisteminin geliştirilmesi açıklanmaktadır. Yedinci bölümde amaçlanan sistemin olurluluğunu test etmek üzere kurulan deney düzeneği, deneylerin sonuçları ve istatistiki testler sunulmaktadır. Son bölümde ise çalışmanın sonuçları ve geleceğe dönük düşünülenler tartışılmaktadır.

## BÖLÜM 2. GENEL ATÖLYE TİPİ ÇİZELGELEME PROBLEMİ

Bu bölüm genel atölye tipi çizelgeleme problemini açıklamayı amaçlamaktadır. Bu itibarla problemin tanımı, geçerli olan varsayımlar ve matematik modeli sunulmuştur. Ayrıca problemin kesin çözüm zorluğu ortaya konmuş ve bulgusal çözümlerde kullanılacak olan problem temsil şekilleri de bu bölümde sunulmuştur.

### 2.1 Tanım

Genel atölye tipi çizelgeleme problemi sonlu sayıda iş kümesi  $J_i$ 'nin ( $i=1,2,\dots,n$ ) sonlu sayıda tezgah kümesi  $M_k$  ( $k=1,2,\dots,m$ ) üzerinde önceden belirlenen bir sıra ve kapasite kısıtlarını yerine getirerek, belirli bir başarı ölçütünü en iyileyecek şekilde her işlem için bir başlama zamanı ( $t_{ik} \geq 0$  olacak şekilde) belirlemektir.

### 2.2 Varsayımlar

Her bir iş kendi işlem sırasına sahiptir (teknolojik kısıt) ve her tezgahda tam olarak bir kere işlenir ( $O_{i1}, O_{i2}, \dots, O_{im}$ ), yani her bir iş  $m$  tane işleme sahiptir, dolayısıyla toplam işlem sayısı  $n \times m$  kadardır. Her işleme ilişkin  $\mu_{ik} \in M_k$  olan bir tezgah ve işlem süresi  $p_{ik}$  vardır. Herhangi bir tezgah herhangi bir zamanda sadece bir işi işleyebilir ve herhangi bir iş herhangi bir zamanda sadece bir tezgah tarafından işlenebilir (kapasite kısıtı). Bu kısıtlara ilaveten French (1982)'de ifade edildiği gibi genel atölye tipi çizelgeleme probleminde şu varsayımlar yapılır:

- Bir işlem işlem anında kesilemez; işlem bir bütündür, bölünemez.
- Herbir iş tamamlanıncaya kadar bütün işlemleri işlenmelidir.
- Bütün işler, işlem süreleri ve teknolojik kısıtlar tam olarak biliniyor ve bütün işler sıfır anında işlenmeye hazırdır.

- İşlem süreleri süreç sırasına bağlı değildir.
- Hazırlık ve taşıma süreleri işlem sürelerine dahil edilmiştir.
- Tezgahlar çizelgelemeye başlarken boştur, asla bozulmazlar, bakım istemezler ve operatör yokluğu çekmezler.
- Her tezgah tipinden sadece bir tane vardır.
- Bütün işler eşit öneme sahiptir, öncelik tercihi yoktur.

### 2.3 Çizelgeleme Probleminin Matematik İfadesi

Teknolojik ve kapasite kısıtlarını yerine getiren bütün çizelgeler olurlu birer çözümdür. Aranılan çözüm, bu çizelgeler arasından belli bir amacı en iyileyen çizelgedir. Problemin matematik ifadesi şöyledir:

$$\begin{array}{ll}
 \min C_{max} & \\
 t_{il} - t_{ik} \geq p_{ik} & \text{bütün } [k, l] \text{'ler ve } i \text{'ler için; ki burada } [k, l] \text{ } i \text{ (1)} \\
 & \text{işinin ardışık iki işleminidir } (k \rightarrow l) \text{'dir.} \\
 t_{iz} - t_{jy} \geq p_{jy} \vee t_{jy} - t_{iz} \geq p_{iz} & \text{bütün } [y, z] \text{'ler ve tezgahlar için; burada } i \neq j \text{ ve (2)} \\
 & [y, z] \text{ aynı tezgahı gerektiren işlem çiftidir.} \\
 t_{ik} \geq 0 & \text{bütün işlemler için. (3)}
 \end{array}$$

Bu model Baker (1974)'deki çizelgeleme probleminin bir geliştirilmesidir. Burada birinci kısıt teknolojik sırayı sağlar. Diğer bir ifadeyle, o herbir işin ardışık işlemlerinin başlama zamanları arasındaki farkın en az bir öndeki işlemin süresi kadar olmasını garanti eder. Bu bir işin bir anda sadece bir tezgah tarafından işlenebileceği varsayımını yerine getirir. İkinci kısıt bir tezgahın aynı anda sadece bir işlemi yapabildiğini sağlar. Üçüncü kısıt negatif olmama şartını yerine getirir; böylelikle bütün işlerin tamamlanacağını garanti eder. Çizelgelemede amaç fonksiyonu daima işlerin tamamlanma zamanının bir fonksiyonudur. Bu bazen en büyük tamamlanma zamanı, ortalama tamamlanma zamanı ve ortalama tezgah boş bekleme oranı gibi doğrudan, bazen de tamamlanma zamanıyla beraber en büyük pozitif gecikme ve ortalama pozitif gecikme gibi teslim tarihinin bir fonksiyonudur.

## 2.4 Çizelgeleme Probleminin Görsel Temsili

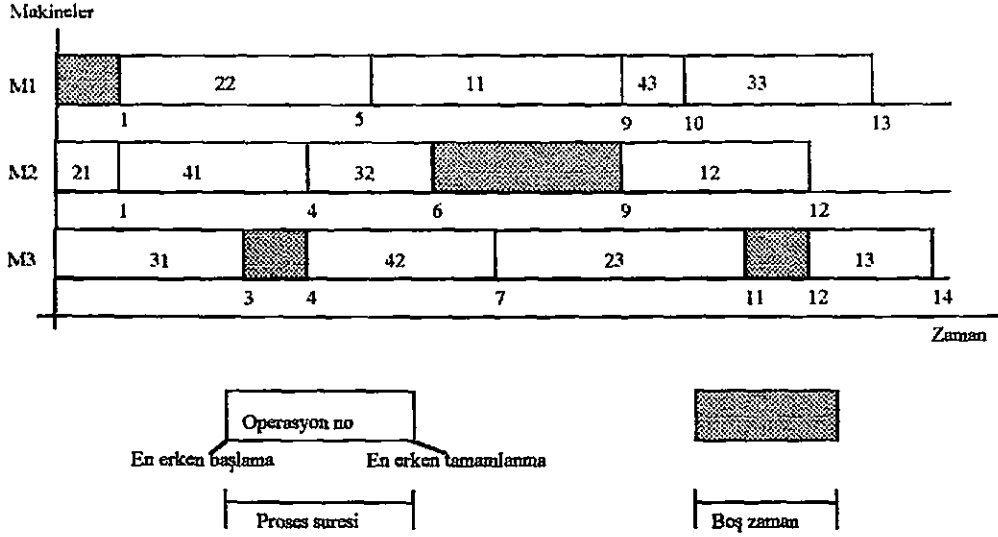
### 2.4.1 Gantt diyagramı gösterimi

Henry L. Gantt tarafından geliştirilen bu diyagram üretim yönetiminin basit, ama kullanışlı ve çok önemli bir görsel aracıdır. Gantt diyagramı işlemler ile onların sıraları, süreleri, başlama ve bitiş zamanları, işleneceği tezgahlar v.b. gibi son derece karmaşık bilgileri açık-seçik ve öz bir şekilde gösterebilir. Hazırlanması, değiştirilmesi, fiili durumla karşılaştırılması son derece kolaydır ve bu yüzden çok kalifiye uzmanlar gerektirmez. Gantt diyagramında gösterimi için, herbir satırda belli bir tezgah yer alır. Bu satırlar üzerinde, zaman eksenini olarak, işlemler belirgin bloklar halinde dizilir. Böylece bir bakışta belli bir işlemin hangi tezgahda, ne zaman başlayıp, ne zaman biteceği, hangi işlemlerin kritik olduğu, hangilerinin aylaklığa sahip olduğu görülebilir.

Aşağıda Tablo 2.1'de, dört iş ve üç tezgahdan oluşan bir çizelgeleme problemine ait işlem süreleri ve işlemlerin yapılacağı tezgah bilgileri verilmiştir. Bu bilgilere göre, Mesela Tezgah 1'de yapılacak işlemler 22, 11, 43 ve 33'dür. Bu işlemlerin yapılabilmesi için öncelikle teknolojik sıra kısıtının yerine getirilmesi gerekir. Mesela Şekil 2.1'de görüldüğü gibi, 22 işleminin başlayabilmesi için 21 işlemin bitmesi gerekir. Tablo 2.1'deki probleme ait olurlu bir çizelge Şekil 2.1'de görülmektedir. Buna göre en büyük tamamlanma zamanı 14'dür.

Tablo 2.1 4x3 atölye tipi çizelgeleme problemi verileri

|       | Operasyonlar |       |       |       |       |       |
|-------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|       | 1            |       | 2     |       | 3     |       |
| İşler | $m_k$        | $P_i$ | $m_k$ | $P_i$ | $m_k$ | $P_i$ |
| 1     | 1            | 4     | 2     | 3     | 3     | 2     |
| 2     | 2            | 1     | 1     | 4     | 3     | 4     |
| 3     | 3            | 3     | 2     | 2     | 1     | 3     |
| 4     | 2            | 3     | 3     | 3     | 1     | 1     |



Şekil 2.1 Gantt diyagramı örneği

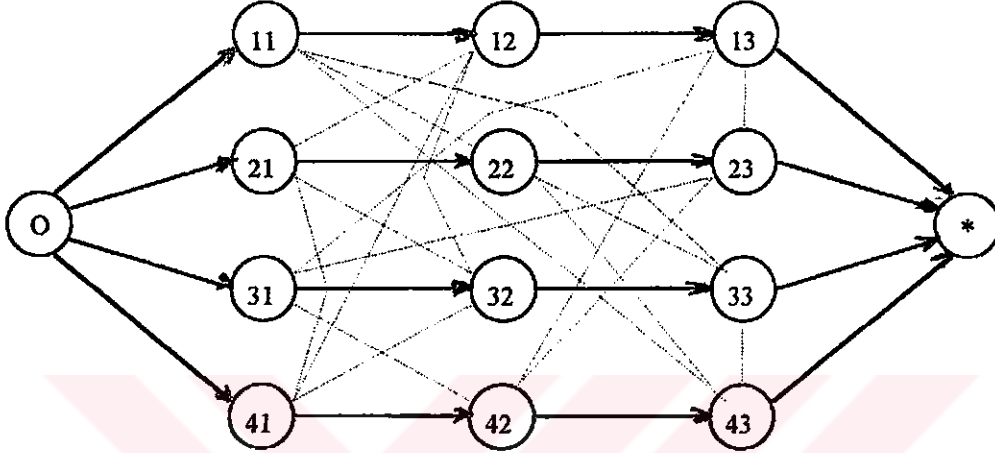
## 2.4.2 Kritik yol diyagramı gösterimi

Bu diagram, aralarında başlama ve bitiş zamanları bakımından bağımlılık bulunan ve sonunda aynı noktada birleşen faaliyetleri gösterir. Bir atölye tipi çizelgeleme problemi için kritik yol diyagramı, Brucker ve diğerleri (1994)'ün ifadesiyle,  $G=(V,C\cup D)$  şeklinde tanımlanır. Burada, V işlerin işlemlerini gösteren düğümler kümesini gösterir (Şekil 2.2'deki 12 adet işlem). C işlemlerin teknolojik sırasını yansıtan oklar kümesini gösterir (Şekil 2.2). Bu sıra içerisindeki her bir işlemin bir *iş öndülü* ( $JP(i)$ ) ve bir *iş ardılı* ( $JS(i)$ ) vardır. Mesela Şekil 2.2'de işlem 12'nin iş öndülü 11 işlemi, işlem 13'ün iş öndülü 12 işlemidir ve tersi mesela işlem 11'ün iş ardılı 12 işlemidir.

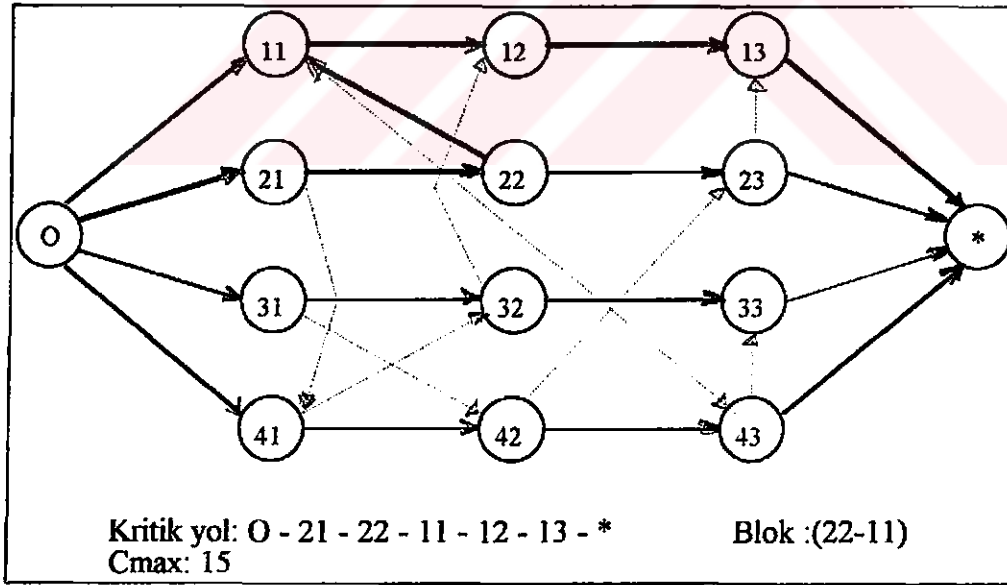
D aynı tezgahı gerektiren her bir işlem çifti için çift yönlü yaylar kümesini gösterir. Şekil 2.2'de görüldüğü gibi tezgah 2'de yapılması gereken işlemler 21, 41, 12 ve 32'dir. Ancak bunları o tezgahda hangi sıra ile işleneceği belli değildir. Temel çizelgeleme kararı aynı tezgahda işlenmek zorunda olan bu işlemleri sıralamak; çift yönlü D yaylar kümesini tek yönlü oklar kümesi halinde sıralamaktır (Şekil 2.3'deki  $21 \rightarrow 41 \rightarrow 23 \rightarrow 12$  sırası gibi). D kümesi, her tezgah için bir tane olmak üzere, tezgah sayısı adedince alt gruptan oluşur. Bu sıralama neticesinde her bir işlemin -sıranın ilk işlemi hariç- bir *tezgah öndülü* ( $MP(i)$ ) ve -sıranın son işlemi hariç- bir *tezgah ardılı* ( $MS(i)$ ) olacaktır. Sıralanmış bir D'ler kümesi *seçim S* olarak adlandırıldığında, seçim



S ancak ve ancak bütün D'ler sıralanmış, ve sonuç  $G(S)=(V,C\cup S)$  grafiği *kısır döngüsüz*<sup>1</sup> ise, S kümesi bir *komple seçim* olarak adlandırılır ve bu olurlu bir çizelge tanımlar (Şekil 2.3).  $G(S)$  grafiği her iş ve her tezgah için işlemlerin bir sırasını tanımladığından, kritik-yol formülasyonu kullanılarak, her bir işlem için en erken başlama zamanını belirler. Böylece belirli düzgün bir amaç fonksiyonu için başka herhangi bir olurlu çizelgeden daha kötü olmayan bir çizelge ortaya çıkarılabilir. Hatta bu komple seçimlerden biri en iyi çizelgeyi içerecektir.



Şekil 2.2 Tablo 2.1'deki problemin kritik-yol diyagramı



Şekil 2.3 Tablo 2.1'deki probleme ait olurlu bir çizelge

<sup>1</sup> *Kısır döngü* bir ağ üzerindeki bir yolun sonsuz çevrime girmesi ya da bir işin bir işleminin iş ardılıının (öndülü) çizelgede o işlemden önce yer alması durumudur, bu olursuz bir çözüm işaretidir.

Eğer amaç fonksiyonu en büyük tamamlanma süresini en küçükmek olursa,  $O$ 'dan  $*$ 'a en uzun yol değeri, ki en büyük iş tamamlanma zamanı ( $C_{max}$ ), *kritik yola* eşittir (Şekil 2.3). Kritik yol üzerindeki işlemler *kritik işlemler* olarak adlandırılmaktadır. Eğer kritik bir işlemin başlama zamanı geciktirilirse,  $C_{max}$  da o kadar gecikir demektir. Benzer şekilde kritik bir işlemin başlaması daha erkene alınabilirse  $C_{max}$  'ın da kısalması söz konusu olabilir. Eğer kritik işlemlerden aynı tezgahı gerektirenler bitişik olarak kritik yol üzerinde bir grup oluşturmuşlar ise bu gruba *blok* denmektedir.

## 2.5 Çizelge Üretimi ve Tipleri

Çizelge üretim yordamları, Baker (1994)'a göre, *tek-paso* düzenek ve *uyarlamalı* düzenek olarak sınıflandırılabilir. Tek-paso düzenekte, işlem başlama zamanı bir defada kalıcı olarak sıralanır ve bir daha değiştirilmez. Böylece, işlemler listesi baştan sona tek pasoda ele alınarak bütün çizelge oluşturulur. Tek-paso çizelgelerin önemli bir sınıfını basit öncelik sevketme kuralları oluşturur.

Uyarlamalı düzenekte ise işlem başlama zamanları geçici olarak sıralanır ve diğer hesaplamalara bağlı olarak tekrar tekrar değiştirilebilir. Bu sınıfa açgözlülük (*greedy*) ve araya girme (*insert*) gibi çeşitli inşaa yordamları ile rastgele örnekleme gibi yöntemler girmektedir. Bahsedilen yöntemlerle değişik tipte çizelgeler üretmek mümkündür. Bunlar aşağıda açıklandığı gibi yarı-aktif, aktif ve gecikmesiz çizelgelerdir.

SPT gibi basit öncelik kuralları sözkonusu olduğunda bulgusal çizelge üretimi için, Baker (1994)'a göre, gecikmesiz sevketme aktif sevketmeden daha iyi sonuç vermektedir. Elde edilen sonuçlar temel çizelge üretim yaklaşımı olarak, aktif çizelgeler kümesinden ziyade gecikmesiz çizelgelerin kullanılmasını desteklemektedir.

Bazı inşaa yordamlarıyla aktif ve yarı-aktif olan iyi çizelgeler üretmek mümkündür. İlaveten, optimal veya optimale yakın çizelgeler üretmek için bir diğer yaklaşım ise çizelge iyileştirme. Bu yordamlar olurlu tam bir çizelge ile başlar ve basit iterasyon teknikleriyle; mesela komşuluk arama teknikleri gibi, onu iyileştirmeye gayret eder.

*Yarı-aktif çizelge:* Tezgahların herhangi biri üzerindeki işlem sırasını değiştirmeksizin hiçbir işlemin daha erken tamamlanmasının mümkün olmadığı; yani bütün iş ve tezgah

sıraları aynı kalırken bir işlemin mümkün olduğunca erken başlatıldığı olurlu bir çizelge yarı-aktiftir (Şekil 2.4a). Böyle bir çizelgede en büyük tamamlanma süresini iyileştirmek ancak tezgahlardaki işlem sıralarını değiştirmekle mümkün olur. Yarı-aktif çizelgeler hiç gereksiz boş zaman içermediği için bütün çizelgeler kümesi içinde baskın bir küme oluşturur.

*Aktif çizelge:* Diğer herhangi bir işlemi geciktirmeden, tezgahların işleme sırasını değiştirerek hiç bir işlemin daha erken tamamlanmasının mümkün olmadığı, yani hiç bir işlemin başka herhangi bir işlemi bekletmeksizin daha erkene çizelgelenemediği olurlu bir çizelge aktif çizelgedir (Şekil 2.4b). Aktif bir çizelge aynı zamanda yarı-aktif olmak zorundadır; ancak tersini doğru olması beklenemez. Aktif çizelgeler genelde atölye tipi çizelgelemeprobleminde en küçük baskın kümeyi teşkil eder.

*Gecikmesiz çizelge:* Eğer tezgah önünde bekleyen işlenmeye hazır bir işlem varken tezgahın asla boş bekletilmeği olurlu bir çizelge gecikmesiz bir çizelgedir (Şekil 2.4c). Gecikmesiz bir çizelge aktif ve yarı-aktif çizelge olmak zorundadır, ama bunun tersinin doğru olması beklenemez. Kapsam şu şekildedir: gecikmesiz çizelge  $\subseteq$  aktif çizelge  $\subseteq$  yarı-aktif çizelgeler.

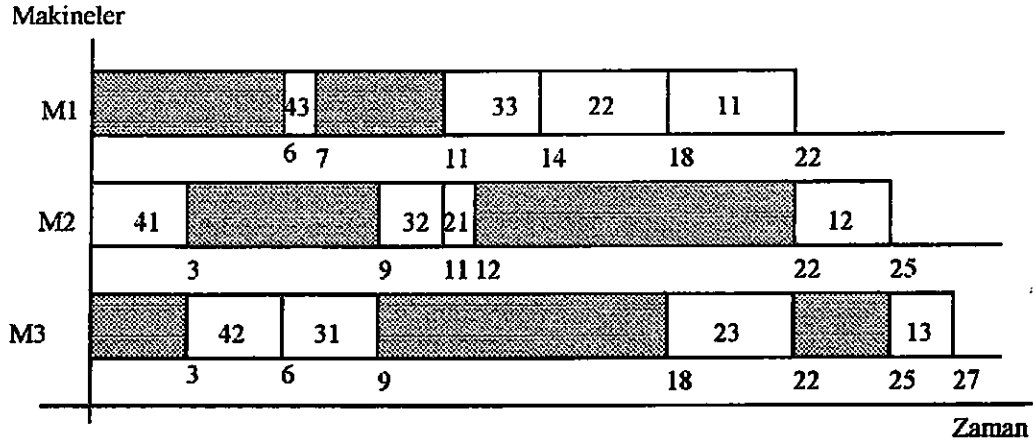
Gecikmesiz çizelgeler en az sayıda eleman içeren çizelge kümesini oluştururlar, ancak bu baskın<sup>2</sup> bir küme olmaz. Yine de, Jain (1998)'e göre, en iyi gecikmesiz çizelgenin, optimal olmasa bile, çok iyi bir çözüm vereceği beklenebilir. Benzer şekilde, Pinedo (1995)'e göre de, çoğu model için tezgah boşaltmaya (preemption) izin veren bütün modeller dahil, gecikmesiz optimal çizelgeler vardır.

Herhangi düzgün bir başarı ölçütü eniyilenmeye çalışılıyorsa sadece aktif çizelgelerin dikkate alınması yeterlidir. Aktif çizelge sayısı hem işlem rotasının hem de işlem sürelerinin bir fonksiyonudur. Yarı-aktif çizelgeler kolayca aktif çizelgelere dönüştürülebilir. Ancak verilen aktif bir çizelgeden gecikmesiz bir çizelge yapmanın nasıl olacağı her zaman kolay değildir. Gecikmesiz çizelgelerin sayısı önemli ölçüde azdır. Baker (1994)'e göre, en iyi çizelgenin gecikmesiz çizelgeler arasında olduğu garantilenmemektedir. Gecikmesiz çizelgelerin sayısı az olmasına rağmen baskın küme oluşturmamaktadır. Yine de optimum olmasa bile, en iyi gecikmesiz çizelgenin çok iyi

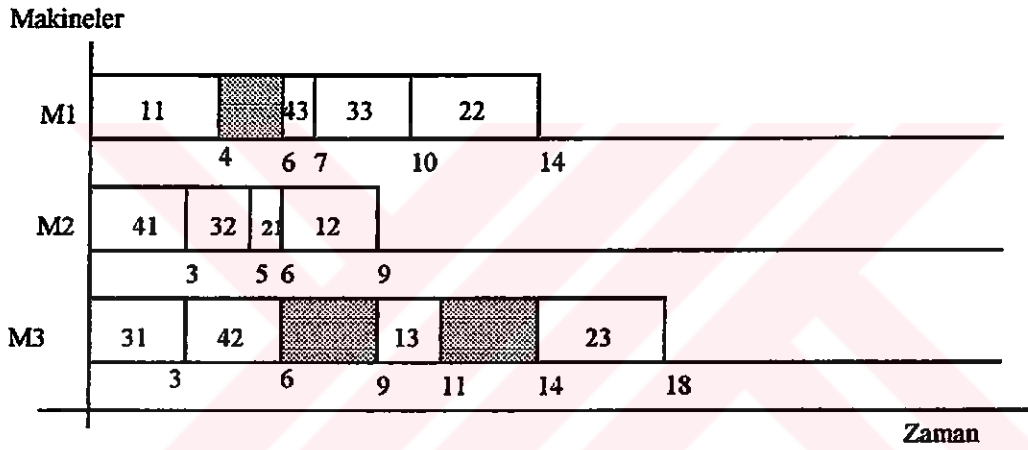
---

<sup>2</sup> Baskın küme içinde optimal ya da istenen çözüm özelliklerini içinde bulunduran çözüm kümesidir.

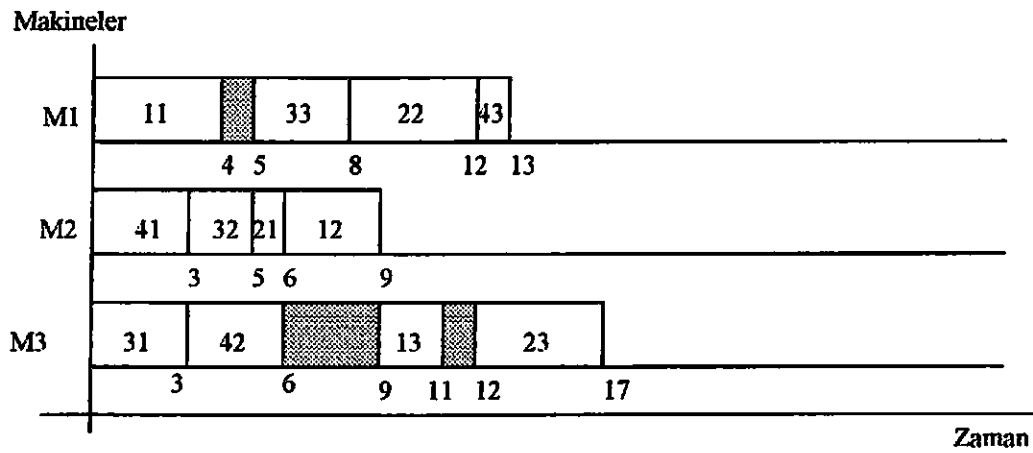
bir çözüm sağlayacağı beklenmektedir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 2.4 Çizelge tipleri: (a) yarı-aktif çizelge, (b) aktif çizelge, ve (c) gecikmesiz çizelge

## 2.6 Çizelgeleme Problemlerinin Zorluğu

Prensipite herhangi bir atölye tipi çizelgeleme problemi için olurlu çizelgelerin sayısı, ardışık işlemler arasına keyfi miktarda boş zaman girilebileceği için sonsuzdur. Hiç boş zaman bırakılmasa bile, belli hacimdeki bir problem için mümkün yarı-aktif çizelgelerin sayısı aşırı fazla olacağından, yani  $(n!)^m$ , bunlar arasında en iyisinin tesbiti için harcanacak zaman aşırı fazla olacak hatta bazen imkanı kalmayacaktır.

Pinedo (1995)'in ifadesiyle, eğer bir çizelgeleme problemini optimum çözecek etkin, yani polinomsal bir zaman algoritması yoksa bu problemler *NP-zor* olarak sınıflandırılır. Bu tür problemlerden bazıları özel koşullar altında azaltılarak polinomsal zamanda çözülebilir hale getirilebilir. Birkaç özel atölye tipi çizelgeleme problemi polinomsal olarak çözülebilir. Ama genel atölye tipi çizelgeleme problemi NP-zor (Non-Polynomial hard) problem sınıfına girer. Dahası, deterministik çizelgelemede<sup>3</sup> problemlerin çoğu NP-zor'dur.

Tabii olarak, bütün NP-zor problemler eşit zorlukta değildir. Bu yüzden, eğer problem aşırı derecede büyük değilse, bir çözüm yaklaşımı olarak dinamik programlama, mesela dal-sınır yöntemi kullanılır ve pseudo-polinomsal olarak çözülebilir (Brucker ve diğerleri, 1994). Yöntem bütün olurlu çizelgelerin zekice taranması fikrine dayanmaktadır. Diğer bir yaklaşım olarak, yaklaşık-optimal çözümler sağlayan yerel arama yöntemleri kullanmak mümkündür. Bunlar en iyiye yakın çözümler bulmayı garantileyen ve bunu nisbeten kısa zamanda gerçekleştirebilen yöntemlerdir. Başka bir yaklaşım da, optimallikle ilgili herhangi bir garanti sağlamaksızın ve daha iyi bir yöntem olmadığında, pratik olarak kullanılacak "bulgusal algoritmalar" dan yararlanmaktır (Brucker, 1995).

## 2.7 Önemli Terim ve Tanımlar

*İş* ( $J_i$ ): Bir veya birkaç işlemden oluşan bir görevdir.

*İşlem* ( $O_{ik}$ ):  $i$  işinin  $k$  tezgahında işlenmesi, değer katılmasıdır.

---

<sup>3</sup> *Deterministik çizelgelemede* çizelge yapılırken kullanılan bütün verilerin önceden biliniyor ya da bilindiği kabul ediliyor demektir.

*İşlem süresi ( $p_i$ ):*  $i$  işinin  $k$  tezgahında işlendiği ( $O_{ik}$  işlemi için harcanan) süredir.

*Hazır zaman ( $r_i$ ):*  $i$  işinin işlenmek için serbest bırakıldığı zamandır.

*Teslim tarihi ( $d_i$ ):*  $i$  işinin taahhüt edilen tamamlanma zamanıdır.

*Sıra:* işlerin verilen bir tezgahda işlendiği sırayı ifade eder; zaman bilgisi içermez.

*İş öndülü:* Bir işin işlem sırası bakımından birbirini takip eden işlemlerden önde olan.

*İş ardılı:* Bir işin işlem sırası bakımından birbirini takip eden işlemlerden arkada olan.

*Tezgah öndülü:* Bir tezgahtaki işlem sırası bakımından birbirini takip eden işlemlerden önde olan.

*Tezgah ardılı:* Bir tezgahtaki işlem sırası bakımından birbirini takip eden işlemlerden arkada olan.

*Çizelge:* İşlerin daha komplike bir tezgahlar kümesi dahilinde tahsisatını işaret eder ve dolayısıyla hangi işin hangi tezgahda ne zaman başlayacağı bilgisini içerir.

*Komşu çizelge:* Eğer iki çizelgeden birisi diğerinin iyi-tanınmış bir modifikasyonu ile elde edilebiliyorsa bu çizelgeler komşudur denir.

*Tamamlanma zaman ( $C_i$ ),*  $i$  işinin  $k$  tezgahındaki işleminin tamamlanma zamanı  $C_{ik}$  ile gösterilirse, o işin son işleminin tamamlanma zamanı işin tamamlanma zamanıdır.

*Negatif gecikme ( $L_i$ ),*  $i$  işinin tamamlanma zamanıyla teslim tarihi arasındaki farktır ve şöyle tanımlanır:  $L_i = C_i - d_i$ , öyle ki iş geç tamamlandığında pozitif ve erken tamamlandığında negatif değer alır. Ortalama veya toplam ( $\sum L_i$ ) ve en büyük ( $L_{max}$ ) değerlerini kullanmak mümkündür.

*Pozitif gecikme ( $T_i$ ),*  $i$  işinin teslim tarihinin ne kadar geciktiğinin bir göstergesidir. Dolayısıyla sadece teslimin zamanında yapılamaması durumunda orataya çıkar. Şöyle tanımlanır:  $T_i = \max(C_i - d_i, 0) = \max(L_i, 0)$ .

*En büyük tamamlanma zamanı ( $C_{max}$ ),* ki sistemi en son terkeden işin tamamlanma zamanı olan  $\max(C_1, \dots, C_n)$ 'a eşittir. Genellikle kısa çevrim süresini ima eder.

*Ortalama akış süresi ( $F_j$ ),* ki bütün işlerin tamamlanma süresinin ortalamasını ifade eder, o da toplam süreç-içi-envanterin bir göstergesidir.

*Ortalama tezgah boş bekleme oranı ( $I_j$ )*, ki aslında tezgah kullanım oranının en büyük yapılmasına eşdeğerdir.

*Geciken işler sayısı ya da oranı ( $\sum U_j$ )* ki bütün işler arasında kaç tanesinin geciktiğini ifade eden pratik bir ölçüdür.

*Yerel minimum çizelge:* Eğer herhangi basit bir yer değiştirmekle mevcut çizelge iyileştirilemiyorsa bu yerel minimum çözüm olarak adlandırılır. Yerel minimumdan kurtulmak için, tezgahlardaki işlem sırasını değiştirerek yerel minimum çözüm değerinden daha kötü bir çözümün kabullenmesi kaçınılmazdır.



## **BÖLÜM 3. MEVCUT ÇÖZÜM YAKLAŞIMLARI**

Çizelgeleme problemleri çeşitliliğinden, matematik çözüm zorluklarından ve önemini hiç kaybetmeksizin varlığını sürdürmesinden dolayı çok çeşitli yaklaşımların uygulanmasına sahne olmuştur. Hatta yeni ileri sürülen bazı yaklaşımların ilk uygulama örnekleri çizelgeleme alanında olmuştur. Netice itibariyle, bu geniş problem alanının ve bu alandaki çok çeşitli yaklaşımların sınıflandırılıp ilgili literatürle beraber sunulması bu bölümün içeriğini oluşturmaktadır.

### **3.1 Çizelgeleme Yaklaşımlarının Sınıflandırılması**

Çizelgelemeye temel modeller açısından yaklaşıldığında, kaynakların düzeni ve görevlerin tabii yapısı dikkate alınarak bir problem türü gruplandırması yapılabilir. Mesela açık atölye ve kapalı atölye şeklinde veya tek-tezgahlı modeller, paralel-tezgahlı modeller, akış-atölyeleri, iş-atölyeleri ve esnek imalat atölyeleri şeklinde veyahut da statik ve dinamik modeller şeklinde gruplandırılabilir (Baker, 1994).

Bunun tersi olarak, yukarıdaki problem türlerini çözecek teknikler açısından yaklaşıldığında ise bu tekniklerin yapısı gereği bir gruplandırmaya gidilebilir (Radommer ve White, 1988; Uzsoy ve diğerleri, 1994; Brown ve diğerleri, 1995; ve Ovacık ve Uzsoy, 1997). Bu çalışmada, çizelgeleme problemlerinin çözümü için kullanılan yaklaşımları temel olarak analitik yöntemler, öncelik sevketme kuralları, fırsatçı algoritmalar, yapay zeka teknikleri, yerel arama algoritmaları ve zeki arama yöntemleri şeklinde değerlendirilmiştir.

### **3.2 Analitik Yöntemler**

Üretim çizelgeleme problemlerini çözmek için kullanılan yöntemlerden ilki analitik yöntemlerdir ki; kuyruk teorisi, doğrusal programlama, dal-sınır algoritması, dinamik programlama v.b. gibi teknikleri içine alır. Bu teknikler sonlu sayıda hesapsal



iterasyonla, optimal çözümler üretir. Brucker (1995) polinomsal olarak çözülmüş tek-tezgahlı ve atölye tipi çizelgeleme problemleri çalışmalarını detaylı olarak özetlemektedir. Buna göre az sayıdaki problem türü için kesin çözüm yöntemleri bulunmaktadır. Diğer birkaç çalışma aşağıda özetlenmiştir.

Uzsoy (1995) bir parti işleme tezgahı problemi için, ilk önce problemi durağan olarak ele alıp  $C_{max}$ ,  $L_{max}$  ve toplam ağırlıklı tamamlanma süresini en küçük yapacak etkin optimal algoritmalar geliştirmiştir. Aynı zamanda, bu sonuçların bazılarını paralel parti işleme tezgahı problemlerine uygulamıştır. Daha sonra dinamik iş gelişlerinin olduğu problemleri ele alınarak  $C_{max}$ 'ın minimizasyonu için etkin optimal bir algoritma ve  $L_{max}$ 'ı en küçük yapacak birkaç bulgusal yöntem elde etmiştir.

Dudek ve diğerleri (1992) tarafından, yapılan bazı statik deterministik akış atölyesi çalışmalarının endüstride uygulama imkanı bulamadığı, buna rağmen daha çok kimyasal işlem endüstrisinde uygulanmaya çalışıldığı ve ikinci bir olası uygulama alanı olarak da FMS olduğu şeklinde bir yorum yapılmıştır.

Steiner ve Truscott (1993) yaptığı çalışmada çevrim süresi, toplam akış süresi ve süreç maliyeti başarı ölçütlerini endüstri yapan bir model geliştirmiştir. Bu model problemi "dağıtım matrisi" olarak adlandırılan özel bir maliyet matrisi yardımıyla polinomsal zamanda çözülebilir bir gezgin satıcı problemine dönüştürerek çözüm üretmektedir.

Miltenburg ve Sinnamon (1992) tam-zamanında üretim kontrol felsefesinin uygulandığı sistemlerin çizelgelenmesi için bir matematik programlama model geliştirmiştir. Son ürün seviyesinden alt montajlar seviyesine doğru üretilecek parçaları birbiriyle ilişkilendiren çok-seviyeli karışık tip (amaç fonksiyonu kuadratik) bir model kurulmuştur. Modelin amacı istenen üretim ve gerçekleşen üretim arasındaki farkın değişimini enküçükleme; yani, sistem tarafından kullanılan herbir parça için sabit bir kullanım oranını muhafaza etmektir. Matematik programlamanın kullanıldığı bir diğer çalışmada, Kim ve Leachman (1993) sınırlı kaynak karşısında çoklu proje çizelgelenmesi yapan bir yordam amaçlamıştır. Yordam hedef kaynak profillerini ayarlar ve projeler arasında gecikme maliyetlerinin dengelerini optimize eder.

### 3.2.1 Dal-sınır algoritmalarıyla atölye tipi çizelgeleme probleminin çözümü

Çizelgeleme probleminin çoğu NP-zor iken sadece çok özel durumlar polinomsal olarak çözülebilir. Yukarıda verilen literatürde görüldüğü gibi, analitik yöntemler içinde en yaygın olanı dal-sınır algoritmalarıdır. Bu yüzden aşağıda yöntemin genel bir açıklaması verilmiştir.

Atölye tipi çizelgeleme için dal-sınır algoritmasının genel işleyişi şöyledir: Öncelikle algoritma bir ağaç dallanma biçimi gibi temsil edilir. Başlangıçta ağaç sadece bir tek düğüm (yani, kök) içerir. Bütün olurlu çözümleri temsil eden bu düğümde henüz hiçbir tezgahda işlem sırası belirlenmemiştir. İlgili tezgahdaki işlemlerin kombinasyonu problemin bütün mümkün çözümlerini içine alır. Kökün ardılları ilgili tezgahdaki işlemlerin sırasının tesbitlenmesiyle belirlenir. Bundan sonra her bir ardıl tekrarlı olarak aynı şekilde elde edilir. Arama ağacının bir düğümünün incelenmesi o düğümün sadece bir çözümü temsil ederse; veya optimal çözüm içermediği görülürse durdurulur. Yapılan bazı çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

Dal-sınır yöntemi çalışmaları arasında en çok dikkat çekenlerden biri Carlier ve Pinson (1989)'dur. Bu yöntemde ilk olarak dallandırma yapılmaktadır. Bunun için aynı tezgah işlemlerini gösteren bir  $[i,j]$  yayı seçilir ve  $A \cup \{(i,j)\}$  ve  $A \cup \{(j,i)\}$  seçimleriyle bu iki düğümden dallanma yapılır. Sonra sınırlar belirlenir: üst sınır atölyenin en iyi bilinen çizelgenin değerine eşittir ve alt sınır ise bir-tezgah problemlerinin (tezgah 1..k) optimal değerlerinin en büyük değeridir. Ardından kritik yol problemi çözüm yoluyla en erken ve en geç serbest bırakma zamanları hesaplanır. Sonra kritik tezgah olarak adlandırılan en büyük başlangıç alt sınırlı tezgahın işlemleri bir öncelik olarak seçilir. Böylece arama uzayı ciddi olarak azaltılır. Bunun için bir bulgusal yöntem geliştirilmiştir.

Brucker ve diğerleri (1994) atölye tipi çizelgeleme problemi kritik-yol diyagramı olarak ifade etmiş ve hızlı bir dal-sınır algoritması geliştirerek ünlü 10X10 test problemini bir mini bilgisayarda 1<sup>o</sup> dakikadan az sürede çözmüştür. Algoritma sabit bir zaman miktarında durdurularak bir bulgusal yöntem olarak da kullanılabilir. Bu algoritma iki yaklaşımı birleştirir. İlki, Grabowski ve diğerleri (1986) tarafından serbest bırakma-tarihli ve teslim tarihli tek-tezgah problemlerine başarıyla uygulanmış bir dallandırma şemasının bir genelleştirilmesi, ikincisi ise Carlier ve Pinson (1989) tarafından her dallandırma adımından önce aynı tezgah işlemlerini tesbit etmek için

kullanılan bir yöntemdir. Yazarların ifadesine göre, sayım (enumeration) ağacının köküne iyi bir başlangıç çözümü sağlayarak algoritma iyileştirilebilir.

Chen ve Bulfin (1994) tek-tezgah problemi için hem en yüksek gecikmeyi, hem de geciken işlerin sayısını en küçük yapan iki ölçütlü bir çizelgeleme algoritması sunmuştur. Prensipte en yüksek gecikmeyi minimize eden bütün çizelgeler arasından, geciken işlerin sayısını en düşük yapan çizelgeyi bulmaktır. Bunun için hem bulgusal yöntem, hem de dal-sınır algoritmaları geliştirilmiştir. Hesapsal sonuçlar 40 işe kadarki problemlerin etkin sürede çözülebildiğini göstermektedir. Benzer bir çalışma Lin ve Lee (1995) tarafından yapılmış ve ilaveten burada problemin stokastik sürümleri göz önüne alınmıştır. Benzer şekilde, Vairaktarakis ve Lee (1995) geç kalan iş sayısı tesbit edildiğinde gecikmeyi en düşük yapacak optimal bir sıra elde etmek için basit bir dal-sınır algoritması sunmuştur. İlaveten, optimal geç kalan iş kümesini bulmak için Moore-Hodgson algoritmasının uygulanabildiği özel durumlar da tanıtılmıştır.

Riezebos ve diğerleri (1995) çalışmasında, FMS çizelgelemede ortaya çıkan bir problem olan, herbir safhada bir tezgahın olduğu, ama bir işin birden fazla işleminin olabileceği, bir akış atölyesinde çizelgeleme sistemi geliştirmeyi amaçlamışlardır. Bu sistemde en büyük tamamlanma süresine bağlı bazı altsınırlar hesaplanmış ve bunlar optimal çizelge üretiminde aramayı sınırlandırmak için kullanılmıştır. Böylelikle en büyük tamamlanma süresini en küçük yapan bir çizelge üretmek mümkün olmuştur. Çalışmada dokuz bulgusal kural ve alt sınır kullanılmıştır. Bunlar: en kısa işlem süresi, en büyük kalan zaman, en küçük oran, en büyük oran, en erken tamamlanma zamanı veya en küçük bitiş zamanı, aktif tek alt sınır, aktif çoklu alt sınır, gecikmesiz tek alt sınır ve gecikmesiz çoklu alt sınırdır. Hesapsal sonuçlar göstermektedirki, basit baskınlık ölçütlerine bağlı bulgusal kurallar hayli etkinlik sergiler.

Öncelik sevketme kuralları, mevcut kısmi bir çizelgeye eklenmek üzere mümkün bir işlemi seçerken, dal-sınır algoritmaları olası bütün işlemleri değerlendirerek birisini seçer. Böylelikle daha iyi çizelgeler üretilir. Ancak aşırı zaman ve hafıza gerektirir. Bunu azaltmak üzere dal-sınır algoritmalarının değişik sürümleri ileri sürülmüştür. Mesela Jain (1998)'de belirtildiğine göre, Morton ve Pentico (1993)'ün kök arama tekniği, verilen herhangi bir karar noktasında birkaç en iyi çözümü değerlendirerek bu iki yaklaşım arasında bir denge sağlar. Sabuncuoğlu ve Bayiz (1997) tarafından öne sürülen filtre edilmiş kök arama tekniği ise bir grup öncelik kuralı kullanılarak hesaplanan bir alt sınıra dayanılarak aramanın en iyi açılım yerlerinin seçilmesi sağlanır.

### 3.3 Öncelik Kuralları

Sıralama/çizelgeleme literatüründe çizelgeleme kuralı, öncelik kuralı ve bulgusal yöntem gibi terimler genellikle eşanlamlı olarak kullanılır. Ancak *öncelik kuralı* veya *sevketme kuralı* basitçe bir önceliğin (yani bir sayı veya değerin) her bir bekleyen işe bazı yöntemlere göre atandığı ve en küçük “değer”’li işin seçildiği bir teknik olarak göz önüne alınır. Benzer olarak, bir *bulgusal yöntem* basitçe “çıkarılmış bir kaide ifadesi” olarak tanımlanır. Ancak bir çizelgeleme kuralı bir veya daha fazla öncelik kuralı ve/veya bir veya daha fazla bulgusal yöntemin kombinasyonu ile oluşturulabilir. Basit öncelik kuralları genellikle bazen teslim tarihi, işlem süresi, bağlı işlem sayısı, maliyetler, hazırlık süreleri, iş geliş zamanları ve aylıklık gibi belirli bir işe ilişkin bilgilere ve bazen de işin atanacağı tezgahdaki kuyruk uzunluğu gibi bilgilere dayandırılır. Bir kuralın etkisi yukarıda bahsedilen bilgilerden birkaçına birden bağlı olabilir. Bu yüzden öncelik sevketme kuralları genel ve her zaman geçerli kurallar olmayabilirler; bununla beraber, spesifik koşullar için en iyi yöntemlerdir. Onlar belirlenen amaçlara uygun olarak seçilmelidirler (Pinedo, 1995). Aşağıda yapılan bazı çalışmalar indelenmiştir.

Panwalker ve Iskander (1977)'in çalışmasının çizelgeleme kurallarının bilinmesinde önemli bir katkı yaptığı görülür. Çünkü bu çalışmada, önceden uygulanmış 100'den fazla çizelgeleme kuralının bir özeti sunulmuştur.

Elvers ve Taube (1983) süreç sürelerine ilişkin olarak hem deterministik, hem stokastik varsayımlar altında değişik atölye kullanım seviyeleri için, değişik atölye sevketme kurallarının nisbi önceliklerini incelemiş ve etkinliğine göre sevketme kurallarının dizilişinin atölye kullanım seviyeleriyle önemli ölçüde değiştiği sonucuna ulaşmıştır.

Kiran ve Smith (1984b) atölye tipi benzetim literatüründeki öncelik kurallarının nisbi etkinliğini tamamlanma zamanına, teslim tarihine ve temel modele dayanan ölçütler için elde edilen temel sonuçlar üzerine önemli bilgiler vermektedir. Buna göre mesela, SPT kuralı iş tamamlanma zamanına dayanan ve süreçteki işlere-dayalı ölçütler için diğer basit öncelik kurallarına tercih edilebilir. SPT, SPRO, MST ve SPRW teslim tarihleri başarısının bütün ölçüleri bakımından diğer basit öncelik kurallarına tercih edilebilir. Bunlar arasında, SPT'nin ortalama gecikme için en iyi sonuçları verdiği de belirtilmektedir. Genellikle yüksek kullanım oranı, sıkı teslim tarihleri ve işlem

sürelerinden bağımsız teslim tarihleri SPT'nin üstünlüğünü tercih eder; SPRO orta kullanım oranlarında, daha az sıkı ve/veya TİT teslim tarihi atamalarında daha başarılıdır. Yazarlar, temel modele dayanan bazı sonuçlar bakımından, işlerin periyodik serbest bırakılması öncelik kurallarının nisbi etkinliğini etkilemediği sonucunu belirtmektedir.

Kim (1990) bir atölye tipi çizelgeleme problemi ele alarak ortalama pozitif gecikme, ortalama akış zamanı ve geç kalan işler sayısı başarı ölçülerine göre çeşitli sevketme kurallarını mukayese etmiştir. Çoğu olayda MOD, MST ve MDD kuralları diğer kurallardan üstün başarı sergilemiştir. Diğer bazı araştırmalarda, COVERT ve ATC kuralları genellikle diğerlerinden daha iyi başarı sergilemiştir. Yazar sonuçta, diğerlerinden tamamen üstün başarılı bir algoritmanın olmadığını, bununla beraber, MDD kuralının, diğer kurallarla mukayese edildiğinde çok iyi başarı sergilediğini belirtmiştir. Ayrıca yazar bir sınırlama olarak, gerçek sistemlerde her bir iş için alternatif rotalamaın olduğu halde, kendi çalışmasında dikkate alınmadığını, çünkü bu durumun problemi çok zorlaştığını, dolayısıyla bu problemin araştırılması gerektiğini de belirtmektedir.

Penz ve Dupont (1995) yaptıkları çalışmada atölye tipi çizelgeleme problemini çözmek için yeni bir yaklaşım amaçlamışlardır. Bu yaklaşım şöyle işler: İlk adımda, işlemler yerine işler göz önüne alınıp bir öncelik kuralına göre seçilerek (seçim yordamı) kısmi çizelge oluşturulur. İkinci adımda, yeni bir iş geldiğinde yeni çözümü hesaplamaksızın bu iş kısmi çizelge ile birleştirilir (birleştirme yordamı). Birleştirme işleminde problem iki işli (polinomsal olarak çözülebilir) çizelgeleme problemi olarak ele alınarak Brucker Algoritması (Brucker, 1988) ile çözülür.

Lee ve DiCesare (1994)'nin bu makalesinde sunulan bulgusal yöntem araştırma ile birleştirilmiş yeni bir Petri-net modelleme yaklaşımı FMS'ler için yeni bir çizelgeleme yöntemi sağlamaktadır. Burada sistemin tam bir modeli bir defa yapıldıktan sonra, çizelgeleme algoritması kısmi bir erişilebilirlik düzlemini araştırmak için bu petri-net modelini kullanır. Bu formülasyonda rotalama esnekliği, kaynakların ortaklaşa kullanımı, paralellik (concurrancy) ve parti hacimleri gibi önemli FMS özellikleri tam ve kolay olarak temsil edilebilir.

Baker (1984) teslim tarihi sıklığına bağlı olarak, sevketme kuralları arasında zıtlıklar olduğunu göstermektedir. EDD kuralı teslim tarihleri gevşek olduğunda ve SPT kuralı

ise teslim tarihleri sıkı atandığında iyi başarı sergiler. MOD (Değiştirilmiş İşlem Teslim Tarihi) kuralı orta aralıkta (sıkı-gevşek) en iyi başarıyı sergiler.

### 3.4 Fırsatçı Algoritmalar

Burada fırsatçı problem çözme yaklaşımını karakterize eden şey, bir sonra dikkate alınacak faaliyet, iş ya da tezgahlara ilişkin yerel kararlar alınırken problemin en uygun tarafları, yani belli bir tezgah üzerindeki işler, üzerine yoğunlaşılması işlemidir. Böylece darboğaz olarak tanımlanan alt problemler ortaya çıkarılır ve ayrı ayrı çözülür. Bu, araştırmanın genişletilmesi için bir esas olarak kabul edilir. Problem ayrıştırma işlemi, tamamen etkin bir tam veya bulgusal algoritma tarafından çözülebilecek kadar kafi küçüklükteki alt problemler oluşturuluncaya kadar devam edecektir. Bununla beraber, problem ayrıştırma yöntemi, altproblemlerin sayısı ve onların ele alınış sırası erişilen çözüm kalitesini büyük ölçüde etkilemektedir.

Adams ve diğerleri (1988)'in geliştirdiği değişen darboğaz yordamı (SBI – Shifting Bothleneck I) ve onun değişik halleri olan Balas ve diğerleri (1995)'in ve Dauzere-Peres ve Lasserre (1993)'in yöntemleri fırsatçı algoritmaların en tipik örnekleridir.

Adams ve diğerleri (1988)'nin değişen darboğaz yordamı iki aşamalı bir yöntemdir. Birinci adımda, problem bir tezgah alt problemlerine ayrıştırılarak henüz sıralanmamış tezgahlar arasında darboğaz (ki, en büyük çözüm değerine sahip tezgahdır) olarak tesbit edilen bir tezgahı ele alır ve o tezgahdaki işlemleri  $1|r_j|L_{max}$  problemine dönüştürür. Sonra bu bir tezgah altproblemini Carlier (1982) yöntemiyle optimal olarak sıralar. İkinci adımda da, önceden tesbitlenmiş sıralar korunurken, sırayla her kritik tezgahın sırası, yine bir tezgah probleminin çözülmesiyle, yerel olarak tekrar optimize edilir.

Bu yordamın felsefesi atölye tipi çizelgeleme problemini bir tezgah problemine küçülterek optimize etmeye çalışmak olduğundan, etkin sürede iyi çözüm üretme hususunda büyük katkısı olmuştur. Ancak elde edilen çözümün kalitesi bir tezgah altproblemlerinin çözülme sırasına büyük ölçüde bağlıdır, yani sıradaki bir değişiklik esaslı bir iyileştirmeye neden olabilir. Bu olgu daha sonraları SBII (Shifting Bothleneck II)bulgusal yordamı olarak bilinen değişen darboğaz yordamının ikinci sürümünü ortaya çıkarmıştır (Dorndorf ve diğerleri, 1998).

### 3.5 Yapay Zeka (YZ) Yaklaşımları

YZ insaninkine benzer yeteneklere sahip olan ve zeki davranış sergileyebilen araçları geliştirme amacı güden bir bilgisayar bilimidir. YZ yaklaşımları, Ntuen ve Park (1995)'a göre, en az üç sebepten ötürü çizelgeleme problemleri için kullanılır. Birincisi, kısıtlar çizelge üretimi boyunca keyfi herhangi bir sırada geçirilebilir. İkincisi, uzmanların bilgi tabanı özel bir çizelgeleme alan problemi için çoklu olurlu bir çözüm alanı üretmek için kullanılabilir. Üçüncüsü, çizelge üretimi önceden planlanabilir, böylelikle olurlu çözümler için yavaş ve zor işleyen arama işlemi azaltılabilir.

Radommer ve White (1988)'e göre, çizelgeleme için özellikle uygun bir teknoloji sağlayan YZ'nin çeşitli kaabiliyetleri şunları kapsar. 1) Zengin ve yapılandırılmış bilgi gösterim şemalarını (ki bunlar bütün imalatla ilgili bilgi, kısıtlar, durum malumatı ve bulguları içine alırlar) sağlamayı mümkün kılar, 2) hem etkileşimli<sup>4</sup> hem de öngörülü<sup>5</sup> çizelgeleme yapmak için çizelgecilere izin veren muhakeme yeteneğine sahip, 3) YZ bazlı çizelgeler ile beraber diğer imalat karar destek sistemleri (arıza tesbit sistemleri, süreç kontrolcileri, sensör gözlemcileri ve süreç planlama sistemleri gibi) ile bütünleşmeyi mümkün kılar ve 4) genellikle yalnız uzman insan çizelgecilerle yapılabilecek tanımlayıcı, organizasyona özel çizelgeleme bilgisini içine almayı mümkün kılar.

Sonuç olarak, YZ yöntemleri araştırmayı yönlendirmek için bulgusal kurallar ve hesapsal olarak kompleks problemlere iyi çözümler bulmak için etkin yordamlar önerir. YZ'nin en yaygın uygulamaları uzman sistemler (US) ve yapay sinir ağlarıdır (YSA). Burada YZ yöntemleri dört ayrı kısımda incelenecektir. Bunlar US'ler yaklaşımı, YSA yaklaşımı, çeşitli YZ yaklaşımları ve karma yapılarıdır (Geyik ve Cedimoğlu, 1998).

---

<sup>4</sup> *Etkileşimli çizelgeleme* atölye ortamının değişen verilerini çizelgeleme kararlarına dahil edebilen bir yapıyı ifade eder.

<sup>5</sup> *Öngörülü çizelgeleme* atölye ortamının verilerinin çizelgeleme periyodu başında öngörüldüğü şekilde değişmeden kalacağı kabulüne göre çizelgelemeyi ifade eder.

### 3.5.1 Uzman sistemler

Uzman sistem, ki bazen bilgi-tabanlı bir karar destek sistemi olarak adlandırılır, daha iyi karar vermeye yardım eden bir YZ uygulamasıdır. Bir US çok dar bir alanda insan uzmanın uzmanlığını kullanma davranışına özenen bir bilgisayar programıdır. Bu program bir uzmanın çok özel bir görevde kullandığı bilgi ve bulgularını içine alır (Medsker ve Liebowitz, 1994). Uzman sistemlerin genel yapısal bir takım özellikleri Pham ve Pham (1988), uygulama geçme koşulları Kerr (1992) ve alanda hatasız işletilmesi Lee ve O'Keefe (1994) tarafından ayrıntılı olarak işlenmiştir. Aşağıda yapılmış bazı uzman çizelgeleme sistemlerini sunan çalışmalar irdelenmektedir.

Çizelgeleme için geliştirilmiş uzman sistemler arasında literatürde en iyi bilineni Fox ve Smith (1984) tarafından geliştirilen ISIS'dir. ISIS atölye çizelgeleme yapısındaki ilgili bütün kısıtları birleştirme yeteneğine sahip bir çizelgeleme sistemidir. Yazarlar bu kısıtları beş kategoride ele almışlardır. İlk kısıt kategorisi teslim tarihleri, yarı mamül envanteri, kaynak seviyeleri, maliyetler, üretim seviyesi ve atölye durağanlığını içine alan *organizasyonel hedefler*'dir. İkinci kategori kısıtlar *fiziksel kısıtlar*'dır, ki bunlar tezgah fiziksel kısıtları, hazırlık zamanları, süreç süreleri ve kalitedir. Üçüncü kategori kısıt işlem alternatifleri, tezgah alternatifleri, takım gereksinimleri, malzeme gereksinimleri, personel gereksinimleri ve işlemler arası taşıma zamanlarını içine alan *nedensellik sınırlamaları*'dır. Dördüncü kategori kaynak rezervasyonları, tezgah bozulma zamanı ve vardiyalardan oluşan *elde edilebilirlik kısıtları*'dır. Beşinci kategori işlem öncelikleri, tezgah öncelikleri ve öncelikleri sıralama şeklinde atölye yöneticisinin tercihlerini yansıtan *öncelik kısıtları*'dır. Dört seviyeden oluşan bir kısıt-yönlendirmeli arama kullanan ISIS gerçekçi atölye tipi çizelgeleri üretebilmektedir. Yazarlar bunun sebebi olarak çıkarım ve kısıtlar için birkaç temsil etme ve arama tekniği kullanılmasını göstermektedir.

İyi bilinen bir diğer çizelgeleme uzman sistemi, Orciuch ve Frost (1984) tarafından geliştirilen ISA'dır. Yazarlar bu makalesinde US teknolojisini, ISA üzerine odaklanarak, üniversite ortamından endüstriye aktarımındaki deneyimlerini de açıklıyorlar. Çalışmanın sonunda ileriki bir plan olarak, ISA'nın mevcut geleneksel sistemlerle ve Digital firmasındaki diğer uzman sistemlerle veya bir "bilgi ağı" gibi diğer uzman sistemlerle iletişim kurması planlanmaktadır. Ayrıca bir imalat üretim planlama sisteminden de çizelgeleme bilgileri sağlanması gibi planlar vardır.



Bir diğeri, Bel ve diğeri (1989) tarafından geliştirilen, yapay zeka programlama tekniklerine ve kısıt-tabanlı analize dayalı, bir atölye tipi çizelgeleme sistemi olan OPAL'dir. Bu sistemde değişik türdeki bilgiler için çeşitli bilgi gösterim şekilleri ve çıkarım için kısıt-tabanlı analiz kullanılmaktadır.

Bunlardan başka, özellikle esnek imalatla ilgili olan bazıları Kusiak ve Chen (1988)'de geniş şekilde sunulmuştur. Bu çalışmanın sonucunda şunlar vurgulanmıştır: *i*) imalat planlama ve çizelgelemede kural-tabanlı US'ler çok sık uygulanmaktadır, *ii*) kısıt-yönlendirmeli (durum uzayı) arama teknikleri çok daha uygundur, *iii*) bulgusal yöntem'ler ve benzetim genişçe kullanılmaktadır ve *iv*) US'ler ve YA yaklaşımlarının birleştirilmesinde yararlar olabilecektir.

Kerr ve Ebsary (1988) küçük bir imalat işletmesinde üretim çizelgeleme için kural tabanlı ve ileriye-doğru çıkarım düzenekli bir US'in deneysel işletimini açıklamaktadır. US'in kural tabanı şu gruplara ayrılmıştır: Sipariş öncelik kuralları, teknolojik kısıt kuralları, iş merkezi yükleme kuralları, iş sevketme kuralları, genel gelecekteki durum kuralları ve zaman dönüştürme kuralları. Çalışmanın sonucu olarak, burada açıklanan yaklaşımın uygulanması işlevsel bir US üretimde tam olarak başarılı olduğunun söylenemeyeceğinin altı çizilmiştir.

Jagdev (1989) çalışmasında paralel ve birbirine benzemeyen tezgahlardan oluşan hücrelerin çizelgelenmesini göz önüne almış ve bunu iki seviyeli bir hiyerarşi içinde yapılandırmıştır. Üst seviyede toplu parti-hacmi çizelgeleme modeli, alt seviyede ise herbir kısa periyodun detaylı çizelgelenmesi sergilenmektedir. Sistem operasyonel çatışmaları çözmek ve final çizelgeyi tanımlayan olayları seçmek için YZ ve bilgi temsil tekniklerini kullanır.

Copas ve Browne (1990) MİP sistemi tarafından atanan teslim tarihlerini karşılama, en küçük termin süresi, en büyük tezgah ve işçi kullanım oranı, en küçük süreç-içi envanter gibi üretim hedeflerini sağlayacak şekilde günlük detaylı bir çizelge üreten birkaç bölümlü bir çizelgeleme sistemi tanımlamıştır. Bu çizelgeleme sisteminin bölümleri şunlardır: 1) imalat profili veritabanı, 2) kural-tabanı seçicisi ve elle seçim, 3) çizelgeleme kuralları kütüphanesi ve 4) etkileşimli çizelgeci. Sonuç olarak, genellikle çizelgeleme problemlerinin bulgusal çözümlerle pratik olarak çözüldüğünün görüldüğü ve etkileşimli çizelgecinin bulgusal yöntemlerin sağlayacağı tek paso çizelgeyi uygun şekilde değiştirebileceği belirtilmiştir. Benzer bir çalışmada, Dattero

ve diğeri (1989) MİP sistemlerinin, kapasite planlamayı hesaba katmaması ve termin süresinin sabit olduğu varsayımı gibi birkaç temel kusuru yüzünden MİP'ye potansiyel alternatif ekonomik parti çizelgeleme fikrine dayalı ve YZ teknikleriyle iyileştirilmiş bir alternatif yaklaşım geliştirildiler.

Alpar ve Srikanth (1989) ise, kapalı atölye çizelgeleme problemlerinde US tekniklerinin kullanımını ve onların diğeri iki yaklaşım olan doğrusal programlama ve elektronik tablolaştırma ya karşı avantajlarını açıklamaktadır. Çalışmada US'i kurmak için logic yöntem bilimi ve logic programlama dillerinden PROLOG kullanılmıştır.

Klein ve diğeri (1993) çalışmalarında, Oprant Expert geliştirme ortamı kullanılarak geliştirilen bir bilgi-tabanlı karar destek sisteminin özellikleri ve çizelgeleme problemi alanın karşılaşılan problemler üzerinde durmaktadır. Bu bilgi-tabanlı karar destek sisteminin yetenekleri arasında nedensel modeller vasıtasıyla sağlanan "derin bilgi" ile sembolik teknikler tarafından sağlanan "sığ bilgi"yi eşleştirme (kavrama), sistemdeki mevcut kaynakları seçmek veya sayısal bir modelle etkileşmek için zeki bir kullanıcı arayüz geliştirme, daha güçlü bir öğrenme ortamı tasarlama, yardımcı zeki araç çubuğu kullanımını destekleme ve karar analizi döngüsünü destekleme sayılabilir.

Meester (1993) yerel planlama sistemi ortamında karar vermeyi destekleyen bir US 'in tasarımını tartışmıştır. Yerel planlama sistemi için US iki önemli parçadan oluşur: Planlama modülü ve çizelgeleme modülü. Üretim çizelgesinin kalitesi US tarafından üretilen her bir öneri için ölçülür. Daha sonra değişen darboğaz yordamı gibi bir alt sınır ile karşılaştırarak çözümü sağlayıp sağlamadığına bakılır. Sonuç olarak, Pascal dili ile yazılan US'in başarıyla çalıştırıldığı vurgulanmaktadır. Geleceğe dönük çalışmalar olarak ise, US'e birkaç alternatifin simule edilmesiyle ilave bilgi üretmeyi mümkün kılacak bir benzetim parçası ve gerçek imalat ortamından bilgi kazanımı sağlayacak bir modül eklemek düşünülmektedir.

Sadeh ve diğeri (1995) çalışmasında bazı işlemlerin gevşetilemez zaman pencereleri (yani, en erken / en geç zaman pencereleri) dahilinde çizelgenmek zorunda olduğu atölye tipi çizelgeleme problemi üzerine eğilmişlerdir. Bu makalede bir takım iyileştirme teknikleri ile arama uzayını daraltan *yeni geriye-bakma şemaları* birleştirilmektedir. Üç "zeki" geri-izleme şeması tanımlanmaktadır: dinamik hassasiyet güçlendirme, hatalardan düzenli öğrenme, eksik geri-zıplama yöntemi. Bu şemaların ilerde arama uzayının ortalama karmaşıklığını azaltacağı, aşırı hesap maliyeti

yüzünden çözülemeyecek problemleri etkinlikle çözmeye sistemimizi olanaklı kıldığı ve atölye tipi çizelgeleme problemlerini çözmeye literatürde sunulan diğer geriye-bakma şemalarından daha çok etkili olduğu şeklinde değerlendirmeler yapılmaktadır.

Taşgetiren ve diğerleri (1995c) çalışmada, kuralla-dayalı bilgi gösterim biçimine sahip uzman çizelgeleme sisteminin ne olduğunu, nasıl yapılandığını, elemanlarının nasıl tasarlandığını ve nasıl işletildiğini açıklamaktadır. Geliştirilen uzman çizelgeleme sisteminin başarısı ortalama pozitif gecikme ölçütü altında, LA-SLACK, MOD ve SPRO öncelik kuralları ile karşılaştırılmaktadır. Buna göre EDD, MST, SPRW, SPRO, MDD ve MOD gibi kurallar hafif yük ve geniş teslim tarihi seviyelerinde iyi sonuç vermekte, buna karşın çok yüklü atölyelerde başarısız olmaktadır. Oysa, SPT aşırı yük ve dar teslim tarihi seviyelerinde iyi sonuç vermekte, ancak hafif yüklü atölyelerde ve geniş teslim tarihi seviyelerinde başarısız olmaktadır. Sonuçta, uzman çizelgeleme sisteminin başarısının öncelik kurallarından daha iyi olduğu gösterilmektedir.

Atölye düzeyinin dinamikliği yüzünden, değişen durumlara karşı kararları da değiştirme gereği gerçek-zamanlı uygulamalara meyledilmesini sağlamıştır. Yapılan çalışmaların bazıları aşağıda özetlenmiştir. Bunlardan birinde, Sarin ve Salgame (1989) fabrika durumunun dinamikliği yüzünden yöneylem araştırması tekniklerinin etkin çözüm araçları sağlayamayacağını, dolayısıyla etkileşimli, gerçek-zamanlı, dinamik bir uzman çizelgeleme sisteminin geliştirmesi gerektiğini savunmuştur. Bu amaçla geliştirdikleri US'de bilgi temsili için çatılar, ilişiksel tablolar ve yapım kuralları kullanılmıştır. Sisteme gerçek-zamanlı bir kontrol görüntüsü verilmesi amacıyla, sistem kullanıcı ile etkileşerek önce geçici birtakım özellikleri sürekliden ziyade çok kısa aralıklarla günceller, sonra problemi çözer ve son olarak son etkileşim anının özellikleri (zaman yöneticisinde) şu anki etkileşim anı ile eşitlenir; böylelikle problem çözme işlemi için geçen süre sıfırlanır. Yazarlara göre bütünleşik, çok-seviyeli hiyerarşik bir sistem geliştirilerek üst seviyeye planlamayı (yöneylem araştırması), daha alt seviyeye ise operasyonel (gerçek-zamanlı) işlemleri yerleştirmek mümkündür.

Brown (1989) üretimin bir defa çizelgelendikten sonra atölye düzeyinin gözlenmesi ve kontrol altında tutulması gereğinden hareketle, dinamik tekrar-çizelgelecisi adı verilen otomatikleşmiş bir yardımcı geliştirmiştir. Geliştirilen bu çizelgeci bir alan kontrolcüsünden veya diğer çizelgeleme fonksiyonunda gelen bilginin kısa dönem çizelgelendiğini içerir. O problemlere ilişkin mesajları toplar, sonra sistem probleme

cevap verecek aktif çizelgeyi düzeltir ve en iyi düzeltilen çizelgeyi teyit için atölye yöneticisine gösterir.

Smith (1995) etkileşimli bir çizelgeleme sistemi kurmak amacıyla, bilgi-tabanlı bir sistem olan OPIS'i (fırsatçı zeki çizelgeci) geliştirdi. Bu sistem, genel bir üst-yapı sağlamak amacıyla asıl operasyonel kısıtları ve amaçları koruyan uygun bir modelleme çatısı ile kısıt-tabanlı çizelge revizyon yöntemleri ve stratejilerini ayarlayan bir karatahta-tabanlı kontrol yapısını birleştirir. Böylece geniş bir kısıt ve amaç aralığında, çok-yönlü çizelgeleme olarak nitelebilecek, esnek bir yaklaşım sağlanır.

Chow ve Huang (1990) bir zeki çizelgeci prototip tasarımını sunmaktadır. Bu sistemin önemli iki niteliği şudur: *i*) değişen ortama göre eylem sergileme yeteneği ve *ii*) sisteme ekli hiyerarşik bir karar yapısı yardımıyla çizelgeleme ortamında meydana gelen alışılmadık veya öngörülmemiş olayları çözebilme yeteneğidir. Sistemin altı kademedен oluşan karar yapısı bilgi toplama, durum saptama, başarı ölçütü seçimi, sevketme kuralı seçimi, üst seviye kontrol ve eylemdir. Sorgulama düzeneği veri-süren ileriye-doğru çıkarım türündedir. Yani, bir çizelgeleme kararı vermek gerektiğinde ilk önce sistemdeki bütün bilgiler toplanır, sonra sorgulama yordamı atölye ortamının durumunu tanımlar, o duruma uygun başarı ölçütü ve o ölçüte uygun sevketme kuralı seçilir ve en sonunda eğer atölye ortamı normal koşullarda ise derhal uygun işi seçme kararı verilir, aksi halde bu anormal olayları çözmek için meta-kurallar kullanılır.

FMS için yapılan uzman sistem çalışmalarından öncü olan biri Kusiak (1987) tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada, çizelgeleme problemlerinin çözümünde yaygın olarak kullanılan iki araç olarak uzman sistemler ve optimizasyon olduğu belirtildikten sonra bunlarla ilgili genel bilgiler sunmuştur. Uzman çizelgeleme sistemleri geliştirmek için hiyerarşik, hiyerarşik-olmayan, karakter-tabanlı (skeleton), fırsatçı (opportunistic) ve kısıt-yönlendirmeli yaklaşımlar kullanıldığını belirtmektedir. FMS için bir çizelgeleme sistemi klasik imalat sistemlerindeki işlemlere ek olarak paletler, sabitleyiciler v.b. gibi kaynakları da göz önüne alır. Bu çizelgeleme probleminin hesapsal karmaşıklığını artırır. Yazarın bu sistemler için önerdiği tandem yapısı YZ ve en iyileme yaklaşımlarının avantajlarını alır. Kusiak (1990) kitabında detaylı açıkladığı gibi, bu yapı içinde veri düzenleme sistemi, model tabanlı sistemi, model kurma sistemi ve algoritma kurma sistemi olmak üzere dört sınıf vardır. Sonuçta bir FMS ortamında uzman çizelgeleme sistemi tasarlamak için *amaç-tabanlı yaklaşım* ve *model-tabanlı yaklaşım* olmak üzere iki yeni yaklaşım önerilebilir.

Bir US tabanlı çizelgecinin avantajı o iş alanına özel bulguları içine alabilmesidir. Mesela bir US model tabanlı çıkarım ile eşzamanlı çizelgelemeye, hazırlıkların minimizasyonu ve değişen atölye koşulları altında tezgah atamanın hedeflerini başarmak için amaçlanmış bulgusal yöntemlerin kullanımına izin verir. Sistemin bir diğer avantajı bilgi temsil etme şemasının nisbeten kapsamlı olmasıdır. Bir diğeri ise, sistem kolay bir şekilde müşteriye özel bir uygulama haline getirilebilir. Sistemin dezavantajları arasında ise, US kurmada uzmanlaşmış insan azlığı sıkıntısı ve bilgi kazanımının özel uzmanlıklar gerektirmesi gibi durumlar sayılabilir.

### 3.5.2 Yapay sinir ağları (YSA)

YSA insan beyninin, bilindiği kadarıyla, biyolojik yapısından esinlenerek oluşturulan çeşitli bilgi işleme teknikleridir. Bu bilgi işleme paralel işlem birimlerinin oldukça sıkı ilişkideki bir ağ üzerinde başarılıdır. Dağıtık hesaplama sergileme yeteneklerinden dolayı öğrenme ve genelleştirme özelliğine sahiptirler.

Tipik bir çizelgeleme probleminde işler ilk sırada yer almak için birbiriyle rekabet halinde olduğundan, çizelgeleme problemlerini çözmek için rekabet-tabanlı ağların etkinlikle kullanılabileceği akla gelir. Ancak şu anda, onların bütün gücü tam olarak açıklanamamaktadır. Genel olarak atölye tipi çizelgeleme probleminde kullanılan ağ paradigmaları Hopfield ağları ve hatayı geriye-yayma ağlarıdır.

#### 3.5.2.1 Hopfield ağları

Hopfield ağları hafızada depolanan bilgi ile yeni girilen girdi arasında ilişki arayarak, benzerlikler bulmaya çalışır. Bunu yaparken bir enerji fonksiyonunu en küçüklemeyi amaçlar. Enerji fonksiyonu atölye tipi çizelgeleme için öncelik ve kapasite kısıtları bağlı olarak en büyük tamamlanma süresini gösteren bir fonksiyondur.

Hopfield ve Tank (1985) zor en iyileme problemlerinin YSA'ler ile çözülebileceğini gösterdikten sonra, buna uyan çizelgeleme problemleri sinir ağı yoluyla çözülmeye başlandı. Ancak ağın yerel minimuma düşmesi gibi problemler ile karşılaşıldı. Bu problemi gidermek için yapılan çalışmaların birinde, Foo ve Takefuji (1988a) atölye tipi çizelgeleme problemini çözmek için olasılıklı sinir ağları yaklaşımını amaçladı. Problem Hopfield ve Tank (1985)'in gezgin satıcı problemi formülasyonuna benzer

şekilde modellendi, ancak yerel minimuma yakalanma olasılığını azaltmak için modele benzetimli tavlama işlemi uygulandı. Daha sonraki bir çalışmada, Foo ve Takefuji (1988b) tamsayı doğrusal programlama sinir ağı modelini sunmuştur. Burada enerji fonksiyonu bütün işlerin başlama zamanlarının toplamı tarafından temsil edilmiştir. Benzer şekilde, Arizono ve diğerleri (1992) olasılıklı sinir ağı modelinin geliştirilmesini amaçlamıştır. Çalışmasında, toplam gerçek akış süresini en küçük yapacak bir çizelgeleme problemini stokastik YSA modellerinden biri olan Gaussian tezgahı modeliyle çözmeyi açıklamaktadırlar.

Sabuncuoğlu ve Gürgün (1994) YSA'lerin onların paralel işlem özelliği yüzünden büyük ölçekli problemlerle uğraşmada belli avantajlar sağladığını belirttikten sonra, Hopfield ve yarış-tabanlı ağı kullanarak paralelleştirilmiş sinir ağı adı verilen bir ağı tasarımı sunmuştur. Amaçlanan modelde, verilen bir tezgahdaki işlerin sırası her bir satırın bir işi ve herbir sütunun sıradaki bir pozisyonu gösterdiği bir  $n \times n$  neuron matrisi tarafından temsil edilir. Atölye tipi üretim durumunda ise yukarıdakine ilaveten,  $m$  tezgah sayısı olmak üzere  $m \times n \times n$  büyüklüğünde üç boyutlu bir matris vardır. Neuronların aktivasyon değerleri bir sigmoid fonksiyonundan geçirilerek bazıları daha güçlü ve kalanlar daha zayıf yapılır. Buna ilaveten, ağ çizelgeleme fonksiyonunun maliyet değerine ilişkin enerji seviyesini en küçük yapmalıdır. Bu rassal olarak seçilen bir tezgahın sırasındaki işlerden ikisinin rassal olarak seçilip yer değiştirilmesi, bu yer değiştirme neticesinde hesap edilen ağ enerjisi iyileşmiş ise yeni durum olarak kabul edilir, aksi halde önceki haline geri döndürülür. Çizelgelenen işlemlerin en büyük tamamlanma süresi o ağı enerjisidir. Atölye tipi çizelgeleme durumunda, herhangi olurlu bir çizelge aynı zamanda öncelik kısıtlarını da sağlamalıdır. Sonuçta, en küçük en büyük tamamlanma süresi atölye tipi çizelgeleme problemlerinin çoğu için optimum çözümler ürettiği yazarlar tarafından gösterilmiştir.

### 3.5.2.2 Hatayı geriye-yayma ağı

Hatayı geriye-yayma ağı çok katmanlı sistemlerdir. Ağ öncelikle bir eğitim kümesi ile eğitilir. Eğitim esnasında ağı çıktılarını ile harici olarak sağlanmış doğru şablonlar karşılaştırılır ve hatalar geriye doğru dağıtılarak neuronların ağırlıkları öğrenme gerçekleşinceye kadar tekrar tekrar ayarlanır.

Hatayı geriye-yayma ağlarının genelleştirme özelliği problem verisi ve optimal çizelgeler arasındaki ilişkileri bulmak, iş öncelik kuralının ileriye görme parametresinin

uygun değerini belirlemek ve iş merkezi operasyonel seviyesi ile imalat sisteminin bütünü için başarı ölçüsü arasındaki kafi ağrlıkları kurmak için uygundur. Ayrıca Sabuncuoğlu ve Gürgün (1994)'ün belirttiğine göre, hatayı geriye-yayma ağları gerçek-zamanlı çizelgeleme sistemleri için bütünleşik bir tarzda YA ve YZ araçları ile beraber kullanılabilir.

YSA ile çizelgeleme çalışmalarından birisi olan, Cedimoglu (1993) montaj ve diğer depolarla birbirine bağlı bir atölye-düzeyini simüle ederek çizelgelemek için bir hatayı geriye-yayma ağı geliştirmiştir. Burada çeşitli sipariş büyüklüklerindeki en iyi ürün sıraları ağa öğretilerek ağın çizelgeleme problemlerini çözmesi amaçlanmaktadır. Elde edilen sonuçlar bazı öncelik sevketme kurallarıyla karşılaştırılmış ve YSA'nın daha iyi sonuç verdiği istatistiki olarak gösterilmiştir.

Kim ve diğerleri (1995) öncelik kuralları ve sinir ağlarını bir arada kullanarak bir hatayı geriye-yayma modeli amaçlamışlardır. Bu modelde ağın eğitilmesi için kullanılan girdi verileri ATC (görünen gecikme maliyeti) kuralından üretilmiştir.

Taşgetiren ve diğerleri (1995b) çalışmasında, uzman çizelgeleme sisteminin mevcut durumunu belirleyen tezgah konumu, iş konumu ve atölye yük konumu gibi niteliklerin kombinasyonlarına göre iş atamasında hangi öncelik kuralının kullanılacağına ilişkin karar verme sürecinden esinlenerek geliştirilen bir hatayı geriye-yayma ağı ile çizelgeleme yaklaşımı sunmuşlardır. Uzman sistemlerdeki çıkarım düzeneğinin işlevini üstlenen hatayı geriye-yayma ağı ile bu sistem, uzman sistemlerden daha basit bir işlevsel yapı gerektirir. Sonuçlar, bu sistemin klasik öncelik kurallarından daha iyi sonuç verdiğini ve sistemin fizibilitesini göstermektedir.

Jain ve Meeran (1998) çalışmasında geleneksel hatayı geriye-yayma sinir ağı modellerinin, problem karmaşık olduğunda, eğitimin başarısız olması ve yerel optimuma yakalanma gibi zorlukları olduğunu ifade etmektedir. Yazarlar bu tip zorlukların üstesinden gelecek bir yapı olarak, ele alınacak büyük örneklerin izin verdiği ölçüde neuron gereksinimini arttıran bir problem kodlamasını önermektedirler.

### 3.5.3 Çeşitli yaklaşımlar

Bu kısımda tezgah öğrenme, bulanık mantık gibi teknikler ile birden fazla YZ

yöntemini içine alan karma yaklaşımlar incelenmiştir.

Shaw ve diğerleri (1992) yaptıkları çalışmada çizelgeleme için makine öğrenme imkanları kullanan bir yapı geliştirmeyi amaçlamışlardır. Yazarlar çoğu imalat sistemlerinde çizelgeleme için genellikle bulgusal karar kurallarının kullanıldığını, bu kuralların sistem özelliklerinin nisbi etkisi altında olduğunu ve bu özelliklerin de zamana göre değiştiğini ifade etmektedirler. Bu yüzden, bu sistemlerin farklı kombinasyonlarını ayırt edebilen ve seçilen bir çizelgeleme kuralının verilen bir kombinasyon için uygunluğunu kontrol eden bir düzenek olarak tümevarım öğrenmeyi kullanmışlardır. Önerilen sistem öğrenme ve çizelgeleme safhalarından oluşur. Öğrenme safhasında benzetim deneylerinden imalat şablonları, yani bulgusal kurallar kümesi çıkarılır. Bu tümevarım öğrenme işlemiyle olur. Çizelgeleme safhasında ise şablon-yönlendirmeli çizelgeleme yaklaşımı kullanılarak öğrenme safhasında seçilen öncelik kuralı uygulanır. Bütün bunlar dinamik bir çizelgenin yapılmasına çalışır.

Park ve diğerleri (1993) çalışmasında, zeki süreç planlamaya bir makine öğrenme tekniği olan açıklama-tabanlı öğrenmeyi uygulama olasılığını incelemektedir. Bunun için EXPLIPP (Zeki Süreç Planlamaya Açıklama-Tabanlı Öğrenme Yaklaşımı) adında, öğrenen bir süreç plancısı çalıştırılmıştır. Yazarlara göre planlama ve çizelgeleme birbirinden ayrı ele alındığında planlamacının çizelgeci üzerinde baskı yapması problem olabilir. Buna alternatif bir yaklaşım yapım süresince ertelenebilecek özel planlama kararlarına izin vermek şeklindedir. Sonuçta imalat işlemlerinin bütünleşik planlanması, çizelgelenmesi ve kontrolünün önerilen bir yol olduğu belirtilmiştir.

Custodio ve diğerleri (1994) bulanık mantık destekli bir kısa-dönem planlama ve çizelgeleme yaklaşımı sunmaktadır. Yaklaşımın üst karar seviyesi gelecek kaynak eksikliklerini karşılamak için kullanılan güvenlik stok seviyelerini belirler. Orta seviyede yükleme oranları hesaplanır. Bu, süreç-içi envanterin kabul edilebilir değerlerinin altında kalması sağlanırken, kümülatif üretim ve kümülatif talep arasındaki hatayı minimize etmeye çalışan bir bulanık mantık (fuzzy) kontrolcüsü vasıtasıyla başarılır. Alt seviye, Yager (1978)'in bulanık mantık karar yönteminin değişik bir sürümü kullanılarak, kaynaklar arasındaki parçaların akışını kontrol eder. Yazarlar bulanık mantık yaklaşımının bilgi temsil etme, sorgulama ve insan-bilgisayar etkileşimini iyileştirme yollarına izin verdiğini, ayrıca zayıfça modellenen veya hiç modellenemeyen karmaşık sistemlerle uğraşmak için çok uygun olduğunu belirtmektedir. Sonuçta amaçlanan sistemin iyi başarı sergilediği vurgulanmaktadır.



Matthys (1994) atölye ortamında çizelgeleme sistemi ve insan çizelgeciler arasında karar verme sorumluluğunun herhangi bir bölümünü yerine getirmek üzere alternatif bir çizelgeleme yaklaşımı (kural tabanlı, ancak bir uzman sistem değil) savunmuştur. Bu yaklaşım çizelgelenen atölyede uzmanlığın geliştirilmesi veya adanmış kural-tabanlı bir dilde yeni kontrol bilgilerinin tesbiti veya mevcut kontrol bulgularının değiştirilmesi durumlarına göre çizelgeleme sisteminin davranışını değiştirmek için kullanıcıya izin verir. Bu çizelgeleme yaklaşımı atölyenin ileriki davranışını öngörmek (yani öngörülü bir çizelge kurmak) için kullanılır ve aynı zamanda beklenmedik olaylara verilen cevapta (etkileşimli çizelgeleme) bu öngörülü çizelgeyi etkileşimli olarak uyarlamak için kullanılır. Buradaki etkileşim tezgah bozulmaları, ürün kalite güvencesi, satıcının dağıtımı, operatör varlığı, sipariş miktarı gibi beklenmedik olaylara zeki olarak erişmek ve onların durumlarını değiştirmek manasındadır. Böyle etkileşimli ve esnek bir çizelgeleme yapısı için gereken iki unsurdan ilki, esnek bir kontrol yapısı ve arayüz ve ikincisi, bir bilgi temsil etme dili geliştirmedir.

Shakhlevich ve diğerleri (1996) çalışmasında kullandıkları uyarlamalı çizelgeleme yaklaşımının ana fikri, bir sınıf problemler için başarılı olmuş özel bir bulgusal kuralı benzer bir problemler sınıfı için üretmektir. Yazarlara göre öğrenme safhası ve inceleme safhasından oluşan bu uyarlamalı yaklaşım çizelgeleme teorisi ve uygulama arasındaki büyük farkı azaltabilir. İlk safhada, göz önüne alınan sınıfın örnek problemleri bir tam veya yaklaşık algoritma ile çözülür. Sonra uygun bir karar kuralı yapılandırılır. İkinci safhada, ilk safhada yapılandırılan birleşik kural göz önüne alınan o sınıfın büyük-ölçekli yakın problemlerini çözmek için kullanılır. Buradaki uyarlamalı yöntemde, öğrenme safhasında dal-sınır yöntemi gibi tam veya yaklaşık bir algoritma kullanılmakta ve inceleme safhasında bulgusal bir algoritma kullanılmaktadır. Bir tam algoritmanın uygulanması daha fazla bilgisayar hafızası ve/veya daha fazla koşum süresi gerektirdiğinden dolayı böyle bir yaklaşım benimsenmiştir. Ancak, bu yaklaşımın örnek probleme kafi derecede yakın olmayan problemlerde iyi çözüm sergilemeye gücü yetmez.

#### 3.5.4 Karma yapılar

Özellikle belli bir disiplin içerisindeki çeşitli tekniklerin birbirini destekler, tamamlar ve eksikliklerini giderir tarzda kullanılması çoğu zaman mümkündür. Bu yolla herhangi bir problem için bazen ilk defa çözüm elde edilebilirken, bazen de daha iyi bir çözüme ulaşılabilir.

YZ disiplini altındaki tekniklerden US'ler ve YSA'lerin sıkça birlikte kullanıldığı görülmektedir. Bunun nedeni bu iki tekniğin birbirlerinin dezavantajlarını ortadan kaldırmasındandır. Mesela Rabelo ve Alptekin (1989)'un ifade etmesine göre, US'lerin açıklama yeteneği, etkin problem-çözme stratejileri, kullanıcı arayüzü ve dökümantasyon yeteneği, olgunlaşmış bir teknoloji ve ticari olarak sağlanabilir geliştirme araçları olması gibi birkaç seçkin özelliği vardır. Ancak buna karşın, öğrenme yeteneğinin yok, dar alan-bağımlı, karmaşık bilgi kazanım işlemi, düşük geliştirme hızı ve büyük hacimli verileri işleme yeteneğinin olmayışı gibi bazı kısıtları da vardır. YSA'lerin ise genelleştirme, özümseme, hız, karmaşık ilişkileri haritalama, örneklerden öğrenme, nazik indirgeme (graceful degradation) gibi yapılarından kaynaklanan birkaç "tabii" özelliği vardır. Ancak buna karşın olgunlaşmamış bir teknoloji, açıklama yeteneği yok ve esnek öğrenme düzenekleri eksikliği gibi kısıtları vardır. Dikkat edilirse, bu özellikler bir araya getirildiğinde genelde birbirinin dezavantajın ortadan kaldırmaktadır.

Dağlı ve diğerleri (1991) uzman sistemler ve sinir ağlarını birleştiren bir yaklaşım amaçlamışlardır. Bu yaklaşımda hatayı geriye-yayma sinir ağı modeli önce iş durumu ve tezgah durumu bilgilerini uzman sistemden alır ve bu bilgileri iş gruplarına göre sınıflandırır. Daha sonra bu sınıflandırma neticesi, işleri önceden tesbit edilmiş bir öncelik kuralına göre çizelgeleyen bir Hopfield sinir ağı modeline gönderilir.

Holsapple ve diğerleri (1993) çalışmasında, FMS için çizelgeleme kararlarına destek sağlayan mevcut bilgisayarlı sistemlerin çizelge üretimi için büyük ölçüde ezberletme (rote learning) esnasında kazanılan bilgiye dayandığını belirtmektedirler. Birkaç durumda da, öğretmenli öğrenme kullanılarak öğrenme yeteneğine sahip olduğu belirtilmektedir. Bu makalede statik çizelge üretimi için yeni (tuhaf) bir YZ-tabanlı sisteme girilmiştir. Bu sistem, çok gerekli olan problem işleme bilgisinin önemli kısımlarını kazanmada bir öğretmensiz öğrenme modülünü çok yoğun olarak kullanır. Bu çizelgeci, etkin bir tarzda yüksek kaliteli çizelgeler üretmede, genetik-tabanlı öğretmensiz öğrenme yoluyla kazanılan bilgi ile ezberlenmiş bilgiyi etkinlikle birleştiren karma bir çizelge üretme taktiğini tekrarlar. Sonuçta yazarlara göre bu çizelgeleme stratejisi için başarıyla çalışabilir, önerilebilir ve daha derinlemesine incelenmeye değer olduğu söylenebilir.

Sim ve diğerleri (1994) çalışmasında dinamik atölye çizelgeleme problemine uzman YSA yaklaşımını uygulamayı amaçlamışlardır. Amaçlanan bu sistemin iş partileriyle

çeşitli geliş oranları için bileşen faktörlerine karşı iyi başarı sergileyebildiği görülmüştür. İleriye-doğru beslemeli ve hatayı-geriye-yaymalı bir YSA tasarlanmış ve geleneksel sevketme kurallarının bireysel özelliklerini tanımak için eğitilmiştir. Bu uzman YSA'nın yapısı girdi dizisi 16 alt-ağın ekli olduğu bir US ve bir tek çıktı düğümünden oluşmaktadır. Yazarlar ayrıca YSA ile atölye benzetiminin tasarımını yaparak atölye, iş ve çizelge özellikleri açısından bazı çalışmalarını incelemişlerdir. Araştırma sonuçlarına göre, tıpkı daha önceki araştırma sonuçları gibi, daha hafif iş yükünde EDD ve LSLK daha iyi iken, çok aşırı yüklü atölyelerde SPT daha iyi gecikme başarısı verdiği işaret edilmiştir. YSA çizelgeleme sisteminin farklı geliş oranları ve çizelgeleme faktörleri karşısında bileşen faktörler onun en iyi başarısı üzerinde bir en üst nokta olarak etki yaptığı belirtilmiştir.

Jones ve diğerleri (1995) çalışmalarında küresel planlama ve çizelgeleme problemlerinin ayrıştırılmasına dayanan bir hiyerarşik yapı kurmuşlardır. Bu hiyerarşideki her bir kontrolcu dört üretim yönetimi fonksiyonuyla tam olarak aynı işleri görür: atama, en iyileme, yapım ve gözlem. Atama fonksiyonu hem kısıtları hem de başarı ölçülerini belirler. En iyileme fonksiyonu her bir iş için bir çalışma-zaman üretim planı ve o plandaki işlemlerin herbiri için başlama ve bitiş zamanları hesaplar. En iyileme fonksiyonunun işletilmesi bir üç-adım geliştirme (arıtma) işleminden oluşur. Bunlardan ilki, çok büyük bir bulgusal yöntemler kümesi içerisinde yapay sinir ağı aracıyla bir aday kurallar seti seçme'dir. İkincisi, atama fonksiyonu tarafından dikte edilen bütün başarı ölçülerine karşı bir gerçek-zamanlı Monte Carlo benzetimi ile bu aday kuralları değerlendirme ve üçüncüsü "en iyi" sıra veya çizelgeyi bir genetik algoritma modülü ile belirlemektir. Yazarlar genetik algoritma kullanma gerekçesini, küresel optimuma farklı yönlerden gelerek yaklaşıldığından dolayı, metodolojinin daha iyi bireylerin (yani çizelgeler) popülasyonunu üretebilir olması şeklinde açıklamaktadırlar. Ayrıca yazarlar kararların öngörülen etkilerinden ziyade kararların gerçek sonuçlarından bilgi çıkaran bir yöntem olan bir tümevarım öğrenme algoritması olan TDKA'yı (iz-sürme ile bilgi kazanımı) da geliştirmişlerdir.

Ntuen ve Park (1995) çalışmasında, hiç dikkate alınmayan veya çok az dikkate alınan bir tip çizelgeleme problemi olan yapılandırılmamış işlerin çizelgelenmesi problemini tanımlanmaktadır. Bu tip probleme tipik örnek hava araçları bakım fonksiyonları çizelgelenmesidir. Bu çizelgeleme yöntemi YZ ve YA tekniklerinden oluşmaktadır. Buradaki model çok-ajanlı görev çizelgeleme ve planlama için bir karar destek sistemi olan TOP (görev merkezli planıcı) ile çalıştırılmaktadır.

### 3.6 Yerel Arama Algoritmaları

Yerel arama algoritmalarının amacı araştırmayı iyileşmiş bir çözüme yönlendirmek için mevcut konfigürasyonu onun komşularına doğru bozarak aramayı bir noktadan diğerine taşımak, böylece çözüm uzayındaki daha iyi çözümleri keşfetmektir. Bunun için gerekli olan unsurlar sonlu bir çözümler kümesi, en iyilenecek bir amaç fonksiyonu ve bir komşu çözüm kümesi üretim düzeneğidir. Üretim düzeneğinin görevi, yukarıda bahsedildiği gibi, mevcut çözüm üzerinde küçük bir değişikliklerle mümkün çözüm uzayında aramanın taşınabileceği küçük bir çözüm kümesi yaratmaktır. İşte sonlu sayıda bir çözüm kümesi üretip, bir düzeneğe yardımıyla bu çözüm kümesi üzerinde gezinerek belli bir amaç fonksiyonunu en iyilemeye çalışmaya genel olarak *yerel arama* denmektedir. Yöntemin temel bileşenleri komşuluk kavramı ve komşu üretme düzeneği olduğundan *komşuluk* ya da *soy arama* yöntemleri olarak da adlandırılır.

Çizelgelemede, üretim düzeneği kök olarak bir çizelgeyi alır ve buna bağlı olarak yeni çizelgeleri sistematik bir şekilde oluşturur. Bu yeni çizelgelerin her biri kökün komşularıdır. Üretim düzeneğinin seçimi komşuluk hacmini belirler. Aşağıda şekilde genel bir komşuluk arama algoritması verilmiştir.

- |   |
|---|
| <p><b>Adım 1:</b> Başlangıç kökü olarak bir çizelge elde et ve amaç ölçütüne göre onu değerlendir.</p> <p><b>Adım 2:</b> Kökün komşuluğundaki bütün çizelgeleri üret ve değerlendir. Eğer hiçbir komşu seçilemezse veya komşu çizelgelerden hiç birisi amaç ölçütüne ilişkin olarak kökten daha iyi değilse veya bir durdurma ölçütü sağlanırsa işlemi durdur, aksi halde ilerle.</p> <p><b>Adım 3:</b> Başarısı iyileştiren komşu çizelgelerden birisini seç. Bu çizelgeyi yeni kök olarak ata. Adım 2'ye dön.</p> |
|---|

Şekil 3.1 Komşuluk arama algoritması (Baker, 1994)

Bu algoritmada şu önemli taktik seçimleri yapılması gerek:

1. başlangıç kökünü elde etme yöntemi,
2. komşuluk üretim düzeneği yöntemi ve
3. yeni kök olacak çizelgeyi seçme yöntemi.

Başlangıç çözümünü seçme yöntemleri çok çeşitli olabilir. Çok sık kullanılan yöntemler şunlardır:

1. bazı öncelik kurallarını içine alan çeşitli sevketme yordamları,
2. açgözlülük (greedy) ve araya girme gibi çeşitli inşaa yordamları ve
3. rastgele örnekleme gibi.

Komşuluk üretim düzeneği yerel arama yöntemlerinin şüphesiz en önemli unsurudur. Çünkü zeki arama yöntemleri de dahil yerel aramanın muhtemelen en büyük dezavantajı aşırı arama zamanı gerektirmesinden dolayı komşuluk hacminin mümkün olduğunca küçük olması gerekir. Tabu arama bölümünde birkaç seçkin komşuluk yapısı açıklanmıştır.

Diğer önemli bir husus yeni kök olacak bir komşunun nasıl seçileceğidir. Bazı seçim yordamları şöyledir:

1. daha düşük maliyetli bulunan ilk komşuyu seçme,
2. bütün komşuluk içindeki en iyiyi seçme ve
3. komşuların bir örneğinin en iyisini seçme gibi. (Jain, 1998)

Yerel arama yöntemlerinin zorluklarından birisi belirlenmesi gereken pekçok önemli detay olmasıdır. Üstelik bunlar Baker (1994)'a göre yöntemin başarısı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir.

Yukarıdaki genel algoritma yerel optimum bir çözüme ulaştığında durur. Algoritmanın durduğu çözümlerin küresel optimum olup olmadığı da maalesef bilinemez. Bu yüzden yerel aramada karşılaşılan en büyük problem yerel optimuma yakalanmadır. Yukarıda bahsedilen taktik seçimler ve özellikle bu iki zorluğa bağlı olarak, yerel arama yöntemleri çeşitlilik arzeder. Hatta yerel optimalliğin aşılması için harcanan yoğun çabalar, bu yerel arama yöntemlerine kılavuzluk eden zeki arama yöntemlerinin geliştirilmesine ve ayrı bir sınıf teşkil edecek şekilde büyümesine neden olmuştur.

Yerel arama tekniklerini iki alt sınıfa ayırmak mümkündür. İlki, bir açgözlülük fonksiyonunun belirlediği adaylar içinden rastgele seçimle arama yapan bir yordam olan *GRASP*'dir (Greedy Random Adaptive Search Procedure – açgözlü rassal uyarlamalı arama yordamı). İkincisi ise mevcut çözüm ile seçilecek komşu çözümler arasında en az belli bir eşik değeri kadar fark bulunmasını garanti eden *eşik algoritmaları*'dir.

Yerel arama çalışmalarına ilişkin geniş bilgi Aarts ve diğerleri (1994) ve Vaessens ve diğerleri (1996) da bulunabilir.

### 3.6.1 GRASP

GRASP bir inşaa ve bir iteratif safhasından oluşmaktadır. İnşaa safhasında bütün bir çözüm kısmi bir çizelgeye bir anda sadece bir element ekleyerek kurulur. Yani hemen sonra seçilebilecek olası bütün elementler, bir greedy fonksiyonuna ilişkin olarak bir aday listesinde sıralanır ve bunlar arasından rastgele bir seçim yapılır. İterasyon safhasında ise, mevcut çözümü daha iyi komşu bir çözüme taşıyacak bir yerel arama yordamı uygulanır. Bu safha daha iyi bir komşu bulunamadığında durur. Sonra işlem inşaa safhasına geri döner ve yeni bir başlangıç çözümü kurar. Algoritma belli bir iterasyon sayısına erişince kesilir (Jain, 1998).

### 3.6.2 Eşik algoritmaları

Eşik algoritmaları eğer mevcut çözüm ( $x$ ) ve komşu ( $x'$ ) arasındaki maliyet farklılığı verilen bir eşik ( $L$ ), yani  $f(x)-f(x') < L$ , değerinin altına düşerse yeni bir konfigürasyon seçer. Aşağıda birkaç eşik algoritmaları açıklanmıştır.

### İteratif İyileştirme Algoritması:

İteratif iyileştirme eşik değerini sıfır atar ve komşu çözümler değerlendirilirken mevcut çözümü ilk iyileştireni yeni kök çözüm olarak kabul eder. Bu kullanılan komşu seçim ölçütlerinden en basitidir. Bu teknikte çözüm yerel minimuma düşünceye kadar ilerler ve durur. Diğer bir deyişle, eğer bir başlangıç çözümünden üretilen bir komşunun maliyet fonksiyonu değeri başlangıç çözümünkinden daha düşük ise taşımaya izin verilir. Dolayısıyla iteratif iyileştirme ile elde edilecek çözüm Brucker (1995)'in de ifade ettiği gibi, küresel optimumdan oldukça uzakta kalabilir.

İteratif iyileştirmenin önemli iki varyasyonu keskin-inişli (steepest descent) iteratif iyileştirme ve çok-başlangıç-noktalı iteratif iyileştirmedir. Aarts ve diğerleri (1994)'in geliştirdiği çok-başlangıç-noktalı iteratif iyileştirme rassal olarak üretilen bir çözümle başlar. Sonra bu başlangıç çözümünün komşuluğunda olan daha iyi bir çözümün seçilmesiyle mevcut çözüm iyileştirilir. Eğer o başlangıç çözümünden daha iyi bir komşu çözümü yoksa, algoritma rassal olarak seçilen başka bir başlangıç noktasından işlemi devam ettirir. Bu işlem bir durdurma ölçütü sağlanıncaya veya şimdiye kadar elde edilen en iyi çözüme tekrar dönülünceye kadar devam eder.

### Eşik Kabülü Algoritması:

Dueck ve Scheuer (1990) tarafından geliştirilen *eşik kabülü* algoritmasında, rastgele üretilen bir komşunun maliyet fonksiyonu değeri ile o anki çözümün maliyet fonksiyonu değeri arasındaki fark negatif olmayan bir eşik değerinden daha küçük ise taşıma kabul edilir. Bu eşik değeri bir fonksiyona bağlı olarak başlangıçta yüksek atanır ve sonra iyileştirmeyen taşımalar ortaya çıktıkça bunların kabulünü sağlamak için, kademeli olarak sıfıra doğru azaltılır. Böylece öncelikle sadece daha iyi komşular seçilmiş olur. Bu yöntem, Brucker (1995)'in ifadesiyle, benzetimli tavlamanın değişik bir hali olarak görülebilir.

Aarts (1994)'ün sonuçları göstermektedirki, hem iteratif iyileştirme hem de eşik kabülü genelde zayıf olmalarına rağmen, genetik yerel arama ve benzetimli tavlama yaklaşımlarıyla aynı koşum süresini almaktadırlar. Yine bu sonuçlara göre, eşik kabülü algoritması iteratif iyileştirmeye göre çok daha iyidir.

Vancheeswaran ve Townsend (1994) atölye tipi çizelgeleme problemine optimal veya optimale yakın çizelgeler üretmek için bir iteratif iyileştirme yaklaşımı amaçlamıştır. İlk aşamasında en düşük en büyük tamamlanma zamanlı bir başlangıç çizelgesi elde etmek için tek pasoda olurlu bir çizelge oluşturan bir bulgusal bir yöntem kullanılmıştır. Bu bulgusal yöntem, toplam kalan iş miktarının mevcut işlemin süresine oranı olan bir acillik ölçütü ile hazır işlemlere öncelik atayarak başlangıç çizelgesini oluşturur. İkinci aşama olan düzeltme aşamasında, bu çizelge adım adım iyileştirilmeye çalışılır. Burada olurlu çizelgeler kümesinin bir alt kümesine bakılarak, kritik iş olarak seçilen bir işin işlemlerinin sırası ilgili tezgahlardaki sıralama değiştirilerek, bir tür yerel arama ile çizelge iyileştirilir. Kritik iş en son tamamlanan iştir.

### 3.7 Zeki Arama Yöntemleri

Dorndorf ve Pesch (1995) makul bir süre içinde yüksek kaliteli bir çözümü belirlemek amacıyla arama alanı içerisinde yerel kararları uygulayacak şekilde bir arama çatısı yapılandırılmasını önermektedir. Böyle bir çatıda, miyopik (uzağı göremeyen) probleme-özel bulgular (mesela, yerel öncelik kuralları gibi) tarafından verilen kararlar bir kılavuz-taktikle yerel optimalliğin ötesine aktarılır. Bu, iyi çözümler elde etmeye izin veren, kılavuz-çözümlerin kapsayıcı (generic) özellikleriyle yerel aramanın probleme-özel özelliklerini birleştiren, kılavuz-bulgusal algoritmaları ortaya çıkarmaktadır.

Glover ve Laguna (1997)'in belirttiğine göre, *kılavuz-bulgu* sözcüğü ilk olarak Glover (1986)'da tabu arama sözcüğüyle beraber anılmıştır. Kılavuz-bulgusal yöntem yerel optimallikten öte çözümler üretmek için, normal bulguları değiştiren ve onlara kılavuzluk eden üst-düzey bir taktiği işaret eder. Ancak böyle bir üst-taktikle kılavuzlanmış bulgusal yöntemler üst seviye yordamlar olabilir. Sonuç olarak, modern en iyileme teknikleri olarak da adlandırılan genetik algoritma, benzetimli tavlama ve tabu arama gibi teknikler yerel arama yordamlarına kılavuzluk ederek onları yerel optimallikten kurtarır ve son derece iyi çözümlere ulaşılmasını sağlarlar. Bu yüzden, kılavuz-bulgusal yöntemler önemli bir gelişmeyi ifade etmektedir.

#### 3.7.1 Genetik algoritmalar (GA)

Goldberg (1989) tarafından geliştirilen GA biyolojik üretimde tabii seçim ve



mutasyonlar arasında doğrudan bir mukayese yapmaya dayanan bir en iyileme yöntemidir. Bu kavramların oluşturduğu değişiklikler sonraki nesil için hayatta kalacak bireyleri belirlemek için bir değerlendirme fonksiyonuna karşı test edilir. Böylelikle genetik algoritmalar prensipte kavram uzayında paralel bir arama oluşturur. Bir genetik algoritma çalıştırıldığında, küresel optimuma farklı yönlerden gelerek yaklaştığından dolayı, bu yöntem daha iyi bireyler topluluğunu üretebilir.

Genetik algoritmalar daha genel ve soyut bir modellemeyi gerektirir. Eğer çizelgeleme için bir model kurulacaksa, bunda çizelgeleri bireyler ya da kromozomlar (topluluk üyeleri), bir çizelgenin başarı ölçütünü bir bireyin sağlamlığı (fitness), her iterasyonu bir nesil üretme, başlangıç ya da önceki çözümü önceki nesil (ebeveyn) ve üretilen yeni çözümü yeni nesil ya da çocuklar olarak kabul etmek gerekir. Nüfus önceki nesilden hayatta kalanlar ve önceki neslin çocuklarından oluşur. Nüfus miktarı genellikle bir nesilden diğerine sabit kalır. Çocuklar önceki nesilden olan bireylerin mutasyonu ile üretilir. Bir ana kromozomun mutasyonu bir çizelge üzerinde komşuluk üretme düzeneğini uygulama anlamına gelebilir. Her iterasyonda en sağlam bireyler çiftleşir ve en zayıf birey ölür. Bir durdurma ölçütü sağlanıncaya kadar, bu şekilde doğum, ölüm ve üretme işlemleri devam eder. Genetik algoritmanın temel adımları aşağıdaki gibidir.

Adım 1. Belli bir yordamla iyi bir başlangıç çizelgesi seç.

Adım 2. Topluluğun herbir üyesini amaç fonksiyonunu kullanılarak değerlendir ve onları dayanıklılıklarına, yani amaç fonksiyonuna göre diz. En iyi bir veya daha fazla çizelgeyi yeni nesil üretecek (doğum yapacak) ebeveyn olarak ve en kötü çizelgeyi de topluluktan çıkarılacak (ölecek) birey olarak seç.

Adım 3. Ebeveynin komşuluğundan rastgele bir komşu çizelge (çocuk) seç.

Adım 4. Seçilen komşu çizelgeyi topluluktaki en kötü çizelgenin yerine yerleştir ve topluluktaki diğer çizelgeleri aynen muhafaza et. Böylece topluluktaki en kötü birey ölür ve nüfus aynı kalır.

Adım 5. Bir durdurma ölçütü karşılanmadıkça Adım 2'ye dönerek iterasyonu tekrarla

Şekil 3.2 Genetik algoritma adımları

Genetik algoritmaların kullanımında şu hususların belirlenmesi önemlidir:

- başlangıç topluluğunu (nufus hacmi ve bireyleri) belirleme şekli,
- bireylere ait çözümleri şifreleme (kodlama) şekli,
- bireylerin çekiciliğini hesaplayan bir değerlendirme fonksiyonu ve
- ebeveyn çözümlerden çocuk çözümler üretilirken ailelerin genetik yapılarını değiştirmek için çaprazlama (aileler arasında rastgele olarak seçilen bir unsuru yer değiştirme) ve mutasyon uygulama şekli.

Yapılan çalışmaların birinde, Leon ve diğerleri (1994) çizelge sağlamlığı, yani beklenmedik olaylara karşı duyarsızlığı ve sağlamlık ölçülerini konu edinmiştir. Burada çizelge sağlamlığı kesilmelerden sonraki en büyük tamamlanma zamanı ve kesilmelerden sonraki en büyük tamamlanma zamanı değişkenliğine dayalı olarak tanımlanmış ve GA'larla bir tam sağlamlık ölçüsü yerine üvey sağlamlık ölçüleri geliştirilerek sağlam çizelgeler üretilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, ortalama aylak-zamana dayanan ölçüler tezgah bozulmalarına ve işlem süresi değişmelerine karşı sağlam (yani daha az hassas) olan bir çizelgeler sınıfı üretmek için kullanılabilir.

Dorndorf ve Pesch (1995) saf GA'la çizelgelemede bazı zorluklardan bahsederek, bunların üstesinden gelmek için, GA taktiği içerisine yerel aramayı yerleştiren Genetik Yerel Arama yöntemini önermektedirler. Bu yaklaşımda, genetik algoritma operatörlerinden dölenen bir çocuk yerel minimuma ulaşıncaya kadar komşuluk araması için başlangıç çözümü olarak kullanılır. Yerel minimuma ulaşıncaya da genetik algoritmanın yeniden çaprazlanmasıyla yerel optimum atlanır. Sonuç olarak, genetik yerel aramanın GA'dan daha iyi sonuçlar ürettiği gösterilmiştir.

### 3.7.2 Benzetimli tavlama (BT – Simulated Annealing)

BT Kirkpatrick ve diğerleri (1983) tarafından geliştirilmiştir. Tavlama fizikten gelen bir terim olup, bir metalin başlangıçta yüksek olan ısısının normal duruma erişinceye kadar yavaş yavaş soğutulması işlemini ifade eder. Benzetimli tavlama yöntemi, bu modelin en iyileme amaçları için kullanılabilmesi düşünüldüğünden çıkmıştır. Böyle bir durumda, dahili enerji amaç fonksiyonunu temsil edecektir. Benzer şekilde ısı kontrol

parametresini ve sistemin ardıl denge durumları da mevcut çözümün komşularını temsil edecektir.

Bu tekniğin dikkat çeken bir yönü, algoritmanın yerel minimuma düşmesini bir nebze önleyen bir seçim ölçütü olan olasılıklı seçim yöntemini kullanmasıdır. Bu yüzden, BT rasgele-esaslı bir arama tekniğidir. Yöntem şöyle işler: Tıpkı iteratif iyileştirme tekniğinde olduğu gibi çözüm yerel minimuma düşünceye kadar ilerler, ancak ondan sonra yapılabilecek bir taşımaya mevcut çözüm ile komşu çözüm değeri arasındaki farkın bir fonksiyonu olasılığında izin verilir. Aşağıda Şekil 3.3'de Pinedo (1995) ve Baker (1994)'deki açıklamalara göre, genel bir BT algoritması verilmiştir.

- Adım 1. Bir başlangıç çizelgesi seç ve onu kök çizelge olarak ata. Bir başlangıç ısı seç.
- Adım 2. Kök çizelgenin komşuluğundan rastgele bir komşu çizelge seç. Eğer seçilen komşu çizelge kök çizelgeden daha iyi ise bu komşu çizelge doğrudan yeni kök çizelge olarak atanır ve Adım 3'e geçilir. Aksi halde, komşu çizelge için  $e^{-\Delta Z/T(k)}$  fonksiyonundan bir olasılık değeri hesapla ve bunu üniform dağılımdan rastgele üretilen bir olasılık değeri ile karşılaştır. Eğer komşu çizelgenin olasılığı daha küçük ise onu yeni kök çizelge olarak ata ve Adım 3'e geç; değilse kök çizelgeyi değiştirmeden Adım 3'e geç.
- Adım 3. Bir durdurma ölçütü karşılanmadıkça ısı parametresi değerini düşür ve Adım 2'ye dönerek iterasyonu tekrarla.

Şekil 3.3 Benzetimli tavlama algoritması

Görüldüğü gibi, BT yöntemi mevcut çözümü  $i$ . kök çözümün komşuluğundan  $j$ . komşuya taşırken, eğer  $Z_j < Z_i$  ise tıpkı genel yerel aramadaki gibi  $j$ . komşu yeni kök olmaktadır. Diğer yandan,  $Z_j \geq Z_i$  ise bile  $j$ 'nin hala yeni kök olma şansı vardır.  $j$ .komşunun o safhada kök olma olasılığı  $q_{ij} = \min\{1, e^{-(Z_i - Z_j)/T(k)}\}$  şeklinde hesaplanır. Burada  $T(k)$   $k$ . safhanın ısı değerini gösterir. Bu olasılık fonksiyonunun iki önemli özelliği vardır. İlki, diğer şeyler aynı kalırken, ısı düşerse olasılık azalır. Isı her iterasyonda üstel olarak (genellikle  $a^k$ , ki  $0 < a < 1$  olacak şekilde) azaltılarak sıfıra kadar düşürülür (soğutma işlemi). Nihayetinde olasılık 1'e eşit olacağından dolayı bir durdurma ölçütü sağlanıncaya kadar yeni bir komşu seçilmeye devam eder. Bu

algoritmanın yerel minimumdan kurtulmasını sağlar. Bununla beraber bu kez de adım sayısı çok artacaktır ve bir komşunun birden fazla ele alınması muhtemeldir. İkincisi, yeni kök olabilecek bir adayın seçilme olasılığı eğer amaç fonksiyonunda bir iyileşme varsa hep %100'dür; ama eğer amaç fonksiyonu kötüleşirse, bu kez adayın kök olma olasılığı azalacaktır.

Yapılan önemli çalışmalar Matsuo ve diğerleri (1988), Laarhoven (1992) ve Alfano ve diğerleri (1994)'dür. Matsuo ve diğerleri (1988)'in benzetimli tavlama çalışmasında başlangıç çözümü değişen darboğaz yöntemi ile elde edilmiştir. Komşuluk yapısı olarak da, tabu arama bölümünde açıklandığı gibi, kendilerinin geliştirdikleri bir yapı kullanılmıştır. Yazarların kullandıkları bu kontrollü-aramalı BT yaklaşımı elde edilen normal sonuçlarını bir geriye-bakma ve ileriye-görme taktiğiyle daha da iyileştirmeyi amaçlamaktadır.

Laarhoven (1992) çizelgeleme için genel bir benzetimli tavlama yaklaşımı amaçlamıştır. Amaçlanan yaklaşımın işletilmesi basit ve kolay, üstelik derin bir problem yapı bilgisi gerektirmemektedir. Bununla beraber yaklaşımın güçlü bir çizelgeleme aracı olacağı hedeflenmişti. Ancak elde edilen sonuçlar tam tatminkar değildir. Bunun nedeni iyi çözümler elde etmek için aşırı bir süreye ihtiyaç duyulması ve problemin yapısına oldukça fazla bağımlılık göstermesidir.

Alfano ve diğerleri (1994) üretim sistemi problemlerinin çözümünün genellikle klasik benzetim yöntemleriyle başarıldığını, buna alternatif bir yaklaşımın ise YA'nın, mesela BT ve TA gibi, en iyileme yöntemlerinin uyarlamasının olduğunu belirtmektedirler. Bu çalışmada atölye tipi çizelgeleme probleminin çözümü için geliştirilmiş benzetimli tavlama sistemi, amaç fonksiyonu olarak çizelge en büyük tamamlanma süresini, komşuluk yapısı olarak aynı tezgah üzerindeki iki işin önceliğini değiştiren onun ebeveyni üzerinde rassal bir permutasyon tarafından üretilmesini ve ısı parametresi olarak da Boltzmann olasılık yoğunluk fonksiyonunu kullanmaktadır.

BT'nin ana eksikliği, iyi çözümler elde edilmesi için aşırı hesap süreleri gerektirmesi ve bazı parametrelerin dikkatli seçilmek zorunda olduğu probleme-bağlı bir yapı içermesidir. Aşırı zaman harcanmasının nedeni, çözüm uzayının çekici olmayan bölgelerinin de araştırılmasındandır (Jain, 1998).

### 3.7.3 Tabu arama (TA – Tabu Search)

TA uygun komşunun seçim düzeneği hariç benzetimli tavlama yapıya oldukça benzemektedir. Bu yaklaşımda komşu seçimi olasılıklı değildir. Bununla beraber benzetimli tavlamanın bir eksikliği olan daha önce ziyaret edilmiş bir komşunun tekrar ele alınmasını gidermek için, ziyaret edilen komşular *tabu listesi* diye adlandırılan bir yasak listesinde bir müddet tutularak tekrar kök çözüm olarak seçilmesini önler. Böylece algoritma yerel minimumdan kolay kurtulur. Ancak eğer ele alınan bir komşunun amaç fonksiyonu değeri *aspirasyon ölçütü* olarak adlandırılan bir ölçütü sağlıyorsa o komşu tabu listesinde olsa bile yeni kök çözüm olarak seçilir. Ayrıca yasak listesindeki çözümler bir müddet sonra listeden düşürülerek onun tekrar ele alınmasına imkan tanınır, yani stratejik bir unutma işlemiyle zekice problem çözme yeteneği sağlamak amaçlanır. Böylece çözüm küresel optimuma doğru farklı yönlerden hızlı bir şekilde ilerletilmeye çalışılır.

TA'nın karakterinde yeni kök çözümün aranmasını hızlı bir şekilde yapma vardır. Dolayısıyla amaç değeri her aşamada mümkün olduğunca çok iyileştirilir; komşunun başında keskin inişler sağlanır, ancak sonlara doğru yavaşlayan bir eğri eğilimine girer. Oysa BT baştan sona doğru daha yumuşak bir eğri eğilimi sağlar (Baker, 1994).

Tabu arama yapısıyla ilgili geniş bilgi sonraki Bölüm 5'de sunulacaktır. Ancak aşağıda Tailard (1989, 1994), Dell'Amico ve Trubian (1993), Barnes ve Laguna (1993), Vancheeswaran ve Townsend (1994), Barnes ve Chambers (1995), Nowicki ve Smutnicki (1996) gibi önemli TA çözümlerine çalışmalarına ilgili özet bilgiler verilmiştir. (Cedimoğlu ve Geyik, 1999)

Tailard (1989) kritik yol diyagramı formülasyonunu kullanarak, atölye tipi çözümlerine problemi için bir TA yaklaşımı kurmuştur. Tailard en büyük tamamlanma zamanını iyileştirmek için kritik yol diyagramının şu iki temel özelliğini kullanmıştır: (1) kritik yol üzerinde aynı tezgahı gerektiren iki ardışık işlem yer değiştirdiği zaman bir çevrim oluşmaz ve (2) bir çözümlerini iyileştirmek için en az böyle bir yer değiştirme işlemi yapılmalıdır. İşte bu TA yaklaşımında kullanılan komşuluk düzeneği kritik yol üzerindeki aynı tezgahı gerektiren ardışık işlemlerin çiftler çiftler yer değiştirmesiyle sağlanır (Bkz. altbaşlık 5.3). Amaç fonksiyonu en büyük tamamlanma zamanı seçilmiştir. Tabu listesi uzunluğu belli bir aralıkta rastgele seçilmiştir; yani, liste uzunluğu dinamikdir. Bu aralık toplam işlem sayısı ile orantılıdır; mesela, bir 10 tezgah

10 iş problemi için tabu listesi uzunluğu 8-14 aralığında değişir. Aspirasyon ölçütü olarak en basit hal seçilmiştir; ki tabu olan bir taşıma ancak ve ancak aramanın o noktası için en iyi en büyük tamamlanma zamanına götürecekse o taşımaya izin verilir. Amaçlanan yaklaşımda bir yoğunlaşma ya da yönelim yordamından veya birden fazla taşıma tipinin kullanımından bahsedilmemektedir. Sonuç olarak, yazar TA yöntemini işletmenin çok kolay ve esnek olduğunu ifade ediyor.

Tailard (1994) ise aramayı hızlandıran bir TA algoritması öngörmektedir. Bununla beraber, kritik yol hesaplamasına ilişkin paralel bir algoritma işletimini de sunmaktadır. Ancak yazar atölye tipi çizelgeleme problemi için paralelleştirmenin uygun olmadığı sonucuna varmıştır.

Dell'Amico ve Trubian (1993) atölye çizelgeleme problemi için kritik yol diyagramı formülasyonu kullanarak kompleks bir TA yaklaşımı geliştirmiştir. Onlar geliştirdikleri yöntemin her bir koşumu için iki yönlü bir sevkete tekniği kullanarak bir tek başlangıç çözümü üretmişlerdir. Çoklu koşumlar için farklı başlangıç çözümleri bu iki yönlü sevkete yordamı için gönüllü bir rassallık yordamı tarafından sağlanır. Yaklaşımda geliştirilen iki tip komşuluk yapısı vardır. Birinci komşuluk yapısı ya  $j$  işi,  $i$  işi ve eğer varsa  $i$  işinin tezgah öndülü arasında ya da  $i$  işi,  $j$  işi ve  $j$  işinin tezgah ardılı arasındaki mümkün ters çevirmeleri sağlar. Eğer bu üç işlemin herhangi birisinin tersi tabu ise bütün taşıma tabu sayılır ve her zaman sadece bir taşıma yapılır. İkinci komşuluk, kritik blok oluşturan işlemlerin sırasının ters çevrilmesiyle komşular oluşturur.

Barnes ve Chambers (1995), atölye tipi çizelgeleme problemi için etkin bir tabu arama yaklaşımı sunmuştur. Bu yaklaşımda, bir başlangıç çözümü elde etmek için yedi öncelik kuralının aktif ve gecikmesiz çizelge üretim düzenekleri kullanılır. Başlangıç çözümü olarak en küçük en büyük tamamlanma zamanlı çizelge seçilir. Problem kritik yol diyagramı formülasyonu kullanılarak temsil edilir. Keza taşıma ardışık olarak, aynı tezgah tarafından yapılan iki bitişik işlemin sırasının ters çevrilmesiyle diğer bir olurlu çözüm elde etmeye dayanır. Her bir iterasyonda en iyi taşıma değeri  $\Delta_h$  (Adams ve diğerleri (1988) veren taşıma seçilir. Aramada dinamik tabu listesi uzunluğu kullanıldığından, belli bir arama periyodundan önce liste uzunluğunun bir sonraki aralığı belirlenir. En iyi sevkete çözümünden başlandığından dolayı, bir başlangıç araması en uzun tabu listesi aralığı kullanılarak yönetilir. Başlangıç araması boyunca her zaman en iyi çözüm iyileştirilir, ilgili çizelge daha sonra geri getirilmek üzere

yukarıdan-aşağı bir listede depolanır. Başlangıç araması belirli sayıdaki taşıma yapılmasına rağmen en iyi çözümde hiçbir iyileşme olmuyorsa kesilir. Bu noktada yordamda tekdüze olarak iyileştirilen çözümlerin bir listesi elde edilir. İzin verilen arama süresi içinde, bu çözümlerin herbiri bir alt arama için alternatif bir başlama çözümü olarak kullanılabilir. Başlangıç aramasının tamamlanması üzerine, bütün tabu sınırları kaldırılır ve yukarıdan-aşağı çözümler listedeki en iyi çözüm listenin tepesinden alınıp aramaların bir sonraki kümesi için başlangıç çözümü olarak tekrar ele alınır. En küçük tabu listesi aralığından başlandığından dolayı, arama yordamı bu aramaya ilişkin bulunan en iyi çözümde hiçbir iyileşme olmadan belli sayıda taşımaya ulaşınca kadar uygulanır.

Nowicki ve Smutnicki (1996) atölye tipi çizelgeleme için çok hızlı bir TA yaklaşımı sunmaktadır. Bu yaklaşımın ana unsurları aşağıdaki şekilde belirlenmiştir. Bunlardan birincisi başlangıç çözümü olarak Werner ve Winkler (1995)'in araya-girme algoritması kullanılmasıdır. İkincisi olan komşuluk yapısı şöyledir: Önce kritik yol diyagramı üzerinde bir tek kritik yol üretilir, sonra bu yol üzerinde aynı tezgahı gerektiren bitişik işlemler bir araya getirilerek *blok*'lar oluşturulur ve bu blokların sadece -eğer varsa- ilk (ya da son) iki işlemi yer değiştirilerek komşular üretilir. Dolayısıyla çok az sayıda araştırılacak komşu üretilmiştir. Üçüncüsü olan komşulukların değerlendirilmesi işlemi, bütün taşımalara ilişkin oluşan komşu çizelgelerin hepsinin en büyük tamamlanma süresi hesaplanıp, bunlar arasından tabu olamayan en küçük tamamlanma zamanlı olanının yeni başlangıç çözümü olarak seçilmesi şeklinde olmaktadır. Dördüncüsü olan aspirasyon ölçütü, bir taşımanın tabu olmasına rağmen eğer onun en büyük tamamlanma süresi şimdiye kadar bulunan en iyi çözümünkünden daha küçük ise o taşımanın seçilmesine izin vermektedir. Beşincisi olan tabu listesi düzeneği, her adımda seçilen taşımaya ilişkin özelliği (ki, sadece o işlem çiftinin tersi olarak alınır) tabu listesindeki en eski taşımaya ilişkin özellikle yer değiştirmesi şeklinde olmaktadır. Tabu listesi uzunluğu sabit olup 8 alınmıştır. Ayrıca TA yaklaşımı yenilikçi bir hafıza yapısıyla bulunmuş seçkin çözümlerin tekrar ele alınmasını birleştiren bir yoğunlaşma stratejisi kullanılmaktadır. Elde edilen sonuçlar son derece iyidir.

Karaboğa ve Kalınlı (1997) standart TA'nın farklı yönlerden gelerek küresel optimumu araması, o iteratif bir arama düzeni olduğundan, başlangıç çözümüne bağlı olduğunu belirtip yeni bir TA modeli sunmuştur. Bu model, GA'ların çaprazlama işlemine dayalı bir TA modeli olup standart TA'nın bu eksikliğini üstesinden gelmekte olduğunu ve

sonuçta yeni modelin standart TA'dan daha güçlü olduğunu gözlemlemiştir.

### 3.8 Çizelgeleme ve Çözüm Yaklaşımlarına İlişkin Bulgular

Çizelgeleme problemi, herşeyden önce, üretim çizelgelemenin bağımsız bir fonksiyon değildir; onu etkileyen pekçok unsur bulunmaktadır. Bunlar arasında ilk önce, temel bir takım kısıtlar oluşturduğu için süreç planlama işlemi yer almaktadır (çizelgeleme süreç planlamanın çıktılarını kullanmaktadır). Sonra, seçilen stratejik yaklaşım (öncelik kuralları gibi) tamamlanma zamanı üzerine önemli bir etki yapabilmektedir ve en iyi çizelgeleme politikası tezgah kullanımına ve teslim tarihi oluşturma yöntemine ciddi olarak bağlıdır. O halde, bir çizelge üretilirken bu unsurların dikkate alınması gerekir.

Çizelgeleme yaklaşımları değerlendirildiğinde, analitik teknikler için söylenebilecek en önemli husus, onların optimal çözümler üretmeye yönelik olmaları, bu yüzden ancak küçük hacimli ve özel (polinomsal) bazı problemleri çözmeye yararlı olabildikleridir.

Öncelik sevketme kuralları ile ilgili çok çeşitli kuralların olması yüzünden, bunlardan hangisinin daha iyi olduğunun belirlenmesi gerekir. Buna dönük pek çok araştırma yapılmıştır. Dikkat çekici bazı bulgular şunlardır:

1. Yüksek kullanım oranı, sıkı ve işlem sürelerinden bağımsız teslim tarihleri olması halinde SPT genellikle daha başarılıdır.
2. Orta kullanım oranlarında, daha az sıkı ve/veya TİT teslim tarihi atamalarında SPRO genellikle daha başarılıdır.
3. Teslim tarihine dayalı kurallar, özellikle MDD, diğer kurallarla mukayese edildiğinde daha iyi başarı sergilemektedir.
4. Etkinliğine göre öncelik kurallarının dizilişi atölye kullanım seviyeleriyle önemli ölçüde değişmektedir.
5. İşlerin periyodik serbest bırakılması öncelik kurallarının nisbi etkinliğini etkilememektedir.

Bütün bunlara rağmen hemen herkesin kabul edeceği bir sonuç şudur: “her koşulda iyi



sonuç veren bir çizelgeleme kuralından bahsetmek mümkün değildir". Öncelik sevketme kurallarının en büyük avantajı çok kısa sürede etkin çözümler üretebilmesidir.

Fırsatçı algoritmaların dikkat çeken bir özelliği, onların atölye tipi çizelgeleme gibi bazı zor test problemlerine ilk defa optimal veya optimale-yakın çözümler üretebilmeleridir. Bu yaklaşımın felsefesi problemi tamamen etkin bir tam veya bulgusal algoritma tarafından çözülebilecek kadar küçüklükte ayrıştırmaya dayanır. Bu işlem çözüm için avantaj sağladığı kadar aynı zamanda yöntemin en büyük dezavantajını da teşkil etmektedir. Çünkü ayrıştırma yöntemi, alt problemlerin sayısı ve onların ele alınış sırası erişilen çözüm kalitesini büyük ölçüde etkilemektedir.

Her koşulda iyi sonuç veren bir çizelgeleme kuralı olmadığından, çözüm için hangi kuralın kullanılacağı çizelgeleme ortamının durumuna ya da amaçlanan hedefe göre değişmektedir. US'ler yaklaşımı hem bu tür değişen çizelgeleme ortamına göre eylem sergiler, hem de çizelgeleme ortamında meydana gelen alışılmadık veya öngörülmemiş olayları çözülebilir. US'ler yaklaşımı ile ilgili belirtilmesi gereken hususlar şöyle sıralanabilir:

1. İmalat planlama ve çizelgelemede kural-tabanlı uzman sistemler çok sık uygulanmaktadır.
2. Çizelgeleme kuralları ve benzetim uzman sistemlerde genişçe kullanılmaktadır.
3. Geliştirme araçları olarak, özellikle Prolog gibi kabuk yazılımlar ve özellikle Pascal gibi geleneksel diller kullanılmaktadır. Geleneksel dillerden Pascal'ın tercih edilmesinin sebebi Pascal'ın büyük programların yapısını basitleştirmesi, öz ve hızlı yazma ve diğer ortamlara kolay dönüşür olmasıdır.
4. Bilgi temsil etmede nesne tabanlı programlama kullanımı artan eğilimdedir.
5. US'ler ve diğer YA yaklaşımlarının birleştirilmesinde yararlar olabilir.
6. BBİ ortamı aracılığıyla gerçek-zamanda fabrika düzeyi bilgilerini alan ve buna göre yeni bir çizelge üreten sistemler geliştirilmeye çalışılmaktadır. Ancak US böyle bir bilgi kazanımını sağlayacak modüller eklemek kolay değildir.
7. US çizelgelemenin başarısının öncelik kurallarından daha iyi olduğu söylenebilir.

8. US kurulması meşakkatli, uzun ve ekip çalışması gerektiren bir yoldur. Bu yüzden bütün özellikleriyle tam bir US kurmada her zaman tam olarak başarılı olduğu söylenemez.
9. US'ler çizelgeleme için, yapısında sezgi olduğundan, özellikle dar bir alan için geliştirilmelerinin uygun olacağı görülmektedir. Ancak, bu dar alan gereksinimi çizelgeleme probleminin zayıf adaptasyonu ile sonuçlanabilir.
10. Her üretim fabrikası farklı olduğu için US yaklaşımı yeni üretim ve çizelgeleme durumları elde etmek için yeterli güçte olmayabilir.

YSA ile çizelgelemede sıkça ağın yerel minimuma düşmesi gibi problemler ile karşılaşmaktadır. Bu yüzden, yakın zamanda yapılan çalışmalar bu yönde yoğunlaşmıştır. Bu amaçla stokastik YSA modeller, paralelleştirilmiş YSA gibi çeşitli ağ tasarımları sunulmuştur. Fakat, aşağıda belirtileceği gibi, sinir ağlarının esas katkısı uzman sistemlerle ya da diğer bazı yöntemlerle birlikte kullanıldığında ortaya çıkmaktadır.

US ve YSA teknolojilerinin dışında diğer YZ tekniklerinin sıkça tek başına çizelgelemede kullanılmadığı görülmektedir. Ancak bütün YZ tekniklerin birbiriyle ve özellikle benzetim gibi genel araçlarla birlikte kullanımı daha etkin çözümler sağlayabilmektedir. Çünkü bu teknikler birbirini destekler, tamamlar ve birbirlerinin eksikliklerini giderir tarzda kullanılabilirler.

Yerel arama yordamlarının en belirgin özelliği mevcut bir çözümü yerel minimuma kadar iyileştirip orada durmasıdır. Yordamın durduğu çözümün küresel optimum olup olmadığı da maalesef bilinemez. Bu yüzden yerel aramada karşılaşılan en büyük problem yerel optimuma yakalanmadır. Yerel arama yöntemlerinin zorluklarından birisi belirlenmesi gereken pekçok önemli detay olmasıdır. Üstelik bunlar yöntemin başarısı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Dolayısıyla, bu tür arama yordamlarının çok fazla uygulanma imkanı bulunduğu söylenemez.

Zeki arama yöntemlerin önemli bir özelliği, yerel arama yordamlarına kılavuzluk ederek onların çözümlerini yerel minimumun ötesine sevkedebilmeleridir. Dolayısıyla atölye tipi çizelgeleme için, halihazırda en üstün yöntemlerin probleme-özel yerel bulgularla genel kılavuz-bulgusal yöntemlerin bütünleştirilerek oluşturulan karma

yapılar ve yerel minimumdan kurtulma yöntemleri olduğu görülmektedir. Ancak bu yöntemlerin ana eksikliklerinden biri, onların probleme bağlı olmasıdır. Parametrelerin belirlenmesi için algoritmanın pekçok koşum yapması gerektirmesi ve deneme yanılmayla karar verilmek zorunda olunmasıdır. Başka bir eksiklik ise başlangıç çözümünün erişilebilecek çözüm kalitesi üzerinde bir etkiye sahip olmasıdır.

Zeki arama yöntemleri daha ayrıntılı olarak değerlendirildiğinde, Dorndorf ve Pesch (1995)'in belirttiği gibi, saf GA'ların diğerlerine nazaran atölye tipi çizelgeleme problemlerini çözmede biraz zayıf kaldığı, çaprazlama operatörlerinin olurlu çizelgeler üretmede genellikle GA'ların etkinliğini azalttığı ve çizelge kodlamada bazı zorluklar olduğu söylenebilir.

BT tek başına güçlü bir teknik olmamasına rağmen karma BT yaklaşımları nisbeten iyi sonuçlar üretmektedir. BT'nın ana eksikliği, iyi çözümler elde edilmesi için aşırı hesap süreleri gerektirmesi ve bazı parametrelerin dikkatli seçilmek zorunda olduğu probleme-bağlı bir yapı içermesidir. Aşırı zaman harcanmasının nedeni, çözüm uzayının çekici olmayan bölgelerinin de araştırılmasındandır.

TA yaklaşımı, makul zamanda iyi çizelgeler üretebildiği için, diğer tekniklerle karşılaştırıldığında genellikle çok daha iyi sonuçlar vermektedir. Bunun nedeni yapısının zeki arama prensiplerine uygun olmasındandır. Mesela, BT'daki gibi daha önce incelenen bir çözüm noktasını tekrar tekrar ele alıp aramayı bir salınma sokmaz. Yine de, diğer yerel arama teknikleri gibi TA'nın da her problem için uygun olarak düzeltilmesi ve hassas ayar yapılması gereken pek çok parametresi vardır.

Neticede, zeki arama yöntemleri bir başlangıç çizelgesi ile işe başladığından dolayı, eğer başlangıç çözümü olarak yukarıda bahsedilen bulgusal yöntemlerden herhangi biri kullanılırsa, bu demektir ki zeki arama yöntemi o başlangıç çözümünü iyileştirdiği ölçüde daha güçlü bir yöntem olmaktadır.

Nasıl bir çözüm yöntemi kullanılmalı ?

Yukarıdaki bulgular tekrar göz önüne alınacak olursa görülür ki, atölye tipi çizelgeleme gibi NP-zor bir problem için, nisbeten küçük problemlerde dal-sınır algoritmaları hariç, analitik yöntemler pek uygun değildir. Dal-sınır algoritmaları da

tam sayımı yaptığundan aşırı bellek ve hesaplama süresi gerektirmektedir. Öncelik sevketme kuralları çok kısa sürede etkin çözümler üretmektedirler. Saf YZ yöntemleri ise daha ziyade, problem alanıyla ilgili rakamsal olmayan bazı kısıtların, yargıların ve tercihlerin çözüme katılması yönünde büyük katkıları olmuştur. Ayrıca öncelik sevketme kurallarını kullanarak birden fazla amacı gerçekleştirebilme yetenekleri de uygulamaya son derece uygun olduklarını göstermektedir. Ancak zeki arama yöntemleri bir başlangıç çizelgesi ile aramayı işe başladıklarından dolayı, onun iyileştirilebildiği oranda çözüm kalitesinin yükseltilebileceği açıktır. Bu teknikler arasında, uzman sistemler gibi nisbeten iyi bir başlangıç çizelgesiyle işe başlayan, iyi düzenlenmiş ve zeki aramanın gereklerini yeterince yerine getirebilen özel bir tabu arama yaklaşımı uygun bir yol olarak görünmektedir.



## BÖLÜM 4. UZMAN SİSTEMLER (US)

Karmaşık üretim/süreç yönetimi problemlerinin çözümü için geleneksel yaklaşımlar ya algoritmiktir, ya da kesikli olay benzetimini içerir. Oysa YZ sembolik, algoritmik olmayan problem çözme yöntemleriyle uğraşan bilgisayar biliminin bir dalı olarak tanımlanabilir. Bu bakımdan YZ farklı bir yaklaşım içerir. Bu farklılığın neticesi olarak geleneksel yöntemlerden farklı ve daha iyi çözümler üretmesi beklenir. Bu amaçla, oluşturulmak istenen bir uzman çizelgeleme modelinin kaynağı olan uzman sistemler yöntembilimi bu bölüm içerisinde açıklanmaktadır.

### 4.1 Giriş

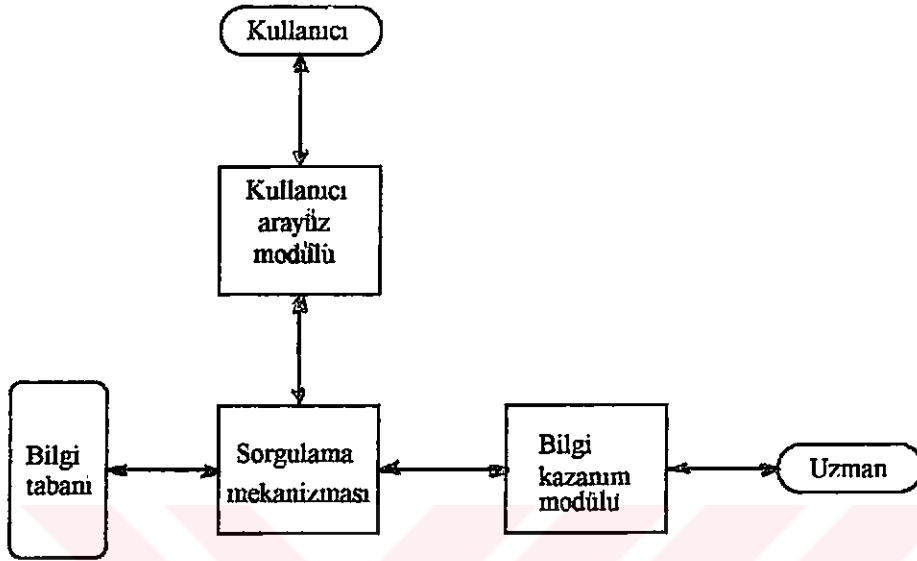
Yapay zekanın muhtemelen en önemli bir dalı US'lerdir. Bazen bilgi-tabanlı bir karar destek sistemi olarak söylenen uzman sistem daha iyi karar vermeye yardım eden bir araçtır. Medsker ve Liebowitz (1994)'e göre, bir US çok dar bir alanda insan uzmanının uzmanlığını kullanma davranışına özenen bir bilgisayar programıdır. Bu program bir uzmanın çok özel bir görevde kullandığı bilgi ve bulgularını içine alır. Pham ve Pham (1988)'e göre ise, US'ler zeki ortamın sergilendiği programları geliştirme ile ilgili bilgisayar biliminin bir dalıdır.

US'in tipik olarak sahip olduğu birkaç özelliği vardır. Mesela, US çıkardığı sonucu "niçin" ve "nasıl" soruları sorulduğunda açıklayabilir. Bunun yanı sıra, çoğu US belirsizliği kullanabilir. Bir uzmanın verdiği bilgiler yüzde yüz kesin değildir ve o genellikle cevaplarına belirsizliğin bir ölçüsünü de katar.

US'in bir başka özelliği, yazılım açısından, veri ve bilgiden (bilgi tabanı) ayrılmış bir kontrol yapısı (sorgulama düzeneği) olmasıdır. Bu özelliği ile US'ler adım adım kurulabilir ve mükemmelleştirilebilir. Aynı zamanda uzman sistemi test etme son derece kolaylaştırılabilir. Diğer bir özellik de, sayılar yerine sembollerin ve listelerin işlendiği, sayısal işlemde öte sembolik işlemin kullanılabilmesidir.

## 4.2 Uzman Sistem Yapısı

Bir US'in temel bileşenleri sorgulama düzeneği ve bilgi tabanıdır. Ancak kullanıcı arayüz ve bilgi kazanım modülleri de US'ler için gerekli bileşenlerdir.



Şekil 4.1 Bir uzman sistemin temel parçaları

### 4.2.1 Sorgulama düzeneği

Kontrol taktiğini kapsayan bir sorgulama düzeneği bir uzman sistemin esas parçasıdır. Bir uzman sistemdeki kontrol taktiğinin rolü geleneksel bir bilgisayar programındaki algoritmanın rolü ile benzerdir. O çeşitli çözümlere varmak için bilgi tabanındaki bilgiyi kullanan bir kontrol yapısıdır.

Farklı sorgulama düzenekleri benimsenen bilgi gösterim tipine bağlıdır. Kural-tabanlı bir sistemde, sorgulama düzeneği mantıksal sorgu ve kontrol yordamları kümesine göre bilgi tabanındaki gerçekleri ve kuralları inceler. Sıkça kullanılan üç sorgulama mantığı modus ponens, modus tollens ve tekrar-çözümdür (kararsızlık-resolution). Bunların mantık yapıları Şekil 4.2'deki gibidir (Pham ve Pham, 1988).

Çıkarım işlemi farklı sorgulama düzeneklerine göre farklı yönde ilerler. Üç temel sorgulama düzeneği yöntemi vardır: ileriye-doğru çıkarım, geriye-doğru çıkarım ve ileri-geri çıkarım.

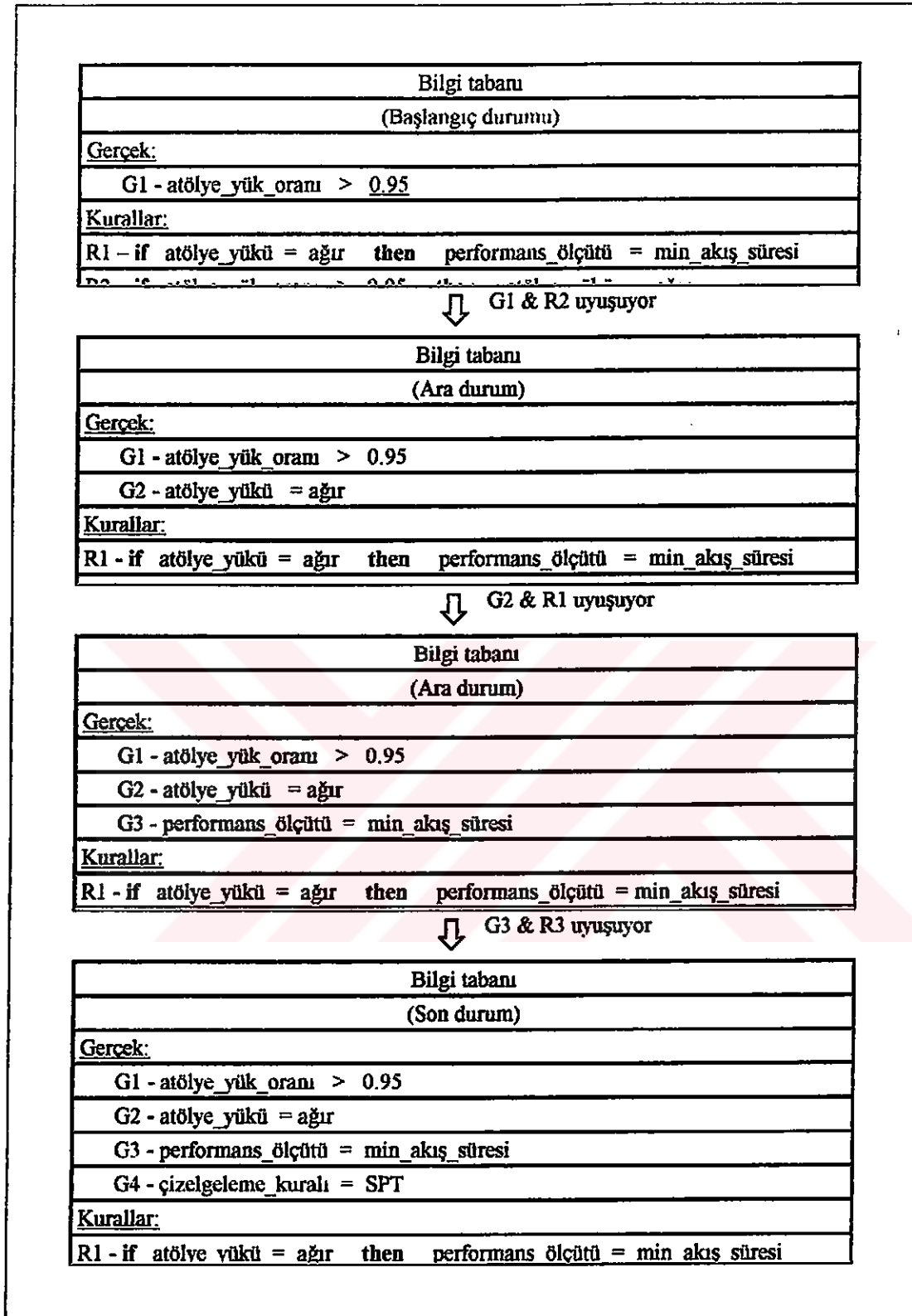
|                   |                           |   |  |
|-------------------|---------------------------|---|--|
| 1) Modus ponens:  | $A \Rightarrow B$         | , | $A \perp B$  |
|                   | (Eğer A doğru ise B doğru | , | A doğru bu yüzden B doğru)                         |
| 2) Modus tollens: | $A \Rightarrow B$         | , | $B^{\neg} \perp A^{\neg}$                          |
|                   | (Eğer A doğru ise B doğru | , | B doğru değil bu yüzden A doğru değil)             |
| 3) Tekrar-çözüm:  | $(A \Rightarrow B$        | ; | $B \Rightarrow C) \Rightarrow (A \Rightarrow C)$ . |

Şekil 4.2 Temel çıkarım şekilleri (Pham ve Pham, 1988)

*İleriye-doğru çıkarım* bir başlama noktası olduğunda problemin çözümü için veriler ve gerçekleri kullanılır. O bir gerçekler kümesini veya verilen bir veriyi bilgi tabanındaki kuralların “if” kısımlarında arayacaktır. Böyle kurallar bulunduğunda, onlardan biri belli bir esasa göre “tetiklenir” ve “then” kısmındaki eylem yerine getirilir. Bu tetikleme diğer kuralları tetikleyecek sebepleri içine alan bilgi tabanında yeni gerçekler ve verileri üretir (Şekil 4.3). Yani, çıkarım gerçeklerden sonuçlara doğru çalışır. Bu yüzden, olay-süren veya veri-süren çıkarım olarak da tanımlanır. (Pham ve Pham, 1988) İleriye-doğru çıkarım veri analizi, tasarım, kavram (matematiksel) formülasyonu gibi konular için kullanılabilir.

*Geriye-doğru çıkarım* başlangıç olarak bir amaç değer veya hipotezi alır ve sonra kuralların “then” kısmında o amacı arayıp, onu kanıtlayacak gerçekleri oluşturmaya çabalar. Yani, çıkarım sonucun doğruluğunu görmek için bazı yollar boyunca geriye doğru tetiklenir. Bu yüzden amaç-yönlü çıkarım olarak da adlandırılır (Pham ve Pham, 1988). Geriye-doğru çıkarımın çarpıcı özelliği, onun belirli bir amaç için konu dışı gerçekler oluşturmamasıdır. Bu yüzden kural sayısı çok olduğunda ve ileriye-doğru çıkarım bir kombinasyonel genişlemeye yol açtığında geriye-doğru çıkarım tercih edilir. Ayrıca arıza tesbit, sınıflandırma, planlama gibi konular için kullanılması uygundur.

*İleri-geri çıkarım* ise sorgulama düzeneğinde hem ileriye-doğru hem geriye-doğru çıkarımı birlikte kullanan bir yöntemdir ve büyük bir arama uzayı için (aşağıdan-yukarı ve yukarıdan-aşağı aramanın yaklaşık olarak birleştirilebilmesi için) kullanılabilir. Konuşma anlama gibi belirsizlik içeren karmaşık problemlere uygulanabilir.

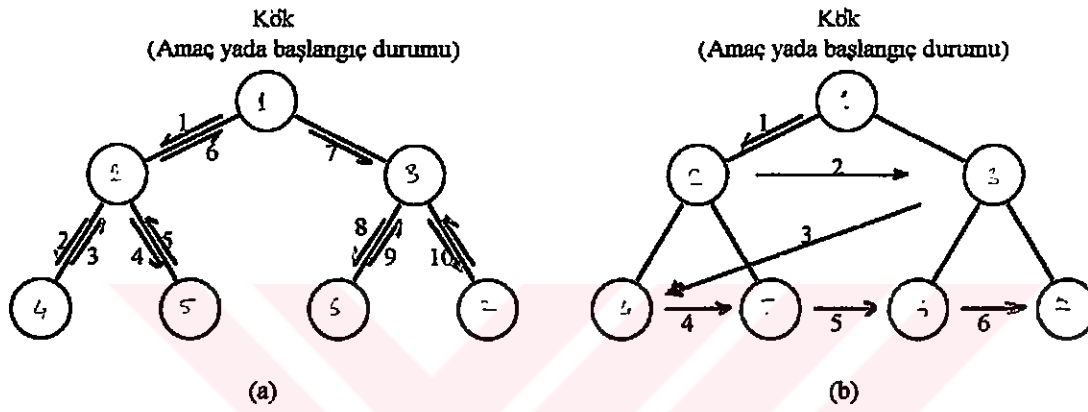


Şekil 4.3 İleriye-doğru çıkarım örneği

Arama yönüne bakmaksızın, verilen herhangi bir hedef durumdan veya başlama



durumundan muhtemel çözümlere giden genellikle birkaç alternatif yol vardır. Yani bir "arama ağacı"nın kökünden başlayan dallar, hedef durumdan veya başlama durumundan ayrılan alternatif yollardır. Arama ağacı "derinlemesine - depth first" veya "yanlamasına - breadth first" araştırılabilir. Derinlemesine arama kökten dallara doğru ilerler, yani durum yol tükeninceye kadar ardışık bir sırayla incelenir ve dibe kadar inildikten sonra bir sonraki dala geçer. Yanlamasına aramada, kökteki bütün muhtemel alternatifler oluşturulur, sonra diğer (alt) seviyedeki alternatifler üretilir ve böyle devam eder. Böylece arama yanlamasına ağacın dalları arasında bir uçtan diğerine yürütülür (Şekil 4.4) (Pham ve Pham, 1988).



Şekil 4.4 (a) Derinlemesine arama ve (b) yanlamasına arama taktikleri (Pham and Pham, 1988)

Pham ve Pham (1988)'in ifadesine göre, kural-tabanlı sistemlerde kullanılan sorgulama düzeneğinin tersine, çatı/ağ-tabanlı sistemlerdeki sorgulama düzeneği sistemin bilgi öne-sürme ve bilgi geri-alma faaliyetlerinin olduğu çok sınırlı bir alana sahiptir. Bu sınırlı alan ve gösterim şemasının yapısal özelliğinden (miras bırakma) dolayı, bir çatı/ağ-tabanlı sistemdeki sorgulama düzeneği kural-tabanlı olandan daha hızlı çalışır.

#### 4.2.2 Bilgi tabanı

Bilgi tabanı US'in muhtemelen en önemli parçasıdır. O dar bir alanda deneyime dayalı bilgileri ve bulguları birleştirir. Burada önemli olan husus bilgi tabanında yer alacak bilgi ve bulguların nasıl temsil edileceğidir. Bilgi temsili bilgi-tabanlı sistemleri geliştirmede anahtar bir adımdır. Medsker ve Liebowitz (1994) US'in bilgi temsil etme yöntemine karar vermede iyi bir yol uzman için en tabii gelenini seçmektir. Diğer bir deyişle, bilginin uzmanın o bilgiyi aynen kullandığı şekilde US'de temsil edilmesidir.

Uzman sistemlerde bilgi temsilinin çeşitli şekilleri vardır. En yaygın kullanılanları üretim kuralları, çatılar ve anlamsal ağlardır. Aşağıda bilgi temsili başlığı altında bunlarla ilgili detaylı açıklamalar yapılmıştır. Pham ve Pham (1988)'e göre, bunlar arasında kural-tabanlı bilgi temsili yüzeysel bir temsil, çatılar ve anlamsal ağlar ise derinlemesine bir temsil sağlarlar.

### 4.2.3 Kullanıcı arayüzü

Kullanıcı arayüz kullanıcının US'e girebildiği dil arayüzüdür. Bu modülü iki yönlü bir iletişim sağlar. Bir yönüyle, kullanıcı US'in sorgulamayı başlatabilmesi için gerekli olan başlangıç ya da amaç durumunu US'e bildirir. Diğer yönüyle, bu modül sayesinde kullanıcı genellikle danışıklı bir şekilde US ile etkileşerek US'e itiraz etme ve sorguya çekme imkanı vardır. Böylelikle kullanıcı US'in çıkarım işlemini inceler, US de sonucu nasıl ulaştığını izah eder.

## 4.3 Bilgi Temsili

### 4.3.1 Kural-tabanlı bilgi temsili

Kural-tabanlı bilgi temsili bilginin sıralı kurallar ifadesi olarak temsil edilmesi şeklindedir. Bu gösterimde bilgi gerçekler ve bu gerçekleri işleyecek kurallar bakımından temsil edilir. Burada gerçekler, nesnelerin kesin sınıflandırıldığı veya onlar arasında belirli ilişkilerin olduğu durumlarda öne sürülür. Kurallar ise if durum then eylem veya if koşul then sonuç şeklindeki modüler bilgi ifadeleridir. Modülerlikten kastedilen veri yapıları ve kurallar birbirinden ayrıdır, bu yüzden birindeki değişiklik diğerini etkilemez (Pham ve Pham 1988, Sarin ve Salgame 1989).

if ... then ... kuralları iki kategoriye ayrılabilir. İlki, uygulamaya özel kuralları kapsar ve ilk-emir kurallardır. Mesela

`if atölye_yük_oranı > 0.95 then atölye_yükü ağırdır`

İkincisi probleme özel kuralları kapsar ve üstseviye kural ya da kural-kuralları ya da kılavuz-kurallardır. Bunlar bilgi hakkında bilgiyi işaret ederler. Mesela,

if zaman  $t$  güncellenmiş then kural X aktif olsun

Tetiklenecek yapım kuralını seçmek için bir yorumcunun rolü gerekir. Böyle bir yorumcunun kontrol yapısı sistemden sisteme değişir. Basit tekniklerden birinde “tanı-tetikle” (recognize-act) çevriminde mevcut veritabanı ile uyuşan ilk kural seçilir. Bir diğerinde “çatışan çözümler” düzeneğinde uyuşan (çatışan küme) bütün kurallar tetikleme için potansiyel adaylar olarak göz önüne alınır (Sarin ve Salgame, 1989).

Kusiak ve Chen (1988 )'e göre, iki tür bilgiden bahsetmek mümkündür: uygulamaya-özel bilgi ve probleme-özel bilgi. Bazı durumlarda uygulamaya-özel ve probleme-özel bilgi birbirinden ayrılmaz, ancak yaygın bir bilgi tabanının içinde birleştirilirler. Böyle bir bilgi tabanının kontrolü problemden bağımsız yordamlarla sağlanmalıdır.

Bilgiler bazen kesin olmayabilir. Böyle bir durumda bu bilgileri temsil eden kurallar kendilerine ilişkin belirsizliği bir ölçüde kullanabilmelidir. Böyle kurallara, Medsker ve Liebowitz (1994)'e göre, özellikle arıza tesbit ve planlama konusunda ihtiyaç duyulabilir.

Kural-tabanlı bilgi temsiline birkaç avantajı vardır. Medsker ve Liebowitz (1994)'e göre birincisi, kurallar prosedürel bilginin ne yapılacağına tabii bir ifadesidir. İkincisi, bir problem için bütün bilgi kurallar olarak tekdüzen temsil edilir. Üçüncüsü, kurallar genişleyebilir bilgi parçalarıdır. Dördüncüsü, kurallar kolayca silinebilen ve eklenebilen bilgi parçalarıdır. Son olarak, kurallar bilgi bilgisini temsil etmek için, yani kılavuz-kural olarak kullanılabilirler. Kural-tabanlı bilgi temsiline bir dezavantajı bir tek kuralda uygun olarak ifade edilebilen bilgi miktarına bir sınır olmasıdır.

#### 4.3.2 Çatılar ve anlamsal ağlar

Hem çatılar hem de anlamsal ağlar anlatımlı (descriptive) veya sözlü bilgi ve gerçeklerin temsilinde kullanılır. Sözlü bilgi, prosedürel bilginin aksine, derhal icra edilemeyen ama tekrar ele geçirilebilen ve depolanabilen bilgidir. Çatılar altında Sarin ve Salgame (1989)'a göre, anlamsal ağların detaylı bilgi veren halidir.

Çatılar genellikle bir hiyerarşi düzeninde organize edilir. Pham ve Pham (1988)'e göre, çatı-tabanlı sistemlerin gücü çatıların hiyerarşide kendinden yukarıda yer alan diğer

çatıların özelliklerini miras almayı mümkün kılan bir yapıda olmalarındandır.

Medsker ve Liebowitz (1994)'e göre çatılar (1) tanımladıkları nesnelere veya durumların çoğu görüntüsü hakkında bilgi içerir, (2) özel depolarını doldurabilmek için kullanılacak nesnelere doğru olmasını gerektiren özellikleri içerir ve (3) temsil ettikleri kavramların tipik örneklerini tanımlarlar.

Anlamsal ağların yapısı çatılardaki esasa benzer. Bir anlamsal ağ birbirlerine oklarla bağlanmış bir düğümler kümesidir. Düğümlerin anlamı genel kavramlar (veya tipler), özel nesnelere (veya belirtiler), genel olaylar (veya örnek olaylar), ya da özel olaylardır. Bilgi bu düğümlerin etrafında organize edilir. Oklar düğümler arasındaki ilişkileri tanımlar.

Anlamsal ağları kullanmanın temel avantajı her bir nesne, olay veya kavram için, bütün ilgili bilginin bir araya toplanmasıdır. Böylece temsilde bir bütünlük sağlanmış olur. Çatılar ve anlamsal ağlar kavramlar ve sebepsel ilişkiler üzerine daha derin bir kavrayışa müsaade ederler, soyut ve benzerlik (analogy) gibi daha derin seviyede sonuçlandırma yapılması imkanı sağlarlar. (Pham ve Pham, 1988)

### 4.3.3 Bilgi temsil şeklinin seçimi

Hangi tür bilginin hangi tip bilgi temsil aracına uygun olduğunun bilinmesi, bilgi temsil şeklinin seçimini kolaylaştırmaktadır. Buna göre, US içindeki kararların çoğu “evet” veya “hayır” şeklinde cevaplandırılabilirse kural-tabanlı temsil uygun olabilirler. Ayrıca bilginin açık açık sınıflandırılmasının mümkün olduğu durumda kullanılması uygundur. İlave olarak, Pham ve Pham (1988)'e göre, özellikle insan uzmanın kişisel deneyimlerinin bulunduğu durumlarda da kural-tabanlı temsil tercih edilebilir. Ancak onun problem alanındaki birtakım esas prensipleri yeterince tanımlaması mümkün olmamaktadır.

Medsker ve Liebowitz (1994)'e göre, eğer bilginin genel duruma bağlılığı az ise o çok anlatımlı bir bilgi olmayacağından bu tür bilginin temsili için de kural-tabanlı temsil daha uygundur. Oysa anlatımlı bilgi söz konusu olduğunda, bunun temsili için çatı-tabanlı bilgi gösterimi daha uygun olur.

Diğer taraftan, Sarin ve Salgame (1989)'e göre, çatılar anlatımsal bilginin kullanımını

kolaylaştırdığından, genel duruma bağlılığın büyük miktarda var olduğu durumlarda kullanılır. Ayrıca bir tezgah arızasının tesbit edilmesi gibi klişeleşmiş bir durumu temsil etmek için kullanılması uygundur. Anlamsal ağlar çatılarda olduğu gibi, genel duruma bağlı büyük miktarda bilginin olduğu görevler için olduğu kadar özel olayları veya uzmanlıkları temsil etmek için kullanılabilir.

#### 4.4 Bilgi Kazanımı

Bilgi ya US'i geliştiren kişiler tarafından çeşitli kaynaklardan kazanılarak gerektiğinde US'e sunulur, ya da US'e bir bilgi kazanım modülü eklenerek uzman sistemin problemin çözümü için gerekli veri ve bilgiyi otomatik kazanması sağlanır.

Bilgi çeşitli çevre kaynaklarından kazanılabilir. Kusiak ve Chen (1988)'e göre bilgi uzmanlar, küresel veri tabanı, matematik modeller ve benzetim programlarından kazanılabilir. Pham ve Pham (1988)'e göre ise bir US gerçekler, kurallar, kavramlar veya ilişkilerden haberdar olunmasıyla, örneklerden bilgi alınmasıyla, ya da gözlem ve keşiflerden öğrenmeyle bilgi kazanabilir.

Bilgi kazanımı için farklı yöntemler kullanılır. Mesela, kural-tabanlı sistemler için en yaygın kullanılan bilgi kazanım yöntemleri anketlere dayanır. Bunlar röportaj teknikleri, senaryo kurma, soru kağıtları ve tutanak analizi şeklinde olabilir. Röportaj tekniği soru-cevap şeklinde olurken, senaryo kurma bilgi mühendisinin konu ile ilgili bir senaryo çizdiği ve sonra uzmanın o problemi nasıl çözdüğünü kaydettiği anlatımsal bir tekniktir. Soru kağıtları yöntemi bazen, özellikle uzmanın o gün sınırlı zamanı varsa, spesifik bilgi elde etmek için kullanılır. Tutanak analizi ise yüksek bilgi kapasiteli deyimleri tesbit etme, bu deyimleri bilgi alanları içine gruplandırma, onların aralarındaki ilişkileri gösterme ve sonra bu bilgiyi temsil etmeyi içerir.

Medsker ve Liebowitz (1994) Quinlan (1987)'nin anlatımlı, bulgusal ve gözlemlilik olmak üzere üç genel bilgi kazanım yöntemi iddia ettiğini ifade etmektedir. Bunun yanı sıra birkaç özel bilgi kazanım tekniği olarak da şunları sıralanmıştır: yerinde (in-site) gözlem, problem tartışma, sistem arıtma<sup>6</sup>, sistem inceleme ve muayene, sistem

<sup>6</sup> Sistem arıtma bilgi mühendisinin uzmandan öğrenilen kurallar ve stratejilere dayanarak problemleri çözmesi ve sonra uzmanın o çözümleri değerlendirmesi anlamındadır.

hatasızlaştırma<sup>7</sup> veya yeniden gözden geçirme. Bu doğrudan yöntemler yanında doğrudan olmayan yöntemlerden bazıları da şunlardır: çok boyutlu ölçekleme<sup>8</sup>, Johnson hiyerarşik kümeleme (yöntem benzerlik yargılarının bir yarı-matrisi ile başlar ve bir birimin bir kümenin elemanı olup olmadığını analiz eder), genel ağırlıklı ağlar (uzman mümkün bütün amaç çiftleri hakkındaki yargılara bir mesafe ölçüsü koyar; bu mesafelerin uzmanın karşıt görüşünden olduğu varsayılırsa), sıralı hatırlama ağaçları ve repertuar şebeke analizi (yöntem uzmanla bir başlangıç diyalogu, bir değerlendirme oturumu ve birimlerin değerlendirilmesiyle ilgili hem amaçları hem de boyutları kümelendiren analizlerden oluşur).

Planlama ve çizelgeleme problemlerinin hesap karmaşıklığı nedeniyle, bilgi kazanımı için karmaşık yöntemler kullanılması muhtemeldir. Uzman planlama sistemlerinin çoğu probleme-özel ve problemenden-bağımsız bilgiyi esas olarak insan uzmandan kazanır. Ancak insan uzmandan bilgi kazanma zor bir işlemdir. Dikkat edilmesi gereken pek çok problem vardır. Medsker ve Liebowitz (1994)'e göre temel problemlerden bazıları şunlardır:

- uzmanın kişisel yargılarının doğru bilgi sağlanmasını etkilemesi,
- uzmanın bilgi kazanım işini savsaklaması, bilgiyi gizlemesi ve kısıtlı zamanını bu işe ayırmak istememesi,
- bilgi mühendislerinin kötü röportaj tekniği, bilgi almak için yeterince organize olmayışı, uzmanı tam olarak anlayamama ya da konuyu tam olarak bilmeme gibi eksikleri olması ve
- uzmanın her zaman doğru, işbirlikçi ya da seçkin olmaması.

Bazı YZ dilleri, US kabukları ve bazı indüksiyon<sup>9</sup> programları bilgi kazanımını kolaylaştırmaktadır. Bunlar veriler ve gerçekler veya örnek olay hikayelerinin otomatik olarak toplanmasıyla US kurallarını çıkarırlar. Bu arada, uzman planlama ve

<sup>7</sup> Sistem hatasızlaştırma prototip sistem tarafından ve uzman tarafından elde edilen çözümlerin başka uzmanlar tarafından elde edilenlerle karşılaştırılması şeklindedir.

<sup>8</sup> Çok boyutlu ölçeklemede uzman bütün amaç çiftlerine ilişkin benzerlik yargılarını bulur ve derecelendirir. Benzerliklerin simetrik ve sürekli (0 ya da 1 değil) değişken değerleri alacağı varsayılmaktadır.

<sup>9</sup> Indüksiyon bilinen gerçekleri kullanarak genel kural ve prensipler çıkarma işlemidir.

çizelgeleme sistemleri gibi dinamik ortamlarda dinamik bilgi kazanımı da dikkate alınması gereken bir husustur.

Uzman çizelgeleme sistemleri için ne tür bilgilerin kazanılması gerektiğine ilişkin olarak, bu tür bilgileri Kerr (1992) şu kategorilere ayırmıştır:

1. mevcut atölye düzeyi bilgisi (tezgah ve operatör sağlama, WIP durumu gibi),
2. var olan çizelgelerin bilgisi (projelenmiş tezgah yükleri, iş başlama ve bitiş zamanları gibi),
3. bir çizelgenin sağlanması gereken kısıtların bilgisi (işlemler arasındaki geçici öncelik kısıtları, teslim tarihi kısıtları, tezgah yükleme kısıtları, v.b.) ve
4. kısıtların mümkün olduğunca uzakta sağlandığı bir çizelge geliştirmek için elle düzeltmeyi sağlayacak düzensiz bulguların bilgisi.

#### 4.5 Bir Uzman Sistemin Kuruluş Adımları

Bir uzman sistemin kuruluşu sırasında uzman sistemin temel unsurları olan bilgi gösterimi, sorgulama düzeneği ve bilgi kazanımı konuları göz önüne alınır. US kurmada atılacak adımlar Medsker ve Liebowitz (1994)'e göre sırasıyla şunlardır:

- problemi seçme, US'in amaç(lar)ını tanımlama ve bilgi kaynaklarını tesbit etme,
- bilgi tabanı geliştirmek için uzmandan bilgi kazanma,
- bilgi temsil etme yaklaşımını seçme,
- uygun bir US kabuğu kullanarak veya LISP, Prolog, ya da diğer uygun bir programlama dili kullanarak bilgiyi programlama ve
- sistemi hatasızlaştırmak, test etmek ve değerlendirmek.

Bütün bunlarla beraber US kurma çalışmaları her zaman başarı ile neticelenmeyebilir. Mesela, Kerr (1992) başarısız bir US kurma girişimini analiz eder ve hatanın kaynaklarını sıralar. Bunlar :

- bilgi kazanımının karmaşıklığının tahmin edilememesi,
- bilgi tabanının değişim oranının tahmin edilememesi,
- insan çizelgeci ve sistem arasındaki ilişkiyi kafi olarak kavramlaştırılmama,
- çizelgeleme parametrelerindeki belirsizliğin kafi derecede temsil edilememesi,
- problem uzayının iyi bilinmeyen bir yolla temsiline alışmada çizelgecinin zorluğu,
- bilgisayar bilgi gösterimini geliştirmeden önce imalat işlemini basitleştirmeyi iyice düşünme çabasının yetersizliği.

Netice olarak da Kerr'e göre çıkarılan muhtemelen en önemli üç ders "otomasyondan" önce "re-organizasyon" gereği, planlamanın önemi ve kullanıcılar ile US'ler arasında etkileşimin kafi derecede sağlanması gerektiğidir.

US kurulmasında dikkat edilmesi gereken önemli bir konu US'in işletilmesidir. Çünkü bu tür teknolojik yeniliklerde organizasyonlarda genellikle davranış sorunları çıkabilir. US kurulduktan sonra, karşılaşılabilecek aşılması lazım gelen çeşitli işletim engellerini Medsker ve Liebowitz (1994) şöyle sıralamıştır:

- organizasyonda değişikliğe karşı koyma olabilir,
- uzman işini kaybedeceği korkusuyla engel olabilir,
- US kullanmak için isteksiz olunabilir ve
- US'in korunamayacağı (güncellenemeyeceği) ve bu yüzden doğru sonuç alınamayacağı için kullanışsız olacağının sanılması.



## BÖLÜM 5. TABU ARAMA (TA)

Çizelgeleme problemine kesin (optimum) çözümler aramanın aşırı zaman alan bir uğraş olduğu bilinmesine rağmen, mevcut geleneksel yaklaşımların, hatta US ve YSA'ler gibi yapay zeka uygulamalarının ürettiği sonuçların optimumdan uzakta olması yüzünden, optimuma olabildiğince yakın sonuçlar üretme çabası durmaksızın devam etmektedir. Bu çabayı destekleyen yaklaşımların başında zeki arama yordamları gelmektedir. Bu bölümde TA çizelgelemeyle bağlantılı olarak ele alınmaktadır.

### 5.1 Giriş

Yerel arama teknikleri olası alternatiflerin sadece küçük bir ayrımının keşfedilmesi yoluyla, kompleks iş problemlerine en iyi ya da yaklaşık en iyi çözümü bulma yeteneğine sahiptir. Burada alternatif seçimlerin küçük bir ayrımından kastedilen şey, mevcut çözümün komşularının araştırılmasıdır. Karşılaşılan en büyük problem bir yerel optimuma yakalanmadır. Benzetimli tavlama gibi bir arama tekniğinde, incelenecek komşu seçimi belli bir olasılıkla rastgele seçildiğinden dolayı yerel optimumdan kaçınılabılır. Ancak zaten incelenmiş çözümlere geri dönme olasılığı olduğundan arama yerel optimum civarında salınma girebilir. Bu da aşırı zaman kaybettirir. Bu yüzden daha önce incelenmiş belli sayıda çözüm tabu listesi olarak adlandırılan bir listede tutulur. Böylece tabu listesinde yer alan çözümler yasaklandığından aramanın salınma girme olasılığı kalmaz. İşte bir tabu listesi ile teçhiz edilmiş böyle bir arama yordamı *tabu arama* tekniği olarak adlandırılmaktadır.

TA tekniğine ait ilk çalışmalar Glover (1986, 1989, 1990)'dir. Tekniğin esası genel zeki problem çözme eğilimlerinden kaynaklanmaktadır. Buna göre TA temel olarak, hafızasında aramanın hikayesini tutarak aramayı sınırlandıran ve yerel optimallikten kurtaran bir arama yordamıdır. Brucker (1995)'e göre TA yerel optimallığe düşmekten kaçınmak için bir hafıza fonksiyonu kullanırken, küresel optimumu hızlı bir şekilde aramada bir veya daha çok yerel arama yordamını hiyerarşik olarak yönlendiren zeki bir tekniktir. Genel TA çerçevesi çözüm yordamlarının tasarımı için üst düzey bir

serbestliğe izin verir. İşte araştırmacılar daha güçlü çözüm yordamlarına ulaşabilecekleri yeni stratejileri keşfetmek için bu esnekliği kullanırlar. Laguna ve Glover (1996)'a göre ise, TA çok çeşitli iş problemlerinin çözümü için bir kapı açan yenilikçi bir yaklaşımdır. Bu yenilikçi yaklaşım muhtemelen şeffaf ve tabii bir hafızaya sahiptir; onun amacı hafızanın zekice kullanımını düzenlemektir. Yani, hadise insanların bir problem çözme labirentinde yolunu bulmaya yardım etmesi için çeşitli hafıza fonksiyonları kullanarak kendi kendine hafıza oluşturması çabasını TA'ya kazandırmadır.

## 5.2 Tabu Arama Algoritması

TA'nın işleyişi basittir ve ilk olarak, bir başlangıç çizelgesi seçilir. Sonra, bu çizelgenin komşuları bir komşuluk yapısıyla belirlenir. Komşu çizelgeler bir amaç fonksiyonuna göre değerlendirilir. Daha sonra, değerlendirilen her komşunun tabu listesinde olup olmadığı kontrol edilir. Eğer en iyi komşu tabu listesinde yoksa ya da aspirasyon ölçütünü sağhyorsa bu çözüme taşınmasına karar verilir, bu çözüm tabu listesine eklenir ve sonraki arama için yeni başlangıç çözümü olarak alınır. Daha sonra, taşınan çözüm şimdiye kadar bulunan en iyi çözümle karşılaştırılır; eğer bu çözüm en iyi çözümden daha iyi ise bu yeni en iyi çözüm olarak saklanır. Bu işlem bir durdurma ölçütü karşılanıncaya kadar tekrarlanır. Aşağıda Şekil 5.1'de genel bir TA algoritması yapısı verilmiştir.

Adım 1. ♦ Bir başlangıç çizelgesi seç ve onu en iyi çizelge olarak kaydet.

Adım 2. ♦ Mevcut kök çizelgenin komşuluğundan tabu olmayan veya tabu olsa bile aspirasyon ölçütünü sağlayan bir komşu çizelge seç.

♦ Seçilen komşu çizelgeyi yeni kök çizelge olarak ata.

♦ Mevcut kök çizelgeden yeni kök çizelgeye taşıma özelliğini tabu listesine ekleyerek listeyi güncelle.

♦ Eğer yeni kök çizelge o ana kadarki en iyi çizelgeden daha iyi ise onu yeni en iyi çizelge olarak ata.

Adım3. ♦ Bir durdurma ölçütü sağlanıncaya kadar Adım 2'yi tekrarla.

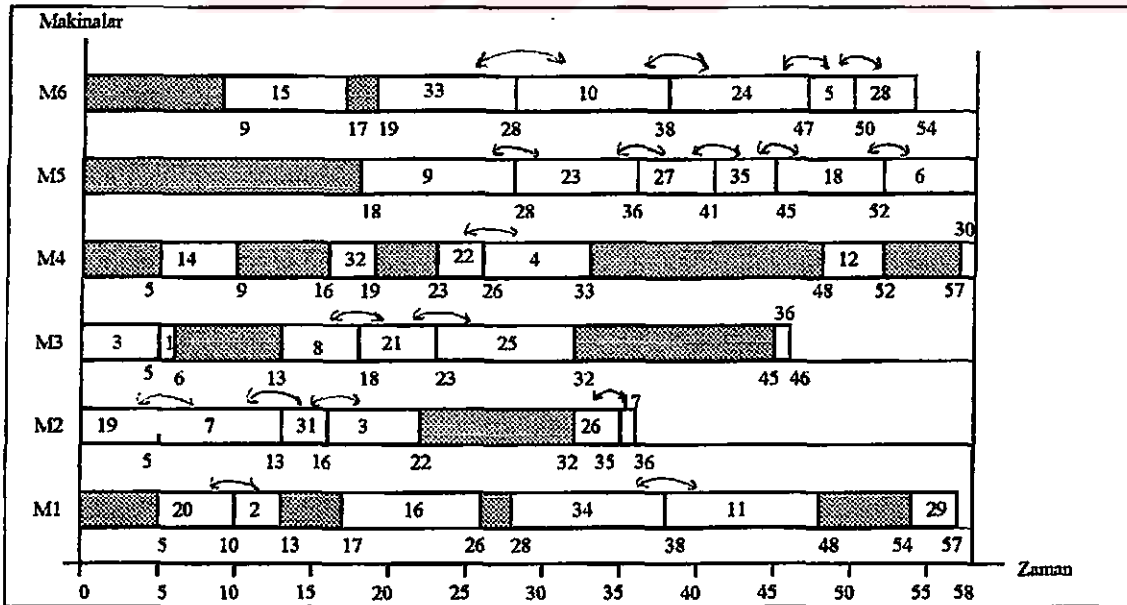
Şekil 5.1 Genel bir tabu arama algoritması yapısı

Burada TA ile ilgili bazı kavramlar ön plana çıkmaktadır. Bunlar komşuluk yapıları, tabu listesinin düzenlenmesi, aspirasyon ölçütü, durdurma ölçütü gibi. Aşağıda bunlar detaylı olarak açıklanmaktadır.

### 5.3 Çizgeleme Komşuluk Yapıları

Komşuluk yapısı mevcut bir çözümü açıkça belirlenmiş bir düzenek yardımıyla bir anda değiştirerek yeni çözümler üretme şeklidir. Çizgeleme problemi için bu tür bir yapı mevcut bir çizgeden, komşuluk yapısının içeriğine göre yarı-aktif yeni çizgeler üretmek için kullanılır. Yukarıda bahsedildiği gibi, bu tür çizgelere komşu çizgeler denmektedir.

Bir çırpıda üretilebilecek komşu çizge sayısı çok fazla olabilir. Mesela, her bir tezgahdaki bitişik bütün işlemleri çiftler çiftler yer değiştirerek en genel komşuluk yapısı oluşturulabilir. Şekil 5.2'de FT06 (Fisher ve Thomsen, 1963) 6x6 test problemine ait bir olurlu çözüm için genel komşuluk yapısı görülmektedir. Ancak bu komşuların pekçoğu gereksiz (yani çözümü iyileştirme ihtimali olmayan) veya olursuz olabilir. Bu yüzden, etkin komşuluk yapısı öncelikle gereksiz komşu üretmemelidir ve eğer mümkünse kısır döngü oluşturacak komşu da üretmemelidir. Çünkü, Brucker (1995)'in de belirttiği gibi, komşuluk arama yöntemlerinin kalitesi kullanılan komşuluk yapısına sıkıca bağlıdır. Birkaç etkin komşuluk yapısı aşağıda açıklanmıştır.



Şekil 5.2 Genel komşuluk yapısı (FT06 test problemi için)

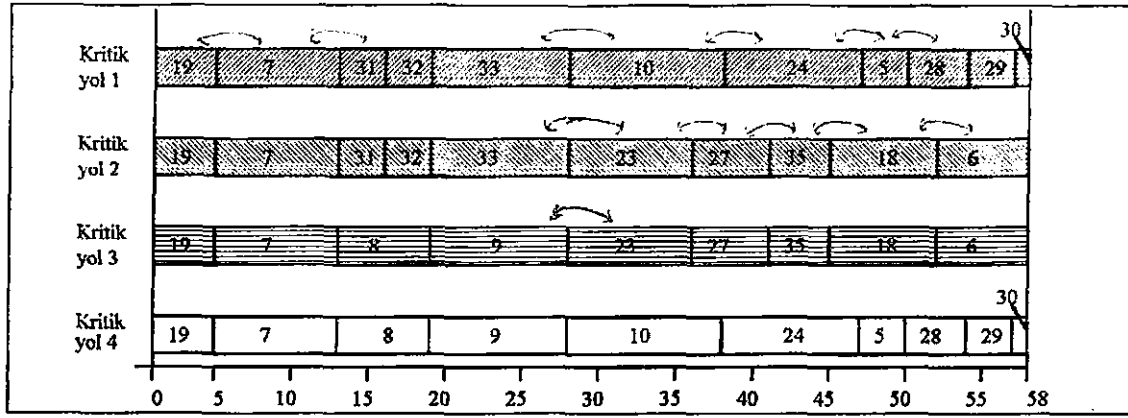
Genel komşuluk yapısı mevcut bir çizelgede aynı tezgaha ait ardışık (bitişik) bütün işlemleri yer değiştirerek komşuları üretir. Dolayısıyla komşuluk hacmi aşırı büyüktür.

### 5.3.1 N1 komşuluğu

N1 komşuluğu olurlu bir çizelgede, kritik yol (alternatif kritik yollar dahil) üzerinde olan ve aynı tezgaha ait işlemlerin, ardışık olarak çiftler çiftler ters çevrilmesiyle elde edilen bütün alternatif çizelgeler kümesini gösterir (Şekil 5.3). Böyle bir küme daima olurlu bir çözüm oluşturur ve herhangi bir olurlu çizelgeden bu komşulukla sonlu sayıda taşıma yapılmasıyla optimum çözüme ulaşılabilir, yani N1 komşuluğu optimal bağlantılıdır.

N1 komşuluğu mevcut bir çizelgede kritik yol üzerindeki aynı tezgaha ait bitişik bütün işlemleri yer değiştirerek komşuları üretir. Dolayısıyla komşuluk hacmi nisbeten büyüktür. Şekil 5.3'de görüldüğü gibi, FT06 test problemi için dört kritik-yol üzerinde aynı tezgahı gerektiren işlemler arasında çiftler yer değiştirmeye toplam 12 komşu çözüm elde edilebilmektedir.

N1 komşuluğu Dell'Amico ve Trubian (1993) tarafından kapsamı genişletilerek değişik sürümleri oluşturulmuştur. Mesela bunlardan birisi şöyledir:  $(i, j)$  yayı kritik yol üzerinde olsun ve eğer varsa  $i$ 'nin tezgah öndülü  $MP(i)$  ve  $j$ 'nin tezgah ardılı  $MS(j)$  ile gösterilsin. Sadece kritik  $i, j$  işlemleri değil, aynı zamanda  $\{MP(i), i, j\}$  ve  $\{i, j, MS(j)\}$ 'nin  $(i, j)$ 'nin ters çevrildiği bütün permutasyonlarının komşular olarak dikkate alınmasını gerektirir. Burada  $MP(i)$  ve  $MS(j)$ 'nin kritik olması gerekmediğinden dolayı, daha kapsamlı bir yapı halidir ve aynı şekilde optimal bağlantılıdır. Diğer bir sürüm ise şöyledir: Eğer kritik yol üzerinde aynı tezgahı gerektiren ardışık işlemler blok oluşturursa, oblokdaki bütün işlemleri o bloğun başına veya sonuna taşıyarak elde edilebilen bütün taşımalar komşuları tanımlar. Ancak bu tür bir taşıma kısır döngü oluşturabilir, yani bu komşuluğun optimal-bağlantılı olup olmadığı belli değildir.

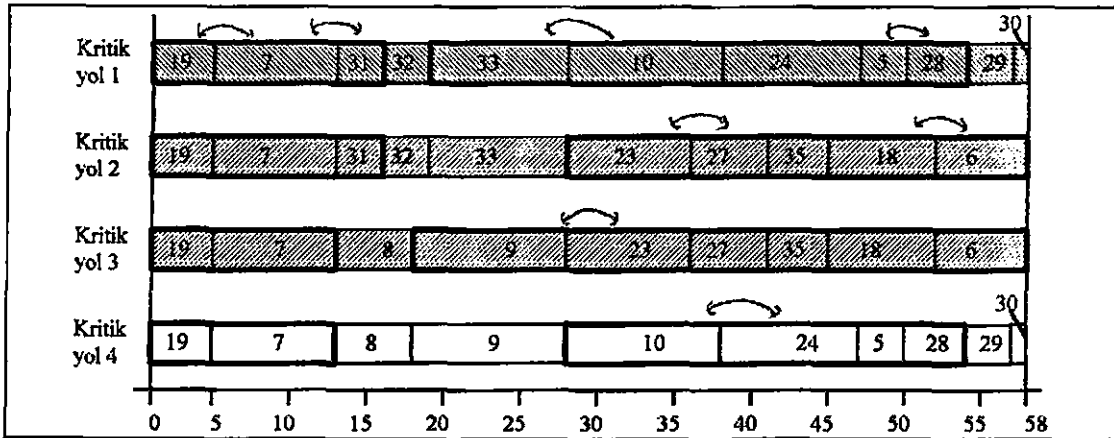


Şekil 5.3 N1 komşuluk yapısı örneği

### 5.3.2 N2 komşuluğu

N2 komşuluğu Matsuo ve diğerleri (1988) tarafından geliştirilen bir komşuluk yapısıdır. Buna göre, olurlu bir çizelgede, kritik yol (alternatif kritik yollar dahil) üzerindeki aynı tezgahı gerektiren bitişik işlemler kritik bloklar oluşturur. Bu komşuluk yapısı, bütün kritik blokların ilk iki ve eğer o blokta ikiden fazla işlem varsa son iki işlemi yer değiştirerek komşuları üretir (Şekil 5.4).

N2 komşuluğunun komşuluk hacmi nisbeten küçüktür. Bir bloktaki ara işlemlerin yer değiştirmesi doğrudan bir iyileştirmeye sebep olması mümkün olmadığından gereksiz taşımalar daha baştan önlenmiş olur. Dolayısıyla TA'da en çok zaman tüketen unsur olan komşu değerlendirme işlevi az sayıda yapılmış olacağından N2 komşuluğu büyük bir etkinlik sağlayacaktır.

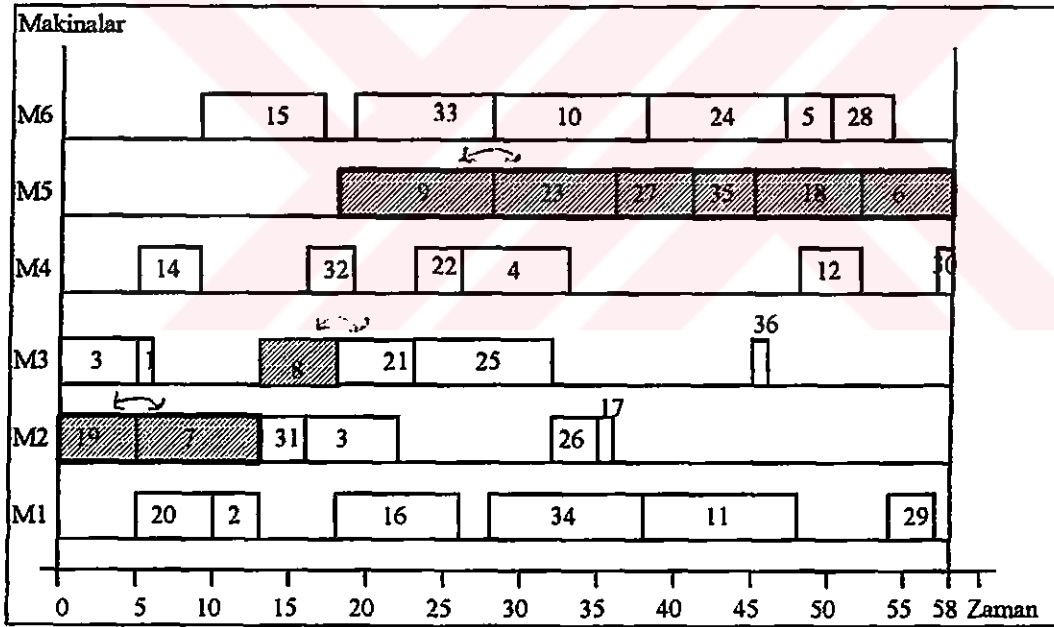


Şekil 5.4 N2 komşuluk yapısı örneği

### 5.3.3 N3 komşuluğu

Brucker (1995) tarafından tanımlanan bu komşuluk, N2 komşuluğuna benzemektedir. Şöyleki, olurlu bir çizelgede, kritik yol (alternatif kritik yollar dahil) üzerindeki aynı tezgahı gerektiren bitişik işlemler kritik bloklar oluştursun.  $(i,j)$  yayı bu blokların herhangi bitişik ilk iki veya (o blok ikiden fazla işlem içeriyorsa) son iki işlemi gösterebilir. Bu komşuluk yapısı, tıpkı N2 komşuluğu gibi,  $(i,j)$ 'yi ters çevirmeyi ve ilaveten, eğer varsa,  $(MP(h), h)$  ve  $(k, MS(k))$ 'yi de ters çevirmeyi gerektirir (Şekil 5.5). Burada  $h$ 'nin iş öndülü ve  $k$ 'nin iş ardılığıdır.

Şekil 5.5'de görüldüğü gibi, taralı operasyonlardan oluşan bir kritik-yol üzerinde, koyu çerçeveye gösterilen iki bloktaki üç taşımaya ilaveten *kritik işlem 7*'nin iş ardılı (veya *kritik işlem 9*'un iş öndülü) olan *işlem 8* de kritik yol üzerindedir. Bu yüzden *işlem 8* ve onun tezgah ardılı olan *işlem 21* arasında da yer değiştirme yapılarak bir komşu tanımlanmaktadır.



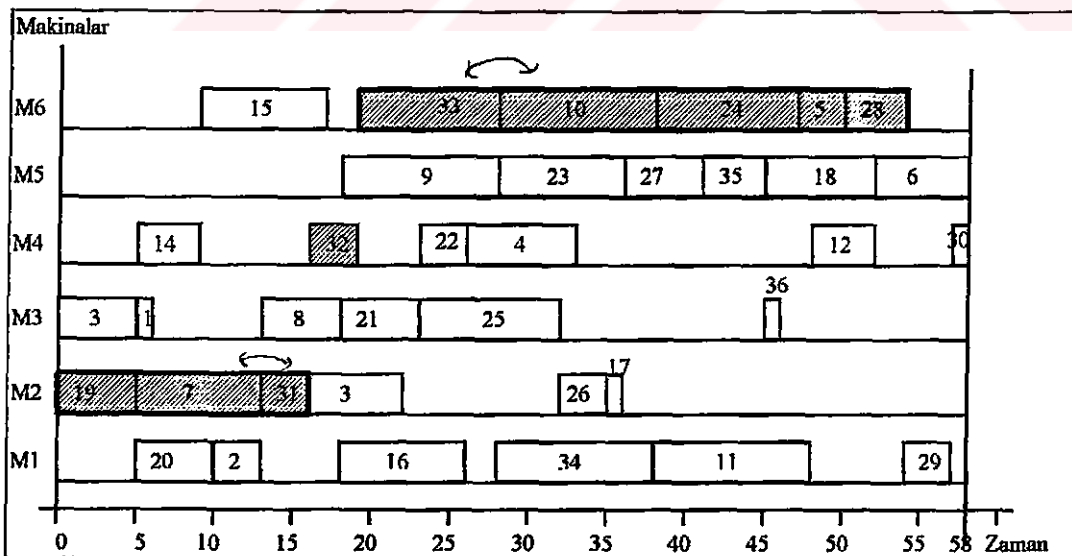
Şekil 5.5 N3 komşuluk yapısı örneği

### 5.3.4 N4 Komşuluğu

Nowicki ve Smutnicki (1996) tarafından kullanılan bu komşuluk çok etkindir. Şöyleki, bu komşuluk N1 komşuluğunu (veya onun değişik sürümlerini) sadece bir bloğun uç noktaları üzerinde ters çevirmeye sınırlandırarak daha az sayıda komşu içermektedir. Üstelik bir tek kritik yol seçilmektedir. Seçilen bu yol alternatif kritik yollar arasından en sıkı öndüle (alternatif yolun olduğu işlemlerden süreç sırası daha ön sırada olan) sahip olmaktadır. İlave olarak bu kritik yol üzerindeki ilk bloğu sadece son iki işlemi ve son bloğu sadece ilk iki işlemi üzerinde ters çevirmeye sınırlandırmaktadır.

Bu komşuluk yapısı şöyle tanımlanmaktadır: Olurlu bir çizelgede, bir tek kritik yol üzerindeki aynı tezgahı gerektiren bitişik işlemler kritik bloklar oluşturursun.  $(i,j)$  yayı bu blokların herhangi bitişik ilk iki veya (o blok ikiden fazla işlem içeriyorsa) son iki işlemi gösterebilir. Bu komşuluk yapısı  $(i,j)$ 'yi ters çevirmeyi gerektirir. Ancak kritik yol üzerindeki ilk bloğun eğer ikiden fazla işlemi varsa sadece son iki işlemi ve simetrik olarak, son bloğun eğer ikiden fazla işlemi varsa sadece ilk iki işlemi yer değiştirir.

Şekil 5.6'da görüldüğü gibi, N4 komşuluğu bir tek kritik yol üretir. Komşuluk hacmi son derece küçüktür. Taralı işlemlerden oluşan kritik-yol üzerinde koyu çerçeve içine alınan iki blok görünmektedir. Komşu aday çözümler olarak sadece  $(7,31)$  ve  $(33,10)$  işlem çiftleri yer değiştirmektedir.

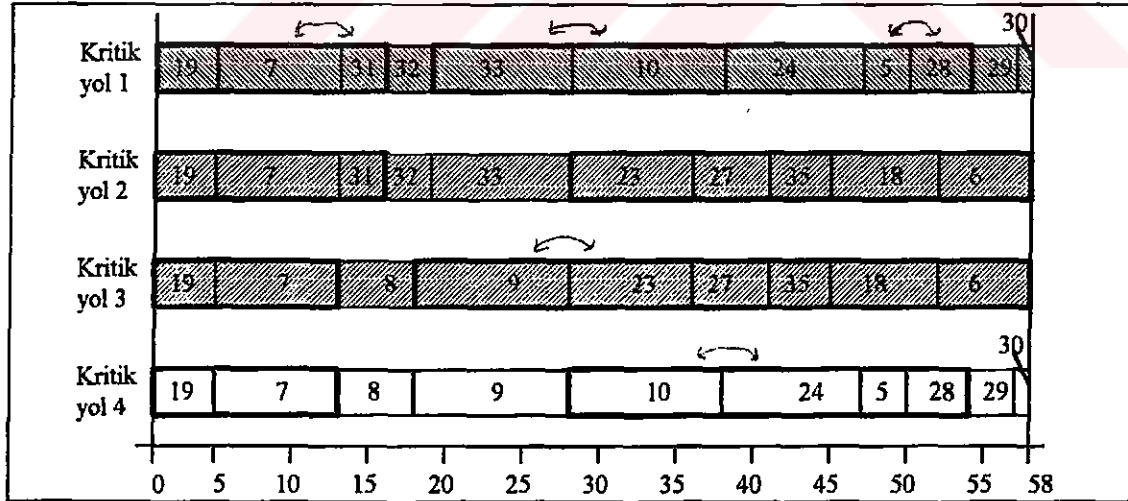


Şekil 5.6 N4 komşuluk yapısı örneği

### 5.3.5 N5 Komşuluğu

Balas ve Vazacopoulos (1998)'in komşuluk yapısının esasları ileri ve geri doğru yerdeğiştirme kavramlarına dayanır. Mevcut bir çözümü, onun komşularını oluşturmak üzere, bozarken bir kritik yol üzerindeki  $i$  ve  $j$  gibi iki bitişik işlemin yer değiştirilmesi arasında fark yok gibi görünmesine rağmen bu iki şekilde yapılabilir. İlkinde,  $i$   $j$ 'nin arkasına taşınabilir, ki bu *ileriye-doğru yerdeğiştirme* olur. İkincisinde ise,  $j$   $i$ 'nin önüne taşınabilir, ki bu *geriye-doğru yerdeğiştirme* olur. Olurlu bir  $S$  çizelgesi ve aynı tezgahda işlenecek herhangi iki  $i$  ve  $j$  işlemi göz önüne alınsın, böylece  $i$  ve  $j$  aynı kritik yol üzerinde olsun, ama ardışık olması gerekmez. Kabul edilsin ki  $i$ ,  $j$ 'den önce işleniyor.  $P(o, i)$   $o$ 'dan  $i$ 'ye en uzun yolun mesafesi olsun. Yazarların ileri sürdüğü önermeye göre, çizelge yapım periyodunda bir iyileştirme sağlamak için, ya  $i$ 'nin iş öndülü  $JP(i)$  ya da  $j$ 'nin iş ardılı  $JS(j)$ 'den en az biri  $i$  ve  $j$ 'yi içeren  $P(o, n)$  kritik yolu üzerinde olmalıdır.

Şekil 5.7'de görüldüğü gibi, dört kritik-yol üzerinde toplam altı aday komşu oluşturulabilmektedir. Bunlar her bir kritik-yol üzerinde sadece blokların sonunda son işlemin iş ardılı ve/veya blokların önünde ilk işlemin iş öndülü olan işlem çiftlerinin yer değiştirilmesi neticesi üretilmiştir. Böylece "çekici" yer değiştirmelerin sayısı son derece azalmaktadır.



Şekil 5.7 N5 komşuluk yapısı örneği



N5 Komşuluğu,  $i$  ve  $j$  gibi iki faaliyeti içeren bir kritik yol aynı zamanda  $j$ 'nin iş ardılına da içeriyorsa ve  $i$ 'nin iş ardılından  $j$ 'ye doğrudan bir yol yoksa, yani

$$L(j, n) \geq L(JS(i), n) \text{ ise,}$$

$i$  ve  $j$  üzerinde bir ileriye-doğru yer değiştirme kısır döngü yaratmayan komple bir seçim oluşturur. Diğer taraftan,  $i$  ve  $j$  gibi iki faaliyeti içeren bir kritik yol aynı zamanda  $i$ 'nin iş öndülünü de içeriyorsa ve

$$L(o, i) + p_i \geq L(o, JP(j)) + p_{JP(j)} \text{ ise,}$$

$i$  ve  $j$  üzerinde bir geri yer değiştirme kısır döngü yaratmayan bir komple seçim oluşturur.

N5 komşuluğu N2'ye benzemektedir, ancak bir tek kritik yol ele alınmaktadır. Daha da önemlisi Balas ve Vazacopoulos (1998)'in kılavuzlu yerel arama yordamı fikri, bir komşu daha üretilirken onun bir kısır döngüye yol açıp açmayacağını kontrol etmeye dayanır. Bu kontrol  $i$  ve  $j$ 'nin yer değiştirmesi sözkonusu iken şöyle yapılır: Eğer  $j$  faaliyeti bloğun son sırasında ise ve  $i$ 'nin iş ardılından  $j$ 'ye doğrudan bir yol yok ise  $j \rightarrow i$ 'nin komşu olmasına izin verilir. Eğer  $i$  faaliyeti bloğun ilk sırasında ise ve  $i$ 'den  $j$ 'nin iş öndülüne doğrudan bir yol yok ise  $j \rightarrow i$ 'nin komşu olmasına izin verilir. Ancak dikkat edilmesi gereken nokta, kısır döngü kontrolünü taşımayla etkilenecek işlemler arasında kalan çizelgenin bütün işlemleri için baştan sona değil de sadece etkilenen iki işlem arasında direkt bir bağın varlığının kontrolü yapılmaktadır. Ancak bu durum, yaklaşıma büyük bir değerlendirme hızı sağlamasına rağmen bütünüyle bir kısır döngü kontrolü sağlamaz.

#### 5.4 Hafıza Yapıları

Glover ve Laguna (1997)'nin belirttiği gibi, TA hafıza yapıları yenilik, frekans, nitelik ve etkiden oluşan başlıca dört boyuta atıfla iş görür. *Yenilik-tabanlı* ve *frekans-tabanlı* hafıza yapıları birbirini tamamlar niteliktedir. Yenilik-tabanlı hafıza geçmiş en son aramalar müddetince değişen çözümlerin özelliklerini kaydetmek için kullanılan en yaygın hafıza tipidir. Bu hafıza tipi kısaca tabu listesi şeklinde kullanılır. Bu tip hafıza sürekli güncellenmeyi gerektirir. Bilgiler hafızada belli kısa bir süre tutulur ve sonra unutulur.

Frekans-tabanlı hafıza yenilik-tabanlı hafıza tarafından elde edilen bilgileri tamamlayan bir bilgi üretir. Ayrıca, frekans unsuru taşıma değerlendirmelerini değiştiren ceza ve teşvikleri oluşturmak üzere yenilik unsuru ile bütünleştirilebilir. Gerçi yenilik kısa-dönem hafızanın bir unsurudur, ama o uzun-dönem hafızanın da doğrudan bir unsuru olabilir. Bir işin bir özelliğinin belli bir pozisyonda yüksek frekanslı olması gibi bir durum, o özelliğin değiştirilmesi için güçlü bir teşvik olarak iş görebilir, böylece öncekinden farklı yeni bir çözüm üretilmiş olur. Bu yüzden frekans-tabanlı hafıza genellikle taşımanın değerlendirilmesini değiştirmek için ceza ve teşvik değerlerini tanımlamada bir unsur olarak kullanılır.

Frekans-tabanlı hafıza ile yenilik-tabanlı hafıza arasında tabii bir bağ vardır. Eğer yenilik-tabanlı hafızada bir özelliğin kalış periyodu (süresi) çok büyük bir ceza uygulamak için koşullu bir eşik olarak düşünülürse, böyle bir hafıza tarafından üretilen tabu sınıflandırmaları cezalar uygulandığı zaman ikinci derece bir değerlendirme sonucu olarak yorumlanabilir. Ancak şu anda pekçok uygulama bir ceza ya da teşvik yaratmak için bir frekans ölçüsünün basit doğrusal bir çarpanını kullanır. Bu çarpanlar teşvik ya da ceza arasında ve amaç fonksiyonunun maliyet (kar) katsayıları arasında doğru bir denge yaratmak üzere ayarlanabilir. Frekans-tabanlı hafıza tarafından oluşturulan teşvik ve ceza unsurları TA'da önemli iki kavram olan yoğunlaşma ve genişletmenin uygulanmasında kullanılır. Bu kavramlar aşağıda açıklanmaktadır.

*Nitelik* boyutu araştırma müddetince ziyaret edilen dikkate değer çözümlerin farklılığını ortaya çıkarma yeteneğini işaret eder ve böyle çözümlere giden yolların ya da ara çözümlerin elemanlarını tesbit etmek için kullanılır. Bu, iyi çözümleri teşvik etmek ve zayıf çözümleri cezalandırmak için dürtü oluşturarak, dürtü-tabanlı öğrenme için bir temel teşkil etmektedir.

*Etki* boyutu ise araştırma müddetince yapılan seçimlerin sadece nitelik üzerinde değil aynı zamanda yapı üzerindeki etkisini de dikkate alır. Özel çözüm elemanları üzerinde seçimlerin etkisi hakkında kaydedilen bilgi ilave bir öğrenme seviyesi oluşturur.

TA'da kullanılan hafıza hem *tam* hem de *özelliksel*'dir. Tam hafıza tipi çözümleri bütün olarak kaydeder. Ancak aşırı hafıza gerektirdiğinden bunun kullanılması sınırlıdır. Özellikle hafıza tipi bütün çözüm yerine, sadece bir çözümden diğerine harekette değişen çözüm özellikleri hakkında bilgileri tutar.

## 5.5 Tabu Listesi

TA`de önemli bir ayırım, kısa-sürelî hafıza ve uzun-sürelî hafıza arasındaki farklılıktan kaynaklanmaktadır. Her hafıza tipinin kendi özel taktikleri vardır. Bununla beraber her iki tipin de etkisi mevcut bir çözümün komşuluğunu değiştirmek üzerinedir.

Kısa süreli hafıza kullanan TA taktiklerinin esas özelliği komşuluk içindeki taşımaların tabu durumlarını tesbit etmesidir. Uzun süreli hafıza kullanan TA taktiklerinde ise, komşuluk mevcut komşulukta olağan olarak bulunmayan çözümleri içine alacak şekilde genişletilebilir. Bu dinamik bir komşuluk yöntemi olarak görülebilir ve paralel işlem yaklaşımı için önemli bir esası oluşturur (Glover ve Laguna 1997).

### 5.5.1 Tabu listesinin düzenlenmesi

Tabu listesi belli bir süre müddetince tekrar göz önüne alınmaması gereken çözümleri karakterize eden özellikleri saklar. Genellikle listeye ilk-giren-ilk-çıkarm stratejisi uygulanır. Listedeki varlık sayısı liste uzunluğuna ulaştıktan sonra listeye yeni varlıklar tepeden girdikçe eski varlıklar birer aşağı kayar ve en dipteki varlık listeden düşer. Komple bir çizelgeyi bütün olarak tabu listesinde saklamak büyük bir hafıza israfına neden olur. Bu yüzden sadece bu seçimi temsil eden bir özellik listede tutulur. Özellik olarak genellikle en son taşımada yer değiştiren aynı tezgaha ait ardışık iki ( $i-j$ ) işlemi kullanılabilir. Dolayısıyla, eğer özellik kümesine ait bu ardışık işlemleri temsil eden ( $i-j$ ) yayı incelenen bir çözüm içinde varsa bu çözüm tabu olarak tanımlanır.

### 5.5.2 Tabu listesi uzunluğu

Tabu listesi uzunluğu belirlenmesi gereken önemli bir parametredir. Liste uzunluğu sabit veya belli bir aralıkta değişken olabilir. En iyi liste uzunluğunu tesbit eden kesin bir kural yoktur; deneme yanılma ile tesbit edilmeye çalışılır.

Etkin tabu listesi uzunluğunun seçimi problem hacmine ve kullanılan taşıma tipine bağlıdır. Ancak bütün problem sınıfları için etkin tabu listesi uzunluğu tasarlayacak tek bir kural yoktur. Tabu listesi uzunluğu bazı deneylerle kolayca belirlenebilir. Aşırı küçük tabu listesi uzunlukları periyodik olarak tekrarlı amaç fonksiyonu değerleri veya çevrim meydana gelmesini ima eden diğer fonksiyon göstergelerine neden olur. Aşırı

büyük tabu listesi uzunlukları ise bulunan çözümlerin kalitelerini kötüleştiren bir etkiye sahiptir.

Genellikle, daha uzun tabu listeleri aramayı yerel optimum civarından uzaklaştırmaya yardım ederken, kısa tabu listesi uzunlukları yerel optimuma “yakın” çözümlerin keşfine yol açar. Aslında tabu listesi uzunluğu bir çeşit yoğunlaşma ve genişletme fonksiyonu olarak da iş görür.

Biraz küçük hacimli komşuluk olması ya da tabu listesi uzunluğunun biraz büyük seçilmesi durumunda, mevcut bütün taşımaların tabu olması olasılığı çok muhtemeldir. Böyle bir halde “endüşük tabu” durumlu bir taşımaya izin vermek için peşinen-aspirasyon yöntemi kullanılabilir. Rastgele seçim yöntemi de genellikle kabul edilen bir yoldur (Glover ve Laguna 1997).

### 5.5.3 Dinamik tabu listesi

Dinamik tabu listesi uzunluğu işlemleri rastgele ve sistemli dinamik tabu listesi uzunluğu olarak sınıflandırılabilir (Glover ve Laguna 1997). *Rastgele dinamik tabu listesi* uzunluğu bir alt ve bir üst sınır parametresiyle tanımlanan bir aralıktan, genellikle üniform dağılımdan, rastgele seçilir. Bunun iki değişik hali vardır. İlk halde, seçilen liste uzunluğu belli bir iterasyon sayısınca sabit kalır, sonra yeni bir liste uzunluğu seçilir. İkinci halde ise, her iterasyonda yeni bir tabu listesi uzunluğu belirlenir.

*Sistemli dinamik tabu listesi* uzunluğu ise, yine belli bir aralıkta, her defasında üniform dağılımdan değil de, bir dizi olarak önceden belirlenmiş tabu listesi uzunluk değerlerinin her iterasyonda yeni liste uzunluğu olarak atanmasını içerir. Bu önceden belirlenen değerler arama bitinceye kadar aynı sırayla tekrarlanır.

Dinamik tabu listesi uzunluğunda aralık ve aralığın orta noktasının genişletme ve yoğunlaşma amaçları için, ne kadar arttırılması ve azaltılmasının belirlenmesi önemli bir çalışma konusudur. Çünkü bu konuda belirlenmiş uygun değerler pek yoktur.

Dell'Amico ve Trubian (1993)'ın dinamik tabu listesi kullanımı aşağıdaki gibidir.

- Eğer mevcut amaç fonksiyonu değeri önceden bulunan en iyi değerden daha iyi ise tabu listesi uzunluğuna belli bir eşik değer ata.
- Eğer arama iyileşen bir safhadaysa (yani, mevcut iterasyonun amaç değeri o ana kadarki en iyi amaç değerinden daha iyi ise) ve tabu listesi uzunluğu bir eşik değerden daha büyük ise liste uzunluğunu bir birim azalt.
- Eğer arama kötüleşen bir safhadaysa (yani, iyileşen safhada değilse) ve liste uzunluğu verilen bir üst sınırdan daha küçük ise liste uzunluğunu bir arttır.

#### 5.5.4 Tabu durumu tesbiti

Tabu durumunu tesbit etmek için şu iki yaklaşım kullanılabilir. Birincisinde, Tabu durumunu tesbit etmek için önce boyutları en büyük işlem sayısına eşit olan bir kare matris  $A=(a_{ij})$  oluşturulur. Sonra  $a_{ij}$ 'ye  $(i-j)$  yayının son ters çevrildiğindeki algoritma iterasyon nosu atanır. Eğer  $a_{ij}$  değeri ile tabu listesi uzunluğunun toplam mevcut iterasyon nosundan daha büyük ise  $(i-j)$  yayı "tabu"dur denir (Brucker, 1995). Burada olası bir güçlük oluşturulan matrisin aşırı hafıza tüketmesidir. Ancak yaklaşım son derece hızlı çalışır.

İkinci yaklaşım, ele alınan komşu çözümün özelliği olan son ters çevrilen  $(i-j)$  yayı tabu listesinde kayıtlı bütün varlıklarla karşılaştırılır. Eğer bu özellik tabu listesinde bulunursa  $(i-j)$  yayı "tabu"dur denir.

Genelde yenilik-tabanlı hafıza tabu olma durumlarını kaydeden, bir veya birkaç tabu listesi oluşturularak idare edilir. Tabu listesinin uzunluğu farklı tiplere veya özelliklerin kombinasyonuna göre, ve de farklı zaman aralıklarına göre veya arama safhalarına göre değişmektedir.

#### 5.6 Aspirasyon Ölçütü

Aspirasyon ölçütü bir taşıma üzerindeki tabu durumunun etkisini iptal eden bir koşul olarak tanımlanır. Aspirasyon ölçütüne başvurma ihtiyacı iki durumda ortaya çıkar. İlk

durumda, komşuluktaki bütün taşımalar tabudur ve hiçbiri o ana kadar elde edilen amaç değerinden daha iyi değildir. Şu halde içlerinden birisi seçilerek arama devam ettirilecektir. Buna uygun birkaç aspirasyon ölçütü şekli tanımlanmaktadır (Glover ve Laguna 1997):

- *Peşinen-aspirasyon*: Eğer mevcut bütün taşımalar tabu ve diğer bazı aspirasyon kriterleriyle kabul edilemez ise, “endüyük tabu” taşımaları yeni çözüm olarak seçilir.
- *Rastgele-aspirasyon*: Eğer mevcut bütün taşımalar tabu ise içlerinden birisi rastgele seçilerek taşıma yapılır.
- *Arama-yönlü aspirasyon*: Aramanın yönünü (ister iyileşen ister iyileşmeyen) değiştirmeyen bir taşımaların tabu durumu kaldırılarak taşımaya izin verilebilir.
- *Etki-ile-aspirasyon*: Eğer düşük etkili bir taşıma kendinden sonra yüksek etkili bir taşımaya yol açmış ise, düşük etkili taşımaların tabu durumu iptal edilebilir.

İkinci durumda ise, bütün taşımalar tabu değildir, fakat tabu olan taşımaların değeri tabu olmayanlardan daha iyidir, ya belli bir eşik değeri kadar iyidir, ya da şimdiye kadarki en iyi amaç değerinden bile daha iyidir. Bu durumda aşağıdaki gibi aspirasyon ölçütleri oluşturulabilir.

*Küresel-amaçlı aspirasyon*: Eğer bir taşıma o ana kadar elde edilen en iyi çözüm değerinden daha iyi bir çözüm üretirse, tabu olsa bile o taşımaya izin verilir. Böyle bir ölçütün arkasındaki fikir Brucker (1995)'e göre şudur: İlgili taşıma tabu olsa bile önceki en iyi çözümü iyileştiren bir taşımayla ilgilenilmelidir.

*Bölgesel-amaçlı aspirasyon*: Eğer bir taşıma bulunduğu bölgede o ana kadar elde edilen en iyi çözüm değerinden daha iyi bir çözüm üretirse, o taşımaya izin verilir.

Şüphesiz yukarıda açıklanan aspirasyon ölçütlerinin çok değişik formları oluşturulabilir. Ayrıca,  $(i,j)$  gibi bir taşımayı gösteren özelliğe olduğu gibi,  $i$  ve  $j$  işlemlerine tek tek aspirasyon uygulayan yöntemler de geliştirilebilir.

## 5.7 Seçkin Adaylar Listesi Taktikleri

Geleneksel tabu arama, herhangi bir iyileştirmenin olmadığı iterasyon sayısı veya toplam iterasyon sayısı belli bir düzeye ulaştığında genellikle durdurulur. Bazı aday listesi taktikleriyle bir iyi çözümler listesi oluşturulup, geleneksel tabu arama biter bitmez bu aday listesinde tutulan bir çözümden tekrar başlatılarak arama ilerletilebilir.

0Mevcut bir komşuluktaki her mümkün taşımayı değerlendirmeye çalışmaktan ziyade, etkinliğe aday taşımaları ayırt edecek zeki yordamlar kullanılmasıyla etkinlik ve kalite büyük oranda etkilenebilir. Bu durum büyük veya incelenmesi uzun sürecek bir komşuluk söz konusu olduğunda özellikle geçerlidir. Bu yüzden, aday listesi kullanmada dikkatli bir düzenlemenin, önceki iterasyon değerlendirmelerini saklayacağı ve onları etkinlikle güncelleyeceği için, toplam çabayı azaltması mümkündür.

*Seçkin-adaylar listesi* taktiği, oluşturulan master listeye kafi derecede sadece yüksek nitelikli elemanların yerleştirilmesine izin verecek bir taktiktir. Burada koşum müddetince tabu listesi gibi bir de en iyi çözümler listesi oluşturulup taşımalar esnasında o ana kadarki en iyi çözümü iyileştiren bir çözümle karşılaşıldığında o hemen en iyi çözümler listesine kaydedilir. Sonra geleneksel tabu arama biter bitmez, en iyi çözümler listesine en son giren çözüme geri dönüp geleneksel tabu aramayı tekrar başlatır. Eğer yeni bir en iyi çözüm ile karşılaşırsa, bu liste güncellenir. İşlem en iyi çözümler listesi boşalincaya kadar devam eder.

## 5.8 Yoğunlaşma ve Genişletme Taktikleri

Yoğunlaşma ve genişletme taktikleri çözüm uzayının ümit vaadeden bölgelerinin daha yoğun araştırılmasını ve çözüm uzayındaki aramanın olabildiğince yayılmasını sağlamaya çalışma çabalarıdır. Bu taktikler aşağıda açıklanmaya çalışılmaktadır.

### 5.8.1 Yoğunlaşma taktikleri

Yoğunlaşma taktikleri arama uzayının iyi bir bölgesini keşfederek oraya yoğunlaşmayı sağlayan yordamlardır. Yoğunlaşma taktikleri seçkin çözümleri ya da bu çözümlerin belli özelliklerini bir listeye kaydetme ve daha sonra onları kullanmaya dayanır. Onlar

çekici bölgeleri daha yoğun araştırmak üzere oralara geri dönebilir. Bazı yoğunlaşma taktikleri aşağıda açıklanmaktadır.

Birinci yaklaşım, istenen düzeyde birbirlerinden farklı çözümlerin kaydedilmesini sağlamak için bir genişletme ölçüsü yürürlüğe koyar ve sonra listeye kaydedilen çözümlerin en iyisinden tekrar başlamadan önce kısa-dönem hafızayı tamamen boşaltır. Burada kullanılan genişletme ölçüsü bir çözümden diğerine değiştirilmesi gereken taşıma sayısına ilişkin bir şey olabilir. Veya, bu ölçü karşılaştırılan iki çizelgede farklı pozisyonda olan iş sayısı olabilir. Anlaşılacağı üzere yoğunlaşma ve genişletme taktikleri genellikle beraber çalışmaktadır (Glover ve Laguna 1997).

İkinci yaklaşım, sınırlı uzunluktaki sıralı bir listeye daha iyi çözümler bulunduğunda ekleme yapılarak bir seçkin çözümler listesi oluşturma yaklaşımıdır. Bu listeye eklenen mevcut son üye daima aramayı yeniden başlatmak üzere seçilir. Ancak bu seçilen çözüme ait kısa-dönem hafıza da saklanır ve yeni bir çözüm yolu açılın diye bu çözümden hemen önce yapılan taşıma da yasaklanır. Eğer eski tabu hafıza değerleri saklanmıyorsa, olasılıklı bir seçim tasarlanması gerekir (Glover ve Laguna 1997).

Seçkin çözümlerle yeniden başlamada, liste hacmi sınırlıdır ve kabaca arama boyunca yapılacağı öngörülmüş ele alınacak çözüm sayısı ile alakalıdır. Listedeki bir seçkin çözüm ele alındığında, o çözüm listeden silinir, böylece yeni ortaya çıkabilecek seçkin çözümlerin kaydedilmesi için yer açılmış olur. Eğer liste doluysa, yeni seçkin çözümün kaydedilebilmesi için genellikle listede mevcut en kötü çözüm listeden düşürülür. Ancak yeni seçkin çözüm listedeki mevcut çözümlerden birisine çok fazla benziyorsa (ki, bu çözümler arasındaki mesafe ölçülerek belirlenebilir), listedeki mevcut en kötü çözümü düşürmek yerine kaydedilecek çözümü belirlemek için yeni çözüm ile mevcut en kötü çözümün benzer parçaları doğrudan kıyaslanabilir. Yeniden başlatmak için listedeki en iyi çözümü almak kullanılan en yaygın taktiktir, ama bazen tersi de mümkündür (Glover ve Laguna 1997).

Üçüncü yaklaşım, aramayı daha önce üretilen çözümlerin ziyaret edilmemiş komşularından yeniden başlatmaya ilişkindir. Böyle bir taktik, bir seçkin küme oluşturmak için bu komşuların niteliklerini izler ve belli tipteki çözümleri sınırlandırır (Glover ve Laguna 1997).



Dördüncü yaklaşım, bir çözümün diğer parçaları üzerine odaklanmaya izin veren bir arama şekli üretmek amacıyla bazı kısıtlar uygulanır. Bu kısıtlar en iyi çözümdeki bazı işleri onların en iyi pozisyonlarına kilitleyerek serbest (kalan) işler üzerine arama yapma şeklinde olabilir (Glover ve Laguna 1997).

### 5.8.2 Genişletme taktikleri

Soyut açıdan, rastgelelik ve genişletmeyi aynı görmek yanlış olmaz. Bu yüzden GA, BT ve GRASP gibi teknikler uygun bir genişletme etkisi sağlama için rastgeleliği kullanır. Ancak bununla beraber, rastgelelik bir kümenin elemanları arasında bir dereceye kadar farklılık yaratabileceğinden ve belli bir derecede farklılık kurmak etkin bir arama taktiğiyle bağlantılı olduğundan, rastgeleliğin yaygın kullanımı o kadar da uygun değildir. Yine de, eğer rastgelelik bir yeniden başlatma düzeneğinin parçası olarak kullanılacaksa, frekans bilgisi inşaa yordamını etkileyecek yaklaşık olasılık dağılımları için kullanılabilir. Bu tarz bir kullanımda rastgelelik “kör” bir düzenek değildir ve arama hikayesi tarafından yönlendirilebilir (Glover ve Laguna 1997).

Genişletme işlemi gelişigüzel rastgelelikten ziyade, amaçlı bir hafıza ve taktikler harmanı kullanmaya dayanır. Genişletme taktiklerinin bazıları için esas amaç arama işlemlerinin kör döngüye girmesini önlemek, diğer bazıları için ise arama işlemine güç ve kuvvet katmaktır. Hem yenilik hem de frekans-tabanlı hafıza genişletmeyle alakalıdır. Çünkü bu unsurlar aramanın yönlendirilmesinde ikincil kısıt yöntemlerini teşkil ederler.

TA'de genişletme etkisi bir dereceye kadar kısa-dönem hafıza ile sağlanır, ama bu özellikle belli uzun-dönem hafıza yöntemleriyle güçlendirilir. TA genişletme taktikleri genellikle nadiren ele alınan çözüm özelliklerini ortaya çıkarmak için seçim kurallarını değiştirmeye dayanır. Alternatif bir yaklaşım ise, aramanın durduğu yerde yeniden başlatmak veya aramayı devam ettirmek için periyodik olarak bazı yöntemlerle elde edilen bazı özellikleri aday çözümler içerisine katmaya çalışmak şeklindedir.

*Seçim kurallarını değiştirme* basit ve tabii bir genişletme yaklaşımıdır. Bu yaklaşım, genelde karşılaşılan çözümlere zıt olarak, seçkin-olmayan çözümlerde yer alan özelliklerin frekansının izini tutmak ve sonra biraz yüksek frekanslı özelliklerin yeni çözümlerde yer almasını periyodik olarak cezalandırmak şeklinde ifade edilebilir. Seçkin

olmayan çözümlerin dikkate alınmasının nedeni, bir yoğunlaşma taktiğiyle teşvik edilebilecek özellikleri cezalandırmaktan kaçınmak içindir (Glover ve Laguna 1997).

Tabii olarak, eğer bir eleman üretilen bir çözümde hiç ya da nadiren yer almışsa ve geçmişte seçilmeye çok yaklaşmış ama seçilme derecesini yakalayamamışsa, bir genişletme yaklaşımı bu elemanın derecesini yükseltmelidir. Böyle bir durum gözlemleyip bir yoğunlaşma taktiğine bağlı olarak işletilebilir. Bu belli bir dönem için iyileştirmeyen taşımalara ceza uygulayarak sağlanabilir. TA'de yaygın olarak kullanılan bir ceza fonksiyonu şöyledir:  $Yenitaşımadeğeri = Taşımadeğeri + d * Ceza$ . Burada  $Ceza$  değeri genellikle frekans ölçülerinin bir fonksiyonudur ve  $d$  ise ayarlanabilir bir genişletme parametresidir.  $d$ 'nin büyük değerler alması daha fazla genişletme isteğini yansıtır (yani, daha sıkça değişen düğümlere daha ağır cezalar uygulanır ki, diğer düğümleri içeren taşımalar teşvik edilmiş olsun).  $d$  parametresinin ayarlanması olurluluk sınırı etrafında taktikli bir salınım sağlayacak şekilde yapılabilir. Aynı zamanda, bu parametre olasılıklı TA sürümünde rastgelelik miktarını kontrol için de kullanılabilir.

### 5.8.3 Yoğunlaşma ve genişletme taktiklerinin beraber kullanılması

Yoğunlaşma ve genişletme taktikleri TA'nın hayli önemli iki bileşenidir. Yoğunlaşma taktikleri seçkin çözümleri kaydederek, tam olarak araştırmak için o çekici bölgelere geri dönülmesini sağlarlar. Diğer taraftan, genişletme taktikleri ziyaret edilmemiş bölgeleri incelemek ve daha önceki görüntülerinden farklı çözümler üretmek için arama işlemini cesaretlendirir. Bu, Glover ve Laguna (1997)'ya göre, ceza veya dürtü fonksiyonları kullanılarak yapılır.

Genişletme ve yoğunlaşma taktiklerini beraber kullanmak önemlidir. Sadece genişletme taktiklerini kullanmak uzun-dönem taktikler için uygun olabilir, ama orta dönem taktiklerde eğer yoğunlaşma taktikleriyle sağlanan bilgi de dikkate alınırsa genişletme genellikle çok etkin olur. Aslında, tek başına yoğunlaşma bazen bir genişletmeye de neden olabilir, çünkü bir uzayın bir bölümü üzerinde yoğunlaşma onun kalanında daha geniş bir aramaya izin verebilir.

Genişletme etkisi sağlamaya çalışırken mevcut değerlendirmeler gözardı edilmemelidir. Diğer taraftan, genişletme işlemi birbiriyle çatışan elemanları bir araya

getirebilir ve böylece iyileşmiş çözümleri bulmayı kolaylaştırmaktan ziyade zorlaştırabilir. Sonuç olarak, genişletme sınırlı sayıda adım için planlanmalıdır. Kısaca genişletmenin seviyesi iyi ayarlanmalıdır.

Etkin bir arama yöntemi için yoğunlaşma ve genişletmenin faydalı bir harmanı yapılmalıdır. Bunun önemli birkaç yolu taktikli salınım, dağıtık arama ve bağlı arama olabilir. Özellikle taktikli salınım ile bağlı arama yoğunlaşma ve genişletme taktikleri geliştirmek için tabii bir temel oluşturur.

### 5.9 Durdurma Ölçütü

Basit bir durdurma ölçütü, yapılan taşıma sayısını tutan bir sayaca bağlı olarak oluşturulabilir. Mesela, yapılan taşıma sayısı belli bir üst sınıra ulaşması bir durdurma ölçütü olarak kullanılabilir. Bir diğeri, önceden belirlenmiş sayıda taşıma yapılmasına rağmen, amaç fonksiyonunda küresel bir iyileşme olmamışsa yine bu bir durdurma ölçütü olarak kullanılabilir.

Yapılan toplam taşıma sayısını veya iyileştirmeyen taşıma tutan bir sayaç yanında daha başka unsurlar kullanılarak daha girift bir durdurma ölçütü oluşturulabilir. Mesela, seçkin çözümler listesinin boşalması gibi. Bunun yanında komşu üretilmemesi, taşınacak çözümün olursuz olması (kısır döngüye girmesi) gibi, alt sınır (optimal) çözüme ulaşılması gibi unsurlar da bir durdurma ölçütünün parçaları olabilir.

### 5.10 Tahmin Teknikleri

Tahmin teknikleri esas itibariyle, hesaplanması güç veya aşırı zaman gerektiren amaç fonksiyonu değerinin tahmininden ibarettir. Bunun bir algoritmanın etkinliğinde payı çok önemlidir. Şöyleki, TA felsefesine göre bütün komşuların değerlendirilmesi gerektiğinden, herbir komşu için amaç fonksiyonu değerini hesaplamak zaruridir. Üstelik yapılacak olan taşımaların ekserisinin iyileştirmeyen taşımalar olacağı da muhakkaktır. Bunlar yanında, eğer amaç fonksiyonu tam değeri hesaplanmak istenirse pekçok ara değer hesaplanması sözkonusu olacaktır. Neticede komşu çözümler yarıştırdığından ve sadece nisbi olarak en iyisinin bulunması önemli olduğundan dolayı, bu ara unsurlardan sadece taşıma anında değişenleri hesaplayıp bunlara bağlı olarak amaç fonksiyonu değerini tahmin etmek algoritmayı çok hızlandıracaktır. Bu da

daha az sürede daha fazla taşıma gerçekleştirilmesini mümkün kılacaktır.

Çizelgelemede iyileştirilen amaç fonksiyonu genellikle iş tamamlanma zamanının bir fonksiyonu olduğundan dolayı -mesela en büyük tamamlanma zamanı gibi- bu amaç değerini hesaplamak için öncelikle bütün işlemlerin en erken başlama zamanlarını bulmak gerekiyor. İşte mevcut tahmin teknikleri genellikle bütün işlemleri değilde, sadece taşımadan etkilenen işlemlerin en erken başlama zamanlarına göre en büyük tamamlanma zamanını tahmin ederek değerlendirme yapılmasını amaçlamaktadır. Buna ilişkin bazı tahmin teknikleri aşağıda açıklanmaktadır.

Brucker (1995) tekniği:  $B(S, S')$ ,  $S$  'den  $S'$  'ne taşınırken ters çevrilen bütün  $j$  işlemleri kümesi olsun.  $r_j$ ,  $S$  'deki ve  $r'_j$   $S'$  'deki en erken başlama zamanı olsun,  $q_j$   $S$  'deki ve  $q'_j$   $S'$  'deki en geç tamamlanma zamanı olsun. Buna göre  $Cmax(S')$  'nin bir tahmini

$$estim(S, S') = \max\{r'_j + p_j + q'_j \mid j \in B(S, S')\} \text{ 'dir.}$$

Bu tahmin  $Cmax(S')$  için bir alt sınırdır. Burada  $r'_j$  ve  $q'_j$  değerleri  $r_j$  ve  $q_j$  değerlerinden kolayca hesaplanabilir (Brucker, 1995).

Tailard (1994) tekniği: Eğer  $i-j$  ters çevriliyorsa yeni en erken başlama ve en geç tamamlanma zamanı değerleri aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$r'_j = \max\{r_{MP(i)} + P_{MP(i)}, r_{JP(j)} + P_{JP(j)}\},$$

$$r'_i = \max\{r'_j + p_j, r_{JP(i)} + P_{JP(i)}\},$$

$$q'_j = \max\{q_{MS(j)} + P_{MS(j)}, q_{JS(i)} + P_{JS(i)}\},$$

$$q'_i = \max\{q'_j + p_j, q_{JS(j)} + P_{JS(j)}\},$$

$$Cmax(S') = \max\{r'_i + p_i + q'_i, r'_j + p_j + q'_j\}.$$

Eilkelter ve diğerleri (97)'ye göre  $Cmax(S)$   $Cmax(S')$  'ya eşit ya da daha büyük ise  $Cmax(S')$  bu taşımanın tam değeridir. Bu tahmin olmaktan çok, asıl değer olur. Aksi halde bu  $S'$  çözümü için sadece bir alt sınır değeri olur.

### 5.11 Tabu Aramanın Karakteristik Özellikleri

Tabu arama hafızasında araştırmannın geçmişini tutarak aramayı kısıtlayan ve yerel minimuma düşmeyi önleyen küresel bir adım-adım en iyileme tekniğidir. O daha önce ele alınan çözümlerin tekrar ele alınmasını önleyici bir arama işlemi amaçlar. Bunu yapmak için kısa-sürelî, yenilenebilir bir hafıza fonksiyonu oluşturur ve sadece en son taşımaları yasaklayarak, belli sayıda iterasyondan sonra stratejik bir unutma fonksiyonunu mümkün kılar. Bununla beraber, bir taşımanın yasak olma durumu mutlak değildir. Eğer yasak bir taşıma belli bir kalite düzeyini gerçekleştirirse seçilmesine izin verilir (Jain, 1998). TA tekniği tüm bunları yaparken zekice problem çözme presiplerini ortaya çıkarmaya çalışır. Dolayısıyla TA'nın YZ ve optimizasyon alanlarını birleştiren kavramlara dayandığı da söylenebilir. O halde *TA zeki problem çözme yöntemi* olarak görülebilir.

Diğer yandan TA'yı zeki olarak nitelenek için problem çözümünün yenilenebilir (uyarlamalı) hafızayı içermesi yanında, işaretli (responsive) keşfetmeyi içermesi gerekir. Uyarlamalı hafıza unsuru çözüm uzayını ekonomik ve etkin olarak arama yeteneği olan yordamların işletilmesine izin verir ve özelliğe-dayalı bir yoğunlaşma içermektedir. İşaretli keşif unsuru ise kötü olsa bile belli bir taktik seçimin, iyi bir rastgele seçimden daha fazla bilgi üretebileceğini varsayar. İşaretli keşif yeni çekici bölgeler keşfedilirken iyi çözüm niteliklerini açığa çıkardığından dolayı, zeki aramanın temel presiplerini bütünleştirir. Bu yüzden *TA hem uyarlamalı hafıza hem de işaretli keşif düzeneklerinin avantajlarını alır* (Glover ve Laguna, 1997).

Bütün çizelgeleme problemleri kesikli optimizasyon (discrete optimisation) problemleridir. Burada karşılaşılan en büyük sorun çözümün bir yerel minimuma yakalanmasıdır. Bazı arama yordamları rastgele-tabanlı komşu seçimi yaklaşımlarıyla yerel optimumdan kaçınabilir. Ancak bu defa da daha önce incelenmiş çözümleri tekrar tekrar inceleme ve aramanın yerel optimum civarında salınma girmesi ihtimali ortaya çıkabilir. Bu da aşırı zaman kaybettirir. Halbuki TA bu tür olumsuzlukları ortadan kaldıracak araçlara sahiptir. Bu yüzden *TA kesikli optimizasyon problemlerinin çözümü için yararlı araçlardır* (Brucker, 1995).

TA kompleksliğin üstesinden gelecek ekipmanlarla techiz edilmiştir. Bu yüzden TA çeşitli uygulama problemlerini çözme yeteneklerimizi önemli ölçüde değiştirmiştir.

TA yerel optimalliğin ötesindeki çözüm uzayını keşfetmek için yerel bulgusal arama yordamlarına kılavuzluk eder. Bu yüzden *TA kılavuz-bulgusal bir arama tekniğidir* (Glover ve Laguna, 1997).

TA'nın amacı sadece basit ama yoğun hesap gerektiren işler ya da soyut konular üzerine yoğunlaşmak değil. Daha ziyade *TA'nın amacı problem çözümünde hazır bilgi ve sezi kullanmaktır.*

Bilginin özel bir dizilişi o anda en olası seziyi ortaya çıkarabilir. İnsanlar sıralı bilgi işlemenin sınırlandırılmasını sağlamak için yargılarını kullanır. En iyi çözüm için, *TA arama boyunca depolanan bilgiyi işleyecek stratejilerle birlikte bir hafıza fonksiyonu olarak yargıları işler* (Laguna ve Glover, 1996).

TA yaklaşımı makul sürede genelde iyi çizelgeler üretebilir. Ancak diğer zeki arama tekniklerinin çoğu gibi, *TA'nin de herbir problem için dikkatlice ayarlanması gereken çok sayıda parametresi vardır.* TA'nın dezavatajı, eğer başlangıç çözümü optimum çözümün var olduğu bölgeden uzakta ise makul sürede küresel optimuma ulaşmanın zor olabileceğidir (Karaboğa ve Kalınlı 1997).

## BÖLÜM 6. UZMAN-TABU ÇİZELGELEME MODELİ

Amaçlanan çizelgeleme sisteminde, ilk safhada olurlu ve iyi bir başlangıç çizelgesi elde edilmesi için Uzman Çizelgeleme Modülü kullanılır. İkinci safhada ise bu başlangıç çizelgesi Tabu Arama Modülü ile iyileştirilir. Bütünleşik olarak çalışan bu iki modülün yapısı bu bölümde açıklanmaktadır.

### 6.1 Kullanılan Yazılım

Uzman-tabu çizelgeleme sistemini geliştirmek için Pascal ortamı seçilmiştir. Çünkü, Wright ve diğerleri (1986)'a göre, Pascal'ın büyük programların yapısını basitleştirmesi, öz ve hızlı yazma ve diğer ortamlara kolay dönüşür olması gibi özellikleri vardır. Bunun yanında, Meester (1993)'e göre, IBM Expert Shell ve Delfi II gibi yazılım paketleri ile yerel planlama sistemleri arasında bağlantı kurmak çok zordur, oysa Pascal ile bu daha kolaydır. Bu yüzden uzman sistem geliştirmelerinde Pascal ortamının kullanılması yararlı olabilir.

Tabu arama algoritmasının adımlarının modüler bir yapı oluşturması nedeniyle, yordamlı bir geliştirme ortamı kullanılması avantaj sağlayabilir. Bunun yanında, TA'da problem hacmiyle orantılı olarak, çok sayıda değişkene; dolayısıyla fazla hafızaya ihtiyaç duyulmaktadır. Pascal'ın dinamik veri yapısı özelliği olması büyük bir avantajdır. Ayrıca, özellikle TA çizelge kısır döngü kontrolünde kullanılmak üzere özyinelemeli (iteratif) yordamlar oluşturmaya ihtiyaç duyulmaktadır. Pascal bu ihtiyaca cevap verebilmektedir.

Pascal'ın çok önemli avantajları yanında, grafik-tabanlı olmaması gibi bazı eksiklikleri de mevcuttur. Fakat bütünüyle değerlendirildiğinde, yapay zeka uygulamaları geliştirmek için Pascal ortamının seçilmesinin yanlış olacağı düşünülmemektedir.

## 6.2 Uzman Çizelgeleme Modülünün Yapısı

Başlangıç çizelgesi oluşturmak için esas olarak bir *gecikmesiz* çizelge üretici tasarlanmıştır. Bu çizelge üreticindeki temel düşünce, teknolojik kısıt sağlanmak üzere, bir işlem tezgahda tamamlanır tamamlanmaz tezgah kuyruğunda bekleyen başka bir işlem varsa derhal onun işlenmesi için çizelgeye eklenmesi şeklindedir. Eğer tezgah kuyruğunda birden fazla işlem varsa, bir sonraki işlemu belirlemek için uzman sistem harekete geçirilir. Bu bütün işlemler çizelgeleninceye kadar tekrarlanır.

Gecikmesiz çizelge üreticinin yalancı-program kodu aşağıda Şekil 6.1'deki gibidir. Buna göre, VERİ\_GİR yordamı çizelgeleme ortamına verileri yükler. Bunlar iş ve tezgah sayısı, tezgah kapasiteleri, iş ve tezgah hazır zamanları, işlem rotası, işlem süresi, iş teslim tarihleri gibi verilerdir.

TEZGAH\_BUL işleme hazır olan bir tezgahı tesbit eder. Eğer bir tezgahın hazır zamanı benzetim zamanından küçük veya eşit ise o tezgah işleme hazırdır denir.

İŞ\_BUL yordamı hazır olan belli bir tezgahda işlenebilecek işlerden hazır olanları tesbit eder ve onları geçici tezgah kuyruğuna yerleştirir.

**Program Gecikmesiz\_Başlangıç\_Çizelgesi\_modülü:**

**Begin**

```

verileri_yükle; {VERİ_GİR yordamı}
AYO_ve_SF_değerlerini_hesapla; {US_GİR yordamı}
while biten_ış_sayısı <> toplam_ış_sayısı do
begin
işleme_hazır_tezgah_bul; {TEZGAH_BUL yordamı}
işleme_hazır_ış_bul; {İŞ_BUL yordamı}
if hazır_ış_sayısı = 1 then
işlemi_kısmi_çizelgeye_ekle {ÇİZEL_EKLE yordamı} else
if hazır_ış_sayısı > 1 then
uzman_sistem_yardımla_ışlemleri_önceliklendir; {SIRALA yordamı}
zamanı_bir_sonraki_olay_zamanına_ilerlet; {ZAMAN_BUL yordamı}
biten_ış_varmı?_bul; {BİTEN_İŞ_BUL yordamı}
end;
başarı_ölçütlerini_hesapla; {BAŞARI_ÖLÇ yordamı}
End;
```

Şekil 6.1 Gecikmesiz çizelge üreticinin yalancı-program kodu



US\_GİR yordamı uzman sistemin gerçeklerini teşkil eden atölye\_yük\_oranı (AYO) ve atölye\_iş\_serbestlik\_faktörü (SF) değerlerini hesaplar. Düşünülen atölye yapısında iş yoğunluğunu temsil etmek üzere AYO durumu kullanılmıştır. AYO atölyeye gelen iş sayısı ile ilgilidir. Şöyleki; AYO atölyede yapılacak olan işlerin toplam işlem süresinin (yani, atölye iş yükünün) atölye kapasitesine oranıdır. Atölye kapasitesi çizelgeleme döneminde sabit kabul edildiğinde AYO gelen iş miktarıyla değişmektedir. İşlerin teslim tarihi durumunu temsil etmek üzere ise SF durumu kullanılmıştır. SF atölyedeki bütün işlerin teslim tarihi sıklığı ile ilgilidir. Şöyleki, SF ortalama iş akış serbestliğinin ortalama iş süresine oranıdır. Çizelgeleme döneminde işlerin ortalama süreç süresi sabit kabul edilirse, SF ortalama iş akış serbestliği, o da iş ortalama teslim tarihi ile değişmektedir.

SIRALA yordamı hazır olan belli bir tezgahın kuyruğunda bekleyen birden fazla hazır işlemi bir öncelik sırasına koyar. Tabii olarak bu öncelik sırasına koymada uygulanacak ölçütlere karar verme görevinde uzman bilgisi gerekmektedir. Dolayısıyla bu yordam içinde bu tür kararlar gerektiğinde mevcut sistem durumunu gösteren AYO ve SF'ye göre, kuyruktaki işlemlerin önceliğini belirlemek üzere uygulanması gereken öncelik kuralına karar veren bir uzman sistem modülü vardır. Bu uzman sistem modülü AYO ve SF'yi "gerçekler" olarak alan ve bilgi tabanındaki sorgulama neticesinde algoritma tabanından bir öncelik kuralı seçen bir fonksiyon olarak iş görür. Bu öncelik kuralı tezgah kuyruğundaki o işlemlere uygulanır, bu işlemler üretilen öncelik indeksine göre sıralanır ve birinci sıradaki işlemin çizelgeye eklenmesi için ÇİZEL\_EKLE yordamı çağrılır.

ÇİZEL\_EKLE yordamı tezgah kuyruğunda ilk sıradaki işlemi çizelgeye ekler ve ortamına ait değişen bilgileri günceller. Bunlar iş ve tezgah hazır zamanları, işin kalan işlem sayısı, işin kalan toplam işlem süresi ve tezgah yükü bilgileridir.

ZAMAN\_BUL yordamı benzetim zamanını, olay-artımlı bir yaklaşımla, hem herhangi bir tezgahın hem de o tezgahda yapılabilecek herhangi bir işlemin en erken hazır olduğu zamana iletir. Bu çizelge kurma işlemine büyük bir hız katmaktadır. Çünkü eğer olay-artımlı bir yaklaşım yerine zaman-artımlı bir yaklaşım kullanılsaydı, benzetim zamanı en küçük zaman birimiyle bir bir arttırılacaktı; dolayısıyla her zaman birimi için hazır tezgah ve onda yapılabilecek hazır bir işlemin olup olmadığı kontrol edilecekti. Bu da büyük zaman kaybına neden olacaktır.

BITEN\_İŞ\_BUL yordamı biten işlemleri tesbit eder ve bu işlemleri çizelgelenecek işler kümesinden siler.

BAŞARI\_ÖLÇ yordamı üretilen çizelgeye ait başarı ölçütü değerlerini hesaplar. Bunlar geç kalan iş sayısı oranı, ortalama pozitif gecikme, en büyük gecikme, ortalama akış süresi, ortalama tezgah boş bekleme oranı ve en büyük tamamlanma zamanıdır.

### 6.2.1 Bilgi tabanı

Uzman sistem için üç seviyeli bir hiyerarşik karar yapısı geliştirilmiştir. Bu yapının birinci kademesinde AYO ve SF değerleri çıkarımı tetikleyen “gerçekler” olarak kullanılarak atölye ve iş durumu tesbit edilmektedir. Subramanyam ve Askin (1986)’dakine benzer şekilde, üç atölye durumu aşırı\_yüklü, normal ve hafif\_yüklü olarak seçilmiştir. Çizelgelenecek işlerin teslim durumu ise kritik\_gecikmede, çokaz\_gecikmede ve normal olarak seçilmiştir. İkinci kademe mevcut atölye ve iş durumu kullanılarak uygun başarı ölçütü tesbit edilmektedir. Bunlar ortalama akış süresi minimizasyonu, en büyük tamamlanma zamanı minimizasyonu, ortalama pozitif gecikme minimizasyonu ve ortalama tezgah boş bekleme oranı minimizasyonudur. Son kademe ise tesbit edilen başarı ölçütüne uygun düşen öncelik kuralı belirlenmektedir. Bu amaçla, atölye benzetimiyle uyula kazanılan bilgilere göre oluşturulan, üç bilgi tabanında yer alan 24 kural aşağıda Şekil 6.2 (a), (b) ve (c)’de verilmiştir.

Bu başarı ölçütleri uzmanlardan kazanılmıştır. Kurallar ise esas olarak atölye benzetimi temelinde kazanılmıştır. Bunlarla ilgili veriler deney çalışması bölümünde sunulmaktadır. Uzmanlardan ve benzetimden birleştirilmiş bilgi kazanım yöntemi, Kusiak ve Chen (1988)’in de belirttiği gibi, uzman planlama ve çizelgeleme sistemleri için uygun bir yöntem olarak önerilmektedir.

Oluşturulan bilgi tabanındaki çizelgeleme kuralları hep iki basit öncelik kuralının %50 oranında birleşimi şeklindedir. Ancak bu basit öncelik kuralları birbirinden çok farklı nitelikte indeks değerleri üretmektedir. Bu birleşime herbir basit öncelik kuralının etkisinin eşit olmasını sağlamak için şöyle bir yol izlenmiştir: Önce birinci basit öncelik kuralına göre öncelik indeksi hesaplanır, indeks değerlerinin herbiri en büyük olanına oranlanıp, bunların 0,50’leri ayrı bir indekste tutulur. Sonra ikinci basit öncelik

kuralının öncelik indekleri hesaplanır ve aynı şekilde herbir indeks değeri en büyük olanına oranlanarak %50'leri bulunup, önceki tutulan indekse eklenir. Böylece birbirlerinden çok farklı indeks değerleri üreten basit öncelik kuralları doğrultularak bir pota içerisinde beraberce kullanılabilmesi sağlanmıştır.

Kural.1 if  $AYO > 0,90$  then atölye\_yükü = aşırı\_yüklü  
 Kural.2 if  $(AYO \leq 0,90)$  and  $(AYO > 0,70)$  then atölye\_yükü = normal\_yüklü  
 Kural.3 if  $AYO \leq 0,70$  then atölye\_yükü = hafif\_yüklü  
 Kural.4 if  $SF \leq 2$  then iş\_teslimi = kritik\_gecikmede  
 Kural.5 if  $(SF > 2)$  and  $(SF \leq 4)$  then iş\_teslimi = çokaz\_gecikmede  
 Kural.6 if  $SF \geq 4$  then iş\_teslimi = normal

Şekil 6.2a Bilgi tabanı: Atölye ve iş durumu tesbit kuralları

Kural.7 if  $(atölye_yükü = aşırı_yüklü)$  and  $(iş_teslimi = kritik_gecikmede)$  then başarı\_ölçütü = ortalama\_akış\_suresi  
 Kural.8 if  $(atölye_yükü = normal_yüklü)$  and  $(iş_teslimi = kritik_gecikmede)$  then başarı\_ölçütü = ortalama\_pozitif\_gecikme\_1  
 Kural.9 if  $(atölye_yükü = hafif_yüklü)$  and  $(iş_teslimi = kritik_gecikmede)$  then başarı\_ölçütü = ortalama\_pozitif\_gecikme\_2  
 Kural.10 if  $(atölye_yükü = aşırı_yüklü)$  and  $(iş_teslimi = çokaz_gecikmede)$  then başarı\_ölçütü = ortalama\_akış\_suresi  
 Kural.11 if  $(atölye_yükü = normal_yüklü)$  and  $(iş_teslimi = çokaz_gecikmede)$  then başarı\_ölçütü = maks\_tamamlanma\_zamanı\_1  
 Kural.12 if  $(atölye_yükü = hafif_yüklü)$  and  $(iş_teslimi = çokaz_gecikmede)$  then başarı\_ölçütü = maks\_tamamlanma\_zamanı\_2  
 Kural.13 if  $(atölye_yükü = aşırı_yüklü)$  and  $(iş_teslimi = normal)$  then başarı\_ölçütü = maks\_tamamlanma\_zamanı\_3  
 Kural.14 if  $(atölye_yükü = normal_yüklü)$  and  $(iş_teslimi = normal)$  then başarı\_ölçütü = maks\_tamamlanma\_zamanı\_4  
 Kural.15 if  $(atölye_yükü = hafif_yüklü)$  and  $(iş_teslimi = normal)$  then başarı\_ölçütü = ortalama\_tezgah\_beklemesi

Şekil 6.2b Bilgi tabanı: Başarı ölçütü tesbit kuralları

Kural.16 if başarı\_ölçütü = ortalama\_akış\_suresi\_1 then öncelik\_kuralı = spt\_lwkr  
 Kural.17 if başarı\_ölçütü = ortalama\_pozitif\_gecikme\_1 then öncelik\_kuralı = spt\_lwkr  
 Kural.18 if başarı\_ölçütü = ortalama\_pozitif\_gecikme\_2 then öncelik\_kuralı = spt\_edd  
 Kural.19 if başarı\_ölçütü = ortalama\_akış\_suresi\_2 then öncelik\_kuralı = spt\_lwkr  
 Kural.20 if başarı\_ölçütü = maks\_tamamlanma\_zamanı\_1 then öncelik\_kuralı = mwkr\_spro  
 Kural.21 if başarı\_ölçütü = maks\_tamamlanma\_zamanı\_2 then öncelik\_kuralı = spt\_mwkr  
 Kural.22 if başarı\_ölçütü = maks\_tamamlanma\_zamanı\_3 then öncelik\_kuralı = spt\_mprn  
 Kural.23 if başarı\_ölçütü = maks\_tamamlanma\_zamanı\_1 then öncelik\_kuralı = spt\_sprw  
 Kural.24 if başarı\_ölçütü = ortalama\_tezgah\_beklemesi then öncelik\_kuralı = spt\_mprn

Şekil 6.2c Bilgi tabanı: Çizelgeleme kuralları

### 6.2.2 Algoritma tabanı

SPT kuralında en yüksek öncelik en kısa süreç zamanlı bekleyen işe verilir. SPT kuralı iyi bir sevketme yöntemi olarak bilinmesine rağmen o değişen atölye yükü, tezgah yükü ve iş durumu altındaki çizelgeleme ortamını asla dikkate almaz. O acil olsun olmasın kısa işlerin ilerlemesini hızlandırır ve onları teslim tarihinden önce tamamlar. Aynı zamanda acil olsa bile uzun işleri de genellikle teslim tarihinden sonra tamamlar. Bu hatalı kaynak tahsisine yol açabilir. Formülü şöyledir:  $SPT = p_i$ .

EDD kuralı teslim tarihi en erken olan işe en yüksek önceliği verir. Bu yüzden acil olmayan işler geç tamamlanır; bu en büyük tamamlanma zamanının ve tezgah kullanım oranının aşırı kötüleşmesine neden olabilir. Formülü şöyledir:  $EDD = d_i$ .

MST kuralı en yüksek önceliği endüşük aylak zamanlı bekleyen işe verir. Yani, teslim tarihi ve eğer gecikme var ise işlemin tamamlandığı zaman arasındaki fark aylak zamandır. Formülü şöyledir:  $MST = d_i - rk_i - t$ . Burada  $rk_i$   $i$  işleminin bağlı iş miktarıdır; yani,  $i$  işleminden sonra o işe ait yapılacak işlemlerin toplam işlem zamanıdır.  $t$  ise benzetim zamanını göstermektedir.

Fazla mesai maliyeti (COVERT) kuralı en yüksek önceliği beklenen işlem gecikmesinin (gecikme cezası için bir gösterge) işlem zamanına oranı enyüksek olan bekleyen işleme verir. Formülü aşağıdaki gibidir. Burada  $k$  sabiti enkötü durum için beklenen bekleme zamanını ayarlama katsayısıdır.  $b$  termin süresi tahmin parametresidir; ki iki işlem arasında bekleme zamanını hesaba katar.

$$COVERT = - \left( \left( \frac{(1 - d_i - rk_i - t)^+}{k \cdot b \cdot rk_i} \right) / p_i \right)^+$$

Görünen gecikme maliyeti (ATC) kuralı aylak zamanın üstel bir fonksiyonu beklenen işlem gecikmesinin tahmini için kullanılması hariç COVERT'e benzer. Formülü şöyledir:

$$ATC = -\exp[-\{d_i - b(rk_i - p_i) - p_i - t\}^+ / kp_i]$$

Burada  $kp$  ortalama işlem süresidir.

Değiştirilmiş işlem teslim tarihi (MOD) kuralı en yüksek önceliği endüyük işlem teslim tarihli bekleyen işe verir. İşlem teslim tarihi işlem içermeyen her bir siparişe değil, onun bağı işini dikkate alan her işleme verilir. Formülü şöyledir:

$$MOD = \max\{d_i - b(rk_i - p_i), t + rk_i\}.$$

Bağı işlem sayısı (SPRO) kuralı en yüksek önceliği kalan işlemlerin aylak zamanın bağı işlem sayısına (ardıl işlemlerin sayısı) oranı enyüksek olan bekleyen işleme verir. Formülü şöyledir:  $SPRO = (d_i - rk_i - t) / rpi$ . Burada  $rpi$ ,  $i$ 'nin bağı işlem sayısıdır; yani,  $i$  işleminden sonra o işe ait yapılacak işlem sayısıdır.

Bağı iş miktarı (SPRW) kuralı en yüksek önceliği kalan işlemlerin aylak zamanın bağı iş miktarına oranı enyüksek olan bekleyen işe verir. Formülü şöyledir:

$$SPRW = (d_i - rk_i - t) / rk_i .$$

En çok kalan bağı iş miktarı (MWKR) kuralı en yüksek önceliği en çok kalan bağı iş miktarlı işe verir. Formülü şöyledir:  $MWKR = - rk_i$ .

En çok kalan bağı işlem sayısı (MPNR) kuralı en yüksek önceliği en çok kalan bağı işlem sayılı işe verir. Formülü şöyledir:  $MPNR = rpi$ .

En az toplam işlem süresi (LTWK) kuralı toplam işlem süresi en az olan işin işlemlerine en yüksek önceliği verir. Formülü şöyledir:  $LTWK = \sum p_i$ .

Değiştirilmiş teslim tarihi (MDD) kuralı en yüksek önceliği değiştirilmiş teslim tarihi endüyük olan bekleyen işe verir. Değiştirilmiş teslim tarihi ve eğer gecikme yok ise işlemin tamamlanabildiği zaman arasındaki farkın daha erken zamanıdır. Formülü şöyledir:  $MDD = \max\{d_i, t + rk_i\}$ .

En az kalan iş miktarı (LWKR) kuralı en yüksek önceliği kalan toplam işlem süresi endüyük olan bekleyen işe verir. Formülü şöyledir:  $LWKR = rk_i$ .

### 6.2.3 Sorgulama mekanizması

Sorgulama mekanizması AYO ve SF parametrelerini ve onların değerlerini çıkarımı tetikleyecek “gerçekler” olarak alıp, çıkarım neticesinde algoritma tabanından bir öncelik kuralı öneren bir fonksiyon olarak çalışır. Bu fonksiyonun yalancı-program kodu aşağıda Şekil 6.3'deki gibidir. Görüldüğü gibi, fonksiyona giren “gerçekler” kullanılarak öncelikle sistem durumu sorgulanmaktadır. Buradan çıkarılan bilgi başarı ölçütünün belirlenmesi için yeni “gerçekler” oluşturmaktadır. Başarı ölçütü de belirlendikten sonra, uygun olan öncelik kuralı fonksiyonun sonucu olarak öneriliyor.

```

Function EXPERT(If Parçası AYO değeri, If Parçası SF değeri):Önerilen Öncelik Kuralı;
Begin
    sistem_durumu_ile_ilgili_kurallari_yukle;
    atolye_yuk_durumunu_tesbit_et;
    cikarim_neticesini_yeni_yuk_kosulu_olarak_ata;
    is_teslim_durumunu_tesbit_et;
    cikarim_neticesini_yeni_teslim_kosulu_olarak_ata;
    yeni_yuk_kosulu_ve_yeni_teslim_kosulunu_birlestir;

    basari_olcutu_ile_ilgili_kurallari_yukle;
    basari_olcutunu_sec;
    cikarim_neticesini_yeni_kosul_olarak_ata;

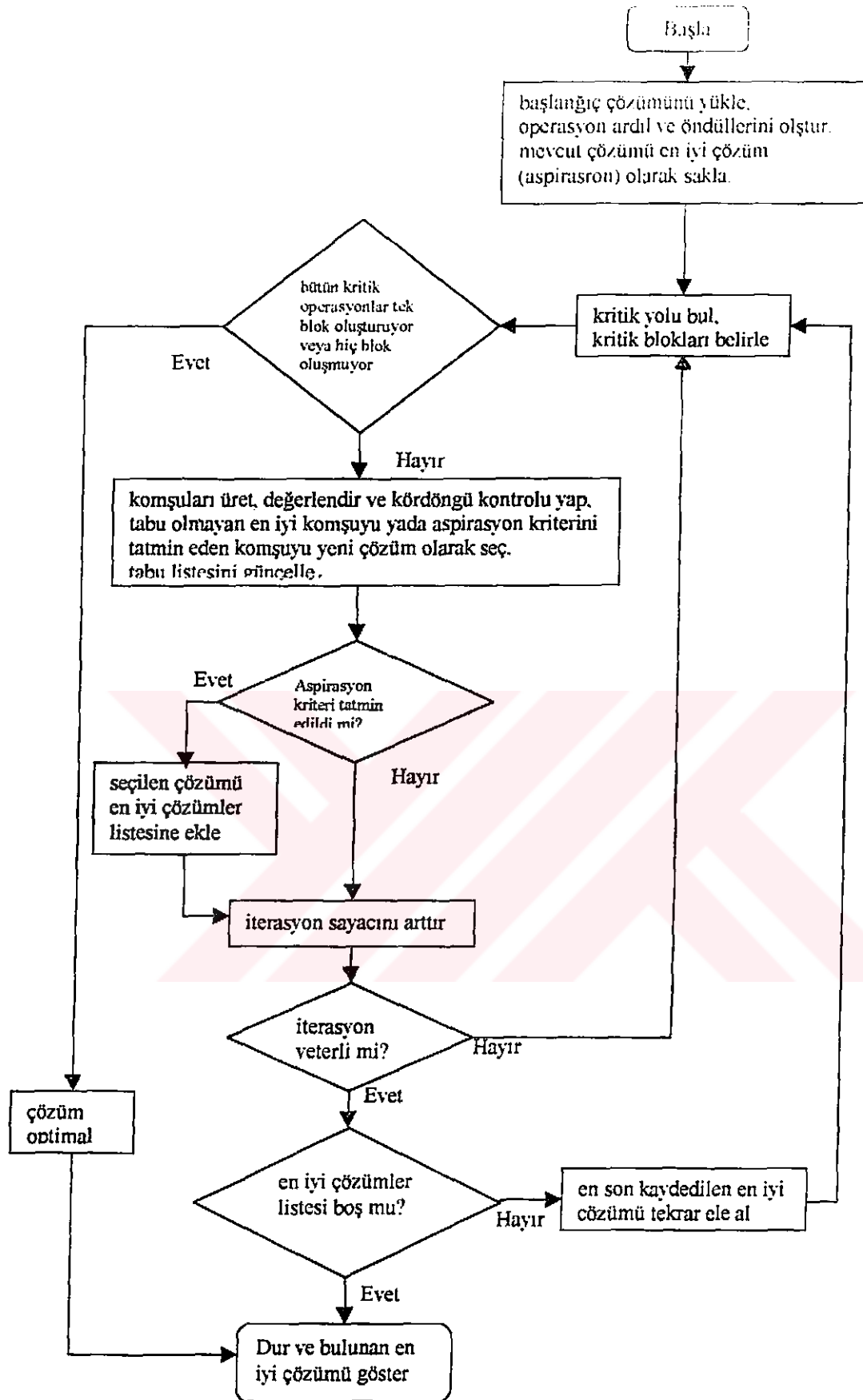
    oncelik_kurallari_ile_ilgili_kurallari_yukle;
    oncelik_kuralini_sec;
    cikarim_neticesini_fonksiyona_aktar;
End;

```

Şekil 6.3 İleri-doğru çıkarımlı sorgulama düzeneği yalancı-program kodu

### 6.3 Tabu Arama Çizelgeleme Modülü

Tabu arama çizelgeleme modülünün akış diyagramı aşağıda Şekil 6.4'deki gibidir. Görüldüğü gibi, öncelikle kullanılacak bazı parametrelerin seçilmesi gerekmektedir. Bunlar iterasyon sayısı, tabu listesi uzunluğu, seçkin çözümler listesi uzunluğu, komşuluk tipi v.b. gibidir. Sonra uzman sistem modülünün ürettiği başlangıç çözümü yüklenmektedir. Buna göre, bir sonraki adımda herbir işlemin iş ve tezgah ardılları ile iş ve tezgah öndüllerinin bulunması gelmektedir. Artık iteratif taşımaların yapılabilmesi için altyapı hazırdır. Bundan sonra, komşuların üretilip değerlendirilmesi için gerekli işlemler yapılacaktır. Bunlar kritik yolu bulma, kritik blokları bulma, komşuları üretme, geçici taşımayı gerçekleştirme, olurluluk kontrolü yapma ve eğer geçici taşımayla olurlu bir çizelge üretilmişse, o çizelgenin amaç fonksiyonu değerini hesaplamadır. Bir sonraki aşamada, komşuluk değerlendirmesi için gerekli bilgiler bütün alternatifler dikkate alınarak toplanır. Buradaki amaç, öncelikle komşuların tabu olması durumu ile aspirasyon ölçütünü sağlama durumu tesbit etmektir. Öyleki herhangi bir komşu tabu olabilir, ama bununla beraber aspirasyon ölçütünü de sağlayabilir. Veyahut bütün komşuların tabu olması durumuyla karşılaşılabılır. Bu yüzden tabu arama programı bütün bunları dikkate alarak en iyi taşımayı belirleyecektir. Taşıma belirlendikten sonra, tekrar tekrar aynı taşımaların yapılmasını önlemek için, bu taşıma tabu listesine kaydedilir. Sonra aspirasyon ölçütünün sağlanıp sağlanmadığı kontrol edilir. Eğer sağlanmış ise seçkin çözümler listesi güncellenir, bu arada yoğunlaşma ve genişletme taktikleri için gerekli değerlendirme yapılır. Neticede tabu arama modülüyle belli iterasyon sayısına ulaşıncaya kadar taşımalarla çözüm iyileştirilmeye çalışılır. Tabu arama çizelgeleme yönteminin yalancı-program kodu Şekil 6.5'de verilmiştir.



Şekil 6.4 Tabu arama yöntemi akış diyagramı



**Program Tabu\_Arama;**

**Begin**

```
iterasyon_sayısını_seç;
tabulitesi_uzunluğunu_seç; {tt}
başlangıç_çözümünü_yükle;
herbir_işlemin_iş_ve_tezgah_ardılını_bul;
herbir_işlemin_iş_ve_tezgah_öndülünü_bul;
işlem_enerken_başlama_ve_engeç_tamamlama_zamanları_bul; {ER_GEÇ yordamı}
mevcut_çözümü_aspirasyon_ölçütü_olarak_sakla;
```

**Repeat**

**Repeat**

```
kritik_yolu_bul; {KRİTİK_YOL yordamı}
kritik_blokları_bul; {BLOK yordamı}
komşuları_üret; {KOMŞU_G1 yordamı}
for i:=1 to komşu_sayısı do {bütün komşuları değerlendir}
```

**begin**

```
mevcut_çizelgenin_değişen_kisimlerini_geçici_sakla;
komşu_çizelgeye_geçici_taşın; {TAŞI yordamı}
kördöngü_kontrolü_yap; {DÖNGÜ_KONTROL yordamı}
if taşınan_çizelge=olurlu then işlem_enerken_engeç_tamamlama_zamanlarını_bul;
tabu_kontrolü_yap;
```

**if taşınan\_çizelge=tabu then**

**begin**

```
mevcut_komşuluktaki_eniyi_tabu_çizelgeyi_sakla;
mevcut_komşuluktaki_eneski_tabu_çizelgeyi_sakla;
end else mevcut_komşuluktaki_eniyi_tabu_olmayan_çizelgeyi_sakla;
geçici_saklanan_mevcut_çizelgenin_değişen_kisimlerini_geri_yükle;
```

**end;**

**if (bütün\_komşular=tabu) and (aspirasyon\_ölçütü\_tatmin\_edilmemiş) then**

mevcut\_çizelgeyi\_eneski\_tabu\_çizelgeye\_taşı else

**if eniyi\_tabu\_çizelge\_aspirasyon\_ölçütünü\_tatmin\_ediyor then**

```
mevcut_çizelgeyi_eniyi_tabu_çizelgeye_taşı else
mevcut_çizelgeyi_eniyi_tabu_olmayan_çizelgeye_taşı;
```

tabulitesini\_güncelle; {TABU\_EKLE yordamı}

**if aspirasyon\_ölçütü\_tatmin\_edildi?=-evet then**

**begin**

çizelgenin\_birönceki\_eniyi\_çözümü\_mesafesini\_bul; {MESAFE yordamı}

**if çizelgenin\_birönceki\_eniyi\_çözümü\_mesafesi < min\_mesafe then**

**begin**

```
aspirasyon_ölçütünü_güncelle;
çizelgeyi_eniyi_çözümler_listesine_ekle; {SEÇKİN_LISTESİ yordamı}
iterasyon_sayacını_sıfırla;
```

**end;**

**end;**

eniyi\_çözümü\_rastlandıktan\_tt\_iterasyon\_sonraki\_tabulitesini\_eniyi\_çözümünü\_kü diye\_sakla;

iterasyon\_sayacını\_arttır;

**until iterasyon\_sayacı=iterasyon\_sayısı;**

iterasyon\_sayacını\_sıfırla;

**if eniyi\_çözümler\_listesi=<boş then**

eniyi\_çözümler\_listesinden\_ilk\_çözümü\_tekrar\_ele\_al; {SEÇKİN\_YÜKLE yordamı}

**until eniyi\_çözümler\_listesi=boş;**

şimdiye\_kadar\_bulunan\_eniyi\_çözümü\_problemin\_olarak\_göster;

**End.**

Şekil 6.5 Tabu arama yöntemi yalancı program kodu

ER\_GEÇ yordamında kritik-yol yöntemi kullanılarak, her işlemin sırasıyla “en erken başlama” ve “en geç tamamlanma” zamanları hesaplanır. Şöyleki, öncelikle hiç bir öndülü olmayan işlemlerin hazır zamanları sıfır atanır. Sonra ileri doğru hesaplamayla, bir işlemin hazır zamanı o işlemin (eğer varsa) tezgah ve iş öndülünün en erken tamamlanma zamanlarından büyük olanına eşit olacağından hareketle bütün hazır zamanlar hesaplanır. Daha sonra tersine hesaplamayla bütün işlemler için en geç tamamlanma zamanları bulunur. Şöyleki, öncelikle hiç bir ardılı olmayan işlemlerin en geç tamamlanma zamanlarına en büyük en erken tamamlanma zamanı atanır. Sonra geriye-doğru hesaplamayla, bir işlemin en geç tamamlanma zamanı o işlemin (eğer varsa) tezgah ve iş ardullarının hazır zamanlarının küçük olanına eşit olacağından hareketle bütün operasyonlar için en geç tamamlanma zamanları hesaplanır. Bu arada, çizelge en büyük tamamlanma süresi, geç kalan işler oranı, ortalama pozitif gecikme, enbüyük pozitif gecikme, tezgah kullanım oranı ve ortalama akış süresi başarı ölçütleri de hesaplanır. Bunlardan herhangi birisi veya hepsinin doğrusal bir bileşeni amaç değer olarak atanır. Bu yordamın yalancı-program kodu Şekil 6.6'de görülmektedir.

```

Procedure ER_GEÇ;
Begin
  for i:=1 to toplam_islem_sayısı do
    if (i.islemin_is_öndülü=yok) and (i.islemin_tezgah_öndülü=yok) then
      i.islemin_hazır_zamanı:=0;
    repeat
      for i:=1 to toplam_islem_sayısı do
        begin
          if (i.islemin_bir_öndülü=var) and (öndülün_hazır_zamanı=biliniyor) then
            i.islemin_hazır_zamanı:=öndülün_hazır_zamanı + öndülün_proses_süresi;
          if (i.islemin_iki_öndülü=var) and (öndüllerin_hazır_zamanı=biliniyor) then
            i.islemin_hazır_zamanı:=min(öndüllerin_hazır_zamanı+öndüllerin_proses_süresi);
          end;
        until hazır_zamanı_hesaplanan_islem_sayısı=toplam_islem_sayısı;
        max_tamaml.zamanı:=max{hiç_ardılı_olmayan_islemlerin (hazır_zamanı+proses_süresi)};
        for i:=1 to toplam_islem_sayısı do
          if (i.islemin_is_ardılı=yok) and (i.islemin_is_ardılı_tezgah_ardılı=yok) then
            i.islemin_teslim_zamanı:=max_tamamlanma_zamanı;
          repeat
            for i:= toplam_islem_sayısı downto 1 do
              begin
                if (i.islemin_bir_ardılı=var) and (ardılın_teslim_zamanı=biliniyor) then
                  i.islemin_teslim_zamanı:=ardılın_teslim_zamanı - ardılın_proses_süresi;
                if (i.islemin_iki_ardılı=var) and (ardılların_teslim_zamanı=biliniyor) then
                  i.islemin_teslim_zamanı:=max(ardılların_teslim_zamanı-proses_süresi);
                end;
              until teslim_zamanı_hesaplanan_islem_sayısı=toplam_islem_sayısı;
            End;

```

Şekil 6.6 Kritik yol hesaplama yordamının yalancı-program kodu

KRİTİK\_YOL yordamı komşuluk düzeneklerine esas olacak kritik yolu veya yolları kritik yol yöntemi mantığıyla bulur. Bu işlem için öncelikle aylak zamanı sıfır olan işlemler bulunur ve kritik işlem olarak kaydedilir. Sonra bu kritik işlemler hazır zamanlarına göre küçükten büyüğe sıralanır ve eğer varsa alternatif rotalar tesbit edilerek kritik yollar dizi olarak kaydedilir.

BLOK yordamı kritik yol(lar) üzerindeki kritik blokları tesbit eder. Kritik *blok* kritik yol üzerindeki ardışık işlemlerden aynı tezgahda yapılacak olanların oluşturduğu kümedir. Blok kavramı etkin komşuluk düzenekleri oluşturmada son derece önemlidir. Çünkü kritik yolun (çizelge en büyük tamamlanma zamanı) tek-pasoda kısaltılabilmesi ancak bir bloğun başında ya da sonunda yapılacak bir yer değiştirmeye mümkündür.

KOMŞU\_G1 yordamı G1 komşuluğunu üretmek üzere hazırlanmıştır. G1 komşuluğu yukarıda bahsedilen etkin komşuluklardan bazı özellikler almıştır. Bu komşuluk yapısı öncelikle bir tek kritik yol üretimini esas alır. Eğer alternatif kritik yol durumu ortaya çıkarsa iş önceliği dikkate alınarak kritik yol belirlenir. Daha açıkçası, diyelimki bir  $h$  kritik işleminden hemen sonra aynı anda  $i$  ve  $j$  kritik işlemleri başlayabilecektir.  $i$  ve  $j$ 'den birisi  $h$ 'ın iş ardılı birisi tezgah ardılıdır. İşte  $h$ 'ın iş ardılı hangisi ise kritik yolun elemanı o olacaktır.

Komşuluğun başka bir özelliği ise N4 komşuluğu gibi bir blok yaklaşımına sahip olmasıdır. Ancak fark şudur: İlk bloğun sadece son iki işlemi değil, eğer ilk bloğun başlama zamanı çizelge periyodunun başlama zamanından farklı ise ve bu blok ikiden fazla işleme sahip ise bu bloğun ilk iki işlemi de yer değiştirilerek komşu üretilir. Benzer şekilde son bloğun sadece son iki işlemi değil, eğer son bloğun tamamlanma zamanı çizelge periyodunun tamamlanma zamanından farklı ise ve son blok ikiden fazla işleme sahip ise bu bloğun son iki işlemi de yer değiştirilerek komşu üretilir. Ara bloklar için işlem aynıdır, yani eğer bir ara blok ikiden fazla işleme sahip ise o bloğun hem ilk iki hem de son iki işlemi yer değiştirilerek komşu üretilir.

Komşuluğun bir diğer özelliği ise N5 komşuluğu gibi, daha komşuluk üretilirken önce aday komşu için kısır döngü kontrolünü yapılır ve kısır döngüye yol açmıyorsa bu aday esas komşu olarak kabul edilir. Bunun esası şöyledir: Eğer  $i$  ve  $j$  işlemleri yukarıda açıklanan esaslara göre yer değiştirilerek bir komşu üretilmesi sözkonusu ise, eğer  $j$  faaliyeti bloğun son sırasında ise ve  $i$ 'nin iş ardılından  $j$ 'ye herhangi bir yol yok ise  $j \rightarrow i$  nin komşu olmasına izin verilir. Eğer  $i$  faaliyeti bloğun ilk sırasında ise ve  $i$ 'den

$j$ 'nin iş öndülüne herhangi bir yol yok ise  $j \rightarrow i$ 'nin komşu olmasına izin verilir. Ayrıca kısır döngü kontrolünde, taşımayla etkilenecek işlemler arasında kalan çizelgenin bütün işlemleri için baştan sona bir bağıın varlığının kontrolü yapılmaktadır. G1 komşuluğunu üreten yordamın yalancı-program kodu Şekil 6.7'da görülmektedir.

TAŞI yordamı mevcut çizelgeyi, üretilen komşuluğa göre değiştirerek yeni bir çizelge oluşturur. Bu işlem bir tezgahdaki ardışık iki işlemin yer değiştirmesiyle neticelenir. Tabii olarak, bu işlemin hangi tezgahda ve hangi iki işlem arasında olacağını komşuluk düzeneği belirleyecektir. Yer değiştirmeden etkilenecek olan elemanlar eğer varsa bu işlemlerin tezgah öndülleri ve tezgah ardılları ile birinci işlemin tezgah ardılının tezgah öndülü ve ikinci işlemin tezgah öndülünün tezgah ardılıdır.

DÖNGÜ\_KONTROL yordamı komşuluk düzeneğinin öngördüğü taşımanın bir kısır döngüye yol açıp açmadığını kontrol eder; eğer kısır döngüye yol açıyorsa o taşımaya izin vermez. Yordam kısır döngüyü tesbit etmek için özyinelemeli (iteratif) bir iç yordam kullanır. Bu iteratif yordamın esası verilen bir işlemde başlayarak o işlemin iş ve tezgah ardılları arasında ve yine yordam içinden o operasyonun ardılının ardılını çağırarak onun kendisi mi? olup olmadığını kontrol etmek şeklindedir.

```

Procedure KOMŞU_G1;
Begin
  for  $i:=1$  to  $blok\_sayısı$  do
    begin
      if  $i.bloğun\_1.işleminin\_hazır\_zamanı > 0$  then
        begin
          if  $i.bloğun\_2.işleminin\_işöndülü = var$  then
            DÖNGÜ_KONTROL( $i.bloğun\_1.işlemininden, i.bloğun\_2.işleminin\_işöndülüne$ );
          if  $kördöngü = yok$  then  $i.bloğun\_ilk\_iki\_işlemini\_yer\_değiştir$ ;
        end;
      if ( $i.bloğun\_işlem\_sayısı > 2$ ) and
        ( $i.bloğun\_son\_işlemin\_teslim\_zamanı < max\_tamamlanma\_zamanı$ ) then
        begin
          if  $i.bloğun\_sondan\_2.işlemin\_işardılı = var$  then
            CYCLE_CHECK( $i.bloğun\_sondan\_2.işlemin\_işardılından, i.bloğun\_son\_işlemine$ );
          if  $kördöngü = yok$  then  $i.bloğun\_son\_iki\_işlemini\_yer\_değiştir$ ;
        end;
      end;
    End;

```

Şekil 6.7 G1 komşuluğu yordamının yalancı-program kodu

TABU\_EKLE yordamı bir çizelgeden diğerine taşınırken yer değiştiren iki işlemi, taşınan çizelgeyi temsil etmek üzere,  $j \rightarrow i$  hafıza özelliği şeklinde tabu listesine kaydeder. En son yapılan taşıma listenin tepesine kaydedilir. Ancak bu yapılmadan önce listedeki varlıklar birer aşağı kaydırılır. Tabii olarak eğer listedeki varlık sayısı liste uzunluğunu aşmışsa listeye en önce kaydedilen varlık listeden düşer (ilk-giren ilk-çıkartma kuralı). Böylece hafızanın en önemli özelliklerinden biri olan stratejik unutma işlevi sağlanmış olur ve listeden düşen bu varlığın yeni bir çizelgenin elmanı olma imkanı ona tanınmış olur.

MESAFE yordamı iki (seçkin) çizelge arasında farklılığı ölçer. Bu farklılık ölçüsü, herhangi iki  $i - j$  işlemin ( $i < j$ , yani  $i$   $j$  den önde) yer değiştirmesine ilişkin  $j$ 'nin  $i$  den önde kaldığı pozisyon sayısıdır. (Hamming Mesafesi) Bu mesafe XOR operatörü ile hesaplanabilir. Şöyleki,

$$HM(i,j) = \sum \sum \sum XOR((a < b)_{k,i}, (a < b)_{k,j}) - \text{bütün } i, j \text{ ler için.}$$

Görüldüğü gibi, belirtilen herhangi bir seçkin çizelgeye ait bir tezgahdaki  $i$  den sonra  $j$  işleminin gelmesi durumu ile mevcut çizelgedeki aynı tezgahda  $j$  den sonra  $i$  işleminin gelmesi durumu karşılaştırılır. Eğer bu durum doğrulanırsa farklılığın göstergesi olarak mesafe sayacı bir arttırılır.

SEÇKİN\_LISTESİ yordamı seçkin bir çizelge ile karşılaşıldığında, yani o ana kadar bulunan en iyi amaç değerli çizelgeden daha iyi bir çizelge bulunduğunda, daha sonra tekrar ele alınmak üzere onu saklar. Saklanan şey komple çizelgeyi temsil eden her tezgahdaki işlem sıralarıdır. Saklanabilecek seçkin çizelge sayısı sınırlıdır ve sabittir. Dolayısıyla tıpkı tabu listesinde olduğu gibi, yeni bir seçkin çizelge ortaya çıktığında listede kayıtlı seçkin çizelgeler birer aşağı kaydırılır ve eğer seçkin çizelge sayısı liste uzunluğundan fazla olursa listenin dibindeki çizelge listeden düşer.

SEÇKİN\_YÜKLE yordamı standart tabu arama modülü belli iterasyon sayısınca yeni bir seçkin çizelge tesbit edemeyip arama işlemi durdurduğunda, en son kaydedilen seçkin çizelgeyi geri yükleyerek arama işleminin buradan devam etmesini sağlar. Listenin tepesindeki çizelge geri yüklendikten sonra, kalan çizelgeler birer yukarı çıkarılır ve yeri boşaltılır ki, yeni ortaya çıkabilecek bir seçkin çizelge için yer açılmış olsun (ilk-giren son-çıkartma kuralı).

### 6.3.1 Test problemleri ve test istatistiği

Tabu arama modülünün en iyi sonucu üretmesini sağlamak için bir test düzeneği kurulmuştur. Bu düzeneğe literatürde yer alan ve en büyük tamamlanma zamanları açısından optimum veya alt sınır değerleri bilinen çeşitli test problemlerinden 38 tanesi seçilerek oluşturulmuştur. Bu seçimde problemlerin mümkün olduğunca farklı kaynaklardan olmasına dikkat edilmiştir. Bununla beraber aynı atölye koşullarında farklı atölye yük seviyeleri (ağır\_yüklü, normal ve hafif\_yüklü) oluşturulmasına dikkat edilmiştir. Çünkü deney çalışmasında farklı yük seviyeleri için ayrı ayrı karşılaştırmalar yapılması öngörülmektedir. Kullanılan 38 test problemi şunlardır: Adams ve diğerleri (1988)'den abz5 ve abz8; Fisher ve Thompson (1963)'dan ft06, 10 ve 20; Lawrence (1984)'den la02, 05, 06, 11, 13, 16, 19, 22, 23, 25, 27, 29, 30, 34, 35, 36 ve 37; Applegate ve Cook (1991)'den orb03, 04, 05, 07, 08 ve 10; Storer ve diğerleri (1992)'den swv01, 02, 03, 04, 05, 06, 07, 08, 09 ve 10. Bu test problemlerine ait iş ve tezgah sayısı, en iyi ya da bilinen en iyi alt-sınır  $C_{max}$  değerleri ile bunları bulan kişi veya kişilere ait bilgiler Tablo 6.1'de yer almaktadır. Ayrıca son sütunda bu tez kapsamında yapılan çalışmalar sonunda oluşturulan TA çizelgeleme modülünün bulduğu  $C_{max}$  değerleri de sunulmuştur.

Bu test problemleri üzerinde Bölüm 5'de bahsedilen tabu arama yönteminin çeşitli parametre değerleri ve taktikleri test edilmiştir. Bu testlerde üretilen çeşitli ölçütler şunlardır: Başlangıç çözümünü iyileştirme oranı (MRI%), optimum çözümden nisbi sapma (MRE%), ortalama değerlendirilen komşu sayısı (MEN), ortalama taşıma sayısı (MMN), ortalama çözüm süresi (TIME), optimum çözümü bulunan problem sayısı (LBE), bilinenden daha iyi çözümü bulunan problem sayısı (LBI), ortalama iyileştiren taşıma sayısı (MIMN), ortalama iyileştiren taşıma yüzdesi (MIM%), ortalama iyileştirmeyen taşıma yüzdesi (MDIM%), ortalama en iyi çözümün bulunduğu iterasyon yüzdesi (IB%) ve ortalama komşuluk sayısı (MN).

Bu değerlerden en önemlisi ve en şeffaf olanı şüphesiz MRE'dir. Bu yüzden çeşitli parametre değerleri ve taktikleri test edilirken birincil ölçüt olarak MRE kullanılmıştır. Bunun yanında, diğer değerler ikincil ölçüt olarak yeri geldiğinde değerlendirmeye dahil edilmiştir.

Tablo 6.1 Literatürdeki bazı test problemlerine çeşitli bilgiler

| Problem adı | Boyut (işXtezgah) | Optimum ( $C_{max}$ )* | Optimum ya da bilinen en iyi alt-sınırı ilk bulan kişi(ler) | Amaçlanan $C_{max}$ ** | TA |
|-------------|-------------------|------------------------|---|------------------------|----|
| abz5        | 10X10             | 1234                   | Applegate ve Cook (1991)                                    | 1238                   |    |
| abz8        | 20X15             | 645                    | Martin ve Shmoys (1995)                                     | 714                    |    |
| ft06        | 6X6               | 55                     | Lageweg ve diğerleri (1977)                                 | 55▶                    |    |
| ft10        | 10X10             | 930                    | Carlier ve Pinson (1989)                                    | 974                    |    |
| ft20        | 20X5              | 1165                   | Carlier ve Pinson (1989)                                    | 1167                   |    |
| la02        | 10X5              | 655                    | Adams ve diğerleri (1988)                                   | 655▶                   |    |
| la05        | 10X5              | 593                    | Adams ve diğerleri (1988)                                   | 593▶                   |    |
| la06        | 15X5              | 926                    | Adams ve diğerleri (1988)                                   | 936                    |    |
| la11        | 20X5              | 1222                   | Adams ve diğerleri (1988)                                   | 1222▶                  |    |
| la13        | 20X5              | 1150                   | Adams ve diğerleri (1988)                                   | 1159                   |    |
| la16        | 10X10             | 945                    | Carlier ve Pinson (1990)                                    | 979                    |    |
| la19        | 10X10             | 842                    | Applegate ve Cook (1991)                                    | 843                    |    |
| la22        | 15X10             | 1046                   | Applegate ve Cook (1991)                                    | 974▼                   |    |
| la23        | 15X10             | 1046                   | Adams ve diğerleri (1988)                                   | 1032▼                  |    |
| la25        | 15X10             | 977                    | Applegate ve Cook (1991)                                    | 1013                   |    |
| la27        | 20X10             | 1235                   | Adams ve diğerleri (1988)                                   | 1269                   |    |
| la29        | 20X10             | 1142                   | Nuijten ve Rogerie (1996)                                   | 1248                   |    |
| la30        | 20X10             | 1355                   | Adams ve diğerleri (1988)                                   | 1371                   |    |
| la34        | 30X10             | 1721                   | Adams ve diğerleri (1988)                                   | 1750                   |    |
| la35        | 30X10             | 1888                   | Adams ve diğerleri (1988)                                   | 1888▶                  |    |
| la36        | 15X15             | 1268                   | Carlier ve Pinson (1990)                                    | 1293                   |    |
| la37        | 15X15             | 1397                   | Carlier ve Pinson (1990)                                    | 1448                   |    |
| orb03       | 10X10             | 1005                   | Applegate ve Cook (1991)                                    | 1082                   |    |
| orb04       | 10X10             | 1005                   | Applegate ve Cook (1991)                                    | 1029                   |    |
| orb05       | 10X10             | 887                    | Applegate ve Cook (1991)                                    | 918                    |    |
| orb07       | 10X10             | 397                    | Applegate ve Cook (1991)                                    | 405                    |    |
| orb08       | 10X10             | 899                    | Applegate ve Cook (1991)                                    | 978                    |    |
| orb10       | 10X10             | 944                    | Applegate ve Cook (1991)                                    | 970                    |    |
| sw01        | 20X10             | 1392                   | Vaessens (1995)   | 1483                   |    |
| sw02        | 20X10             | 1475                   | Vaessens (1995)   | 1575                   |    |
| sw03        | 20X10             | 1369                   | Vaessens (1995)   | 1608                   |    |
| sw04        | 20X10             | 1450                   | Vaessens (1995)   | 1615                   |    |
| sw05        | 20X10             | 1421                   | Vaessens (1995)   | 1563                   |    |
| sw06        | 20X15             | 1591                   | Vaessens (1995)   | 1894                   |    |
| sw07        | 20X15             | 1446                   | Vaessens (1995)   | 1811                   |    |
| sw08        | 20X15             | 1640                   | Vaessens (1995)   | 1999                   |    |
| sw09        | 20X15             | 1604                   | Vaessens (1995)   | 1993                   |    |
| sw10        | 20X15             | 1631                   | Vaessens (1995)   | 1993                   |    |

\* Rakamlar problemin en iyi yada bilinen en iyi alt-sınır  $C_{max}$  değeridir.

\*\* Çözümler ortalama 2908 taşıma ve IBM PC 300GL bilgisayarda ortalama 71,24 saniyede üretilmiştir.

▶ En iyi çözümü bulunan problem.

▼ Bilinen en iyi alt sınırdan daha iyi çözümü bulunan problem.

### 6.3.2 Komşuluk yapısı seçimi

İlk olarak, 8 değişik komşuluk yapısı test edilmiştir. Bunlardan 5'i önceki kısımda (bkz. altbaşlık 5.3) açıklanan ve literatürde yer alan N1, N2, N3, N4 ve N5 komşuluklarıdır. Kalan 3 tanesi ise literatürde yer alan komşulukların çeşitli özelliklerini kullanarak, bu çalışmada kullanılmak üzere oluşturulmuş komşuluklardır. Bunlar G1, G2 ve G3 komşulukları olarak adlandırılmıştır.

G1 komşuluğu N2 ve N4 komşuluğuna benzemektedir. Yani bir tek kritik yol üretilmekte (iş önceliği tercih edilmektedir) ve bu kritik yol üzerindeki blokların ilk iki işlemi ve şayet o blok ikiden fazla işlem içeriyorsa son iki işlemi yer değiştirilmektedir. İlaveten, eğer ilk blok ikiden fazla işlem içeriyor ve ilk işleminin başlama zamanı çizelgeleme periyodu başlangıcı ile aynı ise bu bloğun sadece son iki işlemi yer değiştirir. Benzer şekilde eğer son blok ikiden fazla işlem içeriyor ve son işlemin tamamlanma zamanı en büyük tamamlanma zamanı ( $C_{max}$ ) ile aynı ise bu bloğun sadece ilk iki işlemi yer değiştirilir. Ayrıca herbir seçkin çözümden yeniden başlama anında, bir defaya mahsus N3 komşuluğunu kullanmaktadır. Böylece, N3 komşuluğunun daha geniş bir komşuluk teşkil etmesi yüzünden, arama yönünün öncekinden farklı bölgelere doğru gitme ihtimali artacaktır.

G2 komşuluğu N3 ve G1 komşuluğuna benzemektedir. Yani G1'e ilaveten, N3'teki gibi, eğer herbir bloğun ilk işleminin iş öndülü ( $h$ ) varsa ve bu iş öndülünün bitişik bir tezgah öndülü ( $PM(h)$ ) varsa bunlar da yer değiştirilir. Eğer herbir bloğun son işleminin bir iş ardılı ( $k$ ) varsa ve bu iş ardılının bitişik bir tezgah ardılı ( $SM(k)$ ) varsa bunlar da yer değiştirilir. G3 komşuluğu ise G1 komşuluğuna benzemektedir; tek fark eğer varsa bütün alternatif kritik-yolların üretilmesidir.

MRE değerleri (Tablo 6.2) bakımından, bu test istatistiğine göre, G1 komşuluğu ile diğerlerinin ikili karşılaştırılmasında  $\alpha=0,10$  anlam düzeyinde G1'in diğerlerinden farklı ve daha iyi olduğu söylenebilir.  $\alpha=0,01$  anlam düzeyinde ise G1'in G2, N1, N2, N3 ve N4'den farklı ve daha iyi olduğu; ancak  $\alpha=0,05$  anlam düzeyinde G3 ve N5'den farklı olmadığı söylenebilir (G1 ile G3'ün farklı olduğunu söylemek ancak  $\alpha>0,0663$  olması koşuluyla ve G1 ile N5'inkinin ise ancak  $\alpha>0,0600$  olması koşuluyla mümkündür) (Tablo 6.3). Bununla beraber, Tablo 6.4'de görüldüğü gibi, G1'in ortalama MRE değerinin ve değerlendirilen ortalama komşu sayısının G3 ve N5'inkinden düşük olmasından dolayı G1 komşuluğunun kullanılmasını kabul



edilmiştir.

Tablo 6.2 Komşuluk yapılarına ait MRE değerleri

| Prob\Yöntem | G1     | G2     | G3     | N1     | N2     | N3     | N4    | N5     |
|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|
| ft20        | 0,009  | 0,009  | 0,009  | 0,077  | 0,02   | 0,023  | 0,02  | 0,037  |
| la11        | 0      | 0      | 0      | 0,081  | 0      | 0      | 0     | 0      |
| la13        | 0,008  | 0,008  | 0,008  | 0,067  | 0,008  | 0,008  | 0,078 | 0,008  |
| la27        | 0,049  | 0,062  | 0,043  | 0,109  | 0,074  | 0,071  | 0,061 | 0,028  |
| la29        | 0,106  | 0,1    | 0,082  | 0,203  | 0,086  | 0,104  | 0,104 | 0,067  |
| la30        | 0,016  | 0,024  | 0,092  | 0,149  | 0,1    | 0,071  | 0,02  | 0,034  |
| swv01       | 0,063  | 0,093  | 0,099  | 0,125  | 0,101  | 0,081  | 0,093 | 0,067  |
| swv02       | 0,071  | 0,07   | 0,067  | 0,079  | 0,077  | 0,082  | 0,079 | 0,043  |
| swv03       | 0,144  | 0,15   | 0,142  | 0,191  | 0,152  | 0,167  | 0,182 | 0,155  |
| swv04       | 0,103  | 0,125  | 0,173  | 0,226  | 0,13   | 0,114  | 0,107 | 0,122  |
| swv05       | 0,129  | 0,107  | 0,112  | 0,169  | 0,113  | 0,109  | 0,114 | 0,118  |
| swv06       | 0,149  | 0,223  | 0,135  | 0,246  | 0,198  | 0,179  | 0,187 | 0,208  |
| swv07       | 0,21   | 0,194  | 0,204  | 0,304  | 0,182  | 0,216  | 0,196 | 0,191  |
| swv08       | 0,169  | 0,165  | 0,168  | 0,227  | 0,177  | 0,174  | 0,177 | 0,186  |
| swv09       | 0,17   | 0,195  | 0,166  | 0,226  | 0,19   | 0,195  | 0,218 | 0,192  |
| swv10       | 0,189  | 0,207  | 0,213  | 0,273  | 0,237  | 0,191  | 0,184 | 0,187  |
| abz5        | 0,004  | 0,013  | 0,004  | 0,009  | 0,013  | 0,009  | 0,025 | 0,003  |
| la06        | 0,011  | 0,011  | 0,011  | -0,018 | 0,011  | 0,011  | 0,011 | 0,003  |
| la22        | -0,106 | -0,036 | -0,087 | -0,046 | -0,085 | -0,093 | -0,06 | -0,106 |
| la23        | -0,014 | -0,014 | -0,014 | -0,014 | -0,014 | -0,014 | 0,007 | -0,014 |
| la25        | 0,056  | 0,069  | 0,106  | 0,083  | 0,06   | 0,104  | 0,066 | 0,072  |
| la36        | 0,027  | 0,042  | 0,022  | 0,036  | 0,031  | 0,025  | 0,064 | 0,048  |
| la37        | 0,033  | 0,077  | 0,043  | 0,114  | 0,052  | 0,029  | 0,043 | 0,054  |
| abz8        | 0,088  | 0,099  | 0,104  | 0,112  | 0,09   | 0,094  | 0,115 | 0,097  |
| fl10        | 0,063  | 0,042  | 0,053  | 0,032  | 0,042  | 0,038  | 0,05  | 0,067  |
| la02        | 0,014  | 0      | 0      | 0,024  | 0,025  | 0,017  | 0     | 0,017  |
| la05        | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0     | 0      |
| la16        | 0,035  | 0,036  | 0,017  | 0,035  | 0,017  | 0,035  | 0,038 | 0,026  |
| la19        | 0,025  | 0,014  | 0,021  | 0,027  | 0,018  | 0,021  | 0,025 | 0,014  |
| orb03       | 0,051  | 0,053  | 0,053  | 0,054  | 0,053  | 0,053  | 0,072 | 0,049  |
| orb04       | 0,025  | 0,039  | 0,043  | 0,056  | 0,04   | 0,039  | 0,036 | 0,033  |
| orb05       | 0,06   | 0,09   | 0,03   | 0,091  | 0,061  | 0,091  | 0,084 | 0,075  |
| orb08       | 0,019  | 0,045  | 0,124  | 0,141  | 0,039  | 0,145  | 0,034 | 0,08   |
| orb10       | 0,007  | 0,023  | 0,038  | 0,008  | 0,014  | 0,044  | 0,024 | 0,029  |
| la34        | 0,013  | 0,047  | 0,014  | 0,113  | 0,027  | 0,03   | 0,034 | 0,022  |
| la35        | 0      | 0      | 0      | 0,108  | 0      | 0      | 0     | 0      |
| ft06        | 0      | 0      | 0      | 0,052  | 0      | 0      | 0     | 0      |
| orb07       | 0,057  | 0,02   | 0,027  | 0,061  | 0,046  | 0,048  | 0,034 | 0,036  |
| Ortalama:   | 0,054  | 0,063  | 0,061  | 0,101  | 0,063  | 0,066  | 0,066 | 0,059  |

Tablo 6.3 Komşuluk yapılarının karşılaştırılması: eşlendirilmiş-t testi istatistiği.

| Yönt.\Yönt. | G2     | G3     | N1     | N2     | N3     | N4     | N5     |
|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| G1          | 0,0077 | 0,0663 | 0,0000 | 0,0077 | 0,0026 | 0,0002 | 0,0600 |

Tablo 6.4 Komşuluk yapılarının ürettiği tabu arama parametre değerleri

| Prmt.Yönt. | G1    | G2    | G3    | N1     | N2    | N3    | N4    | N5    |
|------------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|
| MRI(%)     | 15,6  | 14,7  | 14,9  | 10,9   | 14,8  | 14,5  | 14,4  | 15,1  |
| MRE(%)     | 5,4   | 6,3   | 6,1   | 12,4   | 6,3   | 6,6   | 6,6   | 5,9   |
| MEN(br)    | 17119 | 21128 | 17558 | 34199  | 19987 | 25526 | 14598 | 17687 |
| MMN(br)    | 2665  | 2586  | 2543  | 2011   | 2488  | 2616  | 2594  | 2589  |
| TIME(sn)   | 68,16 | 79,37 | 69,42 | 113,92 | 73,05 | 99,42 | 60,34 | 34,42 |
| LBE(br)    | 4     | 5     | 5     | 2      | 4     | 4     | 5     | 4     |
| LBI(br)    | 2     | 2     | 2     | 2      | 2     | 2     | 1     | 2     |
| MIMN(br)   | 42,39 | 38,66 | 41,32 | 22,97  | 38,95 | 39,08 | 43,34 | 41,63 |
| MIM(%)     | 1,59  | 1,49  | 1,62  | 1,14   | 1,57  | 1,49  | 1,67  | 1,61  |
| MDIM(%)    | 98,41 | 98,51 | 98,38 | 98,86  | 98,43 | 98,51 | 98,33 | 98,39 |
| IB(%)      | 54,82 | 49,23 | 49,78 | 40,33  | 52,53 | 50,46 | 49,50 | 49,48 |
| MN(br)     | 6,42  | 8,17  | 6,90  | 17,01  | 8,03  | 9,76  | 5,63  | 6,83  |

### 6.3.3 Tabu durumu tesbiti

Çalışmada bir tek tabu listesi kullanımı amaçlanmıştır. Tabu listesinde tutulan varlıklar özellikseldir. Bir varlığı temsil eden özellik, mevcut çözümden önce son yer değiştiren iki işlemin sırasının tersidir. Özelliysel bir yapı kullanılmasının nedeni bilgisayar hafızasından tasarruf etmektir. Bütün komşular da özelliysel olarak temsil edilmektedir. Komşu bir çözümü temsil eden varlık, kök çözümdeki  $(i,j)$  işlem çiftinin sırasının değişmesiyle oluşan  $(j,i)$  yayıdır. İşte  $(j,i)$  komşu çözüm varlığının tabu durumu tesbit edilirken bu varlığın o anda tabu listesinde olup olmadığına listedeki bütün varlıklar taranarak bakılır. Eğer  $(j,i)$  varlığı tabu listesinde bulunursa incelenen komşu çözüm “tabu”dur denir.

### 6.3.4 Tabu listesi uzunluğu

26 değişik tabu listesi uzunluğu (TLU) test edilmiştir. Tablo 6.5’de görüldüğü gibi, bunlardan ilk 6 tanesi (T5-T20) sabit uzunluklar olup 5, 7, 10, 12, 15, ve 20’dir. Sonraki üç tanesi dinamik TLU’nu teşkil etmektedir. İlki (TD1), Dell’Amico ve Trubian (1993)’ün kullandığı dinamik liste uzunluğudur (bkz. Altbaşlık 5.5.3). İkincisi (TD2), 7-12 aralığında ve alt değerden başlamak üzere, eğer arama azalan bir safhadaysa (yani, mevcut iterasyonun amaç değeri bir önceki iterasyonunkinden daha düşük ise) ve TLU bir eşik değerden daha büyük ise liste uzunluğunu bir birim azaltır; eğer arama artan bir safhadaysa (yani, mevcut iterasyonun amaç değeri bir önceki iterasyonunkinden daha kötü ise) ve liste uzunluğu verilen bir üst sınırdan daha küçük ise liste uzunluğunu bir artırır. Üçüncü (TD3), 7-12 aralığında rastgele TLU belirler.

Diğer yöntemler blok sayısı ( $b$ ), iş sayısı ( $n$ ), tezgah sayısı ( $m$ ) ve komşu sayısına ( $k$ ) göre oluşturulmuşlardır.

TLU yöntemlerinin güncellenmesi şöyle olmaktadır: İkinci ve üçüncü dinamik TLU yönteminde liste uzunluğu her iterasyonda, diğerlerinde ise liste uzunluğunun tesbit edildiği iterasyondan itibaren, liste uzunluğu iterasyon sonra güncellenmektedir.

Tablo 6.5 Tabu listesi uzunluğu yöntemleri

| Yöntem | T5 | T7 | T10 | T12 | T15 | T20 | TD1  | TD2  | TD3  | TB | TB5 | TB7 | TBM |
|--------|----|----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|----|-----|-----|-----|
| TLU    | 5  | 7  | 10  | 12  | 15  | 20  | 7-12 | 7-12 | 7-12 | b  | b+5 | b+7 | b+m |

Tablo 6.5 (devam) Tabu listesi uzunluğu yöntemleri

| Yöntem | TBM2            | TBN         | TBN3            | TBN5            | TK  | TK_2  | TK2         | TKM         | TKM2            | TKM5            | TM  | TM_2  | TM2         |
|--------|-----------------|-------------|-----------------|-----------------|-----|-------|-------------|-------------|-----------------|-----------------|-----|-------|-------------|
| TLU    | $b \cdot m / 2$ | $b \cdot n$ | $b \cdot n / 3$ | $b \cdot n / 5$ | $k$ | $k-2$ | $k \cdot 2$ | $k \cdot m$ | $k \cdot m / 2$ | $k \cdot m / 5$ | $m$ | $m-2$ | $m \cdot 2$ |

Tablo 6.6 Tabu listesi uzunluğu yöntemlerine ait MRE değerleri

| Prob\Yöntem | T12    | T5     | T7     | T10    | T15    | T20    | TD1    | TD2    | TD3    | TB     | TB5    | TB7    | TBM    |
|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| ft20        | 0,002  | 0,033  | 0,014  | 0,009  | 0,009  | 0,009  | 0,015  | 0,017  | 0,009  | 0,01   | 0,009  | 0,022  | 0,009  |
| la11        | 0      | 0      | 0,012  | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0,013  | 0      | 0      | 0      | 0      |
| la13        | 0,008  | 0,066  | 0,008  | 0,008  | 0,008  | 0,008  | 0,008  | 0,008  | 0,008  | 0,066  | 0,022  | 0,008  | 0,022  |
| la27        | 0,027  | 0,064  | 0,041  | 0,049  | 0,026  | 0,075  | 0,046  | 0,036  | 0,05   | 0,062  | 0,023  | 0,027  | 0,039  |
| la29        | 0,085  | 0,099  | 0,126  | 0,106  | 0,082  | 0,086  | 0,118  | 0,071  | 0,079  | 0,085  | 0,097  | 0,088  | 0,086  |
| la30        | 0,012  | 0,089  | 0,044  | 0,016  | 0,064  | 0,011  | 0,04   | 0,003  | 0,01   | 0,036  | 0,092  | 0,003  | 0,034  |
| swv01       | 0,061  | 0,081  | 0,086  | 0,063  | 0,092  | 0,088  | 0,079  | 0,074  | 0,085  | 0,1    | 0,059  | 0,075  | 0,068  |
| swv02       | 0,063  | 0,097  | 0,073  | 0,071  | 0,082  | 0,1    | 0,062  | 0,065  | 0,061  | 0,066  | 0,043  | 0,057  | 0,063  |
| swv03       | 0,149  | 0,144  | 0,157  | 0,144  | 0,149  | 0,134  | 0,149  | 0,157  | 0,153  | 0,16   | 0,135  | 0,134  | 0,154  |
| swv04       | 0,102  | 0,175  | 0,139  | 0,103  | 0,125  | 0,101  | 0,102  | 0,105  | 0,12   | 0,133  | 0,103  | 0,122  | 0,115  |
| swv05       | 0,091  | 0,139  | 0,104  | 0,129  | 0,084  | 0,129  | 0,117  | 0,124  | 0,116  | 0,127  | 0,127  | 0,1    | 0,111  |
| swv06       | 0,142  | 0,201  | 0,146  | 0,149  | 0,156  | 0,186  | 0,152  | 0,149  | 0,151  | 0,202  | 0,132  | 0,139  | 0,147  |
| swv07       | 0,205  | 0,222  | 0,204  | 0,21   | 0,191  | 0,18   | 0,181  | 0,203  | 0,189  | 0,209  | 0,163  | 0,2    | 0,167  |
| swv08       | 0,18   | 0,191  | 0,167  | 0,169  | 0,162  | 0,183  | 0,186  | 0,164  | 0,174  | 0,194  | 0,173  | 0,178  | 0,182  |
| swv09       | 0,195  | 0,183  | 0,19   | 0,17   | 0,189  | 0,17   | 0,183  | 0,195  | 0,198  | 0,181  | 0,195  | 0,195  | 0,177  |
| swv10       | 0,182  | 0,197  | 0,181  | 0,189  | 0,194  | 0,197  | 0,201  | 0,18   | 0,183  | 0,189  | 0,191  | 0,182  | 0,194  |
| abz5        | 0,003  | 0,003  | 0,005  | 0,004  | 0,003  | 0,017  | 0,003  | 0,003  | 0,013  | 0,023  | 0,003  | 0,011  | 0,004  |
| la06        | 0,011  | 0,011  | 0,011  | 0,011  | 0,011  | 0,011  | 0,011  | 0,011  | 0,011  | 0,011  | 0,011  | 0,011  | 0,011  |
| la22        | -0,074 | -0,083 | -0,078 | -0,106 | -0,106 | -0,105 | -0,109 | -0,076 | -0,112 | -0,094 | -0,106 | -0,095 | -0,101 |
| la23        | -0,014 | -0,014 | -0,014 | -0,014 | -0,014 | -0,014 | -0,014 | -0,014 | -0,014 | -0,006 | -0,014 | -0,014 | -0,014 |
| la25        | 0,036  | 0,064  | 0,088  | 0,056  | 0,077  | 0,069  | 0,031  | 0,071  | 0,04   | 0,147  | 0,05   | 0,083  | 0,042  |
| la36        | 0,019  | 0,038  | 0,028  | 0,027  | 0,028  | 0,039  | 0,034  | 0,034  | 0,036  | 0,05   | 0,029  | 0,022  | 0,029  |
| la37        | 0,035  | 0,077  | 0,063  | 0,033  | 0,077  | 0,045  | 0,035  | 0,02   | 0,03   | 0,057  | 0,024  | 0,034  | 0,036  |
| abz8        | 0,097  | 0,114  | 0,127  | 0,088  | 0,086  | 0,115  | 0,088  | 0,1    | 0,099  | 0,086  | 0,112  | 0,099  | 0,085  |
| ft10        | 0,045  | 0,042  | 0,067  | 0,063  | 0,046  | 0,067  | 0,042  | 0,048  | 0,025  | 0,042  | 0,028  | 0,038  | 0,053  |
| la02        | 0      | 0,017  | 0,021  | 0,014  | 0      | 0,012  | 0      | 0      | 0,018  | 0,019  | 0      | 0      | 0      |
| la05        | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      |
| la16        | 0,038  | 0,035  | 0,03   | 0,035  | 0,019  | 0,017  | 0,038  | 0,026  | 0,03   | 0,035  | 0,037  | 0,035  | 0,03   |
| la19        | 0,001  | 0,05   | 0,001  | 0,025  | 0,028  | 0,014  | 0,001  | 0,028  | 0,001  | 0,028  | 0,021  | 0,009  | 0,028  |
| orb03       | 0,051  | 0,066  | 0,051  | 0,051  | 0,054  | 0,035  | 0,054  | 0,071  | 0,049  | 0,071  | 0,054  | 0,011  | 0,066  |
| orb04       | 0,021  | 0,054  | 0,062  | 0,025  | 0,037  | 0,041  | 0,02   | 0,026  | 0,026  | 0,044  | 0,048  | 0,026  | 0,068  |
| orb05       | 0,024  | 0,019  | 0,053  | 0,06   | 0,061  | 0,057  | 0,036  | 0,044  | 0,016  | 0,079  | 0,087  | 0,058  | 0,045  |
| orb08       | 0,035  | 0,153  | 0,084  | 0,019  | 0,111  | 0,026  | 0,088  | 0,049  | 0,016  | 0,032  | 0,032  | 0,028  | 0,029  |
| orb10       | 0,027  | 0,073  | 0,025  | 0,007  | 0,029  | 0,015  | 0,027  | 0,033  | 0,024  | 0,073  | 0,024  | 0,008  | 0,065  |
| la34        | 0,017  | 0,032  | 0,017  | 0,013  | 0,057  | 0,037  | 0,008  | 0,028  | 0,023  | 0,021  | 0,017  | 0,001  | 0      |
| la35        | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      |
| ft06        | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      |
| orb07       | 0,02   | 0,041  | 0,02   | 0,057  | 0,041  | 0,015  | 0,02   | 0,061  | 0,039  | 0,066  | 0,048  | 0,039  | 0,041  |
| Ortalama:   | 0,050  | 0,073  | 0,062  | 0,054  | 0,059  | 0,057  | 0,054  | 0,056  | 0,052  | 0,069  | 0,054  | 0,051  | 0,055  |

Tablo 6.6 (devam) Tabu listesi uzunluğu yöntemlerine ait MRE değerleri

| Yöntem    | TBM2   | TBN    | TBN3   | TBN5   | TK     | TK 2   | TK2    | TKM    | TKM2   | TKM5   | TM     | TM 2   | TM2    |
|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| ft0       | 0,019  | 0,014  | 0,009  | 0,009  | 0,009  | 0,009  | 0,009  | 0,036  | 0,009  | 0,009  | 0,033  | 0,02   | 0,014  |
| la11      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0,03   | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0,012  |
| la13      | 0,066  | 0,008  | 0,008  | 0,008  | 0,066  | 0,022  | 0,008  | 0,008  | 0,008  | 0,066  | 0,066  | 0,066  | 0,008  |
| la27      | 0,023  | 0,04   | 0,046  | 0,028  | 0,037  | 0,039  | 0,035  | 0,034  | 0,058  | 0,035  | 0,049  | 0,031  | 0,027  |
| la29      | 0,097  | 0,089  | 0,132  | 0,096  | 0,097  | 0,086  | 0,1    | 0,092  | 0,099  | 0,1    | 0,106  | 0,069  | 0,085  |
| la30      | 0,092  | 0,013  | 0,043  | 0,092  | 0,046  | 0,034  | 0,004  | 0      | 0,023  | 0,004  | 0,016  | 0,034  | 0,012  |
| swv01     | 0,059  | 0,084  | 0,088  | 0,066  | 0,062  | 0,068  | 0,067  | 0,061  | 0,073  | 0,067  | 0,063  | 0,091  | 0,061  |
| swv02     | 0,043  | 0,068  | 0,063  | 0,063  | 0,061  | 0,063  | 0,043  | 0,042  | 0,062  | 0,043  | 0,071  | 0,056  | 0,063  |
| swv03     | 0,135  | 0,168  | 0,16   | 0,125  | 0,149  | 0,154  | 0,149  | 0,152  | 0,169  | 0,149  | 0,144  | 0,16   | 0,149  |
| swv04     | 0,103  | 0,131  | 0,105  | 0,119  | 0,139  | 0,115  | 0,129  | 0,122  | 0,116  | 0,129  | 0,103  | 0,087  | 0,102  |
| swv05     | 0,127  | 0,095  | 0,099  | 0,102  | 0,123  | 0,111  | 0,12   | 0,124  | 0,119  | 0,12   | 0,129  | 0,091  | 0,091  |
| swv06     | 0,139  | 0,132  | 0,163  | 0,177  | 0,179  | 0,147  | 0,148  | 0,141  | 0,145  | 0,215  | 0,156  | 0,151  | 0,149  |
| swv07     | 0,2    | 0,184  | 0,198  | 0,196  | 0,175  | 0,167  | 0,182  | 0,204  | 0,173  | 0,189  | 0,191  | 0,177  | 0,189  |
| swv08     | 0,178  | 0,184  | 0,161  | 0,186  | 0,159  | 0,182  | 0,165  | 0,182  | 0,167  | 0,154  | 0,162  | 0,167  | 0,189  |
| swv09     | 0,195  | 0,189  | 0,195  | 0,194  | 0,171  | 0,177  | 0,191  | 0,184  | 0,176  | 0,195  | 0,189  | 0,2    | 0,201  |
| swv10     | 0,182  | 0,18   | 0,19   | 0,185  | 0,189  | 0,194  | 0,195  | 0,178  | 0,189  | 0,187  | 0,194  | 0,191  | 0,193  |
| abz5      | 0,003  | 0,004  | 0,003  | 0,006  | 0,003  | 0,004  | 0,006  | 0,016  | 0,008  | 0,006  | 0,004  | 0,011  | 0,003  |
| la06      | 0,011  | 0,011  | 0,011  | 0,011  | 0,011  | 0,011  | 0,011  | 0,011  | 0,011  | 0,011  | 0,011  | 0,011  | 0,011  |
| la22      | -0,106 | -0,1   | -0,106 | -0,096 | -0,106 | -0,101 | -0,087 | -0,079 | -0,088 | -0,087 | -0,106 | -0,108 | -0,074 |
| la23      | -0,014 | -0,014 | -0,014 | -0,014 | -0,014 | -0,014 | -0,014 | -0,014 | -0,014 | -0,014 | -0,014 | -0,014 | -0,014 |
| la25      | 0,05   | 0,021  | 0,05   | 0,03   | 0,062  | 0,042  | 0,059  | 0,035  | 0,037  | 0,059  | 0,056  | 0,05   | 0,036  |
| la36      | 0,022  | 0,029  | 0,029  | 0,036  | 0,019  | 0,029  | 0,019  | 0,032  | 0,033  | 0,032  | 0,028  | 0,029  | 0,036  |
| la37      | 0,034  | 0,036  | 0,024  | 0,042  | 0,074  | 0,036  | 0,036  | 0,042  | 0,043  | 0,046  | 0,077  | 0,027  | 0,046  |
| abz8      | 0,099  | 0,105  | 0,085  | 0,103  | 0,11   | 0,085  | 0,104  | 0,085  | 0,079  | 0,093  | 0,086  | 0,089  | 0,083  |
| ft10      | 0,028  | 0,053  | 0,042  | 0,042  | 0,042  | 0,053  | 0,042  | 0,054  | 0,042  | 0,042  | 0,063  | 0,029  | 0,045  |
| la02      | 0,018  | 0      | 0,018  | 0,018  | 0,019  | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0,017  | 0,018  | 0,021  |
| la05      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      |
| la16      | 0,037  | 0,03   | 0,017  | 0,001  | 0,017  | 0,03   | 0,03   | 0,03   | 0,03   | 0,03   | 0,035  | 0,028  | 0,038  |
| la19      | 0,021  | 0,028  | 0,021  | 0,012  | 0,021  | 0,028  | 0,009  | 0,012  | 0,03   | 0,009  | 0,025  | 0,001  | 0,001  |
| orb03     | 0,054  | 0,066  | 0,029  | 0,044  | 0,048  | 0,066  | 0,049  | 0,028  | 0,048  | 0,049  | 0,051  | 0,044  | 0,051  |
| orb04     | 0,048  | 0,068  | 0,026  | 0,038  | 0,045  | 0,068  | 0,04   | 0,032  | 0,055  | 0,04   | 0,025  | 0,044  | 0,021  |
| orb05     | 0,087  | 0,045  | 0,049  | 0,063  | 0,052  | 0,045  | 0,036  | 0,032  | 0,04   | 0,036  | 0,06   | 0,078  | 0,024  |
| orb08     | 0,032  | 0,029  | 0,015  | 0,143  | 0,074  | 0,029  | 0,028  | 0,078  | 0,111  | 0,028  | 0,019  | 0,033  | 0,035  |
| orb10     | 0,024  | 0,065  | 0,008  | 0,017  | 0,027  | 0,065  | 0,015  | 0,018  | 0,048  | 0,015  | 0,007  | 0,039  | 0,027  |
| la34      | 0,017  | 0      | 0      | 0      | 0,028  | 0      | 0,014  | 0,021  | 0,008  | 0,014  | 0,013  | 0,03   | 0,017  |
| la35      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0,009  | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      |
| ft06      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      |
| orb07     | 0,048  | 0,041  | 0      | 0,008  | 0,039  | 0,041  | 0,02   | 0,048  | 0,068  | 0,02   | 0,057  | 0      | 0,02   |
| Ortalama: | 0,057  | 0,055  | 0,052  | 0,057  | 0,060  | 0,055  | 0,052  | 0,054  | 0,057  | 0,055  | 0,058  | 0,053  | 0,052  |

Bu verilere göre, en düşük ortalama MRE değerine (Tablo 6.6) sahip yöntem T12'dir. T12'nin diğer yöntemlerle ikili karşılaştırılması yapılmış ve eşlendirilmiş-t testi istatistiği aşağıda Tablo 6.7'de verilmiştir.

Tablo 6.7 Tabu listesi uzunluğu yöntemlerinin karşılaştırılması

| Yönt.\Yönt. | T5     | T7     | T10    | T15    | T20    | TD1    | TD2    | TD3    | TB     | TB5    | TB7    | TBM    |
|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| T12         | 0,0000 | 0,0000 | 0,0534 | 0,0050 | 0,0148 | 0,0526 | 0,0054 | 0,1812 | 0,0000 | 0,1042 | 0,3395 | 0,0315 |

Tablo 6.7 (devam) Tabu listesi uzunluğu yöntemlerinin karşılaştırılması

| Yönt.\Yönt. | TBM2   | TBN    | TBN3   | TBN5   | TK     | TK_2   | TK2    | TKM    | TKM2   | TKM5   | TM     | TM_2   | TM2    |
|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| T12         | 0,0249 | 0,0203 | 0,2505 | 0,0572 | 0,0027 | 0,0315 | 0,1785 | 0,0500 | 0,0132 | 0,0494 | 0,0091 | 0,1263 | 0,0396 |

Buna göre, eğer anlam düzeyini  $\alpha=0,05$  kabul edecek olursak, T12 yöntemi ile T10, TD1, TD3, TB5, TB7, TBN3, TBN5, TK2 ve TM-2 yöntemleri arasında fark olmadığı, ancak diğerleri ile farklı ve daha olduğu söylenebilir. Bununla beraber, MRE bakımından aralarında fark olmayan yöntemler içinde, Tablo 6.8'deki sonuçlara göre, T12, TB7 ve TBN3 diğerlerine nazaran tercih edilebilir. T12'nin MRE değerleri diğer ikisinden daha iyi olduğundan dolayı, amaçlanan modelde tabu listesi uzunluğu için T12 yöntemi tercih edilmiştir.

Tablo 6.8 Tabu listesi uzunluklarının ürettiği tabu arama parametre değerleri

| Prmt.\Yönt. | T12   | T5    | T7    | T10   | T15   | T20   | TD1   | TD2   | TD3   | TB    | TB5   | TB7   | TBM   |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| MRI(%)      | 15,9  | 13,8  | 14,9  | 15,6  | 15,1  | 15,3  | 15,6  | 15,4  | 15,8  | 14,2  | 15,5  | 15,9  | 15,5  |
| MRE(%)      | 5     | 7,3   | 6,2   | 5,4   | 5,9   | 5,71  | 5,4   | 5,6   | 5,2   | 6,9   | 5,5   | 5,1   | 5,5   |
| MEN(br)     | 18809 | 15205 | 15907 | 17119 | 16750 | 17825 | 17036 | 16974 | 18871 | 14340 | 17990 | 18595 | 17990 |
| MMN(br)     | 2908  | 2362  | 2523  | 2665  | 2639  | 2761  | 2634  | 2624  | 2951  | 2366  | 2740  | 2854  | 2740  |
| TIME(sn)    | 71,24 | 30,66 | 64,68 | 68,16 | 65,05 | 69,21 | 67,87 | 64,34 | 73,24 | 57,24 | 73,87 | 71,84 | 71,16 |
| LBE(br)     | 5     | 4     | 3     | 4     | 5     | 4     | 5     | 5     | 3     | 4     | 6     | 5     | 6     |
| LBI(br)     | 2     | 2     | 2     | 2     | 2     | 2     | 2     | 2     | 2     | 2     | 2     | 2     | 2     |
| MIMN(br)    | 43,63 | 35,50 | 41,11 | 42,39 | 40,42 | 40,66 | 44,74 | 43,50 | 44,37 | 37,26 | 44,50 | 45,13 | 44,50 |
| MIM(%)      | 1,50  | 1,50  | 1,63  | 1,59  | 1,53  | 0,22  | 1,70  | 1,66  | 1,50  | 1,57  | 1,62  | 1,58  | 1,62  |
| MDIM(%)     | 98,50 | 98,50 | 98,37 | 98,41 | 98,47 | 99,78 | 98,30 | 98,34 | 98,50 | 98,43 | 98,38 | 98,42 | 98,38 |
| IB(%)       | 56,12 | 45,68 | 47,56 | 54,82 | 52,63 | 49,72 | 51,78 | 52,59 | 57,64 | 47,72 | 55,11 | 58,76 | 55,11 |
| IBN         | 1632  | 1079  | 1200  | 1461  | 1389  | 1373  | 1364  | 1380  | 1701  | 1129  | 1510  | 1677  | 1510  |

Tablo 6.8 (devam) Tabu listesi uzunluklarının ürettiği tabu arama parametre değerleri

| Prmt.\Yönt. | TBM2  | TBN   | TBN3  | TBN5  | TK    | TK_2  | TK2   | TKM   | TKM2  | TKM5  | TM    | TM_2  | TM2   |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| MRI(%)      | 15,3  | 15,4  | 15,8  | 15,3  | 15,1  | 15,5  | 15,8  | 15,6  | 15,3  | 15,4  | 15,2  | 15,6  | 15,8  |
| MRE(%)      | 5,7   | 5,5   | 5,2   | 5,7   | 6     | 5,5   | 5,2   | 5,4   | 5,7   | 5,5   | 5,8   | 5,3   | 5,2   |
| MEN(br)     | 17227 | 16621 | 18167 | 19688 | 18721 | 17990 | 19325 | 18913 | 18115 | 18917 | 16445 | 17447 | 18610 |
| MMN(br)     | 2674  | 2507  | 2827  | 3050  | 2969  | 2740  | 2991  | 2825  | 2754  | 2899  | 2550  | 2714  | 2904  |
| TIME(sn)    | 68,37 | 64,53 | 69,97 | 79,36 | 78,11 | 71,16 | 76,79 | 74,97 | 75,08 | 75,42 | 64,11 | 68,16 | 69,37 |
| LBE(br)     | 4     | 6     | 6     | 5     | 2     | 6     | 5     | 6     | 5     | 5     | 4     | 5     | 3     |
| LBI(br)     | 2     | 2     | 2     | 2     | 2     | 2     | 2     | 2     | 2     | 2     | 2     | 2     | 2     |
| MIMN(br)    | 43,50 | 43,37 | 45,00 | 43,63 | 42,29 | 44,50 | 44,32 | 45,00 | 43,89 | 43,37 | 41,47 | 44,32 | 43,00 |
| MIM(%)      | 1,63  | 1,73  | 1,59  | 1,43  | 1,42  | 1,62  | 1,48  | 1,59  | 1,59  | 1,50  | 0,01  | 1,63  | 0,01  |
| MDIM(%)     | 98,37 | 98,27 | 98,41 | 98,57 | 98,58 | 98,38 | 98,52 | 98,41 | 98,41 | 98,50 | 58,53 | 98,37 | 57,00 |
| IB(%)       | 53,52 | 51,18 | 58,58 | 61,31 | 54,80 | 55,11 | 59,31 | 54,51 | 53,16 | 56,43 | 52,00 | 55,60 | 54,24 |
| IBN         | 1431  | 1283  | 1656  | 1870  | 1627  | 1510  | 1774  | 1540  | 1464  | 1636  | 1326  | 1509  | 1575  |

### 6.3.5 Aspirasyon ölçütü

Aspirasyon ölçütünün amacı incelenen komşu çözümün tabu durumunu, gerektiğinde iptal etmek olduğu daha önce açıklanmıştı. Bu çalışmada kullanılan birincil aspirasyon ölçütü küresel-amaçlı-aspirasyondur. Bu şunu ifade etmektedir: Eğer incelenen bir komşu çözümün amaç değeri o ana kadar elde edilenden daha iyi ise, tabu olsa bile bu komşu çözüme taşınmaya izin verilir. Eğer mevcut komşuların hepsi tabu durumunda ise, o zaman ikincil aspirasyon ölçütleri yapılacak taşımamın seçilmesinde kullanılabilir. Burada literatürde yer alanlardan ikisi olan peşinen-aspirasyon (PASP) ve rastgele-aspirasyon (RASP) (bkz. altbaşlık 5.6) ile ilaveten arama hikayesine dayanılarak geliştirilen en-eski-tabu aspirasyon (EASP) yöntemleri test edilmiştir. Araştırma-yönlü aspirasyon ve etki-ile aspirasyon uzun müddet arama hikayesinin tutulmasını gerektirdiklerinden; bu da aşırı hafıza tüketimine neden olacağından dolayı değerlendirme dışı bırakılmıştır. Ayrıca çizelgeleme problemi için alternatif komşu taşımalar birbirinden mesafe olarak çok uzak olmadığından, etki unsuru çok işe yaramayacaktır.

EASP yöntemi tabu listesine daha önce girmiş olan komşunun tabu durumunu kaldırmaktadır. Yöntemin özü, daha eski olan komşunun daha yeni olana nazaran mevcut çözüm bölgesine daha uzak olduğu, dolayısıyla eski olana taşınmayla nisbeten bir genişletme sağlaması olasılığına dayanmaktadır.

Bu yöntemler arasında çeşitli değerlere bakıldığında (Tablo 6.11) genelde birbirine yakın olduğu hemen görülüyor. Ayrıca MRE açısından aşağıda Tablo 6.10'deki test istatistiğine bakıldığında da yöntemler arasında istatistiksel önemli bir fark olmadığı görülmektedir. Ancak EASP yönteminin biraz daha iyi MRE değeri (Tablo 6.9) ürettiği ve üstelik bunu daha az iterasyonda; dolayısıyla daha az zamanda ürettiği dikkate alındığında, amaçlanan modelde EASP yöntemi tercih edilmiştir.

Tablo 6.9 İkincil aspirasyon ölçütü yöntemlerine ait MRE değerleri

| Probyöntem | EASP   | PASP   | RASP   | Probyöntem | EASP   | PASP   | RASP   |
|------------|--------|--------|--------|------------|--------|--------|--------|
| ft20       | 0,009  | 0,009  | 0,015  | la23       | -0,014 | -0,003 | -0,014 |
| la11       | 0      | 0      | 0      | la25       | 0,056  | 0,027  | 0,057  |
| la13       | 0,008  | 0,066  | 0,008  | la36       | 0,027  | 0,022  | 0,033  |
| la27       | 0,049  | 0,045  | 0,031  | la37       | 0,033  | 0,033  | 0,033  |
| la29       | 0,106  | 0,093  | 0,093  | abz8       | 0,088  | 0,088  | 0,088  |
| la30       | 0,016  | 0,03   | 0,039  | ft10       | 0,063  | 0,053  | 0,038  |
| swv01      | 0,063  | 0,063  | 0,063  | la02       | 0,014  | 0,014  | 0,014  |
| swv02      | 0,071  | 0,068  | 0,062  | la05       | 0      | 0      | 0      |
| swv03      | 0,144  | 0,129  | 0,161  | la16       | 0,035  | 0,03   | 0,035  |
| swv04      | 0,103  | 0,107  | 0,112  | la19       | 0,025  | 0,028  | 0,001  |
| swv05      | 0,129  | 0,131  | 0,129  | orb03      | 0,051  | 0,051  | 0,051  |
| swv06      | 0,149  | 0,149  | 0,149  | orb04      | 0,025  | 0,021  | 0,025  |
| swv07      | 0,21   | 0,21   | 0,21   | orb05      | 0,06   | 0,046  | 0,094  |
| swv08      | 0,169  | 0,169  | 0,169  | orb08      | 0,019  | 0,042  | 0,019  |
| swv09      | 0,17   | 0,17   | 0,17   | orb10      | 0,007  | 0,007  | 0,007  |
| swv10      | 0,189  | 0,189  | 0,189  | la34       | 0,013  | 0      | 0,025  |
| abz5       | 0,004  | 0,01   | 0,011  | la35       | 0      | 0      | 0      |
| la06       | 0,011  | 0,011  | 0,011  | ft06       | 0      | 0      | 0      |
| la22       | -0,106 | -0,087 | -0,096 | orb07      | 0,057  | 0,057  | 0,046  |
|            | ↓      |        |        | Ortalama:  | 0,054  | 0,055  | 0,055  |

Tablo 6.10 İkincil aspirasyon ölçütü yöntemlerinin karşılaştırılması

| Yöntem\Yöntem | PASP   | RASP   |
|---------------|--------|--------|
| EASP          | 0,3799 | 0,3545 |

Tablo 6.11 İkincil aspirasyon ölçütü yöntemlerinin ürettiği tabu arama parametre değerleri

| Prmt\Yöntem | EASP  | PASP  | RASP  |
|-------------|-------|-------|-------|
| MRI(%)      | 15,6  | 15,5  | 15,5  |
| MRE(%)      | 5,4   | 5,5   | 5,5   |
| MEN(br)     | 17119 | 17785 | 17390 |
| MMN(br)     | 2665  | 2813  | 2754  |
| TIME(sn)    | 68,16 | 71    | 74,18 |
| LBE(br)     | 4     | 5     | 4     |
| LBI(br)     | 2     | 2     | 2     |
| MIMN(br)    | 42,39 | 42,66 | 41,71 |
| MIM(%)      | 1,59  | 0,29  | 0,26  |
| MDIM(%)     | 98,41 | 99,71 | 99,74 |
| MRIB(%)     | 54,82 | 48,78 | 50,3  |



### 6.3.6 Aday listesi taktiği

Aday listesi taktiği olarak sadece, tıpkı tabu listesi gibi bir seçkin çözümler listesi kullanılmıştır. Aspirasyon-artı taktiğinin (bkz. altbaşlık 5.7) test edilmesine gerek duyulmamıştır. Çünkü yaklaşımda düşünülen iterasyon düzeneği her iyileştiren taşımaya rastlandığında iterasyon sayacının sıfırlanmasını gerektirmektedir. Dolayısıyla ancak son belli sayıda taşıma müddetince herhangi bir iyileşme sağlanmadığında iterasyon sona erdirilmektedir. Bu iterasyon düzeneği kullanılacak bir aspirasyon-artı taktiğinin avantajını zaten sağlamaktadır. Ardışık-filtre taktiği (bkz. altbaşlık 5.7) iş-atölyesi çizelgeleme problemi için uygun değildir. Sıralı-yelpaze taktiği (bkz. altbaşlık 5.7) ise paralel işletim sözkonusu olduğunda kullanılması uygun olmaktadır.

Seçkin çözümler listenin uzunluğu belirlenmesi gereken önemli bir parametredir. Çünkü bu parametre tabii bir yoğunlaşma taktiği işlevi görmektedir. 8 liste uzunluğu yöntemi değerlendirilmiştir. Bunlar "E" harfi yanına sabit liste uzunluğu yazılarak isimlendirmiştir. Bunlara ilişkin MRE değeri (Tablo 6.12) arasında istatistikî olarak önemli bir fark olmadığı söylenebilir (Tablo 6.13). Bunun yanında liste uzunluğu arttıkça taşıma sayısı artmakta (ki bunların ekserisi iyileştirmeyen taşımalarıdır) ve dolayısıyla gereksiz yere uğraşılmış olmaktadır (Tablo 6.14). Bu yüzden amaçlanan modelin seçkin çözümler listesi uzunluğu olarak, kötü olmayan MRE değerini makul iterasyonda ürettiği için E7 yöntemi, yani liste uzunluğu 7 olarak seçilmiştir.

Tablo 6.12 Seçkin çözümler listesi yöntemlerine ait MRE değerleri

| Prob\Yönt. | E7     | E5     | E8     | E9     | E10    | E12    | E15    | E17    |
|------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| ft20       | 0,009  | 0,009  | 0,009  | 0,009  | 0,009  | 0,012  | 0,012  | 0,012  |
| la11       | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      |
| la13       | 0,008  | 0,008  | 0,008  | 0,008  | 0,008  | 0,008  | 0,008  | 0,008  |
| la27       | 0,049  | 0,049  | 0,049  | 0,049  | 0,049  | 0,041  | 0,041  | 0,041  |
| la29       | 0,1    | 0,106  | 0,1    | 0,1    | 0,1    | 0,094  | 0,101  | 0,109  |
| la30       | 0,016  | 0,016  | 0,016  | 0,001  | 0,001  | 0,001  | 0,016  | 0,016  |
| swv01      | 0,063  | 0,063  | 0,063  | 0,063  | 0,063  | 0,063  | 0,063  | 0,063  |
| swv02      | 0,05   | 0,071  | 0,05   | 0,05   | 0,05   | 0,058  | 0,055  | 0,053  |
| swv03      | 0,154  | 0,144  | 0,148  | 0,092  | 0,092  | 0,15   | 0,15   | 0,144  |
| swv04      | 0,102  | 0,103  | 0,103  | 0,103  | 0,103  | 0,103  | 0,095  | 0,102  |
| swv05      | 0,129  | 0,129  | 0,129  | 0,129  | 0,129  | 0,129  | 0,129  | 0,129  |
| swv06      | 0,149  | 0,149  | 0,149  | 0,149  | 0,149  | 0,149  | 0,139  | 0,133  |
| swv07      | 0,21   | 0,21   | 0,21   | 0,21   | 0,21   | 0,21   | 0,21   | 0,21   |
| swv08      | 0,167  | 0,169  | 0,167  | 0,167  | 0,167  | 0,167  | 0,162  | 0,175  |
| swv09      | 0,17   | 0,17   | 0,17   | 0,17   | 0,169  | 0,169  | 0,169  | 0,155  |
| swv10      | 0,189  | 0,189  | 0,189  | 0,188  | 0,188  | 0,188  | 0,188  | 0,188  |
| abz5       | 0,004  | 0,004  | 0,004  | 0,004  | 0,004  | 0,004  | 0,004  | 0,004  |
| la06       | 0,011  | 0,011  | 0,011  | 0,011  | 0,011  | 0,011  | 0,011  | 0,011  |
| la22       | -0,106 | -0,106 | -0,106 | -0,106 | -0,106 | -0,106 | -0,106 | -0,086 |
| la23       | -0,006 | -0,014 | -0,006 | -0,006 | -0,014 | -0,014 | -0,014 | -0,014 |
| la25       | 0,056  | 0,056  | 0,056  | 0,056  | 0,056  | 0,056  | 0,056  | 0,056  |
| la36       | 0,027  | 0,027  | 0,027  | 0,027  | 0,027  | 0,027  | 0,027  | 0,029  |
| la37       | 0,033  | 0,033  | 0,033  | 0,033  | 0,033  | 0,033  | 0,033  | 0,033  |
| abz8       | 0,088  | 0,088  | 0,088  | 0,088  | 0,088  | 0,088  | 0,088  | 0,083  |
| ft10       | 0,063  | 0,063  | 0,063  | 0,063  | 0,063  | 0,063  | 0,063  | 0,063  |
| la02       | 0,014  | 0,014  | 0,014  | 0,014  | 0,014  | 0,014  | 0,014  | 0,014  |
| la05       | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      |
| la16       | 0,035  | 0,035  | 0,035  | 0,03   | 0,03   | 0,03   | 0,03   | 0,03   |
| la19       | 0,025  | 0,025  | 0      | 0,022  | 0,022  | 0,022  | 0,022  | 0,022  |
| orb03      | 0,039  | 0,051  | 0,039  | 0,039  | 0,039  | 0,039  | 0,039  | 0,039  |
| orb04      | 0,025  | 0,025  | 0,025  | 0,025  | 0,025  | 0,043  | 0,04   | 0,015  |
| orb05      | 0,06   | 0,06   | 0,049  | 0,06   | 0,06   | 0,06   | 0,06   | 0,06   |
| orb08      | 0,017  | 0,019  | 0,019  | 0,019  | 0,017  | 0,02   | 0,02   | 0,017  |
| orb10      | 0,007  | 0,007  | 0,007  | 0,007  | 0,007  | 0,007  | 0,007  | 0,007  |
| la34       | 0,013  | 0,013  | 0,013  | 0,013  | 0,013  | 0,013  | 0,013  | 0,013  |
| la35       | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      |
| ft06       | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      |
| orb07      | 0,02   | 0,057  | 0,02   | 0,02   | 0,02   | 0,039  | 0,039  | 0,039  |
| Ortalama:  | 0,052  | 0,054  | 0,051  | 0,050  | 0,050  | 0,052  | 0,052  | 0,052  |

Tablo 6.13 Seçkin çözümler listesi yöntemlerinin karşılaştırılması

| Yöntem\Yöntem | E5     | E8     | E9     | E10    | E12    | E15    | E17    |
|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| E7            | 0,0894 | 0,0837 | 0,0997 | 0,0739 | 0,4888 | 0,4256 | 0,3470 |

Tablo 6.14 Seçkin çözümler listesi yöntemlerinin ürettiği tabu arama parametre değerleri

| Prmt\Yöntem | E7    | E5    | E8    | E9    | E10    | E12    | E15    | E17    |
|-------------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|
| MRI         | 0,157 | 0,156 | 15,83 | 0,159 | 0,16   | 0,157  | 0,158  | 0,158  |
| MRE %       | 5,2   | 5,4   | 5,13  | 5     | 4,99   | 5,2    | 5,2    | 5,2    |
| MEN(br)     | 20871 | 17119 | 22907 | 24821 | 26393  | 27490  | 30830  | 33681  |
| MMN(br)     | 3279  | 2665  | 3691  | 3916  | 4288   | 4354   | 4893   | 5262   |
| TIME(sn)    | 80,05 | 68,16 | 88,16 | 94,63 | 101,79 | 105,34 | 119,42 | 131,11 |
| LBE(br)     | 4     | 4     | 5     | 4     | 4      | 4      | 4      | 4      |
| LBI(br)     | 2     | 2     | 2     | 2     | 2      | 2      | 2      | 2      |
| MIMN(br)    | 42,87 | 42,39 | 43,11 | 44,29 | 44,37  | 43,32  | 43,55  | 43,97  |
| MIM(%)      | 1,31  | 1,59  | 0,23  | 1,13  | 0,23   | 0,99   | 0,89   | 0,84   |
| MDIM(%)     | 98,69 | 98,41 | 99,77 | 98,87 | 99,77  | 99,01  | 99,11  | 99,16  |
| IB(%)       | 51,24 | 54,82 | 45,28 | 48,75 | 46,46  | 43,18  | 37,60  | 34,49  |

### 6.3.7 Yoğunlaşma taktiği

Yoğunlaşma taktiğinin amacının arama uzayının iyi bölgelerini keşfederek orayı daha derinlemesine aramak olduğu daha önce ifade edilmişti. Bu işlem genellikle, yukarıda açıklanan bir seçkin çözümler listesi yardımıyla yapılır.

Bir seçkin çözümler listesini işletme düzeneği, yoğunlaşma taktiğini de şekillendirecektir. Bu düzende önemli unsurlardan birisi seçkin çözümler listesine üye kaydetme koşullarını tesbit etmektir. Bunlar mesafe ölçüsü uygulayıp uygulamama, kısa-dönem hafızanın da beraber kaydedilip kaydedilmemesidir. Bir diğer önemli unsur tekrar ele alınmak üzere listeden seçkin bir çözümün geri çağırılması koşullarını tesbit etmektir. Bunlar, en son kaydedilenin mi? veya en önce kaydedilenin mi? önce çağrılacağı, yoksa rastgele seçim mi? yapılacağı konularıdır. Bir diğeri ise listeye kaydedilen seçkin çözümlere ait bazı özelliklerin tekrar arama boyunca nasıl kullanılacağını belirlemektir. Bunlar tekrar ele alınmış bir seçkin çözümde aramaya onun ziyaret edilmemiş komşularından başlatma, bu seçkin çözümdeki bazı işlemleri belli pozisyonlara kilitleme ve işlemlerin seçkin çözümlerde yer alma frekansının takip edilerek istikrarlı ve sıkı değişkenleri belirleyip bunların tercih edilen değerlerinin yer alıp almamasını sağlamak şeklinde olabilir.

Seçkin çözümler listesinin işletme biçimi, dikkat çekici bir şekilde, yoğunlaşma taktiği kadar genişletme taktiğini de beraberce oluşturmaktadır. Özellikle seçkin çözümler listesinden tekrar ele alınmak üzere geri çağırılan bir çözümde arama yönünün öncekinden farklı olmasını sağlayıcı bir düzenek kurmak son derece önemlidir. Açık ki bunlar yoğunlaşma kadar genişletmeyi de sağlayacaktır.

Tüm bu değerlendirmeler dikkate alınarak birkaç değişik seçkin çözümler listesi işletme düzeneği test edilmiştir. Bunlar:

- YOG1: Seçkin çözümler listesine önce giren önce geri çağrılır ve tabu listesi boşaltılır.
- YOG2: Seçkin çözümler listesine sonra giren önce geri çağrılır ve tabu listesi boşaltılır.
- YOG3: Seçkin çözümler listesinden rastgele seçim yapılır ve tabu listesi boşaltılır.
- YOG4: Seçkin çözümler listesine sonra giren önce geri çağrılır ve o çözüme ait tabu listesi korunur ve yeni bir çözüm yolu açılın diye o çözümden sonra yapılan ilk taşıma yasaklanır.
- YOG5: Seçkin çözümler listesine sonra giren önce geri çağrılır ve seçkin o çözümün bulunmasından itibaren tabu listesi uzunluğu kadar iterasyon sonraki tabu listesi o seçkin çözümlerle beraber korunur. Böylece önceki arama yolundan farklı bir yol izlenmesi garantilenmiş olur.

YOG5 yöntemi ile diğerleri MRE değerleri (Tablo 6.16) bakımından ikili karşılaştırıldığında, Tablo 6.17'da görüldüğü gibi, YOG1'den daha iyi iken diğerleri ile anlamlı bir fark yoktur. Ayrıca Tablo 6.15'deki diğer çeşitli değerler arasında da pek fark olmadığı görülüyor. Neticede, amaçlanan model için aralarında anlamlı bir fark olmayan yöntemlerden YOG5 tercih edilmiştir.

Tablo 6.15 Yoğunlaşma taktiklerinin ürettiği tabu arama parametre değerleri

| Prmt.\Yönt. | YOG5  | YOG1  | YOG2  | YOG3  | YOG4  |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| MRI(%)      | 15,6  | 12,8  | 15,6  | 15,6  | 15,5  |
| MRE(%)      | 5,4   | 8,3   | 5,4   | 5,4   | 5,5   |
| TIME(sn)    | 68,16 | 74,21 | 66,03 | 66    | 62,58 |
| LBE(br)     | 4     | 3     | 4     | 4     | 4     |
| LBI(br)     | 2     | 2     | 2     | 2     | 2     |
| MIMN(br)    | 42,39 | 42,03 | 42,26 | 42,53 | 41,74 |
| MIM(%)      | 1,59  | 1,52  | 1,62  | 1,60  | 1,61  |
| MDIM(%)     | 98,41 | 98,48 | 98,38 | 98,40 | 98,39 |
| IBN         | 1461  | 1594  | 1365  | 1522  | 1322  |
| IB(%)       | 54,82 | 57,52 | 52,20 | 57,09 | 51,02 |
| MEN(br)     | 17119 | 17832 | 16645 | 16934 | 16359 |
| MMN(br)     | 2665  | 2771  | 2615  | 2666  | 2591  |

Tablo 6.16 Yoğunlaşma taktiklerine ait MRE değerleri

| Prob\Yöntem | YOG5   | YOG1   | YOG2   | YOG3   | YOG4   |
|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| ft20        | 0,009  | 0,093  | 0,009  | 0,009  | 0,025  |
| la11        | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      |
| la13        | 0,008  | 0,008  | 0,008  | 0,008  | 0,008  |
| la27        | 0,049  | 0,046  | 0,049  | 0,046  | 0,052  |
| la29        | 0,106  | 0,109  | 0,106  | 0,078  | 0,106  |
| la30        | 0,016  | 0,052  | 0,016  | 0,016  | 0,016  |
| swv01       | 0,063  | 0,088  | 0,063  | 0,063  | 0,063  |
| swv02       | 0,071  | 0,092  | 0,071  | 0,071  | 0,05   |
| swv03       | 0,144  | 0,172  | 0,15   | 0,155  | 0,152  |
| swv04       | 0,103  | 0,094  | 0,103  | 0,103  | 0,097  |
| swv05       | 0,129  | 0,129  | 0,129  | 0,129  | 0,129  |
| swv06       | 0,149  | 0,145  | 0,149  | 0,145  | 0,134  |
| swv07       | 0,21   | 0,21   | 0,21   | 0,21   | 0,21   |
| swv08       | 0,169  | 0,177  | 0,169  | 0,169  | 0,192  |
| swv09       | 0,17   | 0,17   | 0,17   | 0,17   | 0,2    |
| swv10       | 0,189  | 0,189  | 0,189  | 0,189  | 0,182  |
| abz5        | 0,004  | 0,004  | 0,004  | 0,004  | 0,004  |
| la06        | 0,011  | 0,011  | 0,011  | 0,011  | 0,011  |
| la22        | -0,106 | -0,034 | -0,106 | -0,106 | -0,106 |
| la23        | -0,014 | -0,014 | -0,014 | -0,014 | -0,014 |
| la25        | 0,056  | 0,102  | 0,056  | 0,056  | 0,066  |
| la36        | 0,027  | 0,033  | 0,027  | 0,027  | 0,027  |
| la37        | 0,033  | 0,078  | 0,033  | 0,033  | 0,033  |
| abz8        | 0,088  | 0,13   | 0,088  | 0,094  | 0,112  |
| ft10        | 0,063  | 0,112  | 0,063  | 0,063  | 0,04   |
| la02        | 0,014  | 0,09   | 0,014  | 0,014  | 0,014  |
| la05        | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      |
| la16        | 0,035  | 0,03   | 0,03   | 0,03   | 0,035  |
| la19        | 0,025  | 0,097  | 0,025  | 0,025  | 0,009  |
| orb03       | 0,051  | 0,186  | 0,051  | 0,051  | 0,053  |
| orb04       | 0,025  | 0,043  | 0,043  | 0,043  | 0,026  |
| orb05       | 0,06   | 0,162  | 0,06   | 0,06   | 0,06   |
| orb08       | 0,019  | 0,099  | 0,02   | 0,02   | 0,019  |
| orb10       | 0,007  | 0,149  | 0,007  | 0,01   | 0,007  |
| la34        | 0,013  | 0,013  | 0,013  | 0,013  | 0,013  |
| la35        | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      |
| ft06        | 0      | 0,068  | 0      | 0      | 0      |
| orb07       | 0,057  | 0,039  | 0,039  | 0,039  | 0,057  |
| Ortalama:   | 0,054  | 0,083  | 0,054  | 0,054  | 0,055  |

Tablo 6.17 Yoğunlaşma taktiklerinin karşılaştırılması

| Yöntem\Yöntem | YOG1   | YOG2   | YOG3   | YOG4   |
|---------------|--------|--------|--------|--------|
| YOG5          | 0,0000 | 0,4707 | 0,3230 | 0,3258 |

### 6.3.8 Genişletme taktiği

Seçkin çözüm olarak, en iyi çözümü iyileştiren taşımanın kabul edilmesi yanında alternatif olarak, seçkin çözümlerin kafi derecede birbirinden farklı (taşıma mesafesi uzun) olması istenebilir. Tablo 6.18'de beş farklı Hamming mesafesine ait MRE değerleri karşılaştırılmıştır.

Tablo 6.18 Taşıma mesafesi yöntemlerine ait MRE değerleri

| Prob\Yöntem | HM1    | HM2    | HM3    | HM4    | HM5    |
|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| ft20        | 0,009  | 0,009  | 0,009  | 0,009  | 0,009  |
| la11        | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      |
| la13        | 0,008  | 0,008  | 0,008  | 0,008  | 0,008  |
| la27        | 0,049  | 0,049  | 0,049  | 0,049  | 0,049  |
| la29        | 0,106  | 0,106  | 0,106  | 0,1    | 0,1    |
| la30        | 0,016  | 0,001  | 0,001  | 0,001  | 0,001  |
| swv01       | 0,063  | 0,063  | 0,074  | 0,074  | 0,074  |
| swv02       | 0,071  | 0,059  | 0,059  | 0,059  | 0,059  |
| swv03       | 0,144  | 0,15   | 0,15   | 0,15   | 0,15   |
| swv04       | 0,103  | 0,102  | 0,105  | 0,097  | 0,097  |
| swv05       | 0,129  | 0,129  | 0,129  | 0,129  | 0,133  |
| swv06       | 0,149  | 0,122  | 0,157  | 0,157  | 0,157  |
| swv07       | 0,21   | 0,21   | 0,21   | 0,21   | 0,21   |
| swv08       | 0,169  | 0,173  | 0,173  | 0,173  | 0,173  |
| swv09       | 0,17   | 0,17   | 0,17   | 0,17   | 0,17   |
| swv10       | 0,189  | 0,189  | 0,189  | 0,189  | 0,189  |
| abz5        | 0,004  | 0,004  | 0,004  | 0,004  | 0,004  |
| la06        | 0,011  | 0,011  | 0,011  | 0,011  | 0,011  |
| la22        | -0,106 | -0,085 | -0,085 | -0,085 | -0,085 |
| la23        | -0,014 | -0,006 | -0,006 | -0,006 | -0,006 |
| la25        | 0,056  | 0,066  | 0,066  | 0,066  | 0,066  |
| la36        | 0,027  | 0,027  | 0,022  | 0,022  | 0,022  |
| la37        | 0,033  | 0,033  | 0,033  | 0,033  | 0,033  |
| abz8        | 0,088  | 0,103  | 0,103  | 0,103  | 0,103  |
| ft10        | 0,063  | 0,063  | 0,463  | 0,063  | 0,063  |
| la02        | 0,014  | 0,014  | 0,014  | 0,014  | 0,014  |
| la05        | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      |
| la16        | 0,035  | 0,035  | 0,035  | 0,035  | 0,035  |
| la19        | 0,025  | 0,028  | 0,028  | 0,028  | 0,028  |
| orb03       | 0,051  | 0,051  | 0,051  | 0,051  | 0,051  |
| orb04       | 0,025  | 0,052  | 0,052  | 0,052  | 0,052  |
| orb05       | 0,06   | 0,06   | 0,06   | 0,06   | 0,064  |
| orb08       | 0,019  | 0,017  | 0,017  | 0,019  | 0,019  |
| orb10       | 0,007  | 0,007  | 0,007  | 0,007  | 0,007  |
| la34        | 0,013  | 0,013  | 0,013  | 0,013  | 0,013  |
| la35        | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      |
| ft06        | 0      | 0      | 0      | 0,676  | 0,676  |
| orb07       | 0,057  | 0,02   | 0,02   | 0,02   | 0,043  |
| Ortalama:   | 0,054  | 0,054  | 0,055  | 0,073  | 0,073  |

Elde edilen iyileştiren çözümlerin seçkin çözüm olarak kabul edilebilmesinde belli bir taşıma mesafesi ölçütü uygulayarak bir genişletme sağlama amacıyla MRE değerleri (Tablo 6.18) test edilen çeşitli mesafe yöntemleri arasında, beklenilen aksine, istatistiki bir farkın olmadığı görülüyor (Tablo 6.19). Dikkat edilirse mesafe arttırıldığında ortalama MRE değerinin beklenilenin tam aksine daha da kötüleştiği görülüyor (Tablo 6.20). Problem çözümlerine bakıldığında (Tablo 6.18) bunun tamamen ft06 probleminden kaynaklandığı hemen görülüyor. Bunun nedeni bu problem çok küçük olması olabilir.

Tablo 6.19 Taşıma mesafesi yöntemlerinin karşılaştırılması

| Yöntem\Yöntem | HM2    | HM3    | HM4    | HM5    |
|---------------|--------|--------|--------|--------|
| HM1           | 0,5000 | 0,2346 | 0,1515 | 0,1407 |

Tablo 6.20 Taşıma mesafesi yöntemlerinin ürettiği tabu arama parametre değerleri

| Prmt.\Yönt. | HM1   | HM2   | HM3   | HM4   | HM5   |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| MRI         | 15,6  | 15,6  | 15,5  | 12,1  | 12    |
| MRE         | 5,4   | 5,4   | 5,5   | 7,3   | 7,3   |
| MEN(br)     | 17119 | 16490 | 16173 | 16272 | 15969 |
| MMN(br)     | 2665  | 2541  | 2494  | 2502  | 2454  |
| TIME(sn)    | 68,16 | 65,53 | 63,97 | 64,92 | 64,50 |
| LBE(br)     | 4     | 4     | 4     | 3     | 3     |
| LBI(br)     | 2     | 2     | 2     | 2     | 2     |
| MIMN(br)    | 42,39 | 42,71 | 41,71 | 42    | 41,82 |
| MIM(%)      | 1,59  | 1,68  | 1,67  | 1,67  | 1,70  |
| MDIM(%)     | 98,41 | 98,32 | 98,33 | 98,33 | 98,30 |
| IB(%)       | 54,82 | 52,34 | 51,72 | 52,92 | 52,53 |

Neticede, amaçlanan modelde genişletme için mesafe uygulanmamıştır, yani mesafe 1 olarak kalmıştır.

Diğer bir genişletme taktiği olarak iyileştirmeyen taşımaları cezalandırma uygulanmıştır. Bunun için başlangıç araması müddetince iyileştirmeyen taşıma işlemleri için birer sayaç oluşturulmuştur. Yoğunlaşma amacıyla seçkin çözümlere geri dönüldüğünde bu sayaç değerlerine göre amaç fonksiyonu değiştirilmektedir. Bunun için aşağıda 9 değişik yöntem oluşturulmuştur. Bunlardan C0 yöntemi hiçbir ceza uygulamamayı gerektirir. C1\_1 birinci işleme ve amaç fonksiyonunu 1 kat değiştirecek şekilde ceza uygulamayı gerektirir. Benzer şekilde C1\_10 yöntemi 1/10 oranında, C1\_25 1/25 oranında, C1\_50 1/50 oranında, C1\_100 1/100 oranında ve C1\_200 1/200 oranında ceza uygulamayı gerektirir. C100 yöntemi yer değiştiren her iki işleme

birden 1/100 oranında ve C200 ise 1/200 oranında ceza uygulamayı gerektirir.

Tablo 6.21'deki değerlere bakıldığında, ceza uygulandığında umulanın aksine MRE değerlerinin kötüleşmiş olduğu görülmektedir. Neticede, amaçlanan modelde genişletme için iyileştirmeyen taşımalara herhangi bir ceza uygulama yöntemi kullanılmamıştır.

Tablo 6.21 İyileştirmeyen taşımaları cezalandırmayla genişletme yöntemlerinin ürettiği tabu arama parametre değerleri

| Prmt\Yönt | C0    | C1_1  | C1_10 | C1_25 | C1_50 | C1_100 | C1_200 | C100  | C200  |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|-------|-------|
| MRI(%)    | 15,6  | 13,8  | 13,8  | 13,8  | 13,8  | 13,8   | 13,8   | 13,9  | 13,8  |
| MRE(%)    | 5,4   | 7,3   | 7,3   | 7,3   | 7,3   | 7,3    | 7,3    | 7,2   | 7,3   |
| MEN(br)   | 17119 | 13439 | 13457 | 13357 | 13404 | 13395  | 13146  | 13068 | 12949 |
| MMN(br)   | 2665  | 1867  | 1867  | 1802  | 1867  | 1876   | 1876   | 1766  | 1794  |
| TIME(sn)  | 68,16 | 51,89 | 51,87 | 4,71  | 53,61 | 53,37  | 50,71  | 34,68 | 34,68 |
| LBE(br)   | 4     | 3     | 3     | 4     | 3     | 3      | 3      | 5     | 4     |
| LBI(br)   | 2     | 1     | 1     | 1     | 1     | 1      | 1      | 1     | 1     |
| MIMN(br)  | 42,39 | 34,66 | 34,66 | 34,06 | 34,66 | 34,68  | 34,68  | 34,97 | 34,98 |
| MIM(%)    | 1,59  | 0,01  | 0,01  | 1,89  | 0,01  | 0,01   | 0,01   | 1,98  | 1,95  |
| MDIM(%)   | 98,41 | 99,99 | 99,99 | 98,11 | 99,99 | 99,99  | 99,99  | 98,02 | 98,05 |
| MRIB(%)   | 54,82 | 21,43 | 21,43 | 424   | 21,43 | 22,49  | 21,78  | 23,78 | 23,41 |

### 6.3.9 İterasyon sayısı

Üç tip iterasyon şekli denenmiştir. Bunlardan ilki olan tekrarlı-tip iterasyon şöyle işlemektedir: İlk etapta belli bir başlangıç iterasyonu öngörülür, her seçkin çözümde bu iterasyon sayacı sıfırlanır ve iyileştirmeyen iterasyon sayısı bu başlangıç iterasyonuna ulaştığında başlangıç araması sona erer. Sonra her seçkin çözüm tekrar ele alındığında yine belli bir iterasyon sayısınca iyileştirmeyen taşımalar yapılır. Bu tip bir iterasyon yapısının çeşitli değerleri için (*başlangıç\_iterasyonu x tekrar\_iterasyonu*) şeklinde isimlendirilen dokuz yöntem oluşturulmuştur. Bu yöntemlere ilişkin elde edilen sonuçlar Tablo 6.22a'da verilmiştir.

İkinci tip iterasyon çeşidi olan dinamik-tip iterasyonun işleyişi şöyledir: Önce minimum ve maksimum iterasyon sayısı belirlenir, sonra bu aralıkta her seçkin çözümle karşılaşıldığında iterasyon sayacının sıfırlanması yanında, eğer o kullanılan iterasyon sayısı değeri maksimum iterasyon sayısından küçük ise yeni belli bir miktar artırılır. Eğer o arama periyodu hiçbir seçkin çözümle karşılaşılmadan bitmiş ise ve o an kullanılan iterasyon sayısı değeri minimum iterasyon sayısından büyük ise iterasyon



sayısı belli bir miktar azaltılır. Bu tip bir iterasyon yapısı için 5 yöntem oluşturulmuştur. Bunlardan DL1 yöntemi 250-2500 iterasyon sayısı değeri arasında iterasyon sayısı değerinin  $\pm 250$  değiştirilmesini gerektirir. DL2 yöntemi 250-1500 arasında iterasyon sayısı değerinin  $\pm 150$ , DL3 yöntemi 250-1000 arasında  $\pm 100$ , DL4 yöntemi 50-450 arasında  $\pm 50$  ve DL5 yöntemi 150-350 arasında  $\pm 50$  değiştirilmesini gerektirmektedir. Elde edilen sonuçlar Tablo 6.22b'de verilmiştir.

Üçüncü tip iterasyon çeşidi olan sabit-tip iterasyonun işleyişi ise şöyledir: Tıpkı tekrarlı-tip'de olduğu gibi başlangıç araması ve seçkin bir çözümün tekrar ele alınmasından sonraki arama için belli iterasyon sayısı değerleri belirlenir, ancak farklı olarak herhangi bir seçkin çözüme rastlandığında iterasyon sayacı sıfırlanmaz. Bu tip bir iterasyon yapısının çeşitli değerleri için elde edilen sonuçlar Tablo 6.22c'de verilmiştir.

Tablo 6.22'deki bu toplu sonuçlara göre iterasyon sayısının artmasıyla, doğal olarak, ortalama MRE değerleri iyileşmektedir. Bununla beraber, taşıma sayısı artacağından dolayı çözüm süresi paralel olarak artmaktadır. Ancak yapılan taşımaların büyük oranda iyileştirmeyen taşımalar olduğu görülmektedir. Sonuç olarak, makul miktardaki iyileştirmeyi makul zamanda yerine getirebilen iterasyon tipi ve sayısının tekrarlı-tip 250x250, 500x100 ve 500x250 olduğu söylenebilir. İterasyon sayısı dışında aramayı etkileyen diğer tabu arama parametre ve taktiklerinin farklılığını köreltmemesi için iterasyon yapısının tekrarlı-tip 250x250 olması kabul edilmiştir.

Tablo 6.22a İterasyon sayısı yöntemleri: Tekrarlı iterasyon tipleri

| Yöntem<br>Prmt.\ | 250x<br>100 | 250x<br>250 | 500x<br>100 | 500x<br>250 | 500x<br>500 | 1000x<br>250 | 1000x<br>500 | 1000x<br>750 | 1500x<br>250 |
|------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| MRI(%)           | 14,6        | 15,6        | 15,5        | 15,9        | 16,4        | 16,3         | 16,6         | 16,9         | 16,7         |
| MRE(%)           | 6,4         | 5,4         | 5,4         | 5,1         | 4,5         | 4,6          | 4,3          | 4,0          | 4,2          |
| MEN(br)          | 8229        | 17119       | 12036       | 18297       | 32054       | 22665        | 34229        | 46480        | 31993        |
| MMN(br)          | 1292        | 2665        | 1886        | 2892        | 5082        | 3628         | 5478         | 7425         | 5233         |
| TIME(sn)         | 31,42       | 68,16       | 47,37       | 70,92       | 124,39      | 87,37        | 132          | 181,47       | 128,11       |
| LBE(br)          | 4           | 4           | 6           | 6           | 7           | 7            | 7            | 7            | 7            |
| LBI(br)          | 2           | 2           | 2           | 2           | 2           | 2            | 2            | 2            | 2            |
| MIMN(br)         | 38,21       | 42,39       | 42,53       | 44,08       | 47,11       | 46,45        | 48,45        | 50,66        | 49,16        |
| MIM(%)           | 2,96        | 1,59        | 2,26        | 1,52        | 0,93        | 1,28         | 0,88         | 0,68         | 0,94         |
| MDIM(%)          | 97,04       | 98,41       | 97,74       | 98,48       | 99,07       | 98,72        | 99,12        | 99,32        | 99,06        |
| IB(%)            | 53,56       | 54,82       | 65,38       | 57,43       | 54,17       | 57,75        | 53,89        | 52,5         | 60,52        |
| MMT(sn)          | 0,0038      | 0,004       | 0,0039      | 0,0039      | 0,0039      | 0,0039       | 0,0039       | 0,0039       | 0,0040       |

Tablo 6.22b İterasyon sayısı yöntemleri: Devingen iterasyon tipleri

| Yöntem<br>Prmt.\ | DL5    | DL4    | DL3    | DL2    | DL1    |
|------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| MRI(%)           | 15,5   | 16,2   | 17,2   | 17,4   | 17,8   |
| MRE(%)           | 5,5    | 4,7    | 3,7    | 3,4    | 3,0    |
| MEN(br)          | 17520  | 24441  | 50289  | 69237  | 119895 |
| MMN(br)          | 2833   | 4005   | 8356   | 11891  | 20473  |
| TIME(sn)         | 70,32  | 98,89  | 202,68 | 290,74 | 524,26 |
| LBE(br)          | 5      | 7      | 7      | 7      | 7      |
| LBI(br)          | 2      | 2      | 2      | 2      | 2      |
| MIMN(br)         | 43,21  | 46,61  | 52,13  | 53,58  | 56,29  |
| MIM(%)           | 1,53   | 1,16   | 0,62   | 0,45   | 0,27   |
| MDIM(%)          | 98,47  | 98,84  | 99,38  | 99,55  | 99,73  |
| MRIB(%)          | 53,84  | 56,93  | 51,78  | 48,65  | 51,25  |
| MMT(sn)          | 0,0040 | 0,0040 | 0,0040 | 0,0042 | 0,0044 |

Tablo 6.22c İterasyon sayısı yöntemleri: Sabit iterasyon tipleri

| Yöntem<br>Prmt.\ | S250x<br>100 | S750x<br>100 | S1000x<br>100 | S250x<br>250 | S500x<br>250 | S500x<br>500 | S1000x<br>500 | S1000x<br>1000 |
|------------------|--------------|--------------|---------------|--------------|--------------|--------------|---------------|----------------|
| MRI(%)           | 13,8         | 14,7         | 15            | 15,2         | 15,4         | 16,1         | 16,4          | 16,9           |
| MRE(%)           | 7,3          | 6,3          | 6             | 5,8          | 5,7          | 4,9          | 4,6           | 3,9            |
| MEN(br)          | 6071         | 8432         | 9707          | 10727        | 16114        | 29450        | 31708         | 53267          |
| MMN(br)          | 978          | 1368         | 1567          | 1829         | 2518         | 4643         | 5048          | 8728           |
| TIME(sn)         | 23,37        | 30,84        | 36,05         | 39,5         | 52,32        | 115,58       | 123           | 197,66         |
| LBE(br)          | 4            | 4            | 4             | 2            | 4            | 6            | 5             | 7              |
| LBI(br)          | 1            | 1            | 2             | 2            | 2            | 2            | 2             | 2              |
| MIMN(br)         | 33,95        | 38,82        | 39,45         | 40,58        | 41,37        | 46,05        | 46,87         | 49,05          |
| MIM(%)           | 3,47         | 2,84         | 2,52          | 2,22         | 1,64         | 0,99         | 0,93          | 0,56           |
| MDIM(%)          | 96,53        | 97,16        | 97,48         | 97,78        | 98,36        | 99,01        | 99,07         | 99,44          |
| MRIB(%)          | 49,59        | 58,11        | 61,52         | 56,31        | 56,24        | 54,66        | 53,35         | 51,80          |
| MMT(sn)          | 0,0038       | 0,0037       | 0,0037        | 0,0037       | 0,0032       | 0,0039       | 0,0039        | 0,0037         |

## BÖLÜM 7. DENEY ÇALIŞMASI

### 7.1 Deney Tasarımı

#### 7.1.1 Atölye özellikleri

Deney çalışmalarında, belirlenmesi gereken parametrelerden birisi atölye büyüklüğü ve atölye kullanım seviyesidir. Kiran ve Smith (1984 a), atölye benzetimi literatüründe çoğu çalışmadaki tezgah sayısının 4-15 aralığında yer aldığını ve 4 tezgahlı bir atölyenin genelleştirme için yeterince büyük olarak kabul edilebileceğini belirtir. Blackstone (1982) göre, atölye büyüklüğü kuralların nisbi başarısını etkilemez. Sim ve diğerleri (1994) göre ise, kullanım yüzdeliği veya işyükü seviyeleri sabit olduğunda, atölye büyüklüğü önemli bir faktör değildir. Ayrıca, atölye tipi çizelgeleme literatürde yer alan test problemlerine bakıldığında tezgah sayısının genellikle 5,10,15 ve 20 gibi değerler olduğu görülmektedir. Sonuç olarak, bu çalışmalarda atölye büyüklüğü bir temel değişken olarak görülmediğinden dolayı nisbeten küçük atölyelerle deney yapılması ve çıkarılan sonucun genelleştirilmesi makul görünmektedir. Bu yüzden, bu çalışma deneylerinde tezgah sayısı 10 olarak alınmıştır.

Kiran ve Smith (1984a)'e göre, iş geliş şekli, rotalama ve işlem sürelerinin birleşik etkisi kullanım seviyesini belirler. Kullanım seviyesi ise kuyruk uzunluklarını etkilediği için önemlidir. Bu da atölye başarısını etkiler. Sim ve diğerleri (1994)'e göre ise, atölyedeki iş geliş şekli öncelik kurallarının değerlendirilmesinde tek başına önemli bir faktör değildir. Ancak, atölye işyükü ve kullanım seviyesi genellikle çizelgeleme başarısını etkiler. Bu yüzden bu çalışma deneylerinde üç farklı iş yükü seviyesi kullanılmıştır: 30 iş (ağır iş yükü), 20 iş (normal iş yükü) ve 15 iş (hafif iş yükü).

#### 7.1.2 İş özellikleri

Sim ve diğerleri (1994)'de belirtildiğine göre, işlerin işlem sayıları (sıraları) ve her işlemin süreç ve hazırlık süresi genellikle makul doğrulukta bilinir (sabit kabul

edilebilir). Kiran ve Smith (1984a) atölye başarısının iş özellikleri ve sevketme kuralları tarafından etkilendiğine işaret etmiştir. İş özelliklerinden hazırlık süresinin etkisi, onun ortalama işlem süresine ilişkin değerine bağlıdır. Bu yüzden bu çalışma deneylerinde işlerin işlem sayıları sabit ve tezgah sayısınca (yani, 10) olduğu kabul edilmiştir. Hazırlık sürelerinin onların işlem sürelerine eklenmiş olduğu kabul edilmiştir. İşlerin işlem sürelerinin sabit ve önceden bilindiği de kabul edilmiştir. İşlerin işlem sürelerini ve rotalarını üretmek için Tailard (1993)'un kullandığı üreteç kullanılmıştır (bkz. Ek-A). Buna göre her bir problemin işlem süreleri ve rotası için ayrı ayrı kök sayılar (bkz. Tablo A.1) kullanılmıştır. İşlem süreleri 1-99 aralığında üniform dağılımdan üretilmiştir.

Blackstone ve diğerleri (1982)'e göre, en basit ve en yaygın teslim tarihi atama yöntemi toplam iş içeriği yöntemidir. Herbir işin teslim tarihi şöyle atanır:

$$\text{İşin\_teslim\_tarihi} = \text{İşin\_geliş\_zamanı} + k * \text{İşin\_bütün\_işlemlerin toplamsüresi}$$

Burada  $k$ 'nın 5-7 gibi değerler aldığı makul bir teslim tarihi atanmış olmaktadır (Sim ve diğerleri (1994), Elvers ve Taube (1983)).

Bizim deneylerimizde üç farklı teslim tarihi sıklığı kullanılmıştır; ki  $k=1,5$  (sıkı), 3 (normal) ve 4,5 (gevşek) olarak alınmıştır.

### 7.1.3 Çizelgeleme özellikleri

Çizelgeleme yöntemlerinin başarısını değerlendirmede kullanılan pekçok ölçüt vardır ve onlar kullanılarak en iyi sevketme kuralı belirlenmeye çalışılacaktır. Bu çok yaygın ölçütler arasında bizim deney çalışmamızda ortalama akış süresi, ortalama pozitif gecikme, en büyük tamamlanma zamanı ve ortalama tezgah boş bekleme oranı olmak üzere dört tanesinin dikkate alınacağı kabul edilmiştir.

## 7.2 Yöntem Karşılaştırmaları

Başlangıç çözümü üretmede dikkate alınan 4 başarı ölçütü için 13 basit öncelik kuralı ile uzman sistem karşılaştırılmaktadır. Bu karşılaştırmalar üç farklı atölye yük seviyesi ile üç farklı iş teslim sıklığının bütün kombinasyonları (toplam dokuz farklı sistem

durumu) için ayrı ayrı yapılmaktadır.

Nihai çözüm üretmede ise dokuz sistem durumu için, uzman sistem yöntemi çözümü ile uzman-başlangıçlı tabu arama yöntemi çözümü karşılaştırılmaktadır. Bunun yanında yine dokuz sistem durumu için, uzman sistemin gerçekten farklı ve daha iyi bir olup olmadığını test etmek amacıyla, uzman-başlangıçlı tabu arama yöntemi çözümü ile en iyi basit öncelik kuralı başlangıçlı tabu arama yöntemi çözümü karşılaştırılmaktadır.

### 7.3 İstatistik Test Yöntemi

Üç farklı atölye yük seviyesi, belirlenen iş özelliklerine göre (altbaşlık 7.1.2) 30'ar örnek problem üretilmiştir. Bunlardan birincisi, "ağır" atölye yükünü temsil etmek üzere FG01-FG30 problemleridir. İkincisi, "normal" atölye yükünü temsil etmek üzere FG31-FG60 problemleridir. Üçüncüsü ise, "hafif" atölye yükünü temsil etmek üzere FG61-FG90 problemleridir. Her bir yük seviyesi için üretilen bu problemlere üç farklı sıklıkta teslim tarihi atanarak toplam dokuz farklı sistem durumu öngörülmüştür. Deney çalışmasında her bir durum için üretilen bu problemler üzerinde çeşitli yöntemler karşılaştırılmıştır.

Bütün karşılaştırmalarda hipotez testi olarak tek-yönlü eşlendirilmiş t-testi kullanılmıştır (bkz. Ek-D). Eşlendirilmiş t-testinin kullanılmasının nedeni "bağımlı" örneklerle ilgili gözlem değerlerinin karşılaştırılmasının sözkonusu olmasıdır. Burada karşılaştırılacak her yöntemde kullanılan örnek problemler aynıdır. Diğer bir deyişle, aynı örnek problemler üzerinde farklı yöntemlerin ürettiği çözüm değerleri karşılaştırılmaktadır. Sonuç olarak örneklerin bağımlı, örnek sayısının yeterince büyük ve sayısal değerlerin testi sözkonusu olduğundan eşlendirilmiş t-testi uygun bir test istatistiği üretecektir. Tek yönlü olmasının nedeni ise geliştirilen çözüm yöntemlerinin karşılaştırılacak olanlardan sadece farklı olması değil, aynı zamanda daha iyi olduğu öngörüsü yüzündendir. Buna göre, herbir karşılaştırma için  $H_0$  hipotezi ve  $H_1$  ya da alternatif hipotezi aşağıdaki gibidir:

$H_0 : f_{ki} = f_{ji}$  ( $i$ : problem indeksi,  $j$ : yöntem indeksi,  $k$ : geliştirilen yöntemin indeksi)

$H_1 : f_{ki} < f_{ji}$  (bütün ölçütler için en küçük değerler daha iyi).

#### 7.4 Uzman Sistem ile Basit Öncelik Kurallarının Karşılaştırılması

Birinci sistem durumu atölye yükünün “ağır” ve iş tesliminin “kritik-gecikmede” olduğu durumdur. Bunun için, FG01-30 problemleri üzerinde  $k=1,5$  için üretilen ortalama akış değerleri (Tablo 7.1) karşılaştırılmıştır. Uzman sistem yöntemi ile basit öncelik kurallarının ikili karşılaştırılması neticesinde üretilen test istatistiğine göre, 0,0000 anlam düzeyinde bile uzman sistemin bütün basit öncelik kurallarından farklı ve daha iyi olduğu söylenebilir (Tablo 7.2).

Tablo 7.1 Çeşitli öncelik seçketme kuralları ile uzman sistemin FG01-30 problemleri üzerinde  $k=1,5$  için ürettiği ortalama akış değerleri

| PROB      | AYO   | SPT    | EDD    | MST    | COV    | MOD    | SPRO   | Sprw   | Mwkr   | MPNR   | LTWK   | MDD    | ATC  | LWKR   | US     |
|-----------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|------|--------|--------|
| FG01      | 1,132 | 1365   | 1368   | 1553   | 1396   | 1378   | 1413   | 1381   | 1744   | 1709   | 1368   | 1384   | 1451 | 1377   | 1277   |
| FG02      | 1,187 | 1398   | 1425   | 1592   | 1460   | 1317   | 1474   | 1469   | 1724   | 1709   | 1425   | 1388   | 1506 | 1317   | 1302   |
| FG03      | 1,151 | 1390   | 1321   | 1632   | 1396   | 1328   | 1402   | 1452   | 1732   | 1730   | 1321   | 1294   | 1456 | 1328   | 1312   |
| FG04      | 1,110 | 1372   | 1338   | 1587   | 1438   | 1354   | 1417   | 1384   | 1746   | 1665   | 1338   | 1350   | 1522 | 1354   | 1330   |
| FG05      | 1,163 | 1365   | 1370   | 1682   | 1440   | 1365   | 1502   | 1401   | 1746   | 1707   | 1370   | 1331   | 1524 | 1365   | 1350   |
| FG06      | 1,147 | 1321   | 1240   | 1549   | 1309   | 1253   | 1366   | 1317   | 1704   | 1670   | 1240   | 1222   | 1466 | 1253   | 1280   |
| FG07      | 1,179 | 1383   | 1435   | 1614   | 1383   | 1420   | 1486   | 1431   | 1676   | 1725   | 1435   | 1387   | 1557 | 1420   | 1338   |
| FG08      | 1,164 | 1313   | 1289   | 1542   | 1339   | 1292   | 1349   | 1427   | 1600   | 1627   | 1289   | 1276   | 1376 | 1277   | 1252   |
| FG09      | 1,204 | 1320   | 1347   | 1571   | 1313   | 1335   | 1405   | 1355   | 1721   | 1703   | 1347   | 1314   | 1463 | 1335   | 1256   |
| FG10      | 1,149 | 1298   | 1345   | 1483   | 1344   | 1299   | 1402   | 1347   | 1654   | 1612   | 1345   | 1313   | 1395 | 1322   | 1263   |
| FG11      | 1,111 | 1341   | 1401   | 1643   | 1374   | 1378   | 1431   | 1459   | 1771   | 1775   | 1401   | 1403   | 1462 | 1378   | 1323   |
| FG12      | 1,197 | 1331   | 1280   | 1582   | 1335   | 1280   | 1408   | 1381   | 1721   | 1696   | 1280   | 1295   | 1438 | 1280   | 1259   |
| FG13      | 1,119 | 1276   | 1338   | 1526   | 1285   | 1268   | 1367   | 1385   | 1594   | 1632   | 1338   | 1304   | 1388 | 1267   | 1268   |
| FG14      | 1,101 | 1263   | 1279   | 1552   | 1341   | 1252   | 1390   | 1368   | 1689   | 1671   | 1279   | 1229   | 1490 | 1252   | 1284   |
| FG15      | 1,122 | 1342   | 1294   | 1526   | 1397   | 1307   | 1314   | 1348   | 1838   | 1700   | 1294   | 1302   | 1570 | 1307   | 1261   |
| FG16      | 1,195 | 1373   | 1331   | 1513   | 1356   | 1297   | 1388   | 1351   | 1717   | 1661   | 1331   | 1331   | 1434 | 1297   | 1281   |
| FG17      | 1,196 | 1345   | 1345   | 1545   | 1360   | 1363   | 1403   | 1381   | 1633   | 1696   | 1345   | 1319   | 1530 | 1363   | 1288   |
| FG18      | 1,148 | 1384   | 1363   | 1548   | 1440   | 1330   | 1401   | 1387   | 1675   | 1647   | 1363   | 1360   | 1445 | 1330   | 1339   |
| FG19      | 1,136 | 1287   | 1244   | 1404   | 1312   | 1279   | 1301   | 1273   | 1630   | 1576   | 1244   | 1257   | 1390 | 1272   | 1251   |
| FG20      | 1,164 | 1350   | 1251   | 1415   | 1355   | 1240   | 1327   | 1346   | 1670   | 1643   | 1251   | 1267   | 1425 | 1240   | 1271   |
| FG21      | 1,167 | 1391   | 1381   | 1599   | 1393   | 1392   | 1440   | 1441   | 1768   | 1748   | 1381   | 1371   | 1526 | 1392   | 1335   |
| FG22      | 1,203 | 1414   | 1357   | 1601   | 1419   | 1377   | 1445   | 1422   | 1676   | 1771   | 1357   | 1359   | 1521 | 1377   | 1321   |
| FG23      | 1,237 | 1323   | 1252   | 1461   | 1349   | 1242   | 1410   | 1356   | 1653   | 1661   | 1252   | 1287   | 1434 | 1294   | 1250   |
| FG24      | 1,171 | 1147   | 1191   | 1307   | 1168   | 1158   | 1250   | 1202   | 1434   | 1416   | 1191   | 1183   | 1223 | 1158   | 1125   |
| FG25      | 1,152 | 1379   | 1359   | 1619   | 1394   | 1383   | 1433   | 1397   | 1778   | 1730   | 1359   | 1352   | 1577 | 1383   | 1288   |
| FG26      | 1,162 | 1389   | 1383   | 1629   | 1406   | 1383   | 1477   | 1453   | 1699   | 1743   | 1383   | 1369   | 1556 | 1383   | 1293   |
| FG27      | 1,268 | 1408   | 1358   | 1615   | 1403   | 1358   | 1525   | 1408   | 1697   | 1680   | 1358   | 1348   | 1594 | 1358   | 1320   |
| FG28      | 1,152 | 1324   | 1328   | 1451   | 1340   | 1303   | 1370   | 1302   | 1620   | 1590   | 1328   | 1315   | 1403 | 1303   | 1256   |
| FG29      | 1,089 | 1247   | 1275   | 1490   | 1245   | 1266   | 1362   | 1331   | 1618   | 1608   | 1275   | 1244   | 1412 | 1266   | 1148   |
| FG30      | 1,155 | 1295   | 1318   | 1538   | 1305   | 1302   | 1423   | 1350   | 1640   | 1587   | 1318   | 1246   | 1385 | 1264   | 1232   |
| Ortalama: |       | 1337,8 | 1326,9 | 1545,6 | 1359,8 | 1316,6 | 1402,7 | 1376,8 | 1685,6 | 1669,6 | 1326,9 | 1313,3 | 1464 | 1317,1 | 1278,4 |

Tablo 7.2 Birinci sistem durumu için uzman sistem ile diğer öncelik sevketme kurallarının ürettiği ortalama akış değerleri karşılaştırılması: eşlendirilmiş-t testi istatistiği

| Yönt.\Yönt. | SPT    | EDD    | MST    | COV    | MOD    | SPRO   | Sprw   | Mwkr   | MPNR   | LTWK   | MDD    | ATC    | LWKR   |
|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| US          | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |

İkinci sistem durumu atölye yükünün “normal” ve iş tesliminin “kritik-gecikmede” olduğu durumdur. Bunun için, FG31-60 problemleri üzerinde  $k=1,5$  için üretilen ortalama pozitif gecikme değerleri (Tablo 7.3) karşılaştırılmıştır. Uzman sistem yöntemi ile basit öncelik kurallarının ikili karşılaştırılması neticesinde üretilen test istatistiğine göre, 0,001 anlam düzeyinde uzman sistemin sadece SPT ile farklı olmadığı, diğeri ile farklı ve daha iyi olduğu; 0,01 anlam düzeyinde ise uzman sistemin bütün basit öncelik kurallarından farklı ve daha iyi olduğu söylenebilir (Tablo 7.4).

Tablo 7.3 Çeşitli öncelik sevketme kuralları ile uzman sistemin FG31-60 problemleri üzerinde  $k=1,5$  için ürettiği ortalama pozitif gecikme değerleri

| PROB AYO   | SPT   | EDD   | MST   | COV   | MOD   | SPRO  | Sprw  | Mwkr  | MPNR  | LTWK  | MDD   | ATC   | LWKR  | US    |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| FG31 0,817 | 326   | 237   | 351   | 320   | 281   | 367   | 341   | 509   | 436   | 237   | 260   | 327   | 281   | 256   |
| FG32 0,775 | 267   | 290   | 388   | 291   | 308   | 347   | 332   | 476   | 442   | 290   | 263   | 384   | 300   | 266   |
| FG33 0,743 | 298   | 292   | 400   | 330   | 315   | 353   | 369   | 392   | 456   | 292   | 358   | 413   | 315   | 308   |
| FG34 0,766 | 288   | 297   | 448   | 286   | 284   | 428   | 354   | 525   | 510   | 297   | 284   | 425   | 284   | 321   |
| FG35 0,775 | 309   | 278   | 386   | 343   | 278   | 428   | 364   | 525   | 457   | 278   | 291   | 411   | 278   | 288   |
| FG36 0,762 | 337   | 339   | 359   | 354   | 306   | 373   | 352   | 401   | 367   | 339   | 281   | 397   | 306   | 299   |
| FG37 0,794 | 268   | 314   | 409   | 299   | 310   | 372   | 304   | 524   | 490   | 314   | 331   | 400   | 310   | 261   |
| FG38 0,801 | 346   | 298   | 375   | 326   | 295   | 303   | 341   | 514   | 505   | 298   | 286   | 363   | 295   | 264   |
| FG39 0,821 | 272   | 295   | 368   | 291   | 257   | 361   | 349   | 432   | 457   | 295   | 277   | 380   | 255   | 239   |
| FG40 0,763 | 236   | 304   | 411   | 258   | 267   | 322   | 355   | 384   | 392   | 304   | 274   | 333   | 271   | 270   |
| FG41 0,736 | 317   | 350   | 402   | 356   | 336   | 391   | 376   | 541   | 504   | 350   | 328   | 458   | 336   | 322   |
| FG42 0,799 | 208   | 272   | 385   | 281   | 299   | 332   | 316   | 535   | 414   | 272   | 241   | 381   | 301   | 222   |
| FG43 0,742 | 271   | 269   | 367   | 315   | 286   | 291   | 326   | 512   | 444   | 269   | 266   | 363   | 286   | 247   |
| FG44 0,709 | 314   | 359   | 397   | 275   | 339   | 375   | 408   | 495   | 393   | 359   | 338   | 404   | 339   | 267   |
| FG45 0,758 | 267   | 274   | 349   | 300   | 271   | 351   | 340   | 422   | 404   | 274   | 271   | 393   | 271   | 256   |
| FG46 0,793 | 230   | 314   | 411   | 281   | 325   | 381   | 306   | 467   | 423   | 314   | 309   | 316   | 317   | 246   |
| FG47 0,807 | 231   | 269   | 340   | 267   | 272   | 292   | 315   | 461   | 445   | 269   | 254   | 324   | 272   | 236   |
| FG48 0,754 | 295   | 251   | 416   | 311   | 303   | 350   | 363   | 431   | 466   | 251   | 272   | 433   | 303   | 275   |
| FG49 0,729 | 334   | 317   | 443   | 330   | 335   | 402   | 397   | 543   | 471   | 317   | 309   | 450   | 335   | 313   |
| FG50 0,772 | 283   | 306   | 445   | 293   | 273   | 366   | 338   | 450   | 514   | 306   | 284   | 367   | 273   | 276   |
| FG51 0,774 | 292   | 310   | 358   | 302   | 328   | 313   | 339   | 438   | 493   | 310   | 302   | 331   | 328   | 281   |
| FG52 0,8   | 316   | 347   | 470   | 340   | 333   | 470   | 432   | 577   | 535   | 347   | 371   | 468   | 354   | 340   |
| FG53 0,822 | 293   | 268   | 443   | 304   | 278   | 380   | 361   | 461   | 490   | 268   | 262   | 369   | 275   | 282   |
| FG54 0,788 | 314   | 295   | 315   | 284   | 277   | 305   | 280   | 491   | 455   | 295   | 306   | 348   | 277   | 262   |
| FG55 0,728 | 268   | 304   | 396   | 337   | 335   | 325   | 295   | 588   | 481   | 304   | 318   | 370   | 335   | 285   |
| FG56 0,772 | 324   | 332   | 417   | 392   | 338   | 459   | 473   | 514   | 488   | 332   | 325   | 370   | 338   | 259   |
| FG57 0,869 | 313   | 332   | 374   | 315   | 279   | 336   | 312   | 530   | 464   | 332   | 303   | 419   | 279   | 288   |
| FG58 0,771 | 296   | 282   | 322   | 323   | 312   | 349   | 320   | 419   | 371   | 282   | 309   | 336   | 314   | 276   |
| FG59 0,724 | 248   | 294   | 378   | 294   | 262   | 321   | 296   | 447   | 418   | 294   | 304   | 375   | 262   | 261   |
| FG60 0,828 | 255   | 289   | 315   | 255   | 301   | 288   | 305   | 486   | 419   | 289   | 296   | 315   | 301   | 222   |
| Ortalama:  | 287,2 | 299,3 | 387,9 | 308,4 | 299,4 | 357,7 | 345,3 | 483,0 | 453,5 | 299,3 | 295,8 | 380,8 | 299,7 | 272,9 |

Tablo 7.4 İkinci sistem durumu için uzman sistemi ile diğer öncelik sevketme kurallarının ürettiği ortalama pozitif gecikme değerleri karşılaştırılması: eşlendirilmiş-t testi istatistiği

| Yönt.Yönt. | SPT    | EDD    | MST    | COV    | MOD    | SPRO   | Sprw   | Mwkr   | MPNR   | LTWK   | MDD    | ATC    | LWKR   |
|------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| US         | 0.0067 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0001 | 0.0000 | 0.0000 |

Üçüncü sistem durumu atölye yükünün “hafif” ve iş tesliminin “kritik-gecikmede” olduğu durumdur. Bunun için, FG61-90 problemleri üzerinde  $k=1,5$  için üretilen ortalama pozitif gecikme değerleri (Tablo 7.5) karşılaştırılmıştır. Uzman sistem yöntemi ile basit öncelik kurallarının ikili karşılaştırılması neticesinde üretilen test istatistiğine göre, 0,01 anlam düzeyinde uzman sistemin sadece SPT ve MDD ile farklı olmadığı, diğeri ile farklı ve daha iyi olduğu; 0,03 anlam düzeyinde ise bütün basit öncelik kurallarından farklı ve daha iyi olduğu söylenebilir (Tablo 7.6).

Tablo 7.5 Çeşitli öncelik sevketme kuralları ile uzman sistemin FG61-90 problemleri üzerinde  $k=1,5$  için ürettiği ortalama pozitif gecikme değerleri

| PROB      | AYO   | SPT   | EDD   | MST   | COV   | MOD   | SPRO  | Sprw  | Mwkr  | MPNR  | LTWK  | MDD   | ATC   | LWKR  | US    |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| FG61      | 0,613 | 126   | 133   | 154   | 160   | 155   | 137   | 169   | 205   | 210   | 133   | 130   | 173   | 155   | 105   |
| FG62      | 0,619 | 163   | 122   | 199   | 160   | 179   | 169   | 164   | 316   | 269   | 122   | 130   | 144   | 179   | 118   |
| FG63      | 0,55  | 161   | 147   | 201   | 177   | 182   | 204   | 184   | 369   | 293   | 147   | 146   | 184   | 182   | 150   |
| FG64      | 0,581 | 183   | 237   | 287   | 180   | 188   | 251   | 245   | 221   | 231   | 237   | 228   | 229   | 188   | 157   |
| FG65      | 0,595 | 169   | 171   | 188   | 187   | 187   | 224   | 205   | 279   | 245   | 171   | 163   | 220   | 187   | 143   |
| FG66      | 0,582 | 105   | 116   | 212   | 147   | 134   | 196   | 149   | 233   | 211   | 116   | 110   | 187   | 139   | 147   |
| FG67      | 0,596 | 138   | 134   | 232   | 133   | 129   | 199   | 173   | 263   | 240   | 134   | 143   | 176   | 129   | 131   |
| FG68      | 0,645 | 148   | 186   | 213   | 173   | 169   | 197   | 199   | 316   | 298   | 186   | 216   | 184   | 169   | 159   |
| FG69      | 0,602 | 133   | 159   | 207   | 132   | 147   | 188   | 192   | 244   | 273   | 159   | 164   | 217   | 147   | 112   |
| FG70      | 0,571 | 180   | 206   | 227   | 180   | 202   | 166   | 194   | 267   | 259   | 206   | 198   | 201   | 202   | 154   |
| FG71      | 0,543 | 133   | 131   | 172   | 146   | 139   | 146   | 135   | 227   | 164   | 131   | 137   | 155   | 137   | 124   |
| FG72      | 0,615 | 163   | 175   | 250   | 199   | 176   | 235   | 230   | 304   | 261   | 175   | 174   | 249   | 176   | 169   |
| FG73      | 0,566 | 175   | 161   | 255   | 170   | 186   | 216   | 207   | 362   | 308   | 161   | 173   | 238   | 188   | 175   |
| FG74      | 0,526 | 176   | 182   | 222   | 196   | 160   | 210   | 199   | 250   | 269   | 182   | 186   | 230   | 160   | 174   |
| FG75      | 0,568 | 102   | 150   | 134   | 106   | 120   | 151   | 172   | 232   | 220   | 150   | 134   | 135   | 120   | 135   |
| FG76      | 0,582 | 177   | 147   | 205   | 181   | 153   | 177   | 224   | 307   | 318   | 147   | 153   | 182   | 149   | 180   |
| FG77      | 0,625 | 151   | 156   | 188   | 152   | 177   | 194   | 176   | 290   | 218   | 156   | 138   | 152   | 177   | 178   |
| FG78      | 0,566 | 183   | 155   | 201   | 212   | 161   | 190   | 191   | 350   | 320   | 155   | 159   | 226   | 161   | 160   |
| FG79      | 0,553 | 147   | 143   | 162   | 154   | 120   | 181   | 175   | 308   | 255   | 143   | 149   | 198   | 128   | 146   |
| FG80      | 0,578 | 202   | 169   | 188   | 190   | 150   | 183   | 176   | 263   | 251   | 169   | 172   | 176   | 154   | 111   |
| FG81      | 0,572 | 151   | 222   | 266   | 180   | 188   | 227   | 224   | 254   | 357   | 222   | 195   | 238   | 188   | 162   |
| FG82      | 0,602 | 201   | 226   | 205   | 202   | 236   | 191   | 238   | 256   | 251   | 226   | 227   | 223   | 236   | 170   |
| FG83      | 0,607 | 115   | 156   | 193   | 137   | 157   | 185   | 180   | 287   | 254   | 156   | 137   | 210   | 157   | 117   |
| FG84      | 0,577 | 124   | 142   | 192   | 168   | 127   | 180   | 178   | 324   | 271   | 142   | 132   | 198   | 127   | 119   |
| FG85      | 0,53  | 175   | 123   | 162   | 130   | 134   | 180   | 190   | 360   | 324   | 123   | 115   | 140   | 134   | 144   |
| FG86      | 0,584 | 242   | 236   | 308   | 214   | 230   | 263   | 293   | 383   | 282   | 236   | 227   | 314   | 258   | 263   |
| FG87      | 0,655 | 184   | 147   | 135   | 167   | 162   | 152   | 145   | 261   | 266   | 147   | 163   | 173   | 156   | 162   |
| FG88      | 0,569 | 170   | 171   | 240   | 211   | 176   | 215   | 183   | 383   | 293   | 171   | 166   | 266   | 176   | 173   |
| FG89      | 0,543 | 177   | 162   | 317   | 208   | 180   | 266   | 248   | 337   | 310   | 162   | 154   | 246   | 174   | 174   |
| FG90      | 0,627 | 219   | 245   | 232   | 201   | 229   | 277   | 240   | 314   | 401   | 245   | 224   | 214   | 229   | 170   |
| Ortalama: |       | 162,4 | 167,0 | 211,6 | 171,8 | 167,8 | 198,3 | 195,9 | 292,2 | 270,7 | 167,0 | 164,8 | 202,6 | 168,7 | 152,7 |



Tablo 7.6 Üçüncü sistem durumu için uzman sistem ile diğer öncelik sevkete kurallarının ürettiği ortalama pozitif gecikme değerleri karşılaştırılması: eşlendirilmiş-t testi istatistiği

| Yönt.\Yönt. | SPT    | EDD    | MST    | COV    | MOD    | SPRO   | Sprw   | Mwkr   | MPNR   | LTWK   | MDD    | ATC    | LWKR   |
|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| US          | 0,0271 | 0,0108 | 0,0000 | 0,0003 | 0,0030 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0108 | 0,0215 | 0,0000 | 0,0013 |

Dördüncü sistem durumu atölye yükünün “ağır” ve iş tesliminin “çokaz-gecikmede” olduğu durumdur. Bunun için, FG01-30 problemleri üzerinde  $k=3$  için üretilen ortalama akış değerleri (Tablo 7.7) karşılaştırılmıştır. Uzman sistem yöntemi ile basit öncelik kurallarının ikili karşılaştırılması neticesinde üretilen test istatistiğine göre, 0,0000 anlam düzeyinde uzman sistemin bütün basit öncelik kurallarından farklı ve daha iyi olduğu söylenebilir (Tablo 7.8).

Tablo 7.7 Çeşitli öncelik sevkete kuralları ile uzman sistemin FG01-30 problemleri üzerinde  $k=3$  için ürettiği ortalama akış değerleri

| PROB      | AYO    | SPT    | EDD    | MST    | COV    | MOD    | SPRO   | Sprw   | Mwkr   | MPNR   | LTWK   | MDD    | ATC    | LWKR   | US   |
|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|------|
| FG01      | 1,132  | 1363   | 1368   | 1553   | 1396   | 1378   | 1413   | 1381   | 1744   | 1709   | 1368   | 1384   | 1451   | 1377   | 1277 |
| FG02      | 1,187  | 1398   | 1425   | 1592   | 1460   | 1317   | 1474   | 1469   | 1724   | 1709   | 1425   | 1388   | 1506   | 1317   | 1302 |
| FG03      | 1,151  | 1390   | 1321   | 1632   | 1396   | 1328   | 1402   | 1452   | 1732   | 1730   | 1321   | 1294   | 1456   | 1328   | 1312 |
| FG04      | 1,110  | 1372   | 1338   | 1587   | 1438   | 1354   | 1417   | 1384   | 1746   | 1665   | 1338   | 1350   | 1522   | 1354   | 1330 |
| FG05      | 1,163  | 1365   | 1370   | 1682   | 1440   | 1365   | 1502   | 1401   | 1746   | 1707   | 1370   | 1331   | 1524   | 1365   | 1350 |
| FG06      | 1,147  | 1321   | 1240   | 1549   | 1309   | 1253   | 1366   | 1317   | 1704   | 1670   | 1240   | 1222   | 1466   | 1253   | 1280 |
| FG07      | 1,179  | 1383   | 1435   | 1614   | 1383   | 1420   | 1486   | 1431   | 1676   | 1725   | 1435   | 1387   | 1557   | 1420   | 1338 |
| FG08      | 1,164  | 1313   | 1289   | 1542   | 1339   | 1292   | 1349   | 1427   | 1600   | 1627   | 1289   | 1276   | 1376   | 1277   | 1252 |
| FG09      | 1,204  | 1320   | 1347   | 1571   | 1313   | 1335   | 1405   | 1355   | 1721   | 1703   | 1347   | 1314   | 1463   | 1335   | 1256 |
| FG10      | 1,149  | 1298   | 1345   | 1483   | 1344   | 1299   | 1402   | 1347   | 1654   | 1612   | 1345   | 1313   | 1395   | 1322   | 1263 |
| FG11      | 1,111  | 1341   | 1401   | 1643   | 1374   | 1378   | 1431   | 1459   | 1771   | 1775   | 1401   | 1403   | 1462   | 1378   | 1323 |
| FG12      | 1,197  | 1331   | 1280   | 1582   | 1335   | 1280   | 1408   | 1381   | 1721   | 1696   | 1280   | 1295   | 1438   | 1280   | 1259 |
| FG13      | 1,119  | 1276   | 1338   | 1526   | 1285   | 1268   | 1367   | 1385   | 1594   | 1632   | 1338   | 1304   | 1388   | 1267   | 1268 |
| FG14      | 1,101  | 1263   | 1279   | 1552   | 1341   | 1252   | 1390   | 1368   | 1689   | 1671   | 1279   | 1229   | 1490   | 1252   | 1284 |
| FG15      | 1,122  | 1342   | 1294   | 1526   | 1397   | 1307   | 1314   | 1348   | 1838   | 1700   | 1294   | 1302   | 1570   | 1307   | 1261 |
| FG16      | 1,195  | 1373   | 1331   | 1513   | 1356   | 1297   | 1388   | 1351   | 1717   | 1661   | 1331   | 1331   | 1434   | 1297   | 1281 |
| FG17      | 1,196  | 1345   | 1345   | 1545   | 1360   | 1363   | 1403   | 1381   | 1633   | 1696   | 1345   | 1319   | 1530   | 1363   | 1288 |
| FG18      | 1,148  | 1384   | 1363   | 1548   | 1440   | 1330   | 1401   | 1387   | 1675   | 1647   | 1363   | 1360   | 1445   | 1330   | 1339 |
| FG19      | 1,136  | 1287   | 1244   | 1404   | 1312   | 1279   | 1301   | 1273   | 1630   | 1576   | 1244   | 1257   | 1390   | 1272   | 1251 |
| FG20      | 1,164  | 1350   | 1251   | 1415   | 1355   | 1240   | 1327   | 1346   | 1670   | 1643   | 1251   | 1267   | 1425   | 1240   | 1271 |
| FG21      | 1,167  | 1391   | 1381   | 1599   | 1393   | 1392   | 1440   | 1441   | 1768   | 1748   | 1381   | 1371   | 1526   | 1392   | 1335 |
| FG22      | 1,203  | 1414   | 1357   | 1601   | 1419   | 1377   | 1445   | 1422   | 1676   | 1771   | 1357   | 1359   | 1521   | 1377   | 1321 |
| FG23      | 1,237  | 1323   | 1252   | 1461   | 1349   | 1242   | 1410   | 1356   | 1653   | 1661   | 1252   | 1287   | 1434   | 1294   | 1250 |
| FG24      | 1,171  | 1147   | 1191   | 1307   | 1168   | 1158   | 1250   | 1202   | 1434   | 1416   | 1191   | 1183   | 1223   | 1158   | 1125 |
| FG25      | 1,152  | 1379   | 1359   | 1619   | 1394   | 1383   | 1433   | 1397   | 1778   | 1730   | 1359   | 1352   | 1577   | 1383   | 1288 |
| FG26      | 1,162  | 1389   | 1383   | 1629   | 1406   | 1383   | 1477   | 1453   | 1699   | 1743   | 1383   | 1369   | 1556   | 1383   | 1293 |
| FG27      | 1,268  | 1408   | 1358   | 1615   | 1403   | 1358   | 1525   | 1408   | 1697   | 1680   | 1358   | 1348   | 1594   | 1358   | 1320 |
| FG28      | 1,152  | 1324   | 1328   | 1451   | 1340   | 1303   | 1370   | 1302   | 1620   | 1590   | 1328   | 1315   | 1403   | 1303   | 1256 |
| FG29      | 1,089  | 1247   | 1275   | 1490   | 1245   | 1266   | 1362   | 1331   | 1618   | 1608   | 1275   | 1244   | 1412   | 1266   | 1148 |
| FG30      | 1,155  | 1295   | 1318   | 1538   | 1305   | 1302   | 1423   | 1350   | 1640   | 1587   | 1318   | 1246   | 1385   | 1264   | 1232 |
| Ortalama: | 1337,8 | 1326,9 | 1545,6 | 1359,8 | 1316,6 | 1402,7 | 1376,8 | 1685,6 | 1669,6 | 1326,9 | 1313,3 | 1464,0 | 1317,1 | 1278,4 |      |

Tablo 7.8 Dördüncü sistem durumu için uzman sistem ile diğer öncelik sevketme kurallarının ürettiği ortalama akış değerleri karşılaştırılması: eşlendirilmiş-t testi istatistiği

| Yönt.Yönt. | SPT    | EDD    | MST    | COV    | MOD    | SPRO   | Sprw   | Mwkr   | MPNR   | LTWK   | MDD    | ATC    | LWKR   |
|------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| US         | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |

Beşinci sistem durumu atölye yükünün “normal” ve iş tesliminin “çokaz-gecikmede” olduğu durumdur. Bunun için, FG31-60 problemleri üzerinde  $k=3$  için üretilen maksimum tamamlanma zamanı değerleri (Tablo 7.9) karşılaştırılmıştır. Uzman sistem yöntemi ile basit öncelik kurallarının ikili karşılaştırılması neticesinde üretilen test istatistiğine göre, 0,10 anlam düzeyinde bile uzman sistemin MWKR ( $\alpha=0,1253$ ) ve 0,05 anlam düzeyinde MPNR ile farklı olmadığı ( $\alpha=0,0563$ ), diğeri ile ise 0,001 anlam düzeyinde farklı ve daha iyi olduğu söylenebilir (Tablo 7.10).

Tablo 7.9 Çeşitli öncelik sevketme kuralları ile uzman sistemin FG31-60 problemleri üzerinde  $k=3$  için ürettiği maksimum tamamlanma zamanı değerleri

| PROB      | AYO    | SPT    | EDD    | MST    | COV    | MOD    | SPRO   | Sprw   | Mwkr   | MPNR   | LTWK   | MDD    | ATC    | LWKR   | US   |
|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|------|
| FG31      | 0,817  | 1671   | 1624   | 1505   | 1570   | 1470   | 1489   | 1453   | 1463   | 1402   | 1624   | 1624   | 1505   | 1649   | 1393 |
| FG32      | 0,775  | 1482   | 1386   | 1446   | 1501   | 1529   | 1372   | 1349   | 1387   | 1285   | 1586   | 1586   | 1446   | 1822   | 1269 |
| FG33      | 0,743  | 1453   | 1575   | 1608   | 1413   | 1585   | 1451   | 1419   | 1286   | 1373   | 1575   | 1575   | 1608   | 1810   | 1375 |
| FG34      | 0,766  | 1416   | 1642   | 1536   | 1501   | 1958   | 1501   | 1448   | 1537   | 1505   | 1642   | 1642   | 1536   | 1743   | 1528 |
| FG35      | 0,775  | 1474   | 1459   | 1472   | 1514   | 1435   | 1483   | 1517   | 1403   | 1478   | 1459   | 1459   | 1472   | 1587   | 1499 |
| FG36      | 0,762  | 1379   | 1814   | 1668   | 1633   | 1727   | 1376   | 1362   | 1362   | 1362   | 1814   | 1814   | 1668   | 1759   | 1378 |
| FG37      | 0,794  | 1565   | 1610   | 1569   | 1630   | 1530   | 1458   | 1506   | 1560   | 1540   | 1610   | 1610   | 1569   | 1728   | 1538 |
| FG38      | 0,801  | 1585   | 1661   | 1548   | 1643   | 1601   | 1520   | 1563   | 1458   | 1466   | 1661   | 1661   | 1548   | 1822   | 1455 |
| FG39      | 0,821  | 1434   | 1508   | 1507   | 1448   | 1470   | 1317   | 1216   | 1314   | 1288   | 1508   | 1508   | 1507   | 1526   | 1351 |
| FG40      | 0,763  | 1569   | 1645   | 1556   | 1396   | 1486   | 1299   | 1250   | 1196   | 1215   | 1645   | 1645   | 1556   | 1769   | 1165 |
| FG41      | 0,736  | 1577   | 1732   | 1637   | 1625   | 1724   | 1609   | 1517   | 1471   | 1517   | 1732   | 1732   | 1637   | 1821   | 1417 |
| FG42      | 0,799  | 1364   | 1755   | 1605   | 1718   | 1741   | 1445   | 1461   | 1418   | 1381   | 1755   | 1755   | 1605   | 1840   | 1406 |
| FG43      | 0,742  | 1444   | 1489   | 1424   | 1834   | 1465   | 1453   | 1439   | 1475   | 1446   | 1489   | 1489   | 1424   | 1684   | 1369 |
| FG44      | 0,709  | 1573   | 1844   | 1803   | 1618   | 1711   | 1438   | 1448   | 1444   | 1469   | 1844   | 1844   | 1803   | 1865   | 1408 |
| FG45      | 0,758  | 1490   | 1609   | 1570   | 1558   | 1583   | 1467   | 1451   | 1327   | 1318   | 1609   | 1609   | 1570   | 1735   | 1322 |
| FG46      | 0,793  | 1444   | 1925   | 1796   | 1572   | 1892   | 1445   | 1364   | 1483   | 1453   | 1925   | 1925   | 1796   | 1888   | 1456 |
| FG47      | 0,807  | 1369   | 1576   | 1593   | 1438   | 1513   | 1393   | 1382   | 1376   | 1395   | 1576   | 1576   | 1593   | 1683   | 1348 |
| FG48      | 0,754  | 1405   | 1674   | 1551   | 1535   | 1576   | 1390   | 1379   | 1280   | 1430   | 1674   | 1674   | 1551   | 1700   | 1362 |
| FG49      | 0,729  | 1641   | 1776   | 1604   | 1643   | 1490   | 1512   | 1526   | 1595   | 1458   | 1776   | 1776   | 1604   | 1580   | 1440 |
| FG50      | 0,772  | 1349   | 1606   | 1654   | 1769   | 1486   | 1566   | 1491   | 1402   | 1457   | 1606   | 1606   | 1654   | 1666   | 1472 |
| FG51      | 0,774  | 1398   | 1682   | 1600   | 1416   | 1557   | 1565   | 1367   | 1293   | 1416   | 1682   | 1682   | 1600   | 1741   | 1312 |
| FG52      | 0,8    | 1642   | 1673   | 1538   | 1531   | 1694   | 1528   | 1575   | 1535   | 1528   | 1673   | 1673   | 1538   | 2007   | 1556 |
| FG53      | 0,822  | 1791   | 1744   | 1565   | 1797   | 1755   | 1376   | 1447   | 1291   | 1393   | 1744   | 1744   | 1565   | 1570   | 1373 |
| FG54      | 0,788  | 1619   | 1730   | 1683   | 1554   | 1665   | 1504   | 1465   | 1476   | 1450   | 1730   | 1730   | 1683   | 1734   | 1450 |
| FG55      | 0,728  | 1476   | 1915   | 1872   | 1659   | 1945   | 1524   | 1499   | 1455   | 1411   | 1915   | 1915   | 1872   | 2028   | 1485 |
| FG56      | 0,772  | 1539   | 1827   | 1491   | 1507   | 1470   | 1638   | 1669   | 1554   | 1643   | 1827   | 1827   | 1491   | 1678   | 1544 |
| FG57      | 0,869  | 1588   | 1727   | 1614   | 1709   | 1578   | 1619   | 1552   | 1539   | 1489   | 1727   | 1727   | 1614   | 1714   | 1461 |
| FG58      | 0,771  | 1384   | 1800   | 1586   | 1660   | 1530   | 1472   | 1473   | 1356   | 1279   | 1800   | 1800   | 1586   | 1960   | 1311 |
| FG59      | 0,724  | 1295   | 1581   | 1676   | 1430   | 1670   | 1478   | 1487   | 1349   | 1317   | 1581   | 1581   | 1676   | 1648   | 1348 |
| FG60      | 0,828  | 1473   | 1676   | 1548   | 1524   | 1566   | 1339   | 1316   | 1397   | 1325   | 1676   | 1676   | 1548   | 1867   | 1284 |
| Ortalama: | 1496,3 | 1682,2 | 1594,2 | 1578,2 | 1613,4 | 1467,6 | 1446,4 | 1416,1 | 1416,3 | 1682,2 | 1682,2 | 1594,2 | 1754,1 | 1402,5 |      |

Tablo 7.10 Beşinci sistem durumu için uzman sistem ile diğer öncelik sevketme kurallarının ürettiği maksimum tamamlanma zamanı değerleri karşılaştırılması: eşlendirilmiş-t testi istatistiği

| Yönt.Yönt. | SPT    | EDD    | MST    | COV    | MOD    | SPRO   | Sprw   | Mwkr   | MPNR   | LTWK   | MDD    | ATC    | LWKR   |
|------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| US         | 0,0002 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0007 | 0,1253 | 0,0563 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |

Altıncı sistem durumu atölye yükünün “hafif” ve iş tesliminin “çokaz-gecikmede” olduğu durumdur. Bunun için, FG61-90 problemleri üzerinde  $k=3$  için üretilen maksimum tamamlanma zamanı değerleri (Tablo 7.11) karşılaştırılmıştır. Uzman sistem yöntemi ile basit öncelik kurallarının ikili karşılaştırılması neticesinde üretilen test istatistiğine göre, 0,001 anlam düzeyinde bile uzman sistemin bütün basit öncelik kurallarından farklı ve daha iyi olduğu söylenebilir (Tablo 7.12).

Tablo 7.11 Çeşitli öncelik sevketme kuralları ile uzman sistemin FG61-90 problemleri üzerinde  $k=3$  için ürettiği maksimum tamamlanma zamanı değerleri

| PROB      | AYO    | SPT    | EDD    | MST    | COV    | MOD    | SPRO   | Sprw   | Mwkr   | MPNR   | LTWK   | MDD    | ATC    | LWKR   | US   |
|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|------|
| FG61      | 0,613  | 1058   | 1389   | 1208   | 1158   | 1243   | 1215   | 1144   | 1066   | 1127   | 1389   | 1389   | 1208   | 1355   | 1075 |
| FG62      | 0,619  | 1336   | 1337   | 1389   | 1353   | 1315   | 1272   | 1285   | 1335   | 1276   | 1337   | 1337   | 1389   | 1416   | 1179 |
| FG63      | 0,555  | 1390   | 1297   | 1400   | 1344   | 1297   | 1231   | 1198   | 1261   | 1214   | 1297   | 1297   | 1400   | 1355   | 1114 |
| FG64      | 0,581  | 1409   | 1487   | 1466   | 1271   | 1523   | 1249   | 1203   | 1094   | 1173   | 1487   | 1487   | 1466   | 1564   | 1081 |
| FG65      | 0,595  | 1298   | 1368   | 1406   | 1277   | 1371   | 1164   | 1169   | 1151   | 1095   | 1368   | 1368   | 1406   | 1595   | 1093 |
| FG66      | 0,582  | 1149   | 1300   | 1294   | 1226   | 1268   | 1155   | 1163   | 1207   | 1141   | 1300   | 1300   | 1294   | 1407   | 1122 |
| FG67      | 0,596  | 1100   | 1227   | 1208   | 1185   | 1197   | 1157   | 1038   | 1131   | 1127   | 1227   | 1227   | 1208   | 1217   | 1121 |
| FG68      | 0,645  | 1189   | 1375   | 1268   | 1495   | 1262   | 1159   | 1150   | 1161   | 1164   | 1375   | 1375   | 1268   | 1298   | 1115 |
| FG69      | 0,602  | 1068   | 1235   | 1250   | 1192   | 1166   | 1138   | 1208   | 1048   | 1163   | 1235   | 1235   | 1250   | 1336   | 1078 |
| FG70      | 0,571  | 1313   | 1662   | 1337   | 1319   | 1399   | 1209   | 1302   | 1193   | 1201   | 1662   | 1662   | 1337   | 1691   | 1247 |
| FG71      | 0,543  | 1294   | 1335   | 1245   | 1403   | 1328   | 1092   | 1081   | 1117   | 1048   | 1335   | 1335   | 1245   | 1406   | 1028 |
| FG72      | 0,615  | 1442   | 1327   | 1370   | 1312   | 1372   | 1348   | 1216   | 1189   | 1153   | 1327   | 1327   | 1370   | 1557   | 1118 |
| FG73      | 0,566  | 1447   | 1623   | 1410   | 1536   | 1396   | 1297   | 1358   | 1331   | 1351   | 1623   | 1623   | 1410   | 1679   | 1264 |
| FG74      | 0,526  | 1250   | 1432   | 1327   | 1387   | 1272   | 1154   | 1189   | 1169   | 1202   | 1432   | 1432   | 1327   | 1469   | 1172 |
| FG75      | 0,568  | 1224   | 1287   | 1255   | 1220   | 1255   | 1311   | 1143   | 1127   | 1098   | 1287   | 1287   | 1255   | 1302   | 1150 |
| FG76      | 0,582  | 1438   | 1583   | 1267   | 1657   | 1479   | 1241   | 1200   | 1240   | 1266   | 1583   | 1583   | 1267   | 1571   | 1186 |
| FG77      | 0,625  | 1237   | 1433   | 1292   | 1266   | 1191   | 1143   | 1109   | 1210   | 1104   | 1433   | 1433   | 1292   | 1506   | 1122 |
| FG78      | 0,566  | 1325   | 1262   | 1356   | 1401   | 1356   | 1275   | 1215   | 1261   | 1269   | 1262   | 1262   | 1356   | 1411   | 1178 |
| FG79      | 0,553  | 1109   | 1268   | 1259   | 1125   | 1265   | 1187   | 1096   | 1136   | 1093   | 1268   | 1268   | 1259   | 1403   | 1104 |
| FG80      | 0,578  | 1288   | 1458   | 1494   | 1398   | 1488   | 1227   | 1144   | 1160   | 1171   | 1458   | 1458   | 1494   | 1335   | 1169 |
| FG81      | 0,572  | 1329   | 1590   | 1427   | 1234   | 1344   | 1259   | 1283   | 1154   | 1227   | 1590   | 1590   | 1427   | 1603   | 1129 |
| FG82      | 0,602  | 1190   | 1454   | 1265   | 1323   | 1282   | 1199   | 1207   | 1166   | 1187   | 1454   | 1454   | 1265   | 1679   | 1188 |
| FG83      | 0,607  | 1165   | 1419   | 1300   | 1310   | 1300   | 1212   | 1152   | 1230   | 1169   | 1419   | 1419   | 1300   | 1368   | 1185 |
| FG84      | 0,577  | 1266   | 1387   | 1456   | 1269   | 1410   | 1288   | 1258   | 1218   | 1271   | 1387   | 1387   | 1456   | 1442   | 1224 |
| FG85      | 0,53   | 1140   | 1159   | 1199   | 1181   | 1201   | 1230   | 1304   | 1256   | 1250   | 1159   | 1159   | 1199   | 1169   | 1244 |
| FG86      | 0,584  | 1378   | 1435   | 1485   | 1305   | 1460   | 1290   | 1263   | 1260   | 1202   | 1435   | 1435   | 1485   | 1577   | 1197 |
| FG87      | 0,655  | 1130   | 1385   | 1207   | 1272   | 1236   | 1247   | 1139   | 1140   | 1087   | 1385   | 1385   | 1207   | 1454   | 1137 |
| FG88      | 0,569  | 1408   | 1474   | 1355   | 1477   | 1332   | 1290   | 1248   | 1343   | 1299   | 1474   | 1474   | 1355   | 1536   | 1270 |
| FG89      | 0,543  | 1402   | 1642   | 1484   | 1496   | 1599   | 1323   | 1357   | 1382   | 1389   | 1642   | 1642   | 1484   | 1769   | 1357 |
| FG90      | 0,627  | 1602   | 1639   | 1720   | 1486   | 1473   | 1280   | 1289   | 1229   | 1325   | 1639   | 1639   | 1720   | 1530   | 1223 |
| Ortalama: | 1279,1 | 1409,0 | 1346,6 | 1329,3 | 1336,0 | 1228,1 | 1203,7 | 1198,8 | 1194,7 | 1409,0 | 1409,0 | 1346,6 | 1466,7 | 1162,3 |      |

Tablo 7.12 Altıncı sistem durumu için uzman sistem ile diğer öncelik sevketme kurallarının ürettiği maksimum tamamlanma zamanı değerleri karşılaştırılması: eşlendirilmiş-t testi istatistiği

| Yöntem | SPT    | EDD    | MST    | COV    | MOD    | SPRO   | Sprw   | Mwkr   | MPNR   | LTWK   | MDD    | ATC    | LWKR   |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| US     | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0001 | 0,0002 | 0,0004 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |

Yedinci sistem durumu atölye yükünün “ağır” ve iş tesliminin “normal” olduğu durumdur. Bunun için, FG01-30 problemleri üzerinde  $k=4,5$  için üretilen maksimum tamamlanma zamanı değerleri (Tablo 7.13) karşılaştırılmıştır. Uzman sistem yöntemi ile basit öncelik kurallarının ikili karşılaştırılması neticesinde üretilen test istatistiğine göre, 0,001 anlam düzeyinde sadece MWKR ile farklı olmadığı ( $\alpha=0,0015$ ), diğer bütün basit öncelik kurallarından farklı ve daha iyi olduğu söylenebilir (Tablo 7.14).

Tablo 7.13 Çeşitli öncelik sevketme kuralları ile uzman sistemin FG01-30 problemleri üzerinde  $k=4,5$  için ürettiği maksimum tamamlanma zamanı değerleri

| PROB      | AYO    | SPT    | EDD    | MST    | COV    | MOD    | SPRO   | Sprw   | Mwkr   | MPNR   | LTWK   | MDD    | ATC    | LWKR   | US   |
|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|------|
| FG01      | 1,132  | 2176   | 2359   | 2443   | 2251   | 2347   | 2128   | 1962   | 1938   | 1892   | 2359   | 2359   | 2443   | 2379   | 1835 |
| FG02      | 1,187  | 1848   | 2369   | 2244   | 2318   | 2139   | 2090   | 2087   | 1883   | 1999   | 2369   | 2369   | 2244   | 2323   | 1942 |
| FG03      | 1,151  | 2224   | 2452   | 2499   | 2457   | 2590   | 2130   | 2079   | 1945   | 1998   | 2452   | 2452   | 2499   | 2394   | 1973 |
| FG04      | 1,110  | 2190   | 2211   | 2300   | 2338   | 2374   | 2114   | 1998   | 2077   | 1969   | 2211   | 2211   | 2300   | 2509   | 1966 |
| FG05      | 1,163  | 2318   | 2438   | 2386   | 2011   | 2399   | 2154   | 2082   | 2141   | 2076   | 2438   | 2438   | 2386   | 2264   | 2045 |
| FG06      | 1,147  | 2199   | 2187   | 2199   | 2010   | 2167   | 1910   | 1865   | 1879   | 1954   | 2187   | 2187   | 2199   | 2294   | 1817 |
| FG07      | 1,179  | 2040   | 2413   | 2224   | 2246   | 2238   | 2078   | 2068   | 2005   | 2051   | 2413   | 2413   | 2224   | 2440   | 1922 |
| FG08      | 1,164  | 1928   | 2229   | 2122   | 1964   | 2153   | 1800   | 1932   | 1869   | 1833   | 2229   | 2229   | 2122   | 2306   | 1826 |
| FG09      | 1,204  | 2125   | 2330   | 2252   | 2246   | 2199   | 2018   | 2012   | 1991   | 1934   | 2330   | 2330   | 2252   | 2283   | 1914 |
| FG10      | 1,149  | 1918   | 2185   | 2172   | 2116   | 2142   | 1804   | 1766   | 1885   | 1816   | 2185   | 2185   | 2172   | 2119   | 1721 |
| FG11      | 1,111  | 2151   | 2441   | 2307   | 2242   | 2222   | 2042   | 2018   | 1944   | 2082   | 2441   | 2441   | 2307   | 2323   | 1901 |
| FG12      | 1,197  | 2036   | 2117   | 2051   | 2238   | 2095   | 1990   | 2086   | 2048   | 2042   | 2117   | 2117   | 2020   | 2315   | 2072 |
| FG13      | 1,119  | 1947   | 2198   | 2143   | 2219   | 2144   | 1900   | 1935   | 1904   | 1851   | 2198   | 2198   | 2143   | 2244   | 1767 |
| FG14      | 1,101  | 1995   | 2256   | 2146   | 2083   | 2104   | 2145   | 2215   | 2120   | 2132   | 2256   | 2256   | 2146   | 2384   | 2029 |
| FG15      | 1,122  | 2214   | 2226   | 2246   | 2374   | 2179   | 1987   | 2198   | 2215   | 2041   | 2226   | 2226   | 2246   | 2394   | 1965 |
| FG16      | 1,195  | 1921   | 2047   | 2188   | 2034   | 2168   | 2031   | 2007   | 2073   | 2040   | 2047   | 2047   | 2188   | 2176   | 2044 |
| FG17      | 1,196  | 2067   | 2207   | 2317   | 2191   | 2273   | 2022   | 1948   | 1795   | 1929   | 2207   | 2207   | 2317   | 2287   | 1963 |
| FG18      | 1,148  | 2430   | 2281   | 2374   | 2431   | 2365   | 2112   | 1971   | 1958   | 1962   | 2281   | 2281   | 2374   | 2426   | 1979 |
| FG19      | 1,136  | 1940   | 2114   | 1992   | 2059   | 2031   | 1838   | 1838   | 1869   | 1838   | 2114   | 2114   | 1992   | 2359   | 1838 |
| FG20      | 1,164  | 1983   | 2301   | 2273   | 2088   | 2178   | 1903   | 1894   | 1996   | 1974   | 2301   | 2301   | 2273   | 2175   | 1939 |
| FG21      | 1,167  | 2146   | 2417   | 2232   | 2303   | 2205   | 1993   | 2067   | 1953   | 1950   | 2417   | 2417   | 2232   | 2554   | 1931 |
| FG22      | 1,203  | 2071   | 2192   | 2174   | 2190   | 2196   | 2087   | 2117   | 1974   | 2052   | 2192   | 2192   | 2174   | 2414   | 2044 |
| FG23      | 1,237  | 2080   | 2290   | 2105   | 2134   | 2236   | 1960   | 1972   | 1980   | 2034   | 2290   | 2290   | 2105   | 2576   | 1939 |
| FG24      | 1,171  | 1764   | 1978   | 2009   | 1894   | 1895   | 1690   | 1640   | 1615   | 1618   | 1978   | 1978   | 2009   | 2104   | 1633 |
| FG25      | 1,152  | 2184   | 2483   | 2405   | 2298   | 2405   | 2026   | 1983   | 2028   | 1984   | 2483   | 2483   | 2405   | 2486   | 1951 |
| FG26      | 1,162  | 2121   | 2443   | 2332   | 2171   | 2374   | 2183   | 2090   | 1987   | 2023   | 2443   | 2443   | 2332   | 2456   | 1991 |
| FG27      | 1,268  | 2104   | 2233   | 2224   | 2303   | 2135   | 2069   | 1974   | 1929   | 1938   | 2233   | 2233   | 2224   | 2431   | 1899 |
| FG28      | 1,152  | 1795   | 2158   | 2209   | 2020   | 2121   | 1851   | 1830   | 1844   | 1819   | 2158   | 2158   | 2209   | 2473   | 1789 |
| FG29      | 1,089  | 1864   | 2214   | 2230   | 1866   | 2094   | 1943   | 1933   | 2032   | 1964   | 2214   | 2214   | 2230   | 2291   | 1786 |
| FG30      | 1,155  | 1934   | 1975   | 2070   | 1860   | 2009   | 1823   | 1912   | 1886   | 1846   | 1975   | 1975   | 2070   | 2185   | 1822 |
| Ortalama: | 2057,1 | 2258,1 | 2228,9 | 2165,2 | 2205,9 | 1994,0 | 1982,6 | 1958,8 | 1954,7 | 2258,1 | 2227,9 | 2227,9 | 2345,5 | 1908,1 |      |

Tablo 7.14 Yedinci sistem durumu için uzman sistem ile diğer öncelik sevketme kurallarının ürettiği maksimum tamamlanma zamanı değerleri karşılaştırılması: eşlendirilmiş-t testi istatistiği

| Yönt.Yönt. | SPT    | EDD    | MST    | COV    | MOD    | SPRO   | Sprw   | Mwkr   | MPNR   | LTWK   | MDD    | ATC    | LWKR   |
|------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| US         | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0015 | 0,0001 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |

Sekizinci sistem durumu atölye yükünün “normal” ve iş tesliminin “normal” olduğu durumdur. Bunun için, FG31-60 problemleri üzerinde  $k=4,5$  için üretilen maksimum tamamlanma zamanı değerleri (Tablo 7.15) karşılaştırılmıştır. Uzman sistem yöntemi ile basit öncelik kurallarının ikili karşılaştırılması neticesinde üretilen test istatistiğine göre, 0,10 anlam düzeyinde bile MWKR ve MPNR ile farklı olmadığı ( $\alpha=0,2743$  ve  $\alpha=0,2009$ ), 0,001 anlam düzeyinde ise sadece SPRO ile farklı olmadığı, diğerleri ile farklı ve daha iyi olduğu söylenebilir (Tablo 7.16).

Tablo 7.15 Çeşitli öncelik sevketme kuralları ile uzman sistemin FG31-60 problemleri üzerinde  $k=4,5$  için ürettiği maksimum tamamlanma zamanı değerleri

| PROB      | AYO    | SPT    | EDD    | MST    | COV    | MOD    | SPRO   | Sprw   | Mwkr   | MPNR   | LTWK   | MDD    | ATC    | LWKR   | US   |
|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|------|
| FG31      | 0,817  | 1671   | 1624   | 1433   | 1564   | 1420   | 1346   | 1412   | 1463   | 1402   | 1624   | 1624   | 1433   | 1649   | 1445 |
| FG32      | 0,775  | 1482   | 1586   | 1520   | 1531   | 1417   | 1408   | 1357   | 1387   | 1285   | 1586   | 1586   | 1520   | 1822   | 1277 |
| FG33      | 0,743  | 1453   | 1575   | 1542   | 1499   | 1709   | 1451   | 1437   | 1286   | 1373   | 1575   | 1575   | 1542   | 1810   | 1401 |
| FG34      | 0,766  | 1416   | 1642   | 1596   | 1493   | 1962   | 1501   | 1448   | 1537   | 1505   | 1642   | 1642   | 1596   | 1743   | 1478 |
| FG35      | 0,775  | 1474   | 1459   | 1462   | 1514   | 1415   | 1497   | 1517   | 1403   | 1478   | 1459   | 1459   | 1462   | 1587   | 1498 |
| FG36      | 0,762  | 1379   | 1814   | 1813   | 1718   | 1717   | 1397   | 1362   | 1362   | 1362   | 1814   | 1814   | 1813   | 1739   | 1362 |
| FG37      | 0,794  | 1565   | 1610   | 1490   | 1624   | 1615   | 1411   | 1471   | 1560   | 1540   | 1610   | 1610   | 1490   | 1728   | 1536 |
| FG38      | 0,801  | 1585   | 1661   | 1631   | 1626   | 1584   | 1531   | 1515   | 1458   | 1466   | 1661   | 1661   | 1631   | 1822   | 1455 |
| FG39      | 0,821  | 1434   | 1508   | 1543   | 1527   | 1491   | 1273   | 1290   | 1314   | 1288   | 1508   | 1508   | 1543   | 1526   | 1293 |
| FG40      | 0,763  | 1569   | 1645   | 1617   | 1499   | 1614   | 1318   | 1290   | 1196   | 1215   | 1645   | 1645   | 1617   | 1769   | 1184 |
| FG41      | 0,736  | 1577   | 1732   | 1596   | 1603   | 1795   | 1496   | 1501   | 1471   | 1517   | 1732   | 1732   | 1596   | 1821   | 1464 |
| FG42      | 0,799  | 1364   | 1755   | 1609   | 1718   | 1723   | 1445   | 1374   | 1418   | 1381   | 1755   | 1755   | 1609   | 1840   | 1408 |
| FG43      | 0,742  | 1444   | 1489   | 1450   | 1558   | 1447   | 1396   | 1451   | 1475   | 1446   | 1489   | 1489   | 1450   | 1684   | 1414 |
| FG44      | 0,709  | 1573   | 1844   | 1803   | 1658   | 1745   | 1465   | 1479   | 1444   | 1469   | 1844   | 1844   | 1803   | 1865   | 1460 |
| FG45      | 0,758  | 1490   | 1609   | 1570   | 1626   | 1608   | 1373   | 1297   | 1327   | 1318   | 1609   | 1609   | 1570   | 1735   | 1321 |
| FG46      | 0,793  | 1444   | 1925   | 1788   | 1483   | 1640   | 1402   | 1417   | 1483   | 1453   | 1925   | 1925   | 1788   | 1888   | 1435 |
| FG47      | 0,807  | 1369   | 1576   | 1534   | 1350   | 1536   | 1389   | 1428   | 1376   | 1395   | 1576   | 1576   | 1534   | 1683   | 1300 |
| FG48      | 0,754  | 1405   | 1674   | 1582   | 1594   | 1616   | 1392   | 1408   | 1280   | 1430   | 1674   | 1674   | 1582   | 1700   | 1362 |
| FG49      | 0,729  | 1641   | 1776   | 1576   | 1682   | 1510   | 1557   | 1527   | 1595   | 1458   | 1776   | 1776   | 1576   | 1580   | 1510 |
| FG50      | 0,772  | 1349   | 1606   | 1578   | 1715   | 1523   | 1433   | 1469   | 1402   | 1457   | 1606   | 1606   | 1578   | 1666   | 1457 |
| FG51      | 0,774  | 1398   | 1682   | 1653   | 1509   | 1607   | 1491   | 1357   | 1293   | 1416   | 1682   | 1682   | 1653   | 1741   | 1327 |
| FG52      | 0,8    | 1642   | 1673   | 1701   | 1511   | 1728   | 1540   | 1617   | 1535   | 1528   | 1673   | 1673   | 1701   | 2007   | 1556 |
| FG53      | 0,822  | 1791   | 1744   | 1744   | 1802   | 1744   | 1360   | 1384   | 1291   | 1393   | 1744   | 1744   | 1744   | 1570   | 1349 |
| FG54      | 0,788  | 1619   | 1730   | 1705   | 1720   | 1680   | 1634   | 1474   | 1476   | 1450   | 1730   | 1730   | 1705   | 1734   | 1381 |
| FG55      | 0,728  | 1476   | 1915   | 1935   | 1728   | 1881   | 1630   | 1422   | 1455   | 1411   | 1915   | 1915   | 1935   | 2028   | 1417 |
| FG56      | 0,772  | 1539   | 1827   | 1477   | 1628   | 1454   | 1637   | 1678   | 1554   | 1643   | 1827   | 1827   | 1477   | 1678   | 1642 |
| FG57      | 0,869  | 1588   | 1727   | 1614   | 1798   | 1701   | 1542   | 1498   | 1539   | 1489   | 1727   | 1727   | 1614   | 1714   | 1496 |
| FG58      | 0,771  | 1384   | 1800   | 1852   | 1614   | 1802   | 1403   | 1387   | 1356   | 1279   | 1800   | 1800   | 1852   | 1960   | 1395 |
| FG59      | 0,724  | 1295   | 1581   | 1580   | 1553   | 1615   | 1447   | 1417   | 1349   | 1317   | 1581   | 1581   | 1580   | 1648   | 1359 |
| FG60      | 0,828  | 1473   | 1676   | 1563   | 1608   | 1503   | 1322   | 1387   | 1397   | 1325   | 1676   | 1676   | 1563   | 1867   | 1302 |
| Ortalama: | 1496,3 | 1682,2 | 1618,6 | 1601,8 | 1626,7 | 1449,6 | 1435,7 | 1416,1 | 1416,3 | 1682,2 | 1682,2 | 1618,6 | 1754,1 | 1409,5 |      |

Tablo 7.16 Sekizinci sistem durumu için uzman sistemi ile diğer öncelik sevketme kurallarının ürettiği maksimum tamamlanma zamanı değerleri karşılaştırılması: eşlendirilmiş-t testi istatistiği

| Yönt.Yönt. | SPT    | EDD    | MST    | COV    | MOD    | SPRO   | Sprw   | Mwkr   | MPNR   | LTWK   | MDD    | ATC    | LWKR   |
|------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| US         | 0,0004 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0053 | 0,0017 | 0,2743 | 0,2009 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |

Dokuzuncu sistem durumu atölye yükünün “hafif” ve iş tesliminin “normal” olduğu durumdur. Bunun için, FG61-90 problemleri üzerinde  $k=4,5$  için üretilen ortalama tezgah boş bekleme oranı değerleri (Tablo 7.17) karşılaştırılmıştır. Uzman sistem yöntemi ile basit öncelik kurallarının ikili karşılaştırılması neticesinde üretilen test istatistiğine göre, 0,001 anlam düzeyinde bütün basit öncelik kurallarından farklı ve daha iyi olduğu söylenebilir (Tablo 7.18).

Tablo 7.17 Çeşitli öncelik sevketme kuralları ile uzman sistemin FG61-90 problemleri üzerinde  $k=4,5$  için ürettiği ortalama tezgah boş-bekleme oranı değerleri

| PROB      | AYO   | SPT   | EDD   | MST   | COV   | MOD   | SPRO  | Sprw  | Mwkr  | MPNR  | LTWK  | MDD   | ATC   | LWKR  | US    |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| FG61      | 0,613 | 0,212 | 0,341 | 0,328 | 0,255 | 0,325 | 0,287 | 0,257 | 0,237 | 0,256 | 0,341 | 0,341 | 0,328 | 0,368 | 0,242 |
| FG62      | 0,619 | 0,293 | 0,3   | 0,319 | 0,34  | 0,319 | 0,281 | 0,307 | 0,313 | 0,285 | 0,3   | 0,3   | 0,319 | 0,376 | 0,267 |
| FG63      | 0,55  | 0,393 | 0,341 | 0,349 | 0,403 | 0,35  | 0,276 | 0,3   | 0,365 | 0,318 | 0,341 | 0,341 | 0,349 | 0,368 | 0,301 |
| FG64      | 0,581 | 0,378 | 0,41  | 0,375 | 0,349 | 0,393 | 0,337 | 0,306 | 0,271 | 0,289 | 0,41  | 0,41  | 0,375 | 0,425 | 0,276 |
| FG65      | 0,595 | 0,334 | 0,367 | 0,357 | 0,39  | 0,344 | 0,293 | 0,325 | 0,302 | 0,286 | 0,367 | 0,367 | 0,357 | 0,396 | 0,29  |
| FG66      | 0,582 | 0,219 | 0,282 | 0,246 | 0,26  | 0,245 | 0,199 | 0,214 | 0,243 | 0,215 | 0,282 | 0,282 | 0,246 | 0,319 | 0,206 |
| FG67      | 0,596 | 0,264 | 0,343 | 0,332 | 0,272 | 0,347 | 0,269 | 0,287 | 0,305 | 0,284 | 0,343 | 0,343 | 0,332 | 0,295 | 0,236 |
| FG68      | 0,645 | 0,297 | 0,369 | 0,369 | 0,341 | 0,367 | 0,29  | 0,295 | 0,309 | 0,313 | 0,369 | 0,369 | 0,369 | 0,362 | 0,295 |
| FG69      | 0,602 | 0,288 | 0,35  | 0,332 | 0,342 | 0,338 | 0,324 | 0,321 | 0,252 | 0,334 | 0,35  | 0,35  | 0,332 | 0,389 | 0,265 |
| FG70      | 0,571 | 0,244 | 0,414 | 0,329 | 0,26  | 0,345 | 0,185 | 0,308 | 0,221 | 0,21  | 0,414 | 0,414 | 0,329 | 0,405 | 0,206 |
| FG71      | 0,543 | 0,285 | 0,334 | 0,317 | 0,332 | 0,308 | 0,24  | 0,254 | 0,248 | 0,219 | 0,334 | 0,334 | 0,317 | 0,357 | 0,219 |
| FG72      | 0,615 | 0,356 | 0,343 | 0,348 | 0,39  | 0,384 | 0,34  | 0,31  | 0,324 | 0,291 | 0,343 | 0,343 | 0,348 | 0,388 | 0,298 |
| FG73      | 0,566 | 0,371 | 0,405 | 0,372 | 0,386 | 0,359 | 0,297 | 0,306 | 0,339 | 0,278 | 0,405 | 0,405 | 0,372 | 0,446 | 0,275 |
| FG74      | 0,526 | 0,306 | 0,406 | 0,311 | 0,319 | 0,289 | 0,266 | 0,337 | 0,319 | 0,309 | 0,406 | 0,406 | 0,311 | 0,419 | 0,275 |
| FG75      | 0,568 | 0,276 | 0,329 | 0,29  | 0,272 | 0,288 | 0,247 | 0,267 | 0,253 | 0,222 | 0,329 | 0,329 | 0,29  | 0,318 | 0,23  |
| FG76      | 0,582 | 0,367 | 0,383 | 0,385 | 0,407 | 0,337 | 0,259 | 0,287 | 0,291 | 0,298 | 0,383 | 0,383 | 0,385 | 0,383 | 0,249 |
| FG77      | 0,625 | 0,275 | 0,371 | 0,35  | 0,276 | 0,35  | 0,273 | 0,264 | 0,333 | 0,253 | 0,371 | 0,371 | 0,35  | 0,418 | 0,236 |
| FG78      | 0,566 | 0,374 | 0,337 | 0,337 | 0,4   | 0,337 | 0,336 | 0,323 | 0,304 | 0,289 | 0,337 | 0,337 | 0,337 | 0,342 | 0,275 |
| FG79      | 0,553 | 0,32  | 0,364 | 0,394 | 0,312 | 0,341 | 0,314 | 0,367 | 0,32  | 0,299 | 0,364 | 0,364 | 0,394 | 0,395 | 0,284 |
| FG80      | 0,578 | 0,318 | 0,364 | 0,339 | 0,348 | 0,37  | 0,25  | 0,277 | 0,263 | 0,268 | 0,364 | 0,364 | 0,339 | 0,359 | 0,26  |
| FG81      | 0,572 | 0,321 | 0,433 | 0,414 | 0,328 | 0,405 | 0,343 | 0,306 | 0,272 | 0,338 | 0,433 | 0,433 | 0,414 | 0,417 | 0,272 |
| FG82      | 0,602 | 0,244 | 0,403 | 0,353 | 0,318 | 0,308 | 0,272 | 0,286 | 0,274 | 0,267 | 0,403 | 0,403 | 0,353 | 0,458 | 0,263 |
| FG83      | 0,607 | 0,258 | 0,332 | 0,331 | 0,278 | 0,324 | 0,238 | 0,251 | 0,29  | 0,28  | 0,332 | 0,332 | 0,331 | 0,341 | 0,271 |
| FG84      | 0,577 | 0,28  | 0,299 | 0,332 | 0,337 | 0,328 | 0,26  | 0,325 | 0,3   | 0,264 | 0,299 | 0,299 | 0,332 | 0,312 | 0,211 |
| FG85      | 0,53  | 0,296 | 0,272 | 0,273 | 0,296 | 0,273 | 0,257 | 0,309 | 0,321 | 0,31  | 0,272 | 0,272 | 0,273 | 0,286 | 0,273 |
| FG86      | 0,584 | 0,422 | 0,429 | 0,428 | 0,393 | 0,396 | 0,363 | 0,365 | 0,387 | 0,332 | 0,429 | 0,429 | 0,428 | 0,45  | 0,318 |
| FG87      | 0,655 | 0,279 | 0,366 | 0,354 | 0,318 | 0,339 | 0,279 | 0,263 | 0,266 | 0,273 | 0,366 | 0,366 | 0,354 | 0,393 | 0,265 |
| FG88      | 0,569 | 0,295 | 0,348 | 0,357 | 0,345 | 0,358 | 0,289 | 0,301 | 0,332 | 0,294 | 0,348 | 0,348 | 0,357 | 0,381 | 0,303 |
| FG89      | 0,543 | 0,376 | 0,418 | 0,384 | 0,372 | 0,37  | 0,274 | 0,274 | 0,29  | 0,26  | 0,418 | 0,418 | 0,384 | 0,424 | 0,264 |
| FG90      | 0,627 | 0,425 | 0,44  | 0,358 | 0,368 | 0,36  | 0,322 | 0,301 | 0,288 | 0,316 | 0,44  | 0,44  | 0,358 | 0,418 | 0,249 |
| Ortalama: |       | 0,312 | 0,363 | 0,345 | 0,334 | 0,340 | 0,282 | 0,296 | 0,294 | 0,282 | 0,363 | 0,363 | 0,345 | 0,380 | 0,262 |

Tablo 7.18 Dokuzuncu sistem durumu için uzman sistem ile diğer öncelik sevketme kurallarının ürettiği ortalama tezgah boş bekleme oranı değerleri karşılaştırılması: eşlendirilmiş-t testi istatistiği

| Yöntem | SPT    | EDD    | MST    | COV    | MOD    | SPRO   | Sprw   | Mwkr   | MPNR   | LTWK   | MDD    | ATC    | LWKR   |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| US     | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0006 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |

## 7.5 Tabu Arama Yöntemine İlişkin Karşılaştırmalar

Uzman sistem ile tabu aramanın karşılaştırılması yukarıdaki gibi dokuz farklı sistem durumu için yapılacaktır. İlk etapta uzman-başlangıçlı tabu arama (US\_TA) ile uzman sistem karşılaştırılmaktadır. Akabinde her bir sistem durumu için uzman sistem başlangıç çözümü ile iyi bir basit öncelik kuralı başlangıç çözümünün tabu arama üzerine etkisi olup olmadığını belirleme amacıyla, US\_TA ile basit öncelik kuralı başlangıçlı tabu arama (Spt\_TA veya Edd\_TA) yöntemleri karşılaştırılmaktadır.

Karşılaştırmalar için kullanılacak değerler her bir farklı sistem durumu için uzman sistemin seçtiği başarı ölçütü olacaktır. Dolayısıyla tabu arama uzman sistemin iyileştirmeye çalıştığı başarı ölçütünü iyileştirmeye çalışacaktır. Aynı şekilde, basit öncelik kuralı başlangıç çözümü tabu arama da o sistem durumunda uzman sistemin seçeceği performans ölçütünü iyileştirmeye çalışacaktır. Başlangıç çözümleri arasındaki karşılaştırmalarda, başarı ölçütünü iyileştirme derecesine ilaveten MRI%, MEN, MMN, TIME, LBE ve uzman-başlangıçlı tabu arama çözümünün basit öncelik kuralı başlangıçlı tabu aramaninkinden daha iyi olma yüzdesi (MPI%) gibi parametreler de göz önüne alınmaktadır. Aşağıda dokuz sistem durumu için karşılaştırmalar yapılmıştır.

Birinci sistem durumu için, FG01-30 problemleri üzerinde  $k=1,5$  için üretilen ortalama akış süresi değerleri (Tablo 7.19) karşılaştırılmıştır. Uzman-başlangıçlı tabu arama ile uzman sistem yönteminin ikili karşılaştırılması neticesinde üretilen test istatistiğine göre, 0,000 anlam düzeyinde tabu aramanın uzman sistemden farklı ve daha iyi olduğu söylenebilir (Tablo 7.20). Ayrıca bu sistem durumu için diğer basit öncelik kurallarına nisbeten daha iyi sonuç veren SPT-başlangıçlı tabu arama ile uzman-başlangıçlı tabu arama yöntemi karşılaştırılmış; uzman-başlangıçlı tabu arama yönteminin 0,000 anlam düzeyinde farklı ve daha iyi olduğu söylenebilir (Tablo 7.20).

Birinci ve dördüncü sistem durumu için hem başarı ölçütü, yani ortalama akış süresi, hem de o başarı ölçütünün değerleri aynıdır. Çünkü birinci ve dördüncü sistem

durumunda atölye yükü, yani işlem süreleri aynıdır. Dolayısıyla aynı akış süresi değerleri elde edilmektedir (Tablo 7.22). Bu yüzden üretilen test istatistikleri (Tablo 7.20 ve 7.23) de aynıdır. Sonuç olarak, 0,000 anlam düzeyinde tabu aramanın uzman sistemden farklı ve daha iyi olduğu; aynı zamanda, uzman-başlangıçlı tabu aramanın SPT-başlangıçlı tabu aramadan farklı ve daha iyi olduğu söylenebilir.

Birinci ve dördüncü sistem durumları için, uzman-başlangıçlı tabu aramanın ürettiği çeşitli tabu arama parametre değerlerine bakıldığında (Tablo 7.21 ve 7.24) tabu aramanın uzman sistem çözümünü %1,05 iyileştirdiği görülmektedir. Benzer şekilde, tabu arama SPT çözümünü %0,62 iyileştirmiştir. Bu iyileştirmelerin nisbeten düşük olduğu görülüyor. Bu başarı ölçütünden kaynaklanmaktadır. Çünkü iyileştirilmeye çalışılan ölçüt bütün işlerin ortalama akışıdır; sadece bir işin değil. Yine de uzman-başlangıçlı tabu aramanın, geleneksel bir yöntem olan, SPT çözümünü %5.44 iyileştirmesi küçümsenecek bir sonuç değildir.





Tablo 7.19 Uzman- ve SPT-başlangıçlı tabu arama yöntemlerinin FG01-30 problemleri için ürettiği ortalama akış süresi değerleri

| Prob\Yönt | US     | US_TA  | SPT    | Spt_TA |
|-----------|--------|--------|--------|--------|
| FG01      | 1277   | 1266   | 1365   | 1308   |
| FG02      | 1302   | 1289   | 1398   | 1398   |
| FG03      | 1312   | 1300   | 1390   | 1384   |
| FG04      | 1330   | 1328   | 1372   | 1366   |
| FG05      | 1350   | 1335   | 1365   | 1365   |
| FG06      | 1280   | 1264   | 1321   | 1295   |
| FG07      | 1338   | 1316   | 1383   | 1379   |
| FG08      | 1252   | 1238   | 1313   | 1307   |
| FG09      | 1256   | 1244   | 1320   | 1298   |
| FG10      | 1263   | 1262   | 1298   | 1296   |
| FG11      | 1323   | 1301   | 1341   | 1341   |
| FG12      | 1259   | 1252   | 1331   | 1328   |
| FG13      | 1268   | 1253   | 1276   | 1273   |
| FG14      | 1284   | 1258   | 1263   | 1263   |
| FG15      | 1261   | 1260   | 1342   | 1342   |
| FG16      | 1281   | 1272   | 1373   | 1371   |
| FG17      | 1288   | 1284   | 1345   | 1337   |
| FG18      | 1339   | 1312   | 1384   | 1377   |
| FG19      | 1251   | 1232   | 1287   | 1287   |
| FG20      | 1271   | 1258   | 1350   | 1331   |
| FG21      | 1335   | 1329   | 1391   | 1387   |
| FG22      | 1321   | 1286   | 1414   | 1398   |
| FG23      | 1250   | 1239   | 1323   | 1323   |
| FG24      | 1125   | 1109   | 1147   | 1147   |
| FG25      | 1288   | 1284   | 1379   | 1375   |
| FG26      | 1293   | 1278   | 1389   | 1382   |
| FG27      | 1320   | 1312   | 1408   | 1386   |
| FG28      | 1256   | 1249   | 1324   | 1322   |
| FG29      | 1148   | 1125   | 1247   | 1228   |
| FG30      | 1232   | 1217   | 1295   | 1291   |
| Ortalama: | 1278,4 | 1265,1 | 1337,8 | 1329,5 |

Tablo 7.20 Uzman- ve SPT-başlangıçlı tabu arama yöntemlerinin birinci sistem durumu için ürettiği ortalama akış süresi değerleri için eşlendirilmiş-t testi istatistiği

| Yönt. \ Yönt. | US     | Spt_TA |
|---------------|--------|--------|
| US_TA         | 0,0000 | 0,0000 |

Tablo 7.21 Uzman- ve SPT-başlangıçlı tabu arama yöntemlerinin birinci sistem durumu için ürettiği tabu arama parametre değerleri

|        | MRI% | MEN  | MMN  | TIME  | LBE | MPI% |
|--------|------|------|------|-------|-----|------|
| US_TA  | 1,05 | 8680 | 1369 | 63,53 | 0   | 5,44 |
| Spt_TA | 0,62 | 6381 | 1066 | 47,20 | 0   | -    |

Tablo 7.22 Uzman- ve SPT-başlangıçlı tabu arama yöntemlerinin FG01-30 problemleri için ürettiği ortalama akış süresi değerleri

| Prob\Yönt | US     | US_TA  | SPT    | Spt_TA |
|-----------|--------|--------|--------|--------|
| FG01      | 1277   | 1266   | 1365   | 1308   |
| FG02      | 1302   | 1289   | 1398   | 1398   |
| FG03      | 1312   | 1300   | 1390   | 1384   |
| FG04      | 1330   | 1328   | 1372   | 1366   |
| FG05      | 1350   | 1335   | 1365   | 1365   |
| FG06      | 1280   | 1264   | 1321   | 1295   |
| FG07      | 1338   | 1316   | 1383   | 1379   |
| FG08      | 1252   | 1238   | 1313   | 1307   |
| FG09      | 1256   | 1244   | 1320   | 1298   |
| FG10      | 1263   | 1262   | 1298   | 1296   |
| FG11      | 1323   | 1301   | 1341   | 1341   |
| FG12      | 1259   | 1252   | 1331   | 1328   |
| FG13      | 1268   | 1253   | 1276   | 1273   |
| FG14      | 1284   | 1258   | 1263   | 1263   |
| FG15      | 1261   | 1260   | 1342   | 1342   |
| FG16      | 1281   | 1272   | 1373   | 1371   |
| FG17      | 1288   | 1284   | 1345   | 1337   |
| FG18      | 1339   | 1312   | 1384   | 1377   |
| FG19      | 1251   | 1232   | 1287   | 1287   |
| FG20      | 1271   | 1258   | 1350   | 1331   |
| FG21      | 1335   | 1329   | 1391   | 1387   |
| FG22      | 1321   | 1286   | 1414   | 1398   |
| FG23      | 1250   | 1239   | 1323   | 1323   |
| FG24      | 1125   | 1109   | 1147   | 1147   |
| FG25      | 1288   | 1284   | 1379   | 1375   |
| FG26      | 1293   | 1278   | 1389   | 1382   |
| FG27      | 1320   | 1312   | 1408   | 1386   |
| FG28      | 1256   | 1249   | 1324   | 1322   |
| FG29      | 1148   | 1125   | 1247   | 1228   |
| FG30      | 1232   | 1217   | 1295   | 1291   |
| Ortalama: | 1278,4 | 1265,1 | 1337,8 | 1329,5 |

Tablo 7.23 Uzman- ve SPT-başlangıçlı tabu arama yöntemlerinin dördüncü sistem durumu için ürettiği ortalama akış süresi değerleri için eşlendirilmiş-t testi istatistiği

| Yönt. \ Yönt. | US     | Spt_TA |
|---------------|--------|--------|
| US_TA         | 0,0000 | 0,0000 |

Tablo 7.24 Uzman ve SPT-başlangıçlı tabu arama yöntemlerinin dördüncü sistem durumu için ürettiği tabu arama parametre değerleri

|        | MRI% | MEN  | MMN  | TIME  | LBE | MPI% |
|--------|------|------|------|-------|-----|------|
| US_TA  | 1,05 | 8680 | 1369 | 63,53 | 0   | 5,44 |
| Spt_TA | 0,62 | 6381 | 1066 | 47,20 | 0   | -    |

İkinci sistem durumu için, FG31-60 problemleri üzerinde  $k=1,5$  için üretilen ortalama pozitif gecikme değerleri (Tablo 7.25) karşılaştırılmıştır. Uzman-başlangıçlı tabu arama ile uzman sistem yönteminin ikili karşılaştırılması neticesinde üretilen test istatistiğine göre, 0,000 anlam düzeyinde tabu aramanın uzman sistemden farklı ve daha iyi olduğu söylenebilir (Tablo 7.26). Çünkü tabu arama uzman sistem çözümünü %7,35 iyileştirmiştir (Tablo 7.27). Ayrıca bu sistem durumu için diğer basit öncelik kurallarına nisbeten daha iyi sonuç veren EDD-başlangıçlı tabu arama ile uzman-başlangıçlı tabu arama yöntemi karşılaştırılmıştır. Buna göre, ancak 0,03 anlam düzeyinde birbirinden farklı ve uzman-başlangıçlı tabu arama yönteminin daha iyi olduğu söylenebilir (Tablo 7.26). Test istatistiği sonucu elde edilen  $\alpha=0,029$  değerinden dolayı, 0,029'un altı bir anlam düzeyinde bu yöntemler arasında istatistiki bir fark olmadığı söylenir. Son olarak, Tablo 7.27'den uzman-başlangıçlı tabu arama çözümünün geleneksel EDD çözümünden %15,5 daha iyi olduğu görülmektedir.

Üçüncü sistem durumu için, FG61-90 problemleri üzerinde  $k=1,5$  için üretilen ortalama pozitif gecikme değerleri (Tablo 7.28) karşılaştırılmıştır. Uzman-başlangıçlı tabu arama ile uzman sistem yönteminin ikili karşılaştırılması neticesinde üretilen test istatistiğine göre, 0,000 anlam düzeyinde tabu aramanın uzman sistemden farklı ve daha iyi olduğu söylenebilir (Tablo 7.29). Çünkü tabu arama uzman sistem çözümünü %14,56 iyileştirmiştir (Tablo 7.30). Ayrıca bu sistem durumu için diğer basit öncelik kurallarına nisbeten daha iyi sonuç veren EDD-başlangıçlı tabu arama ile uzman-başlangıçlı tabu arama yöntemi karşılaştırılmıştır. Buna göre, 0,10 anlam düzeyinde bile birbirinden farklı olmadığı söylenebilir. Çünkü elde edilen  $\alpha=0,483$  test istatistiği (Tablo 7.29) bu yöntemlerin neredeyse aynı sonucu ürettiğini göstermektedir. Bu Tablo 7.28'e bakıldığında uzman sistem ve EDD öncelik kuralı farklı ortalama pozitif gecikme değerleri ürettiği halde, tabu aramaya uzman sistemle veya EDD öncelik kuralıyla başlanmasının farklı bir sonuç üretmediği ortaya çıkmaktadır (ort. pozitif gecikme değerleri uzman-başlangıçlı tabu arama için 130,5, EDD-başlangıçlı tabu arama için 130,7). Uzman- ve EDD-başlangıçlı tabu arama yöntemleri arasında fark olmayışının nedeni her iki yöntemin de optimum civarına ulaştığı şeklinde yorumlanabilir. Çünkü nisbeten biraz iyi olan uzman sistem çözümü tabu aramayla %14,56 iyileştirilirken, nisbeten biraz kötü olan EDD çözümü %21,76 (Tablo 7.30) iyileştirilmiştir. Ancak, uzman-başlangıçlı tabu arama çözümünün geleneksel EDD çözümünden %21,86 daha iyi olması denk çözümlere ulaşıldığını göstermektedir.

Tablo 7.25 Uzman- ve EDD-başlangıçlı tabu arama yöntemlerinin FG31-60 problemleri için ürettiği ortalama pozitif gecikme değerleri

| Prob\Yönt | US    | US_TA | EDD   | EddTA |
|-----------|-------|-------|-------|-------|
| FG31      | 256   | 252   | 237   | 217   |
| FG32      | 266   | 258   | 290   | 265   |
| FG33      | 308   | 270   | 292   | 246   |
| FG34      | 321   | 261   | 297   | 237   |
| FG35      | 288   | 261   | 278   | 249   |
| FG36      | 299   | 276   | 339   | 292   |
| FG37      | 261   | 253   | 314   | 277   |
| FG38      | 264   | 253   | 298   | 255   |
| FG39      | 239   | 233   | 295   | 238   |
| FG40      | 270   | 229   | 304   | 275   |
| FG41      | 322   | 257   | 350   | 286   |
| FG42      | 222   | 210   | 272   | 222   |
| FG43      | 247   | 245   | 269   | 242   |
| FG44      | 267   | 246   | 359   | 298   |
| FG45      | 256   | 253   | 274   | 258   |
| FG46      | 246   | 232   | 314   | 290   |
| FG47      | 236   | 232   | 269   | 230   |
| FG48      | 275   | 258   | 251   | 249   |
| FG49      | 313   | 294   | 317   | 276   |
| FG50      | 276   | 238   | 306   | 275   |
| FG51      | 281   | 253   | 310   | 279   |
| FG52      | 340   | 296   | 347   | 292   |
| FG53      | 282   | 281   | 268   | 250   |
| FG54      | 262   | 255   | 295   | 267   |
| FG55      | 285   | 276   | 304   | 277   |
| FG56      | 259   | 235   | 332   | 280   |
| FG57      | 288   | 268   | 332   | 257   |
| FG58      | 276   | 245   | 282   | 263   |
| FG59      | 261   | 247   | 294   | 275   |
| FG60      | 222   | 219   | 289   | 234   |
| Ortalama: | 272,9 | 252,9 | 299,3 | 261,7 |

Tablo 7.28 Uzman- ve EDD-başlangıçlı tabu arama yöntemlerinin FG61-90 problemleri için ürettiği ortalama pozitif gecikme değerleri

| Prob\Yönt | US    | US_TA | EDD | EddTA |
|-----------|-------|-------|-----|-------|
| FG61      | 105   | 86    | 133 | 107   |
| FG62      | 118   | 118   | 122 | 110   |
| FG63      | 150   | 132   | 147 | 138   |
| FG64      | 157   | 153   | 237 | 192   |
| FG65      | 143   | 141   | 171 | 128   |
| FG66      | 147   | 125   | 116 | 85    |
| FG67      | 131   | 97    | 134 | 93    |
| FG68      | 159   | 113   | 186 | 117   |
| FG69      | 112   | 82    | 159 | 91    |
| FG70      | 154   | 122   | 206 | 139   |
| FG71      | 124   | 107   | 131 | 96    |
| FG72      | 169   | 153   | 175 | 146   |
| FG73      | 175   | 147   | 161 | 157   |
| FG74      | 174   | 152   | 182 | 125   |
| FG75      | 135   | 104   | 150 | 121   |
| FG76      | 180   | 175   | 147 | 144   |
| FG77      | 178   | 122   | 156 | 96    |
| FG78      | 160   | 121   | 155 | 133   |
| FG79      | 146   | 119   | 143 | 122   |
| FG80      | 111   | 106   | 169 | 135   |
| FG81      | 162   | 128   | 222 | 150   |
| FG82      | 170   | 148   | 226 | 162   |
| FG83      | 117   | 108   | 156 | 99    |
| FG84      | 119   | 107   | 142 | 125   |
| FG85      | 144   | 134   | 123 | 116   |
| FG86      | 263   | 215   | 236 | 181   |
| FG87      | 162   | 143   | 147 | 147   |
| FG88      | 173   | 166   | 171 | 148   |
| FG89      | 174   | 152   | 162 | 138   |
| FG90      | 170   | 139   | 245 | 179   |
| Ortalama: | 152,7 | 130,5 | 167 | 130,7 |

Tablo 7.26 Uzman- ve EDD-başlangıçlı tabu arama yöntemlerinin ikinci sistem durumu için ürettiği ortalama pozitif gecikme değerleri için eşlendirilmiş-t testi istatistiği

| Yönt. \ Yönt. | US     | Edd_TA |
|---------------|--------|--------|
| US_TA         | 0,0000 | 0,029  |

Tablo 7.27 Uzman- ve EDD-başlangıçlı tabu arama yöntemlerinin ikinci sistem durumu için ürettiği tabu arama parametre değerleri

|        | MRI%  | MEN   | MMN  | TIME  | LBE | MPI% |
|--------|-------|-------|------|-------|-----|------|
| US_TA  | 7,35  | 11098 | 1767 | 40,27 | 0   | 15,5 |
| Edd_TA | 12,55 | 14385 | 2241 | 52,63 | 0   | -    |

Tablo 7.29 Uzman- ve EDD-başlangıçlı tabu arama yöntemlerinin üçüncü sistem durumu için ürettiği ortalama pozitif gecikme değerleri için eşlendirilmiş-t testi istatistiği

| Yönt. \ Yönt. | US     | Edd_TA |
|---------------|--------|--------|
| US_TA         | 0,0000 | 0,483  |

Tablo 7.30 Uzman ve EDD-başlangıçlı tabu arama yöntemlerinin üçüncü sistem durumu için ürettiği tabu arama parametre değerleri

|        | MRI%  | MEN   | MMN  | TIME  | LBE | MPI%  |
|--------|-------|-------|------|-------|-----|-------|
| US_TA  | 14,56 | 10680 | 1839 | 25,00 | 0   | 21,86 |
| Edd_TA | 21,76 | 12300 | 1987 | 28,33 | 0   | -     |

Beşinci sistem durumu için, FG31-60 problemleri üzerinde  $k=3$  için üretilen maksimum tamamlanma zamanı değerleri (Tablo 7.31) karşılaştırılmıştır. Uzman-başlangıçlı tabu arama ile uzman sistem yönteminin ikili karşılaştırılması neticesinde üretilen test istatistiğine göre, 0,000 anlam düzeyinde tabu aramanın uzman sistemden farklı ve daha iyi olduğu söylenebilir (Tablo 7.32). Çünkü tabu arama uzman sistem çözümünü %12 iyileştirmiştir (Tablo 7.33). Bu arada tabu aramayla FG32, 33, 35, 36, 40, 48 ve 60 problemleri (Tablo 7.31'de '\*' işaretli olanlar) için optimal çözüm anlamına gelen alt sınır değerleri (bir tezgahda yapılacak işlemlerin işlem süreleri toplamının  $C_{max}$ 'a eşit olması durumu) bulunmuştur. Ayrıca bu sistem durumu için diğer basit öncelik kurallarına nisbeten daha iyi sonuç veren SPT-başlangıçlı tabu arama ile uzman-başlangıçlı tabu arama yöntemi karşılaştırılmıştır. Buna göre, ancak  $\alpha=0,019$ 'un üstünde bir anlam düzeyinde birbirinden farklı ve uzman-başlangıçlı tabu arama yönteminin daha iyi olduğu söylenebilir (Tablo 7.32). Üstelik, uzman-başlangıçlı tabu arama yönteminin bu daha iyi sonuçları daha az sayıda komşu değerlendirmesi, daha az sayıda taşıma (yaklaşık %12) dolayısıyla kısa sürede ürettiği dikkate alınmalıdır. Son olarak, Tablo 7.33'den uzman-başlangıçlı tabu arama çözümünün geleneksel SPT çözümünden %17,51 daha iyi olduğu görülmektedir.

Altıncı sistem durumu için, FG61-90 problemleri üzerinde  $k=3$  için üretilen maksimum tamamlanma zamanı değerleri (Tablo 7.34) karşılaştırılmıştır. Uzman-başlangıçlı tabu arama ile uzman sistem yönteminin ikili karşılaştırılması neticesinde üretilen test istatistiğine göre, 0,000 anlam düzeyinde tabu aramanın uzman sistemden farklı ve daha iyi olduğu söylenebilir (Tablo 7.35). Çünkü tabu arama uzman sistem çözümünü %12,52 iyileştirmiştir (Tablo 7.36). Bu arada uzman-başlangıçlı tabu aramayla FG64 problemi için optimal  $C_{max}$  çözümü bulunmuştur. Ayrıca bu sistem durumu için diğer basit öncelik kurallarına nisbeten daha iyi sonuç veren SPT-başlangıçlı tabu arama ile uzman-başlangıçlı tabu arama yöntemi karşılaştırılmıştır. Buna göre, test istatistiği sonucu elde edilen  $\alpha=0,265$  değerinden dolayı, 0,10 anlam düzeyinde bile birbirinden farklı olmadığı söylenebilir (Tablo 7.35). Uzman- ve SPT-başlangıçlı tabu arama yöntemleri arasında fark olmayışının nedeni her iki yöntemin de optimum civarına ulaştığı şeklinde yorumlanabilir. Çünkü nisbeten biraz iyi olan uzman sistem çözümü tabu aramayla %12,52 iyileştirilirken, nisbeten biraz kötü olan SPT çözümü %20,27 (Tablo 7.35) iyileştirilmiştir. Ancak, uzman-başlangıçlı tabu arama çözümünün geleneksel SPT çözümünden %20,5 daha iyi olması denk çözümlere ulaşıldığını göstermektedir.

Tablo 7.31 Uzman- ve SPT-başlangıçlı tabu arama yöntemlerinin FG31-60 problemleri için ürettiği  $C_{max}$

| Prob\Yönt | US   | US_TA | SPT  | Spt_TA |
|-----------|------|-------|------|--------|
| FG31      | 1393 | 1211  | 1671 | 1229   |
| FG32      | 1269 | 1173* | 1482 | 1173*  |
| FG33      | 1375 | 1168  | 1453 | 1155*  |
| FG34      | 1528 | 1296  | 1416 | 1296   |
| FG35      | 1499 | 1242* | 1474 | 1242*  |
| FG36      | 1378 | 1378  | 1379 | 1362*  |
| FG37      | 1538 | 1234  | 1565 | 1234   |
| FG38      | 1455 | 1250  | 1585 | 1215   |
| FG39      | 1351 | 1121  | 1434 | 1126   |
| FG40      | 1165 | 1098* | 1569 | 1151   |
| FG41      | 1417 | 1357  | 1577 | 1357   |
| FG42      | 1406 | 1222  | 1364 | 1224   |
| FG43      | 1369 | 1277  | 1444 | 1277   |
| FG44      | 1408 | 1228  | 1573 | 1314   |
| FG45      | 1322 | 1268  | 1490 | 1377   |
| FG46      | 1456 | 1176  | 1444 | 1214   |
| FG47      | 1348 | 1190  | 1369 | 1208   |
| FG48      | 1362 | 1226* | 1405 | 1226*  |
| FG49      | 1440 | 1322  | 1641 | 1296   |
| FG50      | 1472 | 1196  | 1349 | 1196   |
| FG51      | 1312 | 1165  | 1398 | 1173   |
| FG52      | 1556 | 1348  | 1642 | 1349   |
| FG53      | 1373 | 1195  | 1791 | 1312   |
| FG54      | 1450 | 1277  | 1619 | 1249   |
| FG55      | 1485 | 1242  | 1476 | 1252   |
| FG56      | 1544 | 1327  | 1539 | 1300   |
| FG57      | 1461 | 1288  | 1588 | 1423   |
| FG58      | 1311 | 1199  | 1384 | 1226   |
| FG59      | 1348 | 1153  | 1295 | 1178   |
| FG60      | 1284 | 1200* | 1473 | 1200*  |
| Ortalama: | 1403 | 1234  | 1496 | 1251   |

Tablo 7.32 Uzman- ve SPT-başlangıçlı tabu arama yöntemlerinin beşinci sistem durumu için eşlendirilmiş-t testi istatistiği

| Yönt. \ Yönt. | US     | Spt_TA |
|---------------|--------|--------|
| US_TA         | 0,0000 | 0,019  |

Tablo 7.33 Uzman- ve SPT-başlangıçlı tabu arama yöntemlerinin beşinci sistem durumu için ürettiği tabu arama parametre değerleri

|        | MRI%  | MEN   | MMN  | TIME  | LBE | MPI%  |
|--------|-------|-------|------|-------|-----|-------|
| US_TA  | 12    | 13169 | 2902 | 51,83 | 5   | 17,51 |
| Spt_TA | 16,38 | 17800 | 3277 | 66,53 | 6   | -     |

Tablo 7.34 Uzman- ve SPT-başlangıçlı tabu arama yöntemlerinin FG61-90 problemleri için ürettiği  $C_{max}$

| Prob\Yönt | US   | US_TA | SPT  | Spt_TA |
|-----------|------|-------|------|--------|
| FG61      | 1075 | 960   | 1058 | 953    |
| FG62      | 1179 | 1118  | 1336 | 1067   |
| FG63      | 1114 | 1020  | 1390 | 1033   |
| FG64      | 1081 | 1001* | 1409 | 1053   |
| FG65      | 1093 | 978   | 1298 | 1032   |
| FG66      | 1122 | 996   | 1149 | 1000   |
| FG67      | 1121 | 929   | 1100 | 925    |
| FG68      | 1115 | 1012  | 1189 | 1011   |
| FG69      | 1078 | 925   | 1068 | 960    |
| FG70      | 1247 | 1080  | 1313 | 1048   |
| FG71      | 1028 | 939   | 1294 | 940    |
| FG72      | 1118 | 1048  | 1442 | 1099   |
| FG73      | 1264 | 1091  | 1447 | 1091   |
| FG74      | 1172 | 1064  | 1250 | 1016   |
| FG75      | 1150 | 977   | 1224 | 961    |
| FG76      | 1186 | 1031  | 1438 | 1038   |
| FG77      | 1122 | 1000  | 1237 | 991    |
| FG78      | 1178 | 1010  | 1325 | 1029   |
| FG79      | 1104 | 965   | 1109 | 970    |
| FG80      | 1169 | 992   | 1288 | 1000   |
| FG81      | 1129 | 1006  | 1329 | 1005   |
| FG82      | 1188 | 1030  | 1190 | 1028   |
| FG83      | 1185 | 1029  | 1165 | 1005   |
| FG84      | 1224 | 1012  | 1266 | 1004   |
| FG85      | 1244 | 1005  | 1140 | 1032   |
| FG86      | 1197 | 1054  | 1378 | 1033   |
| FG87      | 1137 | 985   | 1130 | 995    |
| FG88      | 1270 | 1085  | 1408 | 1091   |
| FG89      | 1357 | 1114  | 1402 | 1114   |
| FG90      | 1223 | 1050  | 1602 | 1070   |
| Ortalama: | 1162 | 1017  | 1279 | 1020   |

Tablo 7.35 Uzman- ve SPT-başlangıçlı tabu arama yöntemlerinin altıncı sistem durumu için eşlendirilmiş-t testi istatistiği

| Yönt. \ Yönt. | US     | Spt_TA |
|---------------|--------|--------|
| US_TA         | 0,0000 | 0,265  |

Tablo 7.36 Uzman ve SPT-başlangıçlı tabu arama yöntemlerinin altıncı sistem durumu için ürettiği tabu arama parametre değerleri

|        | MRI%  | MEN   | MMN  | TIME  | LBE | MPI% |
|--------|-------|-------|------|-------|-----|------|
| US_TA  | 12,52 | 17706 | 3180 | 41,70 | 1   | 20,5 |
| Spt_TA | 20,27 | 19328 | 3331 | 44,50 | 0   | -    |

Yedinci sistem durumu için, FG01-30 problemleri üzerinde  $k=4,5$  için üretilen maksimum tamamlanma zamanı değerleri (Tablo 7.37) karşılaştırılmıştır. Uzman-başlangıçlı tabu arama ile uzman sistem yönteminin ikili karşılaştırılması neticesinde üretilen test istatistiğine göre, 0,000 anlam düzeyinde tabu aramanın uzman sistemden farklı ve daha iyi olduğu söylenebilir (Tablo 7.38). Çünkü tabu arama uzman sistem çözümünü %7,95 iyileştirmiştir (Tablo 7.39). Üstelik 30 problemde 19'u için  $C_{max}$  alt sınır çözümü (Tablo 7.37'de '\*' işaretli olanlar) bulunmuş olması çok önemli bir sonuçtur. Ayrıca bu sistem durumu için diğer basit öncelik kurallarına nisbeten daha iyi sonuç veren SPT-başlangıçlı tabu arama ile uzman-başlangıçlı tabu arama yöntemi karşılaştırılmıştır. Buna göre, 0,000 anlam düzeyinde birbirinden farklı ve uzman-başlangıçlı tabu arama yönteminin daha iyi olduğu söylenebilir (Tablo 7.38). Son olarak, Tablo 7.39'den uzman-başlangıçlı tabu arama çözümünün geleneksel SPT çözümünden %14,61 daha iyi olduğu görülmektedir.

Sekizinci sistem durumu için, FG31-60 problemleri üzerinde  $k=4,5$  için üretilen maksimum tamamlanma zamanı değerleri (Tablo 7.40) karşılaştırılmıştır. Uzman-başlangıçlı tabu arama ile uzman sistem yönteminin ikili karşılaştırılması neticesinde üretilen test istatistiğine göre, 0,000 anlam düzeyinde tabu aramanın uzman sistemden farklı ve daha iyi olduğu söylenebilir (Tablo 7.41). Çünkü tabu arama uzman sistem çözümünü %12,79 iyileştirmiştir (Tablo 7.42). Üstelik 9 problemi için  $C_{max}$  alt sınır çözümü bulunmuştur (Tablo 7.40'da '\*' işaretli olanlar). Ayrıca bu sistem durumu için diğer basit öncelik kurallarına nisbeten daha iyi sonuç veren SPT-başlangıçlı tabu arama ile uzman-başlangıçlı tabu arama yöntemi karşılaştırılmıştır. Buna göre, ancak 0,002'nin üstünde bir anlam düzeyinde bu yöntemlerin birbirinden farklı ve uzman-başlangıçlı tabu arama yönteminin daha iyi olduğu söylenebilir (Tablo 7.41). Son olarak, Tablo 7.42'den uzman-başlangıçlı tabu arama çözümünün geleneksel SPT çözümünden %17,86 daha iyi olduğu görülmektedir.

Tablo 7.37 Uzman- ve SPT-başlangıçlı tabu arama yöntemlerinin FG01-30 problemleri için ürettiği  $C_{max}$  değerleri

| Prob\Yönt | US   | US_TA | SPT  | Spt_TA |
|-----------|------|-------|------|--------|
| FG01      | 1835 | 1794  | 2176 | 1815   |
| FG02      | 1942 | 1848* | 1848 | 1848*  |
| FG03      | 1973 | 1945* | 2224 | 1945*  |
| FG04      | 1966 | 1966* | 2190 | 1966*  |
| FG05      | 2045 | 1804  | 2318 | 1782   |
| FG06      | 1817 | 1780  | 2199 | 1792   |
| FG07      | 1922 | 1770* | 2040 | 1812   |
| FG08      | 1826 | 1602* | 1928 | 1602*  |
| FG09      | 1914 | 1801  | 2125 | 1822   |
| FG10      | 1721 | 1712* | 1918 | 1724   |
| FG11      | 1901 | 1752* | 2151 | 1752*  |
| FG12      | 2072 | 1723  | 2036 | 1730   |
| FG13      | 1767 | 1603  | 1947 | 1639   |
| FG14      | 2029 | 1720  | 1995 | 1760   |
| FG15      | 1965 | 1842* | 2214 | 1842*  |
| FG16      | 2044 | 1717* | 1921 | 1717*  |
| FG17      | 1963 | 1690  | 2067 | 1733   |
| FG18      | 1979 | 1888  | 2430 | 1888   |
| FG19      | 1838 | 1838* | 1940 | 1838*  |
| FG20      | 1939 | 1668  | 1983 | 1755   |
| FG21      | 1931 | 1798* | 2146 | 1808   |
| FG22      | 2044 | 1724* | 2071 | 1773   |
| FG23      | 1939 | 1673* | 2080 | 1708   |
| FG24      | 1633 | 1581* | 1764 | 1581*  |
| FG25      | 1951 | 1701* | 2184 | 1749   |
| FG26      | 1991 | 1766* | 2121 | 1766*  |
| FG27      | 1899 | 1845* | 2104 | 1902   |
| FG28      | 1789 | 1723* | 1795 | 1757   |
| FG29      | 1786 | 1599  | 1864 | 1659   |
| FG30      | 1822 | 1629* | 1934 | 1629*  |
| Ortalama: | 1908 | 1757  | 2057 | 1787   |

Tablo 7.38 Uzman- ve SPT-başlangıçlı tabu arama yöntemlerinin yedinci sistem durumu için ürettiği maksimum tamamlanma zamanı değerleri için eşlendirilmiş-t testi istatistiği

| Yönt. \ Yönt. | US     | Spt_ST |
|---------------|--------|--------|
| US_TA         | 0,0000 | 0,0001 |

Tablo 7.39 Uzman- ve SPT-başlangıçlı tabu arama yöntemlerinin yedinci sistem durumu için ürettiği tabu arama parametre değerleri

|        | MRI%  | MEN   | MMN  | TIME  | LBE | MPI%  |
|--------|-------|-------|------|-------|-----|-------|
| US_TA  | 7,95  | 6898  | 2236 | 65,07 | 19  | 14,61 |
| Spt_TA | 13,13 | 18151 | 3339 | 136,7 | 11  | -     |

Tablo 7.40 Uzman- ve SPT-başlangıçlı tabu arama yöntemlerinin FG31-60 problemleri için ürettiği  $C_{max}$

| Prob\Yönt | US   | US_TA | SPT  | Spt_TA |
|-----------|------|-------|------|--------|
| FG31      | 1445 | 1201  | 1671 | 1229   |
| FG32      | 1277 | 1173* | 1482 | 1173*  |
| FG33      | 1401 | 1155* | 1453 | 1155*  |
| FG34      | 1478 | 1296  | 1416 | 1296   |
| FG35      | 1498 | 1242* | 1474 | 1242   |
| FG36      | 1362 | 1362* | 1379 | 1362*  |
| FG37      | 1536 | 1239  | 1565 | 1234   |
| FG38      | 1455 | 1220  | 1585 | 1215   |
| FG39      | 1293 | 1108  | 1434 | 1126   |
| FG40      | 1184 | 1098* | 1569 | 1151   |
| FG41      | 1464 | 1357  | 1577 | 1357   |
| FG42      | 1408 | 1199  | 1364 | 1224   |
| FG43      | 1414 | 1257* | 1444 | 1277   |
| FG44      | 1460 | 1228  | 1573 | 1314   |
| FG45      | 1321 | 1268  | 1490 | 1377   |
| FG46      | 1435 | 1199  | 1444 | 1214   |
| FG47      | 1300 | 1177  | 1369 | 1208   |
| FG48      | 1362 | 1226* | 1405 | 1226*  |
| FG49      | 1510 | 1314  | 1641 | 1296   |
| FG50      | 1457 | 1190  | 1349 | 1196   |
| FG51      | 1327 | 1167  | 1398 | 1173   |
| FG52      | 1556 | 1353  | 1642 | 1349   |
| FG53      | 1349 | 1195  | 1791 | 1312   |
| FG54      | 1381 | 1259  | 1619 | 1249   |
| FG55      | 1417 | 1242  | 1476 | 1252   |
| FG56      | 1642 | 1320  | 1539 | 1300   |
| FG57      | 1496 | 1297  | 1588 | 1423   |
| FG58      | 1395 | 1182* | 1384 | 1226   |
| FG59      | 1359 | 1150  | 1295 | 1178   |
| FG60      | 1302 | 1200* | 1473 | 1200*  |
| Ortalama: | 1409 | 1229  | 1496 | 1251   |

Tablo 7.41 Uzman- ve SPT-başlangıçlı tabu arama yöntemlerinin sekizinci sistem durumu için ürettiği maksimum tamamlanma zamanı değerleri için eşlendirilmiş-t testi istatistiği

| Yönt. \ Yönt. | US     | Spt_TA |
|---------------|--------|--------|
| US_TA         | 0,0000 | 0,002  |

Tablo 7.42 Uzman ve SPT-başlangıçlı tabu arama yöntemlerinin sekizinci sistem durumu için ürettiği tabu arama parametre değerleri

|        | MRI%  | MEN   | MMN  | TIME  | LBE | MPI%  |
|--------|-------|-------|------|-------|-----|-------|
| US_TA  | 12,79 | 12768 | 2875 | 50,53 | 9   | 17,86 |
| Spt_TA | 16,38 | 17800 | 3277 | 66,30 | 5   | -     |

Dokuzuncu sistem durumu için, FG61-90 problemleri üzerinde  $k=4,5$  için üretilen ortalama tezgah boş bekleme oranı değerleri (Tablo 7.43) karşılaştırılmıştır. Uzman-başlangıçlı tabu arama ile uzman sistem yönteminin ikili karşılaştırılması neticesinde üretilen test istatistiğine göre, 0,01 anlam düzeyinde tabu aramanın uzman sistemden farklı ve daha iyi olduğu söylenebilir (Tablo 7.44). Çünkü tabu arama uzman sistem çözümünü %19,27 iyileştirmiştir (Tablo 7.45). Ayrıca bu sistem durumu için diğer basit öncelik kurallarına nisbeten daha iyi sonuç veren SPT-başlangıçlı tabu arama ile uzman-başlangıçlı tabu arama yöntemi karşılaştırılmıştır. Buna göre, ancak  $\alpha=0,006$  ve üstü bir anlam düzeyinde bu yöntemler birbirinden farklı ve uzman-başlangıçlı tabu arama yönteminin daha iyi olduğu söylenebilir (Tablo 7.45). Son olarak, uzman-başlangıçlı tabu arama çözümünün geleneksel SPT çözümünden %32,13 daha iyi olduğu görülmektedir.





Tablo 7.43 Uzman- ve SPT-başlangıçlı tabu aramanın FG61-90 problemleri için ürettiği ort. tezgah boş bekleme oranı değerleri

| Prob\Yönt | US    | US_TA | SPT   | Spt_TA |
|-----------|-------|-------|-------|--------|
| FG61      | 0,242 | 0,183 | 0,212 | 0,172  |
| FG62      | 0,267 | 0,238 | 0,293 | 0,235  |
| FG63      | 0,301 | 0,246 | 0,393 | 0,238  |
| FG64      | 0,276 | 0,218 | 0,378 | 0,242  |
| FG65      | 0,29  | 0,215 | 0,334 | 0,265  |
| FG66      | 0,206 | 0,163 | 0,219 | 0,147  |
| FG67      | 0,236 | 0,195 | 0,264 | 0,196  |
| FG68      | 0,295 | 0,219 | 0,297 | 0,239  |
| FG69      | 0,265 | 0,207 | 0,288 | 0,229  |
| FG70      | 0,206 | 0,146 | 0,244 | 0,153  |
| FG71      | 0,219 | 0,19  | 0,285 | 0,173  |
| FG72      | 0,298 | 0,255 | 0,356 | 0,264  |
| FG73      | 0,275 | 0,243 | 0,371 | 0,239  |
| FG74      | 0,275 | 0,211 | 0,306 | 0,244  |
| FG75      | 0,23  | 0,177 | 0,276 | 0,187  |
| FG76      | 0,249 | 0,222 | 0,367 | 0,224  |
| FG77      | 0,236 | 0,206 | 0,275 | 0,215  |
| FG78      | 0,275 | 0,232 | 0,374 | 0,216  |
| FG79      | 0,284 | 0,229 | 0,32  | 0,223  |
| FG80      | 0,26  | 0,218 | 0,318 | 0,207  |
| FG81      | 0,272 | 0,202 | 0,321 | 0,219  |
| FG82      | 0,263 | 0,186 | 0,244 | 0,209  |
| FG83      | 0,271 | 0,173 | 0,258 | 0,208  |
| FG84      | 0,211 | 0,203 | 0,28  | 0,221  |
| FG85      | 0,273 | 0,228 | 0,296 | 0,232  |
| FG86      | 0,318 | 0,289 | 0,422 | 0,293  |
| FG87      | 0,265 | 0,221 | 0,279 | 0,215  |
| FG88      | 0,303 | 0,215 | 0,295 | 0,223  |
| FG89      | 0,264 | 0,225 | 0,376 | 0,267  |
| FG90      | 0,249 | 0,202 | 0,425 | 0,217  |
| Ortalama: | 0,262 | 0,212 | 0,312 | 0,22   |

Tablo 7.44 Uzman- ve SPT-başlangıçlı tabu aramanın dokuzuncu sistem durumu için ürettiği ortalama tezgah boş bekleme oranı değerleri için eşlendirilmiş-t testi istatistiği

| Yönt \ Yönt. | US     | Spt_TA |
|--------------|--------|--------|
| US_TA        | 0,0000 | 0,0062 |

Tablo 7.45 Uzman- ve SPT-başlangıçlı tabu arama yöntemlerinin dokuzuncu sistem durumu için ürettiği tabu arama parametre değerleri

|        | MRI%  | MEN   | MMN  | TIME  | LBE | MPI%  |
|--------|-------|-------|------|-------|-----|-------|
| US_TA  | 19,27 | 15385 | 2853 | 35,73 | 0   | 32,13 |
| Spt_TA | 29,4  | 19172 | 3406 | 44,90 | 0   | -     |

## 7.6 Dency Sonuçları

Atölye tipi üretimde etkin çizelgeleme araçları geliştirmek için yapılan deneysel çalışmada elde edilen istatistiki deney sonuçları aşağıda dört gurupta sunulmuştur:

1. Uzman sistem ve öncelik kuralları karşılaştırması neticesinde şu önemli sonuçlar elde edilmiştir:

a) Üçüncü, beşinci ve sekizinci sistem durumları hariç bütün sistem durumlarında, uzman sistem karşılaştırılan 13 değişik öncelik kuralından, % 0,1 anlam düzeyinde istatistiki olarak, farklı ve daha iyi çözümler üretmiştir. Hatta üçüncü sistem durumunda % 3 anlam düzeyinde yine uzman sistem bütün öncelik kurallarından farklı ve daha iyi çözümler üretmiştir.

b) Beşinci sistem durumunda uzman sistem ile MWKR ve sekizinci sistem durumunda da uzman sistem ile MWKR ve MPNR öncelik kuralları arasında, % 10 anlam düzeyinde bile, istatistik olarak fark çıkmamıştır. Ayrıca, beşinci sistem durumunda uzman sistem ile MPNR öncelik kuralı arasında, % 5 anlam düzeyinde fark çıkmamıştır. Ancak bunlar dışında, beşinci ve sekizinci sistem durumunda % 0,5'in üzerinde bir anlam düzeyi ile uzman sistem diğer bütün öncelik kurallarından farklı ve daha iyi çözümler üretmiştir.

2. Uzman sistem ve uzman-başlangıçlı tabu arama yöntemi karşılaştırması neticesinde, bütün sistem durumlarında kabul edilen başarı ölçütüne göre, tabu arama yöntemi, 9 sistem durumunun hepsinde, uzman sistemin ürettiği başlangıç çözümlerini iyileştirmiştir (bütün karşılaştırmalarda % 0,0 anlam düzeyinde uzman-balańęlı tabu arama modülü çözümleri, uzman sistem çözümlerinden farklı ve daha iyi çıkmıştır).

Bütünleşik bir çizelgeleme modeli amaçlandığından dolayı, bu çizelgeleme sistemi birden fazla başarı ölçütü için çözüm üretebilmektedir. O değişen sistem duruma göre uygun düşen farklı başarı ölçütlerini iyileştirebilmektedir. Tabu aramanın uzman sistem çözümünü iyileştirmesi sistem durumuna ve başarı ölçütüne göre farklılık arzetmektedir. Buna göre öngörülen dört başarı ölçütüne ilişkin iyileştirmeler şöyledir: Ez az iyileştirme birinci ve dördüncü sistem durumlarında ortalama akış süresi başarisında, ortalama %1,05 mertebesinde olmuştur. Ortalama pozitif gecikme başarısı iyileşmesi ikinci sistem durumunda %7,35 ve üçüncü

sistem durumunda ise %14,56 mertebesinde olmuştur. En büyük tamamlanma zamanı başarısı iyileşmesi beşinci sistem durumunda %12, altıncı sistem durumunda %12,52 , yedinci sistem durumunda %7,95 ve sekizinci sistem durumunda %12,79 mertebesinde olmuştur. En yüksek iyileşme ise ortalama tezgah boş bekleme oranı başarısında dokuzuncu sistem durumunda, ortalama % 19,27 mertebesinde olmuştur.

3. Tabu arama yöntemini daha iyi bir başlangıç çizelgesi ile işe başlatmak için yapılan deneysel karşılaştırmalar neticesinde, uzman sistemin 13 öncelik kuralının en iyi başarıyı gösterenden bile, istatistiki olarak, daha iyi çözümler ürettiği sonucu elde edilmiştir.

Buna göre, uzman-başlangıçlı tabu arama yöntemi ile en iyi basit öncelik kuralı başlangıçlı tabu arama yöntemi karşılaştırması neticesinde birinci, dördüncü, yedinci, sekizinci ve dokuzuncu sistem durumlarında,  $\alpha > 0,006$  anlam düzeylerinde, uzman-başlangıçlı tabu aramanın SPT-başlangıçlı tabu aramadan istatistiki olarak farklı ve daha iyi çözüm üretmiştir. Öyleki, SPT bu sistem durumlarında başarı ölçütü açısından oldukça iyi bir öncelik kuralıdır. İkinci ve beşinci sistem durumlarında,  $\alpha > 0,029$  anlam düzeylerinde uzman-başlangıçlı tabu aramanın SPT ve EDD öncelik kuralı başlangıçlı tabu aramadan farklı ve daha iyi çözüm üretmiştir. Öyleki, SPT ve EDD bu sistem durumlarında başarı ölçütü açısından oldukça iyi öncelik kurallarıdır. Ancak, üçüncü ve altıncı sistem durumlarında ise,  $\alpha = 0,10$  anlam düzeyinde bile başlangıç çözümü için uzman sistem veya EDD ve SPT gibi nisbeten iyi basit öncelik kuralından birisinin kullanılmasının önemli olmadığı sonucu çıkarılmaktadır.

4. Genel olarak, tabu arama ile makul sürede elde edilen çözüm değerinin, bütün sistem durumlarında, karşılaştırılan öncelik kuralları arasında, başarı ölçütü bakımından en iyi olanın çözüm değerinden ortalama %16,74 daha iyi olduğu bulunmuştur. Özel olarak, en büyük tamamlanma zamanı başarı ölçütüne göre, tabu arama yöntemi SPT çizelgeleme kuralı çözümünü ortalama %17,6 oranında iyileştirmiştir. Bu oran Bölüm 6'daki literatür test problemleri üzerindeki ortalama iyileştirme oranı (MRI) değeri olan %15,6'nın üzerinde çıkmıştır. Burada test problemleri üzerindeki %15,6 oranındaki SPT iyileştirmesi, o test problemlerinin optimal çözümlerinden ortalama %5,4 uzak olma anlamına geliyordu. Buradan hareketle, deney çalışmasında elde edilen çözümlerin optimalden sadece %5 civarında uzağında olduğunu söylemek mümkündür.

## BÖLÜM 8. SONUÇLAR

Atölye tipi üretim çizelgeleme problemlerinin çözüm kalitelerinin yükseltilmesine yönelik bu çalışmada ortaya çıkan sonuçlar, uzman sistem çizelgelemeye ilişkin olanlar, tabu arama çizelgeleme modülüne ilişkin olanlar ve genel olmak üzere üç grupta toplanabilir:

### 1. Uzman sistem çizelgeleme modülüne ilişkin sonuçlar:

- a) Her koşulda iyi sonuç veren bir çizelgeleme kuralı olmadığından, çözüm için hangi kuralın kullanılacağı atölye ortamının durumuna ya da öngörülen amaca göre değişmektedir. Bu durumda, geliştirilecek bir uzman sistemin atölye düzeyindeki çizelgeleme kararlarını verebileceği görülmüştür.
- b) Atölye düzeyindeki farklı iş yükü ve iş teslim tarihi durumlarına göre sistem durumunu tesbit eden, ona uygun bir başarı ölçütü ve bir çizelgeleme kuralı önerebilecek, 24 kuraldan oluşan prototip bir bilgi tabanı oluşturulmuştur ve etkinliği görülmüştür.
- c) Nisbeten iyi çizelgeler üretebilen 13 öncelik kuralının, belli atölye durumlarında ve belli başarı ölçütlerine göre, ikiserli olarak en iyi olanlarının %50 oranında kullanılarak oluşturulacak yeni bir çizelgeleme kuralının, o iki öncelik kuralından daha iyi çizelgeler ürettiği görülmüştür.

### 2. Tabu arama çizelgeleme modülüne ilişkin sonuçlar:

- a) Tabu aramanın zeki problem çözme yeteneğinin, atölye tipi çizelgeleme gibi matematiksel çözüm zorluğu olan, en iyileme problemleri için etkinlikle kullanılabileceği görülmüştür.

- b) Tabu aramanın temel yapısını oluşturan, çeşitli parametre ve taktiklerin atölye tipi çizelgeleme probleminde alabileceği çeşitli değerler genişçe irdelenerek, iyi çizelgeler üretebilen bir parametre ve taktik değerleri seti sunulmuştur
- c) Tabu aramanın temel unsurlarından biri olan komşuluk yapısı için, GI Komşuluğu olarak adlandırılan yeni bir çizelgeleme komşuluk düzeneği oluşturulmuş ve etkinlikle kullanılabilceği görülmüştür.
- d) Tabu aramada kullanılan başlangıç çözümü bulma yönteminin tabu aramanın başarı üzerinde etkili olduğu görülmüştür. Bu arada, çizelgelemede uzman sistem başlangıç çözümünün basit öncelik kuralları başlangıç çözümünden daha iyi başarı gösterdiği sonucu çıkarılmıştır.
3. Uzman sistem ve tabu aramadan oluşan bütünleşik bir çizelgeleme modeli sunularak, bu modelle birden fazla başarı ölçütü için etkin çözümler üretilebileceği görülmüştür. O değişen atölye durumuna göre uygun olan farklı başarı ölçütlerini iyileştirebilmektedir.

## BÖLÜM 9. TARTIŞMA VE ÖNERİLER

### 9.1 Araştırmanın Katkıları

Bu araştırmanın beş önemli katkısı olmuştur:

1. Amaçlanan çizelgeleme modeli, uzman sistemler ve tabu arama yöntembilimini, ilk defa bir arada kullanan, bütünleşik bir çizelgeleme ortamı oluşturmaktadır. Böylece, duruma göre değişen farklı başarı ölçütlerinin aynı ortamda iyileştirilmesi sağlanmış olmaktadır.
2. Tabu arama literatürde teorik olarak bahsedilen bazı parametre ve taktiklerinin çizelgeleme uygulamasının nasıl olabileceği verilmektedir.
3. Üç yeni çizelgeleme komşuluk düzeneği oluşturulmuş ve bunlardan G1 komşuluğunun literatürdeki komşuluklardan, diğer parametreler sabit kabul edildiğinde, nisbeten daha iyi sonuç verdiği, test problemleri üzerinde istatistiki olarak gösterilmiştir.
4. Belli davranış biçimine sahip bir atölye için insan uzmanlar ve atölye benzetimi temelinde kazanılan bilgilerle oluşturulan prototip bir bilgi tabanı sunulmuş ve uygun basit öncelik kurallarının ikişerli %50 karışımıyla oluşturulan yeni bir öncelik indeksinin, basit öncelik kurallarına göre daha iyi çizelgeler ürettiği istatistiki olarak gösterilmiştir.
5. Tabu aramada kullanılabilecek alternatif başlangıç çözüm yöntemlerinden biri olan uzman sistem yönteminin, bir diğeri olan basit öncelik kuralları yönteminden genelde farklı ve daha iyi çözümler ürettiği istatistiki olarak gösterilmiştir.

## 9.2 Bulunan Sonuçların Analizi

Çıkarılan bir sonuca göre, tabu aramada uzman sistem başlangıç çözümünün basit öncelik kuralları çözümünden genelde farklı ve daha iyidir. Bu adım adım (iteratif) iyileştirme yöntemleri açısından çok önemlidir. Çünkü bu farklı başlangıç çizelgelerinin farklı oranda iyileştirilebildiğini gösterir. Dolayısıyla daha iyi ve çözüm uzayının daha geniş bir parçasından elde edilen bir başlangıç çözümünün daha fazla iyileştirilebileceği ileri sürülebilir.

Beş ve sekizinci sistem durumlarında uzman sistemin karşılaştırılan 13 basit öncelik kuralının nisbeten en iyisinden daha iyi sonuç üretmediği görülmektedir. Bu olumsuzluğun oluşturulan uzman sistemin daha fazla sistem bilgisinin dikkate alınması sağlanarak giderilebilmesi muhtemeldir. Amaçlanan uzman sistem sadece genel atölye yük oranı ve bütün işlerin ortalama teslim tarihi sıklığı faktörünü “gerçekler” olarak dikkate almaktadır. Bunlara ilaveten, problem alanından gerçek-zamanda veri toplanarak, herbir tezgah ve işin bilgisi dinamik olarak dikkate alınabilir.

Tabu arama yönteminin ortalama akış süresi başarısının önemli olduğu sistem durumlarında, nisbeten düşük bir iyileştirme oranı gerçekleştirilmesi dikkat çekicidir. Bu sonuç başarı ölçütünün kendi yapısından kaynaklanabilir. Çünkü iyileştirilmeye çalışılan şey herbir işin daha erken tamamlanmasına ilişkindir; sadece kritik olan birisinin daha erken tamamlanması değil. Dolayısıyla çok küçümsenecek bir netice değildir. Yine de ortalama pozitif gecikme ölçütünün de ortalama akış süresine benzer bir yapısı olmasına rağmen daha yüksek bir iyileşme oranı sergilemesi dikkat çekicidir.

Üçüncü ve altıncı sistem durumlarında uzman-başlangıçlı tabu arama ile basit öncelik kuralı başlangıçlı tabu arama yöntemleri arasında bir fark olmadığı görülmektedir. Halbuki aynı sistem durumlarında uzman sistem ve basit öncelik kurallarının farklı sonuçlar ürettiği görülmüştü. Dolayısıyla bu farklılığın tabu arama modülünü de etkilemesi beklenirdi. Böyle olmamasının nedeni, o sistem durumlarında, yerel optimalliklerin kuvvetli olmaması dolayısıyla optimal veya optimale yakın çözümlerin kolay bulunması olabilir. Veyahutta bunun tam tersi, o sistem durumlarında, çok kuvvetli yerel optimalliklerin olması dolayısıyla bunların aşılabilmesi olabilir. Eğer tabu arama için çok güçlü genişletme taktikleri uygulanabilirse, alınacak sonuca göre bunun gerçek nedeni de bilinebilir.

Genel olarak, atölye yükü hafifledikçe ve teslim tarihi sıklığı gevşedikçe tabu aramanın çizelgeleme başarısı üzerindeki iyileştirmesinin arttığı gözlenmektedir. Bu durum o noktadaki başlangıç çözümlerinin daha kötü olmasından kaynaklanabilir.

Tabu arama yönteminde yer alan bazı parametre ve taktiklerin uygulanması neticesinde beklenenin aksine daha iyi neticelere götürmemiştir. Bunlar özellikle ilave genişletme sağlaması amacıyla uygulanan çeşitli taktiklerdir. Bunlardan birisi, Bölüm 6'da açıklandığı gibi, iyileştirmeyen taşımalara ceza uygulama taktiğidir. Bir diğeri ise, seçkin çözümler arasında belli bir Hamming mesafesi olmasını sağlamak için uygulanan mesafe taktiğidir. Ayrıca ilave bir yoğunlaşma sağlaması amacıyla uygulanan birkaç taktik arasında ve birkaç aspirasyon taktiği arasında da büyük bir fark çıkmamıştır. Benzer şekilde, dinamik tabu listesi uzunluğu ve dinamik iterasyon yapısı da, umulduğu gibi daha iyi neticeler üretmemiştir. Bunların nedeni test problemlerinin yapısından kaynaklanabilir. Çünkü tabu arama yönteminin probleme-bağlı bir yapısı vardır. Bunun dışında, çeşitli taktiklerin uygulanmasında daha iyi yöntemler düşünülebilir. Tabu aramanın çok esnek olan yapısı bu tür uygulamalara müsaittir.

### 9.3 Gelecekteki Muhtemel Çalışma Konuları

Uzman sistemler imalat alanında gelecekte daha fazla uygulama bulacaktır. Hakkında yetersiz, eksik ve kaba varsayımlarla uyarlanmış bilgi bulunan (kötü yapılandırılmış) problemler uzman sistemler vasıtasıyla çözülecektir, ki bu tür problemleri en iyileme yöntemleri kullanarak çözmek zordur. Bilgisayar donanım ve yazılımları geliştirildikçe, diğer yöntemlerle sentezlenen uzman sistem tekniklerinin çok etkin ve esnek bir şekilde imalat problemlerini çözmesi muhtemeldir. Bu yüzden uzman sistemlerle bütünleşik yeni yaklaşımlar oluşturma önemli bir araştırma konusu olmaya devam edecektir.

Tabu arama yönteminde komşuluk düzenekleri çok önemli olduğundan dolayı, farklı başarı ölçütleri için o ölçütün yapısına uygun yeni komşuluk düzenekleri oluşturulması daha yüksek iyileştirmeler sağlayabilir. Mesela en büyük veya ortalama pozitif gecikme başarısı için, en büyük gecikmenin olduğu işin bütün işlemleri kritik işlem olarak dikkate alınabilir ve buna göre bir komşu üretme düzeneği kurulabilir. Bunun araştırılması yararlı olacaktır.



Tabu arama algoritmasının komşulukları değerlendirme safhası çok zaman gerektirdiğinden ve o taşımaların büyük çoğunluğunun (tezdeki deney sonuçlarına göre neredeyse %99) da çözümü iyileştirmediği bilindiğinden dolayı bu safhayı hızlandıracak çalışma konuları üzerine yoğunlaşmak daha uygundur. Bunun için, çözümü iyileştirme olasılığı yüksek olan taşımaları hızla tarayan tahmin teknikleri yararlı olabilir. Taillard (1994) ve Dell'Amico ve Trubian (1993)'in hızlı tahmin teknikleri mevcuttur. Bunların kullanıldığı tabu arama uygulamaları geliştirilebilir veya yeni tahmin teknikleri geliştirilebilir. Ayrıca, tabu aramanın iteratif yapısı gereği, aramanın ne kadar sürdürülmesi gerektiğinin bilinmesi önemlidir. Tabu aramada etkin durdurma ölçütlerinin tasarımı gerekir. Böyle bir ölçüt, problemler için tezgah yükü ve iş süreç bilgilerine göre bazı alt-sınır değerler belirleyip, ara çözüm değerleri bu alt-sınıra belli oranda yaklaştığında aramayı durdurması şeklinde olabilir.

Mevcut çözüm üzerinde büyük ilerlemeler sağlamak için hem güçlü bir yoğunlaşma taktiği hem de güçlü bir genişletme taktiği uygulamak gerektiği ilgili literatürde sözlü olarak vurgulanan bir husustur. Ancak bununla ilgili yayınlanmış uygulama neticeleri literatürde yer almamaktadır. Özellikle genişletme ile ilgili yapılacak uygulama araştırmalarının çok büyük yararlar sağlayacağı açıktır.

Çizelgelemede herhangi bir durumda bir tek başarı ölçütü olmayabilir. Belli sistem şartlarında, aynı anda birden fazla amacın yerine getirilmesi gerekebilir. Bunu gerçekleştirmek amacıyla yapılacak çalışmalar büyük yararlar sağlayacaktır. Aslında uzman sistem ve tabu arama yöntemlerinin birlikte bunu gerçekleştirebilecek bir yapısı vardır. Birden fazla başarı ölçütü bir tek amaç fonksiyonu içerisinde değerlendirilebilir.

İmalat ortamlarının bütünleşik planlanması ve kontrolüne yönelik araştırmalar gelecekteki çok önemli çalışma alanlarını oluşturacaktır. Bunun için imalat ortamından gerçek-zamanlı bilgi toplanması gerekecektir. Yapay zeka yaklaşımları imalat ortamındaki dinamik durumları kullanabilir, ama onlar çok büyük miktarda tekrarlı hesap gerektiren en iyileme işleri için kullanılamazlar. Oysa optimale yakın çözümler üretmek için bu tür tekniklerin de kullanılması gerekmektedir. Sonuç olarak, hem dinamik sistem bilgilerini kullanabilen hem de iteratif işlemlerle iyi çözümler üretebilen bütünleşik çizelgeleme sistemleri tasarlamak muhtemelen gelecekteki en önemli çalışma konusunu oluşturacaktır.

## KAYNAKLAR

- [1] AARTS, E.H.L., LAARHOVEN, P.J.M. van, LENSTRA, J.K. & Ulder, N.L.J., "A computational study local search algorithms for job-shop scheduling", ORSA Journal on Computing, Spring, Vol.6, No.2, pp.118-125, 1994.
- [2] ADAMS, J., BALAS, E. & ZAWACK, D., "The shifting bottleneck procedure for the job shop scheduling", Management Science, Vol.34, pp.391-401, 1988.
- [3] ALFANO, M., GENCO, A., LOPES, S., & PRESTIGIACOMO, A., "Scheduling simulation on a parallel virtual machine", Proceedings of the European Simulation Symposium, 1994.
- [4] ALPAR, P. & SRIKANTH, R., "Closed-shop scheduling with expert systems techniques", Knowledge-Based Systems in Manufacturing (edt) by A.Kusiak, John Wiley, New York, 1989.
- [5] APPLGATE, D. & COOK, W., "A computational study of the job-shop scheduling instance", ORSA Journal on Computing Vol.3, pp.149-156, 1991.
- [6] ARIZONO, I., YAMAMUTO, A. & OHTA, H., "Scheduling for minimizing total actual flow time by neural networks", International Journal of Production Research, Vol.30, pp.503-511, 1992.
- [7] ASKIN, R.G. & IYER, A., "A comparison of scheduling philosophies for manufacturing cells", European Journal of Operational Research, Vol. 69, pp.438-449, 1993.
- [8] BAKER, K.R., Introduction to Sequencing & Scheduling, John Wiley, New York, 1974.
- [9] BAKER, K.R., "Sequencing rules and due date assignments in a job shop", Management Science, Vol.30, No.9, pp.1093-1104, 1984.
- [10] BAKER, K.R., Elements Of Sequencing and Scheduling, Dartmouth College, Hannover, 1994.
- [11] BALAS, E. & VAZACOPOULOS, A., "Guided Local Search with Shifting Bottleneck for Job Shop Scheduling", Management Science, Vol.44, pp.262-275, 1998.

- [12] BALAS, E., LENSTRA, J.K. & VAZACOPOULOS, A., "One Machine Scheduling with Delayed Precedence Constraints", *Management Science* Vol.41, pp.94-109, 1995.
- [13] BARNES, J.W. & CHAMBERS, J.B., Technical Note "Solving the job shopscheduling problem with tabu search", *IEE Transactions*, Vol.27, pp.257-263, 1995.
- [14] BARNES, J.W. & LAGUNA, M., "A tabu search experience in production scheduling", *Annals of Operations Research*, Vol.41, pp.141-156, 1993.
- [15] BARNES, J.W., LAGUNA, M. & Glover, F., "An overview of tabu search approaches to production scheduling problems", in D.E.Brown and W.T.Scherer (Ed.), *Intelligent Scheduling Systems*, Kluver Academic, Boston, USA, pp.101-128, 1995.
- [16] BEL, E., BENSANA, E., DUBOIS, D., ERSCHER, J. & ESQUIROL, P., "A knowledge-based approach to industrial job-shop scheduling (OPAL)", *Knowledge-Based Systems in Manufacturing* (edt) by A.Kusiak, 1989.
- [17] BIERWIRTH, C. & MATTFELD, D.C., "Production scheduling and rescheduling with genetic algorithms", *Evolutionary Computation*, Vol.7, No.1, pp.1-17, 1999.
- [18] BLACK, J.T., *The Design Of The Factory With A Future*, McGraw-Hill, Singapore, 1991.
- [19] BLACKSTONE, J.H., PHILIPS, D.T. & HOGG, G.L., "A state-of-art survey of dispatching rules for manufacturing job shop operations", *International Journal of Production Research*, Vol.20, No.1, pp.27-45, 1982.
- [20] BROWN, D.E., MARIN, J.A. & SCHERER, W.T., "A survey of intelligent scheduling systems", in D.E.Brown and W.T.Scherer (Ed.), *Intelligent Scheduling Systems*, Kluver Academic, Boston, USA, pp.1-40, 1995.
- [21] BROWN, M.C., "An AI-based assistant for conquering the changing production environment", *Knowledge-Based Systems in Manufacturing* (edt) by A.Kusiak, John Wiley, New York, 1989.
- [22] BRUCKER, P., "An efficient algorithm for the job-shop problem with two jobs", *Computing*, Vol.40, pp.353-359, 1988.
- [23] BRUCKER, P., JURISCH, B. & SIEVERS, B., "A branch and bound algorithm for the job-shop scheduling problem", *Discrete Applied Mathematics*, Vol.49, pp.107-127, 1994.
- [24] BRUCKER, P., *Scheduling Algorithms*, Springer-Verlag, Berlin, 1995.

- [25] CARLIER, J., "The one machine sequencing problem", *European Journal of Operational Research*, Vol.11, pp.42-47, 1982.
- [26] CARLIER, J. & PINSON, E., "An algorithm for solving the job shop problem", *Management Science*, Vol.35, pp.164-176, 1989.
- [27] CARLIER, J. & PINSON, E., "A practical use of Jackson's preemptive schedule for solving the job-shop problem", *Annals of Operations Research*, Vol.26, pp.269-287, 1990.
- [28] CEDİMOĞLU, İ.H., "Neural Networks in Shop Floor Scheduling", Ph.D. Thesis, Cranfield Institute of Technology, 1993.
- [29] CEDİMOĞLU, İ.H. VE GEYİK, F., "Tabu arama tekniğiyle klasik iş-atölyesi çizelgeleme", *Yöneylem Araştırması / Endüstri Mühendisliği XX. Ulusal Kongresi*, Kara Harp Okulu, Ankara, 8-9 Haziran, 1999.
- [30] CHEN, C.L. & BULFIN, R., "Scheduling a single machine to minimize two criteria: maximum tardiness and number of tardy jobs", *IEE Transactions*, Vol.26, No.5, pp.76-84, 1994.
- [31] CHOW, L.R. & HUANG, H.S., "The design of an intelligent job scheduler", *Information and Management Sciences*, Vol.1, No.1, June, pp.1-12, 1990.
- [32] COPAS, C. & BROWNE, J., "Rule-based scheduling system for flow type assembly", *International Journal of Production Research*, Vol.28, No.5, pp 981-1005, 1990.
- [33] CUSTODIO, L.M.M., SENTIEIRO, J.J.S. & BISP, C.F.G., "Production planning and scheduling using a fuzzy decision system", *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol.10, No.2, pp.160-167, 1994.
- [34] DAĞLI, C.H., LAMMERS, S. & VELLANKI, M., "Intelligent scheduling in manufacturing using neural networks", *Journal of Neural Network Computing Technology Design and Applications*, Vol.2, No.4, pp.4-10, 1991.
- [35] DATTERO, R., KANET, J.J. & WHITE, E.M., "Enhancing manufacturing planning and control systems with AI techniques", *Knowledge-Based Systems in Manufacturing* (edt) by A.Kusiak, John Wiley, New York, 1989.
- [36] DAUZERE-PERES, S. & LASSERRE, "A modified shifting bottleneck procedure for job shop scheduling", *International Journal of Production Research*, Vol.31, pp.923-932, 1993.
- [37] DELL'AMICO, M. & TRUBIAN, M., "Applying tabu search to the job shop scheduling problem", *Annals of Operations Research*, Vol.41, pp.231-252, 1993.

- [38] DORNDORF, U. & PESCH, E., "Evolution based learning in a job shop scheduling environment", *Computers and Operations Research* Vol.22, pp.25-40, 1995.
- [39] DORNDORF, U., PESCH, E. & HUY, T.P., "Recent developments in scheduling", *Operation Research Proceedings* (to appear).
- [40] DUDEK, R.A., PANWALKER, S.S. & SMITH, M.L., "The lessons of flow shop scheduling research", *Operations Research*, Vol.40, No.1, pp.7-13, 1992.
- [41] DUECK, G. & SCHEUER, T., "Threshold Accepting: A general purpose optimization algorithm appearing superior to Simulated Annealing", *Journal of Computation Physics*, Vol.90, pp.161-175, 1990.
- [42] EIKELDER, H.M.M. TEN, AARTS, B.J.M, VERHOEVEN, M.G.A. & AARTS, E.H.L., "Sequential and parallel local search algorithms for job shop scheduling", *Second International Conference on Meta-heuristics (MIC'97)*, Sophia-Antipolis, France, July 21-24, pp.75-80, 1997.
- [43] ELVERS, D.A. & TAUBE, L.R., "Time completion for various dispatching rules in job shops", *OMEGA The International Journal of Management Science*, Vol.11, No.1, pp. 81-89, 1983.
- [44] FISHER, H. & THOMPSON, G.L., "Probabilistic learning combinations of local job-shop scheduling rules", in J.F. Muth and G.L. Thompson (Ed.), *Industrial Scheduling*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, pp.225-251, 1963.
- [45] FOO, Y-P.S. & TAKEFUJI, Y., "Stochastic neural networks for solving job-shop scheduling: Part 1 problem representation," *Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Network*, July 1988a.
- [46] FOO, Y-P.S. & TAKEFUJI, Y., "Stochastic neural networks for solving job-shop scheduling: Part 2 architecture and simulations," *Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Network*, July 1988b.
- [47] FOX, M.S. & SMITH, S.F., "ISIS: A knowledge-based system for factory scheduling", *Expert Systems*, Vol.1, No.1, pp.25-49, 1984.
- [48] FRENCH, S., *Sequencing and Scheduling - An Introduction to the Mathematics of the Job-Shop*, John-Wiley & Sons, New York, 1982.
- [49] GEYİK, F. VE CEDİMOĞLU, İ.H., "Üretim çizelgeleme: Yapay zeka çözüm yaklaşımlarının geniş bir taraması", *Yöneylem Araştırması / Endüstri Mühendisliği XIX. Ulusal Kongresi, ODTÜ, Ankara, 25-26 Haziran, 1998.*

- [50] GEYİK, F. & CEDİMOĞLU, I.H., "A review of the production scheduling approaches based-on artificial intelligence and the integration of process planning and scheduling", in A. Belhi, P.J. Erard and A. Bouras (Ed.), Proceedings on Swiss Conference of CAD/CAM'99, Neuchatel University, Switzerland, 22-24 February, pp.167-174, 1999.
- [51] GLOVER, F. & LAGUNA, M., Tabu Search, Kluwer Academic Publishers, Norwell, MA, 1997.
- [52] GLOVER, F., "Future paths for integer programming and links to artificial intelligence", Computers and Operations Research, Vol.13, No.5, pp.533-549, 1986.
- [53] GLOVER, F., "Tabu Search - Part I", ORSA Journal on Computing, Summer, Vol.1, No.3, pp.190-206, 1989.
- [54] GLOVER, F., "Tabu Search - Part II", ORSA Journal on Computing, Winter, Vol.2, No.1, pp.4-32, 1990.
- [55] GOLDBERG, D. E., Genetic Algorithms in Search Optimization and Machine Learning, Addison Wesley, Reading, MA, 1989.
- [56] GRABOWSKI, J., NOWICKI, E. & ZDRZALKA, S., "A block approach for single machine scheduling with release dates and due dates", European Journal of Operational Research, Vol.26, No.2, pp.278-285, 1986.
- [57] HOLSAPPLE, C.W., JACOP, V.S., PACART, R. & ZAVERI, J.S., "A genetic-based hybrid scheduler for generating static schedules in flexible manufacturing contexts", IEEE Transactions on System, Manufacturing and Cybernetics, Vol.23, No.4, pp.953-971, 1993.
- [58] HOPFIELD, J.J. & TANK, D.W., "Neural computational of decisions in optimization problems", Biological Cybernetics, Vol.52, pp.141-152, 1985.
- [59] HUANG, S.H., ZHANG, H.C. & SMITH, M.L., "A progressive approach for the integration of process planning and scheduling", IEE Transactions, Vol.27, pp.456-464, 1995.
- [60] JAGDEV, H.S., "An intelligent knowledge based system for the scheduling of a cell with parallel facilities", in J.Browne (Ed.), Knowledge Based Production Management Systems, Elsevier, Nort-Holland, 1989.
- [61] JAIN, A.S., "A multi-level hybrid framework for the deterministic job-shop scheduling problem", Ph.D. Thesis, Department of Applied Physics and Electronic and Mechanical Engineering, University of Dundee, UK, October 1998.

- [62] JAIN, A.S. & MEERAN, S., "Job-shop scheduling using neural networks", *International Journal of Production Research*, Vol.36, No.5, pp.1249-1272, 1998.
- [63] JONES, A., RABELO, L. & YIH, Y., "Hybrid approach for real-time sequencing and scheduling", *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, Vol.8, No.2, pp.145-154, 1995.
- [64] KARABOGA, D. & KALINLI, A., "A Tabu search algorithm for combinatorial optimisation problems", 11th ESM'97 Edited by A.R. Kaylan and A. Lehmann, Boğaziçi University, 1997.
- [65] KERR, R.M. & EBSARY, R.V., "Implementation an expert system for production scheduling", *European Journal of Operational Research*, Vol.33, No.1, pp.17-29, 1988.
- [66] KERR, R.M., "Expert system in production scheduling: Lessons from a failed implementation", *Journal of Systems and Software*, Vol.19, No.2, pp.123-130, 1992.
- [67] KIM, S.Y. & Leachman, R.C., "Multi-project scheduling with explicit lateness cost", *IEE Transactions*, Vol.25, No.2, pp.34-44, 1993.
- [68] KIM, S.Y., LEE, Y.H. & AGNIHOTRI, D. "A hybrid approach for sequencing jobs using heuristic rules and neural networks", *Production Planning and Control*, Vol.6, No.5, pp.445-454., 1995.
- [69] KIM, Y.D., "A comparison of dispatching rules for job shops with multiple identical jobs and alternative routings", *International Journal of Production Research*, Vol.28, No.5, pp.953-962, 1990.
- [70] KIRAN, A.S. & SMITH, M.L., "Simulation studies in job shop scheduling-I: A survey", *Computers and Industrial Engineering*, Vol.8, No.2, pp. 87-93, 1984 a.
- [71] KIRAN, A.S. & SMITH, M.L., "Simulation studies in job shop scheduling-II: Performance of priority rules", *Computers and Industrial Engineering*, Vol.8, No.2, pp. 95-105, 1984 b.
- [72] KIRKPATRICK, S., GERLATT, C. D. JR. & VECCHI, M.P., "Optimization by Simulated Annealing", *Science* Vol.220, pp.671-680, 1983.
- [73] KLEIN, M., LECOMTE, C. & DEJAX, P., "Using a knowledge-based decision support system development to implement a scheduling system for a workshop", *International Journal of Production Research*, Vol.30-31, pp.437-451, 1993.
- [74] KÖKSAL, B.A., *İstatistik Analiz Metodları*, Çağlayan Kitabevi, İstanbul, 1985.

- [75] KUSIAK, A. & CHEN, M., "Expert system for planning and scheduling manufacturing systems", *European Journal of Operational Research*, Vol.34, No.2, pp.113-130, 1988.
- [76] KUSIAK, A., "Designing expert systems for scheduling of automated manufacturing", *Industrial Engineering*, Vol.19, No.7, 42-46, pp.42-46, 1987.
- [77] KUSIAK, A., *Intelligent Manufacturing Systems*, Prentice-Hall, Singapore, 1990.
- [78] LAARHOVEN, P.J.M. VAN, AARTS, E.H.L. & LENSTRA, J.K., "Job Shop Scheduling by Simulated Annealing", *Operational Research*, Vol.40, No.1, pp.113-125, 1992.
- [79] LAGEWEG, B.J., LENSTRA, J.K. & RINNOOY KAN, A.H.G., "Job-shop scheduling by implicit enumeration", *Management Science* Vol.24, pp.441-450, 1977.
- [80] LAGUNA, M. & GLOVER, F., "What is tabu search?", *Colorado Business Review*, Vol.LXI, No.5, Sep.1996.
- [81] LAWRENCE, S., *Resource constrained project scheduling: an experimental investigation of heuristic scheduling techniques (Supplement)*, Graduate School of Industrial Administration, Carnegie-Mellon University, Pittsburg, Pennsylvania, 1984.
- [82] LEE, D.Y. & DICESARE, F., "Scheduling manufacturing systems using petri nets and heuristic search", *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol.10, No.2, pp.123-132, 1994.
- [83] LEE, S.E. & O'KEEFE, R.M., "Developing a strategy for expert system verification and validation", *IEEE Transactions on System, Manufacturing and Cybernetics*, Vol.24, No.4, pp.643-655, 1994.
- [84] LEON, V.J., WU, S.D. & STORER, R.H., "Robustness measures and robust scheduling for job-shops", *IEE Transactions*, Vol.26, No.5, pp.32-43, 1994.
- [85] LIN, C.S. & LEE, C.Y., Technical Note "Single-machine stochastic scheduling with dual criteria", *IEE Transactions*, Vol.27, pp.244-249, 1995.
- [86] MARTIN, O., OTTO, S.W. & FELTEN, E.W., "Large-step Markov chains for TSP incorporating local search heuristics", *Operations Research Letters*, Vol.11, pp.219-224, 1992.
- [87] MARTIN, P. & SHMOYS, D.B., "A new approach to computing optimal schedules for the job shop scheduling problem", Working paper, School of Operations Research an Industrial Engineering, Cornell University, Ithaca, New York, 1995.



- [88] MATSUO, H., SUH, C.J. & SULLIVAN, R.S., "A controlled search simulated annealing method for the general job-shop scheduling problem", Working Paper No: 03-04-88, Graduate School of Business, The University of Texas at Austin, Austin, Texas, USA, 1988.
- [89] MATTHEY, D.C., "Flexible decision support for acquiring expertise in reactive factory scheduling", Proceeding of the European Simulation Symposium, 1994.
- [90] MCKAY, K.N., SAFAYENI, F.R. & BUZACOTT, J.A., "Job shop scheduling theory: What is relevant?", *Interfaces*, Vol.18, No.4, pp.84-90, 1988.
- [91] MEDSKER, L. & LIEBOWITZ, J., *Design And Development Of Expert Systems And Neural Networks*, Macmillan, New York, 1994.
- [92] MEESTER, G.T., "Expert system for a local planning environment", *International Journal of Production Research*, Vol.30-31, pp 453-464, 1993.
- [93] MILTENBURG, J. & SINNAMON, G., "Algorithms for scheduling multi-level just-in-time production system", *IEE Transactions*, Vol.24, No.2, pp.121-130, 1992.
- [94] MORTON, T.E. & PENTICO, D.W., *Heuristic Scheduling Systems*, John Wiley, New York, 1993.
- [95] NOWICKI, E. & SMUTNICKI, C., "A fast taboo search algorithm for the job shop problem", *Management Science*, Vol.42, pp.797-813, 1996.
- [96] NTUEN, C.A. & PARK, E.H., "An experiment in scheduling and planning of non-structured jobs: Lessons learned from artificial intelligent and operational research toolbox", *European Journal of Operational Research*, Vol.84, pp.96-115, 1995.
- [97] ORCIUCH, E. & FROST, J., "ISA: Intelligent scheduling assistant", 1984
- [98] OVACIK, İ.M. & UZSOY, R., *Decomposition Methods For Complex Factory Scheduling Problems*, Kluwer Academic, Boston, 1997.
- [99] PANWALKER, S.S. & ISKANDER, W., "A survey of scheduling rules", *Operations Research*, Vol.25, No.1, pp.45-61, 1977.
- [100] PARK, S.C., GERVASIO, M.T., SHAW, M.J. & DEJONG, G.F., "Explanation-based learning for intelligent process planning", *IEEE Transactions on System, Manufacturing and Sybernetic*, Vol.23, No.6, pp.1597-1616, 1993.
- [101] PENZ, B. & DUPONT, L., "An Aggregation procedure for the deterministic job-shop problem", *J. of Intelligent Manufacturing*, Vol.6, pp.117-122, 1995.

- [102] PHAM, D.T. & PHAM, P.T.N., "Expert systems in mechanical and manufacturing engineering", *International Journal Advanced Manufacturing Technology*, Vol.3, No.3, pp.3-21, 1988.
- [103] PINEDO, M., *Scheduling: Theory, Algorithms and Systems*, Prentice-Hall, New Jersey, 1995.
- [104] QUINLAN, J.R., *Knowledge Acquisition: The Key to Building Expert Systems*, Addison-Wesley, Reading, MA, 1987.
- [105] RABELO, L.C. & ALPTEKİN, S., "Integrating scheduling and control functions in computer integrated manufacturing using artificial intelligence", *Computers and Industrial Engineering*, Vol.17, No.1-4, pp.101-106, 1989.
- [106] RADOMMER, F.A. & WHITE, K.P., "A recent survey of production scheduling", *IEEE Transactions on Man, Machine and Cybernetics*, Vol.18, No.6, pp.841-851, 1988.
- [107] RIEZEBOS, J., GAALMAN, G.J.C. & GUPTA, J.N.D., "Flow shop scheduling with multiple operations and time lags", *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol.6, pp.105-115, 1995.
- [108] ROBINSON, L.W. & HENDRICS, K.B., "Using state-dependent processing rates to emulate SPT queue discipline in an FCFS queueing network", *IEE Transactions*, Vol.27, pp.530-541, 1995.
- [109] SABUNCUOĞLU, İ. & BAYİZ, M., "A beam search based algorithm for the job shop scheduling problem", Research Report: IEOR-9705, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Bilkent University, 06633 Ankara, Turkey, 1997.
- [110] SABUNCUOĞLU, İ. & GÜRGÜN, B., "A neural network model for scheduling problems", *European Journal of Operation Research*, July, 1994.
- [111] SADEH, N., SYCARA, K. & XIONG, Y., "Backtraking techniques for the job shop scheduling constraint satisfaction problem", *Artificial Intelligence*, Vol.76, pp.455-480, 1995.
- [112] SARIN, S.C. & SALGAME, R., "A knowledge-based system approach to dynamic scheduling", *Knowledge-Based Systems in Manufacturing* (edt) by A.Kusiak, John Wiley, New York, 1989.
- [113] SHAKHLEVICH, N.V., SOTSKOV, Y.N. & WERNER, F., "Adaptive scheduling algorithm based on mixed graph model", *IEE Production Control Theory and Applications*, Vol.43, No.1, pp.9-16, January, 1996.
- [114] SHAW, M.J., PARK, S. & RAMAN, N., "Intelligent scheduling with machine learning capabilities: the induction of scheduling knowledge", *IEE Transactions*, Vol.24, No.2, pp.156-176, 1992.

- [115] SIM, S.K., YEO, K.T. & LEE, W.H., "An expert neural network system for dynamic job shop scheduling", *International Journal of Production Research*, Vol.32, No.8, pp.1759-1773, 1994.
- [116] SMITH, S.F., "Reactive scheduling systems", in D.E.Brown and W.T.Scherer (Ed.), *Intelligent Scheduling Systems*, Kluwer Academic, Boston, USA, pp.155-192, 1995.
- [117] STEINER, G. & TRUSCOTT, W.G., "Batch scheduling to minimize cycle time, flow time and processing cost", *IEE Transactions*, Vol.25, No.5, pp.90-96, 1993.
- [118] STORER, R.H., WU, S.D. & VACCARI, R., "New search spaces for sequencing instances with application to job shop scheduling", *Management Science* Vol.38, pp.1495-1509, 1992.
- [119] SUBRAMANYAM, S. & ASKIN, R.G., "An expert system approach to scheduling in flexible manufacturing systems", in A. Kusiak (Ed.), *Flexible Manufacturing systems: Methods and Studies*, Amsterdam, Netherlands, pp.243-256, 1986.
- [120] SUER, G.A. & DAĞLI, C.H., "Knowledge-based single-machine scheduling", *Computers and Industrial Engineering*, Vol.23, No.1-4, pp.149-152, 1992.
- [121] TAILARD, E., "Benchmarks for basic scheduling problems", *European Journal of Operational Research*, Vol.64, No.2, pp.278-285, 1993.
- [122] TAILLARD, E., "Parallel taboo search techniques for the job shop scheduling", *ORSA Journal on Computing*, Vol.16, No.2, pp.108-117, 1994.
- [123] TAŞGETİREN, M.F., CEDİMOĞLU, İ.H. VE İNCE, B., "Teslim tarihi oluşturma yöntemleri üzerine bir karşılaştırma", *YA/EM'95 Bildiriler*, ODTÜ, ANKARA, 1995a.
- [124] TAŞGETİREN, M.F., CEDİMOĞLU, İ.H. VE ÖZTEMEL, E., "Sinir ağı çizelgeleme sistemi: Uzman çizelgeleme sisteminden esinlenen bir yaklaşım", *YA/EM'95 Bildiriler*, ODTÜ, ANKARA, 1995b.
- [125] TAŞGETİREN, M.F., ÖZTEMEL, E VE CEDİMOĞLU, İ.H., "Uzman çizelgeleme sistemi", *YA/EM'95 Bildiriler*, ODTÜ, ANKARA, 1995c.
- [126] UZSOY, R., "Scheduling batch processing machines with incompatible job families", *International Journal Production Research*, Vol.33, No.10, pp.2685-2708, 1995.
- [127] UZSOY, R., LEE, C.Y. & VEGA, L.A.M., "A review of production planning and scheduling model in the semiconductor industry part II:shop floor control", *IEE Transactions*, Vol.26, No.5, 44-55, pp.44-55, 1994.

- [128] VAESSENS, R.J.M., Operations Research Library of Problems, Anonymous FTP site at <ftp://mscmga.ms.ca.uk/pub/jobsjop1.txt> of Management School, Imperial College, London, 1996.
- [129] VAESSENS, R.J.M., AARTS, E.H.L. & LENSTRA, J.K., "Job shop scheduling by local search", *INFORMS Journal on Computing*, Vol.8, pp.302-317, 1996.
- [130] VAIRAKTARAKIS, G.L. & LEE, C.Y., Technical Note "Single-machine scheduling problem to minimize total tardiness subject to minimum number of tardy jobs", *IEE Transactions*, Vol.27, pp.250-256, 1995.
- [131] VANCHEESWARAN, R. & TOWNSEND, M.A., "Two-stage heuristic procedure for scheduling job shop", *Journal of Manufacturing Systems*, Vol.12, No.4, pp.315-325, 1994.
- [132] WERNER, F. & WINKLER, A., "Insertion techniques for the heuristic solution of the job-shop problem", *Discrete Applied Mathematics*, Vol.58, No.2, pp.191-211, 1995.
- [133] WRIGHT, M.L., GREEN, M.W., FIEGL, G. & CROSS, P.F., "An expert system for real-time control", *IEEE Software*, pp.16-24, March, 1986.
- [134] YAGER, R.R., "Fuzzy decision making including unequal objectives", *Fuzzy Sets and Systems*, Vol.1, pp. 87-95, 1978.

## Ek-A Test Problemleri Üretme Pascal Programı Kodu

```

Type
  matrix=array[1..20,1..100] of integer;
Var
  lastjob,lastmach,prob,probno: integer; d,M:matrix; time_seed,machine_seed: longint;

Function unif(var seed : longint; low, high : integer): integer;
  (* "low" ve "high" değerleri arasında rassal sayı üretir*)
Const m = 2147483647; a = 16807; b = 127773; c = 2836;
Var k : longint; value_0_1 : double; (* floating point coded on 64 bits *)
begin
  k := seed div b ;
  seed := a * (seed mod b) - k * c;
  if seed < 0 then seed := seed + m ;
  value_0_1 := seed / m ;
  unif := low + trunc(value_0_1 * (high - low + 1))
end;

procedure generate(var time_seed, machine_seed: longint;
                  nb_jobs,nb_machines:integer; var M, d : matrix);
var i, j : integer;
  procedure swap(var a, b : integer);
    var temp : integer;
    begin temp := a; a := b; b := temp end;
begin
  for j := 1 to nb_jobs do
    for i := 1 to nb_machines do
      d[i, j] := unif(time_seed, 1, 99);
    for j := 1 to nb_jobs do
      for i := 1 to nb_machines do
        M[i, j] := i;
      for j := 1 to nb_jobs do
        for i := 1 to nb_machines do
          swap(M[i, j], M[unif(machine_seed, i, nb_machines), j])
        end;
      end;
    end;
  end;
Begin
  readln(probno, lastjob, lastmach time_seed, machine_seed);
  for prob:=1 to probno do
    generate(time_seed, machine_seed,lastjob,lastmach,M,d);
  End.

```

Her bir problemin işlem süresi ve rota verilerini üretmek için Tablo Ek-A.1'deki kök sayılar kullanılmıştır.

Tablo Ek-A.1 Deney çalışması problemlerinin üretilmesinde kullanılan kök sayılar

| 30 iş 10 tezgah |           |           | 20 iş 10 tezgah |           |           | 15 iş 10 tezgah problemleri |           |           |
|-----------------|-----------|-----------|-----------------|-----------|-----------|-----------------------------|-----------|-----------|
| P.no            | time seed | mach seed | P.no            | time seed | mach seed | P.no                        | time seed | mach seed |
| FG01            | 898994716 | 318285222 | FG31            | 4471637   | 622618499 | FG61                        | 988049172 | 603840458 |
| FG02            | 424677563 | 368027547 | FG32            | 327006187 | 169151094 | FG62                        | 677412492 | 460872087 |
| FG03            | 975059310 | 883294280 | FG33            | 586233837 | 543480275 | FG63                        | 139464679 | 181715353 |
| FG04            | 912561125 | 557800475 | FG34            | 298889785 | 393767852 | FG64                        | 132850224 | 49406796  |
| FG05            | 854324759 | 775354327 | FG35            | 811269361 | 128564612 | FG65                        | 36195761  | 492221543 |
| FG06            | 193618635 | 495542904 | FG36            | 450846718 | 59545624  | FG66                        | 381220905 | 282358139 |
| FG07            | 521833127 | 716706766 | FG37            | 242848455 | 492804799 | FG67                        | 23255233  | 92588947  |
| FG08            | 746811151 | 907276517 | FG38            | 236617087 | 158922726 | FG68                        | 380698046 | 633718406 |
| FG09            | 497118093 | 851539425 | FG39            | 2178468   | 717399931 | FG69                        | 358074134 | 774794103 |
| FG10            | 582678862 | 758900737 | FG40            | 110805622 | 501097569 | FG70                        | 59251742  | 501803839 |
| FG11            | 760711856 | 759468195 | FG41            | 540356101 | 872423568 | FG71                        | 29257683  | 693037900 |
| FG12            | 276620505 | 681600693 | FG42            | 60695057  | 861322544 | FG72                        | 688528607 | 569890725 |
| FG13            | 76886307  | 755302243 | FG43            | 729643847 | 991788185 | FG73                        | 2858253   | 149744204 |
| FG14            | 744075002 | 98472248  | FG44            | 115242108 | 166382299 | FG74                        | 219462912 | 57852104  |
| FG15            | 684526428 | 845807540 | FG45            | 584635557 | 93201025  | FG75                        | 973227797 | 65340096  |
| FG16            | 379811825 | 209571491 | FG46            | 429156755 | 556662009 | FG76                        | 957576323 | 672433629 |
| FG17            | 414632    | 869026540 | FG47            | 456228673 | 58744580  | FG77                        | 332791682 | 709129816 |
| FG18            | 190099731 | 428518359 | FG48            | 450881001 | 862507221 | FG78                        | 457072307 | 42788364  |
| FG19            | 447747112 | 878747015 | FG49            | 18761993  | 74491586  | FG79                        | 229165260 | 128238777 |
| FG20            | 924353530 | 993644933 | FG50            | 474232821 | 11204163  | FG80                        | 531659064 | 904594498 |
| FG21            | 278726357 | 429570689 | FG51            | 722034461 | 855680535 | FG81                        | 803500456 | 977171327 |
| FG22            | 732678676 | 723099986 | FG52            | 361598010 | 90220765  | FG82                        | 955007619 | 591077504 |
| FG23            | 984266543 | 441490701 | FG53            | 3640061   | 942902017 | FG83                        | 309247842 | 268326282 |
| FG24            | 981603512 | 954711975 | FG54            | 360894452 | 343915152 | FG84                        | 457838096 | 596443748 |
| FG25            | 887495809 | 834501842 | FG55            | 369806818 | 165678500 | FG85                        | 704994314 | 2308239   |
| FG26            | 224474589 | 276472264 | FG56            | 166068149 | 18514030  | FG86                        | 335435661 | 628003159 |
| FG27            | 759920496 | 770466384 | FG57            | 716056294 | 890088160 | FG87                        | 43617487  | 92514598  |
| FG28            | 153322941 | 425172040 | FG58            | 544388838 | 330847342 | FG88                        | 111872443 | 67710516  |
| FG29            | 257707887 | 420506767 | FG59            | 306991246 | 56128307  | FG89                        | 946358944 | 56128871  |
| FG30            | 617616454 | 699497623 | FG60            | 506747646 | 522698498 | FG90                        | 600376933 | 536471283 |

Doğrulama: `generate_job_shop(617616454,617616454,30,10,d,M)` yordamı bir 30x10 problemi olan FG30'a ait Tablo A.2'deki verileri üretmeli. Burada ilk rakam işin işlem sayısını, diğer rakamlar ise 1. işlemden itibaren sırayla o işlemin görüleceği tezgahı ve işlem süresini göstermektedir.

Tablo Ek-A.2 FG30 problemine ait proses verileri (tezgah nosu ve işlem süresi)

| İş No | tezgah nosu ve işlem süresi                        | İş No | tezgah nosu ve işlem süresi                        |
|-------|--|-------|--|
| 1     | 7 29 10 54 8 65 9 9 1 54 4 92 6 20 5 12 3 34 2 98  | 16    | 1 68 4 18 2 85 3 8 5 76 9 31 8 42 7 25 6 5 10 59   |
| 2     | 6 63 1 54 5 72 7 53 10 22 4 82 2 20 3 50 9 60 8 33 | 17    | 1 8 7 22 3 81 9 81 10 89 5 51 8 28 2 19 6 26 4 44  |
| 3     | 4 41 3 97 5 1 1 98 7 24 2 38 10 49 6 8 8 24 9 42   | 18    | 8 16 10 18 7 78 6 60 2 68 1 22 9 12 4 31 3 19 5 81 |
| 4     | 9 46 4 45 2 23 7 57 5 15 8 54 3 57 10 59 6 57 1 12 | 19    | 4 63 2 85 6 37 10 23 3 37 1 78 8 33 5 25 9 21 7 68 |
| 5     | 10 74 7 27 6 41 3 48 9 4 1 55 5 61 2 29 4 54 8 49  | 20    | 1 45 6 5 4 69 8 1 7 12 2 81 9 89 3 86 10 88 5 24   |
| 6     | 10 51 1 61 7 51 6 58 3 68 8 18 9 43 2 91 4 25 5 77 | 21    | 5 79 9 40 2 42 6 95 1 40 3 84 10 11 4 2 8 60 7 32  |
| 7     | 2 72 7 48 4 3 5 80 9 83 10 63 8 71 3 95 1 33 6 33  | 22    | 8 88 9 17 4 15 6 41 2 21 1 29 7 94 5 49 3 94 10 8  |
| 8     | 6 93 2 8 10 62 7 32 3 13 8 79 4 44 1 46 9 78 5 65  | 23    | 3 28 10 36 8 98 1 48 9 41 6 52 5 12 4 6 7 65 2 68  |
| 9     | 2 46 10 99 3 16 9 79 4 26 6 29 1 79 5 48 7 36 8 16 | 24    | 4 63 10 65 3 35 8 14 2 16 1 12 5 82 7 38 6 86 9 31 |
| 10    | 7 25 8 54 6 58 2 42 5 2 10 85 9 41 1 13 3 43 4 79  | 25    | 7 97 8 38 1 5 4 15 5 66 2 28 6 79 3 2 9 76 10 17   |
| 11    | 2 53 1 61 6 15 4 69 3 76 10 14 5 54 8 91 7 19 9 30 | 26    | 3 7 4 28 5 55 1 83 6 67 10 57 8 72 9 79 7 59 2 54  |
| 12    | 7 85 6 67 1 28 3 19 5 27 4 78 10 66 8 33 9 58 2 95 | 27    | 7 52 4 73 9 58 6 74 10 86 3 38 1 28 2 76 8 5 5 36  |
| 13    | 7 86 10 72 9 22 1 14 6 86 3 36 5 53 8 61 4 13 2 68 | 28    | 9 20 2 54 5 62 4 53 7 35 1 94 3 49 10 83 6 61 8 30 |
| 14    | 6 45 9 87 5 17 7 74 3 73 1 43 10 94 2 91 8 23 4 11 | 29    | 1 26 8 4 4 43 10 26 3 34 6 17 9 61 7 85 5 80 2 39  |
| 15    | 2 5 10 77 7 87 8 92 5 94 4 2 9 66 1 18 6 55 3 12   | 30    | 9 7 5 4 4 46 1 31 3 97 8 28 6 81 7 29 10 22 2 30   |

## Ek-B: Örnek Çözüm Çıktısı

FG30 problemin maksimum tamamlanma zamanı başarı ölçütü altındaki tabu arama çözümü aşağıda verilmiştir. Tablo Ek-B.1'de herbir tezgahda yapılacak işlemlerin yapılaş sırası verilmektedir. Burada işlemlerin numaralandırması şöyledir: sırayla, 1. işin 1. işlemi, 1. işin 2. işlemi, ..., 2. işin 1. işlemi, 2. işin 2. işlemi, ... Tablo Ek-B.2'de ise her bir tezgahdaki işlemlerin başlama zamanı ve tamamlanma zamanları verilmektedir.

Tablo B.1 FG30 problemi çözümü: Tezgah işlem sıraları

M1{161-281-191-151-12-52-102-113-224-254-243-294-236-24-5-46-124-216-176-205-186-267-136-276-87-98-148-78-40-69}  
M2{141-101-81-61-272-182-72-33-153-203-235-94-215-246-175-196-48-58-26-168-268-17-130-260-138-300-290-120-230-10}  
M3{251-221-22-163-233-44-114-185-154-285-295-83-75-55-105-135-266-126-206-18-277-37-248-198-179-9-99-68-219-150}  
M4{21-181-252-231-152-32-262-63-283-213-293-193-244-274-104-116-6-85-77-16-146-178-129-49-228-208-59-170-100-140}  
M5{201-292-253-23-133-13-273-64-155-115-95-245-237-47-166-145-35-127-227-188-8-107-289-88-218-60-270-180-80-200}  
M6{131-11-71-192-112-43-183-93-103-214-264-174-54-204-255-125-286-297-226-86-7-247-169-28-159-149-39-239-279-70}  
M7{91-1-261-162-111-42-62-241-173-121-53-74-195-143-134-14-25-34-275-298-259-288-217-158-229-238-89-109-190-210}  
M8{171-211-282-92-223-3-234-242-194-157-296-76-56-144-167-257-187-128-36-67-118-269-108-29-209-90-20-139-50-280}  
M9{291-271-31-132-212-202-164-263-4-45-225-65-156-84-123-57-177-197-287-258-147-97-189-249-119-19-79-110-240-30}  
M10{51-41-172-222-2-232-142-184-284-73-82-122-165-265-256-15-66-106-96-137-117-299-207-27-38-278-199-250-160-220}

Tablo Ek-B.2 FG30 problemi çözümü: İşlem başlama ve tamamlanma zamanları

| M1 <sup>+</sup> |        |         | M2     |       |       | M3     |       |       | M4     |       |       | M5     |       |       |
|-----------------|--------|---------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|
| Op.No.          | B. Z.* | T. Z.** | Op.No. | B. Z. | T. Z. | Op.No. | B. Z. | T. Z. | Op.No. | B. Z. | T. Z. | Op.No. | B. Z. | T. Z. |
| 161             | 0      | 8       | 141    | 0     | 5     | 251    | 0     | 7     | 21     | 0     | 41    | 201    | 0     | 79    |
| 281             | 8      | 34      | 101    | 5     | 58    | 221    | 7     | 35    | 181    | 41    | 104   | 292    | 79    | 83    |
| 191             | 34     | 79      | 81     | 58    | 104   | 22     | 41    | 138   | 252    | 104   | 132   | 253    | 132   | 187   |
| 151             | 79     | 147     | 61     | 104   | 176   | 163    | 138   | 219   | 231    | 132   | 195   | 23     | 187   | 188   |
| 12              | 147    | 201     | 272    | 176   | 230   | 233    | 298   | 333   | 152    | 195   | 213   | 133    | 188   | 205   |
| 52              | 201    | 262     | 182    | 230   | 315   | 44     | 333   | 381   | 32     | 213   | 258   | 13     | 205   | 277   |
| 102             | 262    | 323     | 72     | 315   | 323   | 114    | 381   | 400   | 262    | 258   | 331   | 273    | 277   | 339   |
| 113             | 323    | 351     | 33     | 323   | 346   | 185    | 400   | 437   | 63     | 331   | 334   | 64     | 339   | 419   |
| 224             | 351    | 399     | 153    | 346   | 431   | 154    | 437   | 445   | 283    | 334   | 377   | 155    | 445   | 521   |
| 254             | 399    | 482     | 203    | 431   | 473   | 285    | 445   | 479   | 213    | 377   | 392   | 115    | 521   | 548   |
| 243             | 482    | 487     | 235    | 473   | 489   | 295    | 518   | 615   | 293    | 392   | 438   | 95     | 548   | 550   |
| 294             | 487    | 518     | 94     | 489   | 531   | 83     | 615   | 631   | 193    | 438   | 507   | 245    | 550   | 616   |
| 236             | 518    | 530     | 215    | 531   | 552   | 75     | 632   | 645   | 244    | 507   | 522   | 237    | 616   | 698   |
| 24              | 530    | 628     | 246    | 616   | 644   | 55     | 664   | 732   | 274    | 522   | 575   | 47     | 737   | 798   |
| 5               | 628    | 682     | 175    | 644   | 712   | 105    | 732   | 808   | 104    | 575   | 644   | 166    | 798   | 849   |
| 46              | 682    | 737     | 196    | 712   | 793   | 135    | 808   | 881   | 116    | 644   | 722   | 145    | 849   | 943   |
| 124             | 737    | 751     | 48     | 798   | 827   | 266    | 881   | 919   | 6      | 722   | 814   | 35     | 943   | 958   |
| 216             | 751    | 780     | 58     | 827   | 918   | 126    | 919   | 955   | 85     | 814   | 840   | 127    | 958   | 1011  |
| 176             | 780    | 802     | 26     | 918   | 956   | 206    | 955   | 1039  | 77     | 840   | 884   | 227    | 1062  | 1074  |
| 205             | 802    | 842     | 168    | 956   | 975   | 18     | 1071  | 1121  | 16     | 911   | 993   | 188    | 1074  | 1099  |
| 186             | 842    | 920     | 268    | 975   | 1051  | 277    | 1121  | 1170  | 146    | 993   | 995   | 8      | 1111  | 1123  |
| 267             | 920    | 948     | 17     | 1051  | 1071  | 37     | 1170  | 1227  | 178    | 995   | 1026  | 107    | 1123  | 1177  |
| 136             | 948    | 991     | 130    | 1085  | 1153  | 248    | 1227  | 1229  | 129    | 1072  | 1085  | 289    | 1213  | 1293  |
| 276             | 991    | 1085    | 260    | 1153  | 1207  | 198    | 1229  | 1315  | 49     | 1085  | 1139  | 88     | 1293  | 1341  |
| 87              | 1091   | 1170    | 138    | 1207  | 1298  | 179    | 1315  | 1334  | 228    | 1139  | 1145  | 218    | 1341  | 1390  |
| 98              | 1176   | 1189    | 300    | 1298  | 1328  | 9      | 1334  | 1368  | 208    | 1266  | 1268  | 60     | 1390  | 1423  |
| 148             | 1189   | 1207    | 290    | 1328  | 1367  | 99     | 1368  | 1411  | 59     | 1268  | 1293  | 270    | 1423  | 1459  |
| 78              | 1207   | 1253    | 120    | 1367  | 1462  | 68     | 1411  | 1506  | 170    | 1293  | 1337  | 180    | 1459  | 1540  |
| 40              | 1449   | 1461    | 230    | 1462  | 1530  | 219    | 1506  | 1600  | 100    | 1411  | 1490  | 80     | 1540  | 1605  |
| 69              | 1506   | 1539    | 10     | 1530  | 1628  | 150    | 1600  | 1612  | 140    | 1543  | 1554  | 200    | 1605  | 1629  |

<sup>+</sup> M : Tezgah

\* B. Z. : Başlama zamanı

\*\* T. Z. : Tamamlanma zamanı

Tablo Ek-B.2 (devam) FG30 problemi çözümü: İşlem başlama ve tamamlanma zamanları

| M6     |       |       | M7     |       |       | M8     |       |       | M9     |       |       | M10    |       |       |
|--------|-------|-------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|
| Op.No. | B. Z. | T. Z. | Op.No. | B. Z. | T. Z. | Op.No. | B. Z. | T. Z. | Op.No. | B. Z. | T. Z. | Op.No. | B. Z. | T. Z. |
| 131    | 0     | 45    | 91     | 0     | 25    | 171    | 0     | 16    | 291    | 0     | 7     | 51     | 0     | 51    |
| 11     | 45    | 108   | 1      | 25    | 54    | 211    | 16    | 104   | 271    | 7     | 27    | 41     | 51    | 125   |
| 71     | 108   | 201   | 261    | 54    | 106   | 282    | 104   | 108   | 31     | 27    | 73    | 172    | 125   | 143   |
| 192    | 201   | 206   | 162    | 106   | 128   | 92     | 108   | 162   | 132    | 73    | 160   | 222    | 143   | 179   |
| 112    | 213   | 280   | 111    | 128   | 213   | 223    | 179   | 277   | 212    | 160   | 177   | 2      | 179   | 233   |
| 43     | 280   | 321   | 42     | 213   | 240   | 3      | 277   | 342   | 202    | 177   | 217   | 232    | 233   | 298   |
| 183    | 321   | 358   | 62     | 240   | 288   | 234    | 342   | 356   | 164    | 219   | 300   | 142    | 298   | 375   |
| 93     | 358   | 416   | 241    | 288   | 385   | 242    | 385   | 423   | 263    | 331   | 389   | 184    | 375   | 398   |
| 103    | 416   | 431   | 173    | 385   | 463   | 194    | 507   | 508   | 4      | 389   | 398   | 284    | 398   | 424   |
| 214    | 431   | 472   | 121    | 463   | 549   | 157    | 557   | 599   | 45     | 398   | 402   | 73     | 424   | 486   |
| 264    | 472   | 546   | 53     | 549   | 600   | 296    | 615   | 643   | 225    | 402   | 443   | 82     | 486   | 585   |
| 174    | 546   | 606   | 74     | 600   | 632   | 76     | 645   | 724   | 65     | 443   | 526   | 122    | 585   | 657   |
| 54     | 606   | 664   | 195    | 632   | 644   | 56     | 732   | 750   | 156    | 526   | 557   | 165    | 657   | 746   |
| 204    | 664   | 759   | 143    | 644   | 731   | 144    | 750   | 842   | 84     | 631   | 710   | 265    | 746   | 832   |
| 255    | 759   | 826   | 134    | 731   | 805   | 167    | 849   | 877   | 123    | 710   | 732   | 256    | 832   | 889   |
| 125    | 826   | 912   | 14     | 805   | 858   | 257    | 889   | 961   | 57     | 750   | 793   | 15     | 889   | 911   |
| 286    | 912   | 929   | 25     | 858   | 882   | 187    | 961   | 994   | 177    | 802   | 814   | 66     | 911   | 974   |
| 297    | 929   | 1010  | 34     | 882   | 939   | 128    | 1011  | 1072  | 197    | 814   | 903   | 106    | 974   | 988   |
| 226    | 1010  | 1062  | 275    | 939   | 974   | 36     | 1072  | 1126  | 287    | 929   | 990   | 96     | 988   | 1073  |
| 86     | 1062  | 1091  | 298    | 1010  | 1039  | 67     | 1126  | 1197  | 258    | 990   | 1069  | 137    | 1073  | 1167  |
| 7      | 1091  | 1111  | 259    | 1069  | 1128  | 118    | 1233  | 1266  | 147    | 1069  | 1135  | 117    | 1167  | 1233  |
| 247    | 1111  | 1190  | 288    | 1128  | 1213  | 269    | 1266  | 1271  | 97     | 1135  | 1176  | 299    | 1233  | 1255  |
| 169    | 1190  | 1216  | 217    | 1213  | 1307  | 108    | 1271  | 1362  | 189    | 1176  | 1197  | 207    | 1255  | 1266  |
| 28     | 1315  | 1323  | 158    | 1307  | 1332  | 29     | 1362  | 1386  | 249    | 1229  | 1305  | 27     | 1266  | 1315  |
| 159    | 1332  | 1337  | 229    | 1332  | 1397  | 209    | 1386  | 1446  | 119    | 1305  | 1363  | 38     | 1315  | 1374  |
| 149    | 1337  | 1392  | 238    | 1397  | 1435  | 90     | 1471  | 1487  | 19     | 1363  | 1423  | 278    | 1374  | 1457  |
| 39     | 1392  | 1449  | 89     | 1435  | 1471  | 20     | 1487  | 1520  | 79     | 1423  | 1501  | 199    | 1457  | 1545  |
| 239    | 1449  | 1535  | 109    | 1471  | 1490  | 139    | 1520  | 1543  | 110    | 1501  | 1531  | 250    | 1545  | 1562  |
| 279    | 1535  | 1596  | 190    | 1490  | 1558  | 50     | 1543  | 1592  | 240    | 1535  | 1566  | 160    | 1562  | 1621  |
| 70     | 1596  | 1629  | 210    | 1558  | 1590  | 280    | 1596  | 1626  | 30     | 1566  | 1608  | 220    | 1621  | 1629  |

Not: Tablo Ek-B.2'de M10 sütununa dikkat edildiğinde, ardışık işlemlerin tamamlanma ve başlama zamanları arasında boşluk olmadığı görülmektedir. Yani 10.tezgah hiç boş beklememekte; dolayısıyla  $C_{max}$  başarı ölçütünün değeri, M10'daki (darboğaz tezgah) son işlemin (220) tamamlanma zamanından (1629) daha iyi olması imkanı yoktur. Bu durum, uzman başlangıçlı tabu arama çizelgeçicisinin FG30 problemi için optimal  $C_{max}$  değerini bulduğunu ispatlamaktadır.



## Ek-C: FG01-90 Test Problemleri İçin $C_{max}$ Değerleri

Tablo Ek-C.1 FG01-90 test problemleri  $C_{max}$  değerleri

| Problem | $C_{max}$ | Problem | $C_{max}$ | Problem | $C_{max}$ |
|---------|-----------|---------|-----------|---------|-----------|
| FG01    | 1794      | FG31    | 1201      | FG61    | 960       |
| FG02    | 1848*     | FG32    | 1173*     | FG62    | 1118      |
| FG03    | 1945*     | FG33    | 1155*     | FG63    | 1020      |
| FG04    | 1966*     | FG34    | 1296      | FG64    | 1001*     |
| FG05    | 1804      | FG35    | 1242*     | FG65    | 978       |
| FG06    | 1780      | FG36    | 1362*     | FG66    | 996       |
| FG07    | 1770*     | FG37    | 1239      | FG67    | 929       |
| FG08    | 1602*     | FG38    | 1220      | FG68    | 1012      |
| FG09    | 1801      | FG39    | 1108      | FG69    | 925       |
| FG10    | 1712*     | FG40    | 1098*     | FG70    | 1080      |
| FG11    | 1752*     | FG41    | 1357      | FG71    | 939       |
| FG12    | 1723      | FG42    | 1199      | FG72    | 1048      |
| FG13    | 1603      | FG43    | 1257*     | FG73    | 1091      |
| FG14    | 1720      | FG44    | 1228      | FG74    | 1064      |
| FG15    | 1842*     | FG45    | 1268      | FG75    | 977       |
| FG16    | 1717*     | FG46    | 1199      | FG76    | 1031      |
| FG17    | 1690      | FG47    | 1177      | FG77    | 1000      |
| FG18    | 1888      | FG48    | 1226*     | FG78    | 1010      |
| FG19    | 1838*     | FG49    | 1314      | FG79    | 965       |
| FG20    | 1668      | FG50    | 1190      | FG80    | 992       |
| FG21    | 1798*     | FG51    | 1167      | FG81    | 1006      |
| FG22    | 1724*     | FG52    | 1353      | FG82    | 1030      |
| FG23    | 1673*     | FG53    | 1195      | FG83    | 1029      |
| FG24    | 1581*     | FG54    | 1259      | FG84    | 1012      |
| FG25    | 1701*     | FG55    | 1242      | FG85    | 1005      |
| FG26    | 1766*     | FG56    | 1320      | FG86    | 1054      |
| FG27    | 1845*     | FG57    | 1297      | FG87    | 985       |
| FG28    | 1723*     | FG58    | 1182*     | FG88    | 1085      |
| FG29    | 1599      | FG59    | 1150      | FG89    | 1114      |
| FG30    | 1629*     | FG60    | 1200*     | FG90    | 1050      |

\* Optimallığı bilinen (darboğaz iş ya da tezgah olan ) problem

**Ek-D: Eşlendirilmiş t-Testi Formülasyonu**

$n$  : örnek sayısı,

$d_i$  :  $i$ . bağılı örnek üzerinde karşılaştırılan iki yöntem ile elde edilen değerlerin farkı ise,

$\bar{d}$  : farkların ortalaması,

$S_d$  : farkların standart sapması,

$S_{\bar{d}}$  : farkların standart hatası, ve

$t$  : test istatistiği ( $\alpha$  hatası) olsun.

Buna göre,

$$S_d = \sqrt{(\sum(d-d^-)^2)/(n-1)},$$

$$S_{\bar{d}} = S_d/\sqrt{n},$$

$$t = \bar{d} / S_{\bar{d}} \text{ 'dir.}$$

## ÖZGEÇMİŞ

|                            |  |
|----------------------------|--|
| <b>KİMLİK BİLGİLERİ</b>    |  |
| Adı Soyadı                 | Faruk Geyik  |
| Ünvanı                     | Araştırma Görevlisi  |
| Doğum Yeri ve Tarihi       | Gaziantep, 1968  |
| Medeni Durumu              | Evli   |
| İş Adresi                  | Karadeniz Teknik Üniversitesi Orman Fakültesi<br>O. Endüstri Müh. Böl. 61080 Trabzon<br>Tlf. 0462 3253223 /2836 Fax. 3257499   |
| Ev Adresi                  | Kalkınma Mah. Mekan Sokak No:8 Başak Ev.3 A Blk. D.10<br>Trabzon<br>Tlf. 0462 3256928  |
| <b>EĞİTİM DURUMU</b>       |  |
| Lise                       | Gaziantep Lisesi, 1985   |
| Lisans                     | İ.T.Ü. Sakarya Müh. Fak. Endüstri Mühendisliği Bölümü, 1990  |
| Yüksek Lisans              | Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü<br>Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı<br>Tez Başlığı: Toplam Kalite Yönetimi ve ISO-9000 Kalite<br>Güvence Sistemleri, Kasım 1994  |
| Doktora                    | Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Endüstri<br>Mühendisliği Anabilim Dalı<br>Başlama Tarihi : Şubat 1995 (Ekim 1994 özel statü ile)<br>Yeterlilik Tarihi: Ağustos 1995<br>Tez Konusu : Atölye Tipi Çizelgeleme İçin Uzman-Tabu<br>Arama Modeli |
| <b>YÜRÜTÜLEN GÖREVLER</b>  |  |
| 1994-                      | K.T.Ü. Orman Fak. O.Endüstri Müh. Araştırma Görevlisi  |
| <b>İLGİLENDİĞİ KONULAR</b> | Yapay Zeka, Zeki Arama Yordamları, Zeki İmalat Sistemleri,<br>Üretim Çizelgeleme, Toplam Kalite Yönetimi, Bilgi İşlem  |
| <b>YABANCI DİL</b>         | İngilizce  |
| <b>REFERANS</b>            | Dr. İsmail Hakkı Cedimoğlu<br>SAÜ Endüstri Müh. Böl. / Sakarya Tlf. 0264 3431602 /269  |
| Trabzon, Haziran 2000      |  |