

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ**

146511

**ÇOK OBJEKTİFLİ ESNEK ATÖLYE ÇİZELGELEME
PROBLEMLERİNİN SEZGİSEL YÖNTEMLERLE
MODELLENMESİ, ANALİZİ VE ÇÖZÜMÜ**

**Tezi Hazırlayan
Lale ÖZBAKIR**

**Tez Danışmanı
Doç. Dr. Adil BAYKASOĞLU**

**İşletme Anabilim Dalı
Doktora Tezi**

**Şubat 2004
KAYSERİ**

146511

Bu çalışma, jürimiz tarafından Erciyes Üniversitesi İşletme Anabilim Dalı, Üretim Yönetimi ve Pazarlama Bilim Dalı'nda doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

11 / 03 / 2004

JÜRİ:

Üye : Doç. Dr. Adil BAYKASOĞLU (Danışman)

Üye : Prof. Dr. Cemal ÖZGÜVEN

Üye : Prof. Dr. Ali İhsan SÖNMEZ

Üye : Prof. Dr. Filiz ÇALIŞKAN

Üye : Doç. Dr. Türkay DERELİ

ONAY:

Bu tezin kabulü Enstitü Yönetim Kurulunun 02.04.2004 tarih ve ...0.7..... sayılı kararı ile onaylanmıştır.



TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde emeği geçen;

Danışmanım Doç. Dr. Adil Baykasoğlu'na, sonsuz desteği, yönlendirici yaklaşımı ve bilimsel ufkundan faydalanmamı sağladığı için,

Prof. Dr. Ali İhsan Sönmez'e, beni yönlendirerek bu çalışmanın başlamasını sağladığı için,

Prof. Dr. Cemal Özgüven'e, çalışmanın yazılmasında bana ayırdığı zamanı ve emeği için,

Çalışma arkadaşlarım Sinem Kulluk ve Pınar Tan'a, her yardıma ihtiyacım olduğunda yanımda oldukları için,

Değerli arkadaşım Yeşim Alemdar'a, çalışmanın biçimsel düzenlenmesindeki yardımları ve dostluğu için,

ve Erciyes Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Bölümü çalışanlarına tüm destekleri için teşekkür ederim.

ÇOK OBJEKTİFLİ ESNEK ATÖLYE ÇİZELGELEME PROBLEMLERİNİN SEZGİSEL YÖNTEMLERLE MODELLENMESİ, ANALİZİ VE ÇÖZÜMÜ

ÖZET

Üretim sistemleri için etkin ve tam çizelgelemenin önemi bilinmektedir. Üretim teknolojilerindeki hızlı gelişmeler sonucunda esnek sistemlerin ortaya çıkması ile bu sistemlerin kontrolü için daha gelişmiş, yeni yöntemlere ihtiyaç duyulmaktadır. Klasik atölye çizelgeleme problemlerine göre çok daha karmaşık ve yapısı gereği çözümlenmesi zor bir problem olan esnek atölye çizelgeleme problemi bunlardan birisidir.

Gelişen üretim teknolojilerine bağlı olarak, çok amaçlı otomatik makinelerin üretim atölyelerinde yaygın kullanımı ile birlikte, bir iş için tek bir proses planının, bir operasyon için tek bir makinenin uygun olduğu varsayımı ile yapılan üretim çizelgeleme, geçerliliğini artık yitirmiştir. Klasik varsayımlar üzerine geliştirilen çizelgeleme yöntemleri ile esnek atölyelerin çizelgelenmesi ciddi performans problemlerine ve mali kayıplara sebebiyet verebilir. Esnek sistemler, müşteri taleplerine hızlı bir şekilde cevap verebilecek nitelikte tepkisel olmalıdır. Buna bağlı olarak, esnek atölye çizelgeleme problemleri, esneklikten kaynaklanan potansiyel performans düzeyini yakalayabilmek için, kendi özel durumları göz önüne alınarak modellenmeli ve çözülmelidir. Ayrıca değişen çevre ve talep durumlarına göre bir çok üretim parametresi optimize edilmeli, yani sistem çok objektifli bir yapıya sahip olmalıdır.

Bu gelişmeler doğrultusunda çalışmada, esnek atölye çizelgeleme problemine proses plan esnekliği entegre edilerek kapsamı genişletilmiş ve problem, çok objektifli optimizasyon problemi olarak ele alınmıştır. Çok objektifli esnek atölye çizelgeleme problemine modern sezgisel optimizasyon teknikleri ile çözüm yaklaşımı geliştirilmiştir.

Esnek atölye çizelgeleme problemlerinin modellenmesi için Dil Teorisi kapsamında yer alan Bağlam Bağımsız Gramer yapısı kullanılmıştır. Bu yaklaşım ile problemin

karmaşık yapısal özellikleri, Bağlam Bağımsız Gramer tanımlamasına dayalı basit bir gösterimle ifade edilmiştir.

Bu çalışmada, proses plan esnekliği içeren ve gramer modeli oluşturulan esnek atölye çizelgeleme problemine, çok objektifli tabu aramaya dayalı optimizasyon tekniği ile çözüm algoritması geliştirilmiştir. Önerilen algoritma, esnek atölye çizelgeleme problemi için; proses plan seçimi, operasyonların makinelere atanması ve bu makinelerde sıralanması alt problemlerine eş zamanlı olarak çözüm geliştirmektedir. Pareto optimizasyona dayalı çok objektifli yaklaşım, çözüm sonucunda karar mekanizmasına, birden fazla uygun çözüm arasından seçim yapabilme imkanı sunmaktadır.

Önerilen çözüm yöntemi için, C/C++ programlama dili ile etkin veri yapıları kurularak, pek çok farklı yapıda çizelgeleme problemine uyarlanabilecek esneklikte bir yazılım geliştirilmiştir.

Çalışmada, esnek atölye çizelgeleme problemleri için ürün teslim tarihlerinin gerçekçi olarak belirlenmesine yönelik yeni bir yaklaşım ortaya konulmuştur. Bu yaklaşımla, iş sisteminin özelliklerini, yapısı gereği öğrenebilme ve yansıtabilme niteliğine sahip olan genetik programlama yöntemi kullanılarak, çizelgeleme sistemine özel teslim tarihi belirleme denklemleri oluşturulmuştur. Önerilen yaklaşım, yapay sinir ağları ve regresyon analizleri ile karşılaştırılmış ve etkinliği ortaya konulmuştur.

Çalışmanın sonunda, esnek atölye çizelgeleme problemleri için geliştirilen genel çözüm algoritması ile türetilen hipotetik problemler üzerinde deneysel çalışma ve analizler gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalar sonucunda, esnek atölye çizelgeleme performansı üzerinde etkili olan faktörler ve bu faktörlerin en iyi düzeyleri belirlenmiştir. Sıralama kuralları ile makine esneklik düzeyleri arasındaki ilişki, seçilen bir performans kriterine etkileri açısından irdelenerek analiz edilmiştir. Ayrıca literatürde yer alan, çok objektifli esnek atölye çizelgeleme problemleri çözülerek, önerilen yaklaşımın geçerliliği ortaya konulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Esnek Atölye Çizelgeleme, Çok Objektifli Optimizasyon, Tabu Arama, Genetik Programlama, Dil Teorisi

MODELING, ANALYZING AND SOLVING MULTIPLE- OBJECTIVE FLEXIBLE JOB-SHOP SCHEDULING PROBLEMS BY USING META-HEURISTIC ALGORITHMS

ABSTRACT

Importance of effective and complete scheduling for the production systems is very well known. Control of emerging flexible systems, as a result of rapid development in production technologies, requires novel advanced methods. Flexible job-shop scheduling problem is a hard to solve problem due to its structure, and even more complex as compared with classical job shop scheduling problems.

Progress in production technologies that caused widespread use of automated multipurpose machines has overruled production scheduling systems which assume that a single machine is needed for a single operation and a single process plan for a single job. Generating schedules for flexible job-shops by using methods based upon classical assumptions may cause serious financial losses and performance problems. Flexible systems should respond rapidly to customer demands. To achieve the potential performance level caused by flexibility, flexible job-shop scheduling problems should be modeled and solved by considering their own characteristics. Furthermore, many production performances should be optimized simultaneously according to the changing environment and demands. In other words, the system should have a multi-objective structure.

In this study, the process plan flexibility was integrated into the flexible job-shop scheduling problem to broaden its scope and was handled as a multi-objective optimization problem. A solution approach for multi-objective flexible job-shop scheduling systems was developed by using meta-heuristic optimization techniques.

Context-free grammar structure within linguistic theory was used for modeling the flexible job-shop scheduling problem. With this approach, complex structural features of the problem are expressed simply.

A solution algorithm with optimization technique based upon multi objective tabu search has been developed for the flexible job-shop scheduling problem which covers process plan flexibility and has its own grammatical model. This algorithm provides concurrent solutions for the sub-problems of flexible job-shop scheduling which include process plan selection, assignment of operations to the machines and sequencing of operations in these machines. This Pareto optimization based multi-objective approach allows the decision - maker to choose the feasible solution among alternatives.

For the proposed solution method, effective data structures have been established and a C/C++ software which can be adapted to different scheduling problems has been implemented.

In this study, a novel approach is proposed for realistic flexible job-shop scheduling systems. With this approach, due-date determination equations have been created by using genetic programming which can learn and reflect the features of the system. The proposed approach has been compared with artificial neural networks and regression analyses and its effectiveness has been proved.

Finally, experimental studies and analyses with the proposed solution algorithm have been performed on the hypothetical problems for flexible job-shop scheduling. As a result of these experimental studies, factors which affect the performance of flexible job-shop scheduling and their optimal levels are determined. Relations between the dispatching rules and machine flexibility levels have been analyzed according to their effects on predetermined performance criteria. Furthermore, reliability of the proposed approach was tested by solving benchmark problems from the literature.

Keywords: Flexible Job Shop Scheduling, Multiple Objective Optimization, Tabu Search, Genetic Programming, Linguistic Theory.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	iii
İÇİNDEKİLER	v
KISALTMALAR	x
TABLolar LİSTESİ.....	xii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	xiv
BÖLÜM 1.....	1
1 GİRİŞ	1
1.1 ÇALIŞMANIN KAPSAMI VE ÖNEMİ	1
1.2 ÇALIŞMANIN AMACI VE YÖNTEMİ	6
1.3 ÇALIŞMANIN BÖLÜMLERİ	8
BÖLÜM 2.....	10
2 GENEL BİLGİLER VE LİTERATÜR TARAMASI.....	10
2.1 GİRİŞ	10
2.2 ÇİZELGELEME	10
2.2.1 Klasik Atölye Çizelgeleme Problemi.....	12
2.2.1.1 Çözüm Yaklaşımları.....	14
2.2.2 Esnek Atölye Çizelgeleme Problemi	17
2.3 KOMBİNATORİYAL OPTİMİZASYON	22
2.4 ÇOK OBJEKTİFLİ OPTİMİZASYON	23
2.4.1 Çözüm Teknikleri	27
2.5 MODERN SEZGİSEL OPTİMİZASYON TEKNİKLERİ	31
2.5.1 Benzetimli Tavlama	32
2.5.1.1 Çok Objektifli Benzetimli Tavlama	36
2.5.1.2 Benzetimli Tavlama ile Atölye Çizelgeleme Uygulamaları	36
2.5.2 Genetik Algoritma	38
2.5.2.1 Çok Objektifli Genetik Algoritma.....	41
2.5.2.2 Genetik Algoritma ile Atölye Çizelgeleme Uygulamaları	42
2.5.3 Tabu Arama	44
2.5.3.1 Çok Objektifli Tabu Arama Algoritması	51

2.5.3.2 Tabu Arama ile Atölye Çizelgeleme Uygulamaları	53
2.6 TESLİM TARİHİ BELİRLEME	56
2.7 YAPAY SINIR AĞLARI	59
2.8 SONUÇ	63
BÖLÜM 3.....	64
3 ESNEK ATÖLYE ÇİZELGELEME PROBLEMİNİN MODELLENMESİ.....	64
3.1 GİRİŞ	64
3.2 DİL TEORİSİ.....	64
3.2.1 Bağlam Bağımsız Gramer.....	65
3.3 ESNEK ATÖLYE ÇİZELGELEME PROBLEMİNİN DİL TEORİSİ İLE MODELLENMESİ	72
3.3.1 Örnek Problem Modeli	76
3.4 SONUÇ	82
BÖLÜM 4.....	83
4 ESNEK ATÖLYE ÇİZELGELEME PROBLEMİNE ÇÖZÜM YÖNTEMİ GELİŞTİRİLMESİ.....	83
4.1 GİRİŞ	83
4.2 ÇOK OBJEKTİFLİ TABU ARAMA ALGORİTMASI.....	83
4.3 ESNEK ATÖLYE ÇİZELGELEME PROBLEMİNİN ÇOK OBJEKTİFLİ TABU ARAMA ALGORİTMASI İLE ÇÖZÜMÜ.....	89
4.3.1 Giffler ve Thompson Sıralama Kuralı Çizelgeleme Algoritması	94
4.3.2 Çözüm Dizisi	100
4.3.3 Çok Objektifli Tabu Arama Aşamaları	102
4.4 SONUÇ	112
BÖLÜM 5.....	113
5 DTTAÇOEACP 1.0: DİL TEORİSİ VE TABU ARAMA TEMELLİ ÇOK OBJEKTİFLİ ESNEK ATÖLYE ÇİZELGELEME PROGRAMI.....	113
5.1 GİRİŞ	113
5.2 ESNEK ATÖLYE ÇİZELGELEME PROBLEMİ MODELİNİN POGRAMLANMASI	113
5.3 PROGRAMIN GİRDİLERİ.....	114

5.3.1	Veri Giriş Formatı.....	116
5.4	PROGRAM PARAMETRELERİ.....	119
5.5	PROGRAM ALGORİTMASI	121
5.5.1	Fonksiyonlar	123
5.6	ÖRNEK PROBLEM ÇÖZÜMÜ.....	130
5.7	SONUÇ	133
BÖLÜM 6		134
6	GENETİK PROGRAMLAMA VE TESLİM TARİHİ BELİRLEME	
PROBLEMLERİNE UYGULANMASI		134
6.1	GİRİŞ	134
6.2	GENETİK PROGRAMLAMA.....	134
6.2.1	Genetik Programlama Algoritması	135
6.2.2	Programların Gösterimi	136
6.2.3	Programlar Üzerinde Genetik Operasyonlar.....	138
6.2.4	Genetik Programlama Uygulamaları	140
6.2.4.1	Doğrusal Genetik Programlama Yaklaşımları	140
6.3	ÇOKLU DENKLEM PROGRAMLAMA.....	144
6.3.1	Standart Çoklu Denklem Programlama Algoritması	144
6.3.2	Çoklu Denklem Programlama Kromozom Gösterimi	146
6.3.3	Çoklu Denklem Programlama ve Gen Programlama Gösterimlerinin Karşılaştırılması	147
6.3.4	Seçim.....	148
6.3.5	Arama Operatörleri	149
6.3.5.1	Çaprazlama.....	149
6.3.5.2	Mutasyon.....	152
6.4	TESLİM TARİHİ BELİRLEMEDE ÇOKLU DENKLEM PROGRAMLAMA UYGULAMASI.....	153
6.4.1.1	Çoklu Denklem Programlama Algoritmasının Modifikasyonu ve Parametreleri.....	155
6.4.1.2	50x15 Problemi Çoklu Denklem Programlama Uygulaması	159
6.4.1.3	50x15 Problemi için Regresyon Sonuçları.....	162
6.4.1.4	50x15 Problemi için Yapay Sinir Ağı Sonuçları.....	164

6.4.1.5 Çoklu Denklem Programlama ve Yapay Sinir Ağı Karşılaştırması....	167
6.4.1.6 Çoklu Denklem Programlama Deney Tasarımı	168
6.5 SONUÇ	171
BÖLÜM 7.....	172
7 DENEYSEL ÇALIŞMA VE ANALİZLER.....	172
7.1 GİRİŞ	172
7.2 TEST PROBLEMLERİNİN OLUŞTURULMASI	172
7.3 DENEY TASARIMI.....	174
7.3.1 5x5 Problemi Deney Tasarımı	175
7.3.1.1 5x5 Taguchi Deney Tasarımı	176
7.3.1.2 5x5 Tam Faktöryel Deney Tasarımı.....	180
7.3.2 20x5 Problemi Deney Tasarımı	183
7.3.2.1 20x5 Taguchi Deney Tasarımı	183
7.3.2.2 20x5 Tam Faktöryel Deney Tasarımı.....	185
7.3.3 25x10 Deney Tasarımı	189
7.3.3.1 25x10 Taguchi Deney Tasarımı	189
7.3.3.2 25x10 Tam Faktöryel Deney Tasarımı.....	191
7.3.4 50x15 Deney Tasarımı	195
7.3.4.1 50x15 Taguchi Deney Tasarımı	195
7.3.4.2 50x15 Tam Faktöryel Deney Tasarımı.....	197
7.4 MAKİNE ESNEKLİĞİ – SIRALAMA KURALI İLİŞKİSİ.....	199
7.4.1 10x10 Problemi İçin Sıralama Kuralları Analizi	201
7.4.2 20X5 Problemi İçin Sıralama Kuralları Analizi	206
7.4.3 25X10 Problemi İçin Sıralama Kuralları Analizi	211
7.5 LİTERATÜR PROBLEMLERİNİN ÇÖZÜMÜ	216
7.6 SONUÇ	219
BÖLÜM 8.....	222
8 SONUÇ VE TARTIŞMALAR.....	222
8.1 TEZ ÖZETİ.....	222
8.2 ÇALIŞMANIN KATKILARI.....	223
8.3 İLERİYE YÖNELİK ÖNERİLER.....	226

KAYNAKÇA	229
EKLER.....	249
EK I BÖLÜM 7 TAM FAKTÖRYEL DENEY TASARIMI GRAFİKLERİ	249
EK II SIRALAMA KURALLARI – MAKİNE ESNEKLİĞİ.....	258
II.1.1 10x10 Test Problemi.....	258
II.1.2 20x5 Test Problemi.....	261
II.1.3 25x10 Test Problemi.....	264
EK III LİTERATÜR PROBLEMLERİ ÇÖZÜM ÇİZELGELERİ	267



KISALTMALAR

AEKİZ	Ağırlıklandırılmış En Kısa İşlem Zamanı
AHK	Ayarlanmış Hata Kareleri
BBG	Bağlam Bağımsız Gramer
BT	Benzetimli Tavlama
ÇDP	Çoklu Denklem Programlama
DTTAÇOEAĊP 1.0	Dil Teorisi ve Tabu Arama Temelli Çok Objektifli Esnek Atölye Çizelgeleme Programı V 1.0
EAÇP	Esnek Atölye Çizelgeleme Problemi
EBZ	Erken Başlama Zamanı
EFİS	En Fazla İşlem Sayısı
EKB	En Kısa Boşluk
EKİZ	En Kısa İşlem Zamanı
ETT	En Erken Teslim Tarihi
EUİZ	En Uzun İşlem Zamanı
GA	Genetik Algoritma
GEP	Gen Programlama
GP	Genetik Programlama
HK	Hata Kareleri
İS	İterasyon Sayısı
İZBK	İşlem Zamanı / Kalan Zaman
KDİZ	Kalan En Düşük İşlem Zamanı
KS	Komşu Çözüm Sayısı
KYİZ	Kalan En Yüksek İşlem Zamanı

ME	Makine Esnekliği
OD	Operasyon Değişiklik Oranı
OF1	Objektif Fonksiyon 1 (Tamamlanma Zamanı)
OF2	Objektif Fonksiyon 2 (Makinelerin Yık Dengesi)
OF3	Objektif Fonksiyon 3 (İşlerin Ortalama Bekleme Zamanları)
PPE	Proses Plan Esnekliği
PPD	Proses Plan Değişiklik Oranı
SD	Serbestlik Derecesi
SKD	Sıralama Kuralı Değişiklik Oranı
SKS	Sıralama Kuralı Sayısı
TA	Tabu Arama
TU	Tabu Listesi Uzunluğu
YSA	Yapay Sinir Ağı

TABLOLAR LİSTESİ

TABLO 2.1 GENETİK ALGORİTMA ÇİZELGELEME YAKLAŞIMI SINIFLANDIRMASI.....	43
TABLO 3.1 PARÇA PROSES PLAN BİLGİLERİ VE TESLİM TARİHLERİ	76
TABLO 3.2 OPERASYON-MAKİNE İŞLEM SÜRELERİ	77
TABLO 3.3 SEÇİLEN KONTROLLERE GÖRE PROSES PLANLAR VE MAKİNELER.....	80
TABLO 4.1 SIRALAMA KURALLARI	91
TABLO 4.2 OBJEKTİF FONKSİYONLAR.....	92
TABLO 4.3 ÇÖZÜM DİZİSİ İÇİN PROSES PLANLAR, OPERASYON MAKİNE ATAMALARI	97
TABLO 4.4 ÇÖZÜM DİZİSİ İÇİN GIFFLER VE THOMPSON ALGORİTMASI.....	98
TABLO 4.5 PARETO OPTİMAL ÇÖZÜM ÇİZELGESİ.....	111
TABLO 5.1 PROGRAM VERİ GİRİŞ FORMATI	118
TABLO 5.2 OP1-PARÇA1 ADAY MAKİNELER,İŞLEM SÜRELERİ VE OLASILIKLAR	123
TABLO 5.3 ÖRNEK PROBLEM İÇİN MAKİNE SEÇİM OLASILIKLARI	124
TABLO 5.4 ÖRNEK PROBLEM İÇİN PARETO OPTİMAL ÇÖZÜMLER.....	131
TABLO 5.5 SON ÇÖZÜM DİZİSİ KONTROLLERİ, MAKİNELER VE SIRALAMA KURALLARI	132
TABLO 5.6 SON ÇÖZÜM DİZİSİ İÇİN ÇİZELGE.....	132
TABLO 6.1 ÇDP PARAMETRELERİ.....	160
TABLO 6.2 50X15 TEST PROBLEMİ İÇİN ÇDP R ² DEĞERLERİ	161
TABLO 6.3 REGRESYON DENKLEMLERİ	163
TABLO 6.4 YSA PARAMETRELERİ	164
TABLO 6.5 50X15 TEST PROBLEMİ İÇİN YSA R ² DEĞERLERİ.....	164
TABLO 6.6 ÇDP-YSA ANOVA SONUÇLARI	167
TABLO 6.7 ÇDP-YSA TANIMLAYICI İSTATİSTİKLERİ	168
TABLO 6.8 ÇDP TAGUCHİ DENEY TASARIMI.....	169
TABLO 6.9 PARAMETRELERİN ETKİNLİK SIRALAMASI.....	170
TABLO 7.1 PROBLEM BOYUTLARI VE PROSES PLAN ESNEKLİKLERİ	173
TABLO 7.2 PROBLEM PARAMETRELERİ.....	174
TABLO 7.3 FAKTÖRLER VE DÜZEYLERİ	175
TABLO 7.4 5X5 TAGUCHİ DENEY TASARIMI FAKTÖRLERİ VE DÜZEYLERİ.....	177
TABLO 7.5 5X5 İÇİN TAGUCHİ FAKTÖR SIRALAMASI	179
TABLO 7.6 5X5 FAKTÖR SIRALAMASI	180
TABLO 7.7 5X5 FAKTÖR ETKİNLİĞİ ANOVA SONUÇLARI.....	181
TABLO 7.8 5X5 FAKTÖR DÜZEYLERİ ÇOKLU KARŞILAŞTIRMA TESTİ.....	183
TABLO 7.9 20X5 FAKTÖR SIRALAMASI	184
TABLO 7.10 20X5 FAKTÖR ETKİNLİĞİ ANOVA SONUÇLARI.....	187
TABLO 7.11 20X5 FAKTÖR DÜZEYLERİ ÇOKLU KARŞILAŞTIRMA TESTİ.....	189
TABLO 7.12 25X10 FAKTÖR SIRALAMASI	191

TABLO 7.13 25X10 FAKTÖR ETKİNLİĞİ ANOVA SONUÇLARI.....	193
TABLO 7.14 25X10 FAKTÖR DÜZEYLERİ ÇOKLU KARŞILAŞTIRMA TESTİ.....	195
TABLO 7.15 50X15 FAKTÖR SIRALAMASI	196
TABLO 7.16 50X15 FAKTÖR ETKİNLİĞİ ANOVA SONUÇLARI.....	198
TABLO 7.17 50X15 FAKTÖR DÜZEYLERİ ÇOKLU KARŞILAŞTIRMA TESTİ.....	199
TABLO 7.18 10X10 DEĞİŞKENLERİN TANIMLAYICI İSTATİSTİKLERİ	202
TABLO 7.19 10X10 GRUPLAR ARASI İLİŞKİ İÇİN ANOVA SONUÇLARI	203
TABLO 7.20 10X10 ÇOKLU KARŞILAŞTIRMA TESTİ SONUÇLARI	205
TABLO 7.21 20X5 DEĞİŞKENLERİN TANIMLAYICI İSTATİSTİKLERİ	207
TABLO 7.22 20X5 GRUPLAR ARASI İLİŞKİ İÇİN ANOVA SONUÇLARI	208
TABLO 7.23 20X5 ÇOKLU KARŞILAŞTIRMA TESTİ SONUÇLARI	210
TABLO 7.24 25X10 DEĞİŞKENLERİN TANIMLAYICI İSTATİSTİKLERİ	212
TABLO 7.25 25X10 GRUPLAR ARASI İLİŞKİ İÇİN ANOVA	213
TABLO 7.26 25X10 ÇOKLU KARŞILAŞTIRMA SONUÇLARI.....	214
TABLO 7.27 ÇÖZÜM PARAMETRELERİ VE DÜZEYLERİ	216
TABLO 7.28 TEST PROBLEM 1 PARETO OPTİMAL ÇÖZÜMLER	217
TABLO 7.29 TEST PROBLEM 2 PARETO OPTİMAL ÇÖZÜMLER	218
TABLO 7.30 TEST PROBLEM 3 PARETO OPTİMAL ÇÖZÜMLER	218
TABLO 7.31 TEST PROBLEM 4 PARETO OPTİMAL ÇÖZÜMLER	219
TABLO II.1 10X10 DEĞİŞKENLERİN TANIMLAYICI İSTATİSTİKLERİ.....	258
TABLO II.2 10X10 GRUPLAR ARASI İLİŞKİ İÇİN ANOVA SONUÇLARI.....	259
TABLO II.3 10X10 ÇOKLU KARŞILAŞTIRMA TESTİ SONUÇLARI	259
TABLO II.4 20X5 DEĞİŞKENLERİN TANIMLAYICI İSTATİSTİKLERİ	261
TABLO II.5 20X5 GRUPLAR ARASI İLİŞKİ İÇİN ANOVA SONUÇLARI.....	262
TABLO II.6 20X5 ÇOKLU KARŞILAŞTIRMA TESTİ SONUÇLARI	262
TABLO II.7 25X10 DEĞİŞKENLERİN TANIMLAYICI İSTATİSTİKLERİ.....	264
TABLO II.8 25X10 GRUPLAR ARASI İLİŞKİ İÇİN ANOVA SONUÇLARI.....	265
TABLO II.9 25X10 ÇOKLU KARŞILAŞTIRMA TESTİ SONUÇLARI	265
TABLO III.1 KACEM TEST PROBLEM 1. PARETO OPTİMAL ÇÖZÜM ÇİZELGELERİ.....	267
TABLO III.2 KACEM TEST PROBLEM 2 PARETO OPTİMAL ÇÖZÜM ÇİZELGELERİ	267
TABLO III.3 KACEM TEST PROBLEM 3 PARETO OPTİMAL ÇÖZÜM ÇİZELGELERİ	268
TABLO III.4 KACEM TEST PROBLEM 3 PARETO OPTİMAL ÇÖZÜM ÇİZELGELERİ II	269
TABLO III.5 KACEM TEST PROBLEM 4 PARETO OPTİMAL ÇÖZÜM ÇİZELGELERİ.....	270
TABLO III.6 KACEM TEST PROBLEM 4 PARETO OPTİMAL ÇÖZÜM ÇİZELGELERİ II	271

ŞEKİLLER LİSTESİ

ŞEKİL 1.1 ÜRETİM ESNEKLİĞİNE ETKİ EDEN FAKTÖRLER	4
ŞEKİL 1.2 ÇALIŞMA KONULARI VE İLİŞKİLERİ	8
ŞEKİL 2.1 GENEL YEREL ARAMA ALGORİTMASI	33
ŞEKİL 2.2 TEMEL BENZETİMLİ TAVLAMA ALGORİTMASI	34
ŞEKİL 2.3 GENETİK ALGORİTMA	40
ŞEKİL 2.4 GENEL TABU ARAMA ALGORİTMASI	45
ŞEKİL 2.5 YAPAY SINIR AĞI YAPISI	60
ŞEKİL 2.6 YAPAY NÖRON	61
ŞEKİL 3.1 BBAAAAB TÜRETİM AĞACI.....	68
ŞEKİL 3.2 ESNEK ATÖLYE ÇİZELGELEME PROBLEM GRUPLARI.....	72
ŞEKİL 3.3 ESNEK ATÖLYE ÇİZELGELEME PROBLEMİNE ÇÖZÜM YAKLAŞIMI	73
ŞEKİL 3.4 ÖRNEK ÇÖZÜM DİZİSİ GÖSTERİMİ	81
ŞEKİL 3.5 PARÇA 1 İÇİN KONTROLLER	81
ŞEKİL 3.6 PARÇA 1 İÇİN OPERASYON VE MAKİNELER(İŞLEM SÜRELERİ).....	80
ŞEKİL 3.7 PARÇA 2 İÇİN OPERASYON VE MAKİNELER(İŞLEM SÜRELERİ).....	81
ŞEKİL 4.1 ÇOK OBJEKTİFLİ TABU ARAMA ALGORİTMASI.....	88
ŞEKİL 4.2 GİFFLER VE THOMPSON ÇİZELGELEME ALGORİTMASI	95
ŞEKİL 4.3 ÖRNEK PROBLEM SON ÇÖZÜM DİZİSİ.....	97
ŞEKİL 4.4 ÇÖZÜM DİZİSİ SEMBOLİK GÖSTERİMİ	101
ŞEKİL 4.5 ÖRNEK PROBLEM BAŞLANGIÇ ÇÖZÜMÜ	103
ŞEKİL 4.6 KOMŞU ÇÖZÜM OLUŞTURULMASI	104
ŞEKİL 4.7 KOMŞU ÇÖZÜM OBJEKTİF FONKSİYON DEĞERLERİ	105
ŞEKİL 4.8 ÇÖZÜM SÜRECİ.....	110
ŞEKİL 4.9 PARETO OPTİMAL ÇÖZÜM İÇİN GANT ŞEMASI	112
ŞEKİL 5.1 GELİŞTİRİLEN PROGRAMIN TEMEL İŞLEYİŞİ	122
ŞEKİL 5.2 PARETO LİSTESİNE ELEMAN EKLENMESİ	125
ŞEKİL 5.3 KOMŞU ÇÖZÜM TÜRETME ALGORİTMASI	127
ŞEKİL 5.4 BASKINLIK KONTROLÜ ALGORİTMASI.....	128
ŞEKİL 5.5 TABU LİSTESİ KONTROL ALGORİTMASI.....	129
ŞEKİL 5.6 ADAY LİSTESİNE ELEMAN EKLENMESİ VE ÇIKARILMASI.....	130
ŞEKİL 6.1 GENETİK PROGRAMLAMA DÖNGÜSÜ	136
ŞEKİL 6.2 $((X-Y)+X)/Y^2$ DENKLEMİNİN AĞAÇ YAPISINDA GÖSTERİMİ	137
ŞEKİL 6.3 ÇAPRAZLAMA.....	139
ŞEKİL 6.4 C KROMOZOMUNUN AĞAÇ YAPISI	142
ŞEKİL 6.5 ÖRNEK LGP BİREYİ C KODU.....	143
ŞEKİL 6.6 STANDART ÇDP ALGORİTMASI	145

ŞEKİL 6.7 ÇDP KROMOZOM YAPISI.....	146
ŞEKİL 6.8 ÇDP KROMOZOMUNUN DENKLEM GÖSTERİMİ	147
ŞEKİL 6.9 E DENKLEMİNİN ÇDP KROMOZOMU.....	148
ŞEKİL 6.10 C1-C2 KROMOZOMLARI.....	149
ŞEKİL 6.11 F1-F2 KROMOZOMLARI.....	150
ŞEKİL 6.12 C1-C2 KROMOZOMLARI.....	150
ŞEKİL 6.13 F1-F2 KROMOZOMLARI.....	151
ŞEKİL 6.14 F1-F2 KROMOZOMU	151
ŞEKİL 6.15 MUTASYON İÇİN C1 KROMOZOMU	153
ŞEKİL 6.16 F1 KROMOZOMU	153
ŞEKİL 6.17 ESNEK ATÖLYE ÇİZELGELEME-ÇDP ENTEGRASYONU.....	154
ŞEKİL 6.18 ÇOK POPULASYONLU ÇDP ALGORİTMASI	155
ŞEKİL 6.19 ÇDP FONKSİYONU.....	156
ŞEKİL 6.20 ÇDP TESLİM TARİHİ - AKIŞ SÜRESİ	162
ŞEKİL 6.21 REGRESYON TESLİM TARİHİ - AKIŞ SÜRESİ	163
ŞEKİL 6.22 YSA TESLİM TARİHİ - AKIŞ SÜRESİ	167
ŞEKİL 6.23 ANA ETKİLER GRAFİĞİ.....	170
ŞEKİL 7.1 5X5 TAGUCHİ ANA ETKİLER GRAFİĞİ	178
ŞEKİL 7.2 5X5 TAM FAKTÖRYEL ANA ETKİLER GRAFİĞİ.....	181
ŞEKİL 7.3 5X5 TAM FAKTÖRYEL ETKİLEŞİM GRAFİĞİ	182
ŞEKİL 7.4 20X5 TAGUCHİ ANA ETKİLER GRAFİĞİ	184
ŞEKİL 7.5 20X5 TAM FAKTÖRYEL ANA ETKİLER GRAFİĞİ.....	186
ŞEKİL 7.6 20X5 TAM FAKTÖRYEL ETKİLEŞİM GRAFİĞİ.....	188
ŞEKİL 7.7 25X10 TAGUCHİ ANA ETKİLER GRAFİĞİ	190
ŞEKİL 7.8 25X10 TAM FAKTÖRYEL ANA ETKİLER GRAFİĞİ.....	192
ŞEKİL 7.9 25X10 TAM FAKTÖRYEL ETKİLEŞİM GRAFİĞİ	194
ŞEKİL 7.10 50X15 TAGUCHİ ANA ETKİLER GRAFİĞİ	196
ŞEKİL 7.11 50X15 TAM FAKTÖRYEL ANA ETKİLER GRAFİĞİ.....	197
ŞEKİL 7.12 50X15 TAM FAKTÖRYEL ETKİLEŞİM GRAFİĞİ	198
ŞEKİL 7.13 SIRALAMA KURALLARI EŞLEŞTİRMESİ.....	201
ŞEKİL 7.14 10X10 MAKİNE ESNEKLİĞİ SIRALAMA KURALI İLİŞKİSİ	206
ŞEKİL 7.15 20X5 MAKİNE ESNEKLİĞİ SIRALAMA KURALI İLİŞKİSİ	211
ŞEKİL 7.16 25X10 MAKİNE ESNEKLİĞİ SIRALAMA KURALI İLİŞKİSİ	215
ŞEKİL I.1 5X5 ANA ETKİLER GRAFİĞİ (OF2).....	249
ŞEKİL I.2 5X5 ETKİLEŞİM GRAFİĞİ (OF2)	250
ŞEKİL I.3 20X5 ANA ETKİLER GRAFİĞİ (OF2).....	250
ŞEKİL I.4 20X5 ETKİLEŞİM GRAFİĞİ (OF2)	251
ŞEKİL I.5 25X10 ANA ETKİLER GRAFİĞİ (OF2)	251
ŞEKİL I.6 25X10 ETKİLEŞİM GRAFİĞİ (OF2)	252
ŞEKİL I.7 50X15 ANA ETKİLER GRAFİĞİ (OF2).....	252

ŞEKİL I.8 50X15 ETKİLEŞİM GRAFİĞİ (OF2)	253
ŞEKİL I.9 5X5 ANA ETKİLER GRAFİĞİ (OF3)	253
ŞEKİL I.10 5X5 ETKİLEŞİM GRAFİĞİ (OF3)	254
ŞEKİL I.11 20X5 ANA ETKİLER GRAFİĞİ (OF3)	254
ŞEKİL I.12 20X5 ETKİLEŞİM GRAFİĞİ (OF3)	255
ŞEKİL I.13 25X10 ANA ETKİLER GRAFİĞİ (OF3)	255
ŞEKİL I.14 25X10 ETKİLEŞİM GRAFİĞİ (OF3)	256
ŞEKİL I.15 50X15 ANA ETKİLER GRAFİĞİ (OF3)	256
ŞEKİL I.16 50X15 ETKİLEŞİM GRAFİĞİ (OF3)	257



BÖLÜM 1

1 GİRİŞ

1.1 ÇALIŞMANIN KAPSAMI VE ÖNEMİ

Günümüzün pazar şartları, değişken tüketici talepleri, ürün ömrünün kısalması, maliyetleri düşürme yönünde rekabet baskısı, pazar paylarını koruyabilmeleri ve artırabilmeleri için üreticilerin daha hızlı hareket etmelerini zorunlu kılmaktadır. Bunun sonucunda, hem talep özelliklerinin değişmesi ve maliyetlerin artmasından dolayı sıfır stokla çalışmak, hem de talebe hızlı bir şekilde cevap verebilmek için daha fazla stokla çalışmak gibi iki çelişen durum ortaya çıkmaktadır. Buna bağlı olarak, üretim ortamında her iki yönde de olumlu sonuçlar alabilmek için etkin ve kesin çizelgelemenin önemi belirginleşmektedir. Çizelgeleme problemi, üretim planlama içerisinde oldukça önemli bir yeri olan ve araştırmacılar tarafından üzerinde yıllardır durulan bir çalışma alanı olma niteliğini korumaktadır (Jones; Rabelo; 1998).

Globalleşmeye bağlı olarak artan rekabet şartları, işletmeler açısından, kalite ve verimlilik kavramalarını ön plana çıkarmıştır. İşletmeler, bu alanda kendilerine üstünlük sağlayacak yeni üretim yönetimi yaklaşımlarının arayışı içerisindeyler. Günümüzdeki teknolojik gelişim hızı da göz önünde bulundurulursa, yeni üretim sistemlerinin içerisine teknolojinin yeni alanları da dahil olmaktadır.

İşletmelerin, mevcut sistemlerinde görülen kalite yetersizliği ve verimlilik düşüşü problemlerine en sık önerilen çözüm otomasyondur. Bilgisayar bütünleşik imalat, esnek imalat sistemleri, bu alandaki ana çalışma ve araştırma konuları olarak gündemdedir.

Üretim sistemlerinin gelişimine göz gezdirildiğinde, yüksek talebe cevap verebilmek amacıyla çok sayıda üretmek temel amaç niteliğini korumuş, dolayısıyla 1960'lara

kadar seri üretimde üretkenlik artışı yüksek olmuştur. Yüklü miktarda üretimi gerçekleştirebilme amacına ulaşıldıktan sonra bu amaca daha etkin, daha düşük maliyetle ulaşabilmek hedeflenmiştir. Bu arada rekabet şartlarının gelişiyor olması, kalite kavramını ön plana çıkarmıştır. 1965-1973 yılları arasında üretkenlik oranı düşmüş ve başka faktörler bu düşüşü desteklemiştir. Artan rekabet şartları, değişen tüketici profili, gelişen tüketim imkanları ve teknolojik yenilikler işletmelerde köklü değişikliklere yol açacak yeni bir dönemin başlamasını sağlamıştır. Artık değişen çevre şartlarına en hızlı ayak uyduran, en düşük maliyetle en kaliteli ürünü müşterisine sunan ve bireysel pazarlamanın ön plana çıktığı bu dönemde müşteriye özel üretime kadar geniş bir üretim miktarı yelpazesine sahip olan işletmeler ayakta kalmayı ve büyümeyi başarmışlardır. Bu başarının temelinde de *esneklik* yatmaktadır (Duguay; Landry; Pasin; 1997).

Bir üretim sisteminin esnekliğinin açıklanabilmesi için 8 farklı esneklik kavramı tanımlanmaktadır (Kaighobadi; Venkatesh; 1994, Browne; Dubois; Rathmill et. Al.; 1984).

- Makine Değişim Esnekliği: Makine ve makine parçalarının değişimindeki hız ve kolaylık, makine değişim esnekliği olarak ifade edilmektedir. Makine değişim esnekliği, iş parçasındaki değişikliklere bağlı olarak makine hazırlık sürelerinin enküçüklenmesini amaçlamaktadır. Bu esneklik;
 - a. gelişmiş iş parçası ve makine parçası yükleme araçlarının kullanılması,
 - b. makine parça değişimlerini enküçüklemek üzere uygun operasyon atamaları,
 - c. iş parçaları ile uygun makine parçalarını bir araya getirebilmek için teknolojik yeterliliğe sahip olmak
 ile sağlanabilir.
- Proses Esnekliği: Aynı gruptaki ürünleri farklı malzeme ve yöntemler kullanarak üretebilme kabiliyetidir. Proses esnekliği, makine hazırlık maliyetleri düştükçe artar. Her parça ayrı olarak işlenebilir, partiler halinde üretim zorunlu değildir. Bu esneklik, eş zamanlı olarak işlenen farklı parça sayısı ile ölçülebilir. Proses

esnekliği, makine değişim esnekliğinin yükseltilmesi ve çok amaçlı, adaptif iş istasyonlarının kullanılması ile sağlanabilir.

- Ürün Esnekliği: Farklı bir ürünü ekonomik ve hızlı üretebilme kabiliyetidir. Buna aynı zamanda tasarım değişikliği esnekliği de denilmektedir. Bu esneklik bir üründen, bir diğerine geçerken harcanan süre ile ölçülebilir. Ürün Esnekliği;
 - a. etkin bir otomasyona dayalı üretim planlama ve kontrol sistemi,
 - b. etkin operasyon atama prosedürleri,
 - c. makine değişim esnekliği

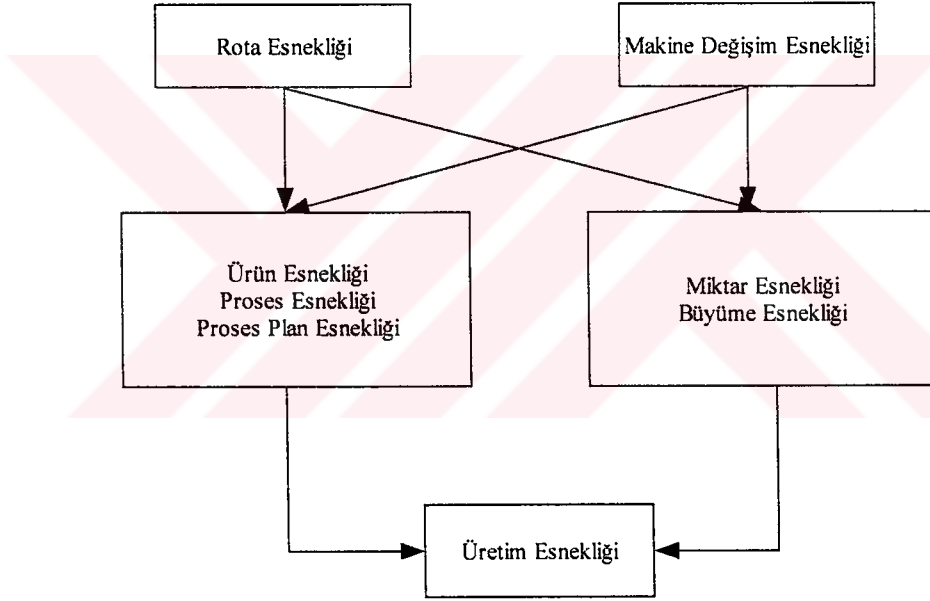
ile sağlanabilir.

- Rota (Makine) Esnekliği: Arıza ve duraksamaları ortadan kaldırarak, üretime gecikmesiz devam edebilme kabiliyetidir. Bu kabiliyet, bir ürünün birden fazla rotada işlenebilmesi ve her operasyonun birden fazla makinede gerçekleştirilebilmesiyle sağlanabilir. Rota esnekliği, üretim sisteminin herhangi bir sebepten duraklamaya, arızaya karşı dayanıklılığı ile ölçülebilir. Böyle bir durum söz konusu olduğunda, üretim miktarında ve akış hızında herhangi bir değişiklik olmaksızın parçalar işlenmeye devam edilebilmelidir.
- Miktar Esnekliği: Çok farklı miktarlarda üretime izin verebilme (ekonomik olarak) kabiliyetidir. Miktar esnekliği yüksek seviyede bir otomasyon ile makine hazırlık sürelerini ve değişken maliyetleri azaltmak suretiyle sağlanır. Bu esneklik, sistemde ne kadar düşük miktarda üretim yapılırsa yapılsın, sistemin karlı işleyişi ile ölçülebilir. Üretim parti büyüklüğü ne kadar düşerse, miktar esnekliği o kadar yüksek olmalıdır.
- Büyüme Esnekliği: Bir sistem oluşturma ve sistemi gerektiğinde modüler olarak istenildiği kadar genişletebilme kabiliyetidir. Montaj hatlarında ve prosese göre düzenlenmiş yerleşimlerde bu durum pek söz konusu değildir.
- Proses Plan Esnekliği: Her parça tipi için, proses planındaki operasyon sırasını değiştirebilme kabiliyetidir. Genellikle, bir parça tipi için belirli öncelik yapısı oluşturmak gerekmektedir. Buna rağmen, bazı operasyonların yer değiştirebilmesi mümkün olabilmektedir. Bir parça için proses planlar önceden

belirli olabilir veya üretim esnasında makinelerin durumuna göre operasyon sırasına karar verilebilir.

- Üretim Esnekliği: Üretim sisteminin üretebileceği ürün çeşitliliğini ifade eder. Bu esneklik, mevcut teknoloji ile bağlantılıdır. Teknoloji seviyesinin yükseltilmesi, makine parça sayısının ve çeşitliliğinin artırılması ile üretim esnekliği yükseltilebilir. Bu esnekliğin sağlanması için daha önce belirtilen bütün esneklik türleri gereklidir.

Farklı esneklik kavramları ile üretim esnekliğinin ilişkisi Şekil 1.1’de görülmektedir.



Şekil 1.1 Üretim Esnekliğine Etki Eden Faktörler

Çizelgeleme problemleri, üretim sistemlerinin en karmaşık problemlerinden birisi olup, bir çok uygulama alanı bulunmaktadır. Yapılan çalışmalar sonucunda, klasik çizelgeleme problemlerinin bir kısmına optimal çözümler üretecek algoritmalar ve yöntemler hala geliştirilememiştir. Buna bağlı olarak çizelgeleme problemi, halen üzerinde çalışılan bir problem olma niteliğini korumaktadır. Ancak üretim teknolojilerindeki hızlı gelişmeler sonucunda esnek sistemler ortaya çıkmakta ve bu

sistemlerin kontrolü için daha gelişmiş yöntemlere ihtiyaç duyulmaktadır. Çizelgeleme esnekliği, üretim sistemlerinin esnekliği üzerinde tepkisellik ve etkinlik açısından önemli bir yere sahiptir (Chan; 2003, 899-900). Çok objektifli esnek atölye çizelgeleme problemleri bunlardan birisidir. Bu problem, klasik atölye çizelgeleme probleminden çok daha karmaşık ve yapısı gereği çözümlenmesi zor bir problemdir (Baykasoğlu; 2002).

Bu çalışmada, çizelgeleme problemi için, sıralanan esneklik kavramları içerisinde üretim sisteminin esnekliği ve çevikliği üzerinde önemli bir yere sahip olan *rota esnekliği* ve *proses plan esnekliği* bir arada ele alınmıştır.

- Rota Esnekliği: Esnek atölye çizelgeleme problemi, atölye çizelgeleme probleminin en genel hali olup, makine (rota) esnekliğini içermektedir. Yani, her bir parçanın proses planında yer alan operasyonların gerçekleştirilebileceği birden fazla makine alternatifleri söz konusudur. Problem, öncelikle operasyonlar için bu aday makinelerden birisinin belirlenmesi (atama), daha sonra makinelerdeki operasyonların sıralanması ve çizelgelenmesi problemlerini kapsamaktadır.
- Proses Plan Esnekliği: Çalışmada, esnek atölye çizelgeleme problemine, proses plan seçimi problemi entegre edilmiştir. Yani her bir parça için işlem görebilecekleri alternatif operasyon sıraları mevcuttur. Çalışmada ele alınan temel problem, proses plan esnekliğini ifade eden bu özellikle birlikte, üç aşamalı bir problem haline gelmiştir.
 - a. Proses plan seçimi
 - b. Operasyonların makinelere atanması
 - c. Makinelerde operasyonların çizelgelenmesi

Üretim sistemlerinde çizelgeleme problemlerinin çoğu çok amaçlıdır. Bu problemlerde çizelge uzunluğunun enküçüklenmesi, mevcut kaynakların optimizasyonu, insan kaynaklarının beklentilerinin tatmini, siparişlerin gecikmelerinin enküçüklenmesi gibi pek çok amaç aynı anda söz konusudur. Hatta bazı durumlarda bu amaçlar birbirleri ile çelişen amaçlar halinde ortaya çıkabilmektedir. Araştırma camiasında çok amaçlı çizelgeleme probleminin çözümü için uzun yıllardır pek çok çalışma yapılmıştır. Bu

çalışmalarda çoğunlukla benimsenen yöntem, birden çok amacı karar mekanizması tarafından belirlenen ağırlıklar vasıtasıyla tek bir değerde toplayıp, daha sonra bu ağırlıklara uygun çözümü bulunmasıdır.

Ancak gerçek hayattaki çok amaçlı çizelgeleme problemlerinde, karar mekanizmasına birden fazla iyi çözümü sunulup, bunlar arasından seçim yapabilme kabiliyetine sahip olunması büyük önem taşımaktadır.

Yukarıda sıralanan faktörler göz önüne alınarak, çalışmada, proses plan esnekliği içeren çok amaçlı esnek atölye çizelgeleme probleminin Pareto optimizasyonu ele alınmıştır. Geliştirilen model tanımlanan çizelgeleme alt problemlerini bütünleşik ve eşzamanlı olarak çözebilmektedir.

1.2 ÇALIşMANIN AMACI VE YÖNTEMİ

Çalışmanın temel amacı, proses plan esnekliği içeren çok objektifli esnek atölye çizelgeleme problemine değişik disiplinlerde kullanılan çözümleme tekniklerini (Dil Teorisi, Tabu Arama, Genetik Programlama) bir araya getirerek etkili bir modelleme ve çözümleme yöntemi geliştirmektir. Bu yeni yöntem ile, literatürdeki bir boşluk doldurulmaya çalışılarak esnek üretim atölyelerinin performanslarını artırmaları için bir prototip sistem oluşturulacaktır.

Günümüzde üretim teknolojilerinin hızlı bir şekilde gelişmesi sonucunda, çok amaçlı otomatik makineler yaygın bir kullanım alanına sahip duruma gelmişlerdir. Dolayısıyla, bir iş için tek bir proses planının, bir operasyon için tek bir makinenin uygun olduğu varsayımı ile üretimi çizelgeleme, bir çok üretim ortamı için geçerliliğini yitirmiştir. Klasik varsayımlar üzerine geliştirilen çizelgeleme yöntemleri ile esnek atölyelerin çizelgelenmesi ciddi performans problemlerine ve mali kayıplara sebebiyet verebilir. Esnek sistemler müşteri taleplerine hızlı bir şekilde cevap verebilecek nitelikte tepkisel olmalıdırlar. Buna bağlı olarak esnek atölye çizelgelemesi problemleri, esneklikten kaynaklanan potansiyel performans düzeyini yakalayabilmek için, kendi özel durumları göz önüne alınarak modellenmeli ve çözülmelidirler. Ayrıca değişen çevre ve talep durumlarına göre bir çok üretim parametresi optimize edilmeli, yani sistem çok objektifli bir yapıya sahip olmalıdır.

Esnek atölye çizelgeleme problemine çözüm geliştirilebilmesi için öncelikle problemin modellenmesi gerekmektedir. Çalışmada proses plan esnekliği içeren esnek atölye çizelgeleme problemi, Baykasoğlu (2002) tarafından önerilen, çizelgeleme problemlerinin modellenmesinde yeni bir yaklaşım olan Dil Teorisine dayalı Bağlam Bağımsız Gramer ile modellenmiştir. Bu yaklaşım ile problemin karmaşık yapısal özellikleri, Bağlam Bağımsız Gramer tanımlamasına dayalı basit bir gösterimle ifade edilebilmiştir.

Çözümü zor (NP-zor) problemler arasında yer alan esnek atölye çizelgeleme problemi, proses plan seçimi probleminin de eklenmesiyle daha da karmaşık bir problem haline gelmiştir. Buna bağlı olarak, çalışmada ele alınan problemin çözümü için modern sezgisel optimizasyon tekniklerinden tabu arama seçilmiştir.

Baykasoğlu, Owen ve Gindy (1999a, 1999b) tarafından geliştirilerek literatüre kazandırılan çok objektifli tabu arama (MOTS) modeline dayalı optimizasyon tekniği probleme uyarlanmış ve genel çözüm algoritması geliştirilmiştir.

Çalışmada, esnek atölye çizelgeleme problemleri için ürün teslim tarihlerinin gerçekçi olarak belirlenmesine yönelik yeni bir yaklaşım ortaya konulmuştur. Bu yaklaşımla, iş sisteminin özelliklerini yapısı gereği öğrenebilme ve yansıtılabilirliğine sahip olan genetik programlama yöntemini kullanarak, çizelgeleme sistemine özel teslim tarihi belirleme denklemlerinin türetilmesi etkin bir şekilde gerçekleştirilmiştir.

Çalışmanın ilk aşamasında problemin modellenmesi üzerinde durulmuştur. Bu amaçla Baykasoğlu (2002) tarafından önerilen Dil Teorisine dayalı Bağlam Bağımsız Gramer yöntemi ele alınarak, bu yöntemle proses plan esnekliği içeren esnek atölye çizelgeleme probleminin modeli kurulmuştur.

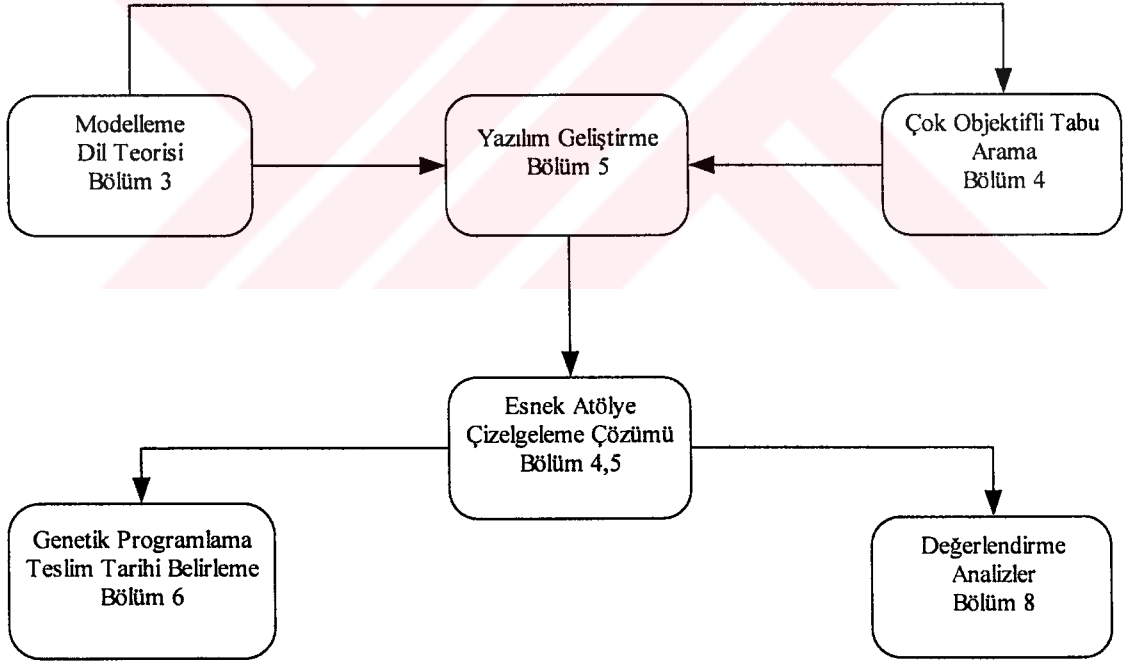
Çalışmanın ikinci aşamasında ise modellenen problemin, Baykasoğlu, Owen ve Gindy (1999a, 1999b) tarafından geliştirilen çok objektifli tabu arama yaklaşımı ile çözüm algoritması oluşturulmuştur. Algoritma, C/C++ programlama dili ile etkin veri yapıları kurularak, pek çok farklı yapıda çizelgeleme problemine uyarlanabilecek esneklikte programlanmıştır.

Geliştirilen yazılım ile çözüm yönteminin etkinliğinin analiz edilebilmesi için, hipotetik esnek atölye çizelgeleme problemleri türetilmiş, deneysel çalışmalar ve analizler gerçekleştirilmiştir.

Çalışmanın son aşamasında, atölye çizelgeleme sistemleri için teslim tarihi belirleme probleminin çözümünde genetik programlama yaklaşımı ele alınmıştır. Geliştirilen çözüm algoritmasının yazılımı, C/C++ programlama dili ile gerçekleştirilmiştir.

1.3 ÇALIŞMANIN BÖLÜMLERİ

Çalışmada ele alınan konular ve bunların birbirleri ile ilişkileri Şekil 1.2’de görülmektedir.



Şekil 1.2 Çalışmanın Bölümleri ve İlişkileri

Bölüm 2’de, tez çalışmasına temel teşkil eden konular ile ilgili genel bilgiler ve detaylı bir literatür çalışması yer almaktadır.

Bölüm 3, Dil Teorisi yaklaşımı ile esnek atölye çizelgeleme probleminin modellenmesine ilişkin çalışmaları kapsamaktadır. Bu bölümde Dil Teorisi ve Bağlam Bağımsız Gramer'ler tanıtılarak, modelleme yöntemi ortaya konulmuştur.

Bölüm 4, esnek atölye çizelgeleme probleminin çözümü için geliştirilen çok objektifli tabu arama yöntemini içermektedir. Bu bölümde orijinal MOTS algoritması incelenmiş, esnek atölye çizelgeleme probleminin özelliklerine uygun çok objektifli tabu arama yaklaşımı açıklanmıştır.

Bölüm 5'te, Dil Teorisi ve tabu arama temelli çok objektifli esnek atölye çizelgeleme programının tasarımı, veri yapısı, işleyişi, parametre ve fonksiyonları ile ilgili açıklamalar yer almıştır.

Bölüm 6, atölye çizelgeleme sistemleri için teslim tarihi belirlenmesine ilişkin genetik programlamaya dayalı çözüm yöntemini içermektedir. Bu bölümde, genetik programlama kapsamında yer alan çoklu denklem programlama yöntemi ele alınmış ve çözüme yönelik geliştirilen yazılım ortaya konulmuştur. Yöntemin etkinliği, yapay sinir ağları ve regresyon analizleri ile karşılaştırılmıştır. Bölüm sonunda yöntemle ilişkin deneysel çalışma ve analizlere yer verilmiştir.

Bölüm 7'de, çok objektifli esnek atölye çizelgeleme problemi çözümü için önerilen yöntemin çeşitli performans kriterlerine göre değerlendirilmesi ve analizleri yer almaktadır. Bu bölümün sonunda, önerilen yöntemin etkinliği literatürde yer alan çözümler ile karşılaştırılmıştır.

Bölüm 8, çalışmanın sonuç değerlendirmesini, literatüre kazandırdığı yenilikleri ve ileriye yönelik önerileri içermektedir.

Deneysel çalışma ve analizlere ilişkin ilave sonuçlar Ekler'de yer almaktadır.

BÖLÜM 2

2 GENEL BİLGİLER VE LİTERATÜR TARAMASI

2.1 GİRİŞ

Bu bölümde, çalışmaya temel teşkil eden konularda kuramsal altyapının oluşturulması amaçlanmıştır. Klasik atölye çizelgeleme ve çalışmaya konu olan esnek atölye çizelgeleme problemleri ortaya konulmuştur. Çok objektifli optimizasyon kavramı ve çözüm yöntemleri incelenmiştir. Modern sezgisel yaklaşımlar ele alınmış, bu yaklaşımların tek objektifli algoritmaları açıklanmıştır. Son bölümde ise literatürde yer alan çok objektifli modern sezgisel optimizasyon teknikleri ile çizelgeleme uygulamaları üzerinde durulmuştur.

2.2 ÇİZELGELEME

Çizelgeleme, işlerin belirli bir zaman dilimi içerisinde, mevcut kısıtlara uygun olarak belirli amaçları sağlayacak şekilde düzenlenmesi olarak görülebilir (Silva; Burke; 2002, 1). Kısıtlar ise çizelgelenecek işler arasındaki ilişkiden veya kaynaklardan oluşur ve mümkün olabilecek çizelge alternatiflerini kısıtlar. Pratikte çizelgeleme problemi, uygun bir çizelgenin bulunmasını hedefleyen bir arama problemi veya en uygun çizelgenin bulunmasını hedefleyen bir optimizasyon problemi olarak değerlendirilebilir.

Üretim planlamanın önemli bir problemi olan çizelgeleme teorisi üzerine uzun yıllardır süren çalışmalar, basit sıralama kurallarından karmaşık sezgisel yöntemlere kadar uzanan geniş bir yelpazede literatürde yer almaktadır (Jain; Meeran; 1998). Çizelgeleme problemlerinden, çizelgelemenin genel özelliklerini taşıması ve çözümünün zor olmasından dolayı atölye çizelgeleme problemleri üzerinde odaklanılmıştır. Çizelgelemenin genel teorisi, Baker (1974), Lawler, Lenstra, Rinnoy Kan vd.(1993) gibi bir çok araştırmacı tarafından detaylı bir şekilde literatüre kazandırılmıştır. Ayrıca

literatürde, çizelgeleme konusunda yapılan çalışmaları inceleyerek, ayrıntılı sınıflandırmalar yapan araştırmalar da yer almaktadır (McCarthy; Liu; 1993, Jain; Meeran; 1998, Jones; Rabelo; 1998).

Çizelgeleme problemleri, üretim çizelgeleme, olay çizelgeleme, personel çizelgeleme gibi oldukça farklı alanlarda ortaya çıkmaktadır. Ayrıca kaynakların düzenine göre, açık-kapalı atölye, tek-paralel tezgahlı, akış tipi, atölye tipi, esnek atölye tipi çizelgeleme şeklinde de sınıflandırılmaktadır (Baker; 1994, 24). Parçaların makinelere uğrama yoluna göre akış tipi ve atölye tipi çizelgeleme farklılık göstermektedir. Akış tipi çizelgelemede tüm parçalar aynı yönde hareket etmektedir. Atölye tipinde ise parçalar farklı yönde hareket edebilmekte ve aynı parça bir makineye birden fazla kere uğrayabilmektedir (Kusiak; 1990, 356).

Pratikte çizelgeleme problemlerinin çoğu çok amaçlıdır. Bu problemlerde çizelge uzunluğunun enküçüklenmesi, mevcut kaynakların optimizasyonu, insan kaynaklarının beklentilerinin tatmini, siparişlerin gecikmelerinin enküçüklenmesi gibi pek çok amaç aynı anda söz konusudur. Araştırma camiasında çizelgeleme probleminin çözümü için uzun yıllardır pek çok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalarda çoğunlukla benimsenen yöntem, birden çok amacı karar mekanizması tarafından belirlenen ağırlıklarla tek bir değerde toplayıp, daha sonra bu ağırlıklara uygun çözümün bulunmasıdır. Ancak gerçek hayatta çok amaçlı çizelgeleme problemlerinde karar mekanizmasına birden fazla uygun çözümü sunup, bunlar arasından seçim yapabilme kabiliyetine sahip olmak büyük önem taşımaktadır. Bu yöntemin de iki farklı yolu mevcuttur. Bunlardan birincisi, farklı amaçlarla birden çok arama yapılarak her biri için farklı çözüm türetmektir. İkincisi ise çok amaçla birden fazla çözümü bir aramada elde edebilmektir. Bu ikinci yöntem, Pareto optimizasyon tekniklerinin, çok amaçlı çizelgeleme problemlerinde uygulanması üzerine odaklanılmasını sağlamıştır. Son yıllarda bir çok alanda çok amaçlılık ön plana çıktığı için Pareto optimizasyon ile ilgili pek çok algoritma geliştirilmiştir.

Tek amaçlı optimizasyon problemlerine uygulanan modern-sezgisel yaklaşımların büyük bir bölümü çok amaçlı optimizasyon için genişletilerek geliştirilmiştir. Bunların arasında bazı araştırmacılar tarafından, yapısı gereği çok amaçlılığa daha uygun olduğu gerekçesiyle, çok amaçlı evrimsel algoritmalar üzerinde dırılmıştır. Ayrıca son yıllarda yerel arama yöntemlerine dayalı benzetimli tavlama, tabu arama gibi modern-sezgisel

yaklaşımların da çok amaçlı hale getirilmesine yönelik çeşitli çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Literatürde Pareto optimizasyon ile ilgili pek çok çalışma yer almasına rağmen, geliştirilen tekniklerin çok amaçlı çizelgeleme problemlerine uygulanması henüz yeterli düzeyde değildir (Silva; Burke; 2002, 2).

2.2.1 Klasik Atölye Çizelgeleme Problemi

Atölye çizelgeleme, 'iş yükünün tezgahlar arasında dağıtımı ve bu işlerin kendi tezgahlarında işlem sıralarının belirlenmesi' olarak tanımlanmaktadır (Stevenson; 1996, 592). Klasik atölye çizelgeleme probleminde n işten oluşan bir J iş kümesi, $J=\{J_1, J_2, \dots, J_n\}$ ve bu kümede yer alan işlerin işlem göreceği m makineden oluşan bir M makine kümesi, $M=\{M_1, M_2, \dots, M_m\}$, yer almaktadır. Dolayısıyla çizelgeleme problemi, bu sonlu sayıda iş kümesinin, sonlu sayıda makine kümesi üzerinde, belirli operasyon sırası ve kapasite kısıtlarını yerine getirerek, performans kriterini optimize edecek biçimde her operasyonu için işleme başlama zamanının belirlenmesidir. Problemin varsayımları (Vaessens; Aarts; Lenstra; 1994, 303):

- Çizelgeleme problemlerinde her bir iş, her makinede bir kere işlem görecektir. Kendi operasyon sırasına $(O_{i1}, O_{i2}, \dots, O_{im})$ sahiptir.
- Her bir operasyonun işlem göreceği makinesi ve bu makinedeki işlem süresi belirlidir.
- Bir makine, herhangi bir zamanda sadece bir işi gerçekleştirebilir ve bir iş belirli bir zamanda sadece bir makine tarafından işlenebilir.
- Bir operasyon işlem süresince bölünemez.
- Bir işin tamamlanması için tüm operasyonlarının gerçekleştirilmesi gereklidir.
- İşler, işlem süreleri, teknolojik kısıtlar bilinmektedir.
- İşler ve makineler sıfır anında işleme hazırdır.
- Operasyonların işlem süreleri süreç sırasına bağlı değildir.
- Hazırlık ve taşıma süreleri işlem sürelerinin içerisinde yer alır.
- Her makine tipinden bir tane vardır.

- Bütün işlerin önem derecesi aynıdır.

Problem matematiksel olarak, teknoloji ve kapasite kısıtlarını yerine getiren, belirli bir performans kriterini optimize eden uygun çözümlerin bulunması olarak ifade edilebilir (2.1);

Enküçük $C_{enbüyük}$

$$\begin{aligned}
 t_{io_n} - t_{io_{n+1}} &\leq p_{io_{n+1}} \\
 t_{io_n} - t_{jo_n} &\geq p_{jo_n} \quad i \neq j \text{ yada} \\
 t_{jo_n} - t_{io_n} &\geq p_{io_n} \\
 t_{io_n} &\geq 0
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

$\{Ji\}_{i=1}^n$: iş kümesi

$\{Mk\}_{k=1}^m$: makine kümesi

$\{O_{i1}, O_{i2}, \dots, O_{im_i}\}_{i=1}^n$: her bir i işi için operasyon kümesi

p_{ik} : i. işin k. makinedeki işlem süresi

C_{ik} : i. işin k. makinede tamamlanma zamanı

$C_{enbüyük}$: tüm işlerin tüm makinelerde tamamlanma zamanı

t_{io_n} : i. işin o operasyonunun n. makinede işleme başlama zamanı

Matematiksel modeldeki ilk kısıt, teknolojik sırayı koruyarak, bir işin bir anda sadece bir makine tarafından işlenmesini sağlar. İkinci kısıt ise, bir makinenin bir anda sadece bir operasyonu gerçekleştirmesini sağlayan kısıttır. Performans kriterleri genel olarak;

- Tamamlanma zamanının,
- Toplam/Ortalama gecikmenin,
- Geciken iş sayısının,
- Süreç içi işlerin bekleme sürelerinin,
- Ortalama akış zamanının en küçüklenmesi veya

- Kaynak kullanımının en büyüklenmesi (boş zamanlarının en küçüklenmesi)

şeklinde sıralanabilir.

Atölye çizelgeleme problemi karmaşık yapıda ve n iş, m makine için $(n!)^m$ alternatif çözümü olan bir problemdir (Jain; Meran; 1998, 5). Optimum çizelgeyi belirlemek üzere her bir çözümün gözden geçirilerek, gerekli performans kriterlerini değerlendirmek zaman açısından uygulamada pratik olmayan bir yöntemdir. Eğer bir çizelgeleme problemini optimum çözecek polinomsal zamanlı bir algoritma yoksa, bu problemler NP-zor olarak adlandırılır (Pinedo; 1995, 20). Bu tür problemlerin çözümünde, problemin büyüklüğüne göre farklı çözüm yöntemleri uygulanır. Bunlardan bir kaç, dal-sınır, yerel arama ve modern sezgisel yöntemlerdir (Jain; Meeran; 1998).

2.2.1.1 Çözüm Yaklaşımları

Çizelgeleme problemine yönelik optimal çözüm yöntemlerinin zaman gereksinimleri, problem büyüklüğünün doğrusal artışıyla, üssel olarak artmaktadır (Jain; Meeran; 1998, 4).

Matematiksel Formülasyonlar: Atölye çizelgeleme problemlerinin matematiksel programlama ile çözülmesine yönelik yöntemlerdir. Atölye çizelgelemenin matematiksel formülasyonlarından en yaygın olanı Manne'nin karma tamsayılı doğrusal programlama modelidir. Model basit olarak doğrusal kısıtlardan ve bir objektif fonksiyonundan oluşan, ancak tamsayılı karar değişkenleri ile ilave sınırlara sahip bir doğrusal programdır. Literatürde atölye çizelgeleme için geliştirilmiş farklı matematiksel modeller yer almaktadır (Pinedo; 1995, Sönmez; Baykasoğlu;1998). Ancak oluşturulan matematiksel modellerdeki değişkenlerin sayısının problem boyutuyla birlikte üssel artışı bu yöntemin uygulanabilirliğini çok küçük problemlerle sınırlamıştır. Bu grup içerisinde yer alan Lagrange rahatlatma yöntemleri, öncelik ve kapasite kısıtlarını, objektif fonksiyonunda yer alan cezaları da içeren pozitif Lagrange çarpanları ile rahatlatarak çözüm geliştirmektedirler. Ayrıştırma yöntemleri (Applegate; Cook; 1991) ise problemi daha kolay çözülebilen alt problemlere bölme yaklaşımını izlemektedirler.

Dal-Sınır Teknikleri: Dal-sınır algoritmaları, bütün uygun çözümleri kapsayan ve dinamik olarak oluşturulan ağaç yapılarını kullanarak optimal çözümü elde ederler. Optimal çözüm araması kök düğümünden başlar, ağacın uç düğümüne ulaşıldığında tam çizelge elde edilir. Arama ağacında, p seviyesindeki her bir birim, p operasyonunun kısmi sırasını ifade etmektedir. Dal-sınır yapısı, her birimde alt ve üst sınırların belirlenmesi ve bu sınırlara göre dalların elenmesi esasına dayanmaktadır. Literatürde, atölye çizelgeleme problemine ilk dal-sınır yaklaşımlarından birisi Balas tarafından 1969'da gerçekleştirilmiştir. Bu yaklaşım kritik yol diyagramını uygulayarak kritik operasyonları incelemiştir (Jain; Meeran; 1998).

Yakınsama Yöntemleri: Yakınsama yöntemleri, optimal çözümü garanti etmemekle birlikte, uygun çözüm sürelerinde optimale yakın çözümlere ulaşabilmektedirler. Buna bağlı olarak, bu yöntemler daha büyük çizelgeleme problemlerinin çözümü için uygundur.

Sıralama Kuralları: Sıralama kuralları, uygulama kolaylıkları ve hesaplama yükünün az olmasından dolayı sıkça kullanılan bir tekniktir (Baker; 1974, Morton; Pentico; 1993, Blackstone; Phillips; Hogg; 1982, Giffler; Thompson; 1960). Çizelgelemenin her bir aşamasında, çizelgelenebilecek operasyonların öncelikleri kurallara göre belirlenir. En yüksek önceliğe sahip operasyon çizelgelenir. Tüm operasyonlar çizelgelenene kadar bu işlem sürdürülür. Literatürde çizelgeleme için yeni sıralama kuralları oluşturmaya ilişkin pek çok çalışma yer almaktadır (Holthaus; 1997, Holthaus; Rajendran; 1997). Chang, Sueyoshi ve Sullivan (1996), 42 sıralama kuralının performanslarını değerlendirerek karşılaştırmışlar ve en kısa işlem zamanına dayalı kuralların iyi, en uzun işlem zamanına dayalı kuralların ise diğerlerine göre daha kötü sonuçlar verdiğini ortaya koymuşlardır. Sıralama kuralları her koşulda iyi sonuç veren kurallar olmayabilirler. Çizelgelemede kullanılacak sıralama kuralları, iş sisteminin özelliklerine ve amaca uygun olarak belirlenmelidir. (Pinedo; 1995, 143)

Darboğaza Dayalı Sezgiseller: Bu yöntemler, sıralama kuralları ve kesin çözüm yöntemleri arasında köprü oluşturmuşlardır (Jain, Meran; 1998, 12). Bu yöntemlerden birisi Adams, Balas ve Zawack (1988) tarafından geliştirilen değişen darboğaz yöntemidir. Yöntem, problemin alt problemlere ayrılması, darboğaz seçimi, alt problemlerin çözümü ve çizelgenin yeniden düzenlenmesi aşamalarından oluşmaktadır.

Problem, her makine için alt problemlere bölünerek, tekrarlı tek makine çizelgeleme problemi olarak çözülmektedir. Çözümünden sonra her makinenin değeri, diğerleri ile karşılaştırılarak makineler sıralanır. En büyük çözüm değerine sahip makine darboğaz makine olarak belirlenir. Yöntem darboğaz makineyi, daha önce çizelgelenmiş makinelerle göre çizelgeler. Her darboğaz makine çizelgelendiğinde, önceki çizelgelenmiş makineler yeniden tek makine problemi olarak çözülürler. Atölye çizelgeleme problemine uygulanmış farklı değişen darboğaz yöntemleri Jain ve Meeran (1998) tarafından karşılaştırılmıştır.

Yapay Zeka Yöntemleri: Yapay zeka, doğadaki prensipleri kullanarak bilgisayarların problem çözebilme kabiliyetlerini artırmaya yönelik bir çalışma alanıdır. Pek çok yapay zeka tekniği atölye çizelgeleme problemine uygulanmıştır. Bunlardan en yaygın olanları kısıt tatmin teknikleri ile yapay sinir ağlarıdır (Jain; Meeran; 1998, 14).

Kısıt tatmin teknikleri, kısıtlara bağlı olarak arama alanının daraltılmasını amaçlamaktadır. Kısıtlar, seçilen değişkenlerin sırasını ve her değişkene mümkün atabilecek değerlerin sırasını sınırlandırır. Bir değişkene bir değer atandıktan sonra, eğer varsa uygunsuzluklar ortadan kaldırılır. Geri izleme ile değişkenlerin sırası sabitlenir. Problemin çözümü, kısıtları sağlayacak şekilde tüm değişkenlerin kapsanması ile tamamlanır. Yönteme ilişkin ilk çalışmalardan birisi Fox ve Sadeh (1990) tarafından gerçekleştirilmiş ve kısıt tatmin yaklaşımı, zorluk derecesi farklı çizelgeleme problemlerine uygulanmıştır.

Yapay sinir ağları (YSA) beynin fizyolojisinden ve çalışma prensibinden faydalanılarak oluşturulmaya çalışılan bilgi işleme modelleridir. YSA, bir olay hakkında giriş ve çıkışlar arasındaki ilişkiyi, doğrusal olsun veya olmasın, elde bulunan mevcut örneklerden öğrenerek, daha önce hiç görülmemiş olayları, önceki örneklerden çağrışım yaparak ilgili olaya çözümler üretebilme özelliğine sahiptirler (Zurada; 1992, 11). Yaygın olarak çizelgelemede kullanılan ağlar, Hopfield ve hatayı geriye yayma ağlarıdır. Hofield ağlarında amaç, tamamlanma zamanına bağlı enerji fonksiyonunu farklı öncelikler ve kısıtlar ile en küçükleme. Kısıtlara uyulmadığı takdirde enerji fonksiyonunu artıran bir ceza değeri türetilmektedir. Enerji fonksiyonu bazı uygulamalarda, tüm işlerin işleme başlama zamanlarının toplamı olarak ifade edilmiştir (Jain; Meeran; 1998, 9). Hatayı geriye yayma yaklaşımlarında iş sıraları, kapasite

kısıtları ve hazırlık zamanları gibi bilgiler sistemin girdisini oluştururken, çıktı makine sıralarıdır. Ağ, bu girdi verisi ile eğitilir. Çıktılar ile bilinen sonuçlar karşılaştırılır ve hatalar geriye doğru dağıtılarak nöronların ağırlıkları öğrenme gerçekleşinceye kadar tekrar ayarlanır. Yapay sinir ağları ile ilgili bilgi Bölüm 2.8’de yer almaktadır.

Son yıllarda üzerinde çalışılan ve çizelgelemeye uygulanan yapay zeka tekniklerinden birisi de karınca sistemidir (Coloni; Dorigo; Maniezzo et. Al.; 1994, Coloni; Dorigo; Maffioli; 1996). Karınca sistemi yaklaşımı, karınca kolonilerinin yiyecek kaynaklarına ulaşan en kısa yolu bulmalarına yönelik davranışlarının modellenmesi temeline dayanmaktadır. Yöntem, kritik yol grafiğini kullanmakta ve grafikteki düğümlere karıncaları rasgele yerleştirmektedir. Bu aşamadan sonra, çeşitli yöntemlerle hangi bitişik düğüme hareket edileceğine karar vermektedir (Jain; Meran; 1998, 13).

Modern Sezgisel Yöntemler: Modern sezgisel yöntemler ve çizelgeleme uygulamaları Bölüm 2.5’te detaylı olarak açıklanmaktadır.

2.2.2 Esnek Atölye Çizelgeleme Problemi

Esnek atölye çizelgeleme problemi, atölye çizelgeleme probleminin genel halidir (Brandimarte; 1993, 158). Günümüz üretim teknolojilerindeki hızlı değişimle birlikte çok amaçlı makinelerin üretim ortamına girmesi sonucunda, esnek atölyelerin kontrolü için bu sistemlerin özelliklerini yansıtan modellere ihtiyaç duyulmaktadır. Klasik atölye çizelgeleme probleminde her bir operasyonun işlem göreceği makine tektir. EAÇP’de ise operasyon (O_{ijk}), belirlenmiş bir aday makine kümesindeki ($M_k \subseteq M$) makinelerin her birinde gerçekleştirilebilmektedir. Yani operasyonların makine alternatifleri vardır. Operasyon O_{ijk} ’nun k makinesinde ($k \in M_k$) işleme süresi p_{ijk} ’dir. Amaç, tüm işlerin tamamlanma zamanını ($C_{enbüyük}$) enküçükleyecek şekilde her bir operasyon için bir makine ve bu makinede başlama zamanının belirlenmesidir. Dolayısıyla EAÇP, belirlenmiş performans kriterlerini optimize edecek şekilde;

- operasyonların makinelere *atanması*,
- makinelerdeki operasyonların sıralanarak *çizelgelenmesi*

olmak üzere iki ana aşamadan oluşmaktadır. EAÇP, farklı olarak operasyonların makinelerle atanmasını gerektirdiğinden klasik atölye çizelgeleme probleminden çok daha karmaşık bir problemidir. Bu konuda yapılan çalışmalar, klasik atölye çizelgeleme problemine göre daha azdır (Baykasoğlu; 2002).

Ben-Daya (1994), esnek üretim sistemleri için çizelgeleme problemlerini genel olarak ele almış, tanımlamış ve klasik atölye çizelgelemeden farklarını ortaya koymuştur. Esnek üretim sistemlerinde çizelgelemeye geliştirilen çözüm yaklaşımlarını sınıflandırarak, problem için ileriye yönelik çalışma alanlarına ilişkin önerilerde bulunmuştur.

Brandimarte (1993), EAÇP için bir tabu arama çalışması yapmıştır. Çalışmada en büyük tamamlanma zamanı ve toplam ağırlıklandırılmış gecikme objektif fonksiyonları olarak belirlenmiştir. Çözüm stratejisi olarak iki farklı hiyerarşik teknik kullanılmış ve bu tekniklerin yazılım geliştirme açısından zorluk dereceleri karşılaştırılmıştır. Çalışmada tabu aramanın hafıza yapısı oluşturulurken rotalama ve sıralama arasında çözüm aşamasında koordinasyon kurulmuştur. Brandimarte (1999), yaptığı farklı bir çalışmada, atölye çizelgeleme sistemine proses plan esnekliğini entegre etmiş, makine yükleme alt problemini iki kriterli tamsayılı programlama ile formüle ederek çözüm için farklı sezgisel yaklaşımlar önermiştir.

Brucker (1995), EAÇP'yi çok modlu atölye çizelgeleme problemi olarak tanımlamıştır. Çalışmada ele alınan çok modlu atölye çizelgeleme probleminde, her operasyon için birden fazla makine söz konusudur. Brucker (1995), problemin çözümü için tabu aramaya dayalı bir algoritma geliştirmiştir. Algoritma hiyerarşik olarak, önce operasyonların makinelerle atanmasını sağlamakta, ardından makinelerde operasyonları çizelgelemektedir.

El Maqrini ve Teghem (1995), EAÇP için genel bir metodoloji tasarımı gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada kimya endüstrisi için esnek atölye çizelgeleme yazılımı geliştirilmiştir. Ele alınan problemde, makinelerin hazırlık zamanları, işlerin işleme hazır olma zamanları ve teslim tarihleri yer almıştır. Ayrıca çalışmada kaynaklar, ara stoklar, operasyonlar arasındaki gecikmeler ve insan kaynakları kısıtları problem

kapsamı içerisinde değerlendirilmiştir. Problemin optimizasyonunda, benzetimli tavlama ve tabu arama algoritmaları kullanılmıştır.

Chambers (1996), EAÇP için tabu arama algoritması geliştirerek, farklı komşuluklar üzerinde çalışmalar yapmıştır. Çalışmada, yarı dinamik bir tabu arama algoritması geliştirilerek, etkili operasyonların karşılıklı değiştirilmesi üzerine kurulu bir komşuluk yapısı kullanılmıştır. Başlangıç çözümü sıralama kuralları ile oluşturulmuş, etkili bir yoğunlaşma ve yayılma stratejisi için hafıza yapıları kurulmuştur.

Chambers ve Barnes (1996a, 1996b), dinamik ve adaptif bir tabu arama stratejisi geliştirerek EAÇP'ye uygulamışlardır. Çalışmada ayrıca eşzamanlı hareket seçim stratejileri kullanmışlardır.

Chambers ve Barnes (1998), reaktif bir tabu arama stratejisi üzerinde çalışarak, kritik operasyonların ikili yer değiştirmesi komşuluğu üzerinde durmuşlardır. Reaktif mekanizma ile çözümlerin ağaç yapısı üzerinde tutulmasını sağlamışlar ve önerdikleri yeni yapı ile etkili bir yoğunlaşma ve yayılma stratejisi uygulamışlardır.

Mesghouni, Hammadi ve Borne (1998), esnek atölye çizelgeleme için genetik algoritmaya dayalı bir model geliştirmişlerdir. Çalışmalarında genetik operatörler üzerinde yoğunlaşmış, kromozomların paralel gösterimi ile buna uygun yeni genetik operatörleri önermişlerdir.

Chen, Ihlow ve Lehmann (1999), EAÇP için tamamlanma zamanı kriterine dayalı yeni bir genetik algoritma önermişlerdir. Çalışmada problem çözümünün kromozom gösterimi iki kısımdan oluşturulmuştur. İlk kısım rotalamayı, ikinci kısım ise operasyonların makinelerdeki sıralamasını belirlemektedir. Algoritmanın üreme süreci için genetik operatörler uygun biçimde tanımlanmış ve uygulanmıştır. Çalışmada algoritmanın etkinliği, sayısal örneklerle ortaya konulmuştur.

Mastrolilli ve Gambardella (2000), esnek atölye çizelgelemeye, modern sezgisel optimizasyon tekniklerinde kullanılabilecek iki farklı komşuluk fonksiyonu önermişlerdir. Her iki komşuluk fonksiyonunda da, tamamlanma zamanını etkileyen operasyonların hareketi ile bir komşu türetilmiştir. Mastrolilli ve Gambardella (2000),

mevcut bütün komşu çözümler kümesinden bir alt küme elde etmeye yönelik bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Uyguladıkları yöntemle komşu çözümler içerisinde en düşük tamamlanma zamanına sahip komşunun bu alt kümeye girmesini garantilemişlerdir. Çalışmada, çözüm sürecinde tabu arama algoritması kullanılmıştır.

Jansen, Masrolilli ve Solis-Oba (2000), esnek atölye çizelgeleme için yakınsama algoritmaları geliştirmişlerdir. Doğrusal zamanlı yaklaşımları ile esnek atölye çizelgelemede işlerin operasyon sayılarının sabit ve bölünemez olduğu problemler için uygulama yapmışlardır.

Tamaki, Ono, Murao vd. (2001), EAÇP'nin matematiksel modelini oluşturmuşlardır. Matematiksel modelin çözüm süresinin uzun olmasından dolayı melez bir yöntem geliştirmişlerdir. Modelle, uygun bir sürede optimale yakın sonuçlar elde ederek, bunları genetik algoritma ile iyileştirmiş ve çözüm kalitesini artırmışlardır.

Mati, Rezg ve Xie (2001), EAÇP için geometrik yaklaşıma dayalı, operasyonların atanması ve makinelerde sıralanması problemlerine eş zamanlı çözüm geliştiren bir açgözlü (greedy) sezgisel geliştirmişlerdir. Geometrik yaklaşımı, biri makine esnekliğine sahip iki iş için ortaya koymuşlardır. Geliştirilen yaklaşımı ikiden fazla iş için genelleştirmiş ve yöntemin etkinliğini literatür problemleri ile ortaya koymuşlardır.

Kacem, Hammadi ve Borne (2002a), EAÇP'nin çözümü için, Pareto optimizasyona dayalı evrimsel algoritmalar ile bulanık mantıktan oluşan melez bir yaklaşım ortaya koymuşlardır. Bu iki metodolojinin birleşimi ile etkin çok objektifli bir optimizasyon yöntemi geliştirmişlerdir. Çalışmalarında, tamamlanma zamanı, makinelerin iş yükü, en çok yüklenmiş makine olmak üzere üç farklı objektif kullanmışlardır.

Kacem, Hammadi ve Borne (2002b), toplam ve kısmi esnekliğe sahip atölye çizelgeleme problemleri için iki farklı yaklaşım önermişlerdir. Birinci yaklaşımda ideal bir atamayı gerçekleştiren bir yöntem önermişlerdir. İkinci yaklaşımları, birinci yaklaşımın önerdiği atama ile genetik operatörleri kullanarak çözüm kalitesini iyileştirmek üzerine kurulmuştur. Çözüm yöntemini, önceki çalışmalarında olduğu gibi çok objektifli esnek atölye çizelgeleme problemleri üzerinde uygulamışlardır.

Kim, Park ve Ko (2003), atölye çizelgeleme problemlerine rota ve proses plan esnekliğini de dahil ederek proses planlama ve çizelgelemeyi entegre etmişlerdir. Bu problemin çözümü için yeni bir simbiyotik evrimsel algoritma önermişlerdir. Algoritmanın performansını geliştirmek için proses planlama ve çizelgeleme arasında yerel etkileşimi sağlayarak, buna bağlı evrimsel operatörler geliştirmişlerdir.

Scrich, Armentano ve Laguna (2004), EAÇP'nin çözümünde tabu aramaya dayalı iki farklı sezgisel yöntem geliştirmişlerdir. Bunlardan birisi hiyerarşik yöntem, diğeri ise çok başlangıçlı tabu arama yöntemidir. Algoritmanın başlangıç çözümleri sıralama kuralları ile elde edilmiş ve kritik operasyonların değiştirilmesi komşuluk yaklaşımı ile geliştirilmiştir. Ayrıca etkili yayılım stratejileri uygulayarak, farklı test problemleri ile sonuçları değerlendirmişlerdir.

Baykasoğlu (2002), EAÇP ile proses plan seçimi problemini entegre ederek, problemi Dil Teorisine dayalı yeni bir yaklaşımla modellemiştir. Bu yaklaşımda makine işlem yeteneklerini ve parça işlem gereksinimlerini bir arada değerlendiren, makineden bağımsız yetenek birimlerini ifade eden kaynak elemanları kullanılmıştır. Modellenen problemin çözümünde benzetimli tavlama algoritması uygulanmıştır.

Baykasoğlu, Özbakır ve Sönmez (2002b, 2002c), Dil Teorisi kapsamında yer alan Bağlam Bağımsız Gramer'ler ile modellenen EAÇP için, çok objektifli tabu arama algoritmasına dayalı yeni bir çözüm yöntemi önermişlerdir. Çalışmalarda, önerilen modelleme ve çözüm yöntemine ilişkin elde edilen ilk sonuçlar ortaya konulmuştur.

Tez çalışmasında, Baykasoğlu (2002) tarafından önerilen esnek atölye çizelgeleme problemlerinin Dil Teorisine dayalı modelleme yaklaşımı temel modelleme yöntemi olarak ele alınmıştır. Bu yeni modelleme yaklaşımı ile ilgili detaylı açıklamalar Bölüm 3'te yer almaktadır.

Son yıllarda konu ile ilgili tüm çalışmaların yapay zeka ve modern sezgisel yöntemler üzerinde yoğunlaştığı dikkati çekmektedir. Problemin karmaşık yapısı göz önüne alınacak olursa bilim dünyasındaki bu eğilim kaçınılmazdır (Baykasoğlu; 2002, 4525).

2.3 KOMBİNATORİYAL OPTİMİZASYON

Optimizasyon alanındaki problemlerin bir bölümü kombinatoriyal problemler olarak nitelendirilir. Kombinatoriyal problemler kesikli elemanlardan oluşan kümenin permütasyonu, seçimi veya bunlardan birisine atanması olarak tanımlanmaktadır. Buradaki eleman tanımı çok geniş kapsamlı olup insan, mekan, işler, tesisler, objeler gibi kesikli miktarlarda kaynakları ifade etmektedir.

Optimizasyon problemlerinin formülasyonu genel olarak (2.2)'deki gibidir.

$$\text{Enküçüle } f(x) \quad (2.2)$$

$$\begin{aligned} \text{Kısıtlar: } \quad g_j(x) &\leq b_j & j=1,2,\dots,J \\ h_k(x) &= c_k & k=1,2,\dots,K \end{aligned}$$

x : Karar değişkeni

$f(x)$: Objektif fonksiyonu

$g(x)$: Eşitsizlik kısıtları

$h(x)$: Eşitlik kısıtları

Kombinatoriyal problemlerde, x karar değişkenleri kesikli olup, çözüm kesikli objelerden, tamsayılardan oluşan bir sıra ya da bir kümedir. Bu problemlerin optimal çözümlerinin bulunması kombinatoriyal optimizasyon olarak adlandırılmaktadır (Reeves; 1995, 1-2).

Kombinatoriyal problemlerin büyük bir bölümü hesaplanması zor problemler içerisinde yer aldığından, NP-problemleri olarak da ifade edilebilmektedir. NP-problemler polynomial zamanlı algoritmalar tarafından çözülemeyen problemlerdir. Eğer bir problem için polynomial zamanlı bir algoritma mevcutsa bu problem P-problem olarak gösterilir (Hansen; 1998, 3). Bir kombinatoriyal karar probleminde eğer çözümün bulunabilmesi için gerekli hesaplama zamanı problemin büyüklüğü ile herhangi bir polynomial fonksiyondan daha hızlı artıyorsa NP-zor'dur. En iyi çözümün bulunması NP-problemler için çözüm süresinin problem büyüklüğü ile üssel artması demektir (Hansen; 1998, 3).

NP-zor kombinatorial problemlerin çözümü için üç genel yaklaşım söz konusudur (Aardal; Hoesel; Lenstra et. Al.; 1997, 1):

- Optimal çözümü garanti eden kesin çözüm yöntemleri
- Polinomsal zamanda çözüm elde eden yakınsama algoritmaları
- Sezgisel arama teknikleri

Bir algoritma, eğer optimal çözümü buluyorsa kesin çözüm algoritmasıdır. Eğer optimal çözüm, kabul edilebilir bir çözüm süresinde elde edilemiyorsa, bir yaklaşım algoritması kullanılabilir. Bir yaklaşım algoritması gerçekçi bir hesaplama zamanı içerisinde optimal olmayabilen iyi bir sonuç bulmayı hedefler (Hansen; 1998, 4). Sezgisellerin ise çözüm kalitesi ve süresi için önceden belirli bir garantisi söz konusu değildir (Aardal; Hoesel; Lenstra et. Al.; 1997, 1).

2.4 ÇOK OBJEKTİFLİ OPTİMİZASYON

Birden fazla objektif fonksiyonun sistematik ve eşzamanlı olarak optimizasyonu, çok objektifli optimizasyon veya vektör optimizasyon olarak adlandırılır (Marler; Arora; 2003, 3). Çok objektifli optimizasyon, çok objektifli karar problemlerinin çözümü için bir yapı hazırlar. Bir karar probleminin matematiksel modelini kurarken objektif fonksiyonun oluşturulması güç olabilir. Bazı durumlarda, hatta karar problemlerinin bir çoğunda çözümün kalitesini değerlendirmek için birden fazla kriter söz konusudur. Bu kriterleri tek bir objektif fonksiyonda bir araya getirmek kolay olmayabilir. Ancak birden fazla kriterin söz konusu olduğu ve hatta bu kriterlerin birbirleri ile çeliştiği durumlarda farklı çözüm alternatifleri söz konusudur (Coello Coello; Van Veldhuizen; Lamont; 2002, 46).

Ulungu ve Teghem (1994), çok objektifli kombinatorial optimizasyon problemleri ile ilgili klasik problemleri ve bunlara geliştirilen çok objektifli yaklaşımları ele alan detaylı bir literatür taraması gerçekleştirmişlerdir.

Objektiflerin birleştirilmesi: Çok objektifli optimizasyonda kullanılan klasik yöntemlerden birisidir. Farklı kriterlerin bir değerde birleştirilerek çok objektifli problemin tek objektifli problem haline dönüşümünü temel almaktadır. Bunun için en

sık kullanılan yollardan birisi, her bir objektifin ağırlıklandırılması ve ardından hepsinin toplanarak tek bir fonksiyon değeri haline getirilmesidir.

Objektiflerin değiştirilmesi: Bu yöntem de çok objektifli optimizasyonda uzun süredir uygulanan yöntemlerden birisidir. Her seferinde, kalan objektiflerin kısıt haline getirilmesi ile, tek bir objektifin optimizasyonunu ifade etmektedir. Buradaki zorluk, aramanın başarısını etkileyeceğinden dolayı objektifler arasındaki sıranın belirlenmesinde yatmaktadır.

Paretoya dayalı değerlendirme: Bu yaklaşımda uygun çözümü ifade eden tüm objektifleri içeren bir vektör ve çözümler arasındaki seçimi gerçekleştirmeye yarayan baskınlık kavramı yer almaktadır. Çalışmanın bu bölümünde çok objektifli optimizasyon tanımlandıktan sonra baskınlık kavramı açıklanmıştır.

Çok objektifli optimizasyon, N adet objektif için (2.3)'teki gibi ifade edilir;

$$\text{Enküçükle} \quad F(x) = \begin{Bmatrix} f1(x) \\ f2(x) \\ \dots \\ fN(x) \end{Bmatrix} \quad (2.3)$$

$$\begin{aligned} \text{Kısıtlar:} \quad & gj(x) \leq 0 \quad j=1,2,\dots,J \\ & hk(x)=0 \quad k=1,2,\dots,K \end{aligned}$$

$F(x)$, objektif fonksiyon vektörü, x karar değişkenleri, $gj(x)$ eşitsizlik ve $hk(x)$ eşitlik kısıtlarını ifade etmektedir. Tek objektifli optimizasyon problemlerinden tek farkı bir objektif fonksiyon yerine objektif fonksiyonlar vektörünün olmasıdır. Bundan dolayı çok objektifli optimizasyon, vektör optimizasyonu olarak da adlandırılabilir. Ayrıca objektif fonksiyonun ve kısıtların tiplerine göre, çok objektifli doğrusal program, çok objektifli doğrusal olmayan program, çok objektifli tamsayılı program gibi sınıflandırmalar söz konusudur.

Çok objektifli optimizasyon probleminin çözümü, çözüm alanı içerisinde yer alan bir vektördür. Dolayısıyla çok objektifli optimizasyon problemi bir vektör enküçükleme problemi olarak da yazılabilir (2.4);

$$\text{Enküçükle } \{z_1(x), z_2(x), \dots, z_N(x)\} \quad (2.4)$$

$$\text{Kısıtlar} \quad f_i(x) = z_i(x) \quad i=1, \dots, N$$

$$g_j(x) \leq 0 \quad j=1, \dots, J$$

$$h_k(x) = 0 \quad k=1, \dots, K$$

Buna bağlı olarak en iyi sonuç vektörünün belirlenmesi, vektörlerin sıralanarak seçilmesini kapsayan bir küme teorisi problemidir. Optimal çok objektifli çözümler, Pareto optimalite ile belirlenen bu kümeler olarak tanımlanır.

Çok objektifli optimizasyonda, tek objektifli optimizasyonda olduğu gibi tek ve global bir çözüm söz konusu olmadığından, objektif fonksiyonlara uygun bir çözümler kümesi belirlemek gerekmektedir. Buna bağlı olarak optimal bir noktanın belirlenmesi için, Pareto optimalite ve baskınlık kavramlarının ortaya konulması gerekmektedir.

Baskınlık : Baskınlık Steuer(1989, 58) tarafından aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

Baskılanmamış ve baskın çözümler: Objektif fonksiyonların bir vektörü, $F(x^*) \in Z$, eğer, $F(x) \leq F(x^*)$ iken en az bir objektif için $F_i(x) < F_i(x^*)$ şartını sağlayan bir diğer $F(x) \in Z$ vektörü yok ise baskılanmamıştır, aksi taktirde baskılanmıştır.

Eğer Z çözüm alanı içerisindeki diğer noktalar bir çözüm noktasına baskın değilse bu çözüm noktası baskılanmamış çözüm noktası olarak adlandırılır. Diğer çözümler tarafından baskılanmamış olan çözümler *Pareto optimal* çözümlerdir. Dolayısıyla, bir x^* çözümü için, eğer objektif fonksiyonların herhangi birisi bir diğer objektif fonksiyonu bozmadan iyileştirilemiyorsa x^* Pareto optimaldir.

Örneğin V ve U iki farklı j enküçükleme objektifi için iki farklı çözüm vektörü olsun;

1. Eğer $v_i < u_i$, $i=1, 2, \dots, j$ ise V U 'ya kuvvetle baskındır.
2. Eğer $v_i \leq u_i$, $i=1, 2, \dots, j$, ve en az bir i için $v_i < u_i$ ise, V U 'ya baskındır.
3. Eğer V U 'ya baskın değil, U da V 'ye baskın değilse V ve U karşılaştırılmaz.

Yukarıda vurgulanan kuvvetle baskın ve baskın ifadeleri arasındaki fark, çözüm prosedürü için önem taşımaktadır. Bir çözüm diğer bir çözümden bütün kriterler

açısından daha kötü ise bu çözüm kuvvetle baskılanmıştır. Eğer bir çözüm bazı kriterler açısından diğer çözümden kötü, ancak en az bir kriter için diğer çözüm kadar iyiye bu çözüm sadece baskılanmıştır. Dolayısıyla herhangi bir çözüme kuvvetle baskın çözümleri bulmak baskın çözümleri bulmaktan daha zordur. Bazı kombinatoryal problemlerde çözüm uzayında bir takım çözümlere ulaşmak zor olabilir. Bu durumda, kuvvetle baskınlık yerine baskınlık kriteri ile bu çözümlere ulaşmak daha kolay olacaktır.

Çok objektifli optimizasyon problemlerinde arama ve karar proseslerinin hangi noktada birleştirileceğini belirlemek gerekmektedir. Bu, üç farklı biçimde gerçekleştirilebilmektedir (Steuer; 1989, 96-102):

Karar ve arama: Bu durumda öncelikle her bir objektif için karar mekanizması tarafından tercihler belirlenir ve daha sonra bu tercihleri sağlayan çözümler bulunur.

Arama ve karar: Bu yaklaşımda ise birden fazla çözüm bulunur ve daha sonra karar mekanizması bunlardan uygun olanını tercih eder.

Arama ve karar eşzamanlı: Bu yaklaşımda ise etkileşimli bir arama ve tercih durumu söz konusudur. Yani karar mekanizması arama prosesini tercihlerine göre yönlendirir. Her iki proses eşzamanlı yürütülür.

Pareto optimal cephe, çok objektifli çözüm uzayında bulunan (arama ve karar yaklaşımı ile), diğer çözümler tarafından baskılanmamış tüm çözümleri kapsar. Eğer bulunan baskılanmamış çözümler kümesi Pareto optimal cephe ile örtüşmez ise bu küme *bilinen Pareto optimal çözümler* olarak değerlendirilir. Pareto optimizasyon, Pareto optimal cephenin veya Pareto optimal cepheye en yakın çözümlerin bulunmasını amaçlar. Çok objektifli optimizasyonda, Pareto optimizasyona başvurulmasının sebebi, problemlerin, sadece tek bir en iyi sonuca veya global bir optimuma sahip olmaması ve objektiflerle ilgili tercihlere arama prosesinden önce karar verilememesidir. Pareto optimizasyonda objektiflere ilişkin tercihler değişse bile, karar mekanizmasının elinde birden fazla alternatif olması seçimi kolaylaştırmaktadır. Çok objektifli optimizasyonda göz önüne alınması gereken bir diğer durum ise bir problemde birbirleri ile çelişen objektiflerin yer almasıdır. Ancak çelişen objektiflere rağmen, Pareto'ya dayalı modern sezgisel

yöntemler, bütün kriterler için ideal çözümler bulabilmektedirler (Fonseca; Flemming; 1993, 419-421).

Çok objektifli kombinatoriyal optimizasyon problemlerinde problem büyüklüğü arttıkça arama uzayı üssel olarak genişlemektedir. Buna bağlı olarak çözüm süresi artmakta ve pratik olarak uygulanabilirliği azalmaktadır. Bunun için daha kısa sürede optimum veya optimuma yakın çözümler elde edebilmek için probleme özel sezgiseller, yakınsama yöntemleri ve modern sezgisel yöntemler sıkça kullanılmaktadır. Uygulamaya yönelik problemler hem büyük çaplı hem de kısıtları fazla problemlerdir. Çizelgeleme de zor kombinatoriyal optimizasyon problemleri arasında yer alan çok objektifli ve kısıtlı bir problemidir. Buna bağlı olarak çok objektifli optimizasyonda, çizelgeleme problemlerinin çözümü için modern sezgisel yaklaşımlar tercih edilmektedir (Baykasoğlu; 2002, 4525).

2.4.1 Çözüm Teknikleri

Bu bölümde, çok objektifli optimizasyon problemlerinin çözümünde kullanılan yöntemlerden bazıları kısaca açıklanmıştır. Çok objektifli optimizasyonun temel hedefi karar mekanizmasının tercihlerinin doğru modellenmesi olduğundan, yöntemler bu tercihlerin nasıl ve hangi aşamada belirlendiğine bağlı olarak kategorize edilmektedir. Sınıflandırmada ilk grup, karar mekanizmasının objektif fonksiyonların birbirlerine göre önem derecelerini optimizasyon algoritmasının çalışmasından önce belirlediği durumları kapsamaktadır. İkinci grupta ise algoritmanın çalışmasından sonra elde edilen çözümler kümesinden tek bir çözümün seçilmesi ile ilgili yöntemler yer almaktadır. Üçüncü grup yöntemlerde, karar mekanizması optimizasyon algoritmasının çalışması esnasında sürekli bilgi sağlamaktadır. Uygulamada problemler genellikle etkileşimli bir biçimde çözülürler (Marler; Arora; 2003, 14-44).

Global Kriter Yöntemi : Çok objektifli optimizasyonda objektif fonksiyonların birleştirilerek tek bir objektif fonksiyon haline getirilmesi amacıyla sık kullanılan yöntemlerden birisi global kriter yöntemidir. Yöntemin temel dayanağı, üssel toplamalarla tek bir global fonksiyonun enküçüklenmesidir.

Örneğin uygun bir ideal çözümden sapmaların üssel toplamalarının enküçüklenmesi tek objektif halinde (2.5)'deki gibi ifade edilebilir;

$$\text{Enküçükle } F(x) = \left\{ \sum_{i=1}^k [(Fi(x) - Fi(xi^*))]^p \right\}^{1/p} \quad (2.5)$$

p değeri karar mekanizması tarafından belirlenen bir fayda fonksiyonu olup genellikle 1 veya 2 değerlerini almaktadır. xi^* , her bir i objektifi için $Fi(x)$ fonksiyonunun enküçüklenmesi ile elde edilen minimum değer veya karar verici tarafından belirlenen ütopya noktasıdır. $1 \leq p < \infty$ arasındaki p 'nin farklı değerleri için elde edilen sonuçlar Pareto optimaldir. Yöntem, $p = \infty$ için Pareto optimal çözümleri garantilemeyen (Yu; 1973, 936-940, Stadler; 1987, 3-10) enküçük-enbüyük yöntemi haline dönüşmektedir. Enküçük-enbüyük yönteminde bu ütopya çözümünden en büyük sapmanın enküçüklenmesi gerçekleştirilir. Her iki yöntemde de sapmalar ağırlıklandırılabilirler.

Ağırlıklandırılmış Toplam Yöntemi : Çok objektifli optimizasyonda en yaygın kullanıma sahip yöntemlerden birisi objektif fonksiyonların ağırlıklandırılarak toplanması yöntemidir. Bunun için karar mekanizmasının, öncelikle objektiflerin göreceli ağırlıklarını belirlemesi gerekmektedir.

$$\text{Enküçükle } F(x) = \sum_{i=1}^k wiFi(x) \quad (2.6)$$

Eğer bütün ağırlıklar pozitif ise (2.6)'nın minimumu Pareto optimaldir (Zadeh; 1963, 59-60). Ağırlık katsayıları, $0 \leq wi \leq 1$ ve $\sum_{j=1}^Q wi = 1$ şartlarını sağlayacak şekilde belirlenir.

Bu yöntemle ağırlıklar değiştirilerek etkili çözümlere ulaşılabilir. Yöntem çok objektifli kombinatoriyal optimizasyon problemlerinin pek çoğuna uygulanmıştır.

Ağırlıkların belirlenmesi için sistematik bir yaklaşım geliştirilmesi amacı ile pek çok araştırmacı çeşitli yöntemler önermişlerdir (Hobbs; 1980, Hwang; Yoon; 1981). Bunlardan birisi sıralama yöntemidir (Hwang; Yoon; 1981). Bu yöntemde farklı objektif fonksiyonlar önemlerine göre sıralanırlar. En düşük öneme sahip objektife 1 ağırlığı verilir ve diğer objektiflere ağırlıklar önem sıralarına göre sistematik olarak

artırılarak atanır. Benzer bir yaklaşım sınıflandırma yöntemi için de kullanılır. Bu yöntemde öncelikle objektifler, yüksek öncelikli ve orta öncelikli olmak üzere gruplandırılır. Daha sonra gruplar içerisinde sıralama yapılır ve benzer şekilde objektiflerin öncelikleri belirlenir.

Leksikografik Yöntem: Leksikografik yöntemde objektif fonksiyonlar önem sırasına göre düzenlenirler. Daha sonra her seferinde tek objektif fonksiyonla (2.7)'deki optimizasyon problemi çözülür;

$$\begin{aligned} \text{Min} : & F_i(x) \\ F_j(x) & \leq G_j(x_j^*); j = 1, 2, \dots, i-1; i > 1 \end{aligned} \quad (2.7)$$

i , enküçüklenecek objektif fonksiyonun sırasını ifade eder. $F_j(x_j^*)$ ise j . objektif fonksiyonun, j . iterasyonda bulunmuş minimumunu göstermektedir. İlk iterasyondan sonra sisteme yeni kısıtlar ekleneceğinden elde edilen minimumlar aynı kalmayabilir.

Yapılan çalışmalarda, benzer bir yöntem olan hiyerarşik yöntem ile leksikografik yöntem birbirinden (2.8)'deki kısıtla ayrılmıştır (Osyczka; 1985, 42-46):

$$F_j(x) \leq \left(1 + \frac{\delta_j}{100}\right) F_j(x_j^*); j = 1, 2, \dots, i; i > 1 \quad (2.8)$$

(2.7) ve (2.8) karşılaştırıldığında, (2.8)'de (2.7)'ye göre $F_j(x_j^*)$ 'ye δ_j oranında bir esneklik verildiği görülmektedir. δ_j , 0 ile 100 aralığında değişen bir değer olup, δ_j 'nin değiştirilmesi ile kısıtın gevşemesi veya daha sıkılaşması sağlanabilir. Bu da farklı Pareto optimal noktaların bulunmasına yol açar.

Amaç Programlama: Çok objektifli optimizasyon ile ilgili bir diğer çözüm yöntemi ise amaç programlamadır. Marler ve Arora (2003)'da açıklandığı üzere, amaç programlama yöntemi Charnes, Cooper ve Ferguson (1955) ile Charnes ve Cooper (1977) tarafından geliştirilmiştir. Bu yöntemde tüm objektifler için karar verici tarafından bir hedef değer (b_j) belirlenmektedir. Bu belirlenen değerlerden sapmaların toplamı enküçüklenmektedir. Objektiflere, birbirleri arasındaki önem derecelerine göre öncelikler veya ağırlıklar atanır. Amaç kriteri, büyük eşit, küçük eşit, eşit veya aralık olarak tanımlanır.

Sapmalar;

$$dj = dj^+ - dj^- \quad dj^+ \geq 0, dj^- \geq 0 \quad (2.9)$$

olmak üzere pozitif ve negatif kısımlardan oluşmaktadır. Buna bağlı olarak optimizasyon problemi (2.10)'daki gibi ifade edilebilir;

$$\begin{aligned} \text{Enküçük} &: \sum_{i=1}^k (di^+ + di^-) \\ Fj(x) + dj^+ - dj^- &= bj; j = 1, 2, \dots, k \\ dj^+, dj^- &= 0; j = 1, 2, \dots, k \end{aligned} \quad (2.10)$$

Yöntem, oldukça yaygın bir kullanım alanına sahip olmasına rağmen Pareto optimal çözümlerin bulunmasını garantilememektedir. Ağırlıklandırılmış amaç programlama, amaç programlamanın bir alt sınıfı olup, her bir objektiften sapmaların ağırlıklandırılmasını ifade etmektedir. Leksikografik amaç programlamada ise leksikografik yöntemin benzeri şekilde objektiflerden sapmalar önceliklerine göre sıralanırlar ve leksikografik olarak enküçüklenirler. Ağırlıklandırılmış veya leksikografik amaç programlama, eğer amaçlar Pareto optimal nokta oluşturuyorsa veya tüm sapma değişkenleri optimum pozitif değerlere sahipse Pareto optimal çözümleri sağlamaktadır (Miettinen; 1999, 256-264).

Hwang ve Masud (1979), ilk olarak Gembicki tarafından önerilen amaç erişim (goal attainment) yöntemini ortaya koymuşlardır. Bu yöntem ağırlıklandırılmış enküçük-enbüyük yaklaşımına dayanmakta ve (2.11)'deki gibi ifade edilmektedir;

$$\begin{aligned} \text{Enküçük} &: \lambda \\ Fi(x) - wi\lambda &\leq bi; i = 1, 2, \dots, k \end{aligned} \quad (2.11)$$

Ağırlıklar (wi) her bir objektifin göreceli önemini ifade etmektedir. İstenen amaçlara (bi) erişimin sağlanamaması durumunda önemli objektif fonksiyonlar daha düşük ağırlıklara sahip olacaklardır. Amaçlara ulaşılması durumunda ise, önem derecesi düşük objektif fonksiyonlar daha küçük ağırlık katsayılarına sahip olacaklardır. Amaç vektörü $\bar{b}$ ve ağırlık vektörü $\bar{w}$ karar mekanizması tarafından önceden belirlenmektedir. Bu yaklaşım ile ağırlıkların parametrik olarak değiştirilmesi ile tüm Pareto optimal

çözümler kümesine ulaşılabilir. Ancak amaç vektörü doğru belirlenmemiş ise, amaç erişim yöntemi Pareto optimal çözümü garantilememektedir.

Sınırlandırılmış Objektif Fonksiyon Yöntemi : Sınırlandırılmış objektif fonksiyon yöntemi en önemli tek bir objektifi ($F_s(x)$) enküçükler. Diğer tüm objektif fonksiyonlar kısıtlar haline dönüştürülür (2.12).

$$l_i \leq F_i(x) \leq \varepsilon_i; i = 1, 2, \dots, k; i \neq s \quad (2.12)$$

l_i ve ε_i , objektif fonksiyonların alt ve üst sınırlarını ifade etmektedir. Bu sınırların sistematik olarak değiştirilmesi ile yöntem tüm Pareto optimal kümeyi elde edebilmektedir. Buradaki zorluk alt ve üst sınırların çözüm sürecinden önce belirlenmesidir. Bu yaklaşımda göz önüne alınması gereken noktalardan birisi de hangi objektif fonksiyonun enküçükleneyeceğinin belirlenmesidir.

Farklı bir yaklaşım olarak ε -kısıt yaklaşımı alt sınırlar olmadan ortaya konulmuştur. Bu durumda ε 'nın sistematik olarak değiştirilmesi bir Pareto optimal çözümler kümesi ile sonuçlanmaktadır. Bununla birlikte ε 'nın yanlış belirlenmesi uygun olmayan çözümlerin ortaya çıkmasına sebep olmaktadır. ε 'nın tercihleri doğru yansıtacak şekilde belirlenmesine yönelik bir çok çalışma yapılmıştır (Carmichael; 1980).

2.5 MODERN SEZGİSEL OPTİMİZASYON TEKNİKLERİ

Sezgisel stratejiler, optimizasyon problemleri için algoritmalar geliştirmek için kullanılabilir. Sezgisel prensipler üzerine kurulu bir yaklaşım algoritması, optimizasyon literatüründe kısaca sezgisel olarak adlandırılır. Sezgisel yaklaşımlar genellikle optimizasyonda, probleme özel çözüm yöntemleri geliştirmek için kullanılırlar. Ancak son yıllarda çalışmalar modern sezgisel yöntemler üzerinde odaklanmıştır. Modern sezgisel yöntemler, sezgiseller gibi probleme özel olmayıp çok geniş bir uygulama alanına sahiptir. Modern sezgisel yöntemler pek çok optimizasyon problemine uyarlanabilir yapıda çözüm yaklaşımlardır. Bundan dolayı optimizasyon alanında önde gelen alanlardan birisi modern sezgisel yöntemler olmuştur.

Bu bölümde modern sezgisel optimizasyon tekniklerinden yaygın kullanıma sahip olan üçü - benzetimli tavlama, genetik algoritma, tabu arama - ele alınarak açıklanmıştır. Bu

tekniklerin tek objektifli algoritmalarına yer verildikten sonra literatürde yer alan çok objektifli uygulamaları ile çizelgeleme problemine çözüm yaklaşımları irdelenmiştir..

2.5.1 Benzetimli Tavlama

Benzetimli tavlama (BT), kaynağını malzeme ve fizik biliminden alan bir arama sürecidir (Pinedo; Chao; 1999, 41-45). Metropolis, 1953 yılında dayanıklı malzemelerin ısı dengesine ulaşmalarını benzetimleyerek bir arama algoritması önermiştir. Bundan 30 yıl sonra Kirkpatrick, Gellad ve Vecchi (1983), Metropolis tarafından ortaya konulan optimizasyon sürecini kullanarak, sert malzemenin yavaş yavaş soğutulması ile kombinatoriyal optimizasyon problemlerinin maliyet (objektif) fonksiyonlarının enküçüklenmesi arasında bir ilişki kurmuşlardır. BT yerel arama algoritmaları olarak adlandırılan (Şekil 2.1), bir çözümden başlayarak daha iyi birden çok çözümün türetildiği geliştirme algoritmaları içerisinde, eşik algoritmaları sınıfında yer almaktadır (Aarts; Lenstra; 1997, 91-121).

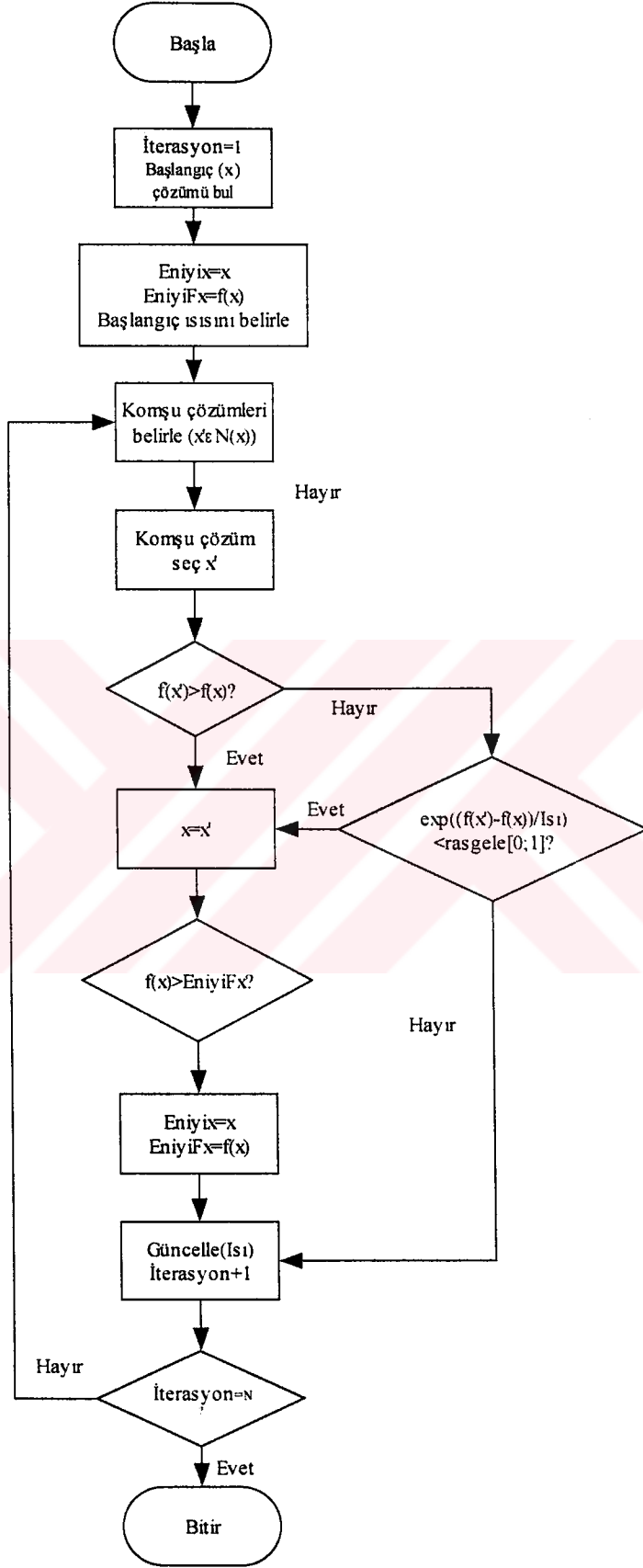
Komşu çözüm : Eğer bir çözüm, bir diğer çözümde tanımlanmış değişikliklerin sonucu elde ediliyorsa, iki çözüm komşu çözümdür (Pinedo; Chao; 1999, 46-47).

Başlangıç çözümü, belirlenmiş bir mekanizma ile veya rasgele türetilir. $f(x)$ objektif fonksiyonu, problemin gereklerine göre hesaplanır. Eğer komşu çözümün objektif fonksiyonu, kök çözümün objektif fonksiyon değerinden düşükse, komşu çözüm kök çözüm haline gelir. Aksi taktirde kök çözüm değişmez. Algoritma komşu çözümlerden hiçbir iyileştirme sağlanamadığı duruma kadar tekrar edilir ve bir yerel minimumda tamamlanır. Bu algoritmanın programlanması ve çalıştırılması oldukça basit olmakla birlikte, algoritmanın önemli bir dezavantajı söz konusudur. Algoritma global optimumdan oldukça uzak bir yerel minimumda tamamlanabilir. Bunun sebebi ise sadece objektifi düşük çözümlerin kabul edilip, diğer çözümlerin elenmesidir. Bununla birlikte BT algoritması yerel optimuma yakalanmamak için farklı bir yol izlemekte ve objektif değeri yüksek komşulara geçişe de izin vermektedir.

Şekil 2.2’de temel benzetimli tavlama algoritmasının işleyişine ilişkin akış diyagramı yer almaktadır.



Şekil 2.1 Genel Yerel Arama Algoritması



Şekil 2.2 Temel Benzetimli Tavlama Algoritması

BT algoritmasında ilk çözümden başlayarak komşu çözümler türetilmektedir. Seçilen komşu çözüm, eğer kök çözümden daha iyi bir çözümse, kök çözüm haline gelmektedir. Eğer daha kötü bir çözüm ise, ısı parametresine bağlı olarak belirli bir olasılıkla kök çözüm olarak kabul edilmektedir. Isı parametresi başlangıçta bütün komşu çözümlerin kabul edilmesini sağlayacak kadar yüksek tutulur. İleriki aşamalarda stokastik olarak yavaş yavaş düşürülerek, kötü komşu çözümlerin kabul edilme olasılığını azaltır. Algoritma temel olarak problem gösterimi, komşuluk fonksiyonu, geçiş mekanizması ve soğutma şartları olmak üzere dört ana parçadan oluşur. Soğutma şartları için kabul edilen genel kurallar söz konusudur. Diğerleri için ise problemin durumuna göre problem çözücü karar vermek durumundadır (Aarts; Lenstra; 1997, 121-136).

Problem Gösterimi : Problem gösterimi, problemin yapısına ve özelliklerine uygun olarak belirlenir. Örneğin tek makine çizelgeleme, n iş için basit permutasyon olarak belirtilebilir. Buna bağlı olarak tek makine çizelgeleme problemi, birbirini izleyen m adet diziden oluşturulabilir. Bu m adet dizinin her biri, bir makinede n operasyonun farklı permutasyonlarını ifade edebilir (Pinedo; Chao; 1999, 46).

Komşuluk Fonksiyonu : Komşuluk fonksiyonunun seçimi algoritmanın performansını büyük oranda etkilemektedir. Komşuluk fonksiyonunu belirlerken çözüm süresinin de göz önüne alınması gerekmektedir. Komşuluk genişliğini çok yüksek tutmak, iyi çözüm bulunmasını sağlarken aynı zamanda çözüm süresini de artırmaktadır.

Geçiş (hareket) Mekanizması : Komşuluk için arama, probleme bağlı olarak bir çok farklı yolla yapılabilmektedir. Bunlardan en basiti rasgele seçim yapmaktır. Diğer bir yöntemde ise ilk iyi çözüm seçilir ve bu çözümün üzerinde objektif fonksiyonunu en fazla etkileyen değişiklikler yapılır.

Algoritmanın performansı, soğutma şartları ve komşuluk yapısına bağlıdır. Başlangıç çözümünün uygun bir çözüm olması ve objektif fonksiyonun çözümün performansını etkin bir şekilde ifade etmesi de önem taşımaktadır. Ayrıca komşuluk yapısı, tüm çözüm uzayını bağlayacak bir şekilde oluşturulmalı, her çözümden belirli komşuluk hareketleri ile diğer çözümlere ulaşılabilir.

2.5.1.1 Çok Objektifli Benzetimli Tavlama

Bu bölümde konuya ilişkin yapılmış literatür çalışmalarının bir kaçına kısaca değinilmiştir.

Çok Objektifli Optimizasyon İçin Benzetimli Tavlama (Serafini; 1992,1994): Bu çalışma literatürde yer alan ilk çok objektifli benzetimli tavlama yaklaşımlarından birisidir. Çalışmanın temel önerisi, orijinal algoritmadaki aday çözümlerden kabul kriterinin değiştirilmesidir. Diğer çözümler tarafından bastırılmamış çözümlerin kabul olasılığını artırmak için çeşitli kriterler üzerinde durulmuştur. Aramanın, bastırılmamış çözümler üzerinde yoğunlaşmasını sağlayacak kurallar önerilmiştir.

Pareto Benzetimli Tavlama (Czyzak; Jaskiewicz; 1998): Bu çalışma çok objektifli kombinatoriyal optimizasyon problemleri için BT'nin populasyon temelli bir uzantısıdır. Çözüm populasyonu, komşuluklarını klasik BT'de olduğu gibi türetmektedir. Ancak her objektif için ağırlıklar her iterasyonda tekrar belirlenmektedir. Her çözüm için ağırlıklar, çözümün yakın komşuluğundan farklı alanlara hareket olasılığını artıracak şekilde yeniden ayarlanmaktadır. Çalışmanın temeli komşuluk aramaya, aday çözümlerin olasılıklı kabulüne ve bu kabulün ısı parametresine bağımlılığına dayalıdır.

Çok Objektifli Benzetimli Tavlama (Ulungu, Teghem; Fortmaps; et. Al.; 1999): Bu yaklaşım, çözümleri değerlendirmek üzere ağırlıklandırılmış toplam fonksiyonunu kullanan bir BT algoritmasıdır. Algoritma sadece bir kök çözümle çalışıp, arama sırasında bulunan bastırılmamış çözümleri saklamaktadır.

Çok Objektifli Optimizasyon İçin Benzetimli Tavlama (Suppapitnarm; Seffen; Parks; et. Al.; 2000) : Bu yaklaşım problemde yer alan her bir objektife bir ısı değerinin atandığı bir çözüm tekniğidir. Algoritma bir çözüm kullanmakta ve tavlama prosesi arama sırasında her ısıyı bağımsız olarak çözümün bütün kriterlerdeki performansına göre ayarlamaktadır. Arama sırasında bulunan bastırılmamış çözümler saklanmaktadır.

2.5.1.2 Benzetimli Tavlama İle Atölye Çizelgeleme Uygulamaları

Literatürde BT algoritması ile atölye çizelgeleme problemlerine pek çok farklı çözüm yaklaşımı yer almaktadır. Bunlardan bir kaçına bu bölümde kısaca yer verilmiştir.

BT algoritması ile atölye çizelgeleme çözüm yöntemleri, komşuluk fonksiyonları üzerinde yoğunlaşmıştır. Van Laarhoven, Aarts ve Lenstra (1992), atölye çizelgeleme problemleri için komşuluk fonksiyonları ile ilgili önemli bir dönüm noktası kabul edilebilecek bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bu yaklaşımda, aynı makinede işlem gören operasyonlardan sadece ard arda gerçekleşen kritik operasyonların proses sıralarının yer değiştirilmesi ile elde edilen hareketler komşuluk için kabul edilmiştir. Böyle bir komşuluk yaklaşımının şu özellikleri vardır;

- Eğer x çözüm alanı içerisinde uygun bir çözüm ise, aynı makinede gerçekleşen ard arda iki kritik operasyonun yer değiştirmesi, hiçbir zaman uygun olmayan çözüm ortaya çıkarmaz.
- Eğer ard arda gelen iki kritik olmayan operasyonun yer değiştirilmesi x' uygun çözümünü türetiyorsa, x' deki kritik yol hiçbir zaman x deki kritik yoldan daha kısa olamaz.
- Herhangi bir x uygun çözümünden başlayarak, optimal çözüm x^* 'ye ulaşacak bir hareketler sırası mevcuttur.

Van Laarhoven, Aarts ve Lenstra (1992), bu komşuluk yapısını kullanarak genel bir BT algoritması geliştirmişlerdir. Algoritmanın basit, yazılımı kolay olmakla birlikte güçlü olmasının komşuluk yapısına dayandığı sonucuna varılmıştır.

Bir diğer önemli komşuluk yapısı Matsuo, Suh ve Sullivan (1988) tarafından tanımlanmıştır. Bu çalışmada, eğer operasyonların makine ardılları da kritik yol üzerinde ise, ard arda gelen iki kritik operasyonun yerlerinin değiştirilmesinin çözümü hemen geliştirmeyeceği kanıtlanmış ve buna bağlı yeni bir komşuluk yapısı önerilmiştir. Bu komşuluk yapısı, iyi bir başlangıç çözümü ile çalışan BT algoritması ile entegre edilmiştir.

Yamada, Rosen ve Nakano (1994) Kritik Blok Benzetimli Tavlama (CBSA) olarak adlandırılan bir yöntem geliştirmişlerdir. Bu yaklaşım, BT çatısına kritik bloklardan oluşturulmuş komşuluk yapısını yerleştirmiştir. Çalışmada, başlangıç ve bitiş ısıları, kabul oranlarına göre tanımlanmış ve aramayı geliştirmek için yeniden tavlama prosesi uygulanmıştır.

Yamada ve Nakano (1995, 1996), CBSA'yi Giffler ve Thompson'ın aktif çizelge oluşturucusu ile birlikte değerlendirmişlerdir.

Kolonko (1998), genetik algoritma ile BT'yi kullanarak melez bir çizelgeleme sistemi geliştirmiştir.

Krishna, Ganeshan ve Ram (1995), atölye çizelgeleme problemlerinin BT ile çözüm süresini kısaltmak amacıyla üç farklı dağıtık benzetimli tavlama algoritması geliştirmişlerdir.

2.5.2 Genetik Algoritma

Genetik algoritma (GA), problemlerin çözümünde evrim teorisi ve doğal seçim teorilerini kullanan, deterministik olmayan, stokastik arama ve optimizasyon yöntemidir. GA evrimsel algoritmalar olarak adlandırılan daha geniş algoritmalar grubunun bir üyesidir. Bu grupta yer alan yaklaşımlar, genetik algoritma, evrimsel programlama, evrim stratejileri, sınıflandırma sistemleri ve genetik programlamadır. Bu algoritmaların tamamı, birey yapısının seçim, mutasyon ve üreme proseslerini temel almaktadırlar (Mitchell; 1996, 1-4).

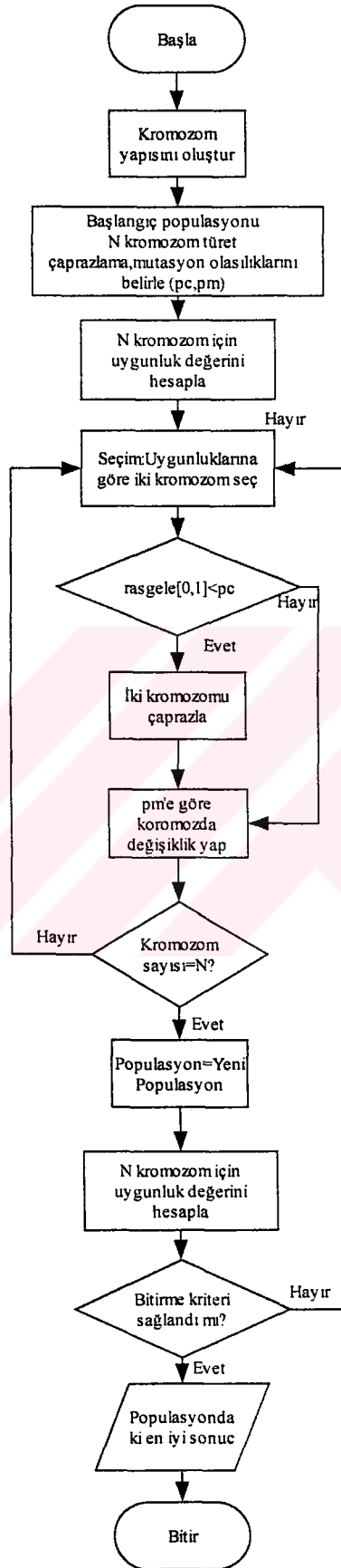
Evrimsel hesaplama fikri 1960'larda I. Rechenberg'in "Evrimsel Stratejileri" çalışması ile ortaya konulmuştur. Bu fikir diğer araştırmacılar tarafından geliştirilmiştir. GA John Holland (1975) tarafından önerilmiş, öğrencileri ve çalışma arkadaşları tarafından geliştirilmiştir. Holland, optimizasyondan çok GA ile karar teorisi üzerinde çalışmıştır. Ancak yapılan çalışmalar ile algoritmanın optimizasyonda oldukça iyi sonuçlar verdiğini göstermiş, araştırmacıların bu konu üzerine odaklanmasını sağlamıştır (Goldberg; 1989, 1-2).

GA, seçim ve diğer arama operatörleri (mutasyon ve üreme) ile geliştirilen bireylerden oluşan bir popülasyon üzerinde çalışır. Popülasyondaki her bir bireyin uygunluk değeri vardır. Üreme, uygunluk değeri yüksek olan bireylerde yoğunlaşmaktadır. Rekombinasyon ve mutasyon bireyleri geliştirmek amacıyla uygulanmaktadır.

Doğada, doğal seçim ve üreme, içinde bulundukları çevreye uyum göstermiş canlıların gelişmesini sağlamaktadır. GA da bu prensip üzerine kurulmuştur. Bir probleme

uygulanan GA'nın işleyişi, bireylerden oluşan bir başlangıç popülasyonunun rasgele veya sezgisel yöntemlerle türetilmesi ile başlar. Popülasyonda yer alan bireyler, problemin kromozomlar şeklinde çözümlerini ifade etmektedir. Jenerasyon olarak adlandırılan her aşamada popülasyon içerisindeki bireyler, belirlenen performans kriterine (uygunluk fonksiyonu) göre değerlendirilirler. Bir sonraki jenerasyonun oluşturulması için bireyler uygunluk fonksiyonlarına göre seçilirler. Mevcut popülasyondan seçilen bireyler yenileri ile yer değiştirirler. Yeni bireylerin oluşturulması ise çaprazlama ve mutasyon operasyonları ile gerçekleştirilir. Seçim için pek çok farklı algoritmalar kullanılmaktadır. En basitlerinden birisi Holland'ın orijinal uygunluk oranlı seçimi olup, bu yöntem bireyleri uygunlukları ile orantılı bir olasılıkla belirlemektedir. Dolayısıyla yüksek uygunluk değerine sahip bireyler daha uzun yaşamakta, düşük uygunluk değerine sahip bireyler ise yok olmaktadır. Bu mekanizma, belirli sayıda jenerasyon veya istenen iyi çözüme ulaşıncaya kadar devam etmektedir. Eğer GA iyi bir şekilde tasarlanmışsa, popülasyon optimal çözüme yaklaşabilmektedir. Popülasyon içerisindeki bir gen eğer popülasyonun %95'i ile aynı değeri taşıyorsa optimale yaklaşmıştır. Ancak GA stokastik yinelemeli bir süreç olduğu için her zaman bir yakınsama söz konusu olmayabilir. Bunun için algoritmayı sonlandırma kriteri, ya belirli sayıda jenerasyon veya kabul edilebilir bir uygunluk seviyesi olarak belirlenmelidir.

Şekil 2.3'te genetik algoritmanın temel işleyiş aşamaları görülmektedir.



Şekil 2.3 Genetik Algoritma

2.5.2.1 Çok Objektifli Genetik Algoritma

Son yıllarda çok objektifli evrimsel algoritmalar ile ilgili çalışmalar yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar konuya ilgiyi artırarak, orijinali tek objektifli ortaya konulan evrimsel algoritmaların çok objektifli versiyonlarının türetilmesi üzerine pek çok çalışmanın yapılmasına yol açmıştır.

Vektör Değerlendirmeli Genetik Algoritma (VEGA) (Schaffer; 1985): Literatürde yer alan ilk çok objektifli modern sezgisel çalışma GA ile Schaffer (1985) tarafından ortaya konulan vektör değerlendirmeli genetik algoritmadır. Bu yöntemde, tek objektifli GA, seçim mekanizmasının değiştirilmesi ile çok objektifli bir yapıya adapte edilmiştir. Her jenerasyonda, J alt populasyonları türetilmiştir. J. populasyon, Populasyon büyüklüğü/J çözümün j. objektif değerine göre seçimi ile oluşturulmuştur. Ardından alt populasyonlar tek bir populasyon olacak şekilde çaprazlama ve mutasyon operatörleri ile birleştirilmişlerdir. Algoritmanın çıktısı, en son jenerasyondaki populasyondur.

Goldberg (1989), GA temelli prosedürlerde oldukça yaygın kullanılan baskınlığa dayalı bir seçim mekanizması önermiştir. Bu yaklaşıma göre bir bireyin uygunluk fonksiyonu, o bireyin baskınlık derecesine göre belirlenmektedir. Bir populasyondaki bireyler değerlendirilerek, bastırılmamış olan bireyler belirlenip 1 ile numaralandırılır. Bu bireylerin dışından kalan bireyler tekrar değerlendirilerek bastırılmamış olanlar 2 ile numaralandırılır. Bu işlem tüm bireyler bir sıra numarası alana dek devam eder. Daha sonra bu sıra numaralarına göre oluşturulan bir uygunluk fonksiyonu ile seçim gerçekleştirilir.

Çok Objektifli Genetik Algoritma (MOGA) (Fonseca; Fleming; 1993): Bu yaklaşımda her birey, populasyondaki kendisine baskın olan birey sayısına göre sıra numarası almıştır. Baskılanmamış çözümler 1 ile numaralandırılmıştır. En iyi ve en kötü sıra numaraları arasında her bireye bir uygunluk fonksiyonu değeri verilmiştir. Aynı sıradaki tüm bireylerin uygunluklarının ortalaması alınmış ve elde edilen değer bu bireylere atanarak uygunlukları belirlenmiştir

Niche Pareto Genetik Algoritma (NPGA) (Horn; Nafpliotis; Goldberg; 1994): Bu çalışmada, bireylerin seçimi, baskınlık konseptine dayalı bir turnuva planı ile

gerçekleştirilir. Seçim için yarışan iki birey, popülasyonun bir alt grubu ile karşılaştırılır ve bastırılmamış olan birey seçilir. Eğer her ikisi de baskın ya da bastırılmamış bireyler ise paylaştıkları denkliklerine göre değerlendirilerek eşitlik bozulur.

Çok Objektifli Genetik Algoritma (MOGA) (Murata; Ishibuchi; Tanka; 1996): Bu yaklaşım, her seçim aşamasında rasgele belirlenmiş ağırlık vektörlerini kullanmaktadır. Seçimden önce, bir ağırlıklar vektörü rasgele belirlenmekte ve popülasyondaki her birey bu vektöre göre değerlendirilmektedir. Genetik operatörleri uygulamadan önce bir olasılık fonksiyonuna göre iki birey seçilmektedir. Baskılanmamış çözümlerden oluşan ikinci bir popülasyon saklanmakta ve bu elit popülasyondaki bazı bireyler sonraki jenerasyona aktarılmaktadır. Bu ikinci popülasyona ilave olarak her bir objektife göre elit bireyler de saklanmaktadır. Murata, Ishibuchi ve Tanka (1996), bu yöntemin Pareto optimal kümeye yaklaşımda VEGA'dan daha iyi sonuç verdiğini ortaya koymuşlardır.

Bastırılmamış Sınıflamaya Dayalı Genetik Algoritma (NSGA) (Srinivas; Deb; 1995): Bu yaklaşım, bireyleri Fonseca ve Fleming (1993) 'e benzer şekilde baskınlık durumuna göre sıralar. Bununla birlikte, her baskınlık sınıfı için popülasyon büyüklüğü ile orantılı bir geçici uygunluk değeri belirlenir. Bütün popülasyon sınıflandırıldıktan sonra kalan orantılı seçim uygulanmaktadır. Bu yapı, üreme için öncelikli bireylerden bir çok kopya elde edilmesini garantilemektedir. Bu yöntemde elitizm dahil edilerek güncelleştirilmiştir.

Yukarıda kısaca açıklanmış olan algoritmalar bu konuda yapılmış olan pek çok çalışmadan seçilmiş olan örneklerdir. Diğer birkaç çalışma ise Çok Objektifli Düzensiz Genetik Algoritma (MOMGA) I ve II (Van Valduizen; Lamont; 2000), Pareto Birleşik Genetik Algoritma (PCGA) (Kumar; Rockett; 2002) olarak literatürde yer almıştır.

2.5.2.2 Genetik Algoritma İle Atölye Çizelgeleme Uygulamaları

GA ile atölye çizelgeleme yaklaşımları Cheng, Gen ve Tsujimura (1996, 984-990) tarafından 9 farklı kategoride sınıflandırılmışlardır.

Tablo 2.1 Genetik Algoritma Çizelgeleme Yaklaşımı Sınıflandırması

Operasyon temelli	Tamamlanma zamanı temelli	Sıralama kuralları temelli
İş temelli	Gen temelli	Grafik temelli
İlişki temelli	Öncelik listesi temelli	Makine temelli

Atölye çizelgeleme problemleri için ilk çalışmalardan birisi Davis (1985) tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu yöntem, her makine için tercih edilen sıralamaları oluşturmuştur. Falkenauer ve Bouffix (1991) bu yaklaşımı geliştirerek, bir makinede işlem görecektir operasyonları, öncelik listesini semboller dizisi şeklinde ifade etmiştir.

Öncelik listesine dayalı yaklaşımlardan birisi Kobayashi, Ono ve Yamamuro (1995) tarafından gerçekleştirilmiş ve bir kromozom n uzunluğunda bir dizi olarak gösterilmiştir. Dizideki her bir sembol makinede işlem görecektir operasyonu ifade etmiştir.

Tamaki ve Nishikawa (1992) kritik yol diyagramı temelli bir gösterime dayanarak grafikteki bağlantıları 0-1 ile ifade etmişlerdir.

Yamada ve Nakano (1992), aynı makinede işlem görecektir operasyonların öncelik ilişkilerinin 0-1 kodlamasını geliştirmişlerdir. Yamada ve Nakano (1992), Giffler ve Thompson (1960) algoritmasını kullanarak, kromozomu operasyonların tamamlanma zamanlarının sıralı listesi şeklinde oluşturmuşlardır.

Bierwirth (1995), mevcut yöntemleri geliştirmek amacıyla genelleştirilmiş permutasyon genetik algoritma yaklaşımını önermiştir. Bu yaklaşımda bir kromozom işlerin bir permutasyonundan oluşmaktadır.

Dorndorf ve Pesch (1995), genetik yerel arama yöntemini kullanarak atölye çizelgeleme problemi için melez bir algoritma önermişler.

Yamada ve Nakano (1995), grafik uzaklıklarına göre iki ebeveyn çizelge oluşturmuşlardır. Aramaya ilk çizelgeden başlayarak, her seferinde mevcut

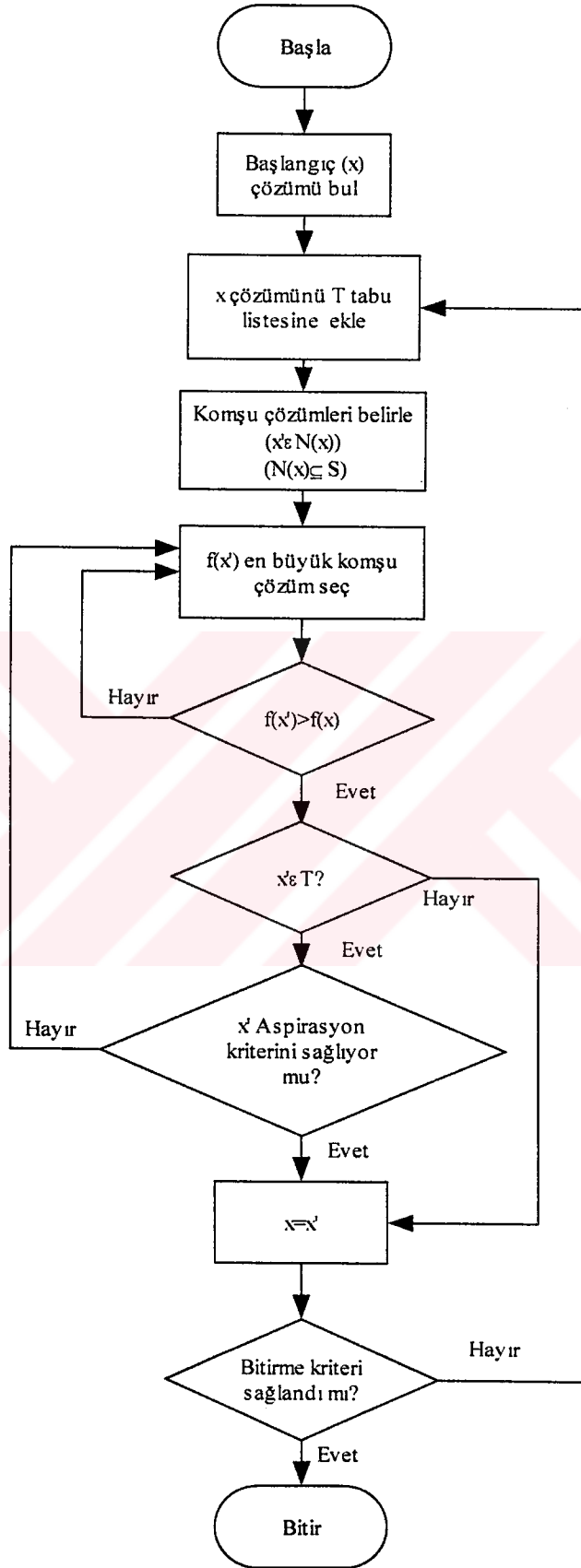
populasyondaki bir çözümü ikinci çözüme doğru geliştirilmiş bir sıra ile değiştirerek ilerlemişlerdir. Yöntemin geliştirilmiş hali Yamada ve Nakano(1996) tarafından çalışılmıştır.

Dimopoulos ve Zalzala (2000), evrimsel algoritmaların, üretim problemlerinin optimizasyonunda uygulanmasına yönelik geniş çaplı bir literatür çalışması yapmışlardır. Bu çalışmada, atölye tipi çizelgeleme, akış tipi çizelgeleme, üretim planlama ve hat dengeleme problemlerine yönelik geliştirilmiş evrimsel algoritmalara yer vermişlerdir.

2.5.3 Tabu Arama

Tabu arama (TA), optimizasyon problemlerinin çözümünde, yerel optimuma yakalanmamak için esnek hafıza yapılarını kullanan ve çözüm alanını etkin bir şekilde tarayan güçlü bir modern sezgisel yaklaşımdır. Glover (1977, 1986, 1990) tarafından ortaya konulmuş ve pek çok alanda (çizelgeleme, çizge teorisi, rotalama ve telekomünikasyon) uygulanmıştır. TA ve uygulamaları ile ilgili detaylı bir çalışma Glover ve Laguna (1997) tarafından gerçekleştirilmiştir. TA, farklı kombinatoryal problemlere uygulanmış ve optimale oldukça yakın sonuçlar elde edilmiştir. Çalışmanın bu bölümünde TA'nın algoritması ve bileşenleri detaylı olarak açıklanacaktır.

Temel işleyişi, bir arama alanındaki uygun çözümleri, bir başlangıç S çözümünden küçük değişikliklerle elde ederek taramak ve en uygun olan çözümü belirlemektir. Dolayısıyla algoritma bir başlangıç çözümü S ile başlar ve bu çözümünden elde ettiği komşuları performans kriteri (uygunluk fonksiyonu) açısından değerlendirerek, en uygun komşuya hareket eder. Bu süreç belirlenen performans kriteri arttığı sürece devam eder. Burada en önemli nokta, global optimum olmayan ama yerel optimum noktalarda döngüye girerek gerçek optimumu yakalayamama problemidir. Bunun için farklı stratejiler uygulanmıştır. TA algoritmasında, bulunan son çözümler tabu listesinde tutularak, aynı çözümlere tekrar dönülmesi engellenir. Ancak bazı durumlarda daha önce elde edilen çözümlere geri dönülmesi de gerekebilir. Bu durumlar için aspirasyon kriterleri belirlenerek, bu kriterler sağlandığı takdirde, o çözümün yasak listesinde yer almasının o çözüme geri dönmek için bir engel teşkil etmemesi sağlanır.



Şekil 2.4 Genel Tabu Arama Algoritması

TA esas olarak yönlendirmeli bir yerel arama algoritmasıdır. Temel prensibi, yerel optimumla karşılaşıldığında, gelişme sağlamayan hareketlere izin vermesi ve tabu listeleri sayesinde, ulaşılmış çözümlere geri dönüşümü engellemesidir. Tabu aramanın temel işleyişi Şekil 2.4'te gösterilmiştir.

Arama Alanı ve Komşuluk Yapısı:

TA yerel aramanın geliştirilmiş şeklidir. Basit TA, yerel arama ile kısa dönemli hafızaların bir kombinasyonu olarak görülebilir. TA'nın iki temel elemanı, arama alanı ve komşuluk yapısıdır.

TA'nın arama alanı, basit olarak arama ile ulaşılabilecek bütün uygun çözümleri içeren alandır. Bununla doğrudan ilişkili bir diğer kavram ise komşuluk yapısıdır. TA'nın her iterasyonunda, kök çözüme uygulanacak olan yerel geçiş/hareket stratejileri ile arama alanında komşu çözümler kümesi oluşturulur.

$N(S)$, arama alanının bir alt kümesi olup, kök çözümünden ulaşılan komşu çözümleri içermektedir.

$N(S) = \{S \text{ kök çözümüne bir yerel geçiş stratejisinin uygulanması ile elde edilen çözümler}\}$

Genelde bir problem için pek çok mümkün komşuluk yapısı mevcuttur. Dolayısıyla üzerinde çalışılan problem için arama alanının ve komşuluk yapısının belirlenmesi, TA algoritmasının en kritik aşamalarından birisidir.

Literatürde yer alan, çizelgeleme problemlerinde en sık kullanılan üç komşuluk yapısı Brandimarte (1993, 158-160) tarafından şu şekilde sıralanmıştır;

- Bitişik işlerin yer değiştirmesi; bir iş, çizelgede doğrudan sağında veya solunda yer alan bir diğer işle yer değiştirebilir.
- İkili yer değiştirme; çizelgede yer alan herhangi iki iş yer değiştirebilir.
- Eklenti; bir iş mevcut pozisyonundan çekilerek, çizelgedeki başka bir pozisyona eklenebilir.

Laguna ve Glover (1993) tarafından bu üç komşuluk yapısının karşılaştırılması sonucunda, eklenti komşuluk yapısının, ikili yer değiştirme komşuluk yapısına göre daha iyi sonuç verdiği ortaya konulmuştur.

Hafıza ve Tabu Sınıflandırmaları:

TA'da hafıza açısından en önemli ayırım, kendilerine özel stratejileri olan kısa ve uzun dönemli hafızalar arasında ortaya çıkmaktadır. Bu hafızaların etkileri x çözümünün, $N(x)$ komşuluklarının değerlendirilmesi açısından ele alınmaktadır. Kısa dönemli hafızaya dayalı TA stratejilerinde, $N'(x)$ komşu çözümleri, $N(x)$ komşu çözümlerinin bir alt kümesidir. Uzun dönemli hafızaya dayalı TA stratejilerinde ise $N'(x)$ komşulukları, $N(x)$ haricindeki çözümlerle genişletilebilmektedir. Bu açıdan bakıldığında, TA dinamik bir komşuluk yöntemidir. Yani, x çözümünün komşuluğu statik bir küme olmayıp, aramanın geçmişine bağlı olarak değişen bir küme özelliğini taşımaktadır. Buna bağlı olarak, kısa dönemli hafızaya dayalı TA süreci, x çözümüne birden fazla defa ulaşılmasına izin verebilir. Ancak, seçilen $N'(x)$ komşuluk alt kümesi her seferinde farklı oluşturulur. Kısa dönemli hafıza, yenilik temelli hafıza yapılarının kullanımını gerektirmektedir. Yenilik temelli hafıza, TA'nın yakın geçmişindeki çözümlerin özelliklerini tutar. En son ulaşılan çözümlerin, seçilen özellikleri tabu-aktif olarak adlandırılır. Tabu-aktif elemanlarını veya bu özelliklerin kombinasyonunu içeren çözümler tabu olarak nitelendirilirler. Bu yapı ile $N'(x)$ komşuluğunda en son ulaşılan çözümlerin yer almaması ve dolayısıyla bu çözümlere yeniden ulaşılması engellenir (Glover; Laguna; 1997).

Uzun dönemli hafıza, frekans temelli hafıza yapısının kullanılmasını gerektirmektedir. Frekans temelli hafıza, geçmişteki çözümleri iyi çözüm yapan özellikleri belirleyerek, elde edilecek yeni çözümde bu özelliklerin yer almasını sağlar. TA sürecinde kısa dönemli hafızaya uzun dönemli hafızanın eklenmesi ile, x çözümünden aynı $N'(x)$ komşuluğunun elde edilmesi sonucu ortadan kaldırılmaktadır (Glover; Laguna; 1997).

Tabular ve Tabu Listesi:

Tabular, TA algoritmasına özel elemanlardan birisidir. Tabular, yerel optimumdan gelişme kaydetmeyen hareketlerle uzaklaşırken, algoritmanın, ulaştığı son çözümlere

geri dönüşünü engeller. Yani algoritmanın ulaştığı çözümden tekrar tersi hareketlerle önceki çözümlere geri dönmemesini sağlar. Buna bağlı olarak daha geniş bir alanın taranması mümkün olur.

Tabular, aramanın kısa dönemli hafızalarına belirli kısıtlar çerçevesinde kaydedilir. Çözümün tamamının saklanması oldukça büyük bir hafıza ve zaman gerektirdiğinden, genellikle hareketi ifade eden bir özelliğin saklanması uygundur. Eğer çözüme farklı komşuluk yapıları aynı anda uygulanıyorsa, her biri için ayrı listelerin tutulması gerekmektedir (Glover; Laguna; 1997).

Kısa dönemli hafıza uzunluğunun doğru belirlenmesi, TA'nın başarısı için zorunludur. Eğer tabu uzunluğu çok kısa ise arama sürecinin belirli bir alanda takılması ihtimali yükselir. Aksi durumda, yani tabu uzunluğunun çok fazla belirlenmesi durumunda ise belirlenen alandan gereksiz yere çok uzaklaşmak söz konusu olabilmektedir. Ayrıca tabu listesinin taranması da arama sürecinin süresini oldukça uzatabilmektedir. Glover ilk olarak sabit 7'lik bir tabu uzunluğunu seçmiştir. Ancak daha sonra Glover ve Greenberg (1989), tabu uzunluklarının problem büyüklüğüne göre belirlenmesinin daha iyi sonuçlar verdiğini deneysel olarak kanıtlamışlardır. Glover (1990) sabit bir kısa dönemli hafıza yapısının, uzun dönemli hafıza yapısı ile birlikte iyi sonuçlar verebileceği üzerinde çalışmalar yapmıştır. Bütün bu çalışmalara rağmen son dönemde gerçekleştirilen pek çok araştırma, tabu uzunluğunun arama esnasında değişen şartlara göre dinamik olarak belirlenmesinin en iyi sonuçları verdiği değerlendirilmesine ulaşmıştır. Bu nosyon Glover, Taillard ve Werra (1993) tarafından ortaya konulmuş ve Laguna ve Glover (1993), Dell'Amico ve Trubian (1993), Taillard (1994) ve bunlar gibi pek çok araştırmacı tarafından da etkin bir şekilde kullanılmıştır. Barnes ve Chambers (1995) tarafından, dinamik tabu uzunluğu yaklaşımına farklı bir bakış açısıyla yarı dinamik tabu uzunluğu önerisi getirilmiştir. Bu çalışmada, tabu uzunluğunun belirlenmiş sınırlar arasında, sadece belirli değerlerde sürekli değiştirilmesi ile sonuçlar değerlendirilmiştir.

Aspirasyon Kriteri:

TA kısa dönemli hafıza yapısı, yakın geçmişte ulaşılan çözümlere yeniden uğramayı yasaklayarak yerel optimuma yakalanmayı engellemektedir. Ancak bazı durumlarda,

tabular etkili hareketleri engelleyebilmektedirler. Dolayısıyla bu hareketlerle ulaşılabacak çözümler tabu tarafından yasaklanmış olmaktadır. Bunun için bazı durumlarda tabuların iptal edilmesini mümkün kılabilen bir mekanizma gerekmektedir ki bu da aspirasyon kriteri olarak adlandırılır. Hemen hemen tüm TA uygulamalarında bulunan en basit aspirasyon kriteri, eğer bir hareket, mevcut en iyi çözümün objektif fonksiyonundan daha iyi bir objektif fonksiyon değerine sahipse, bu hareketin tabu olsa dahi kabul edilmesi kriteridir. Daha karmaşık aspirasyon kriterleri de geliştirilmiş ancak nadiren uygulanmıştır.

Sonlandırma Kriteri:

Uygulamada arama işlemi bir noktada sonlandırılmalıdır. En sık kullanılan sonlandırma kriterleri;

- Belirli bir iterasyon sayısına ulaşıldığında
- Belirli bir CPU zamanına ulaşıldığında
- Objektif fonksiyon değerinde, belirli bir iterasyon sayısı süresince iyileşme kaydedilmediğinde
- Objektif, belirli bir eşik değerine ulaştığında

şeklinde sıralanabilir.

Olasılıklı Tabu Arama ve Aday Listeleri :

Mevcut tanımlamalarda, kök çözümün komşularının tamamı için objektiflerin değerlendirilmesi gerekmektedir. Ancak bu yaklaşım çözüm sürecine oldukça fazla yük getirmektedir. Bu süreyi azaltmak için komşuların içerisinden rasgele bir alt kümenin seçilmesi mümkündür. Bu rasgelelik karşı-dönüşüm mekanizması olarak da çalışmaktadır. Böylece daha kısa bir tabu listesi uzunluğu kullanılabilir. Ancak diğer taraftan iyi çözümlerin kaçırılması da mümkün olabilmektedir. Hareketlerin sayısının kontrol edilebilmesi için diğer bir yöntem aday liste stratejileridir. Komşulukların ($N(S)$), uygun bir alt kümesinin ($N'(S)$) elde edilmesini sağlayan stratejik bir yöntemdir (Reeves; 1995, 74-75). Bunun için problem yapısına göre farklı yaklaşımlar geliştirilerek uygulanmıştır. Eğer komşuluk yapısı tamamen rasgele ise,

aday komşu çözümlerin de rasgele seçilmesi uygundur. Eğer, anlamlı bir komşu çözüm türetme mekanizması geliştirilmiş ise, alt komşu çözümlerin belirlenmesi için farklı değerlendirme mekanizmaları geliştirilmelidir (Glover; Laguna; 1997).

Yoğunlaşma ve Yayılma Stratejileri :

Yoğunlaşma stratejileri, iyi sonuç veren çözümler üzerinde ve komşuluklarında daha detaylı bir arama yapılmasını hedefler. Yayılma stratejileri ise tam tersi olan, daha önce ulaşılmamış çözüm alanlarını taramayı hedefler. Bunun en temel yöntemi aramayı tekrarlı olarak farklı başlangıç çözümlerinden başlatmaktır. Daha genel bir yaklaşım olarak uzun dönemli (frekans temelli) hafıza yapıları, çözüm konfigürasyonu, geçiş hareketleri gibi bilgilerin saklanması amacıyla oluşturulabilir. Bu bilgiler dahilinde yoğunlaşma ve yayılma stratejilerine göre seçilen hareketlerin gerektiği kadar cezalandırılması mümkün olabilmektedir. Laguna ve Glover (1993) uzun dönemli hafıza yapısını detaylı incelemiş, Brandimarte (1993) ve Taillard(1994) ise çalışmalarında bu yapıyı başarıyla kullanmışlardır.

Dönüşüm:

Daha önce de belirtildiği gibi, tabu uzunluğunun çok kısa seçilmesi, önceden ulaşılmış çözümlere geri dönüşü kolaylaştırmaktadır. Bu geri dönüşün olması, iyi bir uzun dönemli hafıza yapısının kurulamadığını da gösterir. Bu amaçla pek çok farklı strateji geliştirilmiştir. Bunlardan birisi, dönüşe yol açan davranışları belirleyebilmek için bazı seçilmiş hareketleri, kendinden önce elde edilen objektif fonksiyon değerleri ile birlikte saklamaktır. Buna benzer bir diğer yaklaşım da, periyodik olarak tekrar eden objektif fonksiyon değerlerine göre hareket sıralarının saklanmasıdır. Çözümlerin farklı algoritmalar ile kodlandırılması ile belirli bir çözüme geri dönüşü kontrol etmeye yönelik çalışmalar da gerçekleştirilmiştir.

Açıklanan TA algoritması kriterleri genel olarak değerlendirildiğinde, aşağıda sıralanmış olan faktörlerle ilgili stratejilerin doğru belirlenmesinin, algoritmanın performansı üzerinde oldukça etkili olduğu görülmektedir.

Başlangıç çözümünün oluşturulması:

Bu konuda yapılan çalışmalar, TA'nın diğer modern sezgisel yöntemlere göre başlangıç çözümünün kalitesinden çok fazla etkilenmediğini göstermiştir. TA hızla optimale yakın çözüm alanına yaklaşabilmektedir. Dolayısıyla başlangıç çözümünün kalitesini artırmak için çok fazla süre harcamak gereksiz hale gelmektedir. Ancak buna rağmen iyi bir başlangıç çözümü, optimale yakın çözüm alanına ulaşma süresini düşüreceğinden algoritmanın performansını etkileyen faktörler arasında yer almaktadır.

Komşuluk ve hareket:

TA'da etkili bir komşuluk arama ve ilerleme stratejisi belirlenmelidir. Komşulukların belirlenmesi, problem yapısına göre çok açık veya karmaşık olabilir. Etkin bir komşuluk arama stratejisi, çözüme ulaşma süresini kısaltacaktır.

Hareket seçim politikası:

Hareket seçiminin sınırlandırılması gerekmektedir. Olabilecek tüm hareketlerin seçilmesi, değerlendirme açısından pratik olmayacaktır. Bu amaçla aday liste veya elit çözümler kullanılmaktadır.

Objektif fonksiyon değerlendirme:

Seçilmesi planlanan hareketin objektif fonksiyon üzerindeki etkisi, etkin bir biçimde değerlendirilmelidir. Atölye çizelgeleme problemlerinin yapısı gereği, tamamlanma zamanı $O(N)$ 'de hesaplanabilmektedir. Ayrıca objektif fonksiyonu değeri üzerinde etkisi olmayan bazı hareketlerin de kabul edilmesi gerekmektedir. Çünkü bu hareketler, çözüm alanı içerisinde diğer noktalara ulaşılmasını sağlayabilmektedirler. Bunun için yayılma ve yoğunlaşma stratejilerinin doğru belirlenmesi zorunludur.

2.5.3.1 Çok Objektifli Tabu Arama Algoritması

Çok objektifli optimizasyonda modern sezgisel yaklaşım uygulamalarının sadece %6'sı tabu arama algoritması ile gerçekleştirilmiştir. Ağırlık %70 ile genetik algoritmada, ardından da %24 ile benzetimli tavlama üzerinde yoğunlaşmıştır (Jones; Mirrazavi;

Tamiz; 2002, 3-5). Bu bölümde konuya ilişkin yapılan çalışmalarla ilgili kısaca bilgi verilmiştir.

Gandibleux, Mezdaoui ve Freville.(1997) çalışmalarında, TA'nın çok objektifli bir versiyonunu önermişlerdir. Bu yöntem, ağırlıklandırılmış fonksiyonların ağırlıklarını periyodik olarak değiştirmek suretiyle optimizasyonunu gerçekleştirmiştir. Ağırlıklar vektöründe yapılan bu değişiklik, objektiflerdeki iyileşme oranına göre uygulanmıştır. Çalışmada iki tabu listesi kullanılmıştır. Bunlardan birisi bilinen tabu listesi olup, ulaşılmış çözümlere geri dönmeyi engellemektedir. İkincisi ise ağırlık vektörünü kapsamaktadır. Gandibleux ve Freville (2000), iki objektifli durumda önceden belirlenmiş bir ağırlık vektörünün kullanılmasının uygun olduğunu ortaya koymuşlardır.

Hansen (1997, 1998), Jaszkiwicz (2001) tarafından önerilen Pareto benzetimli tavlama dayalı bir çok objektifli tabu arama algoritması geliştirmiştir. Bu yöntem, baskılanmamış çözümlerin farklı alanlarını tarayan bir çözümler popülasyonu tutmaktadır. Her çözüm için bir ağırlık vektörü belirlenmektedir. Ayrıca her çözüm için ayrı bir tabu listesi de tutulmaktadır. Yöntemin temel dayanağı çözüm alanı içerisinde uygun yayılımın, ağırlık vektörleri ile sağlamasıdır. Her çözüm için ağırlık vektöründeki değişimin amacı, çözüm alanı içerisinde kök çözümü yakın çözümlerden uzaklaştırmayı sağlamaktır. Hansen (1997) bu yöntemi çok objektifli sırt çantası problemine, Viana (2000) ise çok objektifli proje çizelgeleme problemine uygulamıştır.

Ben Abdelaziz ve Krichen (1997), sırt çantası problemi için çok objektifli tabu arama algoritması tasarlamışlardır. Yöntem, ağırlıklandırılmış objektif fonksiyonuna ve baskınlık ilişkilerine dayanmaktadır. Baskınlık ilişkisi sadece çözümlere değil objelere de uygulanmıştır. Algoritma, baskılanmamış objelerin çantaya yerleştirilmesi esasına dayanmaktadır.

Baykasoğlu, Owen ve Gindy (1999a, 1999b), genel amaçlı, pek çok probleme uyarlanabilen çok objektifli tabu arama algoritması geliştirmişlerdir. Algoritma Pareto optimalite yaklaşımına dayanmakta ve tabu listesine ilave olarak iki farklı liste tutmaktadır. Bunlardan birisi aday çözümler listesi, bir diğeri de Pareto optimal çözümler listesidir. Çözüm sonucunda, Pareto optimal çözümler listesi, çözüm süreci boyunca baskılanmamış son çözümleri kapsamaktadır. Baykasoğlu, Owen ve Gindy

(1999b), Baykasoğlu (2001a), geliştirdikleri çok objektifli tabu arama yaklaşımını amaç programlama modellerinin çözümünde uygulamışlardır.

Baykasoğlu (2000, 2001b), geliştirilen çok objektifli tabu arama algoritmasını, çok objektifli bütünleşik üretim planlama probleminin çözümünde, Baykasoğlu, Saad ve Gindy (1998), hücresel imalatla hücrelerin yüklenmesinde, Baykasoğlu, Gindy (1999, 2000) yine hücresel imalatla parça-makine gruplarının oluşturulmasında, hücrelerin yük dengesinin sağlanmasında amaç programlama ile uygulamışlardır. Ayrıca Baykasoğlu (2003), önerilen yöntemi makine parçaları tasarım optimizasyonunda uygulamış ve elde edilen sonuçları literatürde yer alan benzer sonuçlar ile karşılaştırmıştır.

Baykasoğlu, Özbakır ve Dereli (2002) çalışmalarında çizelgeleme problemlerine yönelik olarak, Baykasoğlu, Owen ve Gindy (1999a, 1999b) tarafından literatüre kazandırılan çok objektifli tabu arama algoritmasına dayalı bir çözüm yaklaşımı ortaya koymuşlardır. Giffler ve Thompson (1960)'ın sıralama kurallarına dayalı çizelgeleme algoritmasını kullanarak, çoklu sıralama kuralına dayalı bir çok objektifli tabu arama algoritması önermişlerdir. Çalışmada yöntemin etkinliğinin değerlendirilmesi amacıyla, literatür problemlerinin çözümleri ortaya konulmuştur.

Baykasoğlu, Owen ve Gindy (1999a, 1999b) tarafından literatüre kazandırılan çok objektifli tabu arama algoritması, tez çalışmasında Bağlam Bağımsız Gramer yapısı ile modellenen, proses plan esnekliği içeren esnek atölye çizelgeleme problemlerinin çözüm yöntemi olarak temel alınmıştır. Buna bağlı olarak algoritmanın yapısı, işleyişi ve elemanları Bölüm 4.2'de detaylı açıklanmıştır.

2.5.3.2 Tabu Arama ile Atölye Çizelgeleme Uygulamaları

Barnes ve Laguna (1993, 150-156), TA'nın çizelgeleme problemine çözüm yaklaşımlarını araştırdıktan sonra, çizelgeleme için iyi bir TA algoritmasının aşağıda sıralanan özellikleri taşıması gerektiğini vurgulamışlardır;

- İyi bir başlangıç çözümü belirlenmesi
- Etkili hareket seçimi ve değerlendirilmesi
- Birden fazla hareket stratejisinin kullanılması

- Tabu özelliklerinin belirlenmesi
- Probleme göre kısa dönemli hafıza uzunluğuna karar verilmesi
- Etkin bir yoğunlaşma ve yayılma stratejisi belirlenmesi
- Diğer sezgisel yöntemlerle melezlenmesi

Bu bölümde, çizelgeleme probleminin çözümüne yönelik tabu arama yaklaşımları ile ilgili çalışmaların bazılarını kısaca değinilmiştir.

Çizelgeleme problemine ilk TA yaklaşımlarından birisi Laguna, Barnes ve Glover. (1991, 1993) tarafından ortaya konulmuştur. Bu yöntemde basit hareketlere dayalı üç TA stratejisi geliştirilmiştir. Laguna ve Glover (1993) bu yöntemde hedef analizi uygulamışlar ve işlerin yer değiştirmesine ilave olarak iş transferlerini kullanarak, çözüm kalitesini geliştirip, çözüm süresini düşürmüşlerdir.

Barnes ve Laguna (1993), çalışmalarında literatürde yer alan TA ile üretim çizelgeleme uygulamalarını inceleyerek, TA mekanizmaları için bir sentez ortaya koymuşlardır. Ayrıca sınırlandırılmış TA yaklaşımı ile birlikte orta ve uzun dönemli hafıza yapılarının önemi üzerinde durmuşlardır.

Hara (1995), TA'da kısa dönemli hafıza yapısı ile belirlenmiş sınırlamalardan yararlanmak üzere enküçük uyumsuzluk arama (MCS) tekniğini geliştirmiştir. Atölye çizelgelemede enküçük uyumsuzluk, kritik yol ile gösterilmiştir.

Sun, Batta ve Lin (1995), kritik yol üzerindeki blokları ifade eden aktif zincirlerle basit bir TA algoritması geliştirmişlerdir.

Barnes ve Chambers (1995) TA algoritmalarında, kısa dönemli hafıza değerlerinin belirli bir aralığına uzun tabu kullanım süresini uygulamışlardır. Her yeni iyi çözüm bulunduğu anda, bu çözümü daha sonra yeniden elde edebilmek için ana listeye kaydedilmiştir. Belirli bir zaman sonra listenin başındaki sıra, en düşük kısa dönem hafıza değeri ile yeni bir arama için başlangıç noktasını oluşturmuştur. Bütün hafıza değerleri kullanıldıktan sonra çözüm süreci kalan çizelgeler için devam ettirilmiştir.

TA ile çizelgelemeye önemli bir yenilik Taillard (1994) tarafından getirilmiştir. Hareketin objektif değerini tesbit etmek için bütün operasyonların başlama zamanlarını yeniden hesaplama gerekliliğini ortadan kaldırarak aramanın hızını artırmıştır. Taillard bu yaklaşımı, uyguladığı TA algoritmasında Van Laarhoven, Aarts ve Lenstra (1992)'nın komşuluk yapısı ile birleştirmiştir.

Dell'Amico ve Trubian (1993), TA algoritmalarına yeni bir başlangıç çözümü türetme yöntemi geliştirmişlerdir. Çalışmada iki farklı komşuluk yapısı kullanarak yöntemleri karşılaştırmışlardır. Ayrıca aramayı hızlandırmak amacıyla Taillard (1994)'ın tahmin stratejisini, önerdikleri komşuluk yapılarında uygulamışlardır.

Çözüm kalitesi ve süresi açısından en iyi TA yaklaşımlarından birisi Nowicki ve Smutnicki(1996) tarafından geliştirilmiştir. Tek bir kritik yolu birden fazla bloğa bölen oldukça yüksek kısıtlı bir komşuluk uygulamışlardır. Eğer komşulukta b blok varsa, $1 < l < b$ blokları için, her blokta ilk ve son operasyonların yerleri değiştirilmiştir. İlk ve son blok için ise son iki operasyon yer değiştirmiştir. Başlangıç çözümü, Werner ve Winkler (1995) tarafından geliştirilen yapıcı ekleme yöntemi ile oluşturulmuştur. Tabu süresi sabitlenmiş ve belirli sayıda elit çizelgeyi bir listede saklayarak çözüm koruma stratejisi kullanmışlardır.

Al-Fawzan ve Al-Sultan (1996), çalışmalarında n iş m makine atölye çizelgeleme problemi için yeni bir sezgisel yöntem önermişlerdir. Tabu aramaya dayalı geliştirilen çözüm tekniği ile tamamlanma zamanı enküçüklenmiştir. Yaklaşım, uygun olmayan çözüm çizelgelerinin tespit edilerek, arama alanının daraltılmasına dayanmaktadır. Ayrıca, iyi başlangıç çözümü ile rasgele oluşturulmuş başlangıç çözümlerinin performansları karşılaştırılmıştır.

İslam ve Ekşioğlu (1997), tek makinede çizelgeleme problemi için ortalama gecikmeyi enküçükleyecek bir TA algoritması geliştirmişlerdir. Elde edilen sonuçları üç farklı sezgiselle karşılaştırmışlar ve önerilen yöntem ile çözüm süresinin uzadığını ancak çözüm kalitesinin arttığını ortaya koymuşlardır.

Aarts ve Lenstra (1997), atölye çizelgeleme için çok sıralı ve paralel tabu arama algoritmaları geliştirmiştir. Çalışmada Taillard (1994)'ın tahmin stratejisini

hızlandırmak üzere kısmi değerlendirme yöntemi uygulanmıştır. Algoritmada, tabu uzunluğu rasgele değiştirilmiştir.

Thomsen (1997), TA'yı dal sınır algoritması ile birleştirmiştir. Dal sınır stratejisi çeşitlendirme için kullanılmış ve süreyi uzatmamak için kısıtlı sayıda iterasyonda uygulanmıştır.

Hurink, Jurish ve Thole (1994), çok amaçlı makineler için, Brucker ve Kramer (1995) çok işlemcili işler için, Dauzere-Peres ve Paulli (1997) genel çok işlemcili atölye çizelgeleme için, Brucker ve Neyer (1997) çok modlu (çok işlemcili iş ve çok amaçlı makine) atölye çizelgeleme için farklı TA yaklaşımları geliştirmişlerdir.

2.6 TESLİM TARİHİ BELİRLEME

Bölüm 6'da, atölye çizelgeleme sistemleri için teslim tarihi belirlemeye yönelik yeni bir yaklaşım olarak genetik programlama uygulaması gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmanın kuramsal altyapısını oluşturmak amacıyla bu bölümde teslim tarihi belirleme problemine ilişkin kısa bilgi verilmiştir.

Çizelgeleme problemlerine girdi olan teslim tarihlerinin belirlenmesi, yeni stok yönetimi tekniklerinin (sıfır stok, tam zamanında üretim) uygulanması ile büyük önem kazanmış ve son 20 yıldır araştırmacıların çalışmalarının odağı haline gelmiştir. Günümüz rekabet ortamında, siparişleri en kısa zamanda tamamlamak, stoğu azaltmak, güvenilir ve doğru teslim zamanlarını belirlemek ile doğrudan ilişkilidir. Bunu gerçekleştirmek de atölye seviyesinde, iyi bir çizelgeleme ve teslim tarihi yönetimi ile mümkündür.

Teslim tarihleri, dışarıdan müşteri tarafından veya çizelgeleme sistemi tarafından belirlenebilir (Ragatz; Mabert; 1984, 27-30). Teslim tarihleri dışarıdan belirlendiğinde, çizelgeleme sistemi bu tarihlere uyabilmek için iş önceliklerini ve akışı belirlemek üzerine çalışır. Çizelgeleme sistemi tarafından belirlenen teslim tarihleri ise genellikle atölyenin yoğunluğunu, üretim sisteminin kapasitesini ve işin içeriğini yansıtır (Veral; 2001, 77-78).

Bu konuda yapılan çalışmalarda, atölye çizelgeleme için bir çok sezgisel yaklaşımla, statik teslim tarihi belirleme kuralı geliştirilmiştir (Baker; 1984). Konu ile ilgili detaylı bir literatür çalışması Gordon, Proth ve Chu (2002) tarafından gerçekleştirilmiştir. Ancak bu statik kurallar, sistemin mevcut kapasitesini göz ardı ettiklerinden, gerçekçi olmayan teslim tarihleri belirlemektedirler. Literatürde yer alan teslim tarihi belirleme kuralları sistem içi ve sistem dışı olmak üzere iki farklı grupta incelenmiştir (Baykasoğlu; Özbakır; 2003, 156).

Sistem dışı teslim tarihi belirleme kuralları :

$$\text{Sabit akış payı (CON)} : di = ri + k \quad (2.13)$$

$$\text{Her iş için rasgele akış payı (RAN)} : di = ri + ei \quad (2.14)$$

di : i . işin teslim tarihi

k : akış payı

ei : i . iş için akış payı

Bu iki yöntem işin özelliklerini, sistem içerisindeki diğer işleri, atölyenin durumunu göz ardı eder. Bundan dolayı teslim tarihi sapmaları genellikle yüksektir.

Sistem içi teslim tarihi belirleme kurallarına göre akış zamanları, işlem zamanları ile veya operasyon sayıları ile orantılıdır :

$$\text{Toplam iş kapsamı (TWK)} : di = ri + k*pi \quad (2.15)$$

$$\text{İşlem zamanlarına eşit boşluk (SLK)} : di = ri + pi + k \quad (2.16)$$

$$\text{İşlem sayısı (NOP)} : di = ri + k*ni \quad (2.17)$$

$$\text{İşlem zamanı+operasyon sayısı (PPW)} : di = ri + pi + k*ni \quad (2.18)$$

pi : işin toplam işlem zamanı

ni : işin operasyon sayısı

ri : işin sisteme geliş zaman

Ancak sıralanan statik teslim tarihi belirleme kuralları, sadece işin özelliklerini ele alarak, atölyenin yoğunluğunu ve diğer özelliklerini göz ardı ettiklerinden dolayı son yıllarda yapılan çalışmalar, daha gerçekçi sonuçlara ulaşabilmek amacıyla dinamik

olarak değişen atölye şartlarını göz önünde bulunduran, dinamik teslim tarihi kuralları üzerinde yoğunlaşmıştır. Bu dinamik yöntemler, atölye durumunu, iş istasyonları yoğunluğu açısından göz önüne alarak işlerin akış paylarını belirlerler. Konuyla ilgili standart metodolojiye göre, operasyon akış zamanları atölye ve iş ile ilgili bağımsız değişkenler cinsinden ifade edilmektedir.

Ragatz ve Mabert (1984) farklı teslim tarihi belirleme kurallarını doğrusal ve doğrusal olmayan regresyon analizi ile belirleyerek karşılaştırmışlardır.

Vig, Dooley (1991) ve Chang (1997) ağırlıklandırma yaklaşımını benimseyerek regresyon denklemleri yerine yapay sinir ağlarını kullanmışlardır. Çalışmanın sonuçlarına göre, yapay sinir ağları ile elde edilen teslim tarihi değerleri, doğrusal ve doğrusal olmayan regresyon analizleri ile elde edilen teslim tarihi değerlerine göre gerçek akış zamanlarına daha uygun değerler olarak belirlenmiştir.

Baykasoğlu, Özbakır ve Sönmez (2002a), esnek atölye çizelgeleme problemlerinde teslim tarihlerinin belirlenmesine ilişkin tabu aramaya dayalı yeni bir yaklaşım ortaya koymuşlardır. Çalışmada, teslim tarihleri önceden belirlenmeyerek, karar değişkenleri olarak ele alınmıştır. Optimize edilecek objektif fonksiyonu ise toplam erken tamamlanma ve gecikmeler olarak belirlenmiştir. Tabu arama yöntemi ile esnek atölye çizelgeleme sistemi için uygun teslim tarihleri elde edilmiştir. Ayrıca çalışmanın sonucunda, esneklik düzeyinin teslim tarihleri üzerindeki etkisi ortaya konulmuştur.

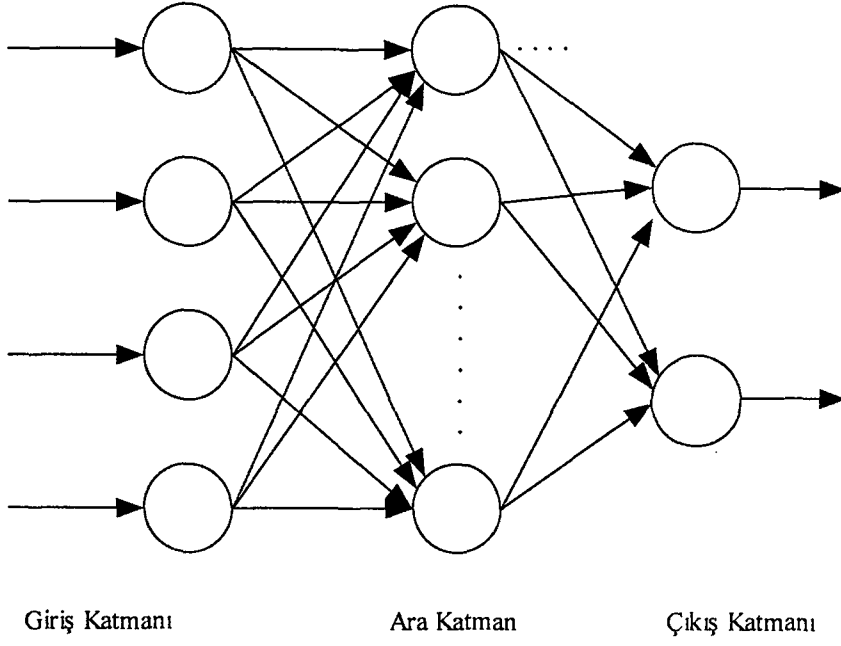
Baykasoğlu ve Özbakır (2003) çalışmalarında, atölye durumunu ve işlerin özelliklerini gözönünde bulundurarak, her bir çizelgeleme problemi için, performansı optimize edecek şekilde, uygun teslim tarihi kurallarının belirlenmesi amacıyla bir genetik program geliştirmişlerdir. Koza'nın otomatik programlama ve evrimsel hesaplama temeline dayalı genetik programlama yaklaşımı ile türetilen genetik programlar, teslim tarihi kuralları olarak tanımlanmış ve evrimsel olarak iyileştirilmişlerdir. Çalışmada, genetik program ile elde edilen teslim tarihi belirleme kuralları, literatürde yer alan klasik teslim tarihi kuralları ile performansa etkileri açısından karşılaştırılarak değerlendirilmiş ve önerilen yöntemin etkinliği ortaya konulmuştur.

2.7 YAPAY SINIR AĞLARI

Bölüm 6'da atölye çizelgeleme sistemleri için teslim tarihi belirlemeye yönelik önerilen genetik programlama yaklaşımı, yapay sinir ağları ile karşılaştırılmıştır. Bu bölümde, Bölüm 6'da ele alınan karşılaştırma yöntemlerinden birisi olan yapay sinir ağları ile ilgili genel kuramsal bilgilere kısaca yer verilmiştir.

Genel anlamda YSA, beynin bir işlevi yerine getirme yöntemini modellemek için tasarlanan bir bilgi işleme sistemidir. YSA, yapay sinir hücrelerinin birbirleri ile çeşitli şekillerde bağlanmasından oluşur ve genellikle katmanlar şeklinde düzenlenir. YSA sistemi, paralel yapıda pek çok basit bilgi işleme birimlerinden oluşur. Bu birimlerin fonksiyonları, aralarındaki bağlantıları kurmak üzere önceden belirlenir. Bu sistemler, adaptasyon ve öğrenme kabiliyetlerinin yanı sıra, farklı yapıda girdilerle bilgi işleme özelliklerine de sahiptirler (Dereli; Baykasoğlu; 2000, 31).

Beynin bilgi işleme yöntemine uygun olarak YSA, bir öğrenme sürecinden sonra bilgiyi toplama, hücreler arasındaki bağlantı ağırlıkları ile bu bilgiyi saklama ve genelleme yeteneğine sahip paralel dağılmış bir işlemcidir. Öğrenme süreci, amaca ulaşmak için YSA ağırlıklarının yenilenmesini sağlayan öğrenme algoritmalarını kapsar (Zurada; 1992, 26-40). Genel YSA yapısı Şekil 2.5'te görülmektedir.



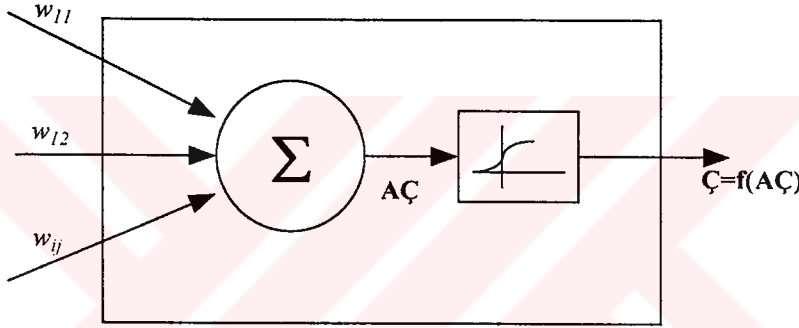
Şekil 2.5 Yapay Sinir Ağı Yapısı

YSA bilgi işleme gücünü paralel dağılmış yapısından, öğrenebilme ve genelleme yeteneğinden almaktadır. Genelleme, YSA' nın eğitim ya da öğrenme sürecinde karşılaşmadığı girişler için de uygun tepkileri üretmesidir. Bu özelliklerinden dolayı YSA'nın karmaşık problemleri çözebilme yetenekleri vardır (Chatterjee; Laudato; 1995, 1-5). YSA'ların özellikleri;

- Doğrusal olmama,
- Öğrenme,
- Genelleme,
- Uyarlanabilirlik,
- Hata toleransı,
- Analiz ve tasarım kolaylığı

şeklinde sıralanabilir.

YSA'ların en küçük bilgi işleme elemanı Şekil 2.6'da yer alan yapay nöronlardır. Bir yapay nöron, girişler, ağırlıklar, birleştirme fonksiyonu, transfer fonksiyonu ve çıkış bileşenlerinden oluşmaktadır. Girişler, diğer sinir hücrelerinden yada dış bağlantılar üzerindeki ağırlıklardan hücreye giren verilerdir. Birleştirme fonksiyonu, yapay nörona gelen girişlerin ilgili ağırlıklarla çarpılarak toplanmasıdır. Transfer fonksiyonu ise, birleştirme fonksiyonu ile elde edilen net girişin bir işlemde geçirilerek nöron çıkışını belirleyen ve genellikle doğrusal olmayan bir fonksiyondur (Chatterjee; Laudato; 1995, 4).



Şekil 2.6 Yapay Nöron

Nöronların birleştirme fonksiyonları (2.19)'daki gibidir.

$$AÇ \text{ (nöron ara çıkış fonksiyonu)} = \sum w_{ij} * x_i \quad (2.19)$$

Birleştirme fonksiyonu tarafından elde edilen net girişler bir transfer fonksiyonuna tabi tutularak nöron çıkışları elde edilir. Transfer fonksiyonu olarak sigmoid fonksiyonu kullanıldığında, çıkış değeri (2.20)'deki gibi hesaplanır.

$$\Ç = f(AÇ) = \frac{1}{1 + e^{-\sum w_{ij} * x_i}} \quad (2.20)$$

YSA'nın performansında ara katmanların sayısının belirlenmesi önemli bir rol oynamaktadır. Ara katman sayısının çok küçük seçilmesi, ağın az parametreliliğine ve doğru modelleme yapamamasına yol açabilir. Ara katmanların fazla belirlenmesi ise, parametrelerin artmasına ve değişkenler arasında bulunmayan ilişkilerin türetilmesine yol açabilir (De Vaux; Ungar; 1997, 5)

YSA'ların Ağ Yapılarına Göre Sınıflandırılması:

YSA'lar yapılarına göre ileri beslemeli (feed-forward) ve geri beslemeli (feed-back) ağlar olarak ikiye ayrılabilir (Karna; Breen; 1989, 7-10).

İleri Beslemeli Ağ Yapısı: İleri beslemeli bir ağda işlemci elemanlar katmanlar üzerinde bulunur. Giriş katmanı, dış ortamdan aldığı bilgileri hiçbir değişiklik yapmadan ara katmandaki işlemci elemanlara iletir. Bilgi, ara katman veya katmanlarla çıkış katmanında işlenerek ağ çıkışına iletilir. Girişler tek yönlü olarak çıkışa doğru iletilirken, her bir katman çıkışı diğer katmana giriş olarak uygulanmaktadır. Herhangi bir andaki çıkış değeri, sadece o andaki girişin fonksiyonu şeklinde ortaya çıkmaktadır. Böylece bu ağ yapısı, statik yapılı bir hafızaya sahip olur. İleri beslemeli ağlar doğrusal olmayan bir yapıya sahip olup çok katmanlı perseptronlar, LVQ (Learning Vector Quantization) ağ yapıları bunlara örnek olarak verilebilir. Çok katmanlı perseptron yapısının eğitilmesinde en çok kullanılan öğrenme algoritması, geri yayılım algoritmasıdır.

Geri Beslemeli Ağ Yapısı: Geri beslemeli bir sinir ağı, en az bir işlemci eleman çıkışının kendisine veya diğer işlemci elemanlara bir gecikme elemanı üzerinden giriş olarak uygulanması ile elde edilen ağ yapısıdır. Geri besleme, bir katmandaki işlemciler arasında olduğu gibi katmanlar arasındaki işlemciler arasında da gerçekleştirilebilmektedir. Geri beslemeli YSA yapıları, doğrusal olmayan dinamik bir davranış gösterirler ve herhangi bir andaki çıkış değeri, hem o andaki hem de daha önceki giriş değerlerine sahiptirler. Dinamik yapılarından dolayı geri beslemeli YSA'lar tahmin uygulamalarında başarılı bir şekilde kullanılmaktadırlar. Hopfield, SOM (Self Organizing Map), Kohonen, Elman ve Jordan ağları bu yapılara örnek olarak verilebilir.

2.8 SONUÇ

Bu bölümde, tez çalışmasına temel teşkil eden konularla ilgili genel bilgilere yer verilmiştir. Atölye çizelgeleme ve esnek atölye çizelgeleme problemleri tanıtıldıktan sonra, literatürde yer alan çok objektifli optimizasyon yöntemleri ile ilgili kısa bilgi verilmiştir. Esnek atölye çizelgeleme probleminin çözümünde Baykasoğlu, Owen ve Gindy (1999a, 1999b) tarafından geliştirilen çok objektifli tabu arama yaklaşımı temel alınmıştır. Buna bağlı olarak, modern sezgisel yöntemlere kısaca değinilerek, çok objektifli modern sezgisel yöntemlerle ilgili literatür çalışmaları incelenmiştir. Ayrıca modern sezgisel yöntemler ile çizelgeleme problemine geliştirilen çözüm yaklaşımları da özetlenmiştir.

Çalışmanın 6. bölümünde, atölye çizelgeleme sistemleri için teslim tarihi belirlenmesine yönelik bir genetik programlama yaklaşımı uygulanmıştır. Bu çalışmaya temel teşkil etmesi açısından, teslim tarihi belirleme problemine ilişkin kısa bilgi verilmiştir. Yine 6. bölümde geliştirilen yaklaşımın sonuç etkinliğinin değerlendirilebilmesi amacıyla karşılaştırma yöntemi olarak yapay sinir ağları seçilmiştir. Bu bölümün sonunda, yapay sinir ağlarının temel elemanları ve işlevleri ile ilgili kısa bilgi verilmiştir.

BÖLÜM 3

3 ESNEK ATÖLYE ÇİZELGELEME PROBLEMİNİN MODELLENMESİ

3.1 GİRİŞ

Çalışmanın bu bölümünde, Baykasoğlu (2002) tarafından geliştirilen ve literatürde Dil Teorisi'ne dayalı çizelgeleme problemlerinin modellenmesine yönelik ilk uygulamalardan birisi olan, Bağlam Bağımsız Gramer'ler ile esnek atölye çizelgeleme probleminin modellenmesi üzerinde durulmuştur. Konuya ilişkin kuramsal altyapının oluşturulması için, Dil Teorisi ve Bağlam Bağımsız Gramer yapıları açıklanmıştır. İkinci kısımda, esnek atölye çizelgeleme probleminin gramere dayalı yapısı oluşturularak, problem modellenmiştir. Yaklaşım, bir örnek problem üzerinde açıklanmıştır.

3.2 DİL TEORİSİ

Bir dilin yapısını oluşturan gramerler doğru cümleler kurulmasını sağlayan bir takım kurallar kümesidir. Burada adı geçen cümle, hangi anlamda kullanılıyorsa kurallar da bu sisteme göre geliştirilebilmektedir. Bir cümlenin bu kurallarla nasıl oluşturulacağını belirlenmesi ise gramer yapısı tarafından gerçekleştirilir. Bu noktada bir cümlenin oluşturulabilmesi için en üst seviyeden başlayarak bir dizi yerleştirme operasyonu gerçekleştirilir. Bunun için terminal ve terminal olmayan semboller kullanılır. Terminal olmayan semboller bir başka sembolle veya bir terminal ile yer değiştirilebilme özelliğine sahiptirler. Terminaller ise dilin başka herhangi bir sembolle değiştirilemeyen sabit elemanlardır.

Bu yaklaşım ile bilinen Dil Teorisi'ni kullanarak pek çok sistemi dilin cümleleri şeklinde ifade etmek mümkün olabilmektedir. Böylece Dil Teorisi karmaşık ve doğrusal

gösterimi mümkün olmayan problemler ve çözüm teknikleri için uygulanabilir bir yapı olma özelliğini taşımaktadır.

3.2.1 Bağlam Bağımsız Gramerler

Türetimler, dilin gramer yapısını oluşturmak amacıyla, sonlanmış bir terminaller dizisi ortaya çıkarmak üzere, ard arda uygulanan gramer kurallarıdır. Bu kurallar, dilin sözcüklerinin türetimi sürecindeki mümkün yerleştirmeleri ifade etmektedirler. Bir türetimin sonucu tek değildir. Yani farklı türetimler ile aynı sonuç cümlesine ulaşmak mümkün olabilmektedir. Her tüetime bir başlangıç sembolü ile başlanır ve bir dizi kurallar uygulanarak sonuç dizisi veya cümlesi elde edilir. Bu tüetimsel terminal olmayan değişken sembol ile devam edilir. Açıklanan bu yapı Bağlam Bağımsız Gramer (BBG) olarak adlandırılmaktadır. Bu yaklaşım dil için pek çok matematiksel modeller geliştiren Chomsky tarafından 1956'da ortaya konulmuştur. Bağlam, bağımsız gramerler özellikle bilgisayar bilimi için fonksiyonel programlama dillerinin geliştirilmesinde oldukça önemli bir rol oynamıştır (Hopcroft; Ullman; 1979, 77-82).

Bir BBG, dil içerisindeki sözcüklerin oluşturulması için yinelemeli olarak uygulanan türetim kurallarının kümesidir.

BBG'ler dört temel elemandan oluşur;

- Terminal (uç) semboller kümesi, gramer tarafından türetilen sözcüklerdeki karakterler
- Terminal olmayan (değişken) semboller kümesi, terminal semboller ile yer değiştirerek sözcüklerin türetilmesini sağlayan değişkenler
- Türetimler kümesi, bir terminal sembolün terminal olan veya olmayan bir diğer sembolle yer değiştirmesine ilişkin kurallar
- Başlangıç sembolü, gramer tarafında türetilen ilk sözcükte yer alan özel bir değişken

Bir BBG ile terminal sembollerden oluşan bir sözcük türetmek için aşağıda sıralanan aşamalar izlenir;

1. Başlangıç sembolü ile başla
2. Soldaki başlangıç sembolünü türetimin sağ tarafı ile yer değiştirecek şekilde türetim kurallarından birisini uygula,
3. Sözcükteki terminal olmayan sembolleri seç ve türetimlerin sağ tarafı ile yer değiştir, bütün terminal olmayan semboller terminallerle yer değiştirene kadar bu tüetime devam et.

Konuya ilişkin terimlerin tanımlamaları aşağıda yer almaktadır.

Alfabe (Σ): Sonlu alfabe kümesi, bölünemez elemanlar (semboller) içerir, $\{a,b,c\}$

Dizi: Alfabe (Σ) elemanlarının sonlu sırası, örneğin, aaabbc, abc, abbbbbc, ccc gibi.

Dil (L): Bir dil alfabe Σ elemanlarından oluşturulmuş dizileri içerir. Genellikle dizilerin oluşturulmasında bazı dil kuralları göz önünde bulundurulur. Bir dil bir alfabeden oluşturulabilecek tüm dizilerin bir alt kümesidir.

Dillerin tanımlanması: Dilin tanımlanması, o dile ait tüm dizilerin ayrıntılı belirlenmesini gerektirir.

- **Gramer (G) :** Dile ait sözcükleri türeten kurallar kümesidir. Örneğin, $S \rightarrow aA$, $A \rightarrow \lambda | aA | bA | cA$
- Bir gramer $G=(V, \Sigma, P, S)$ şeklinde gösterilir. (HopCroit; Ullman; 1979, 81)
- V : Sonlu değişkenler kümesidir.
- Σ : Sonlu uç semboller kümesidir (alfabe)
- P : Sonlu kurallar (dili oluşturan) kümesidir. $A \rightarrow aB$, $A \rightarrow a$, $A \rightarrow \lambda$ gibi.
- S : Başlangıç sembolü olarak adlandırılan özel bir semboldür.

Bu tanımlamalara göre bir BBG ;

- Terminal olarak adlandırılan sembollerden oluşan bir Σ alfabeye,
- Terminal olmayan, bir terminalle veya diğer bir terminal olmayan sembolle değiştirilebilen ve birisi S başlangıç sembolü olan semboller dizisine

sahiptir.

BBG içerisinde tanımlanan sonlu sayıda türetmeler;

Terminal olmayan sembol $\rightarrow$ sonlu terminaller dizisi ve/veya terminal olmayan semboller ve/veya boş

şeklinde gerçekleştirilir. İlk türetme S sembolü ile başlatılır.

Dilin türetilmesinde uygulanan kurallarda, değişkenler sağ taraf dizisinin en sonunda yer almalıdırlar. Her türetme sağ taraf dizisine bir uç eleman ilavesiyle devam eder. Bu türetmeler $A \rightarrow a$ veya $A \rightarrow \lambda$ türetmeyi tamamlayana kadar devam eder.

Gramer içerisinde türetimlerin ifadesinde | işareti veya anlamına gelmektedir.

$$G: S \rightarrow aS | aA$$

$$A \rightarrow bA | b$$

Yukarıda tanımlanan gramer $\{ab, aab, abbbb, \dots\}$ sözcüklerinden oluşan dili türetir.

Bir örnek gramer oluşturulacak olursa türetmeler aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$S \rightarrow aS$$

$$S \rightarrow \emptyset$$

Eğer türetme 1'i dört defa uyguladıktan sonra türetme 2 uygulanacak olursa a^4 'ün bu gramerde türetimi aşağıdaki gibi gerçekleştirilir.

$$S \rightarrow aS$$

$$aS$$

$aaaS$

$aaaaS$

$aaaa\partial = aaaa$

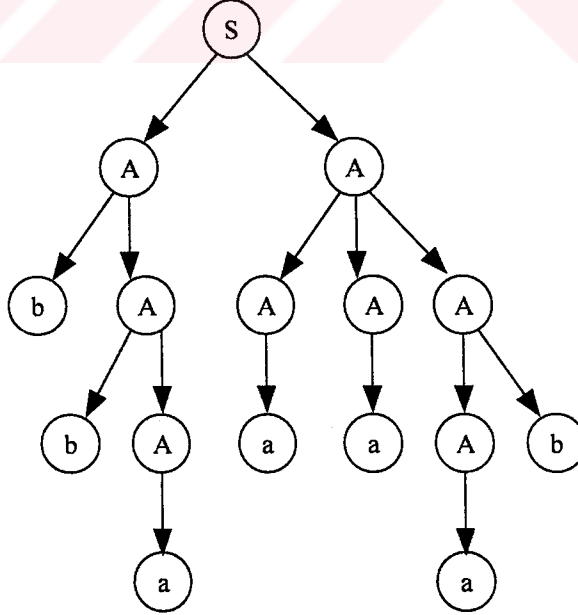
Gramerlerin gösteriminde kullanılan bu formata “BNF” veya “Backus – Naur” gösterimi denilmektedir.

Türetim ağaçları: BBG’de bir ifadenin türetilmesini aşama aşama gösteren ağaç yapıları türetim ağaçları olarak adlandırılmaktadır. Ağacın son düğümleri terminaller, ara düğümleri ise sağdan terminal olmayan semboller ile gösterilir.

$S \rightarrow AA$

$A \rightarrow AAA \mid bA \mid Ab \mid a$

Yukarıda tanımlanan BBG için bbaaaaab sözcüğünün türetim ağacı ile gösterimi Şekil 3.1’de oluşturulmuştur.



Şekil 3.1 bbaaaaab Türetim Ağacı

Toplam dil ağacı ise bir dildeki tüm sözcüklerin türetimini içeren ağaç yapısıdır.

Matematiksel Denklemler için BBG :

Dört temel matematiksel operatör ile denklemlerin oluşturulmasına ilişkin örnek gramer aşağıda tanımlanmıştır.

$$G=(V, \Sigma, P, S)$$

$$V : \{\text{denklem}\}$$

$$\Sigma : \{+, -, *, /, (,), \text{sayı}\}$$

$$S : \text{Başlangıç sembolü}$$

$$P :$$

$$\text{denklem} \rightarrow \text{sayı}$$

$$\text{denklem} \rightarrow (\text{denklem})$$

$$\text{denklem} \rightarrow \text{denklem} + \text{denklem}$$

$$\text{denklem} \rightarrow \text{denklem} - \text{denklem}$$

$$\text{denklem} \rightarrow \text{denklem} * \text{denklem}$$

$$\text{denklem} \rightarrow \text{denklem} / \text{denklem}$$

Tanımlanan türetim kurallarından ilki, denklemin bir sayı ile yer değiştirebileceğini ifade etmektedir. İkincisi, denklemin parantez içerisinde denklem ile ifade edilebileceğini göstermektedir. Sonraki dört kural ise $+, -, *, /$ işlemlerinin türetim kuralı olarak ifadesidir.

BBG ile dizilerin türetilmesi:

Tanımlanan gramerde başlangıç sembolü “denklem”dir. Beşinci sıradaki kural, bu başlangıç sembolüne uygulanacak olursa;

$$\text{denklem} * \text{denklem}$$

dizisi elde edilir. Böylece dizide iki terminal olmayan sembol yer almış olur. İlk sembole üçüncü kural uygulanacak olursa;

$$\text{denklem} + \text{denklem} * \text{denklem}$$

dizisi haline gelir. Bu diziye ard arda ikinci ve birinci kurallar uygulanacak olursa ;

$(denklem) + denklem * denklem$

ve son olarak,

$(sayı) + sayı * sayı$

sonucuna varılır. Son aşamada bütün terminal olmayan semboller terminal sembollerle yer değiştirmiş ve böylece türetme işlemi tamamlanmıştır. Farklı kurallar ile türetme işlemi devam ettirilerek farklı sonuç dizileri elde edilebilir. Bir S başlangıç sembolü ile başlayan G gramerine uygulanan türetimler sonucu elde edilen diziler (s), gramerin dilini ($s \in L(G)$) oluşturmaktadır.

BBG'lerde terminal olmayan sembollerin yerine geçebilecek terminallere veya diğer terminal olmayan sembollere karar verme aşamasında olasılıkların kullanılması, olasılıklandırılmış BBG'ler olarak adlandırılırlar. Bu tür BBG'lerde hangi terminallerin veya değişkenlerin seçileceğine önceden belirlenmiş olan olasılıklarına göre karar verilir. Böylece gramer, türetilcek sonuç dizilerinin, bir takım kriterlere göre seçim alternatiflerini yansıtacak biçimde tasarlanmasına imkan tanır (HopCroit; Ullman; 1979, 82-83).

Farklı disiplinlerde yer alan Dil Teorisinin üretim sistemlerinde uygulanmasına yönelik bazı literatür çalışmaları kısaca özetlenmiştir.

Ratchev ve Gindy (1992), uygun makine takım konfigürasyonlarının belirlenmesinde Dil Teorisini kullanmışlardır. Çalışmada makine yetenekleri ve konfigürasyon modelleri geliştirilerek, Bağlam Bağımsız Gramer'ler ile modellenmiştir. Geliştirilen teknikler için örnek uygulama olarak makine takım konfigürasyonu seçimi kullanılmıştır.

Wu, Venugopal ve Barash (1986), hücresel imalat sistemlerinin tasarımı için Dil Teorisi yaklaşımı ile yeni bir yöntem önerisinde bulunmuşlardır. Parça gruplarının oluşturulmasında, uygun hücrelerin belirlenmesinde ve yeni ürünlerin gruplara atanmasında kullandıkları Dil Teorisi yaklaşımının, sisteme esneklik kazandırdığını iki örnek üzerinde karşılaştırmalı olarak ortaya koymuşlardır.

Graham ve Saridis (1982), üretim sistemlerinin hiyerarşik kontrolü için Dil Teorisi ile yeni bir karar yapısı oluşturmuştur.

Milacic (1994), Zeki Üretim Sistemleri projesinin bir parçası olan, otomata ve Dil Teorisine dayalı bir Zeki Uzman Sistem tasarlamıştır. Geliştirilen sistem, ürün tasarımı, proses tasarımı, üretim planlama ve kontrol tasarımı olmak üzere üç alt sistemden oluşmuştur. Tasarım sisteminin modellemesinde hücrel otomata yaklaşımı uygulanmıştır.

Joshi, Mettala ve Wysk (1992), esnek üretim hücreleri için kontrol yazılımının geliştirilmesine yönelik sistematik bir yaklaşım önermişlerdir. Esnek üretim sistemi, Bağlam Bağımsız Gramer'ler ile tanımlanan ürün bazında kontrol edilmiştir. Esnek üretim sisteminin elemanları, fiziksel, sistematik ve fonksiyonel modeller ile ortaya konulmuştur.

Karacal (1997), üretim sistemlerinin simülasyonunda Dil Teorisini kullanmıştır. Geliştirilen gramer ile sipariş veritabanı, ürün yapısı, kontrol hiyerarşisi ve proses planı bilgileri üretim sistemine entegre edilerek, hiyerarşik simülasyon sisteminin varlıkları arasındaki iletişimin otomasyonunu sağlayan yapısal bir yöntem önerilmiştir.

Liu ve Srinivasan (1984), süreç planlamada Dil Teorisi yaklaşımını uygulamışlardır. Çalışmada, proses planlamada makine yeteneklerinin gösteriminin önemi üzerinde durularak, makine yetenek verileri üretim kuralları ile oluşturulmuştur. Geometrik modelleme ile oluşturulmuş parça modeli için, sentaks analizi ile uygun yeteneklere sahip makinenin belirlenmesine dair bir sistem önerilmiştir

Zhofgang, Renzhong ve Yueming (1992) ürün modellemede gramer yapısını esas almıştır. Dil Teorisi ile üç temel ürün modelleme yaklaşımının - geometrik modelleme, özellik modelleme, mantıksal modelleme - analizi ve karşılaştırması gerçekleştirilmiştir

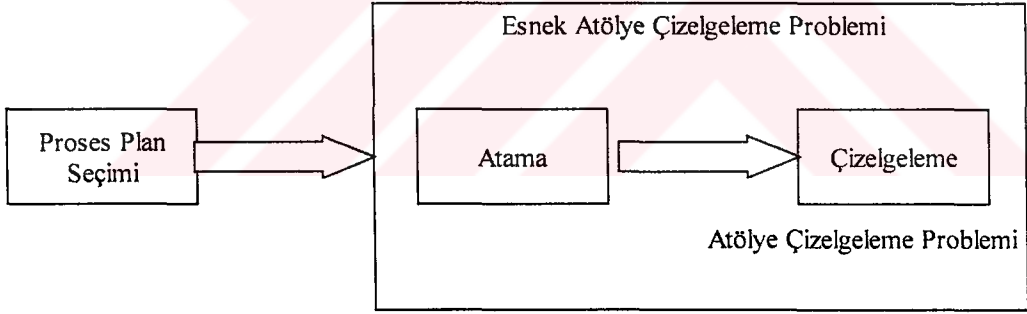
Upton ve Barash (1988), büyük üretim sistemleri için rotalama esnekliğini ortaya koyan bir gramer yaklaşımı geliştirmişlerdir. Bu yaklaşımda rotalama kararı, operasyonların her bir makinedeki işlem sürelerine göre belirlenen bir maliyet hesabına göre

verilmiştir. Önerilen gramer ile türetilen dil entropisini kullanarak, esnekliği uygun bir şekilde modellemiştir.

Sıralanan çalışmalarda Dil Teorisi yaklaşımının temel kullanım amacı, karmaşık sistemlerin modellenmesinde basit bir yapısal yöntem olmasıdır.

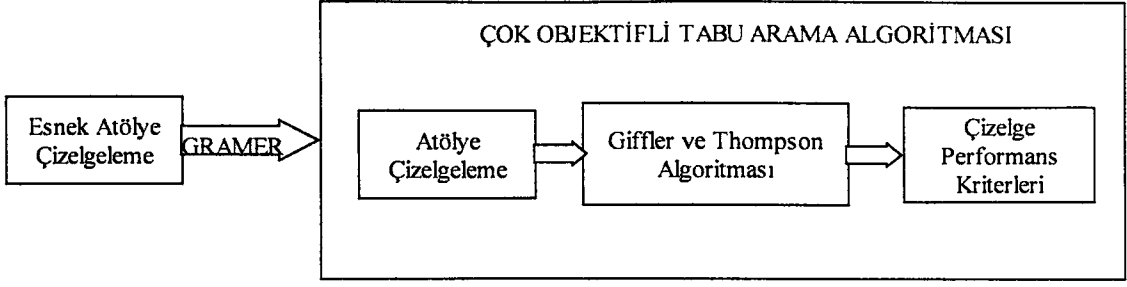
3.3 ESNEK ATÖLYE ÇİZELGELEME PROBLEMİNİN DİL TEORİSİ İLE MODELLENMESİ

Esnek atölye çizelgeleme problemi, operasyonların uygun aday makinelerden birisine atanması (rotalama) ve bu makinelerde işlerin sıralanarak çizelgelenmesi problemlerini bir arada kapsamaktadır. Bu çalışmada, esnek atölye çizelgeleme problemine proses plan esnekliği (proses plan seçimi problemi) de entegre edilerek problemin kapsamı genişletilmiştir (Şekil 3.2).



Şekil 3.2 Esnek Atölye Çizelgeleme Problem Grupları

Oluşturulan bu karmaşık problem, Baykasoğlu (2002) tarafından önerilen Dil Teorisi yaklaşımı kullanılarak modellenmiş ve Baykasoğlu, Owen ve Gindy (1999a,1999b) tarafından geliştirilen çok objektifli tabu arama algoritması ile çözülmüştür (Şekil 3.3). Çizelgeleme algoritması olarak Giffler ve Thompson (1960)'ın sıralama kuralları temelli yaklaşımı uygulanmıştır.



Şekil 3.3 Esnek Atölye Çizelgeleme Problemine Çözüm Yaklaşımı

Esnek atölye çizelgeleme problemi temelde iki ana problemten oluşmaktadır. Birincisi, operasyonların makine alternatifleri arasından bir makineye atanması (*rotalama problemi*), ikincisi ise makinelerde işlerin, belirli performans kriterlerinin optimize edecek şekilde sıralanmasıdır (*sıralama problemi*). Baykasoğlu (2002) konuya ilişkin yaptığı çalışmada, problem çerçevesini genişleterek, esnek atölye çizelgeleme problemine proses plan seçimi problemini de entegre etmiştir. Dolayısıyla ele alınan problemde makine (rota) esnekliğinin yanı sıra proses plan esnekliği de göz önünde bulundurulmuştur.

- Problemde her bir iş için, proses plan alternatifleri söz konusudur.
- Her bir proses planındaki operasyonlar ve bunların sıraları belirlidir.
- Bir işin proses planlarındaki operasyonlarının sayısı birbirinden farklı olabilir.
- Her bir operasyon için işlem görebileceği bir yada birden fazla makine alternatifi mevcuttur.
- Her bir operasyonun, bütün makine alternatiflerindeki süreleri önceden belirlidir.
- Bir operasyon, tüm makinelerde gerçekleştirilebiliyor ise tam esneklik söz konusudur. Aksi taktirde operasyonlar, kısmi makine esnekliğine sahiptir

Esnek atölye çizelgeleme problemi Dil Teorisi ile modellenirken, her iş parçası için alternatif proses planları da göz önüne alınmıştır. Esnek atölye çizelgeleme ile birlikte proses plan seçimi de gerçekleştirilerek, sistemin esnekliği artırılmıştır.

Model;

- proses plan seçimi,
- operasyonların makinelere atanması,
- makinelerde operasyonların sıralanması

olmak üzere üç farklı probleme eşzamanlı olarak çözüm geliştirecek şekilde tasarlanmıştır.

Problemi modellemek üzere oluşturulan Bağlam Bağımsız Gramer dört ana elemandan oluşmaktadır ;

$$G_s = \{ \Sigma_s, \Pi_s, P_s, S \}$$

- Σ_s : Terminal semboller kümesi olup, operasyonlar için makine alternatiflerini içerir
- Π_s : Değişken semboller kümesi olup, parçaları, proses planlarını ve operasyonları içerir
- P_s : Proses planlarının ve makinelerin belirlenmesi için sonlu türetim kurallar kümesidir
- S : Başlangıç sembolüdür

P_s Türetim Kuralları:

$$\Phi \longrightarrow \Delta$$

$$\Omega_i \xrightarrow{\pi_{ij}} \Psi_{ij}$$

$$\Theta_i \xrightarrow{\mu_{ij}} \Lambda_{ij}$$

Φ, Ω_i, Θ_i : Terminal olmayan değişken semboller

Δ, Ψ_{ij} : Değişken semboller kümesi

Λ_{ij} : Terminal (uç) semboller

μ_{ij}, π_{ij} : Kontroller

Kontroller :

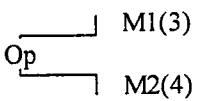
Kontroller, seçilecek olan türetimleri belirlemek amacıyla kullanılmaktadırlar. Kontrol π_{ij} , parçaların alternatif proses planları arasından birisinin seçilmesini sağlarken, μ_{ij} , operasyonların, uygun aday makineler arasından birisine atanmasını sağlar.

Esnek atölye çizelgeleme probleminde kontroller, işlem zamanlarına dayalı hesaplanan operasyon-makine maliyet matrisi kullanılarak belirlenmiştir. Operasyonlar için makine alternatiflerinin söz konusu olduğu esnek atölye çizelgeleme probleminde, makine seçimi aşamasında, alternatif makinelerin işlem zamanlarına göre seçilme olasılıkları hesaplanmalıdır. Bu durumda, bir operasyonun makine alternatifleri arasından, en düşük işlem süresine sahip makineye en yüksek seçilebilme olasılığının atanması gerekmektedir. Dolayısıyla işlem süresi yüksek olan makinenin seçilebilme olasılığı da düşük olacaktır. Bir operasyon için, n aday makine arasından i . makinedeki maliyeti, işlem süresini ifade etmektedir. Buna bağlı olarak, çalışmada makinelerin seçilebilme olasılıkları, 3.1’de yer alan formül ile hesaplanmıştır (Upton; Barash; 1998, 211);

$$\pi_i = \left[\sum_{j=1}^n \frac{1}{p_j} \right]^{-1} / p_i \quad (3.1)$$

p_j : operasyonun j . makinedeki işlem süresi

Örneğin, bir operasyon için iki alternatif makine söz konusu olsun;



Operasyon için aday makinelerden M1 ve M2’nin seçilebilme olasılığı;

$$\pi_1 = (1/3 + 1/4)^{-1} / 3 = 0,57$$

$$\pi_2 = 0,43$$

olarak hesaplanır. M1, operasyon için daha düşük işlem süresine sahip olduğundan M2'ye göre seçilebilme önceliği daha yüksektir.

3.3.1 Örnek Problem Modeli

Bölüm 3.2'de tanımlanan gramer ve türetim kuralları, Baykasoğlu (2002)'de ele alınan, proses plan esnekliği içeren esnek atölye çizelgeleme problemi (test problem 2) üzerinde uygulanarak, problemin modeli oluşturulacaktır. Tablo 3.1'de probleme ilişkin parça proses plan bilgileri ve teslim tarihleri yer almaktadır. Tablo 3.2'de, operasyonların makine alternatifleri ve bu makinelerdeki işlem süreleri görülmektedir.

Tablo 3.1 Parça Proses Plan Bilgileri ve Teslim Tarihleri

Parçalar	Proses Plan No	Proses Planlar	Teslim Tarihleri
Parça 1	1	Op1-2-3-5	19
	2	1-5-3-2	
Parça 2	1	1-2-4-3	21
	2	1-2-3-4	
Parça 3	1	1-5-3	18
	2	1-3-5	
Parça 4	1	1-4-3	11
	2	1-3-4	
Parça 5	1	5-4-3	15
	2	5-3-4	
Parça 6	1	1-4-5	19
	2	1-5-4	

Tablo 3.2 Operasyon-Makine İşlem Süreleri

	Op1						Op2						Op3						Op4						Op5					
Parçalar	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
M1							2	1	0	0	0	0							0	4	0	1	1	1						
M2	3	5	6	2	0	6							4	6	3	3	3	0	0	4	0	1	1	1						
M3							2	1	0	0	0	0													3	0	4	0	6	7
M4	3	5	6	2	0	6							4	6	3	3	3	0							3	0	4	0	6	7
M5							2	1	0	0	0	0							0	4	0	1	1	1	3	0	4	0	6	7
M6							2	1	0	0	0	0							0	4	0	1	1	1						

Tablo 3.1 ve Tablo 3.2'deki bilgiler kullanılarak, problemin Bağlam Bağımsız Gramer modeli şu şekilde tanımlanmıştır:

$\Sigma_s : \{\text{Makine1, Makine2, Makine3, Makine4, Makine5, Makine6}\}$

$\Pi_s : \{\text{Parça1, Parça2, Parça3, Parça4, Parça5, Parça6, Op1, Op2, Op3, Op4, Op5}\}$

S : Her parça için bir proses plan ve bu proses planlardaki tüm operasyonlar için makineleri seç (Makine-Seç).

P_s : Proses planlarının ve makinelerin belirlenmesi için belirlenmiş türetim kuralları :

Makine-Seç $\rightarrow$ Parça1, Parça2, Parça3, Parça4, Parça5, Parça6

Parça1 $\xrightarrow{\pi_{11}}$ Op1, Op2, Op3, Op5

Parça1 $\xrightarrow{\pi_{12}}$ Op1, Op5, Op3, Op2

Parça2 $\xrightarrow{\pi_{21}}$ Op1, Op2, Op4, Op3

Parça2 $\xrightarrow{\pi_{22}}$ Op1, Op2, Op3, Op4

Parça3 $\xrightarrow{\pi_{31}}$ Op1, Op5, Op3

$$\text{Parça3} \xrightarrow{\pi_{32}} \text{Op1, Op3, Op5}$$

$$\text{Parça4} \xrightarrow{\pi_{41}} \text{Op1, Op4, Op3}$$

$$\text{Parça4} \xrightarrow{\pi_{42}} \text{Op1, Op3, Op4}$$

$$\text{Parça5} \xrightarrow{\pi_{51}} \text{Op5, Op4, Op3}$$

$$\text{Parça5} \xrightarrow{\pi_{52}} \text{Op5, Op3, Op4}$$

$$\text{Parça6} \xrightarrow{\pi_{61}} \text{Op1, Op4, Op5}$$

$$\text{Parça6} \xrightarrow{\pi_{62}} \text{Op1, Op5, Op4}$$

$$\text{Op1} \xrightarrow{\mu_{11}} \text{Makine2}$$

$$\text{Op1} \xrightarrow{\mu_{12}} \text{Makine4}$$

$$\text{Op2} \xrightarrow{\mu_{21}} \text{Makine1}$$

$$\text{Op2} \xrightarrow{\mu_{22}} \text{Makine3}$$

$$\text{Op2} \xrightarrow{\mu_{23}} \text{Makine5}$$

$$\text{Op2} \xrightarrow{\mu_{24}} \text{Makine6}$$

$$\text{Op3} \xrightarrow{\mu_{31}} \text{Makine2}$$

$$\text{Op3} \xrightarrow{\mu_{32}} \text{Makine4}$$

$$\text{Op4} \xrightarrow{\mu_{41}} \text{Makine1}$$

$$\text{Op4} \xrightarrow{\mu_{42}} \text{Makine2}$$

$$\text{Op4} \xrightarrow{\mu_{43}} \text{Makine5}$$

$$\text{Op4} \xrightarrow{\mu_{44}} \text{Makine6}$$

$$\text{Op5} \xrightarrow{\mu_{51}} \text{Makine3}$$

$$\text{Op5} \xrightarrow{\mu_{52}} \text{Makine4}$$

$$\text{Op5} \xrightarrow{\mu_{53}} \text{Makine5}$$

Problemde yer alan her bir parça için π_{ij} kontrollerinden sadece birisi seçilecektir. Dolayısıyla i. parçanın j. proses planı seçilirse π_{ij} 1, aksi taktirde π_{ij} 0 değerini alacaktır.

Bir işin belirlenen proses planındaki her bir operasyon için işlem göreceği tek bir makine kontrolü seçilecektir. Operasyon makine kontrolleri için formül (3.1) kullanılarak, her bir operasyon için aday makinelerin seçilebilme olasılıklarının belirlenmesi gerekmektedir. Bu olasılıklara göre seçilen makine kontrolü, μ_{ij} 1, diğer kontroller 0 olacaktır.

Gramer tanımlamada kullanılan bu kontrollerin uygun bir bileşimi, esnek atölye çizelgeleme problemini klasik atölye çizelgeleme problemine indirgeyecektir.

Örneğin;

$$\{\pi_{11}, \mu_{12}, \mu_{21}, \mu_{32}, \mu_{52}, \pi_{22}, \mu_{11}, \mu_{24}, \mu_{32}, \mu_{43}, \pi_{32}, \mu_{12}, \mu_{31}, \mu_{53}, \pi_{41}, \mu_{12}, \mu_{41}, \mu_{32}, \pi_{52}, \mu_{51}, \mu_{31}, \mu_{44}, \pi_{62}, \mu_{12}, \mu_{52}, \mu_{43}\}$$

kontroller kümesi rasgele belirlenmiş olsun.

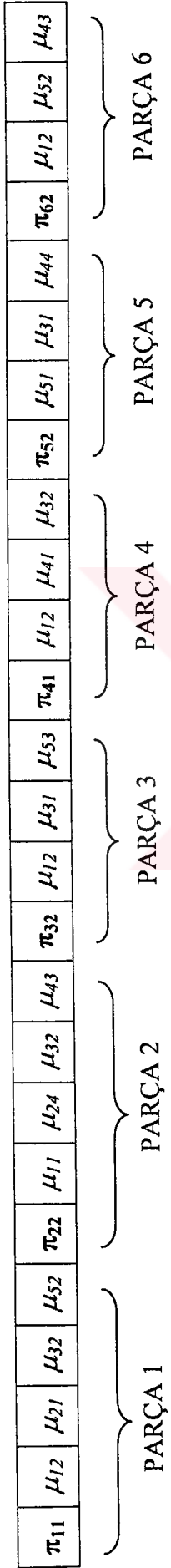
Şekil 3.4 ve Şekil 3.5'te bu kontroller kümesi içerisinde yer alan, parçalara göre proses plan kontrolleri ve seçilen proses planlarındaki operasyonlar için makine kontrolleri yer almaktadır. Oluşturulan bu kontroller ile ilk olarak parçalar için proses planlar belirlenmiş olmaktadır. İkinci aşamada ise belirlenen proses planında yer alan operasyonların her biri için makine kontrolleri seçilmektedir. Kontrollerin bu iki aşamada belirlenmesi sonucunda esnek atölye çizelgeleme probleminin, klasik atölye çizelgeleme problemine dönüşümü gerçekleştirilmektedir. Bu dönüşüm, Parça 1 için Şekil 3.5 ve Şekil 3.6'da, Parça 2 için ise Şekil 3.7'de gösterilmiştir. Her iki parça için π_{11} ve π_{22} kontrolleri ile proses planları belirlenmiştir. Sonraki aşamada, bu proses planlarındaki operasyonlar için makine kontrolleri ile (Parça 1 - $\mu_{12}, \mu_{21}, \mu_{32}, \mu_{52}$, Parça 2- $\mu_{11}, \mu_{24}, \mu_{32}, \mu_{43}$), operasyonların makinelerle atanması gerçekleştirilmiştir.

Tablo 3.3'te, Şekil 3.4'teki üretim kontrollerinin ifade ettiği, klasik atölye çizelgeleme problemi yer almaktadır. Bu kontrollerin farklı bir kombinasyonu, yine farklı bir klasik

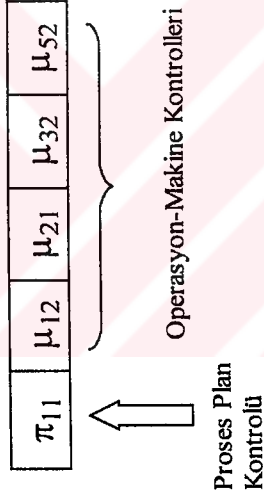
atölye çizelgeleme problemini ifade etmektedir. Dolayısıyla esnek atölye çizelgeleme problemleri için oluşturulan Bağlam Bağımsız Gramer modeli ile karar problemi, bu kontrollerin en uygun kombinasyonunun bulunması haline dönüşmektedir.

Tablo 3.3 Seçilen Kontrollere Göre Proses Planlar ve Makineler (İşlem Süreleri)

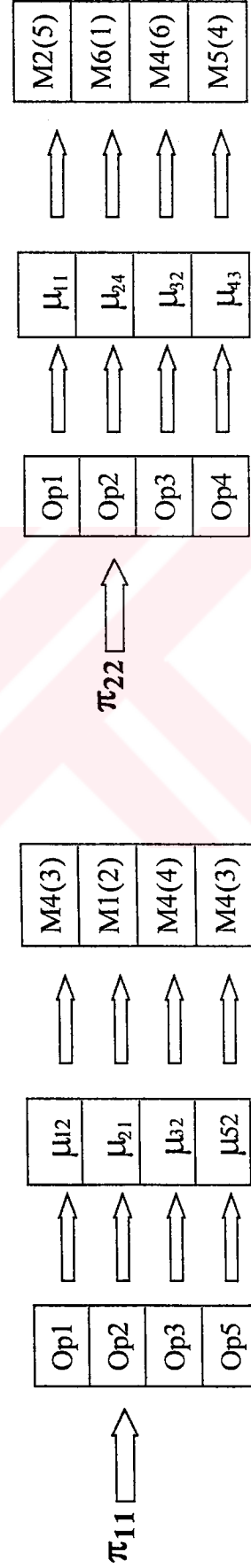
Parça	Operasyon Sıraları			
Parça 1	Op1	Op2	Op3	Op5
	Makine4(3)	Makine1(2)	Makine4(4)	Makine4(3)
Parça 2	Op1	Op2	Op3	Op4
	Makine2(5)	Makine6(1)	Makine4(6)	Makine5(4)
Parça 3	Op1	Op3	Op5	
	Makine4(6)	Makine2(3)	Makine5(4)	
Parça 4	Op1	Op4	Op3	
	Makine4(2)	Makine1(1)	M4(3)	
Parça 5	Op5	Op3	Op4	
	Makine3(6)	Makine2(3)	Makine6(1)	
Parça 6	Op1	Op5	Op4	
	Makine4(6)	Makine4(7)	Makine5(1)	



Şekil 3.4 Örnek Çözüm Dizisi Gösterimi



Şekil 3.5 Parça 1 İçin Kontroller



Şekil 3.6 Parça 1 İçin Operasyon ve Makineler (İşlem Süreleri)

Şekil 3.7 Parça 2 İçin Operasyon ve Makineler (İşlem Süreleri)

3.4 SONUÇ

Bu bölümde, Dil Teorisi yaklaşımı ile Bağlam Bağımsız Gramer'ler kullanılarak, esnek atölye çizelgeleme problemi modellenmiştir. Bu yeni yaklaşım, proses plan esnekliğini de içeren karmaşık yapıda esnek atölye çizelgeleme probleminin modellenmesini basitleştirerek, sistematik bir gösterimle ifade edilmesini sağlamıştır. Bunun sonucunda, esnek atölye çizelgeleme problemini, klasik atölye çizelgeleme problemleri haline dönüştüren bir sistem elde edilmiştir. Sonraki aşamada, üretim kontrollerinin farklı kombinasyonları ile elde edilen klasik atölye çizelgeleme problemlerinden, performans kriterleri açısından en uygun olanlarının belirlenmesi amacıyla çok objektifli tabu aramaya dayalı bir çözüm yaklaşımı uygulanacaktır.



BÖLÜM 4

4 ESNEK ATÖLYE ÇİZELGELEME PROBLEMİNE ÇÖZÜM YÖNTEMİ GELİŞTİRİLMESİ

4.1 GİRİŞ

Çalışmanın bu bölümünde, esnek atölye çizelgeleme problemine çözüm yöntemi olarak Baykasoğlu, Owen ve Gindy (1999a, 1999b) tarafından literatüre kazandırılan çok objektifli tabu arama optimizasyon yaklaşımına dayalı genel bir çözüm algoritması geliştirilmiştir. Öncelikle Baykasoğlu ve Owen, Gindy (1999a, 1999b) tarafından geliştirilen çok objektifli tabu arama algoritması, bileşenleri ile birlikte açıklanmış, daha sonra algoritmanın esnek atölye çizelgeleme problemine uyarlanması üzerinde durulmuştur. Sıralama kurallarına dayalı bir çizelgeleme yöntemi olan Giffler ve Thompson algoritmasının işleyişi açıklanarak, Bölüm 3.3.1’de yer alan örnek problem üzerinde çok objektifli tabu arama ve Giffler ve Thompson algoritmasının çözümü, aşamalarıyla ortaya konulmuştur.

4.2 ÇOK OBJEKTİFLİ TABU ARAMA ALGORİTMASI

Tabu arama, tek objektifli optimizasyon problemleri için geliştirilmiş bir komşuluk arama algoritmasıdır. Tek objektifli tabu arama algoritmasının temel aşamaları;

- Başlangıç çözümünün *belirlenmesi*,
- Komşu çözümlerin *türetilmesi*,
- Komşu çözümlerin içerisinde en iyi çözümün *seçilmesi*,
- Seçilen çözümün tabu listesinde yer alıp almadığının *kontrol* edilmesi,
- Seçilen çözüm tabu listesinde ise aspirasyon kriterinin *kontrol* edilmesi,

- Tabu listesinin ve en iyi çözüm dizisinin *güncellenmesidir*.

Algoritma belirlenmiş olan durdurma kriteri/kriterleri sağlanana kadar aynı aşamaları tekrar eder.

Tabu arama algoritmasının çok objektifli optimizasyona uygunluğu, aynı anda birden fazla komşu çözüm üzerinde çalışmasından kaynaklanmaktadır. Tabu arama algoritmasını çok objektifli hale dönüştürülebilmesi için *seçim* ve *güncelleme* aşamalarının yeniden tanımlanması gerekmektedir. Diğer aşamalar tek objektifli tabu arama algoritması ile benzer şekilde işlemektedir (Baykasoğlu; Owen; Gindy; 1999b, 963-964).

Çok objektifli tabu arama algoritmasının, tek objektifli tabu arama algoritmasına göre en önemli farkı komşu çözümler arasından en iyi çözümün belirlenmesidir. Tek objektifli tabu aramada, performans kriteri tek olduğundan en iyi çözümün belirlenmesi kolaydır. Ancak çok objektifli optimizasyon problemlerinde aynı anda birden fazla performans kriteri (bazıları çelişen kriterler olabilir) ele alındığından en iyi çözüm(ler)ün belirlenmesi için Bölüm 2.5.1’de açıklanan farklı çözüm yaklaşımlarının uygulanması gerekmektedir. Geliştirilen çok objektifli tabu arama yaklaşımı, Pareto optimizasyona dayalı bir teknik olup, çözüm süreci sonunda Pareto optimal çözümlerin elde edilmesine yönelik bir işleyişe sahiptir.

Pareto optimallik kavramı Bölüm 2.5’de detaylı açıklanmakla birlikte, genel olarak çok objektifli optimizasyon problemlerinde optimal çözümleri belirlemekte kullanılmaktadır. Pareto optimal çözüm şu şekilde tanımlanmaktadır: Eğer $x \in S$ olan hiçbir çözüm için, $F_i(x) \leq F_i(x^*)$ $i=1,2,3,...,k$, iken en az bir objektif için $F_i(x) < F_i(x^*)$ şartı sağlanmıyorsa, $x^* \in S$ çözümü Pareto optimaldir. Diğer bir deyişle, x^* çözümünde eğer hiçbir objektif fonksiyonu, bir diğerini düşürmeden iyileştirilemiyorsa x^* çözümü Pareto optimaldir. Buna bağlı olarak, çok objektifli bir optimizasyon probleminin birden fazla Pareto optimal çözümü olabilmektedir. Çok objektifli kombinatoriyal optimizasyon problemlerinin, NP-zor problemler arasında yer almasından dolayı, çözüm sürecinde modern sezgisel yöntemler tercih edilmektedir (Baykasoğlu; 2002, 4524).

Çok objektifli tabu arama algoritmasında, Pareto optimal çözümlerin belirlenebilmesi ve saklanabilmesi amacıyla, tabu listesine ilave olarak iki liste daha tanımlanmıştır.

- Pareto Listesi: Algoritma tarafından bulunan, diğer çözümler tarafından bastırılmamış olan çözümler arasından seçilen Pareto optimal çözümlerin tutulduğu listedir.
- Aday Liste: Algoritmanın bir iterasyonunda, Pareto listesi için seçilmiş olan çözümlerin dışında kalan Pareto optimal çözümlerin saklandığı listedir. Algoritmanın arama alanı içerisinde yayılımını sağlamak amacıyla, bu çözümlerden, sonraki iterasyonlarda Pareto optimallik özelliği taşımaya devam edenler, kök çözüm olarak seçilebileceklerdir.

Çok objektifli tabu arama algoritmasının bileşenleri aşağıdaki gibi tanımlanmıştır (Baykasoğlu; Owen; Gindy; 1999a, 964-967) :

Başlangıç Çözümü: Rasgele seçilmiş veya bilinen bir uygun çözüm, başlangıç çözümü olarak belirlenir.

Komşu Çözümlerin Türetilmesi: Baykasoğlu, Owen ve Gindy (1999a, 1999b) tarafından önerilen orijinal çok objektifli tabu arama algoritmasında, tamsayılı, 0-1, kesikli ve sürekli değişkenler için komşu çözümlerin türetilmesine yönelik farklı formüller uygulanmıştır (4.1, 4.2, 4.3, 4.4).

$$\text{Tamsayılı değişken} : x_i^* = x_i + \text{integer}[(2 * \text{rasgele}() - 1) * si_i] \quad (4.1)$$

$$\text{0-1 değişken} : x_i^* = \begin{cases} 1 & \text{eger } x_i = 0 \\ 0 & \text{eger } x_i = 1 \end{cases} \quad (4.2)$$

$$\text{Kesikli değişken} : x_i^* = d_{(1+\text{tamsayılı}[(2 * \text{rasgele}() - 1) * sd_i])} \text{ eger } x_i = d_i \quad (4.3)$$

$$\text{Sürekli değişken} : x_i^* = x_i + (2 * \text{rasgele}() - 1) * sc_i \quad (4.4)$$

x_i : i. değişkenin, komşuluk geçişinden önceki değeri

x_i^* : i. değişkenin komşuluk geçişinden sonraki değeri

$\text{rasgele}()$: (0,1) aralığından rasgele sayı türetme fonksiyonu

si_i, sd_i, sc_i : tamsayı, kesikli ve sürekli değişkenler için geçiş aralığı

d_l : Kesikli değişkenin l . elemanı

$tamsayı[]$: Bir reel sayıyı tamsayıya çeviren fonksiyon

Algoritmada, değişken türüne göre uygun geçiş stratejileri ile kök çözümden, belirlenen sayıda, tabu olmayan uygun komşu çözümler türetilir. Ayrıca komşu çözümlerin türetilmesi esnasında göz önünde bulundurulması gereken bir diğer faktör de, komşu çözümün kök çözüm tarafından bastırılmamış olmasıdır.

Kök çözümün Seçilmesi: Kök çözümün seçimi, Pareto optimallik kavramına göre gerçekleştirilmektedir. Buna bağlı olarak:

- Her bir komşu çözüm vektörü için objektif fonksiyon değerleri hesaplanır.
- Komşu çözümler arasından aday kök çözümler belirlenir. Aday kök çözümlerin;
 - diğer komşu çözümler,
 - Pareto listesindeki çözümler,
 - aday listesindeki çözümler

tarafından bastırılmamış olmaları gerekmektedir.

Aday çözümlerden rasgele seçilen birisi, yeni kök çözüm olarak belirlenir.

Eğer mevcut komşu çözümler arasında hiç aday çözüm bulunmamışsa, aday listesindeki en eski çözüm yeni kök çözüm olarak atanır.

Algoritmada tanımlanan seçim stratejisine göre, diğer çözümler tarafından bastırılmış çözümler elenmektedir. Algoritmanın amacı, çözüm süreci sonunda sadece bastırılmamış Pareto optimal çözümleri bulmaktır.

Listelerin Güncellenmesi: Pareto listesinin ilk elemanı başlangıç çözüm vektörüdür. Algoritmanın her iterasyonunda, komşu çözümlerin herhangi biri tarafından bastırılmış olan aday ve Pareto listesindeki çözümler, bu listelerden çıkarılırlar. Komşu

çözümlerden kök çözüm olarak belirlenen çözüm, Pareto listesine eklenir. Kalan Pareto optimal komşu çözümler ise aday listesine eklenir.

Algoritma, belirli sayıda en son ulaşılmış kök çözümleri, bu çözümlere geri dönüşü engellemek amacıyla tabu listesinde tutmaktadır. Tabu listesi dairesel bir liste olup, liste dolduğunda ilk giren eleman listeden çıkarılmaktadır.

Aspirasyon Kriteri: Eğer tabu listesinde, çözümün kendisi tutulabiliyorsa aspirasyon kriterinin tanımlanmasına gerek yoktur. Ancak probleme bağlı olarak, tabu listesinde çözümün kendisini saklamak hem alan, hem de çözüm süresi açısından etkin bir yöntem olmayabilir. Bu durumda, çözümün kendisinin yerine, çözümü ifade eden özellikleri tutmak uygun olabilir. Ancak, ileriki iterasyonlarda, aynı çözüm özelliklerine tekrar ulaşıldığında, bu özellikler farklı çözümler ve dolayısıyla farklı objektif fonksiyon değerleri ortaya çıkarabilmektedir. Böyle bir durumda, bu çözümleri tabu listesinde yer aldığı için doğrudan engellemek optimal çözümün kaçırılmasına sebep olabilmektedir. Bunu önlemek amacıyla, önerilen çok objektifli tabu arama algoritmasında aspirasyon kriteri şöyle tanımlanmıştır;

Eğer herhangi bir komşu çözüm, Pareto ve aday listedeki çözümler ile kök çözüm tarafından bastırılmamışsa, tabu listesinde olmasına rağmen kabul edilir.

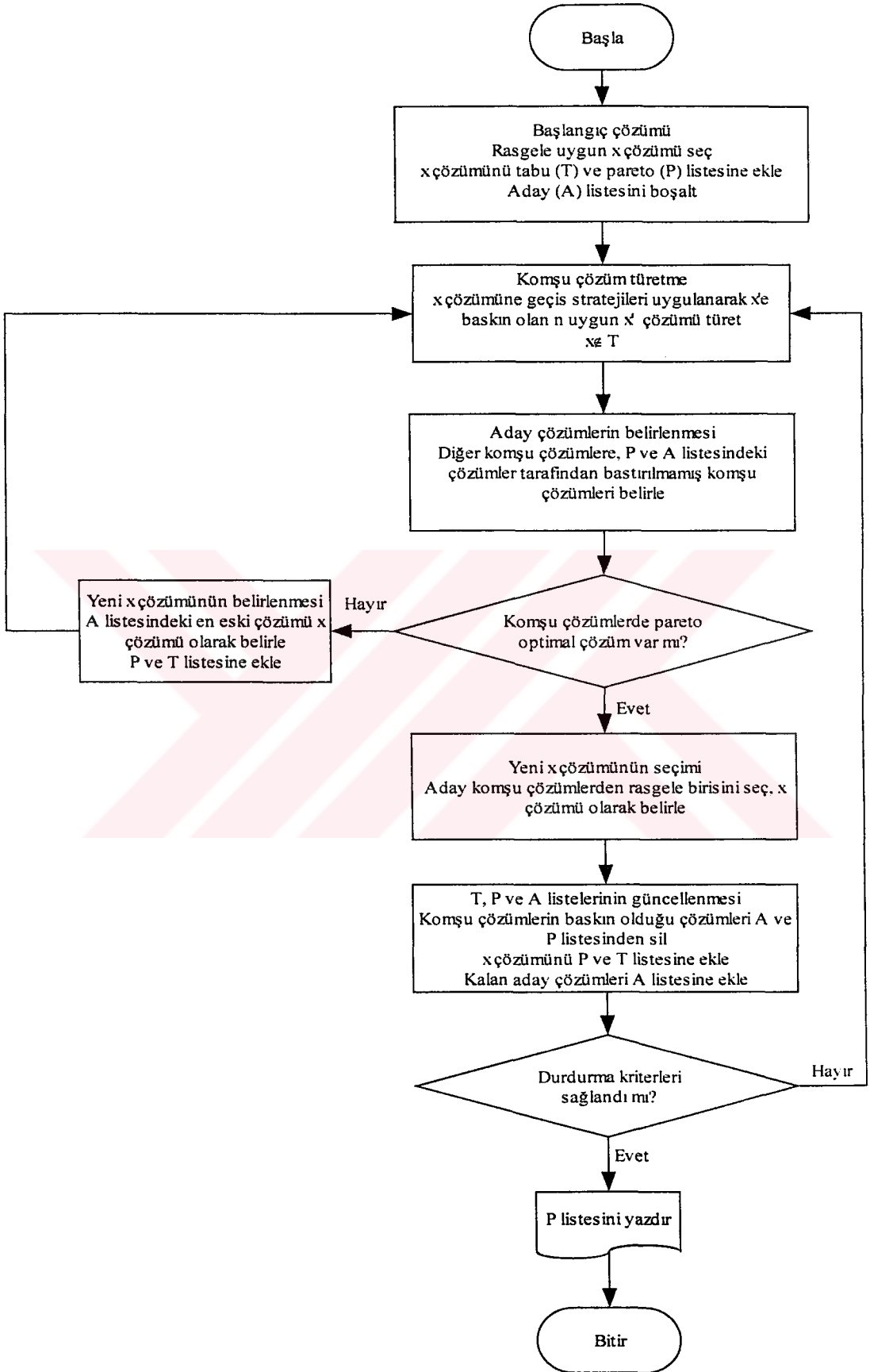
Sonlandırma Kriteri:

- Eğer algoritma belirlenmiş bir iterasyon sayısı kadar tekrar etmişse,
- Eğer aday listesi boşsa ve algoritma yeni aday çözümler bulamıyorsa

algoritma sonlandırılır.

Bu kriterin uygulanmasında dikkat edilecek nokta, iterasyon sayısının problemin optimal çözümüne yaklaşımı sağlayacak kadar büyük seçilmesidir.

Çok objektifli tabu arama algoritmasının, tanımlanan bileşenleri ile ilişkili olarak, genel işleyişi Şekil 4.1'deki akış diyagramı ile gösterilmiştir.



Şekil 4.1 Çok Objektifli Tabu Arama Algoritması

4.3 ESNEK ATÖLYE ÇİZELGELEME PROBLEMİNİN ÇOK OBJEKTİFLİ TABU ARAMA ALGORİTMASI İLE ÇÖZÜMÜ

Atölye çizelgeleme probleminin genel hali olan esnek atölye çizelgeleme problemi, Dil Teorisi içerisinde yer alan Bağlam Bağımsız Gramer'ler ile modellenmiş ve çok objektifli tabu arama algoritması ile çözülmüştür.

Esnek atölye çizelgeleme problemi, bir kombinatoriyal optimizasyon problemi olarak çözümü zor problemler (NP-Zor) arasında yer almasından ve gerçek üretim sistemlerinde birden fazla objektifle çalışılmasından dolayı, problemin çözümüne yönelik olarak çok objektifli tabu arama algoritması uygulanmıştır.

Esnek atölye çizelgeleme problemi içerisinde yer alan rotalama ve sıralama problemlerine ilave olarak, proses planı seçimi problemi de çalışma kapsamı içerisine dahil edilmiştir.

Bölüm 3'te detaylı açıklandığı üzere, esnek atölye çizelgeleme problemi Bağlam Bağımsız Gramer yaklaşımı ile modellenmiştir.

Oluşturulan gramer içerisindeki her türetim bir kontrol ile belirlenmiştir.

Türetimler sonucunda elde edilen kontrol kombinasyonları, esnek atölye çizelgeleme problemini klasik atölye çizelgeleme problemine indirgeyecek şekilde tasarlanmıştır.

Baykasoğlu, Owen ve Gindy (1999a 1999b) tarafından geliştirilen çok objektifli tabu arama algoritması, esnek atölye çizelgeleme problemini, klasik atölye çizelgeleme problemine indirgeyen kontrol kombinasyonlarından, belirlenen performans kriterlerine en uygun olan kombinasyonları belirlemek amacıyla kullanılmıştır. Her bir kontrol kombinasyonu ile ortaya çıkan klasik atölye çizelgeleme problemi, Giffler ve Thompson (1960)'un sıralama kurallarına dayalı çizelgeleme algoritması ile çözülmüştür.

Çalışmada, atölye çizelgeleme problemlerinin çözümü için, Giffler ve Thompson çizelgeleme algoritmasında kullanılmak üzere 10 farklı sıralama kuralı belirlenmiştir. Sıralama kuralları Tablo 4.1'de formülasyonları ile birlikte gösterilmiştir. Ayrıca çok

objektifli tabu arama algoritması için Tablo 4.2’de yer alan 12 farklı objektif fonksiyonu ele alınmıştır. Bu objektif fonksiyonlarından, problemin çözümü için seçilen fonksiyonlar, Tablo 4.2’deki sıra numaraları ile algoritmaya girdi olarak verilmektedir.

Probleme uygulanan çözüm yönteminin ortaya konulması amacıyla, çok objektifli tabu arama algoritmasının bileşenleri, bir örnek problem üzerinde detaylı açıklanmıştır. Bölüm 3.3.1’de bağlam bağımsız gramerler ile modellenen, Baykasoğlu (2002)’den alınan test problem 2, çözüm aşamaları gerçekleştirilmek üzere örnek problem olarak ele alınmıştır.



Tablo 4.1 Sıralama Kuralları

No	Sıralama Kural	Açıklama	Formulasyon
1	EKİZ(SPT)	En kısa işlem zamanı: En kısa işlem süresine sahip operasyonu seç	$enküçük \sum_{j=1}^n \{p_{ijk}\}$
2	ETT(EDD)	En erken teslim tarihi : En erken teslim tarihine sahip operasyonu seç	$enküçük \sum_{j=1}^n \{d_j\}$
3	EUİZ(LPT)	En uzun işlem zamanı : En uzun işlem süresine sahip operasyonu seç	$enbüyük \sum_{j=1}^n \{p_{ijk}\}$
4	KYİZ(MWRT)	Kalan en fazla toplam işlem zamanı: Kendisi ve kendisinden sonraki işlem sürelerinin toplamı en fazla olan operasyonu seç	$enbüyük \sum_{j=1}^n \left\{ \sum_{i=l}^{o_j} p_{ijk} \right\}, l \in \{1, \dots, o_j\}$
5	KDİZ(LWRT)	Kalan en az toplam işlem zamanı: Kendisi ve kendisinden sonraki işlem sürelerinin toplamı en düşük operasyonu seç	$enküçük \sum_{j=1}^n \left\{ \sum_{i=l}^{o_j} p_{ijk} \right\}, l \in \{1, \dots, o_j\}$
6	İZBK(PDR)	İşlem zamanı/ Kalan toplam zaman oranı en düşük olan operasyonu seç	$enküçük \sum_{j=1}^n \left\{ p_{ijk} / \sum_{i=l}^{o_j} p_{ijk} \right\}, l \in \{1, \dots, o_j\}$
7	EBZ(ERD)	En erken işlem görebilme zamanı: En erken işleme başlama zamanına sahip operasyonu seç	$enküçük \sum_{j=1}^n \{r_{ijk}\}$
8	EKB(MS)	Teslim tarihine en yakın operasyonu seç	$enküçük \sum_{j=1}^n \{enbüyük \{d_j - p_{ijk} - t, 0\}\}$
9	EFİS(LNS)	Kendinden sonra en fazla işlem sayısına sahip operasyonu seç	$enbüyük \sum_{j=1}^n \left\{ \sum_{i=l+1}^{o_j} 1 \right\}, O_j \text{ için}, l \in \{1, \dots, o_j\}$
10	AEKİZ(WSP)	Ağırlıklandırılmış en kısa işlem süresine sahip operasyonu seç	$enbüyük \sum_{j=1}^n \{w_j / p_{ijk}\}$

Tablo 4.2 Objektif Fonksiyonlar

No	Objektif Fonksiyonu	Formulasyon
1	Toplam Gecikme	$\sum_{i=1}^n T_i$
2	Toplam Tamamlanma Zamanı	$\sum_{i=1}^n C_i$
3	Yük Dengesi	$\sum_{k=1}^m (U_k - MU) / m$
4	Ortalama Akış Süresi	$\sum_{i=1}^n C_i / n$
5	Ortalama Gecikme	$\sum_{i=1}^n T_i / n$
6	Geciken İş Sayısı	N_T
7	Erken Tamamlanma+Gecikme	$\sum_{i=1}^n (E_i + T_i)$
8	Tamamlanma Zamanı	$C_{enbüyük}$
9	Ortalama Bekleme Süresi	$\sum_{i=1}^n W_i / n$
10	En Fazla Gecikme	$T_{enbüyük} = enbüyük \{T_i\}_{i=1}^n$
11	En Yüksek Makine İş Yüğü	$enbüyük \{WL_k\}_{k=1}^m$
12	Toplam Makine İş Yüğü	$\sum_{k=1}^m WL_k$

Notasyon

n : iş sayısı

m : makine sayısı

$\{Mk\}_{k=1}^m$: makineler

o : toplam operasyon sayısı

$\{O_j\}$: j. iş için operasyon sırası, $\{O_j\} \subseteq \{O_1, \dots, O_o\}$

$\{M_i\}$: i. operasyon için makine kümesi, $\{M_i\} \subseteq \{M_1, \dots, M_m\}$

O_{ij} : j. işin i. operasyonu

d_j : j. işin teslim tarihi

w_j : j. işin ağırlığı

p_{ijk} : j. işin i. operasyonunun k. makinedeki işlem süresi

r_{ijk} : j. işin i. operasyonunun k. makinedeki işleme hazır olma zamanı

$$r_{ijk} = \text{enbüyük} \{r_k, r_{ij}\}$$

r_k : k. makinenin işleme hazır olma zamanı

r_{ij} : j. işin i. operasyonunun işleme hazır olma zamanı

p_i : i. işin toplam işlem süresi

C_i : i. işin tamamlanma zamanı

$C_{\text{enbüyük}}$: tüm işlerin tüm makinelerde tamamlanma zamanı, enbüyük $\{C_i\}_{i=1}^{i=n}$

T_i : i. işin gecikmesi, enbüyük $\{C_i - d_i, 0\}$

E_i : i. işin erken tamamlanma süresi, enbüyük $\{d_i - C_i, 0\}$

N_T : Geciken iş sayısı (eğer $T_i > 0$)

W_i : i. işin bekleme süresi, $(C_i - p_i)$

WL_k : k. makinenin toplam işlem süresi, $k=1..m$

EF_k : k. makinenin en son operasyonu tamamlama zamanı, $k=1..m$

U_k : k. makinenin kullanım oranı, $\{WL_k / EF_k\}_{k=1}^m$

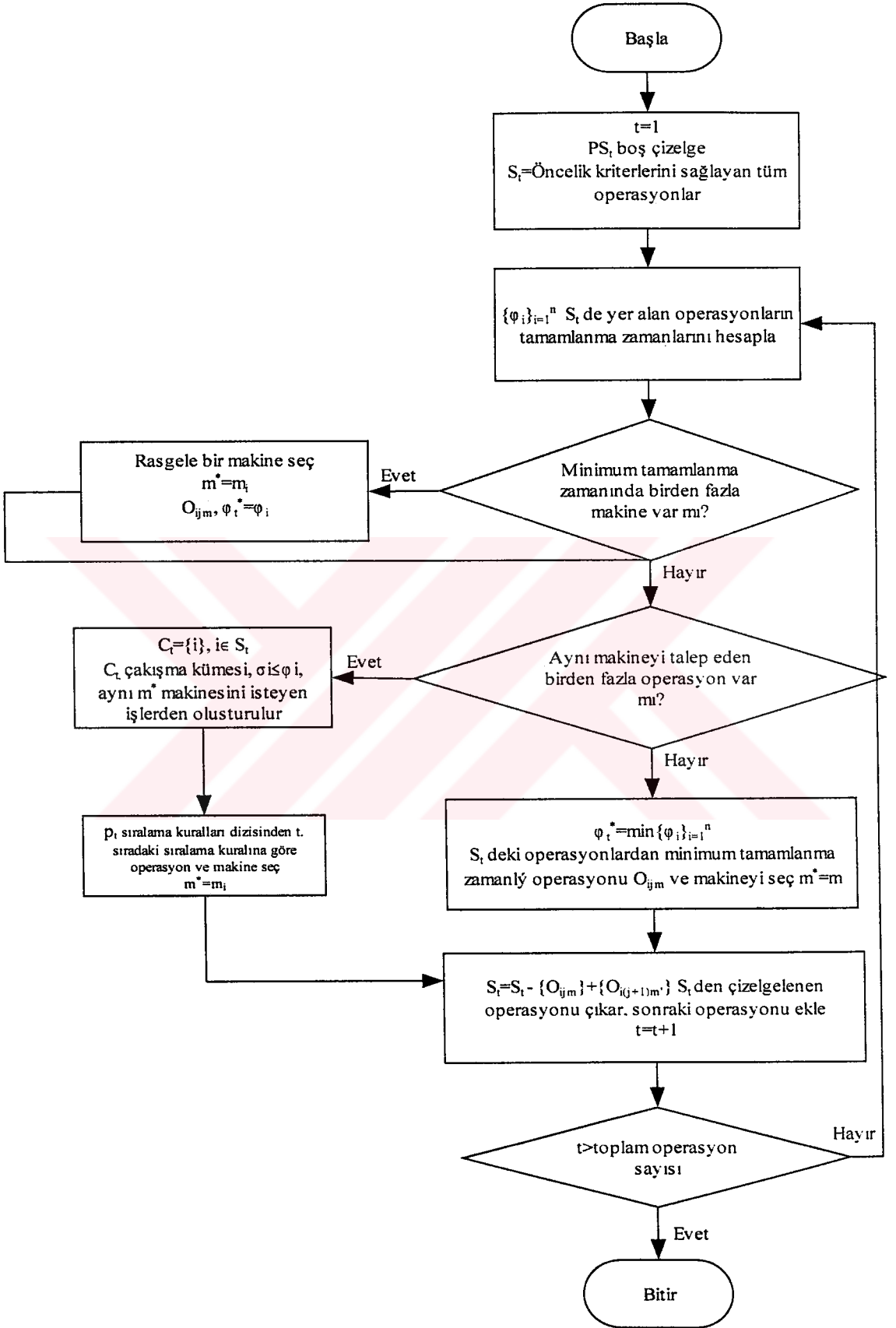
MU : Makinelerin ortalama kullanım oranı, $\sum_{k=1}^m U_k / m$

4.3.1 Giffler ve Thompson Sıralama Kuralı Temelli Çizelgeleme Algoritması

Çalışmanın bu bölümünde, gramer modeli oluşturulan esnek atölye çizelgeleme probleminin, türetim kontrolleri ile atölye çizelgeleme problemlerine indirgenen yapının, Giffler ve Thompson(1960) tarafından ortaya konulan sıralama kurallarına dayalı çizelgeleme algoritması ile çözümü incelenmiştir. Bu amaçla, Giffler ve Thompson algoritması açıklanmış, Bölüm 3.3.1’de ele alınan problemin, bu bölümde bulunan son Pareto optimal çözüm dizisi ile örneklendirilerek çözülmüştür. Atölye çizelgeleme problemlerinin çözümü için Giffler ve Thompson (1960) algoritmasının seçilme sebebi, sıralama kurallarının, geliştirilen algoritmanın çözüm performansı üzerindeki etkilerinin, çalışmanın sonunda irdelenecek olmasıdır.

Giffler ve Thompson algoritması ile atölye çizelgeleme problemlerinin çözümü için öncelikle çizelgelenecek tüm operasyonlara uygulanacak sıralama kurallarının belirlenmesi gerekmektedir. Sıralama kuralı dizisinde yer alan eleman sayısı, her bir parça için operasyon sayılarının toplamıdır. Bu dizinin elemanlarını, Tablo 4.1’de yer alan sıralama kurallarının numaraları oluşturmaktadır.

Giffler ve Thompson algoritmasının akış diyagramı Şekil 4.2’de görülmektedir.



Şekil 4.2 Giffler ve Thompson Çizelgeleme Algoritması

Algoritmada kullanılan notasyon :

PS_t : t. iterasyona kadar elde edilmiş kısmi çizelge

S_t : t. iterasyonda çizelgelenebilir (öncelik kriterini sağlayan) operasyonlar kümesi

σ_i : Operasyon i'nin en erken işleme başlayabileceği zaman $i \in S_t$

φ_i : Operasyon i'nin en erken tamamlanabileceği zaman $i \in S_t$

C_t : t. iterasyonlarda çakışan operasyonların kümesi

Algoritmanın aşamaları:

1. İterasyon =1, PS_t , boş çizelge, $S_t = \{\text{Öncelik kriterini sağlayan tüm operasyonlar}\}$
2. $\varphi_t^* = \min_{i \in S_t} \{\varphi_i\}$, S_t 'de yer alan operasyonlardan tamamlanma zamanı en küçük olan operasyon ve makine m^* belirlenir. Eğer birden fazla makine varsa, rasgele birisi seçilir
3. C_t çakışma kümesi, aynı m^* makinesini talep eden ve $\sigma_i \leq \varphi_i^*$ işleme başlama zamanı belirlenen en küçük tamamlanma zamanından küçük olan, ($i \in S_t$) S_t 'deki tüm operasyonlar ile oluşturulur.
4. C_t 'den bir operasyon, sıralama kuralları dizisindeki t. sıralama kuralına göre belirlenir ve PS_t 'ye eklenir. Eğer sıralama kuralına uygun birden fazla operasyon varsa, rasgele birisi seçilir.
5. S_t kümesi, çizelgelenen operasyonun çıkarılması ve yerine izleyen operasyonun eklenmesi ile güncellenerek S_{t+1} oluşturulur.
6. Tüm operasyonlar çizelgelene kadar 2. aşamaya dönlür.

Algoritmanın işleyişinin bir örnek üzerinde gösterilmesi amacıyla Bölüm 4.3.2'de çok objektifli tabu arama algoritması ile elde edilen objektif fonksiyon değerleri (tamamlanma zamanı, en büyük gecikme) $F1=18$, $F2=0$ olan son Pareto optimal çözüm dizisi çizelgelenmiştir. Tablo 4.4'te, algoritmanın her bir iterasyonunda gerçekleştirilen işlemler sıralanmıştır. Şekil 4.3'te bu çözüm dizisindeki proses plan ve makine üretim kontrolleri ile sıralama kuralları dizisi yer almaktadır.

Türetim Kontrolleri



1	3	1	2	2	1	1	1	1	1	1	3	1	2	1	2	3	1	1	1	1	2	2	3	4
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Sıralama
Kuralları

5	3	1	3	5	1	6	2	7	6	10	8	1	1	3	4	10	1	1	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	---	---	---	---	---	----	---	---	----

Şekil 4.3 Örnek Problem Son Çözüm Dizisi

Çözüm dizisindeki bu türetim kontrolleri ile seçilen proses planlar, operasyonlar için makineler ve işlem süreleri Tablo 4.3'te yer almaktadır.

Tablo 4.3 Çözüm Dizisi İçin Proses Planlar, Operasyon Makine Atamaları (İşlem Süreleri)

Parça	Operasyon Sıraları			
Parça 1	Op1	Op2	Op3	Op5
	M6(3)	M1(2)	M4(4)	M4(3)
Parça 2	Op1	Op2	Op4	Op3
	M2(5)	M1(1)	M1(4)	M2(6)
Parça 3	Op1	Op5	Op3	
	M6(6)	M3(4)	M4(3)	
Parça 4	Op1	Op4	Op3	
	M4(2)	M5(1)	M2(3)	
Parça 5	Op5	Op4	Op3	
	M3(6)	M1(1)	M2(3)	
Parça 6	Op1	Op5	Op4	
	M4(6)	M5(7)	M6(1)	

Çözüm Dizisi İçin Giffler ve Thompson Algoritması :

Tablo 4.4 Çözüm Dizisi İçin Giffler ve Thompson Algoritması

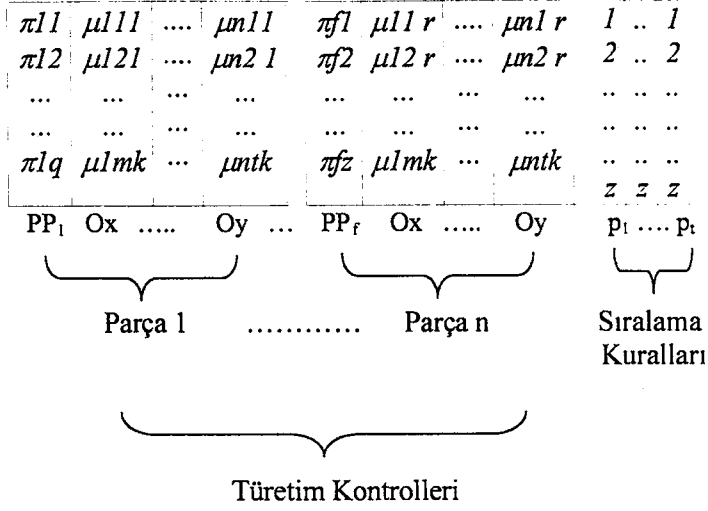
İterasyon 1	$S_1 = \{O_{116}, O_{212}, O_{316}, O_{414}, O_{513}, O_{614}\}$ $\varphi_1 = \{3, 5, 6, \underline{2}, 6, 6\}$ $\varphi_1^* = 2$, $m^* = 4$, $C_1 = \{O_{414}, O_{614}\}$ SKD[1]=5(KDİZ) $O_{414} = 6$, $O_{614} = 14$, $m^* = 4$, $PS_1 = \{O_{414}\}$
İterasyon 2	$S_2 = \{O_{116}, O_{212}, O_{316}, O_{425}, O_{513}, O_{614}\}$ $\varphi_2 = \{\underline{3}, 5, 6, \underline{3}, 6, 8\}$ $\varphi_2^* = \{3, 3\}$ $m = \{6, 4\}$, $m^* = 6$ (rasgele) $C_2 = \{O_{116}, O_{316}\}$ SKD[2]=3(EUİZ) $p_{0116} = p_{0316}$ olduğundan rasgele O_{116} seçilir. $m^* = 6$, $PS_2 = \{O_{414}, O_{116}\}$
İterasyon 3	$S_3 = \{O_{121}, O_{212}, O_{316}, O_{425}, O_{513}, O_{614}\}$ $\varphi_3 = \{5, 5, 9, \underline{3}, 6, 8\}$ $\varphi_3^* = 3$ $m^* = 5$, $C_3 = \{O_{425}\}$ O_{425} , $m^* = 5$, $PS_3 = \{O_{414}, O_{116}, O_{425}\}$
İterasyon 4	$S_4 = \{O_{121}, O_{212}, O_{316}, O_{432}, O_{513}, O_{614}\}$ $\varphi_4 = \{\underline{5}, \underline{5}, 9, 6, 6, 8\}$ $\varphi_4^* = \{5, 5\}$ $m^* = 2$ (rasgele), $C_4 = \{O_{212}, O_{432}\}$ SKD[4]=3 $O_{212} = 5$, $O_{432} = 3$, $m^* = 2$, $PS_4 = \{O_{414}, O_{116}, O_{425}, O_{212}\}$
İterasyon 5	$S_5 = \{O_{121}, O_{221}, O_{316}, O_{432}, O_{513}, O_{614}\}$ $\varphi_5 = \{\underline{5}, 6, 9, 8, 6, 8\}$ $\varphi_5^* = \{5\}$ $m^* = 1$, $C_5 = \{O_{121}, O_{221}\}$ SKD[5]=5 $O_{121} = 9$, $O_{221} = 11$, $m^* = 1$, $PS_5 = \{O_{414}, O_{116}, O_{425}, O_{212}, O_{121}\}$
İterasyon 6	$S_6 = \{O_{134}, O_{221}, O_{316}, O_{432}, O_{513}, O_{614}\}$ $\varphi_6 = \{9, \underline{6}, 9, 8, \underline{6}, 8\}$ $\varphi_6^* = \{6, 6\}$ $m^* = 1$ (rasgele), $C_6 = \{O_{221}\}$ O_{221} , $m^* = 1$, $PS_6 = \{O_{414}, O_{116}, O_{425}, O_{212}, O_{121}, O_{221}\}$
İterasyon 7	$S_7 = \{O_{134}, O_{231}, O_{316}, O_{432}, O_{513}, O_{614}\}$ $\varphi_7 = \{9, 10, 9, 8, \underline{6}, 8\}$ $\varphi_7^* = \{6\}$ $m^* = 3$, $C_7 = \{O_{513}\}$ O_{513} , $m^* = 3$, $PS_7 = \{O_{414}, O_{116}, O_{425}, O_{212}, O_{121}, O_{221}, O_{513}\}$
İterasyon 8	$S_8 = \{O_{134}, O_{231}, O_{316}, O_{432}, O_{521}, O_{614}\}$ $\varphi_8 = \{9, 10, 9, 8, \underline{7}, 8\}$ $\varphi_8^* = \{7\}$ $m^* = 1$, $C_8 = \{O_{231}, O_{521}\}$ SKD[8]=2 $O_{521} = 15$, $O_{231} = 21$, $m^* = 1$, $PS_8 = \{O_{414}, O_{116}, O_{425}, O_{212}, O_{121}, O_{221}, O_{513}, O_{521}\}$
İterasyon 9	$S_9 = \{O_{134}, O_{231}, O_{316}, O_{432}, O_{532}, O_{614}\}$ $\varphi_9 = \{9, 11, 9, \underline{8}, 10, \underline{8}\}$ $\varphi_9^* = \{8, 8\}$ $m^* = 4$ (rasgele), $C_9 = \{O_{134}, O_{614}\}$

	SKD[9]=7 $O_{614}=3$, $O_{134}=5$, $m^*=4$, $PS_9=\{O_{414}, O_{116}, O_{425}, O_{212}, O_{121}, O_{221}, O_{513}, O_{521}, O_{614}\}$
İterasyon 10	$S_{10}=\{O_{134}, O_{231}, O_{316}, O_{432}, O_{532}, O_{625}\}$ $\varphi_{10}=\{12, 11, 9, \underline{8}, 10, 15\}$ $\varphi_{10}^*=\{8\}$ $m^*=2$, $C_{10}=\{O_{432}, O_{532}\}$ SKD[10]=6 $O_{432}=1$, $O_{532}=1$, $m^*=2$(rasgele), $PS_{10}=\{O_{414}, O_{116}, O_{425}, O_{212}, O_{121}, O_{221}, O_{513}, O_{521}, O_{614}, O_{432}\}$
İterasyon 11	$S_{11}=\{O_{134}, O_{231}, O_{316}, -, O_{532}, O_{625}\}$ $\varphi_{11}=\{12, 11, \underline{9}, -, 11, 15\}$ $\varphi_{11}^*=\{9\}$ $m^*=6$, $C_{11}=\{O_{316}\}$ O_{316}, $m^*=6$, $PS_{11}=\{O_{414}, O_{116}, O_{425}, O_{212}, O_{121}, O_{221}, O_{513}, O_{521}, O_{614}, O_{432}, O_{316}\}$
İterasyon 12	$S_{12}=\{O_{134}, O_{231}, O_{323}, -, O_{532}, O_{625}\}$ $\varphi_{12}=\{12, \underline{11}, 13, -, \underline{11}, 15\}$ $\varphi_{12}^*=\{11, 11\}$ $m^*=2$(rasgele), $C_{12}=\{O_{532}\}$ O_{532}, $m^*=2$, $PS_{12}=\{O_{414}, O_{116}, O_{425}, O_{212}, O_{121}, O_{221}, O_{513}, O_{521}, O_{614}, O_{432}, O_{316}, O_{532}\}$
İterasyon 13	$S_{13}=\{O_{134}, O_{231}, O_{323}, -, -, O_{625}\}$ $\varphi_{13}=\{12, \underline{11}, 13, -, -, 15\}$ $\varphi_{13}^*=\{11\}$ $m^*=1$, $C_{13}=\{O_{231}\}$ O_{231}, $m^*=1$, $PS_{13}=\{O_{414}, O_{116}, O_{425}, O_{212}, O_{121}, O_{221}, O_{513}, O_{521}, O_{614}, O_{432}, O_{316}, O_{532}, O_{231}\}$
İterasyon 14	$S_{14}=\{O_{134}, O_{242}, O_{323}, -, -, O_{625}\}$ $\varphi_{14}=\{\underline{12}, 17, 13, -, -, 15\}$ $\varphi_{14}^*=\{12\}$ $m^*=4$, $C_{14}=\{O_{134}\}$ O_{134}, $m^*=4$, $PS_{14}=\{O_{414}, O_{116}, O_{425}, O_{212}, O_{121}, O_{221}, O_{513}, O_{521}, O_{614}, O_{432}, O_{316}, O_{532}, O_{231}, O_{134}\}$
İterasyon 15	$S_{15}=\{O_{144}, O_{242}, O_{323}, -, -, O_{625}\}$ $\varphi_{15}=\{15, 17, \underline{13}, -, -, 15\}$ $\varphi_{15}^*=\{13\}$ $m^*=3$, $C_{15}=\{O_{323}\}$ O_{323}, $m^*=3$, $PS_{15}=\{O_{414}, O_{116}, O_{425}, O_{212}, O_{121}, O_{221}, O_{513}, O_{521}, O_{614}, O_{432}, O_{316}, O_{532}, O_{231}, O_{134}, O_{323}\}$
İterasyon 16	$S_{16}=\{O_{144}, O_{242}, O_{334}, -, -, O_{625}\}$ $\varphi_{16}=\{\underline{15}, 17, 16, -, -, \underline{15}\}$ $\varphi_{16}^*=\{15, 15\}$ $m^*=5$(rasgele), $C_{16}=\{O_{625}\}$ O_{625}, $m^*=5$, $PS_{16}=\{O_{414}, O_{116}, O_{425}, O_{212}, O_{121}, O_{221}, O_{513}, O_{521}, O_{614}, O_{432}, O_{316}, O_{532}, O_{231}, O_{134}, O_{323}, O_{625}\}$
İterasyon 17	$S_{17}=\{O_{144}, O_{242}, O_{334}, -, -, O_{636}\}$ $\varphi_{17}=\{\underline{15}, 17, 16, -, -, 16\}$ $\varphi_{17}^*=\{15\}$ $m^*=4$, $C_{17}=\{O_{144}, O_{334}\}$ $O_{144}=3$, $O_{334}=3$, $m^*=4$(rasgele), $PS_{17}=\{O_{414}, O_{116}, O_{425}, O_{212}, O_{121},$

	$O_{221}, O_{513}, O_{521}, O_{614}, O_{432}, O_{316}, O_{532}, O_{231}, O_{134}, O_{323}, O_{625}, O_{144}\}$
İterasyon 18	$S_{18}=\{-, O_{242}, O_{334}, -, -, O_{636}\}$ $\varphi_{18}=\{-, 17, 18, -, -, \underline{16}\}$ $\varphi_{18}^*=\{16\}$ $m^*=6$, $C_{18}=\{O_{636}\}$ $O_{636}, m^*=6$, $PS_{18}=\{O_{414}, O_{116}, O_{425}, O_{212}, O_{121}, O_{221}, O_{513}, O_{521}, O_{614}, O_{432}, O_{316}, O_{532}, O_{231}, O_{134}, O_{323}, O_{625}, O_{144}, O_{636}\}$
İterasyon 19	$S_{19}=\{-, O_{242}, O_{334}, -, -, -\}$ $\varphi_{19}=\{-, \underline{17}, 18, -, -, -\}$ $\varphi_{19}^*=\{17\}$ $m^*=2$, $C_{19}=\{O_{242}\}$ $O_{242}, m^*=2$, $PS_{19}=\{O_{414}, O_{116}, O_{425}, O_{212}, O_{121}, O_{221}, O_{513}, O_{521}, O_{614}, O_{432}, O_{316}, O_{532}, O_{231}, O_{134}, O_{323}, O_{625}, O_{144}, O_{636}, O_{242}\}$
İterasyon 20	$S_{20}=\{-, -, O_{334}, -, -, -\}$ $\varphi_{20}=\{-, -, 18, -, -, -\}$ $\varphi_{20}^*=\{18\}$ $m^*=4$, $C_{20}=\{O_{334}\}$ $O_{334}, m^*=4$, $PS_{20}=\{O_{414}, O_{116}, O_{425}, O_{212}, O_{121}, O_{221}, O_{513}, O_{521}, O_{614}, O_{432}, O_{316}, O_{532}, O_{231}, O_{134}, O_{323}, O_{625}, O_{144}, O_{636}, O_{242}, O_{334}\}$

4.3.2 Çözüm Dizisi

Çok objektifli tabu arama algoritmasının aşamalarına geçilmeden önce, algorithma kullanılan çözüm dizisinin genel yapısı oluşturulacaktır. Bölüm 3'te detaylı açıklanan modelleme yaklaşımı ile her bir parça için proses plan alternatifini, seçilen proses planındaki her bir operasyon için makine alternatifini ifade eden türetim kontrolleri oluşturulmuştur.



Şekil 4.4 Çözüm Dizisi Sembolik Gösterimi

Şekil 4.4'te çözüm dizisinin sembolik gösterimi yer almaktadır. Bu yapıdan da görüldüğü üzere, çok objektifli tabu arama algoritmasında kullanılan çözüm dizisi;

- Esnek atölye çizelgeleme problemini klasik atölye çizelgeleme problemine dönüştüren *türetim kontrolleri*,
- Giffler ve Thompson algoritmasında kullanılmak üzere oluşturulan *sıralama kuralları* dizisi

olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır.

Türetim kontrollerinin ilk elemanı, Parça 1 için proses plan alternatifini ifade etmektedir. İzleyen kontroller ise 1. parçanın seçilen proses planının operasyonları için makine alternatifi kontrolleri olarak tasarlanmıştır. Proses plan alternatifini ifade eden kontroller rasgele belirlenmektedir. Operasyonların makine alternatiflerini gösteren kontroller ise Bölüm 3.3'te açıklanan, işlem sürelerine bağlı hesaplama yöntemi sonucu elde edilen olasılıklara göre seçilmektedir. Tüm parçalar için alternatif proses plan kontrolleri ile operasyonlar için makine alternatifi kontrolleri aynı şekilde belirlenerek çözüm dizisinin ilk kısmı oluşturulur. Çözüm dizisinin ikinci bileşeni olan sıralama

kuralları dizisi, çizelgelenecek tüm operasyonlar için Tablo 4.1’de yer alan sıralama kuralı numaraları arasından rasgele seçimle oluşturulur.

4.3.3 Çok Objektifli Tabu Arama Aşamaları

Esnek atölye çizelgeleme probleminin çözümüne yönelik, çok objektifli tabu arama algoritmasının aşamaları örnek problem ile birlikte açıklanmıştır. Problem verileri, Bölüm 3’te Tablo 3.1 ve Tablo 3.2’de yer almaktadır. Problemin çözümünde, *tamamlanma zamanı* ve *en büyük gecikme* olmak üzere iki objektif fonksiyon seçilmiştir. Ayrıca Giffler ve Thompson çizelgeleme algoritmasında kullanılmak üzere Tablo 4.1’de sıralanan 10 farklı sıralama kuralı kullanılmıştır.

Başlangıç çözümünün oluşturulması: Başlangıç çözümünün oluşturulması üç aşamada gerçekleştirilmektedir.

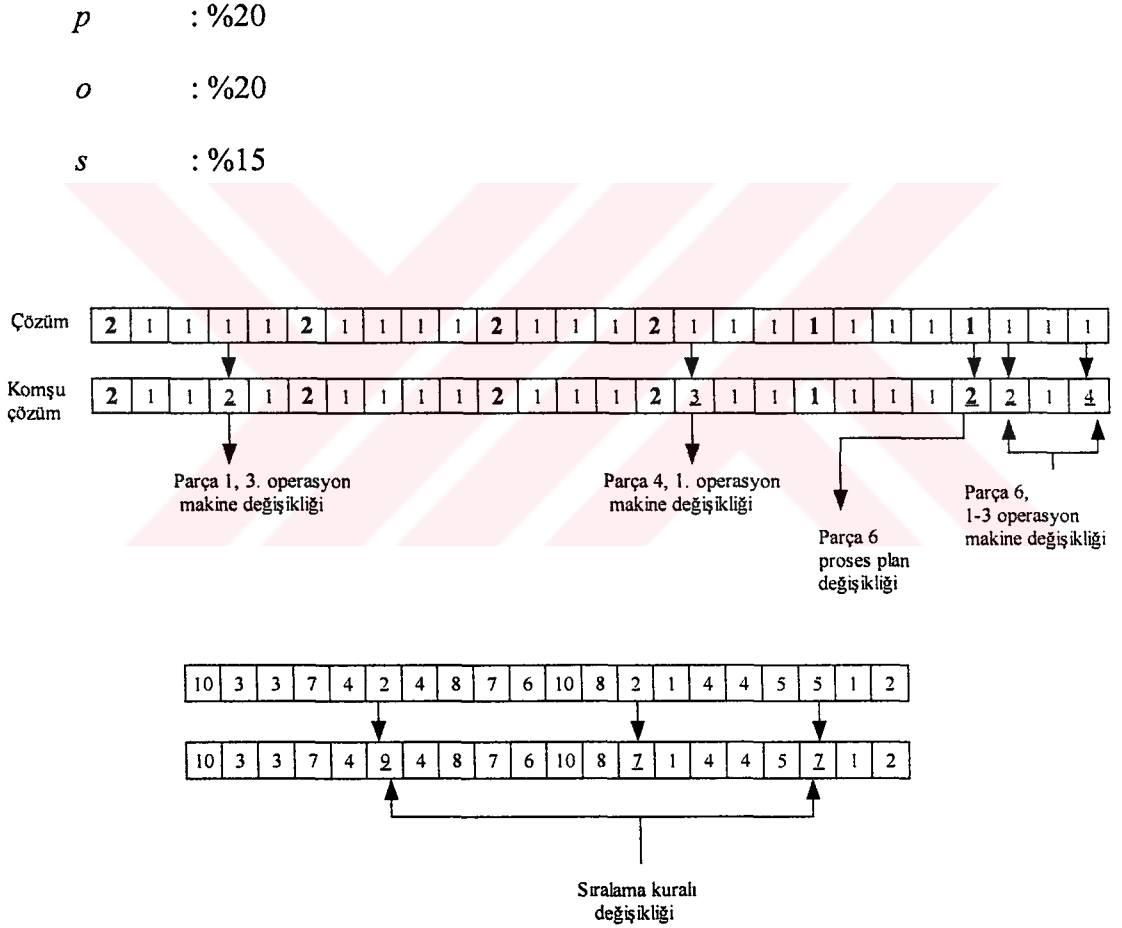
1. Her bir parça için proses plan alternatiflerinden birisi rasgele seçilir.
2. Parçaların seçilen proses planlarındaki her bir operasyon için, makine alternatifleri arasından birisi, seçilme olasılıklarına göre belirlenir.
3. Çizelgelenecek her bir operasyon için, sıralama kurallarından birisi rasgele seçilir.

Örnek problem için oluşturulmuş başlangıç çözümü Şekil 4.5’te gösterilmiştir.

- Elde edilen yeni çözüm dizisinin sıralama kurallarından, sıralama kuralı değişiklik oranına (s) göre k adet seçilerek, sıralama kuralları kümesinden belirlenen diğer sıralama kuralları ile değiştirilir.

Bu yöntemle elde edilen komşu çözümlerin tümü uygun olduğundan, komşu çözüm dizileri üzerinde herhangi bir değişikliğe gerek kalmamaktadır.

Şekil 4.5'te yer alan başlangıç çözümüne, sıralanan komşuluk geçiş stratejilerinin uygulanması ile elde edilen komşu çözüm Şekil 4.6'da gösterilmektedir.



Şekil 4.6 Komşu Çözüm Oluşturulması

Objektif fonksiyon değerleri

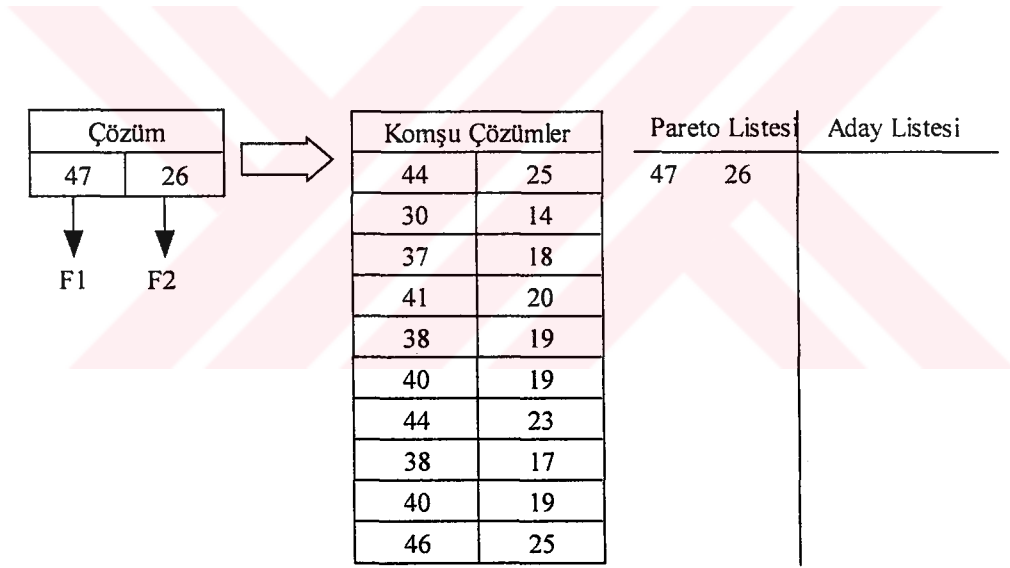
Tamamlanma zamanı : 30

En büyük gecikme : 14

Şekil 4.6’da 6 iş parçasından oluşan çizelgeleme problemi için bir parçanın (parça 6) proses planı değiştirilmiş ve toplam 20 operasyon için dört operasyonda makine alternatifi değişikliği gerçekleştirilmiştir. Sıralama kuralı değişiklik oranına göre, tüm operasyonlar için oluşturulan 20 elemanlı sıralama kuralı dizisinde, üç sıralama kuralı değiştirilmiştir.

Çalışmada uygulanan çok objektifli tabu arama algoritmasında, kök çözümden belirli sayıda komşu çözüm türetilmektedir. Kök çözümün objektif fonksiyonları tarafından bastırılmamış olan çözümler, komşu çözüm olarak belirlenmektedir.

Şekil 4.5’deki başlangıç çözümünden elde edilen 10 komşu çözümün objektif fonksiyon değerleri, Pareto ve aday liste elemanları Şekil 4.7’de görülmektedir.



Şekil 4.7 Komşu Çözüm Objektif Fonksiyon Değerleri

Pareto optimal komşu çözümlerin belirlenmesi: Tek objektifli tabu arama algoritmasında komşu çözümler arasından en iyi çözümün seçilmesi süreci, tek performans kriteri olmasından dolayı açıktır. Ancak çok objektifli tabu aramada tek bir en iyi komşu çözüm söz konusu olmadığından, algoritmada tabu listesine ilave olarak iki liste daha tanımlanır. Bunlardan birincisi Pareto optimal çözümler listesi, diğeri aday çözümler listesidir.

Her iterasyonda türetilen komşu çözümler içerisinde Pareto optimal olan çözümler belirlenir. Pareto optimal komşu çözümlerin belirlenebilmesi için;

Bir komşu çözüme

- diğer komşu çözümlerin,
- Pareto listesindeki çözümlerin,
- aday listesindeki çözümlerin

baskın olmaması gerekmektedir.

Belirlenen Pareto optimal komşu çözümlerden birisi rasgele seçilerek Pareto listesine eklenir. Bulunan diğer Pareto optimal komşu çözümler, ileride Pareto optimalliklerini korudukları takdirde kök çözüm olarak kullanılmak üzere aday çözümler listesine yerleştirilir. Herhangi bir iterasyonda, eğer Pareto optimal komşu çözüm bulunmamış ise, aday çözümler listesindeki en eski Pareto optimal çözüm kök çözüm olarak atanır.

Şekil 4.8a'da algoritmanın çözüm sürecindeki ilk iterasyonu görülmektedir. Başlangıç çözümü Pareto listesinde yer almaktadır. Bu başlangıç çözümünden elde edilen 10 komşu çözüm içerisinde, sadece ikinci çözüm Pareto optimal çözümdür. Bu çözüm, diğer komşu çözümler ve Pareto listesindeki başlangıç çözümü tarafından bastırılmamıştır.

Tabu listesi ve aspirasyon kriterinin kontrolü: Çözüm alanında en son ulaşılan n çözüm dizisi, yerel optimuma yakalanmaktan kaçınmak amacıyla tabu listesinde tutulmaktadır. Tabu listesi uzunluğu girdi parametresi olarak tanımlanmakta ve önceden belirlenmektedir. Tabu listesi dairesel bir liste olup, liste dolduğunda listedeki ilk çözüm yeni çözümle yer değiştirmektedir. Tabu listesinde, çözüm sonucunda elde edilen çizelge bilgilerinin saklanması, hem alan hem de kontrol süresi açısından etkin olmadığından, listede sadece türetim kontrollerinden oluşan çözüm dizileri tutulmaktadır.

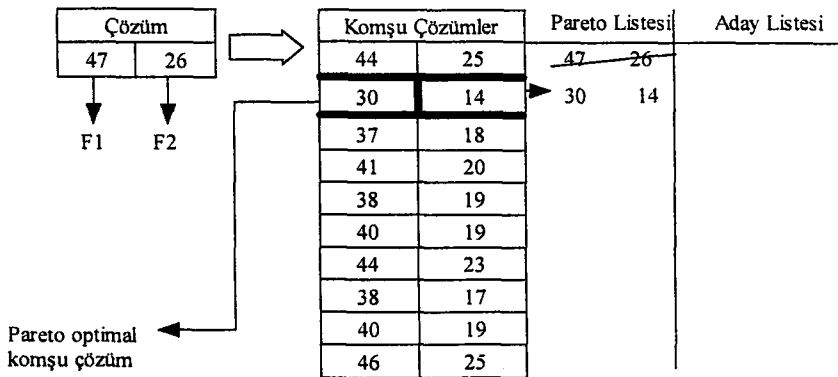
Pareto optimal komşu çözümlerden veya aday listedeki çözümlerden kök çözüm olarak belirlenen çözüm dizisi, tabu listesinde yer alan çözüm dizileri ile karşılaştırılır. Eğer seçilen Pareto optimal komşu çözüm dizisi tabu listesinde yer almıyorsa kök çözüm

olarak kabul edilir. Aksi taktirde, seçilen çözüm dizisi, tabu listesindeki çözüm dizilerinden herhangi birisi ile aynı ise aspirasyon kriteri kontrol edilir.

Aspirasyon kriteri: Tabu listesinde çözüm dizisinin çizelge bilgileri tutulmadığından, aynı çözüm dizileri farklı objektif fonksiyon değerlerine sahip olabilmektedir. Dolayısıyla, eğer çözüm dizisi bir tabu çözüm ise, bu çözümün objektif fonksiyon değerleri, Pareto ve aday listesindeki çözümlerin objektif fonksiyon değerleri ile baskınlık kontrolüne tabi tutulur. Eğer Pareto ve aday listelerindeki hiçbir çözüm, bu tabu çözüme baskın değilse, çözüm kök çözüm olarak kabul edilir. Aksi taktirde reddedilerek, diğer Pareto optimal komşu çözümlerden birisi seçilir. Eğer Pareto optimal komşu çözüm yoksa, aday çözümler listesindeki ilk çözüm seçilir ve aynı kontroller bu çözüm için tekrarlanır.

Listelerin ve kök çözümün güncellenmesi: Tabu listesi ve aspirasyon kriteri kontrollerinden sonra belirlenen kök çözüm, tabu ve Pareto listelerine eklenir. Pareto ve aday listelerindeki çözümler, kök çözüm ile baskınlık kontrolüne tabi tutulurlar. Pareto ve aday listelerinden, kök çözümün ve Pareto optimal komşu çözümlerin baskın olduğu çözümler çıkarılarak listeler güncellenir. Şekil 4.8a'daki objektif fonksiyon değerlerine göre, Pareto optimal komşu çözüm, Pareto listesindeki çözüme baskın olduğundan, bastırılmış olan çözüm Pareto listesinden çıkarılmıştır.

Şekil 4.8a-h'de örnek problem için çözüm iterasyonları, komşu çözümler, Pareto ve aday listeler ile birlikte gösterilmiştir.



a. Çözüm Süreci-İterasyon 1

Çözüm	Komşu Çözümler	Pareto Listesi	Aday Listesi
30 14	33 12	47 26	
	28 9	30 14	
	27 6	24 6	
	31 12		
	31 11		
	31 13		
	24 6		
	32 11		
	25 10		
	29 10		

Pareto optimal komşu çözüm

b. Çözüm Süreci-İterasyon 2

Çözüm	Komşu Çözümler	Pareto Listesi	Aday Listesi
24 6	20 2	47 26	
	23 9	30 14	
	21 3	24 6	
	23 11	20 2	
	21 3		
	22 4		
	22 5		
	23 5		
	25 4		
	24 5		

Pareto optimal komşu çözüm

c. Çözüm Süreci-İterasyon 3

Çözüm	Komşu Çözümler	Pareto Listesi	Aday Listesi
20 2	20 2	47 26	19 8
	22 1	30 14	
	20 2	24 6	
	20 2	20 2	
	22 1	21 1	
	20 2		
	22 1		
	20 2		
	21 1		
	19 8		

Pareto optimal komşu çözümler

d. Çözüm Süreci-İterasyon 4

Çözüm	Komşu Çözümler	Pareto Listesi	Aday Listesi
21 1	21 0	47 26	19 8
	19 7	30 14	20 1
	20 3	24 6	21 0
	20 3	20 2	
	20 7	21 1	
	20 2	19 5	
	20 3		
Pareto optimal komşu çözümler	19 5		
	20 4		
	20 1		

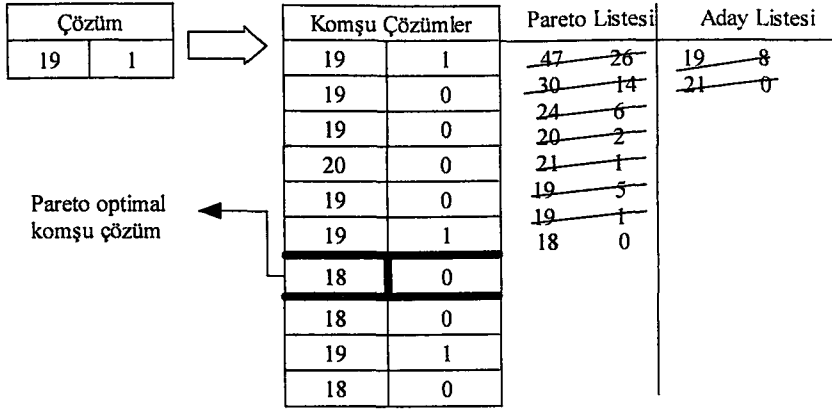
e. Çözüm Süreci-İterasyon 5

Çözüm	Komşu Çözümler	Pareto Listesi	Aday Listesi
19 5	21 1	47 26	19 8
	24 4	30 14	20 1
	22 4	24 6	21 0
	24 3	20 2	
	24 3	21 1	
	25 4	19 5	
	22 1		
	25 4		
	21 4		
	22 3		

f. Çözüm Süreci-İterasyon 6

Çözüm	Komşu Çözümler	Pareto Listesi	Aday Listesi
20 1	20 1	47 26	19 8
	20 1	30 14	21 0
	19 1	24 6	
	19 5	20 2	
	19 4	21 1	
Pareto optimal komşu çözüm	19 4	19 5	
	20 1	19 1	
	19 4		
	19 8		
	19 8		
	20 1		

g. Çözüm Süreci-İterasyon 7



h. Çözüm Süreci-İterasyon 8

Şekil 4.8 Çözüm Süreci

Şekil 4.8a'da yer alan, çözüm sürecinin ilk iterasyonunda başlangıç çözümünden 10 komşu çözüm elde edilmiştir. Komşu çözümlerden sadece 2. sırada yer alan çözüm Pareto optimal çözüm olduğundan, kök çözüm olarak başlangıç çözümü ile yer değiştirmiş ve Pareto listesine eklenmiştir. Benzer işlemler 2. ve 3. iterasyonlarda (Şekil 4.8b-c) tekrar edilmiştir. Şekil 4.8d'de yer alan 4. iterasyonda komşu çözümlerden iki Pareto optimal çözüm belirlenmiştir. Bu çözümlerden birisi rasgele seçilerek kök çözüm haline gelirken, diğeri aday listesine eklenmiştir. Benzer şekilde Şekil 4.8e'deki 5. iterasyonda üç Pareto optimal çözüm belirlenmiş ve bunlardan birisi rasgele kök çözüm olarak seçilmiştir. Diğer iki Pareto optimal komşu çözüm, aday listesine eklenmiştir. Bulunan üç Pareto optimal komşu çözüm, Pareto ve aday listelerindeki çözümlerle baskınlık kontrolüne tabi tutulmuştur. Listelerdeki baskılanan çözümler çıkarılarak, güncelleme gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.8f'de yer alan 6. iterasyonda, oluşturulan komşu çözümlerden Pareto optimal komşu çözüm elde edilememiştir. Komşu çözümlerin tamamı Pareto ve aday listesindeki çözümler tarafından baskılanmıştır. Buna bağlı olarak aday listesindeki ilk çözüm listeden çekilerek kök çözüm olarak belirlenmiştir. Şekil 4.8g-h'de, komşu çözümlerde bir Pareto optimal çözüm elde edilmiş ve listeler bu çözüme göre güncellenmiştir.

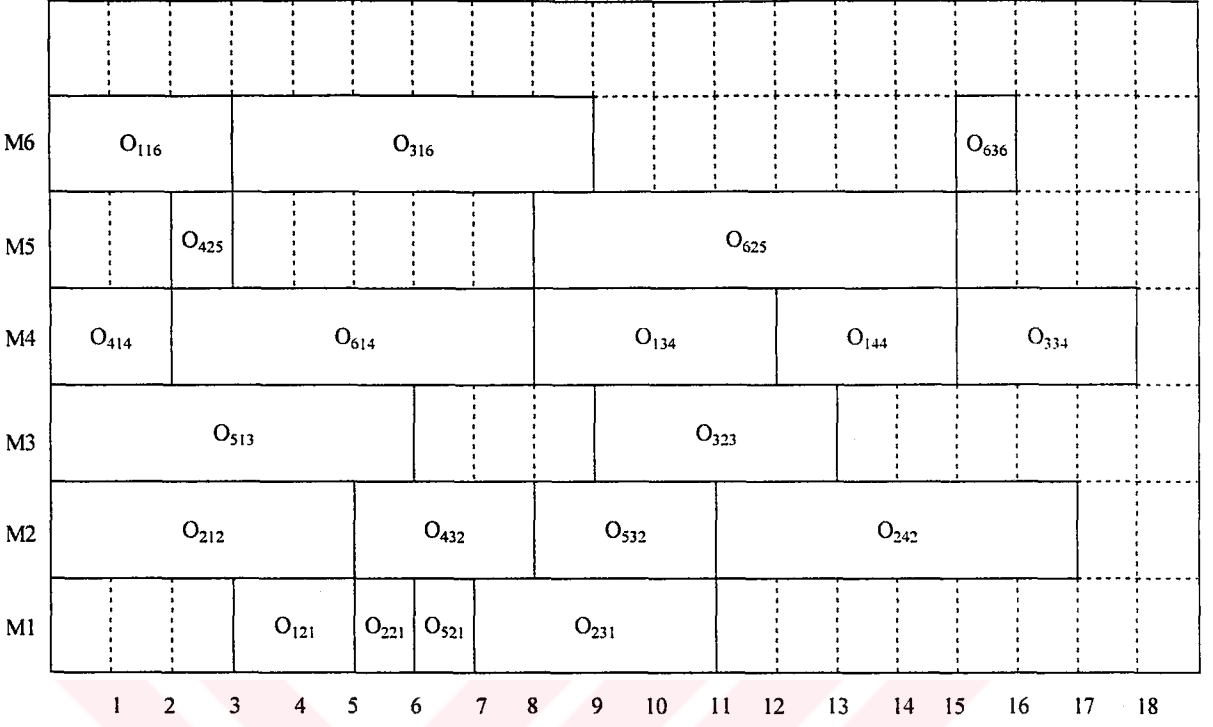
Sonlandırma kriteri: Algoritma belirli sayıda (n) iterasyona ulaşana kadar veya aday çözümler listesi tamamen boşalana kadar devam eder. İterasyonlar tamamlandıktan

sonra Pareto listesi, elde edilen Pareto optimal çözümleri verir. Bu aşamadan sonra problem çok kriterli karar problemi haline dönüşür. Elde edilen Pareto optimal çözümler arasından, uygun çözümün seçilmesi, karar mekanizmasına bırakılır.

Bu bölümde ele alınan örnek problem için çözüm sürecinde iterasyon sayısı 500 olarak belirlenmiştir. Ancak, Şekil 4.8(a-h)'de yer alan 8 iterasyon tamamlandıktan sonra aday liste boş kalmış ve kalan 492 iterasyon sonucunda aynı objektif fonksiyon değerleri elde edilmiştir. Elde edilen son Pareto optimal çözüm dizisi Tablo 4.3'te, atölye çizelgeleme problemi gösterimi ile yer almaktadır. Çok objektifli tabu arama algoritması sonucu elde edilen Pareto optimal çözümün Giffler ve Thompson algoritması ile elde edilen çizelgesi Tablo 4.5'te, bu çizelgenin gant diyagramı Şekil 4.9'da yer almaktadır.

Tablo 4.5 Pareto Optimal Çözüm Çizelgesi

O _{iş,operasyon}	Makine	Başlama, Bitiş Zamanları
O ₁₂	1	3,5
O ₂₂	1	5,6
O ₅₂	1	6,7
O ₂₃	1	7,11
O ₂₁	2	0,5
O ₄₃	2	5,8
O ₅₃	2	8,11
O ₂₄	2	11,17
O ₅₁	3	0,6
O ₃₂	3	9,13
O ₄₁	4	0,2
O ₆₁	4	2,8
O ₁₃	4	8,12
O ₁₄	4	12,15
O ₃₃	4	15,18
O ₄₂	5	2,3
O ₆₂	5	8,15
O ₁₁	6	0,3
O ₃₁	6	3,9
O ₆₃	6	15,16



Şekil 4.9 Pareto Optimal Çözüm İçin Gant Şeması

4.4 SONUÇ

Bu bölümde, Baykasoğlu, Owen ve Gindy (1999a, 1999b) tarafından ortaya konulan çok objektifli tabu arama algoritması, esnek atölye çizelgeleme problemlerine uyarlanarak genel bir çözüm algoritması geliştirilmiştir. Algoritmanın çözüm aşamaları, bileşenleri ve işleyişi örneklendirilerek açıklanmıştır. Atölye çizelgeleme yöntemi olarak, Giffler ve Thompson sıralama kuralına dayalı çizelgeleme algoritması kullanılmıştır.

Aşamaları ortaya konulan çok objektifli tabu arama algoritması, C\C++ programlama dili ile programlanmış olup, bir çok esnek atölye çizelgeleme problemi üzerinde çalıştırılmıştır. Literatürde yer alan esnek atölye çizelgeleme problemleri, proses plan esnekliğini kapsamadığından, türetilen hipotetik problemler üzerinde denemeler yapılmıştır. Programın yazılımı, veri yapıları ve işleyişi Bölüm 5'te detaylı bir biçimde açıklanmıştır.

BÖLÜM 5

5 DTTAÇOEACP 1.0: DİL TEORİSİ VE TABU ARAMA TEMELLİ ÇOK OBJEKTİFLİ ESNEK ATÖLYE ÇİZELGELEME PROGRAMI

5.1 GİRİŞ

Çalışmanın bu bölümünde, esnek atölye çizelgeleme problemi için Bağlam Bağımsız Gramer'ler ile geliştirilen modelleme yaklaşımı ve oluşturulan modelin çözümü için uygulanan çok objektifli tabu arama algoritmasının programlanmasına yönelik açıklamalar yer almaktadır. C/C++ programlama dili ile yazılımı geliştirilen programın, girdi ve çıktı formatı, parametreleri, veri yapıları, fonksiyonları ve işleyişi irdelenmiştir. Bölüm sonunda, proses plan esnekliği içeren bir esnek atölye çizelgeleme problemi için, programın çalıştırılması ile elde edilen Pareto optimal çözümler ve son çözüm çizelgesi program çıktısı olarak sunulmuştur.

5.2 ESNEK ATÖLYE ÇİZELGELEME PROBLEMİ MODELİNİN PROGRAMLANMASI

Problemin programlama dili olarak dinamik veri yapılarının etkin kullanımından dolayı C/C++ seçilmiştir. Bölüm 4'te detaylı bir biçimde ortaya konulan çok objektifli tabu arama algoritmasına dayanan program, temel olarak iki ana aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamada program, girdileri kullanarak, bağlam bağımsız türetim kurallarından oluşan bir çözüm dizisi üretmekte, ikinci aşamada ise bu çözüm dizisine Giffler ve Thompson'ın sıralama kuralı temelli çizelgeleme yaklaşımını uygulayarak, çizelgeleme yapmaktadır.

Çalışmada, Bölüm 3.3'te detaylı açıklandığı üzere, proses plan seçimi problemi esnek atölye çizelgeleme problemine entegre edilmiştir. Buna bağlı olarak, problemde operasyonlar için makine esnekliğinin yanı sıra, işler için proses plan esnekliği de söz konusudur. Yani her bir iş birden fazla proses plan ile gerçekleştirilebilmekte ve her bir operasyon birden fazla makinede işlem görebilmektedir. Bunun için, işlerin proses plan alternatifleri ve operasyonların işlem görebilecekleri makine kümeleri belirlenir. Problem, işler için proses plan seçimi, operasyonlar için uygun makine atamaları ve operasyonların bu makinelerde sıralanarak çizelgelenmesi olmak üzere üç ana parçadan oluşur. Geliştirilen algoritma ve program tüm bu alt problemleri eş zamanlı olarak çözümlemektedir.

5.3 PROGRAMIN GİRDİLERİ

Çalışmada ele alınan esnek atölye çizelgeleme probleminin çok objektifli tabu arama algoritması ile çözümü için geliştirilen programın ilk aşaması, problem verilerinin doğru, etkin ve hızlı bir biçimde alınmasını sağlamaktır. Bu amaçla bir takım değişkenler tanımlanarak etkin bir veri yapısı oluşturulmuştur. Dinamik veri yapıları (işaretçiler) kullanılarak, problemin boyutuna göre gerekli alanların açılması ile çözümün etkinliği ve hızı artırılmıştır. Bu bölümde problem ile ilgili veriler için gerekli değişkenler kısaca açıklanmıştır.

ParçaSayısı

(J): Sistem içerisinde yer alan ve çizelgelenecek toplam parça sayısı

MakineSayısı

(M): Sistem içerisinde yer alan toplam makine sayısı

OperasyonSayısı

(O): Farklı operasyon sayısı

AlternatifProsesPlanlar

(PPS_j): Her bir parça için alternatif proses plan sayısı

ParçaOpSayısı

POS_{jk} : Her bir parçanın proses planlarındaki operasyon sayıları

j. işin k. alternatif proses planındaki operasyon sayısı, $k=1..PPS_j$

ParçaProsesPlan

$PPP_{jk}[POS_{jk}]$: Her bir parça için alternatif proses planlar

j. işin k. proses planındaki operasyonlar ve sıraları

OpMakAlt

OM_o : Her bir operasyon için alternatif makine sayısı

o. operasyonun işlem görebileceği makine alternatifleri sayısı

MakineAlt

$MA_o[OM_o]$: Her bir operasyon için alternatif makineler

o. operasyonun makine alternatifleri $MA_o[OM_o] \in \{1..M\}$

OpProsesSüreleri

P_{ol} : Her bir operasyonun her bir makine alternatifindeki işlem süresi

o. operasyonun l. makine alternatifindeki işlem süresi, $l = 1..OM_o$

TeslimTarihleri

TT_j : j. parçanın teslim tarihi

Ağırlıklar

W_j : Her bir parça için belirlenmiş ağırlıklar

ObjektifFonksiyonlar

F_n : Optimizasyon için objektif fonksiyonlar

SıralamaKuralları

SK : Çizelgelemede kullanılacak sıralama kuralı numaraları

Çözüm Dizisi: Çözüm dizisi, iki boyutlu ÇözümDizi işaretçisi ve bu çözümün objektif fonksiyonlarını içeren tek boyutlu bir Objektif işaretçisi ile birlikte bir yapı oluşturacak şekilde tanımlanmıştır. ÇözümDizi işaretçisi birinci boyutunda parçalar için proses plan kontrollerini ve operasyonlar için makine kontrollerini içermektedir. İkinci boyutunda ise her bir operasyon için sıralama kuralları tutulmaktadır. Objektif işaretçisi, çözüm

dizisinin çizelgelendikten sonra hesaplanan objektif fonksiyon değerlerini saklamaktadır.

typedef struct

*{int **ÇözümDizi;*

*double *Objektif;}Çözüm;*

Listeler:

- Tabu Listesi: Tabu listesi, program parametreleri içerisinde yer alan tabu listesi uzunluğu kadar çözümün tutulduğu bir yapıdır. Dairesel bir dizi yapısı olup, liste dolduğunda ilk eleman çıkarılmaktadır.

Çözüm TabuList[TabuListUzun];

- Aday Listesi: Aday listesi, bağlı işaretçiler kullanılarak tanımlanmıştır. Bu yapının avantajı, listeye eleman eklenmesinin, çıkarılmasının, listenin güncellenmesinin kolaylıkla gerçekleştirilebilmesidir.

struct Aday_List

{Çözüm Aday_Çözüm;

*struct Aday_List *Ardıl_Rek;};*

- Pareto Listesi: Pareto çözümler listesi de aday çözümler listesi ile benzer şekilde bağlı işaretçiler ile oluşturulmuştur. Listenin her bir elemanı, çözüm dizisi ve bu çözümün objektif fonksiyon değerlerini içermektedir.

struct Pareto_List

{ Çözüm Pareto_Çözüm;

*struct Pareto_List *Ardıl_Rek;};*

5.3.1 Veri Giriş Formatı

Geliştirilen program için, problem yapısına en uygun veri giriş formatı oluşturulmuştur. Tablo 5.1’de örnek bir problem için veri tablosu oluşturulmuş ve veriler sınıflandırılarak numaralanmıştır.

Grup (1): Çizelgeleme sistemi ile ilgili bilgiler - parça sayısı, makine sayısı, operasyon sayısı

Grup (2): Her bir parça için proses plan alternatiflerinin sayıları

Grup (3): Her bir parça için alternatif proses planlarındaki operasyon sıraları

Grup (4): Operasyonların işlem görebilecekleri makine alternatifi sayıları

Grup (5): Operasyonların her bir makine alternatifindeki işlem zamanları (parçaya göre değişebilir)

Grup (6): İş parçalarının teslim tarihleri ve (varsa) ağırlıkları

Grup (7): Optimize edilecek objektif fonksiyonları ve çizelgelemede kullanılacak sıralama kuralları

Bölüm 5.3'te sıralanan program değişkenleri ile oluşturulan program girdileri, birbirleri ile örtüşecek biçimde düzenlenmişlerdir.

Tablo 5.1 Program Veri Giriş Formatı

Parça Sayısı (1)		6	Makine Sayısı		6	Operasyon Sayısı		6			
(2) Proses Plan Alternatifi Sayısı		Parça 1	Parça2	Parça3	Parça4	Parça5	Parça6				
		2	2	2	2	2	2				
(3)		Op.Sayısı	Op1	Op2	Op3	Op4	Op5	Op6			
Parça 1	Proses Plan 1	4	1	2	3	5					
	Proses Plan 2	3	1	6	5						
Parça 2	Proses Plan 1	4	1	2	4	3					
	Proses Plan 2	4	1	6	4						
Parça 3	Proses Plan 1	3	1	5	3						
	Proses Plan 2	3	1	3	5						
Parça 4	Proses Plan 1	1	4	3							
	Proses Plan 2	1	3	4							
Parça 5	Proses Plan 1	5	4	3							
	Proses Plan 2	5	3	4							
Parça 6	Proses Plan 1	1	4	5							
	Proses Plan 2	1	5	4							
Operasyon Makine Alternatifi Sayısı (4)		Op1	Op2	Op3	Op4	Op5	Op6				
		3	4	2	4	3	2				
(5)		M. No	Parça1	Parça2	Parça3	Parça4	Parça5	Parça6			
Operasyon 1	Makine Alt 1	2	3	4	7	2	0	6			
	Makine Alt 2	4	2	5	6	1	0	5			
	Makine Alt 3	6	3	6	5	2	0	6			
Operasyon 2	Makine Alt 1	1	2	1	0	0	0	0			
	Makine Alt 2	3	1	2	0	0	0	0			
	Makine Alt 3	5	2	1	0	0	0	0			
	Makine Alt 4	6	1	2	0	0	0	0			
Operasyon 3	Makine Alt 1	2	4	5	3	2	3	0			
	Makine Alt 2	4	5	6	2	3	3	0			
Operasyon 4	Makine Alt 1	1	0	4	0	1	2	1			
	Makine Alt 2	2	0	5	0	2	1	2			
	Makine Alt 3	5	0	6	0	2	2	1			
	Makine Alt 4	6	0	4	0	1	1	1			
Operasyon 5	Makine Alt 1	3	3	0	4	0	6	7			
	Makine Alt 2	4	2	0	3	0	5	6			
	Makine Alt 3	5	3	0	4	0	7	7			
Operasyon 6	Makine Alt 1	2	6	5	0	0	0	0			
	Makine Alt 2	6	7	4	0	0	0	0			
(6)		Parça 1	Parça 2	Parça 3	Parça 4	Parça 5	Parça 6				
Teslim Tarihleri		13	20	14	7	12	5				
Ağırlıklar		1	1	1	1	1	1				
(7) Objektif Fonksiyonlar		0(F1)	2(F2)	7(F3)							
Sıralama Kuralları		EKİZ	ETT	EUİZ	KİZ	KDİZ	İZBK	EBZ	EKB	EFİZ	AEKİZ
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

5.4 PROGRAM PARAMETRELERİ

Program parametreleri, Bölüm 4.2’de detaylı olarak açıklanan çok objektifli tabu arama algoritmasının elemanları ile Giffler ve Thompson’ın sıralama kurallarına dayalı çizelgeleme yaklaşımı için gerekli olan bilgileri içermektedir. Programın işleyişi açısından bu parametrelerin önceden belirlenmesi gerekmektedir.

- **Sıralama Kuralı Sayısı:** Giffler ve Thompson algoritmasında kullanılacak olan sıralama kuralı sayısını ifade etmektedir. Bölüm 4’te çözüm sürecinde kullanılan 10 sıralama kuralı ve formülasyonu verilmiştir (Tablo 4.1). Bölüm 7’de yer alan deney tasarımı çalışmalarında farklı sayıda sıralama kuralları ile algoritmanın çözüm performansı değerlendirilmiştir. Bu değerlendirmeyi gerçekleştirebilmek için, sıralama kuralı sayısı parametresi ile belirlenen sayıda sıralama kuralı, program tarafından tüm sıralama kuralları arasından rasgele seçilmektedir. Belirlenen sayıda seçilen sıralama kuralları, Giffler ve Thompson algoritmasında kullanılarak çizelgeleme yapılmaktadır.
- **Tabu Listesi Uzunluğu:** Çok objektifli tabu arama algoritmasında kullanılacak kısa dönemli hafızayı ifade eden tabu listesi, dairesel bir dizi olarak belirlenmiş ve eleman sayısı, program parametresi olarak tanımlanmıştır. Çok objektifli tabu arama algoritması, belirli sayıda geçmiş çözümleri bu listede saklamaktadır. Tabu listesi FIFO kuralına göre işlemekte, liste dolduğunda, en eski çözüm listeden çıkmaktadır. Bu parametrenin çok büyük verilmesi, çözüm süresini artırırken, çok düşük verilmesi de ulaşılmış çözümlere geri dönüşü kolaylaştırmaktadır.
- **Komşu Çözüm Sayısı:** Çok objektifli tabu arama algoritmasında, kabul edilebilir bir çözüm süresinde, kök çözümden elde edilebilecek tüm komşu çözümlerin değerlendirilmesi mümkün değildir. Bunun için, programın her bir iterasyonunda kök çözümün, belirli sayıda Pareto optimal komşu çözümü değerlendirmeye alınmıştır. Bu parametreye çok düşük bir değerin atanması, çok kısa sürede (henüz optimal çözümlere yaklaşımadan) aday listenin boşalmasına sebep olurken, bu değerin çok yüksek olması da algoritmanın çözüm süresini artırmaktadır.

- **Proses Plan Değişiklik Oranı:** Bağlam Bağımsız Gramer'ler ile modellenen esnek atölye çizelgeleme problemi için çok objektifli tabu arama algoritmasında uygulanan komşu çözüm türetme stratejisi için üç farklı parametre kullanılmaktadır. Bunlardan ilki proses plan değişiklik oranıdır. Bu parametre ile belirlenen oran, çözüm dizisinde yer alan, işlerin proses plan alternatiflerini ifade eden kısımda hangi oranda değişiklik yapılacağını göstermektedir. Örneğin 10 iş için oluşturulan çözüm dizisinde, %20 oranında proses plan değişikliği, 10 işin rasgele seçilen 2'sinin proses planlarında değişiklik yapılmasını gerektirmektedir. Bu parametre çözüm alanı içerisindeki yayılma stratejisinin bir parçasıdır. Parametrenin çok yüksek belirlenmesi, mevcut iyi çözümden uzaklaşarak yakın komşuluklara ulaşılmasını engellerken, çok düşük verilmesi de algoritmanın dar bir arama alanı içerisinde kalmasını sağlayabilmektedir.
- **Operasyon Makine Alternatifi Değişiklik Oranı:** Bu parametre de yine kök çözümden komşu çözüm türetme stratejisi içerisinde yer alan ikinci parametre olup benzer bir işleyişe sahiptir. Esnek atölye çizelgeleme probleminde ikinci esneklik faktörü operasyonların işlem görebilecekleri makine alternatiflerine sahip olmalarıdır. Bu parametre ile, çözüm dizisinde yer alan, her bir işin seçilen proses planlarındaki operasyonların atandığı makinelerde, belirlenen oranlarda değişiklik yaparak, o operasyon için uygun makine kümesinden bir diğer makinenin seçilmesi sağlanmış olmaktadır. Operasyonların makine alternatiflerinin değişikliği operasyon-makine maliyet matrisindeki olasılıklara göre gerçekleştirilmektedir.
- **Sıralama Kuralı Değişiklik Oranı:** İlk parametre olan sıralama kuralı sayısı parametresi ile Giffler ve Thompson algoritmasında kullanılacak olan sıralama kuralları belirlenmişti. Belirlenen bu sıralama kuralları, her bir operasyon için çözüm dizisinde yer almaktadır. Algoritmada operasyonlar, gerektiğinde bu sıralama kurallarına göre makinelerde sıralanmaktadır. Çözüm dizisindeki sıralama kuralları, kullanılan sıralama kurallarının her çözümde statik olmasını engellemek ve komşu çözümler türetmek amacıyla, bu parametre ile belirlenen oranlarda, rasgele seçilen başka bir sıralama kuralı ile değiştirilmektedir.

5.5 PROGRAM ALGORİTMASI

Programın algoritması (Şekil 5.1), problem verilerinin dosyadan alınarak veri yapısının oluşturulması ile başlamaktadır. Problem verileri arasında yer alan operasyonların makinelerdeki işlem süreleri ile operasyon-makine maliyet matrisi hesaplaması gerçekleştirilir. Başlangıç çözümü oluşturularak çizelgelenir ve elde edilen çizelgeye göre objektif fonksiyon değerleri hesaplanır. Başlangıç çözümü tabu ve Pareto listelerine eklenir ve çok objektifli tabu arama iterasyonları başlatılır. Algoritmanın bu aşamasında, kök çözümün komşu çözüm arama stratejilerine göre komşulukları belirlenir. Bu komşuluklar arasından Pareto optimal (diğer komşu çözümler tarafından baskılanmamış) komşu çözümler belirlenir. Eğer komşu çözümler arasında Pareto optimal çözüm varsa bunlardan birisi rasgele seçilerek kök çözüm olarak atanır. Diğer Pareto optimal komşu çözümler aday listesine eklenir. Eğer komşu çözümler arasında Pareto optimal çözüm yoksa, aday listeden ilk eleman çekilerek kök çözüm haline gelir. Yeni çözüm tabu listesine eklenir. Ardından aday ve Pareto listelerinde yeni çözümün baskın olduğu çözümler belirlenerek, bu listelerden çıkartılır. Döngü aday liste boşsa veya belirli bir iterasyon sayısına ulaşılmışsa durdurulur.

Algoritmanın sonucunda kök çözüm, Pareto optimal çözümler ve varsa aday çözümler elde edilmektedir. Algoritmanın işleyişi sürecinde çizelgelerin tamamının saklanması hem alan, hem de zaman açısından uygun değildir. Bunun için iterasyonlar tamamlandıktan sonra, kök çözümün veya Pareto optimal çözümlerden herhangi birisi, çözüm dizisi ile tekrar çizelgelenerek, makinelerdeki operasyon sıraları ve operasyonların başlama bitiş zamanları elde edilir.

Çok Objektifli Tabu Arama Algoritması

Başla

```

    Iter = n                                //İterasyon sayısı
    Sayaç=0;
    ProbVeri = ProbVeriOku(VeriDosyası)      //Problem verileri
    MaliyetMatrisi(ProbVeri)                //Operasyon-makine maliyet
                                           //matrisi hesaplaması
    ÇözümDizi = BaşÇözümTüret(ProbVeri)      //Başlangıç çözümü türetilmesi
    Çizelge = Çizelgele(ProbVeri, ÇözümDizi) //Başlangıç çözümünün
                                           //çizelgelenmesi
    ObjFonkHesapla(ProbVeri, ÇözümDizi, Çizelge) //Oluşturulan çizelge için
                                           //objektif fonksiyon değerlerini
                                           //hesapla
    TabuListEkle(ÇözümDizi, TabuListe)       //Başlangıç çözümün tabu
                                           //listesine eklenmesi
    ParetoListEkle(ÇözümDizi, ParetoListe)   //Başlangıç çözümün Pareto
                                           //listesine eklenmesi
Do                                           //Tabu arama algoritması
{
    Komşuluk(ÇözümDizi, KomÇözümler, TabuListe, ParetoListe, AdayListe)
                                           //Komşu çözümlerin türetilmesi
    ParetoÇözüm=ParetoBelirle(KomÇözümler, ParetoListe, AdayListe)
                                           //ParetoOptimal komşu
                                           //çözümlerin belirlenmesi
    İf (ParetoÇözüm>0)                    //Komşularda ParetoOptimal
    çözüm varsa
    {
        ÇözümDizi = SeçParetoKom(ParetoÇöz) //ParetoOptimal komşu
                                           //çözümlerden birisinin yeni
                                           //çözüm olarak belirlenmesi
        AdayListEkle(ParetoÇöz)           //Diğer Pareto Optimal
                                           //çözümlerin aday listesine
                                           //eklenmesi
    }
    Else
    yoksa
    {
        ÇözümDizi=AdayListÇek()          //Aday listeden yeni çözümün
                                           //belirlenmesi
    }
    TabuListEkle(ÇözümDizi, TabuListe)     //Yeni çözümün tabu listesine
                                           //eklenmesi
    ElimineAday(ÇözümDizi)                //Aday listeden yeni çözüm ve
                                           //komşu çözümler tarafından
                                           //baskılanmış çözümlerin
                                           //çıkartılması
    EliminePareto(ÇözümDizi)              //Pareto listeden yeni çözüm ve
                                           //komşu çözümler tarafından
                                           //baskılanmış çözümlerin
                                           //çıkartılması
    ParetoListEkle(ÇözümDizi)             //Yeni çözümün Pareto optimal
                                           //çözümler listesine eklenmesi
    Sayaç++
}
Until (Sayaç=Iter || AdayListe=NULL)
Bitir

```

Şekil 5.1 Geliştirilen Programın Temel İşleyişi

5.5.1 Fonksiyonlar

ProbVeriOku: Fonksiyon, problem verilerini içeren girdi dosyasından verileri alarak uygun değişkenlere ve yapılara yerleştirir.

MaliyetMatrisi: Fonksiyon, ProbVeriOku fonksiyonu tarafından alınan işlem operasyon-makine işlem sürelerini kullanarak, her bir operasyon için aday makinelerin seçilebilme olasılıklarını hesaplar. Tablo 5.1’de yer alan problem verilerine göre fonksiyon tarafından hesaplanan olasılıklar, Tablo 5.3’te yer almaktadır. Olasılıkların hesaplanmasına ilişkin yöntem Bölüm 3.2’de açıklanmıştır. Tablo 5.1’de yer alan problem verisine göre, operasyon 1’in, parça 1 için aday makine alternatiflerinin seçilebilme olasılıklarının hesaplanması, örnek teşkil etmesi açısından Tablo 5.2’de gösterilmiştir. Operasyon 1, üç farklı makinede, farklı sürelerde gerçekleştirilebilmektedir. İşlem süreleri, parçaya göre de farklı olabilmektedir. Her bir operasyon için aday makinelerin seçilebilme olasılıkları toplamı 1’dir.

Tablo 5.2 Op1-Parça1 Aday Makineler, İşlem Süreleri ve Olasılıklar

Makine No	İşlem Süreleri	Olasılıklar
2	3	$\left(\left(\frac{1}{3} + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} \right)^{-1} / 3 \right) = 0,285$
4	2	$\left(\left(\frac{1}{3} + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} \right)^{-1} / 2 \right) = 0,43$
6	3	$\left(\left(\frac{1}{3} + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} \right)^{-1} / 3 \right) = 0,285$

Tablo 5.3 Örnek Problem İçin Makine Seçim Olasılıkları

Operasyon Makine	Op 1					Op2		Op3				
	P1	P2	P3	P4	P6	P1	P2	P1	P2	P3	P4	P5
M 1						0,17	0,33					
M 2	0,285	0,41	0,28	0,25	0,315			0,56	0,55	0,40	0,60	0,50
M 3						0,33	0,17					
M 4	0,43	0,32	0,33	0,50	0,37			0,44	0,45	0,60	0,40	0,50
M 5						0,17	0,33					
M 6	0,285	0,27	0,39	0,25	0,315	0,33	0,17					

Tablo 5.3 Devam Ediyor

Operasyon Makine	Op4				Op5				Op6	
	P2	P4	P5	P6	P1	P3	P5	P6	P1	P2
M 1	0,29	0,33	0,17	0,29						
M 2	0,23	0,17	0,33	0,13					0,54	0,44
M 3					0,29	0,30	0,33	0,315		
M 4					0,42	0,40	0,39	0,37		
M 5	0,19	0,17	0,17	0,29	0,29	0,30	0,28	0,315		
M 6	0,29	0,33	0,33	0,29					0,46	0,56

BaşÇözümTüret: Fonksiyon, parçaların proses plan kontrolleri, operasyonların makine kontrolleri ve sıralama kurallarından oluşan başlangıç çözümünü türetir. Proses plan kontrollerinin ve sıralama kurallarının seçilmesi rasgele yapılırken, operasyon makine kontrolleri maliyet matrisindeki olasılıklara göre belirlenir. Çözüm dizisi türetildiğinde, her bir parça için proses plan ve bu proses planlardaki her bir operasyon için makineler

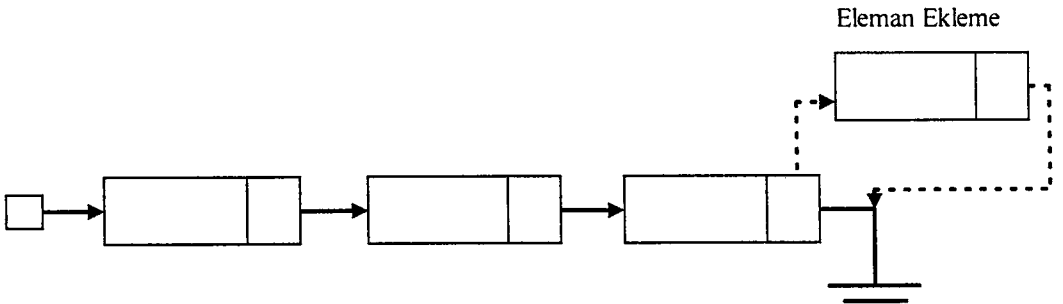
belirlenmiş olur. Bu aşamada, problem bir klasik atölye çizelgeleme problemi haline dönüşür.

Çizelgele: Fonksiyon girdi olarak aldığı çözüm dizisini, Giffler ve Thompson algoritmasına göre çizelgeler. Çözüm dizisinde yer alan proses planlardaki operasyonların atandığı makinelerde, yine çözüm dizisinde yer alan sıralama kurallarına dayalı çizelgeleme gerçekleştirir. Fonksiyonun sonucunda, makinelerdeki operasyon sıraları ve bu operasyonların işleme başlama ve bitiş zamanları belirlenmiş olur.

ObjFonkHesapla: Çizelgele fonksiyonu sonucunda elde edilen çizelgenin objektif fonksiyon değerlerini hesaplayarak Çözüm yapısına ekler. Fonksiyon 12 farklı objektif fonksiyon (Tablo 4.2) hesaplaması yapabilmektedir. İstenen değerleri çıktı dosyasına kaydeder.

TabuListEkle: Fonksiyon girdi parametresi olarak aldığı çözüm dizisini tabu listesine ekler. Tabu listesi dolu ise, listeye ilk giren çözüm listeden çıkartılır ve yeni çözüm eklenir.

ParetoListEkle: Fonksiyon, girdisi olan çözümü, bağlı işaretçi olarak oluşturulmuş Pareto optimal çözümler listesinin sonuna ekler. Şekil 5.2’de bağlı liste olarak tanımlanmış Pareto listesine eleman eklenmesi gösterilmektedir.



Şekil 5.2 Pareto Listesine Eleman Eklenmesi

Komşuluk: Fonksiyon, kök çözümün, başlangıçta komşu çözüm sayısı parametresi ile belirlenen sayıda komşu çözümünü türetir. Komşu çözümler türetilirken, proses planlardaki, operasyonların makinelerindeki ve sıralama kurallarındaki değişiklik oranları kullanılır. Operasyon-makine değişikliğinde, makine kontrolleri olasılıklarına göre değiştirilir. Türetilen her bir çözüm dizisinin eleman sayısı farklılık gösterebilmektedir. Yani çözüm dizisi uzunluğu sabit değildir. Türetilen komşu çözüm için iki kontrol uygulanır; birincisi çözüm dizisinin türetilen komşu çözüme baskınlığının kontrolü, ikincisi ise komşu çözümün tabu listesinde yer alan çözümlerle karşılaştırılmasıdır. Eğer kök çözüm türetilen komşu çözüme baskın ise veya komşu çözüm tabu listesinde varsa (aspirasyon kriteri değerlendirilir) türetilen komşu çözüm kabul edilmez. Aksi takdirde komşu çözüm kabul edilir ve bir sonraki komşunun türetilmesi için işlemler tekrarlanır. Algoritmanın işleyişi Şekil 5.3'te yer almaktadır.



Komşuluk Algoritması

Başla

Sayac =0

While (Sayac<KomşuÇözümSayısı)

{

KomşuÇözüm = ProsesPlanDeğiştir (ÇözümDizi) //Belirlenen oranlarda parça
proses plan alternatifinin
değiştirilmesi

KomşuÇözüm = MakineDeğiştir(KomşuÇözüm) //Belirlene oranlarda operasyon
makine alternatiflerinin
değiştirilmesi

KomşuÇözüm=SıralamaKuralıDeğiştir(KomşuÇözüm)//Belirlenen oranlarda sıralama
kurallarının değiştirilmesi

Çizelge = Çizelgele(ProbVeri, KomşuÇözüm) //Komşu çözümünün
çizelgelenmesi

ObjFonkHesapla(ProbVeri, KomşuÇözüm, Çizelge) //Komşu çözümün objektif
değerlerinin hesaplanması

BasKontrol(KomşuÇözüm, ÇözümDizi,Kontrol1) //Komşu çözümün baskınlık
kontrolü

TabuListKontrol(KomşuÇözüm, TabuList, Kontrol2) //Komşu çözümün tabu
listesindeki
çözümlerle karşılaştırılması

if (Kontrol1!=0 && Kontrol2=1) //Eğer ÇözümDizisi komşu
çözüme

{ //baskın değilse ve Komşu
KomşuÇözümKabul; // çözüm tabu listesinde yoksa
Sayac++;

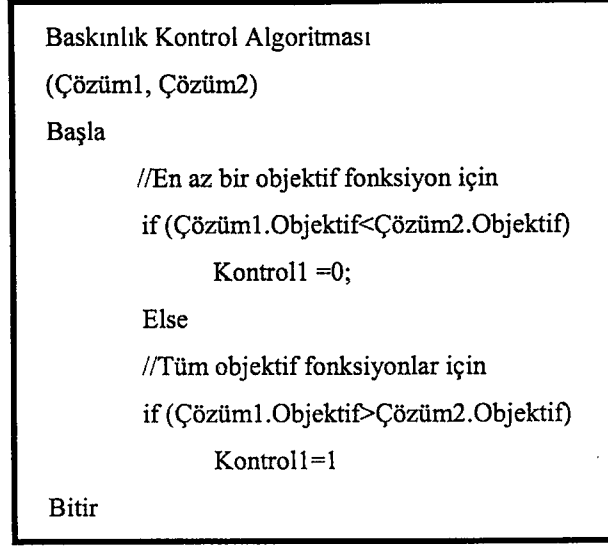
}

}

Bitir

Şekil 5.3 Komşu Çözüm Türetme Algoritması

BasKontrol: Fonksiyon girdi parametresi olarak aldığı iki çözümün baskınlığını kontrol eder. Eğer ikinci çözüm birinci çözüme baskın ise Kontrol1 0, aksi taktirde 1 değerini alır. Baskınlık kontrolü fonksiyonunun işleyişi Şekil 5.4'te yer almaktadır.



Şekil 5.4 Baskınlık Kontrolü Algoritması

TabuListKontrol: Fonksiyon (Şekil 5.5), bir çözüm dizisinin tabu listesinde yer alıp almadığını kontrol eder. Eğer çözüm tabu listesindeki çözümler arasında ise aspirasyon kriterini kontrol eder. Aspirasyon kontrolü, çözüm dizisinin aday ve Pareto listesindeki çözümler ile baskınlığının kontrolünü ifade eder. Eğer aday veya Pareto listesindeki herhangi bir çözüm, çözüm dizisine baskın ise aspirasyon kriteri sağlanamaz ve çözüm kabul edilmez. Eğer çözüm, bu listelerdeki hiçbir çözüm tarafından baskılanmamış ise, tabu listesinde olmasına rağmen aspirasyon kriterini sağlar ve kabul edilir.

Tabu Listesi Kontrol Algoritması

Başla

For Sayac=1 to TabuUzunluğu

{

if (Çözüm = TabuÇözüm) //Eğer çözüm bir tabu çözüm ise

{

//Tüm aday listesi için

BasKontrol(Çözüm, AdayÇözüm,Kontrol1) //Aday listesindeki çözümlerle
baskınlık kontrolü

//Tüm Pareto çözümler listesi için

BasKontrol(Çözüm, ParetoÇözüm,Kontrol2)//Aday listesindeki çözümlerle
baskınlık kontrolü

if (Kontrol1=0 || Kontrol2=0) //Aday veya Pareto çözümlerden

ÇözümRed birisi çözüme baskın ise

Else //Çözüm hiçbir aday veya Pareto

ÇözümKabul baskılanmamışsa

}

}

Bitir

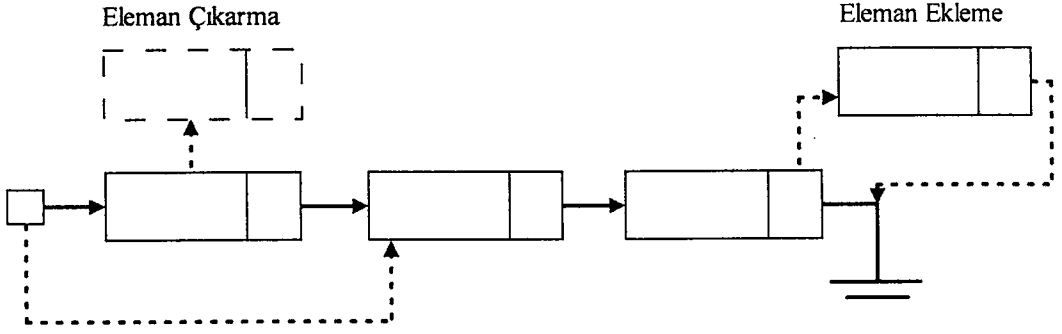
Şekil 5.5 Tabu Listesi Kontrol Algoritması

ParetoBelirle: Fonksiyon, türetilen komşu çözümler arasından Pareto optimal çözümlerin seçilmesini sağlar. Her bir komşu çözümün diğer komşu çözümlerle baskınlık kontrolü yapılır. Diğer komşu çözümler tarafından baskılanmış olan komşu çözümler elenir. Kalan Pareto optimal çözümler, aday ve Pareto listelerde yer alan çözümler ile baskınlık kontrolüne tabi tutulur. Aday ve Pareto listelerindeki çözümler tarafından baskılanmış olan komşu çözümler elenir. Kalan komşu çözümler, Pareto optimal komşu çözümler olarak algoritma tarafından kabul edilirler.

SeçParetoKom: Fonksiyon, Pareto optimal komşu çözümlerden rasgele birisini seçerek yeni çözüm olarak atanmasını sağlar.

AdayListEkle: Fonksiyon, bir çözümün bağlı işaretçi olarak tanımlanan aday listesinin sonuna eklenmesini sağlar. Şekil 5.6'da bağlı liste olan aday listesine eleman eklenmesi gösterilmektedir.

AdayListÇek: Fonksiyon, aday listesinin başında yer alan ilk çözümü listeden çıkararak yeni çözüm olarak atanmasını sağlar. Şekil 5.6’da aday listeden ilk çözümün kök çözüm olarak alınması gösterilmektedir.



Şekil 5.6 Aday Listesine Eleman Eklenmesi ve Çıkarılması

ElimineAday: Fonksiyon, aday listeden, girdi parametresi olarak aldığı bir çözüm (yeni çözüm veya komşu çözüm) tarafından baskılanmış çözümleri çıkarır. Listede sadece Pareto optimal çözümlerin kalmasını sağlar.

EliminePareto: Fonksiyon, Pareto optimal çözümler listesinden, girdi parametresi olarak aldığı bir çözüm (yeni çözüm veya komşu çözüm) tarafından baskılanmış çözümleri çıkarır. Listede sadece Pareto optimal çözümlerin kalmasını sağlar.

5.6 ÖRNEK PROBLEM ÇÖZÜMÜ

Geliştirilen algoritma C/C++ programlama dili ile yazılmış ve Pentium IV-2.6 işlemcili, 256 MB RAM belleğine sahip bir bilgisayarda çalıştırılmıştır. Tablo 5.1’de yer alan problem verileri kullanılarak programın çalıştırılması sonucunda Tablo 5.4’teki Pareto optimal çözümler elde edilmiştir. Problemin çözümünde Tablo 4.1’de sıralanan 10 farklı sıralama kuralı kullanılmıştır. Tablo 4.2’de sıralanan 12 objektif fonksiyonu arasından seçilen, *tamamlanma zamanı*, *makinelere yük dengesi* ve *toplam gecikme*, problemin objektif fonksiyonları olarak belirlenmiştir. Problemin çözümü sonucunda elde edilen 20 Pareto optimal çözüm Tablo 5.4’te yer almaktadır. Ayrıca, Pareto listesine eklenen

son kök çözümde parçalar için seçilen proses planlar, bu proses planlardaki operasyonların atandıkları makineler, işlem süreleri ve çizelgelemede kullanılan sıralama kuralları Tablo 5.5'te gösterilmiştir. Tablo 5.6'da bu çözüm dizisi için Giffler ve Thompson algoritması ile oluşturulan çizelge, her bir makineye atanan operasyonlar, başlama ve bitiş zamanları ile birlikte yer almaktadır.

Program parametreleri :

Iterasyon Sayısı	:500
Tabu Listesi Uzunluğu	:15
Komşu Çözüm Sayısı	:30
Proses Plan Değişiklik Oranı	:%20
Makine Alternatifi Değişiklik oranı	:%20
Sıralama Kuralı Değişiklik Oranı	:%20
Sıralama Kuralı Sayısı	:10
Objektif Fonksiyonlar: Toplam Gecikme, Yük Dengesi, Tamamlanma Zamanı	

Tablo 5.4 Örnek Problem İçin Pareto Optimal Çözümler

Toplam Gecikme	Yük Dengesi	Tamamlanma Zamanı
3	0,09	17
4	0,06	17
4	0,05	18
2	0,09	16
2	0,086	20
24	0,03	22
21	0,03	23
12	0,04	20
13	0,08	16
0	0,12	19
1	0,11	19
3	0,08	22
3	0,12	15
0	0,13	15
5	0,09	16
4	0,18	14

Tablo 5.5 Son Çözüm Dizisi Kontrolleri, Makineler, İşlem Süreleri, Sıralama Kuralları

Parça No	Proses Plan Kontrol	Operasyon No	Makine Alternatif Kontrol	Makine No	İşlem Süresi	Sıralama Kuralı
1	1	1	2	4	2	8
		2	2	3	1	6
		3	1	2	4	6
		5	2	4	2	5
2	2	1	1	2	4	7
		6	2	6	4	1
		4	1	1	4	1
3	2	1	3	6	5	9
		3	2	4	2	6
		5	1	3	4	4
4	2	1	1	2	2	10
		3	1	2	2	2
		4	4	6	1	4
5	1	5	1	3	6	5
		4	1	1	2	5
		3	2	4	3	1
6	2	1	2	4	5	2
		5	3	5	7	7
		4	4	6	1	6

Tablo 5.6 Son Çözüm Dizisi İçin Çizelge

O _{iş,operasyon}	Makine	Başlama, Bitiş	O _{iş,operasyon}	Makine	Başlama, Bitiş
O ₅₂	1	6,8	O ₁₁	4	5,7
O ₂₃	1	9,13	O ₃₂	4	7,9
O ₂₁	2	0,4	O ₅₃	4	9,12
O ₄₁	2	4,6	O ₁₄	4	12,14
O ₄₂	2	6,8	O ₆₂	5	5,12
O ₁₃	2	8,12	O ₃₁	6	0,5
O ₅₁	3	0,6	O ₂₂	6	5,9
O ₁₂	3	7,8	O ₄₃	6	9,10
O ₃₃	3	9,13	O ₆₃	6	12,13
O ₆₁	4	0,5			

5.7 SONUÇ

Çalışmanın bu bölümünde, modellenen esnek atölye çizelgeleme problemi için, çok objektifli tabu arama çözüm yaklaşımına dayalı yazılımı geliştirilen program yapısı açıklanmıştır. Programın veri yapısının etkinliği ve fonksiyonel işleyişi, program fragmanları üzerinde incelenmiştir. Programın, oluşturulan esnek veri yapısı, veri giriş formatı ve parametreleri ile pek çok farklı yapıda esnek atölye çizelgeleme probleminin çözümünde kullanılabileceği ortaya konulmuştur.



BÖLÜM 6

6 GENETİK PROGRAMLAMA VE TESLİM TARİHİ BELİRLEME PROBLEMLERİNE UYGULANMASI

6.1 GİRİŞ

Bu bölümde, Oltean ve Dumitrescu (2002) tarafından geliştirilen Çoklu Denklem Programlama (ÇDP) yaklaşımı ile esnek atölye çizelgeleme problemleri çerçevesinde teslim tarihlerinin belirlenmesine ilişkin bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Dil Teorisine dayalı olarak modeli geliştirilen esnek atölye çizelgeleme probleminin, tabu arama algoritması ile çözülmesi sonucunda elde edilen veriler, ÇDP programına adapte edilerek teslim tarihlerinin belirlenmesini sağlayan bir denklem elde edilmiştir. Denklemin test verileri ile hata oranları ve korelasyon katsayıları hesaplanarak yöntemin etkinliği ortaya konulmuştur.

6.2 GENETİK PROGRAMLAMA

Genetik programlama (GP), zor problemlerin çözümünde kullanılan evrimsel bir çözüm tekniğidir. GP bireyleri genellikle ağaç yapıları ile doğrusal olmayan bir şekilde gösterilir ve işlem görürler. Yakın zamanda GP'nın bir çok doğrusal gösterime sahip biçimleri için farklı yapılar önerilmiştir. Bunlardan bazıları gramere dayalı evrim, doğrusal genetik programlama ve gen denklem programlamadır (GEP). Bu farklı yapılardaki gösterimlerin amacı GP'nın performansını artırmak, aynı zamanda da programlanmasını kolaylaştırmaktır. Bu GP yaklaşımlarının ortak özelliği, doğrusal olmayan GP yapısının, doğrusal bireyler olarak ifade edilmesidir.

Genetik programlama, bireyleri programlardan oluşan bir popülasyona genetik algoritma operasyonlarının uygulanmasıdır. Uygulama alanı geniş olmakla birlikte sembolik regresyonda iyi sonuçlar verdiği ortaya konulmuştur (Sette; Boullart; 2001).

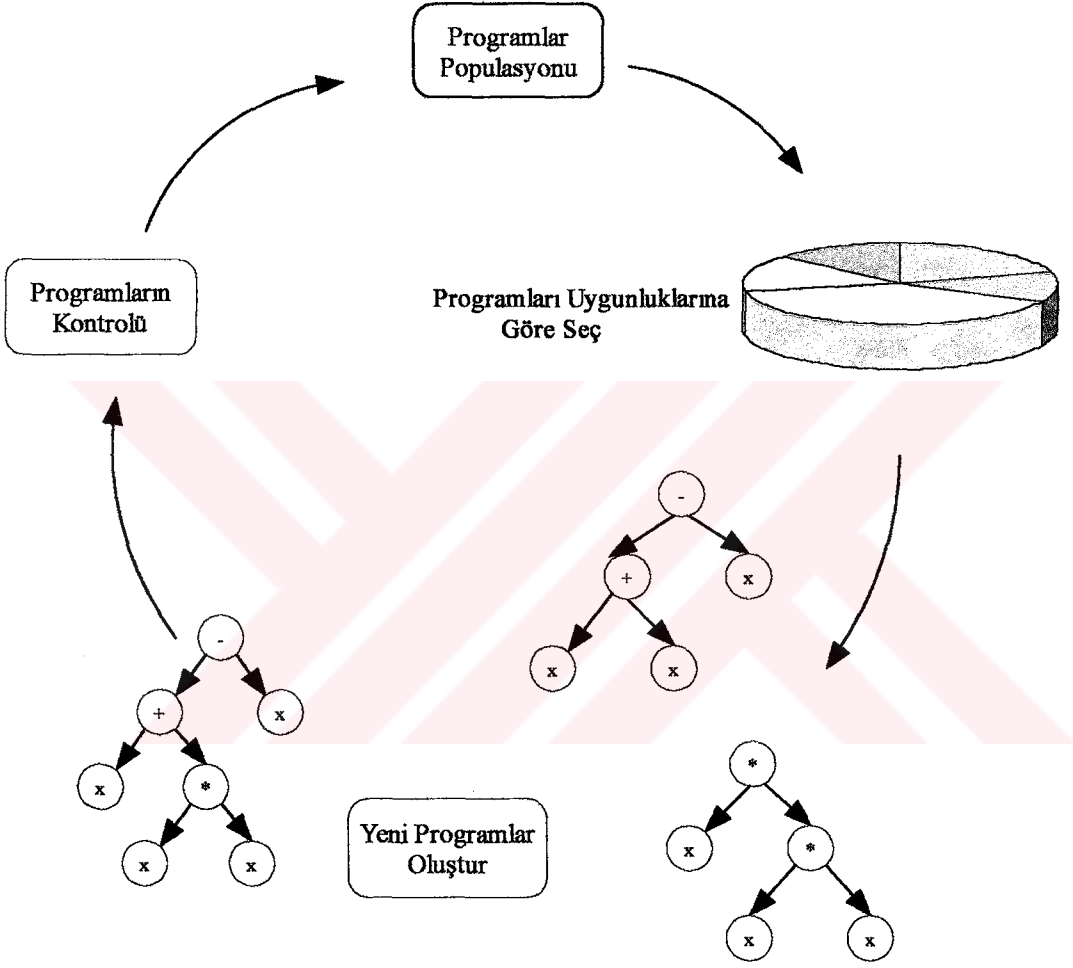
Genetik aloritmadan en önemli farklılığı, çözüm dizisinin değişken uzunlukta olma özelliğini taşımasıdır. Bireylerin ağaç yapısındaki gösterimleriyle birlikte çaprazlama ve mutasyon operatörleri genetik aloritmadan farklı olarak uygulamaya geçirilir. Genetik programlamanın çeşitli uygulamaları ile elde edilen sonuçları, Koza(1994, 291-294) ve Langdon (1998)'de ayrıntılı bir biçimde yer almaktadır. Son yıllarda genetik programlamanın veri yapısı ve programlanması üzerinde çalışmalar yoğunlaşmıştır (Fraser; 1994, Pollatchek; 1997).

Yakın zamanda yapılan çalışmalarla genetik programlama, üretim problemlerinin optimizasyonunda uygulanmaya başlanmıştır. Ancak genetik programlama uygulamaları, kodlanmasının zor olması, ağaç yapısında mutasyon ve çaprazlamadan dolayı uygun olmayan çözümlerin ortaya çıkması yüzünden yaygın bir kullanıma sahip olamamıştır (Langdon; 1998, 10). Ayrıca bu problemler sabit uzunlukta kromozomlarla genetik algoritma tarafından kolayca ifade edilebildiğinden ve çözümün uygunluğu daha kolay kontrol altında tutulabildiğinden genetik algoritma tercih edilmiştir. Bu konuda Dimopoulos ve Zalzal (1999a, 1999b, 2001) genetik programlama ile klasik tek makine çizelgeleme problemlerinde uygun sıralama denkleminin belirlenmesine yönelik bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada problem yapısına göre toplam gecikmeyi enküçükleyecek şekilde, uygun çizelgeleme kuralını belirlemek üzere farklı problem boyutlarında sıralama kurallarından oluşan dokuz farklı denklem türeterek etkinliklerini karşılaştırmışlardır. Dimopoulos ve Mort (2001), hücresele üretim sistemleri için, hiyerarşik yapıda hücrelerin belirlenmesi ve hücrelere atanacak ürün ailelerinin oluşturulması için genetik programlama temelli bir yaklaşım önermişlerdir.

6.2.1 Genetik Programlama Algoritması

Genetik programlama, programlardan oluşan bir popülasyona uygulanmış bir genetik aloritmadır. Genetik programlamada operasyonlar, genetik aloritmada gerçekleştirilen aşamalara oldukça benzemektedir. Genetik algoritma, sayılardan oluşan diziler üzerinde işlerken genetik programlama bilgisayar programlarını bireyler olarak ele almaktadır. Buna bağlı olarak, genetik algoritmanın operatörleri de (mutasyon, çaprazlama, üreme v.b.) genetik programlamada farklı biçimlerde ifade edilirler. İkisi arasındaki temel fark, bireylerin gösterimi ve uygunluk fonksiyonunun hesaplanmasıdır (Colorni; Dorigo; Maffioli; et. Al.; 1996, 2-8). Genetik programlamada genetik operatörlerle yeni

programların oluşturulmasını kolaylaştırmak için programlar ağaç yapısı ile ifade edilirler. Genetik programlamanın genel işleyiş döngüsü Şekil 6.1'de gösterilmiştir (Langdon; 1998, 4).

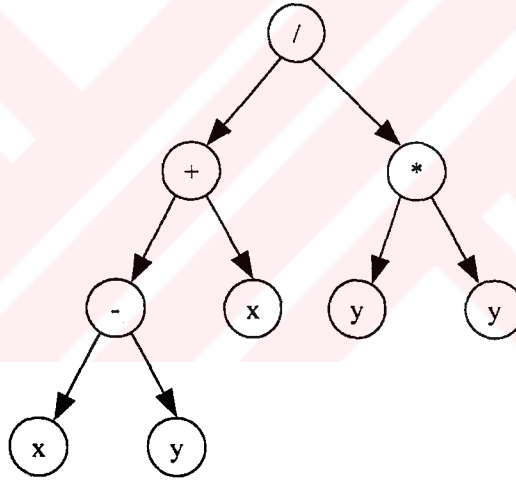


Şekil 6.1 Genetik Programlama Döngüsü

6.2.2 Programların Gösterimi

Genetik algoritmada, bir popülasyon elemanı sayı dizilerinden oluşmuş kodlardır. Bununla birlikte, genetik programlamada, bir popülasyon bireyi hiyerarşik olarak yapılandırılmış fonksiyonlardan ve terminallerden oluşan bir programdır. Fonksiyonlar ve terminaller, önceden belirlenmiş fonksiyon ve terminaller kümesinden seçilir.

Örneğin, bir fonksiyon kümesi temel aritmetik operatörlerden ($F = \{+, -, *, /\}$) oluşabilir. Fonksiyon kümesi probleme bağlı olarak farklı mantıksal operatörleri de içerebilir. Fonksiyon kümesindeki her bir eleman, etki alanı içerisinde olan argümanları belirlenerek tanımlanmalıdır. Örneğin (+) operatörünün iki argümanı vardır. Dolayısıyla seçilen fonksiyon kümesi için argüman sayıları $\{2, 2, 2, 2\}$ olarak belirlenmelidir. Terminal kümesi ise, fonksiyonların argümanlarını oluşturacak elemanları içerir. Örneğin, terminal kümesi, $T = \{x, y\}$, bağımsız iki değişken olan x ve y 'den oluşsun. Bu verileri kullanarak, bir genetik programlama bireyi olan program, Şekil 6.2'deki gibi kökü olan, ara düğümleri fonksiyonlardan, uç düğümleri terminallerden oluşan bir ağaç yapısında gösterilir.



Şekil 6.2 $((x-y)+x)/y^2$ Denkleminin Ağaç Yapısında Gösterimi

Yukarıda gösterilen ağaç yapısının doğrusal ifadesi;

$$((+(-xy)x)(*yy))$$

şeklindedir.

Yukarıdaki ifade ağaç yapısının kökten başlayarak sola yinelemeli olarak ilerlemesi, daha sonra sağ dallara geçmesi ile oluşturulmuştur.

Genetik programlamada fonksiyon ve terminal kümelerinin iki önemli özelliği sağlamaları gerekmektedir (Banzhaf; Nordin; Keller et Al; 1998, 45-49):

- **Kapalılık özelliği:** Fonksiyon kümesindeki her bir fonksiyon diğer fonksiyonlar tarafından türetilmiş olmalı ya da terminaller kümesindeki argümanların tamamını işleyebilmelidir. Örneğin matematiksel fonksiyonlar, 0'a bölünmeden, negatif logaritmadan, negatif karekökten korunmalıdır.
- **Yeterlilik özelliği:** Fonksiyon ve terminal kümesinden seçilen elemanlar, ele alınan problemin çözümü için yeterli olmalıdır. Yani elde edilen sonuç, problemin çözümü için uygun ve problemi ifade edebilir nitelikte olmalıdır.

Ayrıca, elde edilen programların uygunluk fonksiyonlarının kolaylıkla değerlendirilebilecek biçimde belirlenmesi de gerekmektedir.

6.2.3 Programlar Üzerinde Genetik Operasyonlar

GP'ye uygulanan operatörler temelde genetik algoritma operatörlerinin aynısıdır. Ancak uygulamada, birey yapısı farklı olduğu için bazı farklılıklar göstermektedir.

- **Üreme:** Üremenin farklı uygulamaları söz konusudur:
 - a. Uygunluk oranlı üreme yöntemi
 - b. Sıra seçim yöntemi
 - c. Turnuva seçim yöntemi
- **Çaprazlama:** Uygunluk fonksiyonuna bağlı olarak seçilen iki program rasgele belirlenmiş çaprazlama noktalarından çaprazlanırlar. Örneğin, program 1 (P1)'in çaprazlama noktası 2, program 2 (P2)'nin 3 olsun;

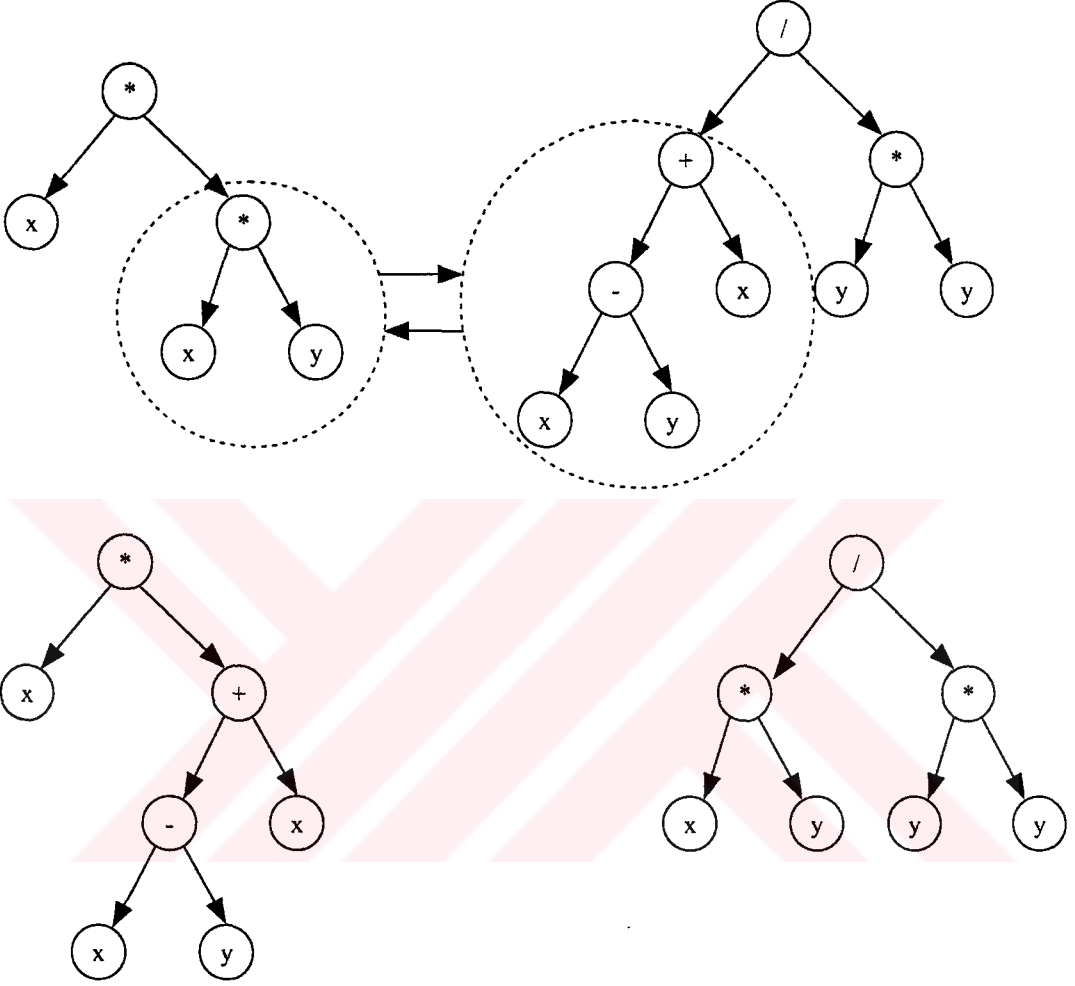
$$P1 = (/ (\pm (-xy) x) (*yy))$$

$$P2 = (*x (\pm xy))$$

Çaprazlamadan sonra elde edilen bireyler Şekil 6.3'te görülmektedir.

$$P1' = (/ (*xy) (*yy))$$

$$P2' = (* x (+ (- xy) x))$$



Şekil 6.3 Çaprazlama

- Mutasyon: Mutasyon iki farklı biçimde gerçekleştirilmektedir:
 - a. Rasgele bir terminal veya fonksiyon seçilir ve yine rasgele seçilmiş bir başka fonksiyon ya da terminalle değiştirilir.
 - b. Rasgele seçilmiş bir dal, yine rasgele oluşturulmuş bir dalla yer değiştirilir.

6.2.4 Genetik Programlama Uygulamaları

Koza (1992), GP'nin geniş bir uygulama yelpazesi olduğunu, özellikle optimal kontrol, robot planlama, yapay karınca, sembolik regresyon problemlerinde iyi sonuç verdiğini belirtmiştir. GP'nin en yaygın kullanımı, sembolik regresyon üzerinedir. Sembolik regresyon ile, herhangi bir süreçle ilgili parametrelerin ve sonuçların veritabanı kullanılarak matematiksel bir fonksiyonunun elde edilmesi ifade edilmektedir (Oltean; Dumitrescu; 2002, 2).

Belirtildiği gibi, GP bireyleri doğrusal değildir ve bireyler üzerindeki genetik operasyonlar hiyerarşik ağaç yapılarına göre gerçekleştirilir. Bu zorluktan ötürü GP'nin bir çok doğrusal türevi ortaya konulmuştur (Oltean; Dumitrescu; 2002, 1).

- Gramer yaklaşımı
- Gen programlama yaklaşımı
- Doğrusal genetik programlama yaklaşımı

6.2.4.1 Doğrusal Genetik Programlama Yaklaşımları

6.2.4.1.1 Gramer Yaklaşımı

Gramer yaklaşımında, programların gösteriminde BNF (Backus-Naur Form) yapısı kullanılmaktadır. Bir BNF grameri, terminal ve terminal olmayan sembollerden oluşur. Gramer sembolleri diğer terminal veya terminal olmayan sembollerle yeniden yazılabilmektedir. Her birey değişken uzunlukta diziler içermektedir. Bu diziler hangi türetim kuralının seçileceğine dair bilgileri içerir. Örneğin;

$$\begin{aligned}
 S ::= & \text{expr} \quad (0) \\
 & | \text{if-stmt} \quad (1) \\
 & | \text{loop} \quad (2)
 \end{aligned}$$

Bu türetim kuralları, S başlangıç sembolünün terminal olmayan sembollerle (expr, if-stmt, loop) yeniden yazılabileceğini göstermektedir. Gramer, türetim kurallarını uygulayarak ve S başlangıç sembolünden başlayarak bir program oluşturmak üzere

türetme sürecini ifade eder. Bu program geliştirme süreci bütün terminal olmayan sembollerin terminal sembollere dönüştürülmesiyle sonuçlanır. Gramer yaklaşımının önemli zorluğu, sistemde uygunsuz bireylerin de oluşabilmesidir. Bu durum bireylerin tam eşleştirilmemesinden kaynaklanmaktadır.

6.2.4.1.2 Gen Programlama

Gen programlama (GEP) doğrusal kromozomlar kullanır. Bir kromozom, terminal veya terminal olmayan sembolleri içeren genlerden oluşur. Kromozomlar, mutasyon, yer değiştirme, kök değiştirme, gen değiştirme, tek nokta ve iki nokta çaprazlama ile değiştirilirler. GEP genleri, baş ve kuyruk olarak adlandırılan iki ana parçadan oluşur. Baş kısmı, hem fonksiyon hem de terminallerden oluşur. Kuyruk kısmı ise sadece terminallerden oluşur. Her problem için baş kısmının uzunluğu kullanıcı tarafından belirlenir. Kuyruk kısmının uzunluğu ise baş kısmının uzunluğuna bağlı olarak 6.1'deki gibi hesaplanır.

$$t = (n-1)h + 1 \quad (6.1)$$

Formül 6.1'deki (n) en fazla argümanı olan fonksiyonun argüman sayısını ifade etmektedir. Örneğin GEP geninin S kümesindeki sembollerden oluştuğunu varsayalım;

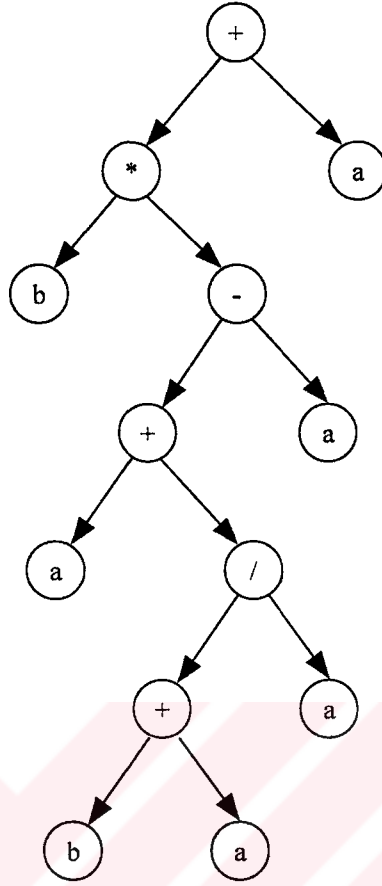
$$S = \{*, /, +, -, a, b\}$$

Kümedeki tüm fonksiyonların argüman sayısı 2 olduğundan $n=2$ olarak alınır. Eğer h 10 seçilirse, $t=11$ olarak hesaplanır. Dolayısıyla kromozomun uzunluğu $h+t=10+11=21$ olacaktır.

Örnek olarak C kromozomu ele alınabilir;

$$C = +*ab-+aa/+ababbbababb$$

Bu tek genli kromozomun ağaç yapısı ile gösterimi Şekil 6.4'te görülmektedir.



Şekil 6.4 C Kromozomunun Ağaç Yapısı

GEP’de çok genli kromozomlar da kullanılabilir. Kromozomu elde etmek amacıyla her bir gen, fonksiyon sembolleri ile birbirine bağlanır. Genellikle bağlantı fonksiyonları (+) toplama veya (*) çarpma fonksiyonları olarak belirlenmektedir. Fakat bazı durumlarda bu varsayım yetersiz kalmakta, diğer fonksiyonları da bağlantı fonksiyonu olarak kullanmak gerekmektedir. Bu durumda da kromozomun yapısı karmaşıklaşmaktadır. Bununla birlikte GEP’in başarı oranı kromozomun içerdiği gen sayısı arttıkça artmaktadır. Dolayısıyla GEP’de dikkat edilmesi gereken husus, kromozomu oluşturan gen sayısına karar vermektir. Bu da tamamen problemin çözümü için beklenen denklemin karmaşık yapısı ile alakalıdır. Ferreira (2001, 89-94)’ya göre, bir çok problem için GEP yaklaşımı, standart GP’ye göre daha iyi sonuç vermektedir.

6.2.4.1.3 Doğrusal Genetik Programlama

Doğrusal genetik programlama (LGP) programların özel bir doğrusal gösterimini kullanır. LISP gibi hiyerarşik ağaç yapısı ile gösterilen GP denklemleri yerine doğrusal bir ifade kullanır. Bir LGP bireyi, basit C dili komutları ile değişken uzunlukta ifade edilebilir (Şekil 6.5) (Oltean; Dumitrescu; 2002, 6);

```
void ind(v)
{
    double v[8];
    .....
    v[0]=v[5]+73;
    v[7]=v[9]-59;
    if (v[1]>0)
        if (v[5]>21)
            v[4]=v[2]*v[1];
    v[2]=v[5]+v[4];
    v[6]=v[9]*25;
    v[6]=v[4]-4;
    v[1]=sin(v[6]);
    if (v[0]>v[1])
        v[3]=v[5]*v[5];
    v[7]=v[6]*2;
    v[5]=v[7]+115;
    if (v[1]<=v[6])
        v[1]=sin(v[7]);
}
```

Şekil 6.5 Örnek LGP Bireyi C Kodu

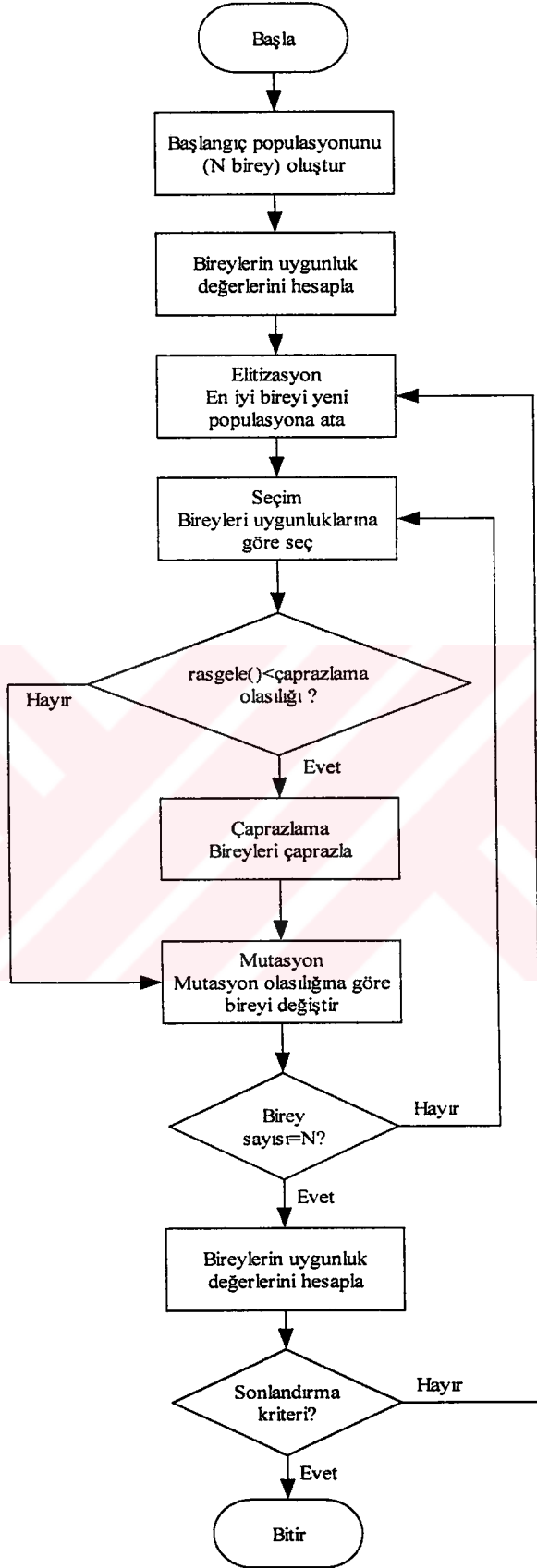
Bireylerin değişimi için çaprazlama ve mutasyon kullanılır. Çaprazlamada birbirini izleyen bir dizi komut seçilir ve bu komutlar iki birey arasında yer değiştirilir. Mikro ve

makro mutasyon olmak üzere iki tip mutasyon kullanılır. Mikro mutasyonla bir komuttaki operatör veya argüman değiştirilir. Makro mutasyonda ise bir komut satırı silinir ya da yeni bir komut satırı eklenir. Çaprazlama ve mutasyon kromozomdaki komut sayısını değiştirir.

6.3 ÇOKLU DENKLEM PROGRAMLAMA

6.3.1 Standart Çoklu Denklem Programlama Algoritması

Oltean ve Dumitrescu (2002) tarafından ortaya konulan, Oltean ve Grosan (2003)'ın evrimsel algoritmaların geliştirilmesinde uyguladıkları standart çoklu denklem programlama algoritması, rasgele seçilmiş bireylerden oluşan bir popülasyonla başlar. Mevcut popülasyondaki her birey, probleme bağlı olarak belirlenen uygunluk fonksiyonuna göre değerlendirilir. Belirli sayıda seçilen en iyi bireyler, bir sonraki jenerasyona geçirilir (elitizasyon). Eşleşme havuzu ikili turnuva seçimi ile doldurulur. Daha sonra bu havuzdaki bireyler rasgele çiftleştirilir ve çaprazlanır. İki ebeveynin çaprazlanması sonucu iki çocuk elde edilir. Elde edilen çocuklar mutasyona uğrar ve bir sonraki jenerasyona girerler. Algoritma belirli sayıda jenerasyon için tekrarlanır. Algoritmanın işleyişine yönelik akış diyagramı Şekil 6.6'da gösterilmiştir.

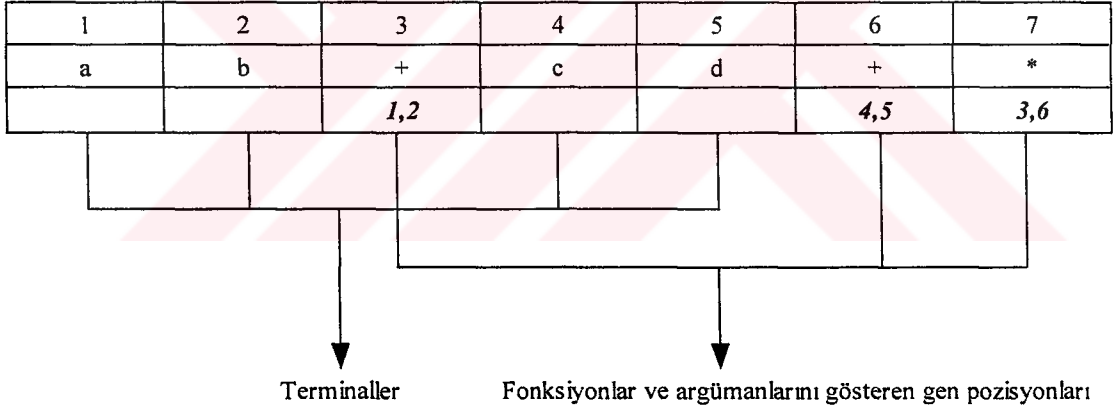


Şekil 6.6 Standart ÇDP Algoritması

6.3.2 Çoklu Denklem Programlama Kromozom Gösterimi

Çoklu denklem programlama genleri, değişik uzunluklardaki alt dizilerle ifade edilir. Kromozomdaki gen sayısı sabittir ve kromozom uzunluğunu ifade eder. Her gen bir terminal ya da fonksiyon sembolü içerir. Fonksiyon içeren bir gen, fonksiyonun argümanlarına işaret eden bir işaretçi taşır. Fonksiyon parametrelerinin, her zaman bu fonksiyonun kendisinin bulunduğu pozisyondan daha küçük pozisyon indislerine sahip olması gerekmektedir. Önerilen gösterim, kromozom deşifre edilirken hiçbir şekilde döngü ortaya çıkarmaz. Bu gösterim tarzına göre kromozomun ilk sembolü mutlaka bir terminal sembolü olmalıdır. Ancak bu şekilde, dizilimi doğru programlar elde edilebilir.

Örnek bir kromozom yapısı Şekil 6.7'deki gibi oluşturulabilir. İlk satırdaki sayılar genlerin kromozom içerisindeki pozisyonlarını ifade etmektedir.



Şekil 6.7 ÇDP Kromozom Yapısı

Bu ÇDP kromozomu incelenecek olursa 1,2,4,5 pozisyonlu genler birer terminaldir. 3, 6 ve 7 numaralı genler ise bir denklemi ifade eden fonksiyonları ve bu fonksiyonların argümanlarını göstermektedir.

1	2	3	4	5	6	7
a	b	$a+b$	c	d	$c+d$	$(a+b)*(c+d)$

Şekil 6.8 ÇDP Kromozomunun Denklem Gösterimi

Şekil 6.8’de görüldüğü gibi ÇDP kromozomları genellikle aynı anda birden fazla denklemi kodlayabilmektedir. Buna karşılık genetik programlama kromozomu tek bir denklemi kodlayabilmektedir. ÇDP kromozomunun kodladığı birden fazla denklemin herhangi birisi kromozomu temsil etmek üzere seçilebilir. Her bir denklemin uygunluk fonksiyonu değeri hesaplanarak en iyi olanı kromozomu temsil edecek şekilde belirlenir. Eğer gerekiyorsa bağlantı fonksiyonları (+,*) ile denklemler birbirlerine bağlanabilir.

6.3.3 Çoklu Denklem Programlama ve Gen Programlama Gösterimlerinin Karşılaştırılması

Gen programlama ile karşılaştırıldığında ÇDP kromozomunun ifadesi oldukça kısadır. $E = a^4 + a^3 + a^2 + a$ denklemi ele alınacak olursa, denklemi tanımlayacak fonksiyon kümesi F, terminal kümesi ise T olur;

$$F = \{+, -, *, /\}$$

$$T = \{a\}$$

E denkleminin ifade eden GEP kromozomunun doğrusal yapısı aşağıdaki gibidir:

$$+a+*+aa**a***aaaaaaaaaaaaa$$

$h=13$, $t=14$ ve kromozom uzunluğu 27’dir.

E denklemini ifade eden ÇDP modelinin kromozomu ise Şekil 6.9’daki gibidir:

1	2	3	4	5	6	7
a	*	*	*	+	+	+
	1,1	1,2	2,2	1,2	3,5	4,6

Şekil 6.9 E Denkleminin ÇDP Kromozomu

Tablo 6.9'dan görüldüğü üzere, kromozom sadece 19 sembol kullanmaktadır. ÇDP kromozomlarının daha kısa olmasının temelinde iki sebebi vardır;

- Kodların tekrar kullanılabilirliği
- Kromozom içerisinde kodlanmayan genin yer almaması

Bunlara bağlı olarak karmaşık denklemlerin çok daha kısa doğrusal gösterimleri mümkün olabilmekte, aynı zamanda da genetik operasyonların uygulanması sonucunda istenmeyen bireylerin ortaya çıkması önlenmektedir. Dolayısıyla ÇDP kromozom gösterimi, diğer doğrusal GP türevlerine göre daha etkin ve daha iyi sonuçlara yol açacak şekilde tasarlanmıştır.

6.3.4 Seçim

Standart ÇDP algoritması evrimsel bir algoritma olduğundan, seçim süreci uygunluk fonksiyonu en yüksek olan bireyin bir sonraki jenerasyona aktarılmasını sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Bunun için q-turnuva seçimi yöntemi kullanılmaktadır. Rasgele seçilmiş q adet bireyi içerisinde en iyi (uygunluk fonksiyonu en yüksek olan) birey seçilir. Oltean ve Dumitrescu (2002), yaptıkları çalışmada ikili turnuva seçiminin sembolik regresyonda diğer seçim yöntemlerine göre daha iyi sonuç verdiğini ortaya koymuşlardır. İkili turnuva seçiminde mevcut popülasyondan seçilen 2 birey arasından uygunluk fonksiyonu yüksek olan birey alınır.

6.3.5 Arama Operatörleri

ÇDP algoritması içerisinde kullanılan arama operatörleri çaprazlama ve mutasyondur. Uygulanan arama operatörleri kromozom yapısını koruyacak ve uygun olmayan birey türetmeyecek şekilde tasarlanmıştır.

6.3.5.1 Çaprazlama

Standart ÇDP algoritmasında üç farklı tip çaprazlama tekniği uygulanmıştır. Probleme bağlı olarak bu tekniklerden herhangi birisi veya tamamı kullanılabilir. Bu teknikler:

- tek-nokta çaprazlama,
- iki-nokta çaprazlama,
- düzenli çaprazlamadır.

6.3.5.1.1 Tek Nokta Çaprazlama

Tek nokta çaprazlamada, iki ebeveyn bireyden rasgele bir nokta seçilir ve bireylerin belirlenen noktadan sonraki genleri birbirleri ile yer değiştirilerek yeni bireyler elde edilir.

Örneğin C1 ve C2 seçilen ebeveynler olsun (Şekil 6.10);

1	2	3	4	5	6	7
b	*	+	a	*	a	-
	1,1	2,1		3,2		1,4
				↑	↓	
1	2	3	4	5	6	7
a	b	+	c	d	+	*
		1,2			4,5	3,6

Şekil 6.10 C1-C2 Kromozomları

Çaprazlama noktası 3 olarak belirlenirse, elde edilen yeni bireyler (F1, F2) Şekil 6.11'deki gibi olur.

1	2	3	4	5	6	7
b	*	+	c	d	+	*
	1,1	2,1			4,5	3,6

1	2	3	4	5	6	7
a	b	+	a	*	a	-
		1,2		3,2		1,4

Şekil 6.11 F1-F2 Kromozomları

6.3.5.1.2 İki Nokta Çaprazlama

İki-nokta çaprazlama da tek-nokta çaprazlamaya benzemekle birlikte, aralarındaki fark, tek nokta yerine iki noktanın rasgele seçilerek çaprazlamanın gerçekleştirilmesidir.

Örneğin Şekil 6.12'deki C1, C2 kromozomları ele alınarak çaprazlama noktaları 2 ve 5 olarak seçilmiş olsun. Elde edilen yeni bireyler Şekil 6.13'teki F1 ve F2 kromozomlarıdır.

1	2	3	4	5	6	7
b	*	+	a	*	a	-
	1,1	2,1		3,2		1,4

1	2	3	4	5	6	7
a	b	+	c	d	+	*
		1,2			4,5	3,6

Şekil 6.12 C1-C2 Kromozomları

1	2	3	4	5	6	7
b	*	+	c	d	a	-
	1,1	1,2				1,4
1	2	3	4	5	6	7
a	b	+	a	*	+	*
		2,1		3,2	4,5	3,6

Şekil 6.13 F1-F2 Kromozomları

6.3.5.1.3 Düzgün Çaprazlama

Düzgün çaprazlamada çocuklar her iki bireyden rasgele genlerin alınması ile oluşturulur. Şekil 6.12'deki C1 ve C2 kromozomlarından rasgele seçilen genlerin yer değiştirmesi sonucunda elde edilen F1 ve F2 kromozomları Şekil 6.14'te görülmektedir.

1	2	3	4	5	6	7
a	*	+	c	*	+	-
	1,1	2,1		3,2	4,5	1,4

1	2	3	4	5	6	7
b	b	+	a	d	a	*
		2,1				3,6

Şekil 6.14 F1-F2 Kromozomu

6.3.5.2 Mutasyon

Kromozom içerisindeki her bir gen mutasyona tabi tutulabilir. Mutasyon operatörünü uygularken, mutasyon olasılığı (pm) göz önüne alınmaktadır. Standart ÇDP algoritmasında iki farklı tip mutasyon uygulanmaktadır;

- Standart mutasyon
- Düzgün mutasyon

6.3.5.2.1 Standart Mutasyon

Mutasyonla kromozom içerisindeki bazı genler değişikliğe uğrar. Burada dikkat edilecek nokta ilk genin her zaman terminal olmasının sağlanmasıdır. Diğer genler için herhangi bir kısıtlama yoktur. Eğer seçilen gen bir terminal sembolse, yine bir terminal sembole veya bir fonksiyon sembole dönüştürülebilir. Eğer seçilen gen bir fonksiyonsa, bir terminal sembole veya başka bir fonksiyona değiştirilebilir ve argümanları da yeni fonksiyona göre belirlenir.

6.3.5.2.2 Düzgün Mutasyon

Fonksiyon sembollerinin değiştirilmesinde düzgün mutasyon kullanılabilir. Düzgün mutasyon, gen içerisinde yer alan her sembolü (fonksiyon sembolü veya fonksiyonun argüman pozisyonları) belirlenmiş bir olasılıkla (psm) değiştirir.

Eğer gen içerisindeki fonksiyon iki argümanlı bir fonksiyon ise, $psm=0.33$ olarak tanımlandığında gen içerisindeki her bir pozisyona eşit değerde değişiklik oranı düşmektedir.

Örneğin Şekil 6.12'deki C1 kromozomu ele alınarak, $Pm=0,28$ olarak tanımlandığında, bu oran 7 genli bir kromozomda 2 genin değiştirileceğini ifade edeceğinden, rasgele iki pozisyon belirlenir.

1	2	3	4	5	6	7
a	*	b	*	b	+	a
	1,1		2,2		3,5	

Şekil 6.15 Mutasyon İçin C1 Kromozomu

Eğer genlerden 3 ve 6 mutasyon için seçilecek olursa (Şekil 6.15), yapılacak rasgele değişikliklerle Şekil 6.16'daki F1 yeni bireyi elde edilebilir.

1	2	3	4	5	6	7
a	*	+	*	b	+	a
	1,1	1,2	2,2		1,4	

Şekil 6.16 F1 Kromozomu

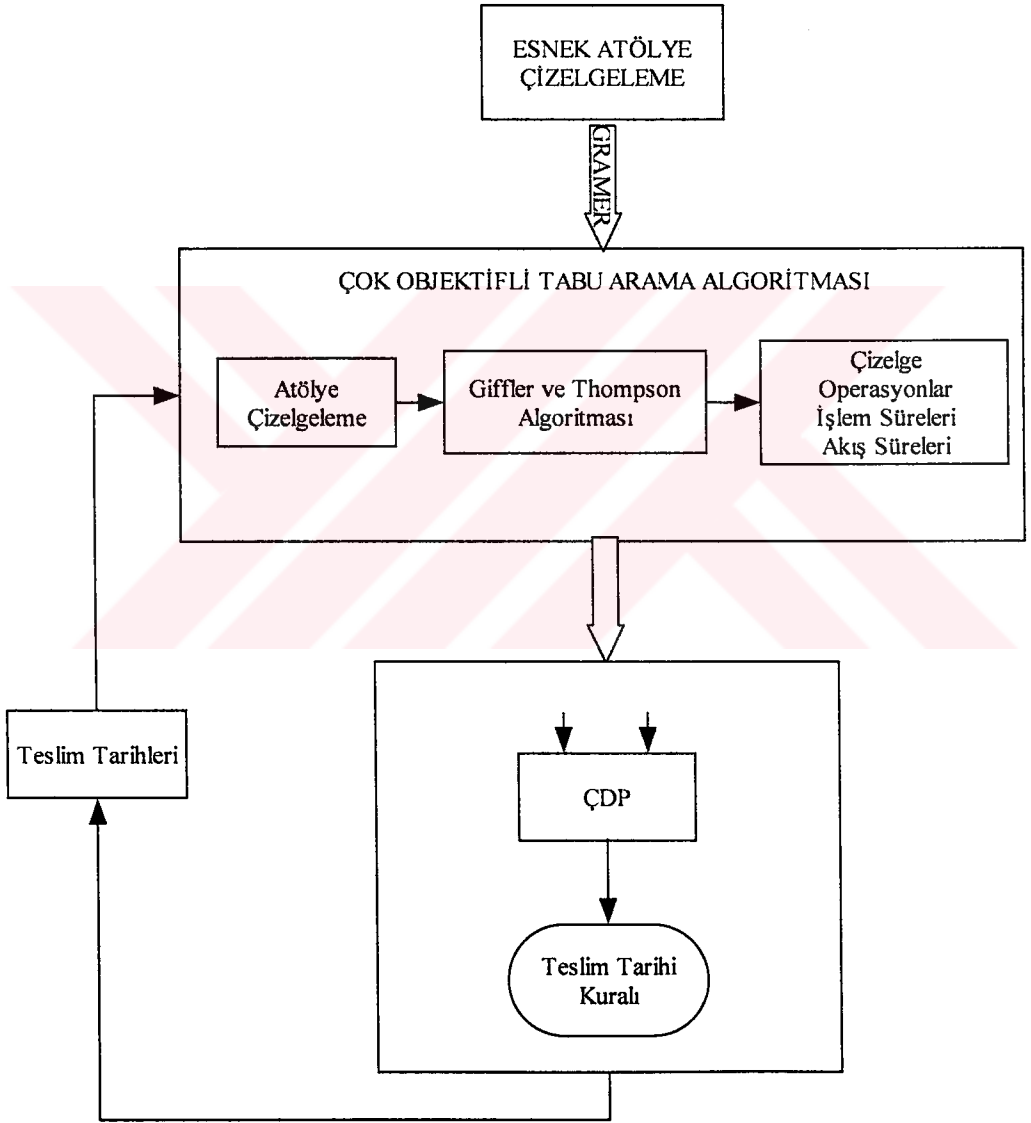
Şekil 6.16'da görüldüğü gibi, 3. gendeki terminal sembolü bir fonksiyonla değiştirilmiştir. Buna bağlı olarak da fonksiyonun argümanları belirlenmiştir. Altıncı gende ise fonksiyon değişmemekle birlikte argümanlarındaki pozisyonlar değişikliğe uğramıştır. Böylece C1'den farklı bir F1 bireyi elde edilmiştir.

6.4 TESLİM TARİHİ BELİRLEMEDE ÇOKLU DENKLEM PROGRAMLAMA UYGULAMASI

Çalışmanın bu bölümünde, bir atölye çizelgeleme sistemi için teslim tarihlerinin en düşük sapma ile belirlenmesi amacıyla Oltean ve Dumitrescu (2002) tarafından geliştirilen ÇDP algoritması kullanılmıştır.

Bağlam Bağımsız Gramer'ler ile modellenen ve çok objektifli tabu arama algoritması ile çözüm geliştirilen esnek atölye çizelgeleme problemleri için doğru teslim tarihlerinin belirlenmesine ilişkin uygulama yapılmıştır. Esnek atölye çizelgeleme problemleri için

geliştirilen çözüm yöntemi, ÇDP ile entegre edilerek, çizelgeleme sistemi için etkin teslim tarihi belirlenmesine yönelik formülasyon, sembolik regresyon ile oluşturulmuştur (Şekil 6.17). Bu yaklaşım ile her bir üretim çizelgeleme sistemi için, o sistemin iş özelliklerine uygun teslim tarihi belirleme denklemlerinin geliştirilmesi amaçlanmıştır.



Şekil 6.17 Esnek Atölye Çizelgeleme-ÇDP Entegrasyonu

6.4.1.1 Çoklu Denklem Programlama Algoritmasının Modifikasyonu ve Parametreleri

Çoklu denklem programlama algoritması tek bir başlangıç popülasyonu ile çalışmaktadır. Rasgele oluşturulan bu başlangıç popülasyonuna genetik operatörlerin uygulanması ile popülasyondaki bireylerin uygunluk değerleri iyileştirilmektedir.

Yapılan çalışmada, standart ÇDP algoritması değiştirilerek birden fazla popülasyon oluşturulmuş, bu popülasyonlar belirlenen sayıda jenerasyonla iyileştirilmişlerdir. Elde edilen popülasyonların belirli sayıda en iyi bireyi son popülasyona aktararak, yeniden iyileştirme sürecine tabi tutulmuşlardır. Bu değişiklik ile iki farklı yapının - standart ÇDP, çok popülasyonlu ÇDP - etkinliği Taguchi deney tasarımı ile karşılaştırılmıştır.

ÇDP2.0 Algoritması

Başla

//m farklı popülasyon için

For (PopSayısı=0; PopSayısı<m; PopSayısı++)

{

Pop = Popülasyon(N)

//N bireyden oluşan başlangıç popülasyonu oluştur

Uygunluk(Pop)

//Popülasyondaki bireylerin uygunluklarını hesapla

Sırala(Pop)

//Popülasyondaki bireyleri uygunluklarına göre sırala

ÇokluDenklemlerProgramlama(Pop)

//Popülasyona genetik operatörleri uygula

Pop2=SonPopOluştur()

//Popülasyondaki en iyi N/m bireyi son popülasyona kopyala

}

ÇokluDenklemlerProgramlama(Pop2)

//Son popülasyonu iyileştir

Bitir

Şekil 6.18 Çok Popülasyonlu ÇDP Algoritması

Şekil 6.18’de çok popülasyonlu ÇDP algoritmasının genel çerçevesi yer almaktadır. Bu yapıya göre, m farklı başlangıç popülasyonu oluşturulmaktadır. Bu başlangıç popülasyonlarındaki bireylerin uygunlukları, belirlenen uygunluk fonksiyonuna göre

hesaplanmaktadır. Uygunluk değerleri belirlenen bireyler, popülasyonda uygunluklarına göre sıralanmaktadır. Bu popülasyonların her birine belirlenen sayıda alt jenerasyon için ÇDP algoritması uygulanarak, uygunluk fonksiyonları iyileştirilmektedir. Elde edilen m farklı popülasyonun her birinin en iyi N/m bireyi son popülasyona aktarılmaktadır. Uygunluk fonksiyonlarına göre m popülasyon tarafından bulunan en iyi bireylerden oluşan son popülasyon, genetik operatörlerle yeniden iyileştirilmektedir.

ÇokluDenklemleriProgramlama(Pop)

Başla

For (Sayaç=0; Sayaç<JenerasyonSayısı; Sayaç++)

{

Elitizasyon() //Popülasyondaki en iyi birey yeni popülasyona aktarılır

EşleştirmeGrup() //Çaprazlama için bireyler grubunu ikili turnuva ile oluştur

Seçim() //Eşleştirme grubundan rasgele iki birey seç

If (rasgele()<pc) //Çaprazlama

{

if (rasgele()<pc1) //Tek nokta çaprazlama

TekNoktaÇaprazlama

Else //İki nokta çaprazlama

İkiNoktaÇaprazlama

}

Mutasyon; //Mutasyon olasılığına göre bireyi değiştir

BireyKopya() //Bireyleri yeni popülasyona kopyala

Uygunluk()

Sırala()

}

Bitir

Şekil 6.19 ÇDP Fonksiyonu

Şekil 6.19'da, uygulanan ÇDP algoritması yer almaktadır. Algoritmaya göre bir popülasyondaki en iyi uygunluk değerine sahip birey (elit birey), doğrudan sonraki popülasyona aktarılmaktadır.

Çaprazlama için bireyleri belirlemek amacıyla, eşleştirme havuzu ikili turnuva seçimi ile oluşturulmaktadır. İkili turnuva seçimine göre, popülasyondan rasgele seçilen iki bireyden, uygunluk fonksiyonu diğerine göre iyi olan birey eşleştirme havuzuna aktarılmaktadır. Eşleştirme havuzundan rasgele iki birey seçilerek çaprazlamaya tabi tutulmaktadır. Çaprazlama, seçilen bireylere (pc) çaprazlama olasılığına göre uygulanır. Çaprazlama olasılığına göre kabul edilen bireyler üzerinde, tek nokta veya iki nokta çaprazlama gerçekleştirilir. Oltean ve Dumitrescu (2002), çalışmalarında tek nokta çaprazlamayı kullanarak, elde ettikleri sonuçları değerlendirmişlerdir. Ancak bu çalışmada uygulanan ÇDP algoritmasında, arama alanında uygun yayılımı sağlamak amacıyla her iki tip çaprazlama yöntemi de kullanılmıştır.

Çaprazlama sonucunda elde edilen yeni bireylere mutasyon uygulanır. Bireyde, mutasyon olasılığına göre belirlenen sayıda gen, fonksiyon ya da terminaller kümesinden rasgele seçilen sembollerle değiştirilir. Seçilen sembol fonksiyon ise, argümanları belirlenir.

Yeni bireyler sonraki jenerasyona aktarılacak üzere yeni popülasyonu oluştururlar. Bireylerin uygunlukları hesaplanarak, popülasyonda bu uygunluklara göre sıralanırlar. Algoritma belirli sayıda jenerasyon için tekrarlanır. Elde edilen son popülasyonun ilk bireyi, en iyi uygunluk değerine sahip birey olarak sonuç fonksiyonunu verir.

6.4.1.1.1 Fonksiyon, Terminal ve Parametreler

ÇDP algoritmasının programlanması ve uygulanmasında, probleme uygun terminallerin belirlenmesi ve fonksiyonların oluşturulması performans açısından büyük önem taşımaktadır. Fonksiyonların doğru belirlenmesi, problem girdilerine en uygun denklemin geliştirilmesini sağlar. Bunun için gerçekleştirilen çalışmada fonksiyon yelpazesi geniş tutulmuştur. Fonksiyon ve terminal kümesi aşağıdaki şekilde belirlenerek programlanmıştır.

$$F = \{ +, -, *, /, e, \logaritma, \cosinüs, \sinüs, \tanjant, \sqrt{} \}$$

$$T = \{x0, x1\}$$

$x0$ = İşin toplam işlem zamanı $p_j = \sum_{i=1}^{o_j} p_{ij}$

$x1$ = İşin operasyon sayısı o_j

$x2(Hedef\ değerler)$ = j. işin sistemdeki akış zamanı F_j

f_j = j. iş için fonksiyon tarafından belirlenen teslim tarihi

Uygunluk Fonksiyonu: Her bir işe ait veri için hedef değerlerden (akış zamanlarından) sapmaların toplamı olarak alınmıştır.

$$Enküçükle \quad d = \sum_{j=1}^n |f_j - F_j| \quad (6.2)$$

Şekil 6.18 ve 6.19’da yer alan ÇDP algoritmasının parametreleri:

- Kod uzunluğu: Populasyonun bir bireyini oluşturan kromozomdaki gen sayısı
- Çaprazlama olasılığı (p_c): Belirlenen bireylere çaprazlama uygulama olasılığı
- Tek nokta çaprazlama olasılığı: Çaprazlamaya giren bireylere, tek nokta çaprazlama olasılığı
- İki nokta çaprazlama olasılığı: Çaprazlamaya giren bireylere, iki nokta çaprazlama olasılığı
- Mutasyon olasılığı (p_m): Kromozomlarda değiştirilecek gen oranı
- Populasyon büyüklüğü: Bir populasyonda yer alacak kromozom sayısı
- Jenerasyon sayısı: Algoritmanın tekrar sayısı
- Başlangıç populasyonu sayısı: Farklı başlangıç populasyonu sayısı

Çalışmada yazılımı geliştirilen ÇDP algoritmasında, arama alanında uygun bir yayılımın gerçekleştirilebilmesi amacıyla, çok populasyonlu ÇDP uygulanmıştır. Yine aynı amaca yönelik olarak, tek ve iki nokta çaprazlama yöntemleri birlikte kullanılmıştır. Oltean ve Dumitrescu (2002) çalışmalarında, ikili turnuva seçimi ve ağırlıklandırılmış fonksiyonların sembolik regresyonda daha iyi sonuç verdiğini ortaya koymuşlardır. Ağırlıklandırılmış ÇDP yönteminde, seçilen fonksiyonların (*,+), diğer fonksiyonlara

göre sonuç denkleminde yer alma olasılığı artırılmaktadır. Buna bağlı olarak çalışmada, ikili turnuva seçimi ve ağırlıklandırılmış ÇDP yöntemlerinin yazılımı gerçekleştirilmiştir.

6.4.1.2 50x15 Problemi Çoklu Denklem Programlama Uygulaması

Yazılımı C/C++ programlama dilinde gerçekleştirilen program, Pentium IV, 2.6 işlemcili, 256 MB RAM özelliklerine sahip bir bilgisayarda çalıştırılmıştır. 50x15'lik test problemi için çok objektifli tabu arama çözümü sonucunda elde edilen;

- işlerin operasyon sayısı,
- işlerin işlem zamanları,
- işlerin akış zamanları

bilgileri ÇDP programına girdi teşkil etmiştir. Elde edilen 200 işlik verinin, 150'si ÇDP algoritmasının denklem geliştirmesinde (öğrenme) kullanılmıştır. Kalan 50 iş verisi, test amacıyla kullanılmıştır. Elde edilen teslim tarihi denkleminin, test verisine uygulanması sonucunda, test verisi için teslim tarihleri belirlenmiştir. Test verisinin hedef akış zamanları ile hesaplanan teslim tarihleri için Pearson çarpım moment korelasyon katsayısının kareleri (R^2) hesaplanmıştır.

Pearson çarpım moment korelasyon katsayısı, -1,0 ile 1,0 arasında (dahil) boyutsuz bir indis olup iki veri kümesi arasındaki doğrusal bir ilişkinin kapsamını yansıtır. R^2 ise 0 ile 1 aralığında olup, bu iki veri kümesi arasındaki ilişkinin yönünü değerlendirmeksizin kuvvetini verir. Pearson korelasyon katsayısının formülasyonu, n elemandan oluşan X ve Y veri dizileri için (6.3)'teki gibidir.

$$r = \frac{n(\sum XY) - (\sum X)(\sum Y)}{\sqrt{[n\sum X^2 - (\sum X)^2][n\sum Y^2 - (\sum Y)^2]}} \quad (6.3)$$

Tablo 6.1'de ÇDP için belirlenen program parametreleri yer almaktadır. Program, Tablo 6.1'de yer alan parametrelerin farklı düzeyleri için çalıştırılmıştır. Elde edilen R^2 değerleri Tablo 6.2'de görülmektedir.

Tablo 6.1 ÇDP Parametreleri

Parametre	Açıklama	Düzeyler
P1	Jenerasyon Sayısı	1000,5000,15000
P2	Çaprazlama Olasılığı	0.2,0.4
P3	Tek nokta çaprazlama	0.3,0.5,0.7
P4	İki nokta çaprazlama	0.3,0.5,0.7
P5	Kromozom uzunluğu	100,200
P6	Mutasyon olasılığı	0.02,0.03
P7	Populasyon büyüklüğü	100,200
P8	Alt jenerasyon sayısı	100,1000
P9	Alt populasyon sayısı	1,5,10

Test verisi hedef değerleri ile teslim tarihi formülü ile hesaplanan değerler arasında en yüksek ilişki, R^2 'nin en yüksek değeri olan 0,83 ile elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlarda en küçük R^2 değeri, iki veri dizisi arasındaki en kötü ilişkiyi ifade edip, 0,71 olarak hesaplanmıştır

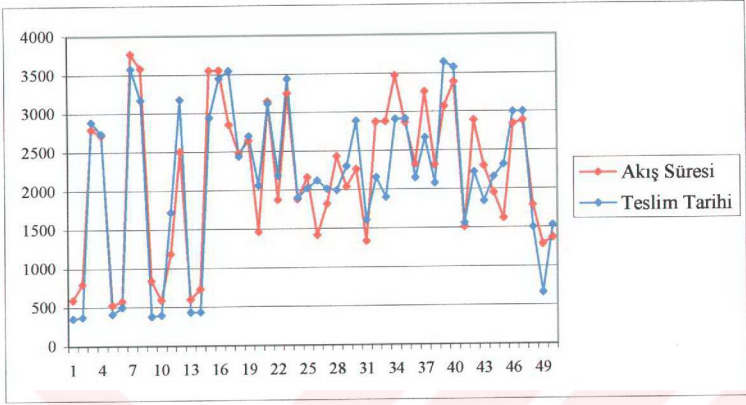
En yüksek R^2 (0,83) değerini veren denklem (6.4)'teki gibidir.

$$f = \tan(x_1) + \log(\cos(\log(\sin(x_0))) - \log(x_0)) * (\log(x_0) + x_0 - x_1) / \sqrt{\sin(\log(x_0))} \quad (6.4)$$

Tablo 6.2 50x15 Test Problemi İçin ÇDP R² Değerleri

P9	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	R ²
5	1000	0,2	0,5	0,5	100	0,03	100	100	<u>0,83</u>
5	1000	0,4	0,5	0,5	100	0,02	100	100	0,77
5	1000	0,4	0,5	0,5	100	0,02	200	100	0,78
1	1000	0,2	0,3	0,7	100	0,02	100	100	0,72
1	1000	0,2	0,7	0,3	100	0,02	100	100	0,74
5	1000	0,2	0,5	0,5	200	0,02	100	100	0,77
5	1000	0,2	0,5	0,5	100	0,02	100	1000	0,78
5	5000	0,2	0,5	0,5	100	0,02	100	100	0,78
5	5000	0,2	0,5	0,5	100	0,03	100	100	0,76
10	1000	0,2	0,5	0,5	100	0,03	100	100	0,81
5	1000	0,2	0,5	0,5	200	0,03	200	100	0,81
5	15000	0,2	0,5	0,5	100	0,02	100	100	0,78
5	15000	0,2	0,5	0,5	100	0,03	100	100	0,77
5	1000	0,4	0,5	0,5	100	0,03	100	100	0,73
10	5000	0,2	0,5	0,5	100	0,03	100	100	0,81
10	5000	0,2	0,5	0,5	100	0,03	100	1000	0,81
5	5000	0,4	0,5	0,5	100	0,03	100	1000	0,79
10	5000	0,4	0,5	0,5	100	0,03	100	1000	0,80
5	15000	0,2	0,5	0,5	100	0,03	100	100	0,81
5	5000	0,2	0,5	0,5	100	0,03	100	1000	0,81
5	5000	0,3	0,3	0,7	100	0,03	100	100	<u>0,71</u>
1	1000	0,2	0,5	0,5	100	0,02	100	100	0,73
1	1000	0,2	0,5	0,5	200	0,03	200	1000	0,76
1	5000	0,4	0,5	0,5	100	0,02	200	1000	0,77
1	5000	0,4	0,5	0,5	200	0,03	100	100	0,76
5	1000	0,4	0,5	0,5	100	0,03	100	1000	0,81
5	1000	0,4	0,5	0,5	200	0,02	200	100	0,78
5	5000	0,2	0,5	0,5	100	0,03	200	100	0,81
5	5000	0,2	0,5	0,5	200	0,02	100	1000	0,81

Test verisi için f denklemi ile hesaplanan teslim tarihleri ile hedef değerler olan akış zamanlarının grafiği Şekil 6.20’de görülmektedir.



Şekil 6.20 ÇDP Teslim Tarihi - Akış Süresi

Çalışmada ele alınan genetik programlama yaklaşımının teslim tarihi belirlemede etkinliğinin değerlendirilebilmesi amacıyla, iki farklı yöntemle karşılaştırma yapılmıştır.

- Regresyon
- Yapay sinir ağları

6.4.1.3 50x15 Problemi İçin Regresyon Sonuçları

Regresyon, bir bağımlı değişken ile bağımsız değişken(ler) arasındaki bağıntıyı bulmak amacıyla kullanılan bir yöntemdir.

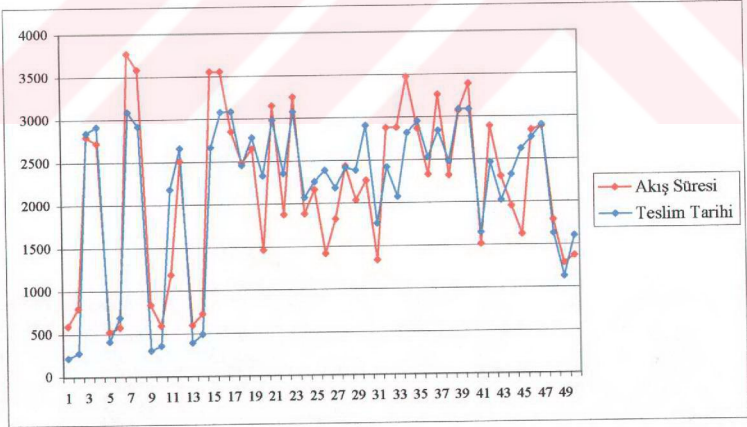
50x15'lik test problemi için, f teslim tarihlerinin (bağımlı değişken), x_0 ve x_1 bağımsız değişkenleri (işlem zamanları, operasyon sayıları) ile arasındaki ilişkinin tespit edilebilmesi için SPSS 11 paket programı kullanılmıştır. Test verilerinin işlem zamanı ve operasyon sayısı bilgileri kullanılarak elde edilen doğrusal ve doğrusal olmayan regresyon denklemleri ve R^2 değerleri Tablo 6.3'te görülmektedir. En yüksek R^2 korelasyon katsayısı, Tablo 6.3'te yer alan 3. denklem ile, 0,78 olarak hesaplanmıştır.

En düşük R^2 değerleri ise ilk iki doğrusal regresyon denklemleri ile 0,71 olarak elde edilmiştir.

Tablo 6.3 Regresyon Denklemleri

Regresyon Denklemi	R^2
$f=1.93x_0+88x_1$	0,71
$f=1.93x_0+100.94268905x_1-151.57$	0,71
$f=-0.00366x_0^2-2.7x_1^2+7.9x_0+110.36x_1-2173.06$	0,78
$f=-0.00366x_0^2-2.64x_0-0.001x_0x_1+7.89x_1^2+109.8462105x_1-2172.77$	0,77

En yüksek R^2 değerine sahip regresyon denklemi sonucu elde edilen teslim tarihleri ile test verisi akış süreleri grafiği Şekil 6.21’de yer almaktadır.



Şekil 6.21 Regresyon Teslim Tarihi – Akış Süresi

6.4.1.4 50x15 Problemi İçin Yapay Sinir Ağı Sonuçları

6.4.1.4.1 50x15 Test Probleminin YSA ile Modellenmesi

Problemin YSA modellemesinde, 7 farklı ağ yapısı ve ayrıca YSA' nın etkin öğrenme algoritmalarından biri olan Delta-Bar-Delta (De Veaux; Ungar; 1997, 7-12, Sarle; 1994, 4-7) öğrenme algoritması kullanılmıştır. YSA modelinde kullanılan parametreler Tablo 6.4'te yer almaktadır.

Tablo 6.4 YSA Parametreleri

Parametreler	Düzeyleri
Ara Katman Sayısı	1, 2, 3
Ara Katmandaki Nöron Sayısı*	1, 2, 4
Ağ Yapısı Çeşitleri	Multilayer Perceptron, Generalised Feedforward, Modular Network, Jordan/Elman, Self-Organizing Map, Principal Component Analysis, Recurrent Network
Epoch Sayısı	10,000

Transfer fonksiyonu olarak, gerçekleştirilen denemelerde bu problem yapısı için diğer transfer fonksiyonlarına göre daha iyi sonuç veren, ara katman için Linearsigmoidaxon, çıkış katmanı için ise Linearaxon transfer fonksiyonları kullanılmıştır.

Yapılan denemeler sonucu epoch sayısı 10,000'den fazla belirlendiğinde sonuçlarda iyileşme görülmemiş, aksine aşırı öğrenme gerçekleştiğinden hata oranı yükselmiştir. Daha düşük epoch sayısı verildiğinde ise öğrenme gerçekleşmemiştir.

Ara katman sayısı 1, 2 ve 3 olarak belirlenmiş, ara katmandaki nöron sayısı ise değişken sayısı, yarısı ve iki katı olarak alınmıştır.

Tablo 6.4'te yer alan parametrelerin bütün kombinasyonları için 63 farklı öğrenme gerçekleştirilmiştir. Modelin amacı hatayı en aza indiren giriş değişkenleri için en uygun ağırlıkları bulmaktır. Tablo 6.5'te parametrelerin bütün kombinasyonları sonucunda, test verisi ile elde edilen R^2 değerleri yer almaktadır. YSA modeli ile elde edilen en iyi sonuç R^2 için 0,8051 iken, en kötü sonuç 0,4595'tir.

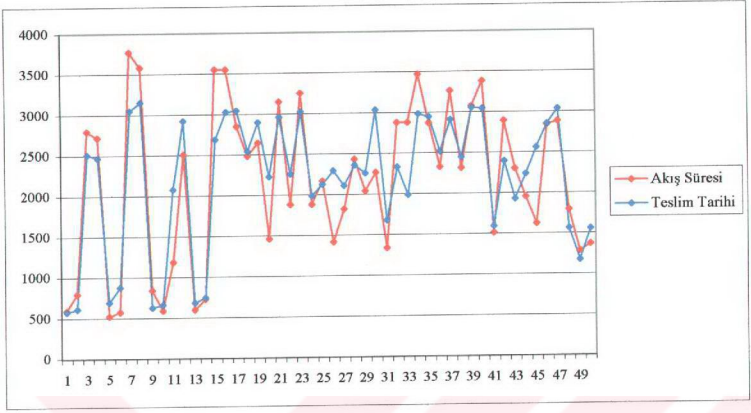
Tablo 6.5 50x15 Test Problemi İçin YSA R^2 Değerleri

Ara Katman Sayısı	Ara K. Nöron Sayısı	Ağ Yapısı	R^2
1	1	Multilayer Perceptron	0,7634
1	2	Multilayer Perceptron	0,7614
1	4	Multilayer Perceptron	0,7634
2	1	Multilayer Perceptron	0,7621
2	2	Multilayer Perceptron	0,7614
2	4	Multilayer Perceptron	0,7567
3	1	Multilayer Perceptron	0,7635
3	2	Multilayer Perceptron	0,7508
3	4	Multilayer Perceptron	0,7779
1	1	Generalized Feedforward	0,7285
1	2	Generalized Feedforward	0,7621
1	4	Generalized Feedforward	0,7475
2	1	Generalized Feedforward	0,8001
2	2	Generalized Feedforward	0,8051
2	4	Generalized Feedforward	0,7555
3	1	Generalized Feedforward	0,7806
3	2	Generalized Feedforward	0,7756
3	4	Generalized Feedforward	0,7721
1	1	Modular Neural Network	0,7697
1	2	Modular Neural Network	0,7679
1	4	Modular Neural Network	0,7769
2	1	Modular Neural Network	0,762
2	2	Modular Neural Network	0,7614
2	4	Modular Neural Network	0,7259
3	1	Modular Neural Network	0,7606
3	2	Modular Neural Network	0,7686
3	4	Modular Neural Network	0,762
1	1	Jordan / Elman Network	0,7648
1	2	Jordan / Elman Network	0,7646

Tablo 6.5 Devam Ediyor

Ara Katman Sayısı	Ara K. Nöron Sayısı	Ağ Yapısı	R ²
1	4	Jordan / Elman Network	0,7526
2	1	Jordan / Elman Network	0,7642
2	2	Jordan / Elman Network	0,7635
2	4	Jordan / Elman Network	0,5774
3	1	Jordan / Elman Network	0,7545
3	2	Jordan / Elman Network	0,7634
3	4	Jordan / Elman Network	0,7309
1	1	Principal Component Network	0,7634
1	2	Principal Component Network	0,7634
1	4	Principal Component Network	0,7662
2	1	Principal Component Network	0,7616
2	2	Principal Component Network	0,7679
2	4	Principal Component Network	0,7762
3	1	Principal Component Network	0,7611
3	2	Principal Component Network	0,7602
3	4	Principal Component Network	0,7726
1	1	Self Organizing Feature Map Network	0,7697
1	2	Self Organizing Feature Map Network	0,4595
1	4	Self Organizing Feature Map Network	0,7726
2	1	Self Organizing Feature Map Network	0,5094
2	2	Self Organizing Feature Map Network	0,7909
2	4	Self Organizing Feature Map Network	0,7711
3	1	Self Organizing Feature Map Network	0,7718
3	2	Self Organizing Feature Map Network	0,7564
3	4	Self Organizing Feature Map Network	0,7527
1	1	Recurrent Network	0,7324
1	2	Recurrent Network	0,7324
1	4	Recurrent Network	0,7217
2	1	Recurrent Network	0,7491
2	2	Recurrent Network	0,5211
2	4	Recurrent Network	0,7569
3	1	Recurrent Network	0,7465
3	2	Recurrent Network	0,7424
3	4	Recurrent Network	0,7322

YSA ile elde edilen en yüksek R² değeri için, hesaplanan teslim tarihleri ve test verisinin akış süreleri grafiği Şekil 6.22'de görülmektedir.



Şekil 6.22 YSA Teslim Tarihi – Akış Süresi

6.4.1.5 Çoklu Denklemler Programlama ve Yapay Sinir Ağı Karşılaştırması

50x15'lik test problemi için teslim tarihi belirleme yöntemi olarak ele alınan ÇDP (Tablo 6.2) ve YSA (Tablo 6.5) sonuçlarının karşılaştırılması amacıyla iki grup için SPSS paket programı kullanılarak varyans analizi (ANOVA) uygulanmıştır (Tablo 6.6).

Tablo 6.6 ÇDP-YSA ANOVA Sonuçları

	HK	SD	Ortalama Kare	F	p
Gruplar arası					
	0,017	1	0,017	5,217	0,025
Grup içi					
	0,274	83	0,003		
Toplam					
	0,291	84			

Grup 0: ÇDP sonuçları

Grup 1: YSA sonuçları

Tablo 6.6'daki ANOVA'ya göre, $p < 0,05$ olduğundan, gruplar arasında anlamlı ($\alpha=0.05$) bir farklılık olduğu sonucuna varılmaktadır.

Tablo 6.7'de yer alan grupların tanımlayıcı istatistikleri incelendiğinde, ortalamalardan Grup 0 (ÇDP)'ın , Grup 1 (YSA)'den daha yüksek R^2 değerine sahip olduğu görülmektedir. Bu sonuca göre ÇDP yaklaşımı, test verisi için işlem sürelerini ve operasyon sayılarını kullanarak akış zamanlarını belirlemede, YSA'ya göre daha etkindir.

Tablo 6.7 ÇDP – YSA Tanımlayıcı İstatistikleri

	N	Ortalama	Standart Sapma	Standart Hata	95% Güvenilirlik		En küçük	En büyük
					Alt Sınır	Üst Sınır		
Grup 0	22	0,7773	0,03383	0,00721	0,7623	0,7923	0,71	0,83
Grup 1	63	0,7448	0,06352	0,00800	0,7288	0,7608	0,45	0,81
Toplam	85	0,7532	0,05890	0,00639	0,7405	0,7659	0,45	0,83

6.4.1.6 Çoklu Denklemler Programlama Deney Tasarımı

Bu çalışmada uygulanan ÇDP yaklaşımı, standart ÇDP algoritmasına göre bazı farklılıklar içermektedir. Bunlardan en önemlisi, ÇDP yaklaşımı içerisinde çok popülasyonlu bir sistemin uygulanmasıdır. Standart ÇDP algoritması, bir başlangıç popülasyonuna, genetik operatörlerin uygulanması ile iyileştirme sağlamaktadır. Bu çalışmada geliştirilen yazılımla, standart ÇDP algoritmasının birden fazla popülasyon ile işletilmesi sağlanmıştır. Amaç, farklı başlangıç popülasyonları ile ulaşılan en iyi sonuçların birleştirilerek yeniden iyileştirilmesi ile daha etkin teslim tarihi denklemlerinin elde edilebilmesidir.

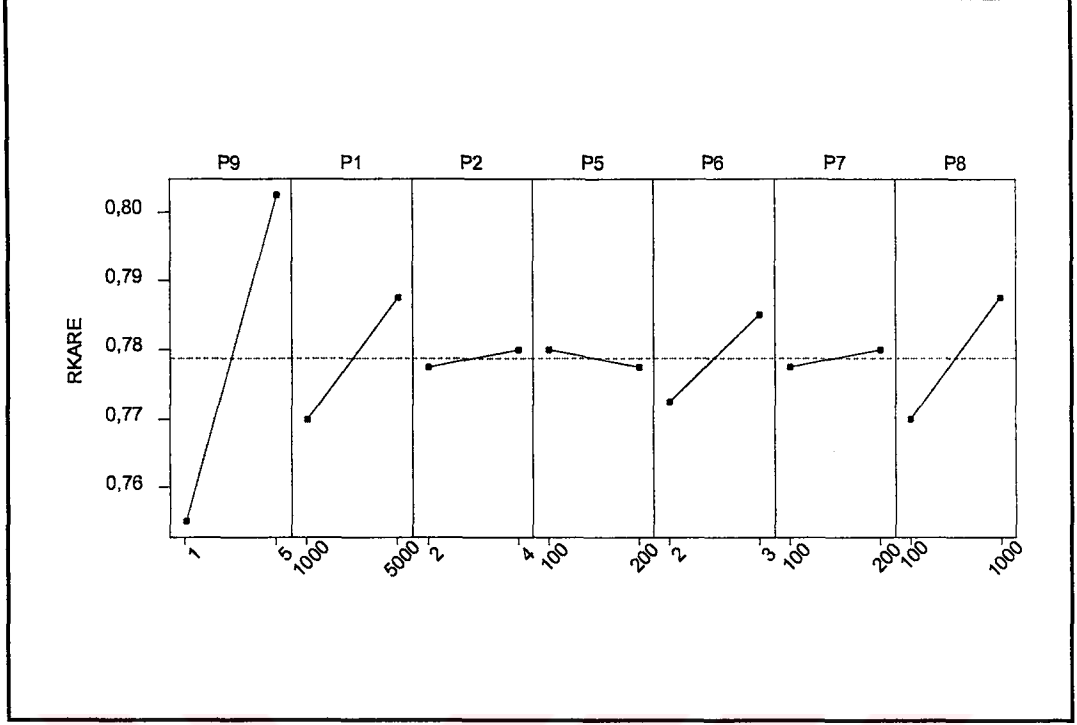
Çalışmanın bu bölümünde, çok popülasyonlu ÇDP yaklaşımının, standart ÇDP algoritması ile, R^2 değerleri açısından karşılaştırılabilmesi amacıyla Taguchi deney tasarımı gerçekleştirilmiştir (Tablo 6.8).

Tablo 6.8 ÇDP Taguchi Deney Tasarımı

P9	P1	P2	P5	P6	P7	P8	R^2
1	1000	0,2	100	0,02	100	100	0,73
1	1000	0,2	200	0,03	200	1000	0,76
1	5000	0,4	100	0,02	200	1000	0,77
1	5000	0,4	200	0,03	100	100	0,76
5	1000	0,4	100	0,03	100	1000	0,81
5	1000	0,4	200	0,02	200	100	0,78
5	5000	0,2	100	0,03	200	100	0,81
5	5000	0,2	200	0,02	100	1000	0,81

Taguchi deney tasarımında P3 ve P4 parametrelerinin farklı düzeyleri için toplamalarının 1 olması sağlanamayacağından, bu parametreler deney tasarımının dışından bırakılmıştır. Tablo 6.2’de elde edilen sonuçlarda en düşük R^2 değeri, P2 ve P3 parametrelerinin 0,3 ve 0,7 değerleri ile elde edildiğinden, Taguchi deney tasarımında P3 ve P4 parametrelerinin değerleri 0,5 olarak tanımlanmıştır.

Taguchi deney tasarımı sonucunda elde edilen ana etkiler grafiği, Şekil 6.23’te görülmektedir. Ana etkiler grafiğine göre, parametrelerin performans üzerindeki etkinlik sıralaması Tablo 6.9’da yer almaktadır. İlk sırada yer alan P9 parametresi, çok popülasyonlu yaklaşımın, standart ÇDP algoritmasının tek başlangıç popülasyonlu yapısına göre daha iyi sonuç verdiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca başlangıç popülasyonları için alt jenerasyon sayısı ile son popülasyon jenerasyon sayısı parametreleri, yüksek düzeylerinde en iyi R^2 değerlerini vermişlerdir.



Şekil 6.23 Ana Etkiler Grafiği

Tablo 6.9 Parametrelerin Etkinlik Sıralaması

Parametreler	Düzeyler
1. P9: Başlangıç popülasyonu sayısı	5
2. P8: Başlangıç popülasyonları için jenerasyon sayısı	1000
3. P1: Son popülasyon jenerasyon sayısı	5000
4. P6: Mutasyon olasılığı	0,03

6.5 SONUÇ

Bu bölümde, bir çizelgeleme sistemi için doğru teslim tarihlerinin belirlenmesine ilişkin yeni bir yaklaşım olarak genetik programlama uygulanmıştır. Genetik programlamanın doğrusal gösterim yöntemlerinden biri olan, Oltean ve Dumitrescu (2002) tarafından önerilen ÇDP algoritması kullanılmıştır. Teslim tarihi belirlemeye ilişkin elde edilen sonuçlar, yapay sinir ağları ve regresyon analizi yöntemlerinden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Sembolik regresyonda, genetik programlama yaklaşımının regresyon analizinden ve yapay sinir ağlarından daha iyi performans sergilediği sonucuna varılmıştır.

Çalışmada ele alınan ÇDP yaklaşımında, çok popülasyonlu bir yapının kullanılması da, performansı iyileştirici yönde sonuçlar vermiştir. Her iki ÇDP yapısının değerlendirilebilmesi amacıyla deney tasarımı yapılarak, analizi gerçekleştirilmiş ve çok popülasyonlu ÇDP'nin standart ÇDP algoritmasına göre daha iyi sonuç verdiği ortaya konulmuştur.

Genetik programlama kapsamı içerisinde yer alan ÇDP yaklaşımı, genetik programlamaya göre yazılım kolaylığı, uygun olmayan çözüm türetmemesi ve iyi çözüme hızlı yaklaşımı ile literatüre yeni kazandırılmış etkili bir yöntem olarak değerlendirilmiştir.

BÖLÜM 7

7 DENEYSEL ÇALIŞMA VE ANALİZLER

7.1 GİRİŞ

Çalışmanın bu bölümünde, Bağlam Bağımsız Gramer'ler ile modellenen esnek atölye çizelgeleme problemine uygulanan çok objektifli tabu arama yaklaşımı sonucunda elde edilen performans, çeşitli kriterler açısından değerlendirilmiştir. Literatürde proses plan esnekliği içeren esnek atölye çizelgeleme için uygun test problemlerinin yer almamasından dolayı, test problemleri C/C++ programlama dili ile geliştirilen bir yazılım aracılığıyla oluşturulmuştur. Test problemleri üzerinde, Taguchi yöntemi (Ross; 1996) ile deney tasarımı gerçekleştirilerek, çözüm faktörleri performans üzerindeki etkinliklerine göre sıralanmıştır. Bu sıralamalarda en etkili olan faktörlerle, daha detaylı sonuç elde edilebilmesi amacıyla tam faktöryel deney tasarımı gerçekleştirilmiştir. İkinci kısımda, operasyonların makine (rota) esnekliği ile sıralama kurallarının performans üzerindeki etkileri incelenmiştir. Son kısımda ise, literatürde yer alan, ancak proses plan esnekliği içermeyen test problemleri için elde edilen çözümler ortaya konulmuştur.

7.2 TEST PROBLEMLERİNİN OLUŞTURULMASI

Literatürde esnek atölye çizelgeleme ile ilgili kısıtlı sayıda test problemleri yer almakla birlikte, bu problemler proses plan esnekliği içermemektedir (Mastrolilli; Gambardella; 1998, Kacem; Hammadi; Borne; 2002c). Bu test problemlerinde işlerin operasyon sıraları belirlidir. Operasyonlar için işlem görebilecekleri makine alternatifleri söz konusudur. Ancak çalışmada ele alınan problemin kapsamı genişletilerek, esnek atölye çizelgeleme problemine proses plan seçimi problemi de entegre edilmiştir. Dolayısıyla, esnek atölye çizelgeleme sistemi içerisinde yer alan her bir operasyon için makine

alternatiflerinin yanı sıra , her bir iş için farklı proses plan alternatifleri söz konusudur. Probleme uygulanan çok objektifli tabu arama çözüm yaklaşımı ile elde edilen sonuçların değerlendirilebilmesi amacıyla, uygun test problemlerinin oluşturulması gerekmiştir. Test problemlerinin oluşturulması için C/C++ programlama dili kullanılarak bir yazılım geliştirilmiştir. Programda sistematik bir yöntem izlenerek, Tablo 7.1 ve Tablo 7.2’de yer alan parametreler kullanılmıştır. Tablo 7.1’de, test problemlerinin boyutuna göre oluşturulan üç farklı proses plan esneklik düzeyi yer almaktadır. Problemde yer alan her bir iş için belirlenen bu proses plan esnekliklerine göre farklı sayıda operasyonlar ve sıraları belirlenmiştir. Proses planlarında yer alan operasyonlar, makine sayısına bağlı olarak $[M/2,M]$ aralığından Uniform dağılımına göre seçilmiştir (Tablo 7.2).

Tablo 7.1 Problem Boyutları ve Proses Plan Esneklikleri

Problem Boyutları	Proses Plan Esnekliği		
	Düşük	Orta	Yüksek
5x5 20x5	2	3	4
10x10 25x10	2	3	6
50x15	2	4	8

Tablo 7.2’de, oluşturulan problemlerin iş ve makine sayıları yer almaktadır. Problemin makine sayısına bağlı olarak, operasyonlar için makine (rota) esneklikleri farklı düzeylerde belirlenmiştir. Operasyonların işlem görebilecekleri makineler, Uniform dağılımına göre $[1,M]$ aralığında belirlenmiştir. Operasyonların belirlenen bu makinelerdeki işlem süreleri ise;

- İlk alternatif makine için Uniform[1,99] ile,
- Diğer alternatif makineler için Uniform[$p_{ij},m_{ij}(1)$, $3 \times p_{ij},m_{ij}(1)$]

şeklinde oluşturulmuştur. Operasyonların işlem görebilecekleri alternatif makinelerindeki işlem süreleri arasındaki fark sınırlandırılmıştır. İşlerin teslim tarihleri TWK teslim tarihi belirleme kuralına göre oluşturulmuştur. p_j , j . işin en uzun işlem süresini ifade ederken, $k=1,3$ olarak belirlenmiştir.

Tablo 7.2 Problem Parametreleri

İş Sayısı (J)	5 10 20 25 50			
Makine Sayısı (M)		Makine Esnekliği		
		Düşük	Orta	Yüksek
	5	2	3	4
	10	2	5	8
	15	3	8	12
Operasyonlar	Uniform[M/2,M]			
m_{ij} (j . işin i . operasyonunun makineleri)	Uniform[1,M]			
p_{ij} (j . işin i . operasyonunun işlem süresi)	$m_{ij}(1)$ için Uniform[1,99] $m_{ij}(2....)$ için Uniform[$p_{ij}, m_{ij}(1)$, $3xp_{ij}, m_{ij}(1)$]			
d_j	$1.3xp_j$ p_j : (j . işin en uzun işlem süresi)			

Test problemleri ile deney tasarımının oluşturulabilmesi amacıyla, her farklı boyutta problemten, 3 farklı proses plan esneklik düzeyi ve 3 farklı makine esneklik düzeyleri için toplam 9 farklı test verisi türetilmiştir.

7.3 DENEY TASARIMI

Deney Tasarımı iki farklı aşamada planlanmıştır. Deney tasarımı içerisinde yer alacak problem parametreleri (faktörler) sayısının fazla olmasından dolayı tam faktöryel deney tasarımı gerçekleştirilmeden önce Taguchi deney tasarımı oluşturulmuştur. Taguchi deney tasarımının sonucunda performans üzerinde etkili parametreler belirlenmiştir. Seçilen bu etkili parametrelerle tam faktöryel deney tasarımı gerçekleştirilmiş ve ayrıntılı sonuçlar elde edilerek irdelenmiştir.

Deney tasarımlarında performans kriterleri olarak üç objektif ele alınmıştır;

- Tamamlanma zamanı (OF1)
- Makinelerin yük dengesi (OF2)
- İşlerin ortalama bekleme zamanları (OF3)

Bu bölümde deney tasarımı sonuçları OF1 için açıklanmış, diğer objektif fonksiyonların ana etkiler ve etkileşim grafikleri Ek-1’de yer almıştır.

Taguchi deney tasarımı için program parametrelerinden ve problem özelliklerinden belirlenen faktörler ve düzeyleri Tablo 7.3’te yer almaktadır.

Tablo 7.3 Faktörler ve Düzeyleri

Faktörler	Açıklama	Düzyey Sayısı	Düzeyler
İS	İterasyon sayısı	2	50 100
TU	Tabu listesi uzunluğu	2	15 30
KS	Komşu çözüm sayısı	2	10 20
PPD	Çözüm dizisinde proses plan değişikliği (%)	2	20 40
OD	Çözüm dizisinde makine alternatifi değişikliği (%)	2	20 40
SKD	Çözüm dizisinde sıralama kuralı değişikliği (%)	2	20 40
PPE	Proses plan esnekliği	3	1 2 3
ME	Makine esnekliği	3	1 2 3
SKS	Sıralama kuralı sayısı	3	2 5 10

7.3.1 5x5 Problemi Deney Tasarımı

Çalışmada öncelikle tüm test problemleri için Tablo 7.3’te yer alan faktörler ile Taguchi deney tasarımı gerçekleştirilmiştir. Taguchi deney tasarımı sonucunda, performans

üzerinde en etkili faktörler seçilmiş ve bu faktörler ile tam faktöryel deney tasarımı yapılmıştır.

7.3.1.1 5x5 Taguchi Deney Tasarımı

Tablo 7.3'te belirlenen faktörler ve düzeyleri için Minitab 13 paket programı kullanılarak tasarlanan Taguchi deneyinde, programın 36 kez çalıştırılması gerekmektedir.

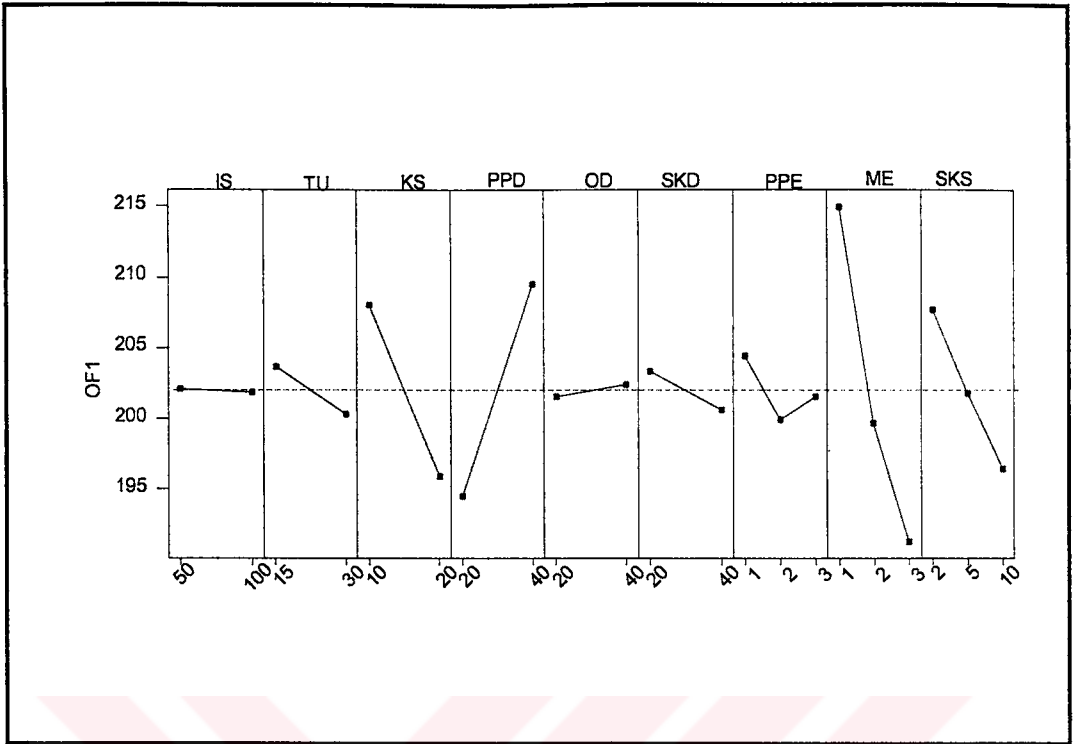
Hazırlanan örnek deney tasarımıyla ilgili faktörler ve bunların düzeylerinin listesi Tablo 7.4'te yer almaktadır.

Program, deney tasarımı için üç farklı amaç fonksiyonu ile çalıştırılmış ve sonuçlar kaydedilmiştir. Programın her bir çalıştırılmasında, farklı başlangıç çözümü ile farklı sonuç değerleri elde edildiği için deney tasarımından sağlıklı sonuç elde edebilmek amacıyla, tabloda yer alan her bir değer, aynı faktör düzeyleri ile 5 farklı çalıştırılma sonucunda ortaya çıkan değerlerin ortalaması olarak alınmıştır.

5x5 problemi için hazırlanan deney tasarımının analizi ile elde edilen ana etkiler grafiği Şekil 7.1'de görülmektedir.

Tablo 7.4 5x5 Taguchi Deney Tasarımı Faktörleri ve Düzeyleri

	İS	TU	KS	PPD	OD	SKD	PPE	ME	SKS	OF1	OF2	OF3
1	50	15	10	20	20	20	1	1	2	229	0,02	30,6
2	50	15	10	20	20	20	2	2	5	202	0,01	13,6
3	50	15	10	20	20	20	3	3	10	194	0,01	14
4	50	15	10	20	20	40	1	1	2	229	0,03	23,6
5	50	15	10	20	20	40	2	2	5	178	0,01	9,8
6	50	15	10	20	20	40	3	3	10	180	0	4,4
7	50	15	20	40	40	20	1	1	5	209	0,01	28,6
8	50	15	20	40	40	20	2	2	10	201	0,01	11,6
9	50	15	20	40	40	20	3	3	2	209	0,01	15,4
10	50	30	10	40	40	20	1	1	10	220	0,03	24,2
11	50	30	10	40	40	20	2	2	2	229	0,02	28,8
12	50	30	10	40	40	20	3	3	5	201	0,03	13,6
13	50	30	20	20	40	40	1	2	10	184	0	1
14	50	30	20	20	40	40	2	3	2	178	0	2,4
15	50	30	20	20	40	40	3	1	5	213	0,02	21,6
16	50	30	20	40	20	40	1	2	10	199	0,01	22,4
17	50	30	20	40	20	40	2	3	2	176	0	1,6
18	50	30	20	40	20	40	3	1	5	208	0,03	22,8
19	100	15	20	40	20	20	1	2	2	212	0,01	19,2
20	100	15	20	40	20	20	2	3	5	203	0,02	11,8
21	100	15	20	40	20	20	3	1	10	205	0,02	18,4
22	100	15	20	20	40	40	1	2	5	189	0,01	8,6
23	100	15	20	20	40	40	2	3	10	172	0	1
24	100	15	20	20	40	40	3	1	2	206	0,02	21,4
25	100	15	10	40	40	40	1	3	5	220	0,03	20,6
26	100	15	10	40	40	40	2	1	10	210	0,02	21,6
27	100	15	10	40	40	40	3	2	2	219	0,02	15,6
28	100	30	20	20	20	20	1	3	5	169	0	1
29	100	30	20	20	20	20	2	1	10	211	0,03	22,4
30	100	30	20	20	20	20	3	2	2	183	0,01	4,8
31	100	30	10	40	20	40	1	3	10	201	0,01	15
32	100	30	10	40	20	40	2	1	2	230	0,03	15,4
33	100	30	10	40	20	40	3	2	5	220	0,01	19,2
34	100	30	10	20	40	20	1	3	2	193	0	6,4
35	100	30	10	20	40	20	2	1	5	210	0,03	18
36	100	30	10	20	40	20	3	2	10	181	0	4,2



Şekil 7.1 5x5 Taguchi Ana Etkiler Grafiği

Taguchi ana etkiler grafiği, faktörlerin, çözümün performans kriteri olarak belirlenen objektif fonksiyonu üzerindeki etki düzeylerini göstermektedir. Grafik üzerinde eğimi yüksek olan doğrulara ait faktörlerin, objektif fonksiyon üzerindeki etkileri fazladır. Bu etki, doğrunun faktörlerin düzeyleri arasındaki durumuna göre, performans üzerinde pozitif ya da negatif bir etki olarak yorumlanır. Örneğin, Şekil 7.1'deki grafikte, proses plan esnekliği düzeyleri değerlendirilecek olursa, PPE faktörünün tamamlanma zamanı objektif fonksiyonu üzerinde etkili olduğu görülmektedir. Bu etkinin yönü, faktörün 1. ve 2. düzeyleri arasında objektif fonksiyonu iyileştirme biçiminde ortaya çıkmaktadır. Yani proses plan esnekliği düşük düzeydeyken tamamlanma zamanı yüksek, proses plan esnekliği orta düzeydeyken tamamlanma zamanı daha düşüktür. Ancak bu faktör düzeyi yükselince, tamamlanma zamanı tekrar artışa geçmiştir. Dolayısıyla bu problem için Taguchi deney tasarımına göre PPE faktörü 2. düzeyinde iken en iyi sonucu vermiştir. Benzer şekilde ME ve SKS faktörleri de değerlendirilecek olursa, bu faktörlerde düzey arttıkça, yani ME için makine esnekliği arttıkça, SKS için algoritmada kullanılan

sıralama kuralı sayısı arttıkça tamamlanma zamanı düşmektedir. Dolayısıyla bu faktörlerin 3. düzeyleri tamamlanma zamanı açısından en iyi sonuçları vermişlerdir.

5x5'lik problem için Taguchi deney tasarımı sonucunda, Tablo 7.5'te yer alan, faktörlerin objektif fonksiyon üzerindeki etkinliklerine göre sıralamaları, ortalamalarla birlikte elde edilmiştir.

Tablo 7.5 5X5 İçin Taguchi Faktör Sıralaması

Faktörler Düzeyleri	İS	TU	KS	PPD	OD	SKD	PPE	ME	SKS
1	202,16	203,72	208,11	194,50	201,61	203,38	204,50	215,00	207,75
2	201,88	200,33	195,94	209,55	202,44	200,66	200,,00	199,75	201,83
3							201,58	191,33	196,50
Fark	0,27	3,38	12,16	15,05	0,83	2,72	4,5	23,66	11,25
Sıralama	9	6	3	2	8	7	5	1	4

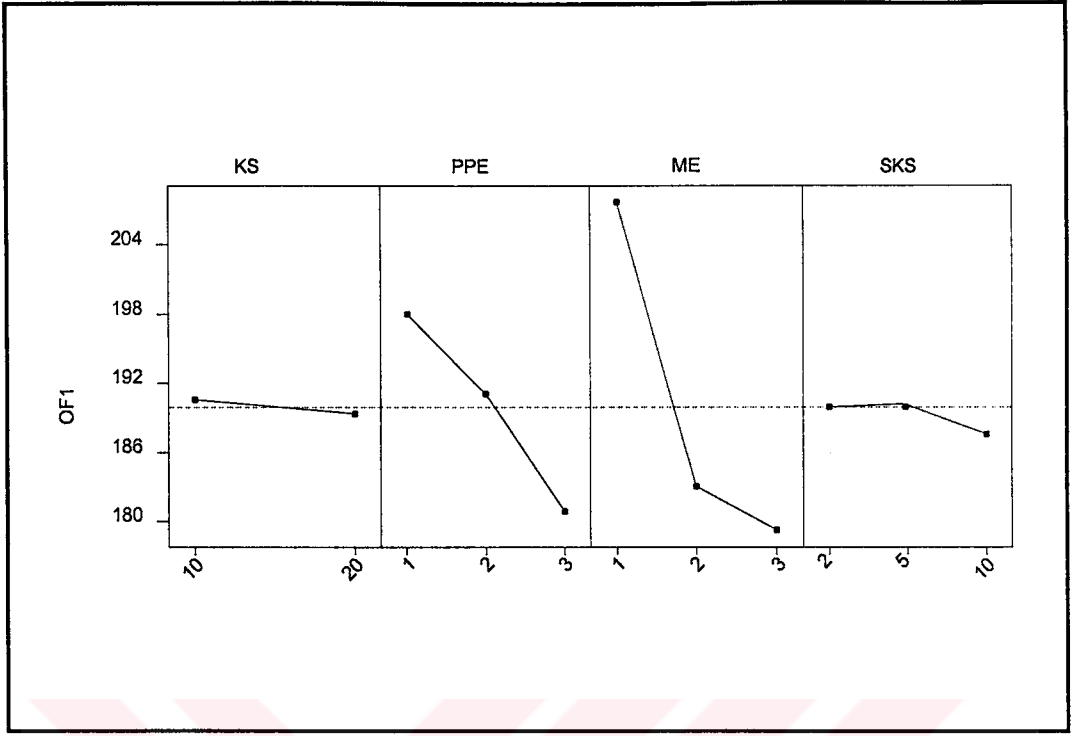
Tablo 7.5'ten elde edilen bilgilere göre, bu problem grubu için faktörlerin tamamlanma zamanı üzerindeki etkinliklerine göre sıralaması ve en iyi sonuç veren düzeyleri Tablo 7.6'da görülmektedir.

Tablo 7.6 5x5 Faktör Sıralaması

Faktörler	Düzeyler
1. Makine esnekliği	3
2. Çözüm dizisinde proses plan değişiklik oranı	20
3. Komşu çözüm sayısı	20
4. Sıralama kuralı sayısı	10
5. Proses plan esnekliği	2
6. Tabu listesi uzunluğu	30
7. Çözüm dizisinde sıralama kuralları değişiklik oranı	40
8. Çözüm dizisinde makine alternatifi değişiklik oranı	20
9. İterasyon sayısı	100

7.3.1.2 5x5 Tam Faktöryel Deney Tasarımı

5x5'lik problem grubu için etkili faktörler listesinde ilk beş sırada, ME, PPD, KS, SKS, PPE faktörleri yer almaktadır (Tablo 7.6). Bu faktörlerden 4'ü seçilerek tam faktör deney tasarımı gerçekleştirilmiştir. Ancak PPE faktörü, çalışmada esnek atölye çizelgeleme problemine entegre edilen proses plan seçimini ifade ettiğinden, çözüm yönteminin analizi açısından önemli bir faktördür. Bu nedenle ikinci sırada yer alan PPD faktörü en iyi sonuç verdiği 20 düzeyinde sabitlenerek PPE faktörü tam faktöryel deney tasarımına dahil edilmiştir. 5x5'lik problem grubu için, tam faktöryel deney tasarımında programın 54 kez çalıştırılması sonucunda elde edilen objektif fonksiyon değerleri kaydedilmiştir. Gerçekleştirilen analiz sonucunda elde edilen ana etkiler grafiği Şekil 7.2'de görülmektedir. Ana etkiler grafiğinde, ME ve PPE faktörlerinin düzeyleri arasında objektif fonksiyon açısından belirgin bir farklılık görülmektedir. Tablo 7.7'de yer alan ANOVA sonuçları incelendiğinde, p sütununda sadece ME ve PPE faktörlerinin ($\alpha=0,05$ için) anlamlı bir farklılık sergilediği sonucuna varılmaktadır ($p<\alpha$).



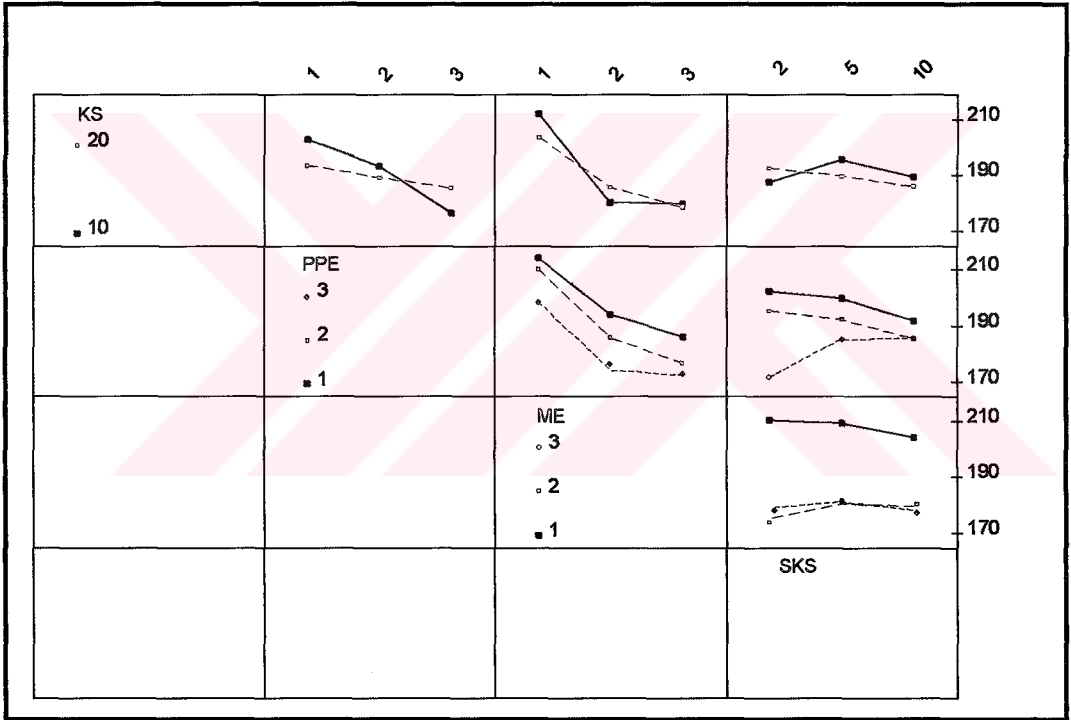
Şekil 7.2 5x5 Tam Faktöryel Ana Etkiler Grafiği

SD: Serbestlik derecesi, HK: Hata kareleri toplamı, AHK: Ayarlanmış hata kareleri

Tablo 7.7 5x5 Faktör Etkinliği ANOVA Sonuçları

	SD	HK	AHK	F	p
KS	1	17,8	17,8	0,08	0,78
PPE	2	2652,5	1326,2	5,93	0,007
ME	2	8626,3	4313,1	19,3	0,00
SKS	2	210,5	105,2	0,47	0,629
KS*PPE	2	777,1	388,6	1,74	0,194
KS*ME	2	406,7	203,4	0,91	0,414
KS*SKS	2	274,5	137,2	0,61	0,548
PPE*ME	4	452,1	113	0,51	0,732
PPE*SKS	4	1198,5	299,6	1,34	0,28
ME*SKS	4	746,4	186,6	0,83	0,251
Hata	28	6258,6	223,5		
Toplam	53	21621			

Faktör etkileşimleri için Tablo 7.7’de yer alan p sütunu incelendiğinde, faktörlerin anlamlı ikili etkileşimlerinin söz konusu olmadığı görülmektedir ($p>\alpha$). Benzer sonuca, Şekil 7.3’teki etkileşim grafiğinden de ulaşılabilmektedir. Şekil 7.3’teki ME ve PPE faktörlerinin etkileşimi değerlendirildiğinde, üç etki doğrusunun birbirini kesmediği görülmektedir. Yani proses plan esnekliği düzeyinden etkilenmeksizin, makine esnekliği faktörü 3. düzeyinde en iyi sonucu vermektedir. Şekil 7.3’teki etkileşim grafiği ve Tablo 7.7’deki ANOVA sonuçları birbirini destekler yönde, objektif fonksiyon üzerinde faktörlerin ikili etkileşimlerinin anlamlı olmadığını göstermektedir.



Şekil 7.3 5x5 Tam Faktöryel Etkileşim Grafiği

5x5’lik problem grubu için gerçekleştirilen tam faktöryel deney tasarımı sonucunda, proses plan esnekliği ile makine esnekliği faktörlerinin 3. düzeylerinde performansın en iyi seviyeye ulaştığı görülmektedir. Ancak bu faktörler 3 düzeyli faktörler olduğundan, hangi düzeyler arasından anlamlı bir farklılık olduğunun belirlenmesi gerekmektedir. Bu amaçla, PPE ve ME faktörleri için çoklu karşılaştırma testi uygulanmıştır.

Tablo 7.8 5x5 Faktör Düzeyleri Çoklu Karşılaştırma Testi

PPE	Düzeyler	p	Fark	ME	Düzeyler	p	Fark
1	2	0,047	Var	1	2	0,000	Var
	3	0,037	Var		3	0,000	Var
2	1	0,047	Var	2	1	0,000	Var
	3	0,042	Var		3	0,048	Var
3	1	0,037	Var	3	1	0,000	Var
	2	0,042	Var		2	0,048	Var

PPE ve ME faktörleri için uygulanan çoklu karşılaştırma testi sonucunda (Tablo 7.8), her iki faktörün, üç düzeyi arasında objektif fonksiyona etkileri açısından anlamlı bir farklılık olduğu görülmektedir.

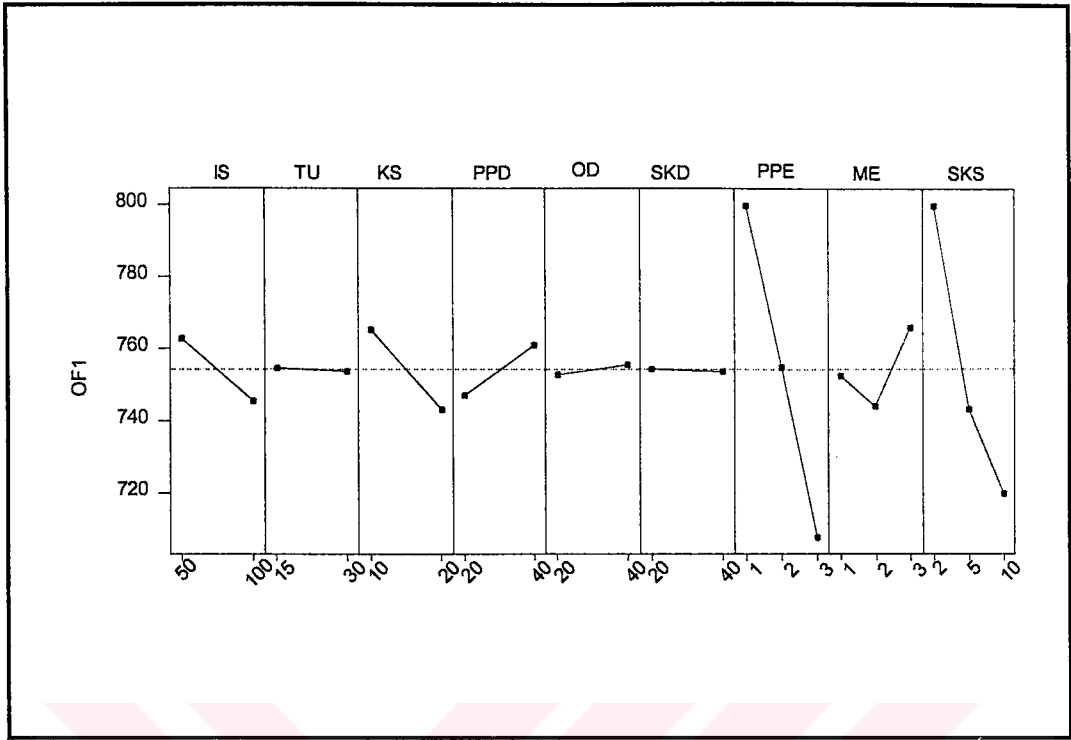
7.3.2 20x5 Problemi Deney Tasarımı

7.3.2.1 20x5 Taguchi Deney Tasarımı

20x5 problem grubu için Taguchi deney tasarımı Tablo 7.3'te yer alan faktörlerle;

- 6 faktör 2 düzey,
- 3 faktör 3 düzey

için 36 farklı çalıştırma sonucu gerçekleştirilmiştir. Taguchi deney tasarımı sonucunda elde edilen ana etkiler grafiği Şekil 7.4'te görülmektedir. PPE, SKS, KS ve ME faktörleri etkinlik sıralamasında ilk dört sırada yer alan faktörler olarak ortaya çıkmıştır. Faktörlerin tamamlanma zamanı objektif fonksiyonu üzerindeki etkinlik sıralaması ve en iyi sonuç veren düzeyleri Tablo 7.9'da görülmektedir.



Şekil 7.4 20x5 Taguchi Ana Etkiler Grafiği

Tablo 7.9 20x5 Faktör Sıralaması

Faktörler	Düzyerler
1. Proses plan esnekliği	3
2. Sıralama kuralı sayısı	10
3. Komşu çözüm sayısı	20
4. Makine esnekliği	2
5. İterasyon	100
6. Çözüm dizisinde proses plan değişikliği	20
7. Çözüm dizisinde makine alternatifini değişikliği	20
8. Tabu listesi uzunluğu	30
9. Çözüm dizisinde sıralama kuralı değişikliği	40

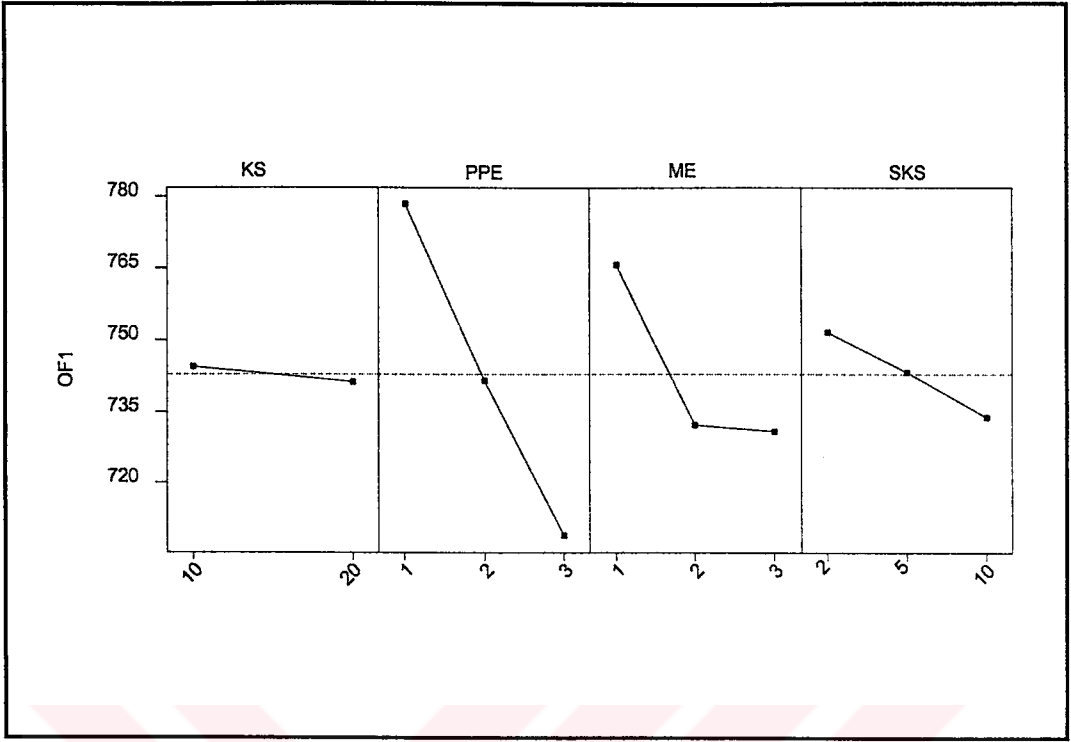
7.3.2.2 20x5 Tam Faktöryel Deney Tasarımı

20x5'lik problem için gerçekleştirilen Taguchi deney tasarımı sonucunda faktörlerin objektif fonksiyon üzerindeki etkinlik sıralaması elde edilmiştir (Tablo 7.9). Bu faktörlerin etkinliklerinin istatistiksel olarak anlamlılığının test edilebilmesi ve faktörler arasındaki etkileşimlerin görülebilmesi amacıyla sadece etkili faktörler kullanılarak, bu problem grubu üzerinde tam faktöryel deney tasarımı gerçekleştirilmiştir.

Tam faktöryel deney tasarımı için seçilen etkili faktörler;

- Proses plan esnekliği,
- Sıralama kuralı sayısı,
- Komşu çözüm sayısı,
- Makine esnekliğidir.

Bu grubun dışında kalan diğer faktörler için ise çözümde en iyi sonucu veren düzeyler (Tablo 7.9) sabitlenmiştir. Deney tasarımına dahil edilen faktörler ve düzeyleri (Tablo 7.3) için programın 54 kez çalıştırılması ile elde edilen sonuçlar kaydedilmiş ve analiz yapılmıştır. Bu faktörlerin ana etkiler grafiği Şekil 7.3'te görülmektedir. Şekil 7.5'deki faktörlerin etki doğruları değerlendirildiğinde, PPE, ME ve SKS faktörlerinin etkinliği açıkça görülmektedir. Tam faktöryel deney tasarımı sonucunda yapılan varyans analizi ile bu etkilerin istatistiksel anlamlılığı ortaya konulmuştur (Tablo 7.10).



Şekil 7.5 20x5 Tam Faktöryel Ana Etkiler Grafiği

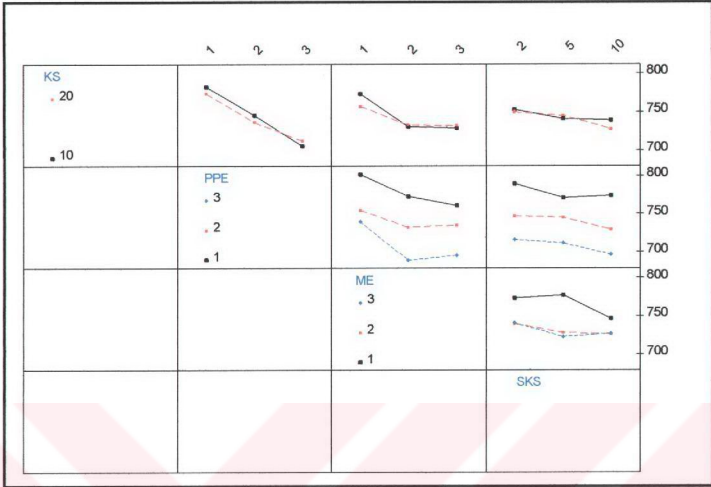
Tablo 7.10'daki p(probability) sütunu göz önüne alınacak olursa, $\alpha=0,05$ için PPE, ME ve SKS faktörlerinin düzeyleri arasında, objektif fonksiyonu üzerindeki etkileri açısından anlamlı bir fark olduğu sonucuna varılmıştır ($p<\alpha$). KS faktörü için ise düzeyleri arasında objektif fonksiyonuna etkinlik açısından anlamlı bir fark olmadığı ortaya çıkmıştır.

Faktörlerin ikili etkileşimleri Tablo 7.10'daki p sütunundan incelendiğinde, tüm faktörlerin ikili eşleştirmeleri için objektif fonksiyonu üzerinde herhangi bir anlamlı farklılık arz etmedikleri görülmektedir ($p>\alpha$).

Tablo 7.10 20x5 Faktör Etkinliği ANOVA Sonuçları

	SD	HK	AHK	F	p
KS	1	136,9	136,9	0,4	0,531
PPE	2	43366,4	21683,2	63,78	0
ME	2	13988,5	6994,2	20,57	0
SKS	2	2854,4	1427,2	4,2	0,025
KS*PPE	2	792,1	396,1	1,16	0,327
KS*ME	2	1020,2	510,1	1,5	0,24
KS*SKS	2	560,8	280,4	0,82	0,449
PPE*ME	4	1919,4	479,8	1,41	0,256
PPE*SKS	4	745,2	186,3	0,55	0,702
ME*SKS	4	2073,5	518,4	1,52	0,222
Hata	28	9519,7	340		
Toplam	53	76977,2			

Faktörler arasındaki etkileşim durumları, Şekil 7.6'daki etkileşim grafiğinde de görülmektedir. Faktör eğrilerinin ikili eşleştirilmesinden oluşan grafikte, KS ve PPE faktörlerinin eşleştirmesi ele alınacak olursa, KS'nin her iki düzeyinde de PPE doğrusunu eğiminin değişmediği görülmektedir. Bu sonuç ta, faktörler arasında bir etkileşim olmadığını ortaya koymaktadır.



Şekil 7.6 20x5 Tam Faktöryel Etkileşim Grafiği

20x5'lik test problemi üzerinde gerçekleştirilen tam faktöryel deney tasarımı sonucunda, bu esnek atölye çizelgeleme problemi için, proses plan ve makine esnekliği faktörlerinin yüksek düzeyi ile en fazla (10) sıralama kuralı sayısının, tamamlanma zamanı objektif fonksiyonunu en iyileyecek faktör düzeyleri olduğu belirlenmiştir. Ancak 3 düzeyli faktörler için hangi faktör düzeyleri arasında anlamlı bir farklılık olduğunun belirlenmesi gerekmektedir. Bu amaçla, 3 düzeyli PPE, ME ve SKS faktörlerinin düzeyleri arasındaki farka yönelik çoklu karşılaştırma testi (Scheffe) uygulanmıştır. Çoklu karşılaştırma testi sonuçları Tablo 7.11'de yer almaktadır. Üç faktörün her bir düzeyinin diğer düzeyler ile ikili karşılaştırılmasına dayalı olarak, objektif fonksiyon değeri açısından aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir;

- PPE faktörünün her 3 düzeyi arasında anlamlı farklılık söz konusudur.
- ME faktörünün 1-2. düzeyleri arasında anlamlı bir fark varken, 2-3 düzeyleri arasında anlamlı bir fark söz konusu değildir.
- SKS faktörünün 3 düzeyi arasında anlamlı farklılık söz konusudur.

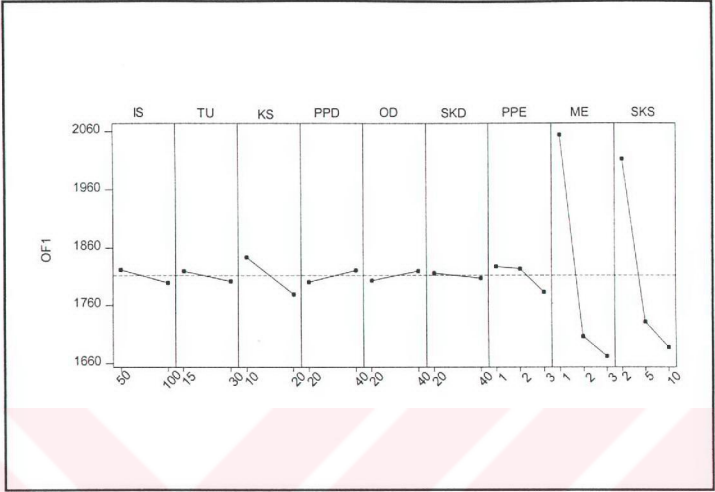
Tablo 7.11 20x5 Faktör Düzeyleri Çoklu Karşılaştırma Testi

PPE	Düzeyler	p	Fark	ME	Düzeyler	p	Fark	SKS	Düzeyler	p	Fark
1	2	0,00	Var	1	2	0,02	Var	1	2	0,02	Var
	3	0,00	Var		3	0,02	Var		3	0,00	Var
2	1	0,00	Var	2	1	0,02	Var	2	1	0,02	Var
	3	0,00	Var		3	0,99	Yok		3	0,02	Var
3	1	0,00	Var	3	1	0,02	Var	3	1	0,00	Var
	2	0,00	Var		2	0,99	Yok		2	0,02	Var

7.3.3 25x10 Deney Tasarımı

7.3.3.1 25x10 Taguchi Deney Tasarımı

25x10'luk problem grubu için Taguchi deney tasarımı, Tablo 7.3'te yer alan faktörler ve düzeyleri için gerçekleştirilmiştir. Faktörlerin düzeylerine göre objektif fonksiyona etkilerini gösteren ana etkiler grafiği Şekil 7.7'de yer almaktadır.



Şekil 7.7 25x10 Taguchi Ana Etkiler Grafığı

25x10'luk problem grubu için objektif fonksiyon üzerinde ME, SKS ve KS faktörlerinin düzeyleri arasında belirgin bir etki farklılığı görülmektedir (Şekil 7.7). PPE faktörü ise 1. ve 2. düzeyler arasında bir fark göstermezken, 2. ve 3. düzeyler arasında objektif fonksiyonda düşüş gözlenmektedir. Faktörlerin objektif fonksiyon üzerindeki etkilerine göre sıralamaları ve en iyi sonuç veren düzeyleri Tablo 7.12'de görülmektedir.

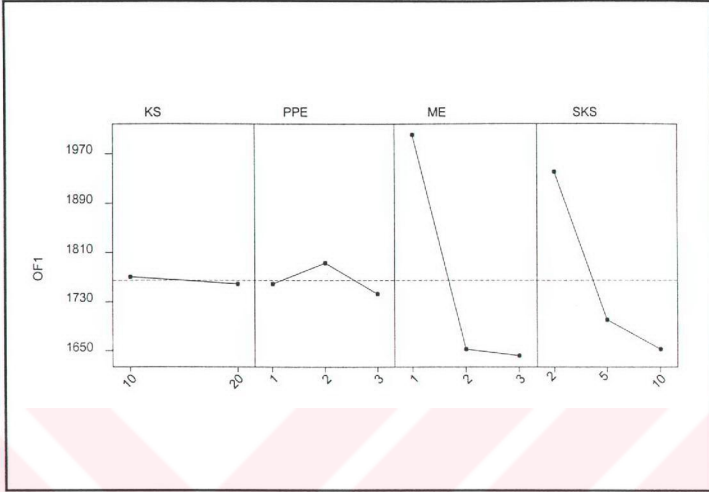
Tablo 7.12 25x10 Faktör Sıralaması

Faktörler	Düzeyler
1. Makine esnekliği	3
2. Sıralama kuralı sayısı	10
3. Komşu çözüm sayısı	20
4. Proses plan esnekliği	3
5. Çözüm dizisinde proses plan değişikliği	20
6. Çözüm dizisinde makine alternatifi değişikliği	20
7. İterasyon	100
8. Tabu listesi uzunluğu	30
9. Çözüm dizisinde sıralama kuralı değişikliği	40

Tablo 7.12’de yer alan sıralamaya göre, ilk dört faktör, ME, SKS, KS, PPE, tam faktöryel deney tasarımı için seçilmiştir. Diğer faktörlerin en iyi sonuç veren düzeyleri sabitlenmiştir.

7.3.3.2 25x10 Tam Faktöryel Deney Tasarımı

25x10’luk problem grubuna, seçilen dört faktör ve düzeyleri için tam faktöryel deney tasarımı uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar kaydedilerek, bu dört faktör için ana etkiler (Şekil 7.8) ve faktör etkileşimleri (Şekil 7.9) grafikleri oluşturulmuştur. Şekil 7.8’de yer alan ana etkiler grafiği değerlendirildiğinde, sonuçların Taguchi deney tasarımı sonuçlarını destekler yönde ortaya çıktığı görülmektedir. ME ve SKS faktörleri, objektif fonksiyon üzerinde etkili çıkarken, KS ve PPE faktörlerinin etkisi düşük gözlenmektedir. Faktörlerin düzeyleri, objektif fonksiyona etkileri açısından varyans analizi ile değerlendirilmiştir. Tablo 7.13’te faktörler ve faktör etkileşimleri için ANOVA sonuçları yer almaktadır.



Şekil 7.8 25x10 Tam Faktöryel Ana Etkiler Grafiği

Tablo 7.13'teki p sütunu incelendiğinde, ME ve SKS faktörlerinin düzeyleri arasındaki anlamlı farklılıktan dolayı objektif fonksiyon üzerinde etkili faktörler olduğu görülmektedir. PPE faktörü ise ($p < \alpha$) olduğundan, 3. sırada etkili faktör olarak ortaya çıkmaktadır. Tablo 7.13'te p sütunundan, faktörlerin ikili ve üçlü etkileşimleri incelendiğinde, ikili ve üçlü faktör etkileşiminin objektif fonksiyon üzerinde anlamlı bir etkisinin olmadığı görülmektedir.

Tablo 7.13 25x10 Faktör Etkinliği ANOVA Sonuçları

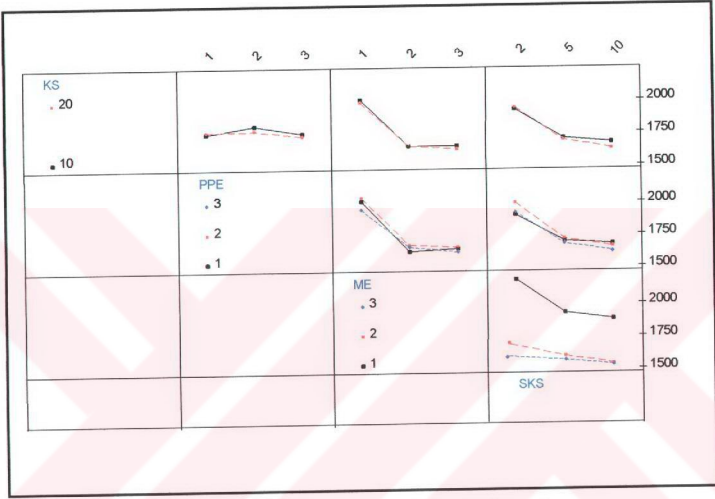
	SD	HK	AHK	F	p
KS	1	2029	2029	1,02	0,342
PPE	2	23360	11680	5,87	0,027
ME	2	1493180	746590	375,31	0,00
SKS	2	855137	427569	214,94	0,00
KS*PPE	2	6397	3198	1,61	0,259
KS*ME	2	2186	1093	0,55	0,598
KS*SKS	2	8569	4284	2,15	0,179
PPE*ME	4	18110	4527	2,28	0,15
PPE*SKS	4	18777	4694	2,36	0,14
ME*SKS	4	5109	1277	0,64	0,648
KS*PPE*ME	4	4441	1110	0,56	0,7
KS*PPE*SKS	4	13738	3434	1,73	0,237
KS*ME*SKS	4	11359	2840	1,43	0,309
PPE*ME*SKS	8	20889	2611	1,31	0,355
Hata	8	15914	1989		
Toplam	53	2499196			

Şekil 7.9'da ANOVA sonuçlarını destekler yönde faktör etkileşimleri grafiği yer almaktadır. KS ve ME faktörlerinin ikili karşılaştırmaları incelenecek olursa, KS'nin farklı düzeyleri için ME etki doğrusunun eğiminin değişmediği görülmektedir. Dolayısıyla ME faktörü, KS faktörünün düzey değişiminden etkilenmemektedir.

25x10'luk problem grubu için gerçekleştirilen tam faktöryel deney tasarımı sonucunda, çözüm yönteminin objektif fonksiyonu açısından;

- proses plan esnekliği yüksek düzeyde(3),
- makine esnekliği yüksek düzeyde (3),
- sıralama kuralı sayısı en yüksek düzeyde (10)

iken en iyi sonucu verdiği ortaya çıkmaktadır. Ancak üç düzeyli faktörler için, hangi düzeyler arasında anlamlı farklılık olduğunun belirlenebilmesi amacıyla çoklu karşılaştırma testinin uygulanması gerekmektedir.



Şekil 7.9 25x10 Tam Faktöryel Etkileşim Grafiği

Tablo 7.14'te yer alan çoklu karşılaştırma testi sonuçlarına göre,

- PPE faktörünün 1-2 ve 1-3 düzeyleri arasında anlamlı bir fark yokken, 2-3 düzeyleri arasında anlamlı bir farklılık görülmektedir
- ME faktörünün 2-3 düzeyleri arasında anlamlı bir farklılık yoktur.
- SKS faktörünün ise tüm düzeyleri arasında anlamlı bir farklılık ortaya çıkmaktadır.

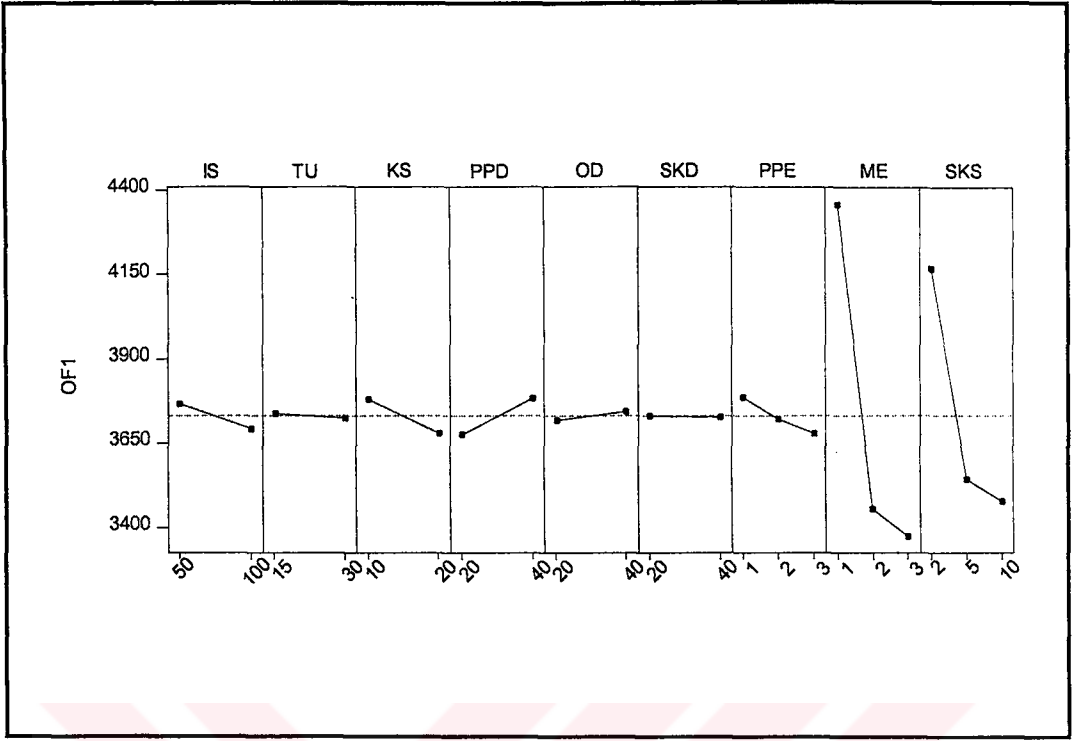
Tablo 7.14 25x10 Faktör Düzeyleri Çoklu Karşılaştırma Testi

PPE	Düzeyler	p	Fark	ME	Düzeyler	p	Fark	SKS	Düzeyler	p	Fark
1	2	0,899	Yok	1	2	0,000	Var	1	2	0,001	Var
	3	0,977	Yok		3	0,000	Var		3	0,000	Var
2	1	0,899	Yok	2	1	0,000	Var	2	1	0,001	Var
	3	0,045	Var		3	0,977	Yok		3	0,045	Var
3	1	0,977	Yok	3	1	0,000	Var	3	1	0,000	Var
	2	0,045	Var		2	0,977	Yok		2	0,045	Var

7.3.4 50x15 Deney Tasarımı

7.3.4.1 50x15 Taguchi Deney Tasarımı

50x15'lik problem grubu için Taguchi deney tasarımı Tablo 7.3'te yer alan faktörler ve düzeyleri için gerçekleştirilmiştir. Objektif fonksiyon değerleri kaydedilerek yapılan analiz sonucunda, oluşturulan ana etkiler grafiği Şekil 7.10'da görülmektedir. Diğer test problemlerine benzer şekilde ME ve SKS faktörleri objektif fonksiyon üzerinde en etkili faktörler olarak ortaya çıkmıştır.



Şekil 7.10 50x15 Taguchi Ana Etkiler Grafiği

50x15'lik problem grubu için Taguchi deney tasarımı sonucunda elde edilen faktör sıralaması ve en iyi düzeyleri Tablo 7.15'te yer almaktadır.

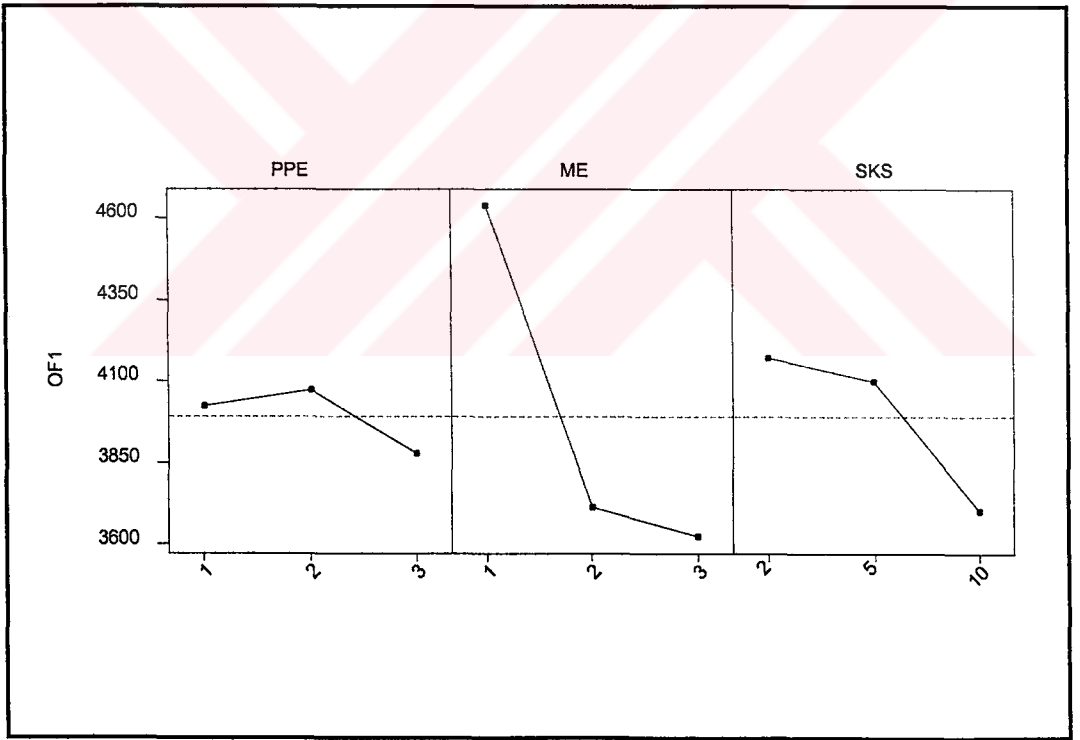
Tablo 7.15 50x15 Faktör Sıralaması

Faktörler	Düzeyler
1. Makine esnekliği	3
2. Sıralama kuralı sayısı	10
3. Proses plan esnekliği	3
4. Çözüm dizisinde proses plan değişikliği	20
5. Komşu çözüm sayısı	20
6. İterasyon	100
7. Çözüm dizisinde makine alternatifi değişikliği	20
8. Tabu listesi uzunluğu	30
9. Çözüm dizisinde sıralama kuralı değişikliği	40

Taguchi deney tasarımı sonucunda elde edilen faktör sıralamasına göre ilk üç faktör, ME, SKS, PPE faktörleri tam faktöryel deney tasarımı için seçilmiştir.

7.3.4.2 50x15 Tam Faktöryel Deney Tasarımı

50x15'lik problem grubu için ME, SKS ve PPE faktörleri ile tam faktöryel deney tasarımı gerçekleştirilmiştir. Deney tasarımının analizi sonucunda Şekil 7.11'deki ana etkiler grafiği ile Tablo 7.16'daki ANOVA sonuçları elde edilmiştir. Ana etkiler grafiğinde, ME ve SKS faktörlerinin etkinliği belirgin şekilde görülmektedir. Tablo 7.16'daki p sütunu incelendiğinde, ME ve SKS faktörünün etkisi seçilen α düzeyine göre anlamlıdır.

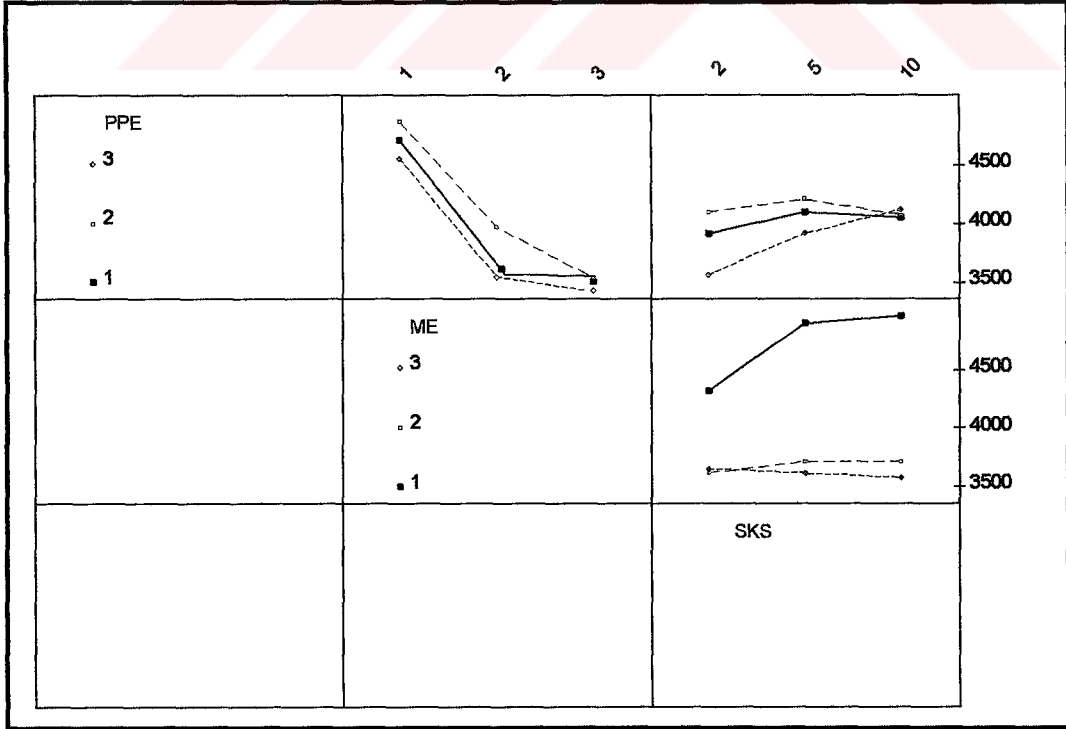


Şekil 7.11 50x15 Tam Faktöryel Ana Etkiler Grafiği

Tablo 7.16 50x15 Faktör Etkinliği ANOVA Sonuçları

	SD	HK	AHK	F	p
PPE	2	186872	93436	0,25	0,782
ME	2	5671757	2835878	7,68	0,014
SKS	2	1157625	578812	1,57	0,046
PPE*ME	4	538060	134515	0,36	0,828
PPE*SKS	4	883340	220835	0,6	0,674
ME*SKS	4	711805	177951	0,48	0,749
Hata	8	2953395	369174		
Toplam	26	12102853			

Tablo 7.16’da, faktörler arasındaki etkileşim p sütunundan incelendiğinde, faktörlerin ikili etkileşimlerinin performans üzerinde anlamlı bir etkisinin olmadığı görülmektedir. Benzer sonuç, Şekil 7.12’deki etkileşim grafiğinden de görülmektedir. Örneğin ME ve PPE etkileşimi değerlendirilecek olursa, ME faktörü, PPE faktörünün düzeyinden etkilenmeksizin 3. düzeyinde en iyi sonucu vermektedir.



Şekil 7.12 50x15 Tam Faktöryel Etkileşim Grafiği

Tam faktöryel deney tasarımı sonucunda etkili faktörler olarak belirlenen ME ve SKS faktörlerinin, hangi düzeyleri arasında objektif fonksiyon açısından anlamlı bir farklılık olduğunun belirlenebilmesi amacıyla, bu faktörlere çoklu karşılaştırma testi uygulanmıştır. Tablo 7.17’de yer alan çoklu karşılaştırma testi sonuçlarına göre, ME faktörünün 1-2 düzeyleri arasında anlamlı bir farklılık varken, 2-3 düzeyleri arasındaki fark seçilen α düzeyine göre anlamlı çıkmamıştır. SKS faktörü için ise, 1-2 düzeyleri arasında anlamlı bir fark yokken, 2-3 düzeyleri arasındaki fark anlamlı çıkmıştır.

Tablo 7.17 50x15 Faktör Düzeyleri Çoklu Karşılaştırma Testi

ME	Düzeyler	p	Fark	SKS	Düzeyler	p	Fark
1	2	0,03	Var	1	2	0,85	Yok
	3	0,02	Var		3	0,03	Var
2	1	0,03	Var	2	1	0,85	Yok
	3	0,56	Yok		3	0,04	Var
3	1	0,02	Var	3	1	0,03	Var
	2	0,56	Yok		2	0,04	Var

50x15’lik problem grubu için, sonuç olarak ME ve SKS faktörleri 3. düzeylerinde en iyi sonucu verirken, ME faktörü için 2-3 düzeyleri birbirine yakın etkilere sahiptir. Benzer şekilde SKS faktörü için, 1-2 düzeyleri objektif fonksiyon üzerinde yakın etkilere sahiptirler.

7.4 MAKİNE ESNEKLİĞİ – SIRALAMA KURALI İLİŞKİSİ

Çalışmanın bu bölümünde, hazırlanan test problemlerinden farklı boyutlarda seçilen üçü üzerinde, belirlenen performans kriteri için, operasyonların makine esneklik düzeyleri ile sıralama kuralları arasındaki ilişki analiz edilmiştir.

Seçilen test problemleri:

- 10x10
- 20x5
- 25x10

Objektif fonksiyon: İşlerin ortalama gecikmesi $\sum_{i=1}^n T_i / n$

Operasyonların makine esneklik düzeyleri dört farklı grupta incelenmiştir;

- Makine esnekliği yok
- Makine esnekliği düşük düzeyde
- Makine esnekliği orta düzeyde
- Makine esnekliği yüksek düzeyde

İlk grupta, makine esnekliğinin olmadığı, yani her bir operasyonun tek bir makinede işlem gördüğü durum ele alınmıştır. İkinci, üçüncü ve dördüncü gruplarda, Tablo 7.1’de yer alan, sırasıyla düşük, orta ve yüksek makine esnekliği düzeyleri incelenmiştir.

Değerlendirilecek sıralama kuralları;

- *EKİZ* (SPT - en kısa işlem zamanı),
- *ETT* (EDD - en erken teslim tarihi),
- *KYİZ* (MWRT - en yüksek kalan işlem zamanı),
- *İZBK* (PDR - en küçük işlem zamanı/ kalan toplam zaman oranı),
- *EKB* (MS - teslim tarihine en yakın işlem zamanı),

olarak belirlenmiştir. Birinci grup hariç (makine esnekliği 0), diğer gruplarda her bir sıralama kuralı için program 30 kez çalıştırılarak sonuçlar kaydedilmiştir. Örnek büyüklüğünün 30 olarak belirlenmesi, parametrik testlerin uygulanabilmesi amacıyla merkezi limit teoremi gereği yeterli sayıda ($n \geq 30$) (Daly; Bourke; McGilvray; 1991, 57)

örneklem için normal dağılıma uygunluğun sağlanmasından kaynaklanmaktadır. Dolayısıyla her bir problem için farklı esneklik düzeyleri ve sıralama kuralları için toplam 451 sonuç elde edilmiştir. Sonuçlar değerlendirilerek, ANOVA ve çoklu karşılaştırma testleri SPSS 11 istatistik programı ile gerçekleştirilmiştir. Ayrıca her bir test problemi için objektif fonksiyon değerlerinin ortalaması ile histogram grafikleri oluşturulmuştur.

ANOVA ve çoklu karşılaştırma testleri için, bütün makine esneklik düzeylerinde ayrı ayrı sıralama kuralları arasındaki performans farkları hesaplanmıştır. Şekil 7.13'te sıralama kurallarının ikili eşleştirmeleri yer almaktadır. Bu ikililer arasındaki objektif fonksiyon açısından mutlak performans farklılıkları hesaplanmıştır. Elde edilen bu farklar makine esneklik düzeylerine göre gruplandırılmış ve bu gruplar arasında varyans analizi (ANOVA) yapılmıştır.

EKİZ-KYİZ	EKİZ-İZBK	EKİZ-EKB	ETT-KYİZ	ETT-İZBK	ETT-EKB	KYİZ-İZBK	KYİZ-EKB	İZBK-EKB
-----------	-----------	----------	----------	----------	---------	-----------	----------	----------

Şekil 7.13 Sıralama Kuralları Eşleştirmesi

7.4.1 10x10 Problemi İçin Sıralama Kuralları Analizi

10x10'luk test problemi için, aralarındaki mutlak performans farkı hesaplanan sıralama kuralı ikililerinin (değişkenler), makine esnekliği gruplarına göre tanımlayıcı istatistikleri hesaplanmıştır. Elde edilen SPSS sonuçları Tablo 7.18'de yer almaktadır.

Şekil 7.13'te yer alan 9 farklı sıralama kuralı ikilisi için oluşturulan tablo boyutlarının çok büyük olmasından dolayı, bu bölümde sadece ilk dört ikili için elde edilen değerler sunulmuştur. Diğer 5 sıralama kuralı ikilisi için sonuç tablo değerleri Ek-2'de yer almaktadır.

Tablo 7.18 10X10 Değişkenlerin Tanımlayıcı İstatistikleri

	Makine Esneklik Düzeyi	N	Ortalama	Standart Sapma	Std. Hata
EKİZ-ETT	0	30	27,70	0,00	0,00
	1	30	12,31	8,98	1,64
	2	30	7,02	4,93	0,90
	3	30	3,63	2,29	0,42
	Toplam	120	12,67	10,61	0,97
EKİZ-KYİZ	0	30	98,80	0,00	0,00
	1	30	53,66	12,57	2,29
	2	30	23,98	6,49	1,19
	3	30	22,46	7,62	1,39
	Toplam	120	49,73	32,07	2,93
EKİZ-İZBK	0	30	41,00	0,00	0,00
	1	30	30,18	6,39	1,17
	2	30	19,86	3,91	0,71
	3	30	13,20	4,75	0,87
	Toplam	120	26,06	11,45	1,05
EKİZ-EKB	0	30	60,40	0,00	0,00
	1	30	32,16	9,97	1,82
	2	30	17,27	4,84	0,88
	3	30	14,95	4,67	0,85
	Toplam	120	31,19	19,13	1,75

Değişken değerlerinin, gruplar arasında farklılığının istatistiksel olarak anlamlılığının belirlenebilmesi için varyans analizi yapılmıştır. Elde edilen ANOVA değerleri Tablo 7.19’da yer almaktadır.

Tablo 7.19’daki ANOVA sonuçlarında p sütununda yer alan değerlere göre, bütün sıralama kuralı ikilileri için, makine esnekliği grupları arasında performans açısından ($\alpha=0,05$) anlamlı bir farklılık görülmektedir. Yani, sıralama kuralları arasındaki fark makine esneklik düzeyine göre değişmektedir.

Tablo 7.19’daki ANOVA sonuçları gruplar arasındaki farkın anlamlılık düzeyini vermesine rağmen, hangi gruplar arasında ne yönde bir farklılık olduğunu göstermemektedir. Farklı makine esnekliği gruplarında sıralama kuralları arasındaki farkın değişimini değerlendirebilmek amacıyla çoklu karşılaştırma testinin uygulanması gerekmektedir. Bu amaçla SPSS 11 paket programı ile Scheffe yöntemi kullanılarak gruplar arasında çoklu karşılaştırma gerçekleştirilmiştir. Tablo 7.20’de yer alan çoklu

karşılaştırma sonuçları, p ve ortalama fark sütunları göz önüne alınarak değerlendirilmiştir.

Tablo 7.19 10X10 Gruplar Arası İlişki İçin ANOVA Sonuçları

		Kareler Toplamı	SD	Ortalama Kare	F	p.
EKİZ-ETT	Gruplar arası	10188,29	3,00	3396,10	123,14	0,00
	Grup içi	3199,30	116,00	27,58		
	Toplam	13387,59	119,00			
EKİZ-KYİZ	Gruplar arası	114896,65	3,00	38298,88	593,49	0,00
	Grup içi	7485,72	116,00	64,53		
	Toplam	122382,37	119,00			
EKİZ-İZBK	Gruplar arası	13319,20	3,00	4439,73	225,65	0,00
	Grup içi	2282,29	116,00	19,67		
	Toplam	15601,49	119,00			
EKİZ-EKB	Gruplar arası	39357,01	3,00	13119,00	362,73	0,00
	Grup içi	4195,46	116,00	36,17		
	Toplam	43552,47	119,00			

EKİZ-ETT sıralama kuralı ikilisi için Tablo 7.20’de A1-A3 satırları aşağıda açıklandığı şekilde değerlendirilmektedir.

Makine esnekliği 0 grubu , 1-2-3 grupları ile ikili olarak karşılaştırılmıştır. Her üç karşılaştırma sonucu elde edilen p değerlerine göre, $p < \alpha$ ($\alpha=0,05$) olduğundan, bu gruplar arasında anlamlı bir farklılık olduğu görülmektedir. Bu farklılığın yönü ise ortalama fark sütunundan gözlenebilmektedir. Ortalama fark sütununda yer alan değerlerin 1. gruptan 3. gruba doğru artması, sıralama kuralı performans farkları açısından karşılaştırılan Grup 0 ile Grup 1 arasındaki farkın, Grup 0 ile Grup 3 arasındaki farktan daha düşük olduğunu ifade etmektedir. Karşılaştırma sonucunun pozitif olması, Grup 0’ın EKİZ-ETT sıralama kuralı farklarının diğer tüm gruplardan büyük olduğunu göstermektedir. Karşılaştırmada, Grup 1’den Grup 3’e doğru bu pozitif

değerin artması, Grup 3'e doğru, EKİZ-ETT sıralama kuralları arasındaki farkın düştüğünü ifade etmektedir.

Benzer bir değerlendirme aynı sıralama kuralı çiftinde 3. grup için yapılacak olursa (Tablo 7.20, A10-A12 satırları);

Grup 3'ün, Grup 0,1 ve 2 ile EKİZ-ETT sıralama kuralları performans farkları açısından karşılaştırılması gerçekleştirilmiştir. Grup 3 ile diğer grupların karşılaştırılması sonucunda elde edilen farklar negatif değerler olarak ortaya çıkmıştır. Bu negatif değerler, Grup 3'teki sıralama kuralı farklarının, diğer tüm gruplardan daha düşük olduğunu göstermektedir. Bu farkların, Grup 2'den Grup 0'a doğru artması, sıralama kuralı farklarının Grup 2'den Grup 0'a doğru gittikçe yükseldiğini ifade etmektedir. Yani Grup 0'da EKİZ-ETT sıralama kuralları arasındaki fark fazla iken, Grup 0'a doğru bu fark azalmaktadır.

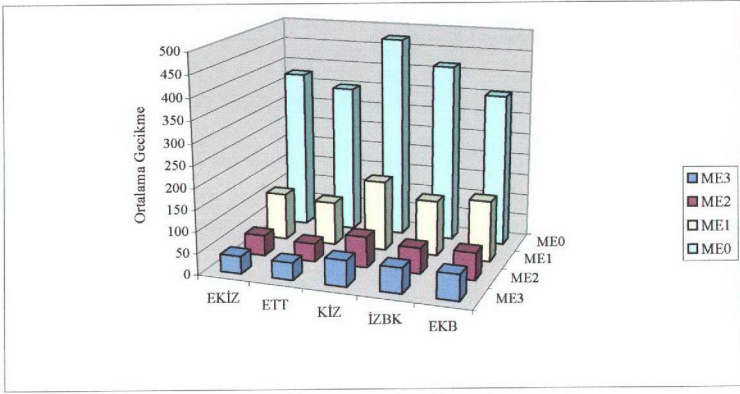
Tablo 7.20'den elde edilen bir başka sonuç ise, sıralama kuralı ikililerinin çoğunda, Grup 2 ile Grup 3 arasındaki farklılığın anlamlı çıkmamasıdır. Tablo 7.20'de EKİZ-ETT sıralama kuralı ikilisi için A9 satırı p sütunu, $p < \alpha$ şartını sağlamadığından, Grup 2 ile Grup 3 arasında sıralama kuralı performans farkları açısından anlamlı bir farkın olmadığını ifade etmektedir. Dolayısıyla, makine esnekliğinin belirli bir düzeyinden sonra sıralama kuralları arasındaki farklılık değişmemektedir.

Benzer değerlendirmeler, diğer sıralama kuralı ikilileri için gerçekleştirilmekte ve aynı sonuçlar elde edilmektedir.

Şekil 7.14'te, grup ortalamaları ile oluşturulmuş, makine esnekliği grupları ile sıralama kuralları arasındaki ilişkiyi gösteren histogram yer almaktadır. Histogramdan da görüldüğü üzere, makine esneklik düzeyi arttıkça objektif fonksiyon (performans yükselmekte) düşmekte ve sıralama kuralları arasındaki fark azalmaktadır. Ayrıca Şekil 7.14'ten, makine esnekliği düzeyi 2 ve 3 arasındaki farkın oldukça düşük olduğu da gözlenmektedir. Dolayısıyla makine esnekliği, belirli bir düzeyden sonra performansı iyileştirmede gibi, sıralama kuralları arasındaki farkı da değiştirmemektedir.

Tablo 7.20 10X10 Çoklu Karşılaştırma Testi Sonuçları

Bağımlı Değişkenler	(I) ME Grubu	(J) ME Grupları	Ortalama Fark (I-J)	Std. Hata	p
EKİZ-ETT (A1)	0,000	1,000	15,390	1,356	0,000
(A2)		2,000	20,682	1,356	0,000
(A3)		3,000	24,065	1,356	0,000
	1,000	0,000	-15,390	1,356	0,000
		2,000	5,292	1,356	0,002
		3,000	8,675	1,356	0,000
	2,000	0,000	-20,682	1,356	0,000
		1,000	-5,292	1,356	0,002
(A9)		3,000	3,383	1,356	0,107
(A10)	3,000	0,000	-24,065	1,356	0,000
(A11)		1,000	-8,675	1,356	0,000
(A12)		2,000	-3,383	1,356	0,107
EKİZ-KYİZ	0,000	1,000	45,139	2,074	0,000
		2,000	74,819	2,074	0,000
		3,000	76,338	2,074	0,000
	1,000	0,000	-45,139	2,074	0,000
		2,000	29,680	2,074	0,000
		3,000	31,200	2,074	0,000
	2,000	0,000	-74,819	2,074	0,000
		1,000	-29,680	2,074	0,000
		3,000	1,520	2,074	0,911
	3,000	0,000	-76,338	2,074	0,000
		1,000	-31,200	2,074	0,000
		2,000	-1,520	2,074	0,911
EKİZ-İZBK	0,000	1,000	10,820	1,145	0,000
		2,000	21,145	1,145	0,000
		3,000	27,797	1,145	0,000
	1,000	0,000	-10,820	1,145	0,000
		2,000	10,325	1,145	0,000
		3,000	16,977	1,145	0,000
	2,000	0,000	-21,145	1,145	0,000
		1,000	-10,325	1,145	0,000
		3,000	6,652	1,145	0,000
	3,000	0,000	-27,797	1,145	0,000
		1,000	-16,977	1,145	0,000
		2,000	-6,652	1,145	0,000
EKİZ-EKB	0,000	1,000	28,237	1,553	0,000
		2,000	43,133	1,553	0,000
		3,000	45,454	1,553	0,000
	1,000	0,000	-28,237	1,553	0,000
		2,000	14,897	1,553	0,000
		3,000	17,218	1,553	0,000
	2,000	0,000	-43,133	1,553	0,000
		1,000	-14,897	1,553	0,000
		3,000	2,321	1,553	0,528
	3,000	0,000	-45,454	1,553	0,000
		1,000	-17,218	1,553	0,000
		2,000	-2,321	1,553	0,528



Şekil 7.14 10x10 Makine Esnekliği Sıralama Kuralı İlişkisi

7.4.2 20X5 Problemi İçin Sıralama Kuralları Analizi

Bölüm 7.4.1’de gerçekleştirilen analiz, farklı boyutlarda (20x5, 25x10) iki test problemi üzerinde tekrarlanmıştır. Şekil 7.13’te oluşturulan sıralama kuralı ikililerinden, EKİZ-ETT, EKİZ-KYİZ, EKİZ-İZBK, EKİZ-EKB ikilileri bu bölümde değerlendirilmiş, diğer sıralama kuralı ikilileri için elde edilen sonuçlar Ek-2’de sunulmuştur. Belirlenen sıralama kuralı ikililerinin tanımlayıcı istatistikleri Tablo 7.21’de yer almaktadır.

Tablo 7.21 20X5 Değişkenlerin Tanımlayıcı İstatistikleri

	Makine Esneklik Düzeyi	N	Ortalama	Standart Sapma	Std. Hata
EKİZ-ETT	0	30,00	42,30	0,00	0,00
	1	30,00	32,86	16,14	2,95
	2	30,00	17,99	10,93	2,00
	3	30,00	12,51	3,23	0,59
	Toplam	120,00	26,41	15,36	1,40
EKİZ-KYİZ	0	30,00	253,55	0,00	0,00
	1	30,00	140,18	22,08	4,03
	2	30,00	45,08	11,54	2,11
	3	30,00	29,08	3,94	0,72
	Toplam	120,00	116,97	90,80	8,29
EKİZ-İZBK	0	30,00	188,30	0,00	0,00
	1	30,00	108,44	18,71	3,42
	2	30,00	28,58	11,36	2,07
	3	30,00	26,56	3,91	0,71
	Toplam	120,00	87,97	67,85	6,19
EKİZ-EKB	0	30,00	53,10	0,00	0,00
	1	30,00	25,91	16,40	2,99
	2	30,00	22,41	10,62	1,94
	3	30,00	21,44	2,11	0,39
	Toplam	120,00	30,72	16,29	1,49

Tanımlanan sıralama kuralı ikililerinin performans farklılıklarının, makine esnekliği gruplarına göre anlamlı bir değişiklik gösterdiğine ilişkin sonuçların elde edilebilmesi amacıyla, bu ikililere ANOVA uygulanmıştır. Tablo 7.22'deki ANOVA tablosunun p sütunu incelendiğinde, sıralama kuralı ikililerin tümü için ($p < \alpha$) olduğundan, ikililer arasındaki performans farklarının gruplara bağlı olarak anlamlı bir değişiklik gösterdiği ortaya çıkmaktadır. ANOVA sonuçlarında, sıralama kuralı farklarının hangi gruplarda, ne yönde değişiklik gösterdiği belirlenemeyeceğinden, bu sıralama kurallarına çoklu karşılaştırma testi uygulanmıştır.

Tablo 7.22 20X5 Gruplar Arası İlişki İçin ANOVA Sonuçları

		Kareler Toplamı	SD	Ortalama Kare	F	p.
EKİZ-ETT	Gruplar arası	16747,49	3,00	5582,50	57,22	0,00
	Grup içi	11317,92	116,00	97,57		
	Toplam	28065,41	119,00			
EKİZ-KYİZ	Gruplar arası	962573,00	3,00	320857,67	2017,29	0,00
	Grup içi	18450,20	116,00	159,05		
	Toplam	981023,20	119,00			
EKİZ-İZBK	Gruplar arası	533523,77	3,00	177841,26	1438,73	0,00
	Grup içi	14338,78	116,00	123,61		
	Toplam	547862,55	119,00			
EKİZ-EKB	Gruplar arası	20372,13	3,00	6790,71	70,35	0,00
	Grup içi	11197,66	116,00	96,53		
	Toplam	31569,79	119,00			

20x5 Test problemi için, sıralama kuralı ikilileri arasındaki farkların, makine esnekliğine bağlı olarak değişimini gösteren çoklu karşılaştırma testi sonuçları Tablo 7.23'te yer almaktadır. Çoklu karşılaştırma testi ile elde edilen sonuçlar, 10x10 test problemi sonuçları ile benzerdir. Bu benzerliği ortaya koyabilmek amacıyla Tablo 7.23'te EKİZ-KYİZ sıralama kuralı ikilileri için, makine esnekliğinin düşük düzeyinin (Grup 1), diğer düzeylerle (Grup 0-2-3) karşılaştırılması açıklanmıştır.

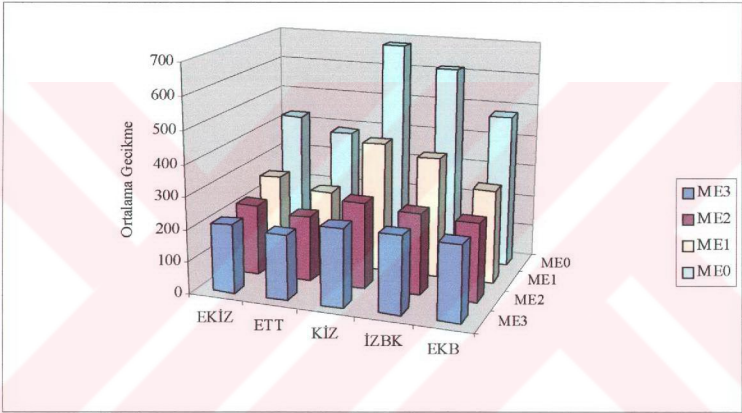
EKİZ-KYİZ sıralama kuralları arasındaki performans farklılığının gruplara göre değişimi (B4-B5-B6 satırlarından) incelenmiş ve Grup 1 ile Grup 0 arasında negatif anlamlı bir fark olduğu görülmüştür. Bu iki grup arasındaki anlamlı farklılık, sıralama kuralı farklarının, makine esnekliğinin olmadığı durumla, makine esnekliğinin düşük olduğu durum arasında değişim gösterdiğini ifade etmektedir. Bu değişimin yönü, Tablo 7.23'te ortalama sütunundan elde edilmektedir. Grup 1 ile Grup 0 arasındaki farkın negatif olması, Grup 0'da sıralama kuralı farklarının Grup 1'e göre daha fazla olduğunu ortaya koymaktadır. Benzer şekilde Grup 1 ile Grup 2 karşılaştırıldığında, bu farkın pozitif olduğu görülmektedir. Bu sonuçta, Grup 1'deki sıralama kuralı farkının, Grup 2'den daha yüksek olduğunu ifade etmektedir. Tablo 7.23'te C10-C11-C12

satırları EKİZ-İZBK sıralama kuralı ikilisi için, Grup 3 ile diğer grupların karşılaştırma sonuçlarını göstermektedir. Bu karşılaştırma için ortalama farkların tamamının negatif olması, Grup 3'teki (makine esnekliği yüksek düzeyde) sıralama kuralı performans farklarının, diğer tüm gruplardan düşük olduğunu belirtmektedir. Ancak bu karşılaştırmalardan Grup 3-Grup 0, Grup 3-Grup 1 için elde edilen p değerleri, farkların anlamlı olduğunu ifade ederken, Grup 3-Grup 2 farklarının anlamlı olmadığını göstermektedir. Sıralama kuralı ikililerinin bir çoğunda, Grup 2-Grup 3 karşılaştırması için benzer sonuçlar elde edilmiştir. Bu değerlendirme, makine esnekliğinin orta ve yüksek düzeylerinde, sıralama kuralı performans farkları açısından anlamlı bir değişim gözlenmediğini ifade etmektedir.

Tablo 7.23 20X5 Çoklu Karşılaştırma Testi Sonuçları

Bağımlı Değişkenler	(I) ME Grubu	(J) ME Grupları	Ortalama Fark (I-J)	Std. Hata	p
EKİZ-ETT	0,00	1,00	9,44	2,55	0,005
		2,00	24,31	2,55	0,000
		3,00	29,79	2,55	0,000
	1,00	0,00	-9,44	2,55	0,005
		2,00	14,86	2,55	0,000
		3,00	20,35	2,55	0,000
	2,00	0,00	-24,31	2,55	0,000
		1,00	-14,86	2,55	0,000
		3,00	5,49	2,55	0,207
	3,00	0,00	-29,79	2,55	0,000
		1,00	-20,35	2,55	0,000
		2,00	-5,49	2,55	0,207
EKİZ-KYİZ	0,00	1,00	113,37	3,26	0,000
		2,00	208,47	3,26	0,000
		3,00	224,47	3,26	0,000
(B4)	1,00	0,00	-113,37	3,26	0,000
(B5)		2,00	95,10	3,26	0,000
(B6)		3,00	111,10	3,26	0,000
	2,00	0,00	-208,47	3,26	0,000
		1,00	-95,10	3,26	0,000
		3,00	15,99	3,26	0,000
	3,00	0,00	-224,47	3,26	0,000
		1,00	-111,10	3,26	0,000
		2,00	-15,99	3,26	0,000
EKİZ-İZBK	0,00	1,00	79,86	2,87	0,000
		2,00	159,72	2,87	0,000
		3,00	161,74	2,87	0,000
	1,00	0,00	-79,86	2,87	0,000
		2,00	79,86	2,87	0,000
		3,00	81,89	2,87	0,000
	2,00	0,00	-159,72	2,87	0,000
		1,00	-79,86	2,87	0,000
		3,00	2,03	2,87	0,919
(C10)	3,00	0,00	-161,74	2,87	0,000
(C11)		1,00	-81,89	2,87	0,000
(C12)		2,00	-2,03	2,87	0,919
EKİZ-EKB	0,00	1,00	27,19	2,54	0,000
		2,00	30,69	2,54	0,000
		3,00	31,66	2,54	0,000
	1,00	0,00	-27,19	2,54	0,000
		2,00	3,50	2,54	0,595
		3,00	4,47	2,54	0,381
	2,00	0,00	-30,69	2,54	0,000
		1,00	-3,50	2,54	0,595
		3,00	0,97	2,54	0,986
	3,00	0,00	-31,66	2,54	0,000
		1,00	-4,47	2,54	0,381
		2,00	-0,97	2,54	0,986

Gerçekleştirilen analiz sonucunda her bir sıralama kuralının, bir makine esnekliği düzeyinde elde edilmiş 30 objektif fonksiyon değerlerinin ortalamaları alınarak histogram grafiği oluşturulmuştur. Şekil 7.15'te yer alan grafikte, makine esneklik düzeyi arttıkça sıralama kurallarının performans farklılıklarının azaldığı görülmektedir. Bu sonuç, esnek çizelgeleme sistemlerinde, farklı sıralama kurallarının yakın performans değerleri elde ettiğini göstermektedir.



Şekil 7.15 20x5 Makine Esnekliği Sıralama Kuralı İlişkisi

7.4.3 25X10 Problemi İçin Sıralama Kuralları Analizi

Bölüm 7.4.1 ve 7.4.2'de gerçekleştirilen çalışmalara benzer bir yöntem 25x10 test problemi için tekrarlanmıştır. 25x10 test problemi için, ilk dört sıralama kuralı ikilisi arasındaki performans farklarının tanımlayıcı istatistikleri Tablo 7.24'te yer almaktadır. Diğer sıralama kuralı ikilileri için elde edilen değerler Ek-2'de sunulmuştur.

Tablo 7.24 25X10 Değişkenlerin Tanımlayıcı İstatistikleri

	Makine Esneklik Düzeyi	N	Ortalama	Standart Sapma	Std. Hata
EKİZ-ETT	0	30	360,16	0,00	0,00
	1	30	163,12	31,71	5,79
	2	30	83,07	19,62	3,58
	3	30	70,96	10,19	1,86
	Toplam	120	169,33	117,77	10,75
EKİZ-KYİZ	0	30	188,04	0,00	0,00
	1	30	149,85	24,28	4,43
	2	30	121,12	15,61	2,85
	3	30	30,03	14,39	2,63
	Toplam	120	122,26	60,67	5,54
EKİZ-İZBK	0	30	259,64	0,00	0,00
	1	30	187,75	28,16	5,14
	2	30	131,27	22,17	4,05
	3	30	35,62	14,33	2,62
	Toplam	120	153,57	84,42	7,71
EKİZ-EKB	0	30	286,52	0,00	0,00
	1	30	68,43	27,41	5,00
	2	30	31,75	19,02	3,47
	3	30	32,79	8,71	1,59
	Toplam	120	104,87	107,71	9,83

25x10 test problemi için, sıralama kurallarının makine esnekliği gruplarına göre anlamlı bir farklılık gösterdiğinin ortaya konulabilmesi için, bu değişkenlere ANOVA uygulanmıştır. Tüm sıralama kuralı ikililerinin performans farklarının, makine esnekliği gruplarına bağlı olarak anlamlı bir değişim gösterdiği, Tablo 7.25'te elde edilen p değerleri sonucunda görülmektedir. Ancak hangi gruplar arasında fark olduğunun belirlenebilmesi amacıyla sıralama kuralı ikililerine çoklu karşılaştırma testi uygulanmıştır.

Tablo 7.25 25X10 Gruplar Arası İlişki İçin ANOVA

		Kareler Toplamı	SD	Ortalama Kare	F	p.
EKİZ-ETT	Gruplar arası	1607200,66	3,00	535733,55	1434,19	0,00
	Grup içi	43331,03	116,00	373,54		
	Toplam	1650531,69	119,00			
EKİZ-KYİZ	Gruplar arası	407853,20	3,00	135951,07	522,77	0,00
	Grup içi	30167,09	116,00	260,06		
	Toplam	438020,29	119,00			
EKİZ-İZBK	Gruplar arası	804834,21	3,00	268278,07	720,22	0,00
	Grup içi	43209,36	116,00	372,49		
	Toplam	848043,56	119,00			
EKİZ-EKB	Gruplar arası	1346006,24	3,00	448668,75	1509,54	0,00
	Grup içi	34477,86	116,00	297,22		
	Toplam	1380484,09	119,00			

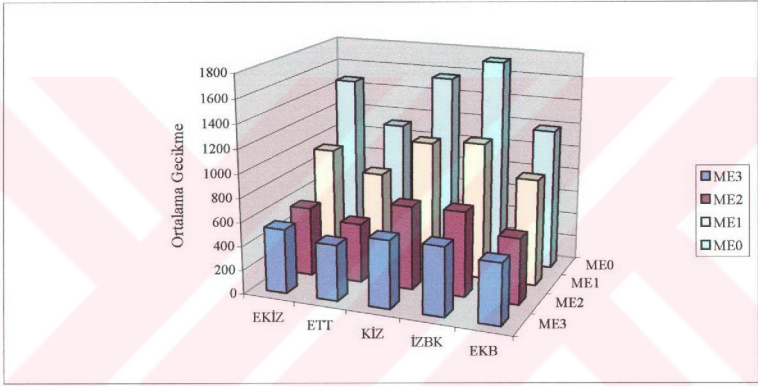
Tablo 7.26'da, elde edilen çoklu karşılaştırma testi sonuçları yer almaktadır. Tablo 7.26'nın ortalama fark ve p sütunu incelendiğinde, 10x10, 20x5 test problemlerinde elde edilen sonuçların, bu test problemi için de geçerli olduğu görülmektedir. Sıralama kuralı ikililerinin performans farkları açısından gruplar arasında anlamlı bir farklılık söz konusudur. Bazı sıralama kuralı ikililerinde, Grup 2-Grup 3 arasında anlamlı bir fark çıkmamıştır. Yani sıralama kuralı performans farkları, bu iki grupta benzer sonuçlar ortaya koymuşlardır. Gruplar arasındaki farklılığın yönü ise, ortalama fark sütunundaki değerden elde edilebilmektedir. Bu değer pozitif ve yüksek bir değer olması, sıralama kuralı performans farklılığının ilk grupta, ikinci gruba göre daha yüksek olduğunu ifade etmektedir. Ortalama fark değerinin negatif olması ise sıralama kuralı performans farklılığının ilk grupta, ikinci gruba göre daha düşük olduğunu göstermektedir.

Sonuç olarak 25x10 test problemi için, sıralama kuralları arasındaki performans farklılıklarının, makine esnekliği arttıkça düştüğü söylenebilir.

Tablo 7.26 25X10 Çoklu Karşılaştırma Sonuçları

Değişkenler	(I) ME Grubu	(J) ME Grupları	Ortalama Fark (I-J)	Std. Hata	p
EKİZ-ETT	0,000	1,000	197,038	4,990	0,000
		2,000	277,093	4,990	0,000
		3,000	289,204	4,990	0,000
	1,000	0,000	-197,038	4,990	0,000
		2,000	80,055	4,990	0,000
		3,000	92,166	4,990	0,000
	2,000	0,000	-277,093	4,990	0,000
		1,000	-80,055	4,990	0,000
		3,000	12,112	4,990	0,123
	3,000	0,000	-289,204	4,990	0,000
		1,000	-92,166	4,990	0,000
		2,000	-12,112	4,990	0,123
EKİZ-KYİZ	0,000	1,000	38,188	4,164	0,000
		2,000	66,917	4,164	0,000
		3,000	158,005	4,164	0,000
	1,000	0,000	-38,188	4,164	0,000
		2,000	28,728	4,164	0,000
		3,000	119,817	4,164	0,000
	2,000	0,000	-66,917	4,164	0,000
		1,000	-28,728	4,164	0,000
		3,000	91,089	4,164	0,000
	3,000	0,000	-158,005	4,164	0,000
		1,000	-119,817	4,164	0,000
		2,000	-91,089	4,164	0,000
EKİZ-İZBK	0,000	1,000	71,888	4,983	0,000
		2,000	128,367	4,983	0,000
		3,000	224,017	4,983	0,000
	1,000	0,000	-71,888	4,983	0,000
		2,000	56,479	4,983	0,000
		3,000	152,129	4,983	0,000
	2,000	0,000	-128,367	4,983	0,000
		1,000	-56,479	4,983	0,000
		3,000	95,649	4,983	0,000
	3,000	0,000	-224,017	4,983	0,000
		1,000	-152,129	4,983	0,000
		2,000	-95,649	4,983	0,000
EKİZ-EKB	0,000	1,000	218,091	4,451	0,000
		2,000	254,768	4,451	0,000
		3,000	253,733	4,451	0,000
	1,000	0,000	-218,091	4,451	0,000
		2,000	36,677	4,451	0,000
		3,000	35,642	4,451	0,000
	2,000	0,000	-254,768	4,451	0,000
		1,000	-36,677	4,451	0,000
		3,000	-1,035	4,451	0,997
	3,000	0,000	-253,733	4,451	0,000
		1,000	-35,642	4,451	0,000
		2,000	1,035	4,451	0,997

Şekil 7.16'da, sıralama kuralları ile makine esnekliği ilişkisini gösteren histogram grafiği yer almaktadır. Grafikteki her bir sütun, bir sıralama kuralı ile belirli bir makine esneklik düzeyinde elde edilen 30 objektif fonksiyon değerinin ortalaması ile oluşturulmuştur. Şekil 7.16'da yer alan histogram, sıralama kurallarının ortalama gecikme üzerindeki etkilerinin, makine esneklik düzeyi arttıkça birbirlerine yaklaştığını göstermektedir.



Şekil 7.16 25x10 Makine Esnekliği Sıralama Kuralı İlişkisi

Çalışmanın bu bölümünde elde edilen sonuçlar, Bölüm 7.3'te yer alan deney tasarımı analizleri tarafından da desteklenmektedir. 5x5, 20x5, 25x10, 50x15 test problemleri için sırasıyla, Şekil 7.3-7.6-7.9-7.12'de yer alan tam faktöryel deney tasarımı etkileşim grafiklerinde, ME-SKS faktörleri arasındaki etkileşimler incelenecek olursa, ME faktörünün düzeyi arttıkça, SKS performans doğrusu eğiminin azaldığı gözlenmektedir. Bu değerlendirme de makine esnekliği arttıkça sıralama kuralı sayısının performans üzerindeki etkisinin azaldığını göstermektedir. ANOVA sonuçlarına göre, faktörler arasındaki ikili etkileşimlerin performans üzerindeki etkileri istatistiksel olarak anlamlı

olmamakla birlikte, etkileşim grafikleri sonuçlar üzerinde değerlendirme yapılmasına imkan tanımaktadır.

Bu bölümde gerçekleştirilen analizler, etkileşim grafiklerinden elde edilen sonuçlar ile aynı yöndedir. Makine esnekliği arttıkça, çizelgeleme sisteminin performansının sıralama kuralına bağımlılığı azalmaktadır.

7.5 LİTERATÜR PROBLEMLERİNİN ÇÖZÜMÜ

Esnek atölye çizelgeleme ile ilgili literatürde yer alan test problemleri, proses plan esnekliğini içermemektedirler. Bununla birlikte, geliştirilen çözüm yönteminin etkinliğini ortaya koyabilmek amacıyla, esnek atölye çizelgeleme problemlerine Pareto temelli çok objektifli bir çözüm yaklaşımı geliştiren Kacem, Hammadi ve Borne (2002a, 2002b)'un çalışmalarında kullandıkları 4 test problemi çözülmüştür. Test problemlerinin verileri Kacem, Hammadi ve Borne (2002c)'den alınmıştır.

Bu çalışmada geliştirilen yaklaşım ile 4 test probleminin çözümün sonucunda elde edilen Pareto optimal çözümler, Kacem, Hammadi ve Borne (2002a, 2002b)'un çalışmalarında elde ettikleri Pareto optimal çözümler ve alt sınırları ile birlikte sunulmuştur.

Çözüm sürecinde, program parametreleri ve düzeyleri Tablo 7.27'deki gibi belirlenmiştir.

Tablo 7.27 Çözüm Parametreleri ve Düzeyleri

Parametre	Düzye
Tabu listesi uzunluğu	15
Komşu çözüm sayısı	30
Çözüm dizisinde proses plan değışikliğı %	20
Çözüm dizisinde makine alternatifi değışikliğı %	20
Çözüm dizisinde sıralama kuralı değışikliğı %	20
İterasyon Sayısı	500
Sıralama Kuralı Sayısı	10

Objektifler:

- Tamamlanma zamanı,
- En büyük makine yükü,
- Toplam makine yükü

fonksiyonlarının en küçüklenmesi olarak belirlenmiştir.

Test Problem 1 Pareto Optimal Çözümler:

Test Problem 1'in çözümü sonucunda elde edilen Pareto optimal çözümler Tablo 7.28'de görülmektedir. Ayrıca Tablo 7.28'de Kacem, Hammadi ve Borne (2002a, 2002b) tarafından elde edilen Pareto optimal çözümler ve alt sınırları da yer almaktadır. DTTAÇOEAĊP 1.0 yazılımı ile bulunan Pareto optimal çözümlerin çizelgeleri Ek-3'te sunulmuştur.

Tablo 7.28 Test Problem 1 Pareto Optimal Çözümler

	Tamamlanma Zamanı	En Büyük Makine Yüğü	Toplam Makine Yüğü
Alt Sınırlar	16	7	32
Kacem	18	8	32
	18	7	33
	16	9	35
	16	10	34
DTTAÇOEAĊP 1.0	16*	8	32*
	16	7*	33

Test Problem 2 Pareto Optimal Çözümler:

Test Problem 2'nin çözümü sonucunda elde edilen Pareto optimal çözümler Tablo 7.29'da görülmektedir. DTTAÇOEAĊP 1.0 ile bulunan Pareto optimal çözümlerin çizelgeleri Ek-3'te sunulmuştur.

Tablo 7.29 Test Problem 2 Pareto Optimal Çözümler

	Tamamlanma Zamanı	En Yüksek Makine Yüğü	Toplam Makine Yüğü
Alt Sınırlar	15	9	60
Kacem	15	11	61
	17	10	64
	18	10	63
	16	10	66
	16	12	60
DTTAÇOEAĊP 1.0	15	10	62
	15*	11	61
	16	12	60*

Test Problem 3 Pareto Optimal Çözümler:

Test Problem 2'nin çözümü sonucunda elde edilen Pareto optimal çözümler Tablo 7.30'da görölmektedir. DTTAÇOEAĊP 1.0 ile bulunan Pareto optimal çözümlerin çizelgeleri Ek-3'te sunulmuştur.

Tablo 7.30 Test Problem 3 Pareto Optimal Çözümler

	Tamamlanma Zamanı	En Yüksek Makine Yüğü	Toplam Makine Yüğü
Alt Sınırlar	23	10	91
Kacem	23	11	95
	24	11	91
DTTAÇOEAĊP 1.0	23	12	92
	25	10*	95
	23*	13	91*
	23	11	93

Test Problem 4 Pareto Optimal Çözümler:

Test Problem 2'nin çözümü sonucunda elde edilen Pareto optimal çözümler Tablo 7.31'de görülmektedir. DTTAÇOEACP 1.0 ile bulunan Pareto optimal çözümlerin çizelgeleri Ek-3'te sunulmuştur.

Tablo 7.31 Test Problem 4 Pareto Optimal Çözümler

	Tamamlanma Zamanı	En Yüksek Makine Yüğü	Toplam Makine Yüğü
Alt Sınırlar	7	5	41
Kacem	8	7	41
	8	5	42
	7	5	45
DTTAÇOEACP 1.0	8	5*	42
	8	7	41*
	7*	7	43
	7	5	44

7.6 SONUÇ

Çalışmanın bu bölümünde, Bağlam Bağımsız Gramer'ler ile modellenen esnek atölye çizelgeleme probleminin çözümü için Baykasoğlu, Owen ve Gindy (1999a, 1999b) tarafından geliştirilen çok objektifli tabu arama yaklaşımına dayalı DTTAÇOEACP 1.0 yazılımı kullanılarak bazı analizler gerçekleştirilmiştir.

Öncelikle, literatürde çözüm yaklaşımının entegre yapısına uygun test probleminin bulunmamasından dolayı, proses plan esnekliği içeren esnek atölye çizelgeleme problemleri hipotetik olarak türetilmiştir. Çalışmanın ilk kısmında, türetilen 4 test problem grubunda proses plan esneklikleri, makine esneklikleri, Giffler ve Thompson algoritmasında kullanılan sıralama kuralı sayısı ile çok objektifli tabu arama faktörleri farklı düzeylerde ele alınarak, Taguchi deney tasarımı gerçekleştirilmiştir. Taguchi deney tasarımı sonucunda, faktörlerin objektif fonksiyon üzerindeki etkinlik sıralamaları elde edilmiştir. Makine esnekliği, proses plan esnekliği, sıralama kuralı

sayısı ve komşu çözüm sayısı faktörleri 4 problem grubunda da en etkili ilk beş faktör arasında yer almıştır. Belirli sayıda seçilen etkili faktörlerle tam faktöryel deney tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tam faktöryel deney tasarımının analizi sonucunda ana etkiler ve etkileşim grafikleri ile ANOVA birlikte değerlendirilmiştir.

- Tüm test problemlerinde makine esnekliği (ME) performans üzerinde en etkili faktör olarak ortaya çıkmıştır. Test problemlerinin çözümü sonucunda, makine esnekliğinin en yüksek seviyesinde en iyi performansın elde edildiği görülmüştür.
- Tam faktöryel deney tasarımı ana etkiler grafiklerine göre, test problemlerinin tamamında, makine esnekliği orta ve yüksek seviyeleri arasında, performanstaki iyileşme oranı düşüş göstermiştir.
- Çözüm sürecinde kullanılan sıralama kuralı sayısı, performans üzerinde etkili ikinci faktör olarak ortaya çıkmıştır. Sıralama kuralı sayısı faktörünün en yüksek düzeyi (10), tüm problemlerde en iyi performansı sağlamıştır.
- Proses plan esnekliği test problemlerinin performanslarında etkinliği düşük bir faktör olarak ortaya çıkmıştır. Tüm test problemlerinde yüksek proses plan esnekliği en iyi sonucu vermekle birlikte, esneklik düzeyleri arasındaki performans farkları düşüktür.

Çalışmanın ikinci kısmında, sıralama kuralları tek tek ele alınarak, farklı makine esneklik düzeylerinde performans üzerindeki etkilerinin değişimi analiz edilmiştir. Seçilen 5 sıralama kuralının, 4 farklı makine esnekliği düzeyinde performansları kaydedilmiştir. Sıralama kurallarının belirli bir makine esnekliği düzeyinde, performans farkları hesaplanmış ve elde edilen veriler ile makine esnekliği grupları arasında varyans analizi gerçekleştirilmiştir. Üç farklı test problemi için, varyans analizi sonuçları benzer çıkmıştır.

Elde edilen sonuca göre, sıralama kurallarının performans üzerindeki etkileri, makine esneklik düzeyi arttıkça birbirine yaklaşmıştır. Yani düşük makine esnekliği düzeyinde, sıralama kurallarının performansa etkileri arasındaki fark yüksekken, makine esnekliği düzeyi arttıkça sıralama kurallarının performansa etkileri arasındaki fark düşmüştür.

Yani sistem optimal esneklik düzeyinde ise performansın sıralama kuralına bağımlılığı ortadan kalkmaktadır.

Çalışmanın son kısmında ise, literatürde yer alan dört çok objektifli esnek atölye çizelgeleme problemi çözülmüş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.



BÖLÜM 8

8 SONUÇ VE TARTIŞMALAR

8.1 TEZ ÖZETİ

Çalışmanın sonunda, bölümlerin içerikleri kısaca özetlenmiştir.

Bölüm 2’de, tez çalışmasına temel teşkil eden konular ile ilgili genel kuramsal bilgiler verilmiştir. Bu bölümde ilgili konulara yönelik detaylı bir literatür çalışması gerçekleştirilmiştir.

Bölüm 3’te, esnek atölye çizelgeleme probleminin Dil Teorisi ile modelleme yaklaşımı sunulmuştur. Bu bölümde Dil Teorisi ve Bağlam Bağımsız Gramer’ler ile ilgili genel bilgi verilmiş, proses plan esnekliği içeren bir esnek atölye çizelgeleme probleminin modeli oluşturulmuştur.

Bölüm 4’te, esnek atölye çizelgeleme probleminin çözümü için geliştirilen çok objektifli tabu aramaya dayalı optimizasyon yaklaşımı ortaya konulmuştur. Bu bölümde orijinal MOTS algoritması incelenmiş, temel yapısı, işleyişi ve elemanları ile açıklanmıştır. Algoritma, proses plan esnekliği içeren, Bağlam Bağımsız Gramer ile modellenmiş esnek atölye çizelgeleme problemlerinin tüm özelliklerini yansıtacak şekilde yeniden düzenlenmiş ve çözüm yöntemi olarak önerilmiştir. Ortaya konulan çözüm yöntemi, bir örnek esnek atölye çizelgeleme problemi üzerinde aşamalar halinde açıklanmıştır.

Bölüm 5’te, Dil Teorisi ve tabu aramaya dayalı çok objektifli esnek atölye çizelgeleme problemi için geliştirilen yazılım açıklanmıştır. Geliştirilen yazılımın tasarımı, veri yapısı, işleyişi, parametre ve fonksiyonları detaylı bir biçimde sunulmuştur. Programın girdi formatı, işleyişi ve çıktıları bir örnek çözüm üzerinde incelenmiştir.

Bölüm 6’da, atölye çizelgeleme sistemleri için teslim tarihi belirlenmesine ilişkin genetik programlamaya dayalı yeni bir çözüm yaklaşımı önerilmiştir. Bu bölümde, genetik programlama kapsamında yer alan çoklu denklem programlama yöntemi ele alınmış ve bu yöntemin atölye çizelgeleme sistemleri için teslim tarihi belirleme problemlerine çözüm yaklaşımı olarak uyarlanması açıklanmıştır. Teslim tarihi belirlemeye yönelik çoklu denklem programlama yaklaşımının modifikasyonu ile geliştirilen yazılım ortaya konulmuştur. Önerilen yaklaşımın etkinliği farklı yöntemlerle karşılaştırılmıştır. Bölüm sonunda yöntemle ilişkin çeşitli parametreler için deneysel çalışma ve analizlere yer verilmiştir.

Bölüm 7’de, çok objektifli esnek atölye çizelgeleme problemi çözümü için önerilen yöntemin, çeşitli performans kriterlerine göre etkinliğinin değerlendirme ve analizleri yer almıştır. Çok objektifli tabu arama parametrelerinin çözüm kalitesi üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu bölümün sonunda, geliştirilen yöntemin etkinliği literatür problemleri ile karşılaştırılmıştır.

8.2 ÇALIŞMANIN KATKILARI

Bu bölümde, çalışmanın orijinallliği ve bilim dünyasına katkıları ortaya konulmuştur. Çalışmanın her bölümünün sonunda, o bölümde önerilen ve/veya uygulanan yöntemlerin getirdiği yeniliklere yönelik değerlendirmeler yer almaktadır. Bu bölümde, değerlendirmeler ve katkılar tekrar bir arada ele alınmıştır.

Üretim sistemlerinde günümüz rekabet şartlarına bağlı olarak, işletme tepkiselliğini artırabilmek için etkin ve kesin çizelgelemenin önemi bilinmektedir. Üretim teknolojilerindeki hızlı gelişim sonucunda esnek sistemlerin ortaya çıkması ile klasik çizelgeleme yöntemlerinin geçerliliği azalmıştır. Çok amaçlı otomatik makinelerin üretim atölyelerinde yaygın kullanımı ile daha karmaşık yapıda, pek çok farklı esnekliği içerisinde barındıran problemler ortaya çıkmıştır. Esnek atölye çizelgeleme problemi bunlardan birisidir.

Uygulamada, çizelgeleme problemlerinin çoğu çok amaçlıdır. Hatta pek çoğunda bu amaçlar birbirleri ile çelişmektedir. Çalışmada ele alınan problemin, literatüre katkısı ile birlikte, uygulamada ortaya çıkan problemlerin bütün özelliklerini yansıtacak niteliklere

sahip olması amaçlanmıştır. Buna bağlı olarak esnek üretim atölyelerinin çizelgelenmesine yönelik belirlenen problem, çok objektifli olarak ele alınmıştır.

Klasik atölye çizelgeleme problemlerine göre çok daha karmaşık bir yapıya sahip olan esnek atölye çizelgeleme problemleri, operasyonlar için makine esnekliği içermektedir. Yani her bir operasyonun işlem görebileceği alternatif makineleri söz konusudur. Bunun yanı sıra, uygulamada ürün tasarımına, ürün ve üretim sisteminin özelliklerine bağlı olarak, bir parçanın farklı operasyon sıralarında gerçekleştirilmesi mümkün olabilmektedir. Bir parça için proses planında belirli bir operasyon öncelik sırası söz konusu olmakla birlikte, bazı durumlarda proses planındaki operasyonların yerleri değiştirilebilmekte veya bazı operasyonlar birleştirilebilmektedir. Dolayısıyla, iş parçaları için farklı proses plan alternatifleri ortaya çıkmaktadır. Buna bağlı olarak esnek üretim sistemleri için proses plan seçimi problemi de çalışmanın kapsamı içerisine alınmış ve proses planlama ile çizelgeleme bir anlamda entegre edilmiştir.

Belirlenen özelliklerde, karmaşık yapıya sahip esnek atölye çizelgeleme probleminin çözümü için önerilen yöntem ile literatürdeki boşluğun doldurulması amaçlanmıştır. Öncelikle problemin modellenmesi için Dil Teorisi kapsamında yer alan Bağlam Bağımsız Gramer'ler kullanılmıştır. Baykasoğlu (2002)'de esnek atölye çizelgeleme problemi için önerilen modelleme yaklaşımı temel alınmıştır. Bu yaklaşım ile karmaşık esnek atölye çizelgeleme probleminin, kısa ve etkin bir gösterimle modellenmesi sağlanmıştır.

Baykasoğlu (2002)'de benzetimli tavlama algoritması ile çözümü gerçekleştirilen esnek atölye çizelgeleme problemi için çok objektifli tabu arama yöntemi uygulanmıştır. Baykasoğlu, Owen ve Gindy (1999a, 1999b) tarafından literatüre kazandırılan orijinal çok objektifli tabu arama yöntemi, esnek atölye çizelgeleme probleminin yapısına ve özelliklerine uygun hale getirilerek yeni bir çözüm algoritması geliştirilmiştir. Geliştirilen yöntem, esnek atölye çizelgeleme problemi çözüm yöntemleri içerisinde bilinen ilk çok objektifli tabu arama yaklaşımıdır. Yaklaşımın en önemli özelliği, proses plan seçimi, operasyonların uygun makinelere atanması ve bu makinelerde sıralanması problemlerine eş zamanlı olarak çözüm geliştirmesidir.

Esnek atölye çizelgeleme problemine önerilen çözüm yöntemi için C/C++ programlama dili ile etkin veri yapısına sahip bir yazılım (DTTAÇOEAC P 1.0) geliştirilmiştir. Bu yazılım ile, Dil Teorisine dayalı modellenen ve önerilen çok objektifli tabu arama yaklaşımı ile çözümü gerçekleştirilen farklı boyutta esnek atölye çizelgeleme problemleri için deneysel tasarım ve analizler gerçekleştirilmiştir. Bu analizler, esnek atölye çizelgeleme sistemlerine ilişkin önemli bir takım sonuçlara ulaşılmasını sağlamıştır.

Deneysel Tasarım ve Analiz Sonuçları:

Literatürde, önerilen çözüm yaklaşımının entegre yapısına uygun, bütün özelliklerini yansıtacak nitelikte test probleminin bulunmamasından dolayı, proses plan esnekliği içeren çok objektifli esnek atölye çizelgeleme problemleri, geliştirilen bir yazılımla hipotetik olarak türetilmiştir. Oluşturulan 4 test problem grubunda proses plan esneklikleri, makine esneklikleri, Giffler ve Thompson çizelgeleme algoritmasında kullanılan sıralama kuralı sayısı ile çok objektifli tabu arama parametreleri (faktörler) farklı düzeylerde ele alınarak, Taguchi deney tasarımı gerçekleştirilmiştir. Çözüm süreci için gerekli faktörlerin sayısının fazla olması, kabul edilebilir bir süre zarfında tam faktöryel deney tasarımı gerçekleştirmeye uygun olmadığı için Taguchi deney tasarımı ile en etkili faktörlerin belirlenmesi gerekmiştir. Taguchi deney tasarımı sonucunda, faktörlerin farklı düzeylerine göre objektif fonksiyon üzerindeki etkinlik sıralamaları elde edilmiştir. Makine esnekliği, proses plan esnekliği, sıralama kuralı sayısı ve komşu çözüm sayısı faktörleri tüm test problemlerinde en etkili faktörler olarak ortaya çıkmıştır. Bu sonuç, bir üretim atölyesinin performansı üzerinde *esneklik* kavramının etkisini ve önemini ortaya koymuştur. En etkili faktörlerden belirli sayıda seçilen faktörle, tam faktöryel deney tasarımı gerçekleştirilmiştir.

Dört farklı boyutta ele alınan test problem gruplarında, makine esnekliği (ME) performans üzerinde en etkili faktör olarak ortaya çıkmış ve makine esnekliğinin en yüksek seviyesinde en iyi performans elde edilmiştir. Test problemlerinin tamamında, makine esnekliğinin orta ve yüksek seviyeleri arasında, performanstaki iyileşme oranı düşüş göstermiştir. Bu sonuç, çizelgeleme sisteminin özelliklerine bağlı olarak belirli bir makine esneklik seviyesinin uygun olduğunu, bu noktadan sonra makine esnekliğinin performansı çok etkilemediğini ortaya koymuştur.

Esnek atölye çizelgeleme sistemleri için, çizelgelemede kullanılan farklı sıralama kuralı sayısı, performans üzerinde etkili ikinci faktör olarak ortaya çıkmıştır. Sıralama kuralı sayısındaki artışa bağlı olarak performans iyileşmiştir.

Proses plan esnekliği, test problemlerinin performanslarında ilk iki faktöre (ME, SKS) göre etkisi düşük bir faktör olarak ortaya çıkmıştır. Yüksek proses plan esnekliği performans üzerinde iyileştirici bir etki göstermekle birlikte, esneklik düzeyleri arasındaki performans farkları düşüktür.

Esnek atölye çizelgeleme sisteminde ikinci bir analiz ile sıralama kuralları ve makine esnekliği arasındaki ilişki irdelenmiştir. Çizelgeleme için sıralama kuralları tek tek ele alınarak, farklı makine esneklik düzeylerinde performans üzerindeki etkilerinin değişimi incelenmiştir. Belirlenen sıralama kurallarının, farklı makine esnekliği düzeylerinde performansları değerlendirilmiş ve makine esnekliği arttıkça sıralama kuralları arasındaki performans farklılıklarının azaldığı gözlenmiştir. Yani, makine esnekliğinin söz konusu olmadığı durumda sıralama kurallarının performansa etkileri arasındaki fark yüksekken, makine esnekliği yüksek düzeyde iken sıralama kurallarının performansa etkileri yaklaşık olarak eşitlenmiştir. Bu sonuca göre, atölye çizelgeleme sistemi optimal esneklik düzeyinde ise performansın sıralama kuralına bağımlılığı düşüktür.

Deneyisel çalışma ve analizlerin sonunda, proses plan esnekliği içermemesine rağmen kıyaslama yapmak amacıyla Kacem, Hammadi ve Borne (2002) tarafından oluşturulan dört literatür problemi, DTTAÇOEACP 1.0 yazılımı ile çözülmüştür. Geliştirilen çözüm yaklaşımı ile Kacem, Hammadi ve Borne (2002) tarafından ortaya konulan Pareto optimal çözümlerden daha iyi çözümler elde edilmiş ve sadece makine esnekliği içeren esnek atölye çizelgeleme problemlerinin çözümünde de yöntemin etkinliği ortaya konulmuştur.

8.3 İLERİYE YÖNELİK ÖNERİLER

Esnek atölye çizelgeleme problemleri ve modern sezgisel optimizasyon teknikleri, araştırmacıların üzerinde odaklandıkları, hala çözülmeyi bekleyen pek çok problemi içerisinde barındıran iki konudur. Bu amaçla, çalışmada ele alınan konularla ilgili ileriye yönelik bir takım önerilerde bulunulacaktır.

Bu çalışmada, temel alınan çok objektifli tabu arama yaklaşımı, esnek atölye çizelgeleme problemine uyarlanarak, bir çözüm algoritması önerilmiştir. Algoritmanın performansını etkileyen bir takım faktörler söz konusudur. Bunlardan en önemlileri, başlangıç çözümü belirleme, komşu çözüm türetme, yayılım ve yoğunlaşma stratejileridir.

Çalışmada başlangıç çözümünün belirlenmesi, proses planlar için rasgele, operasyonların makine alternatifleri için ise işlem sürelerine bağlı olasılıklı olarak gerçekleştirilmiştir. Ancak ileriki çalışmalarda, farklı başlangıç çözüm stratejileri geliştirilerek, algoritmanın performansı üzerindeki etkileri değerlendirilebilir. Özellikle proses plan alternatiflerinin belirlenmesine ilişkin, maliyetlere dayalı seçim stratejileri oluşturulabilir. Operasyonların makine alternatiflerinin belirlenmesine yönelik farklı atama yaklaşımları ele alınarak değerlendirilebilir.

Tabu arama algoritmasının performansını etkileyen bir diğer önemli faktör ise, komşuluk belirleme stratejileridir. Çalışmada, ele alınan kök çözüm dizisinde rasgele belirlenen pozisyonlarda değişiklikler gerçekleştirilerek komşu çözümler elde edilmiştir. Bu noktada, çözüm dizisinde değişiklik yapılacak pozisyonların ve bu pozisyonlardaki dizi elemanı değişikliklerinin belirlenmesine ilişkin, çözüm kalitesini artıracak farklı yaklaşımlar geliştirilebilir. Yine buna bağlı olarak, uygun yayılım ve yoğunlaşma stratejileri oluşturulabilir.

Çalışmada ele alınan Pareto optimizasyona bağlı çok objektifli yaklaşım, farklı bir çok objektifli optimizasyon tekniği ile değiştirilerek, mevcut yaklaşımla kıyaslamalar yapılabilir.

Çok objektifli tabu aramaya dayalı geliştirilen çizelgeleme yöntemi yeniden çizelgeleme problemlerini de çözecek şekilde daha da genelleştirilebilir. Çalışmada geliştirilen çizelgeleme yöntemi ile proses planlama ve çizelgeleme bir ölçüde entegre edilmiştir. Proses planlama maliyetleri, hazırlık süreleri gibi konular da modele eklenerek tam bir entegrasyon sağlanabilir. Ayrıca geliştirilen yöntem tam zamanlı çizelgeleme uygulamalarında kullanılabilecek şekilde uyarlanabilir.

Çalışmanın 6. Bölümü'nde, atölye çizelgeleme sistemleri için teslim tarihi belirlemeye yönelik yeni bir çözüm yaklaşımı olarak genetik programlama önerilmiştir. Teslim tarihi belirleme problemleri için önerilen, genetik programlama kapsamında yer alan çoklu denklem programlama yaklaşımının, gerçekleştirilen yapay sinir ağları ve regresyon analizi karşılaştırmaları sonucunda etkinliği ortaya konulmuştur. Üretim problemlerinin optimizasyonunda henüz çok fazla uygulanmamış olan genetik programlama yaklaşımı için bu alanda ileriye yönelik umut vadeden önemli sonuçlar elde edilmiştir. Bu sonuçlara bağlı olarak, genetik programlamanın değişken uzunluktaki kromozom yapısı, farklı fonksiyon ve terminal kümeleri ile üretim problemlerinin çözümünde uygulanmasına yönelik yeni çalışmalar gerçekleştirilebilir.

Çalışmada teslim tarihi belirlemeye yönelik, genetik programlama yaklaşımlarından Oltean ve Dumitrescu (2002) tarafından ortaya konulmuş yeni bir yöntem olan çoklu denklem programlama uygulanmıştır. Literatürde bu yöntemin yanı sıra, farklı genetik programlama yaklaşımları yer almaktadır. Teslim tarihi belirleme problemleri için bu farklı genetik programlama yaklaşımları ele alınarak mevcut çalışma ile kıyaslamalar yapılabilir. Ayrıca, çoklu denklem programlamada algoritma parametreleri ve düzeyleri deneysel tasarım ve diğer yöntemlerle karşılaştırmalar için sezgisel olarak belirlenmiştir. İleriye yönelik olarak bu parametrelerin problem yapısına uygun optimizasyonuna ilişkin çalışmalar planlanabilir. Geliştirilen teslim tarihi belirleme modeli, gerçek zamanlı veya gerçek zamanlı olmayan benzetim modellerine entegre edilerek performansı daha da arttırılabilir.

Bu çalışmada, günümüz üretim sistemlerinin özelliklerine uygun esnek atölye çizelgeleme problemi ele alınmıştır. Problemin modellenmesi, analizi ve çözümünde farklı disiplinlerden Dil Teorisi, Tabu Arama, Çoklu Denklem Programlama yaklaşımları uygulanmıştır. Çalışmada, esnek atölye çizelgeleme probleminin çözümü ile eşzamanlı olarak proses plan seçimi de gerçekleştirilmiştir. Önerilen çözüm yöntemleri ile elde edilen sonuçların, bilim dünyasında diğer çalışmalara ışık tutacak katkılar sağlaması ve literatürde yeni bir yaklaşım olarak bir boşluğu doldurması amaçlanmıştır.

KAYNAKÇA

Aardal, K.; S. Hoesel; J.K. Lenstra et. Al.; "A Decade of Combinatorial Optimization", Research Paper, Utrecht University, No. RM97023, 1997, pp.1-10.

Aarts, E.; J.K. Lenstra; Local Search in Combinatorial Optimization, John Wiley and Sons, Chichester 1997.

Adams, J.; E. Balas; D. Zawack; "The Shifting Bottleneck Procedure for the Job Shop Scheduling", Management Science, Vol.34, 1988, pp.391-401.

Al-Fawzan, M.A.; K.S. Al-Sultan; "A Tabu Search Algorithm for Minimizing the Makespan in a Job Shop Scheduling" (Proceedings of the 5th Industrial Engineering Research Conference, 1996, Minneapolis), pp. 115-119.

Applegate, D.; W. Cook; "A Computational Study of the Job-Shop Scheduling Instance", ORSA Journal on Computing, Vol. 3, 1991, pp.149-156.

Baker K.R.; Elements of Sequencing and Scheduling, Dartmouth College, Hannover, 1994.

Baker, K.; Introduction to Sequencing and Scheduling", Wiley, New York 1974.

Baker, K.R.; "Sequencing Rules and Due-Date Assignment Rules in a Job Shop", Management Science, Vol. 30, Issue 9, 1984, pp. 349-360.

Banzhaf, W.; P. Nordin; R.E. Keller et Al; "Genetic Programming: An Introduction", Morgan Kaufman Inc., San Francisco, 1998.

Barnes, J.W.; J.B. Chambers; "Solving the Job Shop Scheduling Problem Using Tabu Search", IIE Transactions, Vol. 27, 1995, pp. 257-263.

Barnes, J.W.; M. Laguna; "A Tabu search Experience in Production Scheduling", *Annals of Operations Research*, Vol. 41, 1993, pp.141-156.

Baykasoğlu, A.; "Çok Objektifli Üretim Planlaması Problemlerinin Çok Objektifli Tabu Tarama Yöntemi ile Çözümü", (3. GAP Mühendislik Kongresi, 24-26 Mayıs 2000, Şanlıurfa, Türkiye), s. 181-189.

Baykasoğlu, A.; "Design-Optimization of Mechanical Components Using the Multiple Objective Tabu Search Method", *Mathematical & Computational Applications*, Vol. 8, Issue 1, 2003, pp. 35-47.

Baykasoğlu, A.; "Goal Programming Using the Multiple Objective Tabu Search", *Journal of Operational Research Society*, Vol. 52, Issue 12, 2001a, pp. 1359-1369.

Baykasoğlu, A.; "Linguistic Based Meta-Heuristic Optimisation Model for Flexible Job Shop Scheduling", *International Journal of Production Research*, Vol. 40, Issue 17, 2002, pp. 4523-4543.

Baykasoğlu, A.; "MOAPPS 1.0: Aggregate Production Planning Using the Multiple Objective Tabu Search", *International Journal of Production Research*, Vol. 39, Issue 16, 2001b, pp. 3685-3702.

Baykasoğlu, A.; L. Özbakır; "Çizelgeleme Problemleri için Teslim Tarihi Belirlemede Bir Çözüm Tekniği Olarak Genetik Programlama", (III. Ulusal Üretim Araştırmaları Sempozyumu, 19-20 Nisan 2003, İstanbul), ss.155-162.

Baykasoğlu, A.; L. Özbakır; T. Dereli; "Multiple Dispatching Rule Based Heuristic for Multi-Objective Scheduling of Job Shops Using Tabu Search", (Proceedings of MIM 2002 : 5th International Conference on Managing Innovations in Manufacturing (MIM) 9-11 September 2002, Milwaukee, Wisconsin, USA), pp.396-402.

Baykasoğlu, A.; L. Özbakır; A.İ. Sönmez; "Determining Optimal Due Dates in Earliness-Tardiness Flexible Job Shop Scheduling", (Proceedings of 2nd International Conference on Responsive Manufacturing, 26-28 June 2002a, Gaziantep, Turkey), pp.775-781.

Baykasoğlu, A.; L. Özbakır; A.İ. Sönmez; “A Multiple Objective Tabu Search Approach to Solve Flexible Job Shop Scheduling Problems by Employing Grammars”, (Proceedings of 2nd International Conference on Responsive Manufacturing, 26-28 June 2002b, Gaziantep, Turkey), pp.789-795.

Baykasoğlu, A.; L. Özbakır; A.İ. Sönmez; “Dil Teorisi ve Tabu Arama Yaklaşımı ile Esnek Çok Objektifli Atölye Çizelgeleme Problemlerinin Modellenmesi ve Çözümü”, (Yöneylem Araştırması ve Endüstri Mühendisliği XXIII. Ulusal Kongresi, 3-5 Temmuz 2002c, İstanbul), pp.52.

Baykasoğlu, A.; N.N.Z. Gindy; “Loading Flexible Cells: Tabu Search Based Simulation Optimization Approach” (15th International Conference on Production Research, 1999, University of Limerick, Ireland), Vol. 2, pp. 1441-1444.

Baykasoğlu, A.; N.N.Z. Gindy; “MOCACEF 1.0: Multiple Objective Capability Based Approach to Form Part-Machine Groups for Cellular Manufacturing Applications”, International Journal of Production Research, Vol. 38, Issue.5, 2000, pp. 1133-1161.

Baykasoğlu, A.; S. Owen; N. Gindy; “A Taboo Search Based Approach to Find the Pareto Optimal Set in Multiple Objective Optimisation”, Journal of Engineering optimization, Vol. 31, 1999a, pp. 731-748.

Baykasoğlu, A.; S. Owen; N. Gindy; “Solution of Goal Programming Models Using A Basic Taboo Search Algorithm”, Journal of Operational Research Society, Vol. 50, 1999b, pp. 960-973.

Baykasoğlu, A.; S.M. Saad; N. Gindy; “A Loading Approach For Cellular Manufacturing Systems” (FAIM'1998: 8th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing, 1998, Portland, Oregon), pp. 215-226.

Ben Abdelaziz, F.; S. Krichen; A Tabu Search Heuristic for Multiple Objective Knapsack Problems, Ructor Research Report, 1997, pp. 28-97.

Ben-Daya, M.; "Solution Methodologies for Scheduling Problems in Flexible Manufacturing Systems", *Int. Journal of Manufacturing System Design*, Vol.1, No.4, 1994, pp.315-328.

Bierwirth, C.; "A Generalized Permutation Approach to Job Shop Scheduling with Genetic Algorithms", *OR Spektrum*, Vol. 17, 1995, pp.87-92.

Blackstone, J.H.; D.T. Phillips; G.L. Hogg; "A State-Of-The-Art Survey Of Dispatching Rules for Manufacturing Job Shop Operations", *International Journal of Production Research*, Vol. 20, Issue 1, 1982, pp. 27-45.

Brandimarte, P.; "Routing And Scheduling in a Flexible Job Shop By Tabu Search", *Annals of Operations Research*, Vol. 22, 1993, pp. 158-183.

Brandimarte, P.; "Exploiting Process Plan Flexibility in Production Scheduling: A Multi-objective Approach", *European Journal of Operational Research*, No.114, 1999, pp.59-71.

Browne, J.; D. Dubois; K. Rathmill et. Al.; "Classification of Flexible Manufacturing Systems", *FMS Mag.*, April 1984, pp.114-117.

Brucker, P.; J. Neyer; "Tabu Search for the Multi-Mode Job-Shop Problem", *Operations Research Spektrum*, Vol.20, 1997, pp.21-28.

Brucker, P.; *Scheduling Algorithms*, Springer – Verlag, Berlin, 1995.

Brucker, P., A. Kramer; "Shop Scheduling Problem with Multiprocessor Tasks and Dedicated Processors", *Annals of Operations Research: Mathematics of Industrial Systems I*, Vol. 20, 1995, pp.13-27.

Carmichael, D.G.; "Computation of Pareto Optima in Structural Design", *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 15, 1980, pp. 925-952.

Chambers, J.B.; Classical and Flexible Job Shop Scheduling by Tabu Search, PhD Thesis, Operations Research and Industrial Engineering, The University of Texas, Austin, 1996.

Chambers, J.B.; J.W. Barnes; "Reactive Search for Flexible Job Shop Scheduling", Technical Report Series ORP98-04, Graduate Program in Operations Research and Industrial Engineering, The University of Texas, Austin, 1998.

Chambers, J.B.; J.W. Barnes; "Tabu Search for the Flexible-Routing Job Shop Problem", Technical Report Series ORP96-10, Graduate Program in Operations Research and Industrial Engineering, The University of Texas, Austin, 1996a.

Chambers, J.B.; J.W. Barnes; New Tabu Search Results for the Job Shop Scheduling Problem, Technical Report Series ORP96-06, Graduate Program in Operations Research and Industrial Engineering, The University of Texas, Austin, 1996b.

Chan, F.T.S.; "The Effects of Scheduling Flexibility on the Performance of a Flexible Manufacturing System", Proc. Instn. Mech. Engrs., Vol.217 Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2003, pp.899-918.

Chang, F.R.; "A Study of Factors Affecting Due-date Predictability in A Simulated Dynamic Job Shop", Journal of Manufacturing Systems, Vol.13, Issue 6, 1997, pp.393-400.

Chang, Y.L.; T. Sueyoshi; R.S. Sullivan; "Ranking Dispatching Rules by Data Envelopment Analysis in A Job Shop Environment", IIE Transactions, Vol. 28, Issue 8, 1996, pp.631-642.

Charnes, A.; W.W. Cooper; "Goal Programming and Multiple Objective Optimization", European Journal of Operations Research, Vol. 1, 1977, pp. 39-54.

Charnes, A.; W.W. Cooper; R.O. Ferguson; "Optimal Estimation of Executive Compensation by Linear Programming", Management Science, Vol. 1, 1955, pp. 138-151.

Chatterjee, Sangit; Matthew Laudato; "Statistical Applications of Neural Networks" , Working Paper, Northeastern University, Boston, Massachusetts, 1995, pp.1-21.

Chen, H.; J. Ihlow; C. Lehmann; " A Genetic Algorithm for Flexible Job-Shop Scheduling" (Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Robotics & Automation, Detroit, michigan, 1999), pp.1120-1125.

Cheng, R.; M. Gen; Y. Tsujimura; "A Tutorial Survey of Job Shop Scheduling Problems Using Genetic Algorithms-I Representation", Computers & Industrial Engineering, Vol. 30, Issue 4, 1996, pp. 983-997.

Coello Coello, C.A.; D.A. Van Veldhuizen; G.B. Lamont; Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems, Kluwer Academic Publishers, Boston, 2002.

Coloni, A.; M. Dorigo; F. Maffioli et Al; "Heuristics From Nature for Hard Combinatorial Optimization Problems", Int. Trans. Opr. Res., Vol.3, No.1, 1996, pp.1-21.

Coloni, A.; M. Dorigo; V. Maniezzo et Al; "Ant-System for Job Shop Scheduling", Belgian Journal of Operations Research, Statistics and Computer Science, Vol. 34, Issue 1, 1994, pp.39-54.

Czyzak, P.; A. Jaskiewicz; "Pareto-Simulated Annealing – A Meta Heuristic Technique for Multiple Objective Combinatorial Optimization", Journal of Multi-Criteria Decision Analysis, Vol. 7, Issue 1, 1998, pp. 34-47.

Daly, L. E.; G. J. Bourke; J. McGilvray; Interpretation and Uses of Medical Statistics, Blackwell Scientific Publications, Oxford, 1991.

Dauzere-Peres, S.; J. Paulli; "An Integrated Approach for Modeling and Solving the General Multiprocessor Job-Shop Scheduling Problem Using Tabu Search", Annals of Operations Research, Vol. 70, 1997, pp. 281-306.

Davis, L.; "Job-Shop Scheduling With Genetic Algorithms." (The Proceedings of the International Conference on GAs, Lawrence Erlbaum, Hillsdale, 1985), pp.136-140.

De Veaux, R.; L.H. Ungar; "Brief Introduction to Neural Networks" , Data Mining Group, Department of Computer and Information Science, University of Pennsylvania, Unpublished, 1997, pp. 1-28.

Dell'Amico, M.; M. Trubian; "Applying Tabu Search to the Job Shop Scheduling Problem", Annals of Operations Research, Vol. 41, 1993, pp. 231-252.

Dereli, T.; A. Baykasoglu; "The Use Of Artificial Intelligence Techniques in Design and Manufacturing: A Review", Gazi University Journal of Polytechnic, Vol. 3, Issue 2, 2000, pp. 27-60.

Dimopoulos, C.; A. M. S. Zalzal; "Evolving Scheduling Policies through a Genetic Programming", (Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference, GECCO-99, 1999a, Florida, USA), pp. 1231-1232.

Dimopoulos, C.; A.M.S. Zalzal; "Investigating the Use of Genetic Programming for A Classic One – Machine Scheduling Problem", Advances in Engineering Software, Vol. 32, 2001, pp. 489-498.

Dimopoulos, C.; A.M.S. Zalzal; "Recent Developments in Evolutionary Computation for Manufacturing Optimisation: Problems, Solutions and Comparisons", IEEE Trans. Evol. Comp., Vol. 4, No. 2, 2000, pp.93-113.

Dimopoulos, C.; A.M.S. Zalzal; "A Genetic Programming Heuristic for the One Machine Total Tardiness Problem", (Proceedings of the Congress on Evolutionary Computation (CEC'99)), Vol.3, New York:IEEE Press, 1999b, pp.2207-2214.

Dimopoulos, C.; N. Mort; "A Hierarchical Clustering Methodology Based on Genetic Programming for the Solution of Simple Cell-formation Problems", International Journal of Production Research, Vol.39, No.1, 2001, pp.1-19.

Dorndorf, U., E. Pesch; "Evolution Based Learning in A Job Shop Scheduling Environment", Complex Systems, Vol. 22, 1995, pp. 25-40.

Duguay, C.R.; S. Landry; F. Pasin; "From Mass Production to Flexible/Agile Production", *International Journal of Operations & Production Management*, Vol.7, No.12, 1997, pp. 1183-1195.

El Maqrini, H.; J. Teghem; "Scheduling Complex Flexible Job Shop Problems" (Proceedings of ETFA'95, INRIA/IEEE, 1995), pp.541-549.

Falkenauer, E.; S. Bouffouix; "A Genetic Algorithm for the Job Shop" (Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1991, California), pp. 824-829.

Ferreira, C.; "Gene Expression Programming : A New Adaptive Algorithm for Solving Problems", *Complex Systems*, Vol.13, Issue 2, 2001, pp.87-129.

Fonseca, C.; P.J. Fleming; "Genetic Algorithms for Multiobjective Optimization: Formulation, Discussion and Generalization" (The Fifth International Conference on Genetic Algorithms), Morgan Kaufmann Publishers, 1993, pp. 416-423.

Fox, M.S.; N. Sadeh; "Why is Scheduling Difficult? A CSP Perspective", (ECAI-90 Proceedings of the 9th European Conference on Artificial Intelligence August 6-10 1990, Stockholm, Sweden), pp.754-767.

Fraser, A.P.; "Genetic Programming in C++", Cybernetics Research Institute Technical Report 040, University of Salford, Manchester, 1994.

Gandibleux, X.; A. Freville; "Tabu Search Based Procedure for Solving the 0-1 Multiobjective Knapsack Problem: The Two Objective Case1", *Journal of Heuristics*, Vol. 6, 2000, pp. 361-383.

Gandibleux, X.; N. Mezdaoui; A. Freville; A Multiobjective Tabu Search Procedure to Solve Combinatorial Optimization Problems, *Lecture Notes, Advances in Multiple Objective and Goal Programming in Economics and Mathematical Systems*, 455, Springer-Verlag, 1997, pp. 291-300.

Giffler, B.; G. Thompson; "Algorithms for Solving Production Scheduling Problems", Operations Research, Vol. 8, 1960, pp. 487-503.

Glover, F.; "Future Paths for Integer Programming and Links to Artificial Intelligence", Computers and Operations Research, Vol. 13, 1986, pp. 533-549.

Glover, F.; "Heuristics for Integer Programming Using Surrogate Constraints", Decision Sciences, Vol. 8, 1977, pp. 156-166.

Glover, F.; "Tabu Search – Part-II", ORSA Journal on Computing, Vol. 2, Issue 1, 1990, pp. 4-32.

Glover, F.; E. Taillard; D. De Werra; "A User's Guide to Tabu Search", Annals of Operations Research, Vol. 41, 1993, pp. 3-28.

Glover, F.; H.J. Greenberg; "New Approaches for Heuristic Search: A Bilateral Linkage with Artificial Intelligence", European Journal of Operations Research, Vol. 39, Issue 2, 1989, pp. 119-130.

Glover, F.; M. Laguna; Tabu Search, Kluwer Academic Publishers, Norwell, MA 1997.

Goldberg, D.E.; Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning, Addison-Wesley Longman, Inc., 1989.

Gordon, V.; J. M . Proth; C. Chu; "A Survey of the State-of-the-Art of Common Due Date Assignment and Scheduling Research", European Journal of Operational Research, 139, 2002, pp. 1–25.

Graham, J.H.; G.N. Saridis; "Linguistic Decision Structures For Hierarchical Systems", IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Vol.12, No.3, 1982, pp. 325-333.

Hansen, M.; "Tabu Search for Multiobjective Optimization : MOTS", (13th MCDM Conference, January 6-10 1997, Cape Town, South Africa).

- Hansen, M.P.; Meta Heuristics for Multiple Objective Combinatorial Optimization, Working Paper, Institute of Mathematical Modelling Technical University of Denmark, IMM-REP-1998-7, 1998, pp. 1-44.
- Hara, H.; "Job Shop Scheduling by Minimal Conflict Search", Japanese Artificial Intelligence Society, Vol. 10, Issue 1, 1995, pp. 88-93.
- Hobbs, B.F.; "A Comparison of Weighting Methods in Power Plan Siting", Decision Sciences, Vol. 11, 1980, pp. 725-737.
- Holland, J.H.; Adaptation in Natural and Artificial Systems, University of Michigan Press, 1975 (Second edition: MIT Press, 1992).
- Holthaus, O.; "Design of Efficient JobShop Scheduling Rules", Computers & Industrial Engineering, Vol. 33, No.1-2, 1997, pp. 249-252.
- Holthaus, O.; C. Rajendran; "New Dispatching Rules for Scheduling in a Job Shop- An Experimental Study", Int. Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 13, No.2, 1997, pp. 148-153.
- Hopcroft, J.E.; J.D Ullman; Introduction to Automata Theory, Languages and Computation, Addison-Wesley Pub., 1979.
- Horn, J.; N. Nafpliotis; D.E. Goldberg; "A Niche Pareto Genetic Algorithm for Multiobjective Optimization" (Proceedings of the First IEEE Conference on Evolutionary Computation, 1994), Vol.1, pp. 82-87.
- Hurink, J.; B. Jurisch; M. Thole; "Tabu Search for the Job-Shop Scheduling Problem with Multi-Purpose Machines", OR Spektrum, Vol.15, 1994, pp. 205-215.
- Hwang, C.L.; A.S. Masud; Multiple Objective Decision Making, Methods and Applications: A State of the Art Survey, Lecture Notes, Economics and Mathematical Systems, 164, Springer-Verlag, Berlin, 1979.

Hwang, C.L.; K.P. Yoon; *Multiple Attribute Decision Making Methods and Applications: A State of the Art Survey*, Lecture Notes, Economics and Mathematical Systems, 186, Springer - Verlag, Berlin, 1981.

İslam, A.; M. Ekşioğlu; "A Tabu Search Approach for the Single Machine Mean Tardiness Problem", *Journal of Operational Research Society*, Vol.48, 1997, pp.751-755.

Jain, A.S.; S. Meeran; *A State of the Art Review of Job Shop Scheduling Techniques*, Technical Report, Department of Applied Physics, 1998, pp.1-48.

Jansen, K.; M. Mastrolilli; R. Solis-Oba; "Approximation Algorithms For Flexible Job Shop Problems" (*LATIN'2000: Proceedings of Latin American Theoretical Informatics*, 2000), pp. 68-77.

Jaszkiewicz, A.; *Multiple Objective Metaheuristic Algorithms for Combinatorial Optimization*, Habilitation Thesis, Poznan University of Technology, 2001.

Jones, A.; J.C. Rabelo; "Survey of Job Shop Scheduling Techniques", Technical Report, NISTIR: National Institute of Standards and Technology, 1998.

Jones, D.F.; S.K. Mirrazavi; M. Tamiz; "Multi-Objective Meta-Heuristics: An Overview of the Current State-of-the-Art", *European Journal of Operational Research*, Vol. 137, 2002, pp. 1-9.

Joshi, S.B.; E.G. Mettala; R.A. Wysk; "CIMGEN-A Computer Aided Software Engineering Tool For Development Of FMS Control Software", *IEE Transactions*, Vol. 24, No. 3, 1992, pp. 84-97.

Kacem, I.; S. Hammadi; P. Borne; "Approach by Localization and Multiobjective Evolutionary Optimization for Flexible Job-Shop Scheduling Problems", *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics-Part C: Applications and Reviews*, Vol. 32, Issue 1, 2002b, pp.1-13.

Kacem, I.; S. Hammadi; P. Borne; "Flexible Job Shop Scheduling Problem and Controlled Evolutionary Approach : Some Results", 2002c, <http://www.ec-lille.fr/~kacem/testsPareto.pdf>.

Kacem, I.; S. Hammadi; P. Borne; "Pareto-Optimality Approach for Flexible Job-Shop Scheduling Problems: Hybridization of Evolutionary Algorithms and Fuzzy Logic", Mathematics and Computers in Simulation, Vol. 60, 2002a, pp. 245-276.

Kaighobadi, M.; K.Venkatesh; "Flexible Manufacturing Systems : An Overview", International Journal of Operations & Production Management, Vol.14, No.4, 1994, pp.26-49.

Karacal, S.C.; "A Goal Decomposition Language for Multiple Level Manufacturing Systems", (Proceedings of the 6th Industrial Engineering Research Conference-IERC6, Miami, Florida-USA, May 1997).

Karna, K. N., D. M. Breen; "An Artificial Neural Network Tutorial: Basics", Neural Networks, Vol. 1, Issue 1, 1989, pp.4-23.

Kim, Y.K.; K. Park; J. Ko; "A Symbiotic Evolutionary Algorithm for the Integration of Process Planning and Job Shop Scheduling", Computers & Operations Research, Vol. 30, Issue 8, 2003, pp. 1151-1171.

Kirkpatrick, S.; C.D. Gellad; M.P. Vecchi; "Optimization by Simulated Annealing", Science, Vol. 220, 1983, pp. 671-680.

Kobayashi, S.; I. Ono; M. Yamamura; "An Efficient Genetic Algorithm for Job Shop Scheduling Problems" (Proceedings of the Sixth International Conference on Genetic Algorithms, 1995, San Fransisco), Morgan Kaufmann Publishers, pp. 506-511.

Kolonko, M.; "Some New Results on Simulated Annealing Applied to the Job Shop Scheduling Problem", European Journal of Operational Research, Vol. 3, 1998, pp. 123-136.

Koza, J.R.; "Evolution of Emergent Cooperative Behavior Using Genetic Programming", In Paton Ray (editor), *Computing with Biological Metaphors*, Chapman&Hall, 1994, pp. 280-297.

Koza, J.R.; *Genetic Programming on the Programming of Computers by Means of Natural Selection*, MIT Press, Cambridge 1992.

Krishna, K.; K.Ganeshan; D.J. Ram; "Distributed Simulated Annealing Algorithms for Job Shop Scheduling", *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. 25, Issue 7, 1995, pp. 1102-1109.

Kumar, R.; P. Rockett; "Improved Sampling of the Pareto-Front in Multiobjective Genetic Optimizations by Steady-State Evolution: A Pareto Converging Genetic Algorithm", *Evolutionary Computation*, Vol. 10, Issue 3, 2002, pp. 283-314.

Kusiak, A.; *Intelligent Manufacturing Systems*, Englewood Cliffs, Prentice Hall, New Jersey 1990.

Laarhoven, V.; E. H. L. Aarts; , J. K. Lenstra; "Job Shop Scheduling by Simulated Annealing", *Operations Research*, Vol.40, 1992, pp. 113-125.

Laguna, M.; F.W. Glover; "Bandwidth Packing: A Tabu Search Approach", *Management Science*, Vol. 39, 1993, pp. 492-500.

Laguna, M.; J.W. Barnes; F.W. Glover; "Tabu Search Methods for A Single Machine Scheduling Problem", *Journal of International Manufacturing*, Vol. 2, 1991, pp. 63-74.

Laguna, M.; J.W. Barnes; F.W. Glover; "Intelligent Scheduling with Tabu Search : An Application to Jobs with Linear Delay Penalties and Sequence Dependent Setup Costs and Times", *Journal of Applied Intelligence*, Vol. 3, 1993, pp. 159-172.

Langdon, W.B.; *Genetic Programming and Data Structures: Genetic Programming+Data Structures=Automatic Programming*, The Kluwer International Series In Engineering and Computer Science, 1998.

Lawler, E.L.; J.K. Lenstra; A.H.G. Rinnooy Kan et Al; Sequencing and Scheduling: Algorithms and Complexity, Handbooks in Operations Research and Management Science, Editors: Graves, S.C.; A.H.G. Rinnooy Kan; P.H. Zipkin, Vol. 4, Elsevier, Amsterdam, 1993.

Liu, C.R.; R. Srinivasan; "Generative Process Planning Using Syntactic Pattern Recognition", Computers in Mechanical Engineering, Vol.3, 1984, pp. 63-66.

McCarthy, B.L.; J. Liu; "Addressing the Gap in Scheduling Research: A Review of Optimization and Heuristic Methods in Production Scheduling", International Journal of Production Research, Vol. 31, Issue 1, 1993, pp. 59-79.

Marler, T.; J.S. Arora; Survey of Multi-Objective Optimization Methods for Engineering, Working Report, Optimal Design Laboratory, University of Iowa, 2003, pp. 1-72.

Mastrolilli M.; L.M. Gambardella; "Effective Neighborhood Functions for the Flexible Job Shop Problem: Appendix", 1998, <http://www.idsia.ch/~monaldo/fjsprresults/Text-Data.zip>.

Mastrolilli, M.; L.M. Gambardella; "Effective Neighborhood Functions for the Flexible Job Shop Problem", Journal of Scheduling, Vol. 3, Issue 1, 2000, pp. 3-20.

Mati, Y.; N. Rezg; X. Xie, "An Integrated Greedy Heuristic for A Flexible Job Shop Scheduling" (IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, Tucson, Arizona, USA, 2001), pp.2534-2539.

Matsuo, H.; C.J. Suh; R.S. Sullivan; A Controlled Search Simulated Annealing Method for the General Job Shop Scheduling Problem, Working Paper, University of Texas, 1988.

Maturana, F.; P. Gu; A. Naumann et Al; "Object Oriented Job-Shop Scheduling Using Genetic Algorithms", Computers in Industry, Vol. 32, 1997, pp. 281-294.

Mesghouni, K.; S. Hammadi; P. Borne; "On Modelling Genetic Algorithms for Flexible Job-Shop Scheduling Problems", *Studies in Informatics and Control*, Vol. 7, Issue 1, 1998, pp. 234-247.

Miettinen, K.; 1999, "Nonlinear MultiObjective Optimization", Boston, Kluwer Academic Publishers.

Milacic, V.R.; "Designer-Intelligent Expert System for Intelligent Manufacturing Systems Design", *Robotics & Computer-Integrated Manufacturing*, Vol.11, No.3, 1994, pp.121-136.

Mitchell, M.,1996," An Introduction to Genetic Algorithms", MIT Press, Cambridge Massachusetts.

Morton, T.E.; D.W. Pentico; *Heuristic Scheduling Systems*, John Wiley, New York, 1993.

Murata, T.; H. Ishibuchi; H. Tanka; "Multi-objective Genetic Algorithm and Its Application to Flowshop Scheduling", *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 30, 1996, pp. 957-968.

Nowicki, E.; C. Smutnicki; "A Fast Taboo Search Algorithm for the Job-Shop Problem", *Management Science*, Vol. 42, Issue 6, 1996, pp. 797-813.

Oltean M.; C. Grosan; "Evolving Evolutionary Algorithms Using Multi Expression Programming", (In *Proceedings of the 7th European Conference on Artificial Life (ECAL)*, 2003, Springer Berlin), pp. 651-658.

Oltean, M.; D. Dumitrescu; "Multi Expression Programming", Department of Computer Science Technical Report, Romania, 2002.

Osyczka, A.; "Computer Aided Multicriterion Optimization Method", *Advances in Modeling and Simulation*, Vol. 3, 1985, pp. 41-52.

Pinedo, M.; *Scheduling: Theory, Algorithms and Systems*, Prentice Hall, New-Jersey, 1995.

Pinedo, M.; X. Chao; *Operations Scheduling with Applications in Manufacturing and Services*, Irwin/McGraw-Hill, 1999.

Pollatchek, M.A.; "GP-A C Language Implementation of Genetic Programming", *European Journal of Operational Research* , No.101, 1997, pp. 224-225.

Ragatz, G.; V.A. Mabert; "A Simulation Analysis of Due Date Assignment Rules", *Journal of Operations Management*, Vol.5, Issue 1, 1984, pp. 27-39.

Ratchev, T.M.; N.N.Z. Gindy; "Structure and Capability Description of Machine Tools: A Linguistic Approach", (Proceedings of the 29th International MATADOR Conference, Manchester, UK., 1992), pp. 57-63.

Reeves, C.R.; *Modern Heuristic Techniques for Combinatorial Problems*, McGraw-Hill, Berkshire UK, 1995.

Ross, P.J.; *Taguchi Techniques for Quality Engineering*, McGraw-Hill, New York, 1996, Second Ed.

Sarle, W. S.; "Neural Networks and Statistical Models", (Proceedings of the Nineteenth Annual SAS Users Group International Conference, April 1994), pp.1-13.

Schaffer, J.D.; "Multiple Objective Optimization with Vector Evaluated Genetic Algorithms, Genetic Algorithms and Their Applications" (Proceedings of the First International Conference on Genetic Algorithms, 1985) pp. 93-100.

Scrich, C.R.; V.A. Armentano; M. Laguna; "Tardiness Minimization in a Flexible Job Shop: A Tabu Search Approach", *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol. 15, Issue 1, 2004, pp. 103-115.

Serafini, P.; "Simulated Annealing for Multi Objective Optimization Problems" (Proceedings of the Xth International Conference on MCDM, 1992, Tapei), pp. 87-96.

Serafini, P.; Simulated Annealing for Multiple Objective Optimization Problems, In. Tzeng G.H., Wang H.F., Wen V.P., Yu P.L., Multiple Criteri Decision Making, Expand and Enrich the Domains of Thinking and Application, Springer-Verlag, 1994, pp. 283-292.

Sette, S.; L. Boullart; "Genetic Programming : Principles and Applications", Engineering Applications of Artificial Intelligence, Vol.14, 2001, pp. 727-736.

Silva, L.J.D.; E.K. Burke; "A Tutorial on Multi Objective Meta Heuristics For Scheduling and TimeTabling", Automated Scheduling and Planning Research Group Tutorial, Vol, 2002, pp. 1-39.

Sonmez, A.I.; A. Baykasoğlu, "A New Dynamic Programming Formulation of $(n \times m)$ Flowshop Sequencing Problems with Due Dates", International Journal of Production Research, Vol. 36, 1998, pp. 2269-2283.

Srinivas, N.; K. Deb; "Multiobjective Optimization Using Nondominated Sorting in Genetic Algorithms", Evolutionary Computation, Vol. 2, Issue 3, 1995, pp. 221-248.

Stadler, W.; Initiators of Multicriteria Optimization, Recent Advances and Historical Development of Vector Optimization, Lecture Notes, Economics and Mathematical Systems, Springer-Verlag, 294, 1987, pp. 3-25.

Steuer, R.E.; Multiple Criteria Optimization: Theory, Computation and Application, Krieger Publishing, Malabar, 1989.

Stevenson, J.W.; Production/Operations Management, 5th Edition, Irwin, 1996.

Sun, D. K.; R. Batta; L. Lin; "Effective Job-Shop Scheduling Through Active Chain Manipulation", Computers & Operations Research, Vol. 22, Issue 2, 1995, pp. 159-172.

Suppakitnarm, A.; A. Seffen; G.T. Parks et Al; "A Simulated Annealing Algorithm for Multiobjective Optimisation", Engineering Optimization, Vol. 33, Issue.1, 2000, pp. 59-85.

Taillard, E.; "Parallel Taboo Search Techniques for the Job Shop Scheduling Problem", ORSA Journal on Computing, Vol. 16, Issue 2, 1994, pp. 108-117.

Tamaki, H.; Y. Nishikawa; "A Parallelised Genetic Algorithm Based on Neighbourhood Model and its Application to Job Shop Scheduling" (PPSN'2: Proceedings of the Second International Workshop on Parallel Problem Solving from Nature, 1992, Belgium), pp.573-582.

Tamaki, H.; T. Ono; H. Murao et. Al.; "Modeling and Genetic Solution of A Class of Flexible Job Shop Scheduling Problems" (Proceedings of the 8th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, October 2001), pp. 343-350.

Thomsen, S.; Metaheuristics Combined with Branch&Bound, Technical Report, Copenhagen Business School, Denmark, 1997.

Ulungu, E.L.; J. Teghem; "Multi-objective Combinatorial Optimization Problems: A Survey", Journal of Multi-Criteria Decision Analysis, Vol. 3, 1994, pp. 83-104.

Ulungu, E.L.; J. Teghem; P.H. Fortamps et Al; "MOSA Method: A Tool for Solving Multiobjective Combinatorial Optimization Problems", Journal of Multicriteria Decision Analysis, Vol. 8, 1999, pp.221-236.

Upton, D. M.; M. M. Barash; "A Grammatical Approach to Routing Flexibility in Large Manufacturing Systems", Journal of Manufacturing Systems, Vol.7, Issue 3, 1988, pp. 209-221.

Vaessens, R.J.M.; E.H.L. Aarts; J.K. Lenstra; "Job Shop Scheduling by Local Search", INFORMS Journal on Computing, Vol. 8, 1994, pp. 302-317.

Van Laarhoven, P.J.M.; E.H. Aarts; J.K. Lenstra; "Job Shop Scheduling by Simulated Annealing", Operations Research, Vol. 40, Issue 1, 1992, pp. 113-125.

Van Valduizen, D.A.; G.B. Lamont; "Multiobjective Evolutionary Algorithms: Analyzing the State-of-the-Art", *Evolutionary Computation*, Vol. 8, Issue 2, 2000, pp. 125-147.

Veral, E.; "Computer Simulation of Due-date Setting in Multi Machine Job Shops", *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 41, 2001, pp.77-94.

Viana, A.; J.P. Sousa; "Using Metaheuristics in Multiobjective Resource Constrained Project Scheduling", *European Journal of Operational Research*, Vol. 120, 2000, pp.359-374.

Vig, M.M.; K.J. Dooley; "Dynamic Rules for Due Date Assignment" , *International Journal of Production Research*, Vol. 29, Issue 7, 1991, pp.1361-1377.

Werner, F.; A. Winkler; "Insertion Techniques for the Heuristic Solution of the Job-Shop Problem", *Discrete Applied Mathematics*, Vol. 58, Issue 2, 1995, pp. 191-211.

Wu, H. L.; R., Venugopal; M. M., Barash; "Design of A Cellular Manufacturing System: A Syntactic Pattern Recognition Approach", *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 5, No. 2, 1986, pp. 81-87.

Yamada, T.; B.E. Rosen; R. Nakano; "A Simulated Annealing Approach to Job Shop Scheduling Using Critical Block Transition Operators" (IEEE ICNN'94: International Conference on Neural Networks, 26-29 June 1994, Florida), Vol. 6, pp. 4687-4692.

Yamada, T.; R. Nakano; "A Genetic Algorithm Applicable to Large-Scale Job Shop Problems" (PPSN'2: Proceedings of the Second International Workshop on Parallel Problem Solving from the Nature, 1992, Belgium), pp. 281-290.

Yamada, T.; R. Nakano; "Job Shop Scheduling by Simulated Annealing Combined with Deterministic Local Search" (MIC'95: Meta-heuristics International Conference, July 1995, Colorado), pp. 344-349.

Yamada, T.; R. Nakano; Job Shop Scheduling by Simulated Annealing Combined with Deterministic Local Search, *Meta-heuristics: Theory and Applications*, Kluwer Academic Publishers, USA 1996, pp. 237-248.

Yu, P.L.; "A Class of Solutions for Group Decision Problems", *Management Science*, Vol. 19, 1973, pp. 936-946.

Zadeh, L.A.; "Optimality and Non-Scalar-Valued Performance Criteria", *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 8, 1963, pp. 59-60.

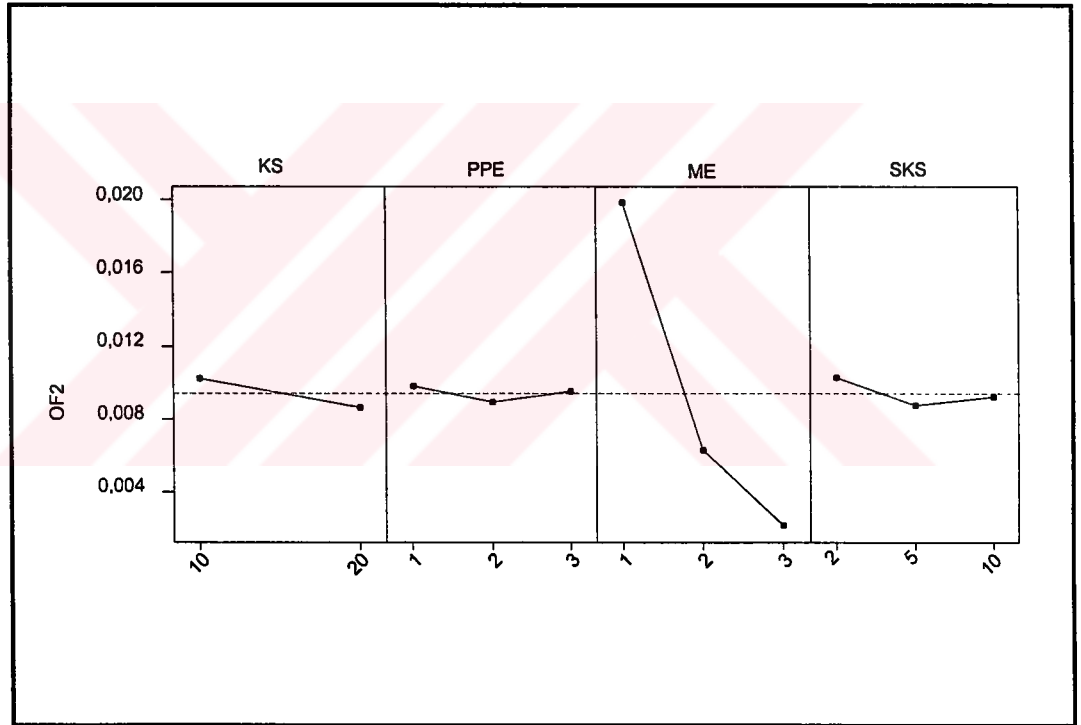
Zhongfang, T.; T. Renzhong; S. Yueming; "Product Modelling: From Geometrical Modeling to Logical Modeling", (7th Symposium on Information Control Problems in Manufacturing Technology, Toronto, Canada, May 25-28, 1992), pp. 484-489.

Zurada, J. M.; *Introduction to Artificial Neural Networks*, West Publishing Company, 1992.

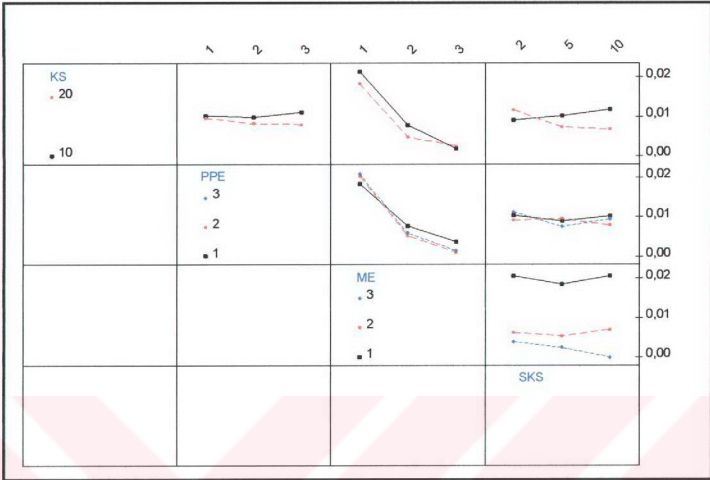
EKLER

EK I BÖLÜM 7 TAM FAKTÖRYEL DENEY TASARIMI GRAFİKLERİ

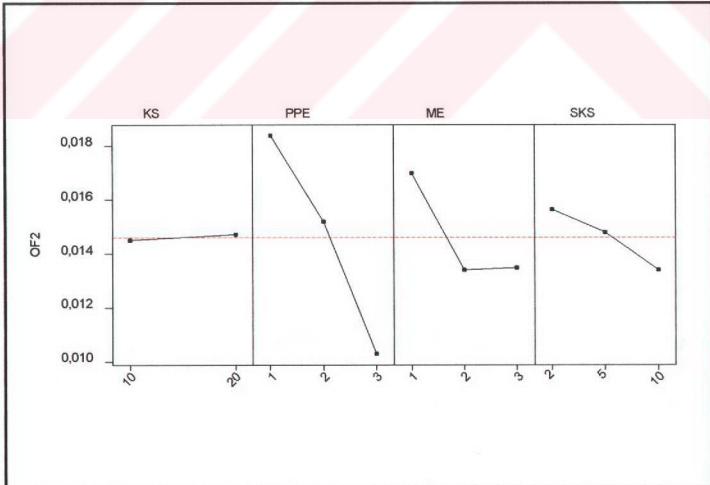
I.1 OBJEKTİF FONKSİYON 2- MAKİNELERİN YÜK DENGESİ



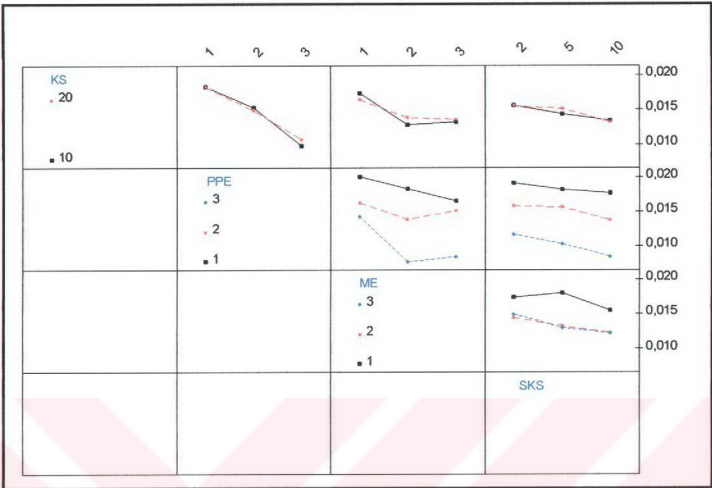
Şekil I.1 5x5 Ana Etkiler Grafiği (OF2)



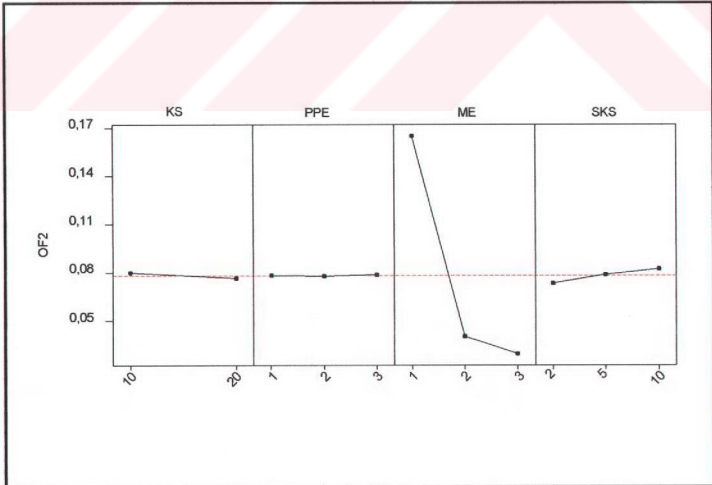
Şekil I.2 5x5 Etkileşim Grafiği (OF2)



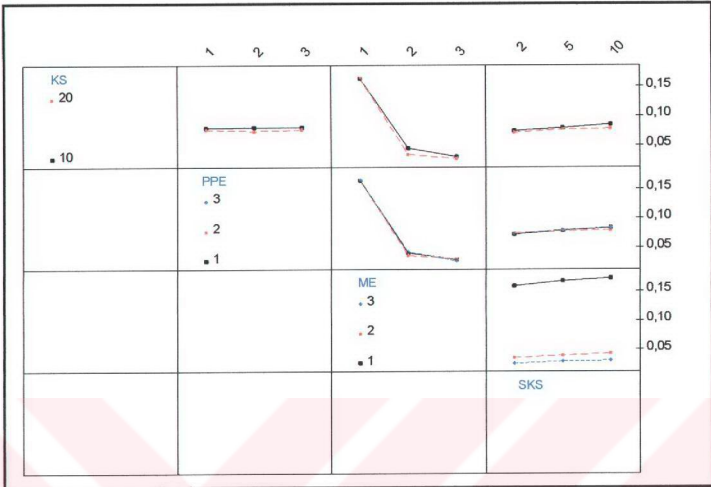
Şekil I.3 20x5 Ana Etkiler Grafiği (OF2)



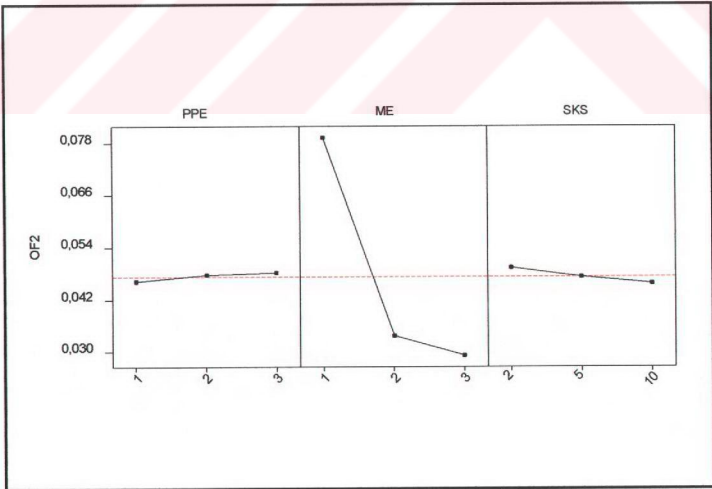
Şekil I.4 20x5 Etkileşim Grafiği (OF2)



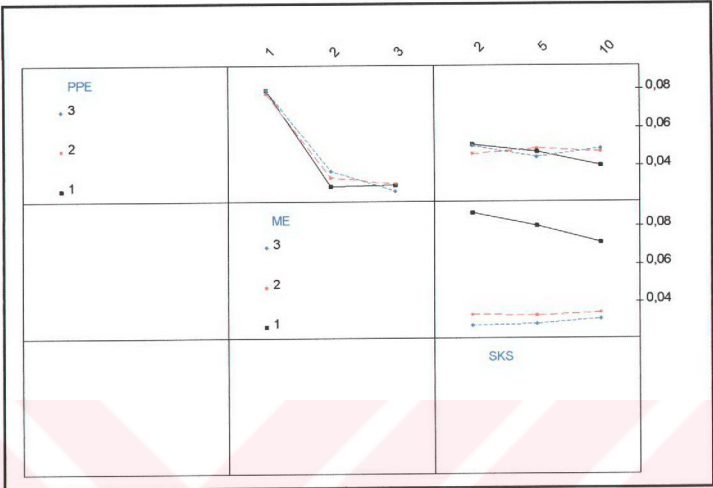
Şekil I.5 25x10 Ana Etkiler Grafiği (OF2)



Şekil I.6 25x10 Etkileşim Grafiği (OF2)

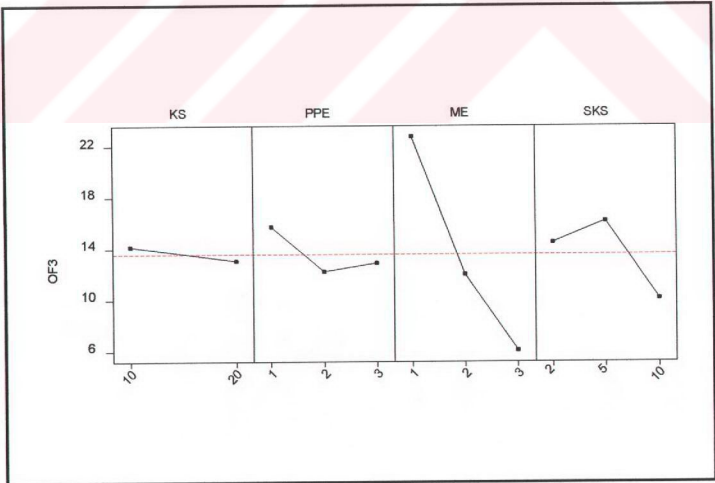


Şekil I.7 50x15 Ana Etkiler Grafiği (OF2)

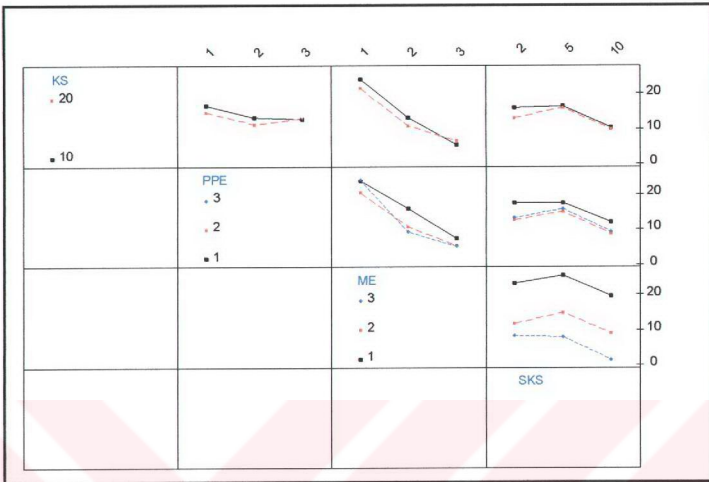


Şekil I.8 50x15 Etkileşim Grafiği (OF2)

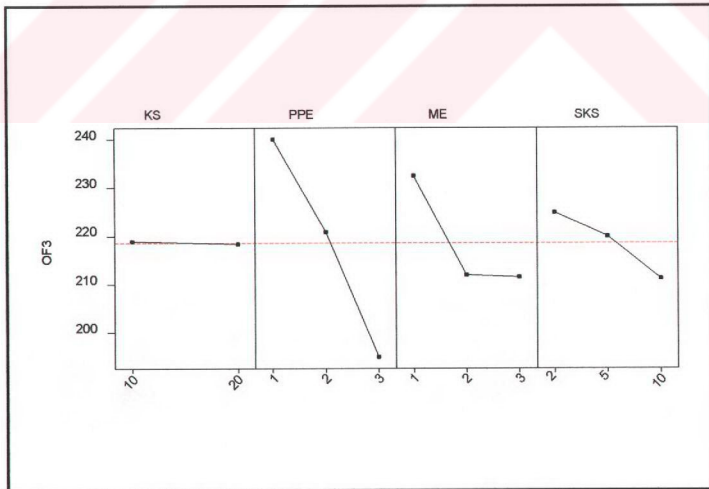
1.2 OBJEKTİF FONKSİYON 3- ORTALAMA BEKLEME ZAMANLARI



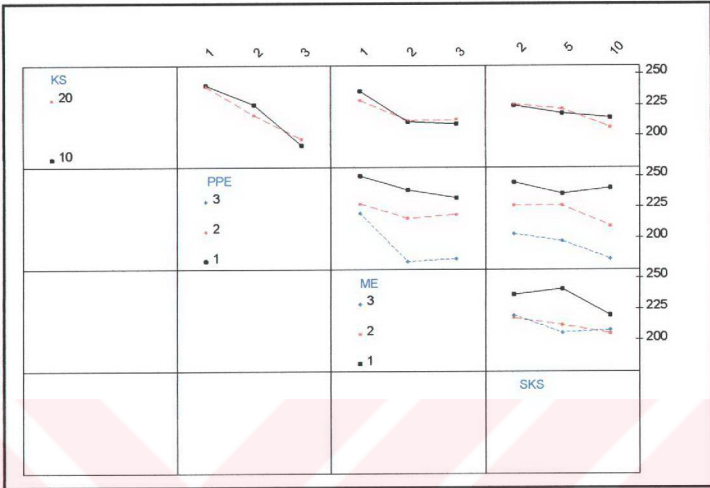
Şekil I.9 5x5 Ana Etkiler Grafiği (OF3)



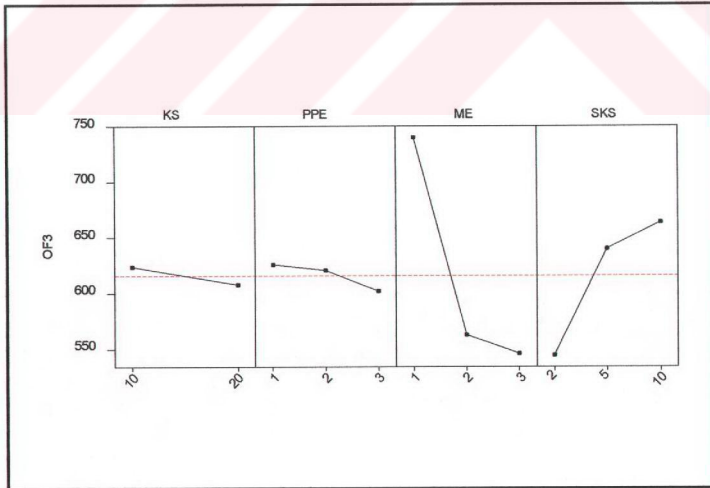
Şekil I.10 5x5 Etkileşim Grafiği (OF3)



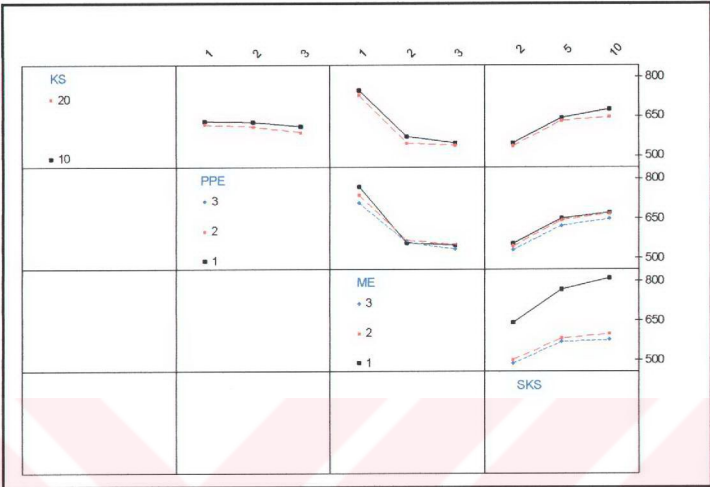
Şekil I.11 20x5 Ana Etkiler Grafiği (OF3)



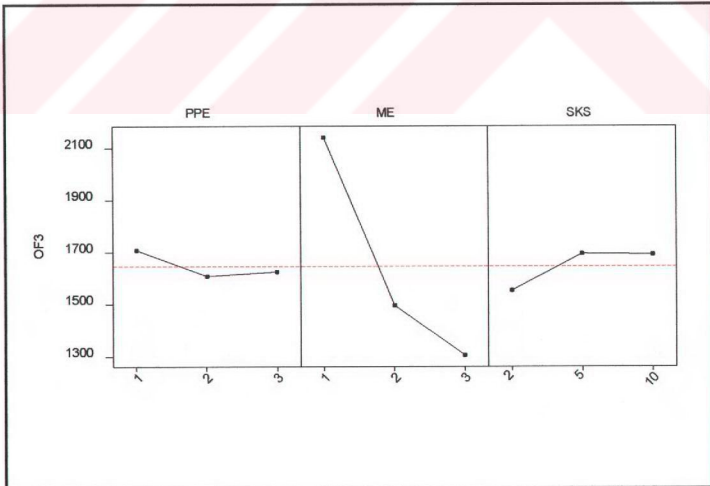
Şekil I.12 20x5 Etkileşim Grafiği (OF3)



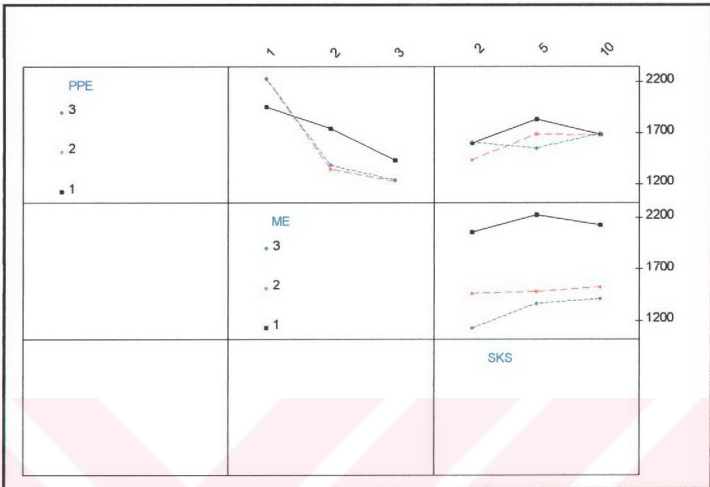
Şekil I.13 25x10 Ana Etkiler Grafiği (OF3)



Şekil I.14 25x10 Etkileşim Grafiği (OF3)



Şekil I.15 50x15 Ana Etkiler Grafiği (OF3)



Şekil I.16 50x15 Etkileşim Grafiği (OF3)

EK II SIRALAMA KURALLARI – MAKİNE ESNEKLİĞİ

II.1 TANIMLAYICI İSTATİSTİKLER, ANOVA, ÇOKLU KARŞILAŞTIRMA TESTLERİ

II.1.1 10x10 Test Problemi

Tablo II.1 10X10 Değişkenlerin Tanımlayıcı İstatistikleri

	Makine Esneklik Düzeyi	N	Ortalama	Standart Sapma	Std. Hata
ETT-KYİZ	0	30	126,50	0,00	0,00
	1	30	62,41	11,70	2,14
	2	30	29,56	5,55	1,01
	3	30	22,84	6,56	1,20
	Toplam	120	60,33	41,82	3,82
ETT-İZBK	0	30	68,70	0,00	0,00
	1	30	30,06	10,57	1,93
	2	30	17,82	5,04	0,92
	3	30	15,64	4,24	0,77
	Toplam	120	33,06	22,26	2,03
ETT-EKB	0	30	77,30	0,00	0,00
	1	30	40,25	10,77	1,97
	2	30	21,19	5,13	0,94
	3	30	19,65	5,20	0,95
	Toplam	120	39,60	24,20	2,21
KYİZ-İZBK	0	30	57,80	0,00	0,00
	1	30	34,35	10,64	1,94
	2	30	12,41	6,39	1,17
	3	30	7,13	6,72	1,23
	Toplam	120	27,92	21,30	1,94
KYİZ-EKB	0	30	119,20	0,00	0,00
	1	30	22,16	9,38	1,71
	2	30	8,83	4,25	0,78
	3	30	7,50	6,25	1,14
	Toplam	120	39,42	46,99	4,29
İZBK-EKB	0	30	61,40	0,00	0,00
	1	30	14,17	8,73	1,59
	2	30	6,28	4,48	0,82
	3	30	6,09	5,10	0,93
	Toplam	120	21,99	23,72	2,17

Tablo II.2 10X10 Gruplar Arası İlişki İçin ANOVA Sonuçları

		Kareler Toplamı	SD	Ortalama Kare	F	p.
ETT-KYİZ	Gruplar arası	202056,09	3,00	67352,03	1278,62	0,00
	Grup içi	6110,38	116,00	52,68		
	Toplam	208166,47	119,00			
ETT-İZBK	Gruplar arası	54445,49	3,00	18148,50	468,00	0,00
	Grup içi	4498,39	116,00	38,78		
	Toplam	58943,88	119,00			
ETT-EKB	Gruplar arası	64752,35	3,00	21584,12	509,74	0,00
	Grup içi	4911,83	116,00	42,34		
	Toplam	69664,18	119,00			
KYİZ-İZBK	Gruplar arası	48203,90	3,00	16067,97	322,62	0,00
	Grup içi	5777,27	116,00	49,80		
	Toplam	53981,17	119,00			
KYİZ-EKB	Gruplar arası	258513,67	3,00	86171,22	2374,57	0,00
	Grup içi	4209,55	116,00	36,29		
	Toplam	262723,22	119,00			
İZBK-EKB	Gruplar arası	63415,85	3,00	21138,62	691,57	0,00
	Grup içi	3545,65	116,00	30,57		
	Toplam	66961,50	119,00			

Tablo II.3 10X10 Çoklu Karşılaştırma Testi Sonuçları

Bağımlı Değişkenler	(I) ME Grubu	(J) ME Grupları	Ortalama Fark (I-J)	Std. Hata	p
ETT-KYİZ	0,000	1,000	64,089	1,874	0,000
		2,000	96,936	1,874	0,000
		3,000	103,665	1,874	0,000
	1,000	0,000	-64,089	1,874	0,000
		2,000	32,847	1,874	0,000
		3,000	39,576	1,874	0,000
	2,000	0,000	-96,936	1,874	0,000
		1,000	-32,847	1,874	0,000
		3,000	6,728	1,874	0,006
	3,000	0,000	-103,665	1,874	0,000
		1,000	-39,576	1,874	0,000
		2,000	-6,728	1,874	0,006
ETT-İZBK	0,000	1,000	38,641	1,608	0,000
		2,000	50,881	1,608	0,000
		3,000	53,056	1,608	0,000
	1,000	0,000	-38,641	1,608	0,000
		2,000	12,240	1,608	0,000
		3,000	14,415	1,608	0,000
	2,000	0,000	-50,881	1,608	0,000
		1,000	-12,240	1,608	0,000
		3,000	2,175	1,608	0,610

	3,000	0,000	-53,056	1,608	0,000
		1,000	-14,415	1,608	0,000
		2,000	-2,175	1,608	0,610
ETT-EKB	0,000	1,000	37,054	1,680	0,000
		2,000	56,107	1,680	0,000
		3,000	57,647	1,680	0,000
	1,000	0,000	-37,054	1,680	0,000
		2,000	19,054	1,680	0,000
		3,000	20,593	1,680	0,000
	2,000	0,000	-56,107	1,680	0,000
		1,000	-19,054	1,680	0,000
		3,000	1,539	1,680	0,840
	3,000	0,000	-57,647	1,680	0,000
		1,000	-20,593	1,680	0,000
		2,000	-1,539	1,680	0,840
KYİZ-İZBK	0,000	1,000	23,448	1,822	0,000
		2,000	45,387	1,822	0,000
		3,000	50,668	1,822	0,000
	1,000	0,000	-23,448	1,822	0,000
		2,000	21,939	1,822	0,000
		3,000	27,220	1,822	0,000
	2,000	0,000	-45,387	1,822	0,000
		1,000	-21,939	1,822	0,000
		3,000	5,281	1,822	0,043
	3,000	0,000	-50,668	1,822	0,000
		1,000	-27,220	1,822	0,000
		2,000	-5,281	1,822	0,043
KYİZ-EKB	0,000	1,000	97,035	1,555	0,000
		2,000	110,366	1,555	0,000
		3,000	111,702	1,555	0,000
	1,000	0,000	-97,035	1,555	0,000
		2,000	13,330	1,555	0,000
		3,000	14,667	1,555	0,000
	2,000	0,000	-110,366	1,555	0,000
		1,000	-13,330	1,555	0,000
		3,000	1,337	1,555	0,864
	3,000	0,000	-111,702	1,555	0,000
		1,000	-14,667	1,555	0,000
		2,000	-1,337	1,555	0,864
İZBK-EKB	0,000	1,000	47,228	1,427	0,000
		2,000	55,119	1,427	0,000
		3,000	55,310	1,427	0,000
	1,000	0,000	-47,228	1,427	0,000
		2,000	7,891	1,427	0,000
		3,000	8,083	1,427	0,000
	2,000	0,000	-55,119	1,427	0,000
		1,000	-7,891	1,427	0,000
		3,000	0,191	1,427	0,999
	3,000	0,000	-55,310	1,427	0,000
		1,000	-8,083	1,427	0,000
		2,000	-0,191	1,427	0,999

II.1.2 20x5 Test Problemi

Tablo II.4 20X5 Değişkenlerin Tanımlayıcı İstatistikleri

	Makine Esneklik Düzeyi	N	Ortalama	Standart Sapma	Std. Hata
ETT-KYİZ	0	30,00	295,85	0,00	0,00
	1	30,00	173,03	12,22	2,23
	2	30,00	62,88	8,35	1,52
	3	30,00	41,59	4,61	0,84
	Toplam	120,00	143,34	101,92	9,30
ETT-İZBK	0	30,00	230,60	0,00	0,00
	1	30,00	141,30	10,10	1,84
	2	30,00	46,38	6,72	1,23
	3	30,00	39,06	4,19	0,76
	Toplam	120,00	114,33	78,89	7,20
ETT-EKB	0	30,00	95,40	0,00	0,00
	1	30,00	57,04	8,10	1,48
	2	30,00	38,07	10,62	1,94
	3	30,00	33,95	2,98	0,54
	Toplam	120,00	56,11	25,32	2,31
KYİZ-İZBK	0	30,00	65,25	0,00	0,00
	1	30,00	32,03	13,04	2,38
	2	30,00	16,49	8,13	1,48
	3	30,00	5,34	4,27	0,78
	Toplam	120,00	29,78	23,99	2,19
KYİZ-EKB	0	30,00	200,45	0,00	0,00
	1	30,00	116,00	13,64	2,49
	2	30,00	24,95	14,04	2,56
	3	30,00	7,83	3,32	0,61
	Toplam	120,00	87,31	78,12	7,13
İZBK-EKB	0	30,00	135,20	0,00	0,00
	1	30,00	84,26	11,24	2,05
	2	30,00	11,44	7,55	1,38
	3	30,00	5,57	3,64	0,66
	Toplam	120,00	59,12	54,43	4,97

Tablo II.5 20X5 Gruplar Arası İlişki İçin ANOVA Sonuçları

		Kareler Toplamı	SD	Ortalama Kare	F	p.
ETT-KYİZ	Gruplar arası	1229070,24	3,00	409690,08	6822,29	0,00
	Grup içi	6965,99	116,00	60,05		
	Toplam	1236036,23	119,00			
ETT-İZBK	Gruplar arası	735856,42	3,00	245285,47	5958,03	0,00
	Grup içi	4775,59	116,00	41,17		
	Toplam	740632,01	119,00			
ETT-EKB	Gruplar arası	70832,55	3,00	23610,85	504,13	0,00
	Grup içi	5432,86	116,00	46,84		
	Toplam	76265,41	119,00			
KYİZ-İZBK	Gruplar arası	61110,20	3,00	20370,07	320,28	0,00
	Grup içi	7377,74	116,00	63,60		
	Toplam	68487,94	119,00			
KYİZ-EKB	Gruplar arası	714872,44	3,00	238290,81	2418,44	0,00
	Grup içi	11429,56	116,00	98,53		
	Toplam	726302,00	119,00			
İZBK-EKB	Gruplar arası	346832,73	3,00	115610,91	2353,00	0,00
	Grup içi	5699,47	116,00	49,13		
	Toplam	352532,19	119,00			

Tablo II.6 20X5 Çoklu Karşılaştırma Testi Sonuçları

Bağımlı Değişkenler	(I) ME Grubu	(J) ME Grupları	Ortalama Fark (I-J)	Std. Hata	p
ETT-KYİZ	0,000	1,000	135,226	3,838	0,000
		2,000	244,009	3,838	0,000
		3,000	348,372	3,838	0,000
	1,000	0,000	-135,226	3,838	0,000
		2,000	108,783	3,838	0,000
		3,000	213,146	3,838	0,000
	2,000	0,000	-244,009	3,838	0,000
		1,000	-108,783	3,838	0,000
		3,000	104,363	3,838	0,000
	3,000	0,000	-348,372	3,838	0,000
		1,000	-213,146	3,838	0,000
		2,000	-104,363	3,838	0,000
ETT-İZBK	0,000	1,000	268,926	4,682	0,000
		2,000	405,460	4,682	0,000
		3,000	513,221	4,682	0,000
	1,000	0,000	-268,926	4,682	0,000
		2,000	136,534	4,682	0,000
		3,000	244,295	4,682	0,000
	2,000	0,000	-405,460	4,682	0,000
		1,000	-136,534	4,682	0,000
		3,000	107,761	4,682	0,000
	3,000	0,000	-513,221	4,682	0,000

		1,000	-244,295	4,682	0,000
		2,000	-107,761	4,682	0,000
ETT-EKB	0,000	1,000	78,731	4,201	0,000
		2,000	120,592	4,201	0,000
		3,000	135,471	4,201	0,000
	1,000	0,000	-78,731	4,201	0,000
		2,000	41,861	4,201	0,000
		3,000	56,740	4,201	0,000
	2,000	0,000	-120,592	4,201	0,000
		1,000	-41,861	4,201	0,000
		3,000	14,879	4,201	0,008
	3,000	0,000	-135,471	4,201	0,000
		1,000	-56,740	4,201	0,000
		2,000	-14,879	4,201	0,008
KYİZ-İZBK	0,000	1,000	133,120	3,099	0,000
		2,000	153,743	3,099	0,000
		3,000	159,842	3,099	0,000
	1,000	0,000	-133,120	3,099	0,000
		2,000	20,624	3,099	0,000
		3,000	26,723	3,099	0,000
	2,000	0,000	-153,743	3,099	0,000
		1,000	-20,624	3,099	0,000
		3,000	6,099	3,099	0,281
	3,000	0,000	-159,842	3,099	0,000
		1,000	-26,723	3,099	0,000
		2,000	-6,099	3,099	0,281
KYİZ-EKB	0,000	1,000	156,495	3,432	0,000
		2,000	223,417	3,432	0,000
		3,000	312,901	3,432	0,000
	1,000	0,000	-156,495	3,432	0,000
		2,000	66,922	3,432	0,000
		3,000	156,406	3,432	0,000
	2,000	0,000	-223,417	3,432	0,000
		1,000	-66,922	3,432	0,000
		3,000	89,484	3,432	0,000
	3,000	0,000	-312,901	3,432	0,000
		1,000	-156,406	3,432	0,000
		2,000	-89,484	3,432	0,000
İZBK-EKB	0,000	1,000	290,195	3,261	0,000
		2,000	384,868	3,261	0,000
		3,000	477,750	3,261	0,000
	1,000	0,000	-290,195	3,261	0,000
		2,000	94,673	3,261	0,000
		3,000	187,555	3,261	0,000
	2,000	0,000	-384,868	3,261	0,000
		1,000	-94,673	3,261	0,000
		3,000	92,882	3,261	0,000
	3,000	0,000	-477,750	3,261	0,000
		1,000	-187,555	3,261	0,000
		2,000	-92,882	3,261	0,000

II.1.3 25x10 Test Problemi

Tablo II.7 25X10 Değişkenlerin Tanımlayıcı İstatistikleri

	Makine Esneklik Düzeyi	N	Ortalama	Standart Sapma	Std. Hata
ETT-KYİZ	0	30	448,20	0,00	0,00
	1	30	312,97	24,59	4,49
	2	30	204,19	13,69	2,50
	3	30	99,83	9,59	1,75
	Toplam	120	266,30	130,63	11,93
ETT-İZBK	0	30	619,80	0,00	0,00
	1	30	350,87	29,86	5,45
	2	30	214,34	17,76	3,24
	3	30	106,58	10,39	1,90
	Toplam	120	322,90	193,67	17,68
ETT-EKB	0	30	173,64	0,00	0,00
	1	30	94,91	27,97	5,11
	2	30	53,05	15,16	2,77
	3	30	38,17	6,86	1,25
	Toplam	120	89,94	55,22	5,04
KYİZ-İZBK	0	30	171,60	0,00	0,00
	1	30	38,48	19,11	3,49
	2	30	17,86	11,19	2,04
	3	30	11,76	9,27	1,69
	Toplam	120	59,92	66,57	6,08
KYİZ-EKB	0	30	374,56	0,00	0,00
	1	30	218,06	18,15	3,31
	2	30	151,14	14,78	2,70
	3	30	61,66	12,60	2,30
	Toplam	120	201,36	115,59	10,55
İZBK-EKB	0	30	546,16	0,00	0,00
	1	30	255,97	16,71	3,05
	2	30	161,29	15,02	2,74
	3	30	68,41	11,54	2,11
	Toplam	120	257,96	180,30	16,46

Tablo II.8 25X10 Gruplar Arası İlişki İçin ANOVA Sonuçları

		Kareler Toplamı	SD	Ortalama Kare	F	p.
ETT-KYİZ	Gruplar arası	2005098,48	3,00	668366,16	3024,47	0,00
	Grup içi	25634,36	116,00	220,99		
	Toplam	2030732,84	119,00			
ETT-İZBK	Gruplar arası	4425362,36	3,00	1475120,79	4486,64	0,00
	Grup içi	38138,53	116,00	328,78		
	Toplam	4463500,89	119,00			
ETT-EKB	Gruplar arası	332149,94	3,00	110716,65	418,17	0,00
	Grup içi	30712,63	116,00	264,76		
	Toplam	362862,57	119,00			
KYİZ-İZBK	Gruplar arası	510630,34	3,00	170210,11	1181,57	0,00
	Grup içi	16710,27	116,00	144,05		
	Toplam	527340,60	119,00			
KYİZ-EKB	Gruplar arası	1569463,32	3,00	523154,44	2961,77	0,00
	Grup içi	20489,72	116,00	176,64		
	Toplam	1589953,04	119,00			
İZBK-EKB	Gruplar arası	3850107,42	3,00	1283369,14	8047,80	0,00
	Grup içi	18498,32	116,00	159,47		
	Toplam	3868605,74	119,00			

Tablo II.9 25X10 Çoklu Karşılaştırma Testi Sonuçları

Bağımlı Değişkenler	(I) ME Grubu	(J) ME Grupları	Ortalama Fark (I-J)	Std. Hata	p
ETT-KYİZ	0,000	1,000	135,226	3,838	0,000
		2,000	244,009	3,838	0,000
		3,000	348,372	3,838	0,000
	1,000	0,000	-135,226	3,838	0,000
		2,000	108,783	3,838	0,000
		3,000	213,146	3,838	0,000
	2,000	0,000	-244,009	3,838	0,000
		1,000	-108,783	3,838	0,000
		3,000	104,363	3,838	0,000
	3,000	0,000	-348,372	3,838	0,000
		1,000	-213,146	3,838	0,000
		2,000	-104,363	3,838	0,000
ETT-İZBK	0,000	1,000	268,926	4,682	0,000
		2,000	405,460	4,682	0,000
		3,000	513,221	4,682	0,000
	1,000	0,000	-268,926	4,682	0,000
		2,000	136,534	4,682	0,000
		3,000	244,295	4,682	0,000
	2,000	0,000	-405,460	4,682	0,000
		1,000	-136,534	4,682	0,000
		3,000	107,761	4,682	0,000
	3,000	0,000	-513,221	4,682	0,000

		1,000	-244,295	4,682	0,000
		2,000	-107,761	4,682	0,000
ETT-EKB	0,000	1,000	78,731	4,201	0,000
		2,000	120,592	4,201	0,000
		3,000	135,471	4,201	0,000
	1,000	0,000	-78,731	4,201	0,000
		2,000	41,861	4,201	0,000
		3,000	56,740	4,201	0,000
	2,000	0,000	-120,592	4,201	0,000
		1,000	-41,861	4,201	0,000
		3,000	14,879	4,201	0,008
	3,000	0,000	-135,471	4,201	0,000
		1,000	-56,740	4,201	0,000
		2,000	-14,879	4,201	0,008
KYİZ-İZBK	0,000	1,000	133,120	3,099	0,000
		2,000	153,743	3,099	0,000
		3,000	159,842	3,099	0,000
	1,000	0,000	-133,120	3,099	0,000
		2,000	20,624	3,099	0,000
		3,000	26,723	3,099	0,000
	2,000	0,000	-153,743	3,099	0,000
		1,000	-20,624	3,099	0,000
		3,000	6,099	3,099	0,281
	3,000	0,000	-159,842	3,099	0,000
		1,000	-26,723	3,099	0,000
		2,000	-6,099	3,099	0,281
KYİZ-EKB	0,000	1,000	156,495	3,432	0,000
		2,000	223,417	3,432	0,000
		3,000	312,901	3,432	0,000
	1,000	0,000	-156,495	3,432	0,000
		2,000	66,922	3,432	0,000
		3,000	156,406	3,432	0,000
	2,000	0,000	-223,417	3,432	0,000
		1,000	-66,922	3,432	0,000
		3,000	89,484	3,432	0,000
	3,000	0,000	-312,901	3,432	0,000
		1,000	-156,406	3,432	0,000
		2,000	-89,484	3,432	0,000
İZBK-EKB	0,000	1,000	290,195	3,261	0,000
		2,000	384,868	3,261	0,000
		3,000	477,750	3,261	0,000
	1,000	0,000	-290,195	3,261	0,000
		2,000	94,673	3,261	0,000
		3,000	187,555	3,261	0,000
	2,000	0,000	-384,868	3,261	0,000
		1,000	-94,673	3,261	0,000
		3,000	92,882	3,261	0,000
	3,000	0,000	-477,750	3,261	0,000
		1,000	-187,555	3,261	0,000
		2,000	-92,882	3,261	0,000

EK III LİTERATÜR PROBLEMLERİ ÇÖZÜM ÇİZELGELERİ

O_{ji} : j. işin i. operasyonu

Tablo III.1 Kacem Test Problem 1. Pareto Optimal Çözüm Çizelgeleri

Çizelge 1 (16 8 32)			Çizelge 2 (16 7 33)		
Operasyon (O _{ji})	Makine	Başlama,Bitiş	Operasyon (O _{ji})	Makine	Başlama,Bitiş
O21	1	5,7	O21	1	5,7
O41	1	7,8	O41	1	7,8
O23	1	12,16	O23	1	12,16
O12	2	4,8	O12	2	5,9
O32	2	8,9	O32	2	9,10
O42	2	9,10	O42	2	10,11
O31	3	1,7	O31	3	1,7
O11	4	3,4	O13	4	9,13
O13	4	8,12	O33	4	13,15
O33	4	12,14	O34	4	15,16
O34	4	14,15	O11	5	3,5
O22	5	7,12	O22	5	7,12

Tablo III.2 Kacem Test Problem 2 Pareto Optimal Çözüm Çizelgeleri

Çizelge 1 (16 12 60)			Çizelge 2 (15 10 62)			Çizelge 3 (15 11 61)		
O _{ji}	M	Baş,Bit	O _{ji}	M	Baş,Bit	O _{ji}	M	Baş,Bit
O11	1	2,3	O11	1	2,3	O11	1	2,3
O103	1	5,6	O103	1	5,6	O103	1	5,6
O22	1	7,9	O41	1	6,8	O22	1	7,9
O52	1	9,11	O52	1	8,10	O52	1	9,11
O41	1	11,13	O22	1	10,12	O41	1	11,13
O101	2	0,4	O101	2	0,4	O101	2	0,4
O51	2	7,8	O51	2	7,8	O51	2	7,8
O92	2	8,10	O92	2	8,10	O92	2	8,10
O53	2	11,12	O53	2	10,11	O53	2	11,12
O83	2	13,15	O83	2	13,15	O83	2	13,15
O61	3	5,9	O61	3	5,9	O61	3	5,9
O62	3	9,10	O62	3	9,10	O62	3	9,10
O32	3	10,11	O32	3	10,11	O32	3	10,11
O63	3	11,13	O63	3	11,13	O63	3	11,13
O81	4	4,5	O81	4	4,5	O81	4	4,5
O82	4	5,13	O82	4	5,13	O82	4	5,13
O42	4	13,14	O42	4	13,14	O42	4	13,14
O93	4	14,16	O12	5	3,4	O12	5	3,4
O12	5	3,4	O91	5	4,8	O91	5	4,8
O91	5	4,8	O33	5	11,13	O33	5	11,13
O33	5	11,13	O43	5	14,15	O43	5	14,15
O43	5	14,15	O102	6	4,5	O102	6	4,5
O102	6	4,5	O13	6	5,9	O13	6	5,9
O73	6	13,14	O72	6	9,13	O73	6	13,14
O21	7	4,7	O73	6	13,14	O21	7	4,7

O71	7	7,9	O21	7	4,7	O71	7	7,9
O31	7	9,10	O71	7	7,9	O31	7	9,10
O72	7	10,13	O31	7	9,10	O72	7	10,13
O13	7	13,16	O93	7	10,12	O93	7	13,15

Tablo III.3 Kacem Test Problem 3 Pareto Optimal Çözüm Çizelgeleri

Çizelge 1 (23 12 92)			Çizelge 2 (25 10 95)			Çizelge 3 (23 13 91)		
O _{ij}	M	Baş, Bit	O _{ij}	M	Baş, Bit	O _{ij}	M	Baş, Bit
O102	1	1,3	O102	1	1,3	O102	1	1,3
O71	1	3,4	O71	1	3,4	O71	1	3,4
O11	1	5,6	O11	1	5,6	O11	1	5,6
O12	1	6,7	O12	1	6,7	O12	1	6,7
O62	1	8,9	O62	1	8,9	O62	1	8,9
O84	1	10,11	O141	1	12,14	O84	1	10,11
O141	1	12,14	O84	1	14,15	O141	1	12,14
O72	2	4,5	O72	2	4,5	O72	2	4,5
O104	2	5,7	O104	2	5,7	O61	2	7,8
O61	2	7,8	O61	2	7,8	O104	2	8,10
O31	2	8,9	O53	2	12,14	O33	2	10,12
O53	2	13,15	O33	2	15,17	O53	2	13,15
O33	2	15,17	O134	2	17,19	O134	2	18,20
O134	2	19,21	O22	3	4,6	O22	3	4,6
O22	3	4,6	O13	3	7,8	O13	3	7,8
O91	3	8,10	O152	3	8,10	O92	3	9,11
O92	3	10,12	O92	3	10,12	O113	3	16,18
O13	3	12,13	O113	3	17,19	O83	4	8,10
O113	3	16,18	O83	4	11,13	O24	4	10,11
O83	4	8,10	O34	4	17,18	O34	4	12,13
O34	4	17,18	O94	4	19,23	O41	5	4,5
O41	5	4,5	O41	5	4,5	O42	5	5,6
O42	5	5,6	O42	5	5,6	O154	5	11,13
O154	5	11,13	O122	5	15,19	O122	5	15,19
O122	5	15,19	O144	5	21,23	O144	5	19,21
O144	5	19,21	O154	5	23,25	O152	6	7,9
O152	6	7,9	O43	6	6,7	O153	6	9,11
O153	6	9,11	O52	6	10,12	O52	6	11,13
O52	6	11,13	O54	6	14,16	O43	6	13,14
O43	6	13,14	O112	6	16,17	O112	6	15,16
O112	6	15,16	O123	6	19,21	O54	6	16,18
O54	6	16,18	O153	6	21,23	O123	6	19,21
O123	6	19,21	O21	7	3,4	O21	7	3,4
O21	7	3,4	O81	7	4,5	O81	7	4,5
O81	7	4,5	O111	7	14,15	O31	7	6,7
O111	7	14,15	O93	7	15,19	O32	7	7,8
O93	7	15,19	O114	7	19,20	O111	7	14,15
O114	7	19,20	O124	7	21,23	O93	7	15,19
O124	7	21,23	O151	8	5,7	O114	7	19,20
O151	8	5,7	O31	8	7,9	O124	7	21,23
O82	8	7,8	O24	8	9,10	O151	8	5,7
O24	8	8,9	O82	8	10,11	O82	8	7,8
O121	8	13,15	O121	8	13,15	O121	8	13,15

O143	8	16,18	O143	8	19,21	O143	8	16,18
O51	9	9,10	O51	9	9,10	O51	9	9,10
O32	9	10,11	O14	9	10,14	O14	9	10,14
O142	9	14,16	O32	9	14,15	O142	9	14,16
O14	9	16,20	O44	9	15,17	O101	10	0,1
O101	10	0,1	O142	9	17,19	O103	10	3,4
O103	10	3,4	O101	10	0,1	O23	10	6,7
O23	10	6,7	O103	10	3,4	O91	10	8,9
O131	10	11,13	O23	10	6,7	O131	10	11,13
O44	10	14,15	O91	10	8,9	O132	10	13,15
O132	10	15,17	O131	10	11,13	O44	10	15,16
O133	10	17,19	O132	10	13,15	O133	10	16,18
O94	10	19,21	O133	10	15,17	O94	10	19,21

Tablo III.4 Kacem Test Problem 3 Pareto Optimal Çözüm Çizelgeleri (devam)

Çizelge 4 (23 11 93)		
O _{ji}	M	Baş, Bit
O102	1	1,3
O71	1	3,4
O11	1	5,6
O12	1	6,7
O141	1	12,14
O62	1	14,15
O84	1	15,16
O104	2	4,6
O31	2	6,7
O72	2	7,8
O33	2	8,10
O61	2	10,11
O134	2	17,19
O53	2	19,21
O22	3	4,6
O91	3	8,10
O13	3	10,11
O152	3	11,13
O92	3	13,15
O113	3	16,18
O83	4	9,11
O34	4	11,12
O41	5	4,5
O42	5	5,6
O122	5	15,19
O154	5	19,21
O144	5	21,23
O43	6	6,7
O153	6	13,15
O112	6	15,16
O52	6	16,18
O123	6	19,21
O54	6	21,23
O21	7	3,4

O81	7	4,5
O111	7	14,15
O93	7	15,19
O114	7	19,20
O124	7	21,23
O151	8	5,7
O24	8	7,8
O82	8	8,9
O121	8	13,15
O143	8	16,18
O32	9	7,8
O44	9	8,10
O51	9	10,11
O142	9	14,16
O14	9	16,20
O101	10	0,1
O103	10	3,4
O23	10	6,7
O131	10	11,13
O132	10	13,15
O133	10	15,17
O94	10	19,21

Tablo III.5 Kacem Test Problem 4 Pareto Optimal Çözüm Çizelgeleri

Çizelge 1 (8 5 42)			Çizelge 2 (8 7 41)		
O _{ij}	M	Baş,Bit	O _{ij}	M	Baş,Bit
O71	1	0,1	O11	1	0,1
O11	1	1,2	O71	1	1,2
O21	1	2,4	O21	1	2,4
O33	2	2,3	O42	2	1,3
O42	2	3,5	O82	2	3,6
O83	2	6,8	O83	2	6,8
O72	3	1,2	O12	3	1,2
O101	3	2,3	O101	3	2,3
O12	3	3,4	O72	3	3,4
O23	3	5,7	O23	3	6,8
O102	4	3,4	O102	4	3,4
O22	4	4,5	O13	4	4,5
O13	4	5,6	O22	4	5,6
O43	4	6,7	O43	4	6,7
O53	4	7,8	O53	4	7,8
O81	5	0,2	O81	5	0,2
O91	6	0,1	O91	6	0,1
O93	6	2,3	O61	6	1,3
O61	6	3,5	O93	6	3,4
O73	6	5,6	O73	6	4,5
O41	7	0,1	O41	7	0,1
O92	7	1,2	O92	7	1,2
O103	7	4,6	O33	7	2,3
O63	7	7,8	O63	7	5,6
O32	8	1,2	O103	7	6,8

O51	9	0,2	O32	8	1,2
O52	9	2,3	O51	9	0,2
O62	9	5,7	O52	9	2,3
O31	10	0,1	O62	9	3,5
O82	10	2,6	O31	10	0,1

Tablo III.6 Kacem Test Problem 4 Pareto Optimal Çözüm Çizelgeleri (devam)

Çizelge 3 (7 7 43)			Çizelge 4 (7 5 44)		
O _{ij}	M	Baş,Bit	O _{ij}	M	Baş,Bit
O11	1	0,1	O11	1	0,1
O71	1	1,2	O21	1	1,3
O21	1	2,4	O71	1	3,4
O82	2	2,5	O82	2	2,5
O83	2	5,7	O83	2	5,7
O101	3	0,1	O101	3	0,1
O12	3	1,2	O12	3	1,2
O72	3	2,3	O72	3	4,5
O23	3	5,7	O23	3	5,7
O13	4	2,3	O13	4	2,3
O53	4	3,4	O22	4	3,4
O22	4	4,5	O53	4	4,5
O43	4	5,6	O73	4	5,6
O81	5	0,2	O43	4	6,7
O91	6	0,1	O81	5	0,2
O61	6	1,3	O103	5	2,5
O93	6	3,4	O91	6	0,1
O73	6	4,5	O61	6	1,3
O41	7	0,1	O93	6	4,5
O92	7	1,2	O41	7	0,1
O102	7	2,3	O102	7	1,2
O33	7	3,4	O33	7	2,3
O103	7	4,6	O92	7	3,4
O63	7	6,7	O63	7	5,6
O32	8	1,2	O32	8	1,2
O51	9	0,2	O51	9	0,2
O52	9	2,3	O52	9	2,3
O62	9	3,5	O62	9	3,5
O31	10	0,1	O31	10	0,1
O42	10	1,5	O42	10	1,5

ÖZGEÇMİŞ

Lale ÖZBAKIR

1971'de Kayseri'de doğdu. İlk ve orta öğrenimini Kayseri'de tamamladıktan sonra, 1988'de İstanbul Kandilli Kız Lisesi'ni ikincilikle bitirdi. Aynı yıl yapılan Öğrenci Yerleştirme Sınavında ülke genelinde ilk 100'e girerek, başarı bursu ile öğrenim görme hakkı kazandığı Bilkent Üniversitesi Bilgisayar ve Enformatik Mühendisliği Bölümü'nden 1992'de mezun oldu. 1992 - 1993 yıllarında Kayseri II. Hava İkmal Bakım Merkezi'nde Bilgi İşlem Uzmanı olarak çalıştı. 1993'te Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Endüstri Mühendisliği Bölümü'nde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya başladı. Yüksek lisans eğitimini 1997'de Erciyes Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü İşletme Anabilim Dalı'nda tamamladı. 1999'da Erciyes Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü İşletme Anabilim Dalı Üretim Yönetimi ve Pazarlama Bilim Dalı'nda doktora eğitimine başladı. Halen Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Endüstri Mühendisliği Bölümü'nde öğretim görevlisi olarak çalışmaktadır.

Çalışma alanları; Yöneylem Araştırması, Yapay Zeka, Modern Sezgisel Yöntemler, Çizelgeleme, Verimlilik ve İş Etüdü, Toplam Kalite Yönetimi ve Bilgisayar Programlamadır.

Çok iyi derecede İngilizce bilmektedir. Evli ve iki çocuk annesidir.

Adres :

Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi

Endüstri Mühendisliği Bölümü

KAYSERİ

Telefon : (0.352) 4374901 / 32475

e-posta : lozbakir@erciyes.edu.tr