



**KARMA MODELLİ MONTAJ HATTI DENGELEME PROBLEMİ İÇİN
KISIT PROGRAMLAMA MODELİ VE ARAMA STRATEJİLERİ**

Hacı Mehmet ALAĞAŞ

**DOKTORA TEZİ
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

NİSAN 2017

Hacı Mehmet ALAĞAŞ tarafından hazırlanan “KARMA MODELLİ MONTAJ HATTI DENGELEME PROBLEMİ İÇİN KISIT PROGRAMLAMA MODELİ VE ARAMA STRATEJİLERİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalında DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Bilal TOKLU

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Başkan : Prof. Dr. Serpil EROL

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Üye : Prof. Dr. Burak BİRGÖREN

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Kırıkkale Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Üye : Prof. Dr. Cevriye GENCER

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Üye : Doç. Dr. İsmail KARAOĞLAN

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Selçuk Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Tez Savunma Tarihi: 19/04/2017

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

.....

Prof. Dr. Hadi GÖKÇEN

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

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

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

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

Hacı Mehmet ALAĞAŞ

19/04/2017

KARMA MODELLİ MONTAJ HATTI Dengeleme Problemi İÇİN KISIT PROGRAMLAMA Modeli ve Arama Stratejileri

(Doktora Tezi)

Hacı Mehmet ALAĞAŞ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Nisan 2017

ÖZET

Farklı modellerin, yığın üretimi yapılmadan, belirlenen sıralamada birbiri ardınca üretildiği montaj hattı tipine karma modellenli montaj hattı denilmektedir. Bu tez çalışmasında, karma modellenli montaj hattı dengeleme problemi ele alınmıştır. Hattın dengelenmesinde sabit istasyon sayısı kısıtı altında çevrim süresinin minimizasyonunu amaçlanmıştır (Tip 2). Problemin çözümünde kısıt programlama yöntemi kullanılmıştır. Tip 2 karma modellenli montaj hattı dengeleme problemi için kısıt programlama modeli kurulmuştur. Modelin etkinliğini artırmak amacıyla, karma modellenli montaj hattı dengeleme problemine özgü çözüm arama stratejileri oluşturulmuştur. Bu arama stratejileri değişken seçimi ve değer seçimi olmak üzere iki aşamadan oluşmaktadır. Her iki aşama için, görev süreleri ve görevler arasındaki öncelik ilişkileri dikkate alınarak probleme özgü seçim kuralları oluşturulmuştur. Kısıt programlama modeli ve kurallar literatürde yer alan deney setleri ile test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar ile matematiksel model sonuçları karşılaştırılarak iyi sonuç veren kurallar belirlenmiştir. Oluşturulan kurallara ek olarak, bir dinamik arama sezgiseli de geliştirilmiştir. Bu sezgiselin değişken seçim aşamasında, önerilen değişken seçim kurallarından iyi sonuç elde edilen kurallar kullanılmıştır. Değer seçimi aşamasında ise, istasyon sürelerinin anlık değerleri dikkate alınarak hangi görevin hangi istasyona atanacağını kararı verilir. Deneysel çalışmalar ile önerilen sezgiselde kullanılacak parametre değerleri ve değişken seçim kuralları belirlenmiştir. Sonuç olarak, karma modellenli montaj hattı dengeleme problemleri için, kısıt programlamada kullanılacak etkin arama stratejileri ve özellikleri ortaya konulmuş ve etkin bir dinamik arama sezgiseli önerilmiştir.

Bilim Kodu : 90617

Anahtar Kelimeler : Montaj hattı dengeleme, tip 2 problemi, karma modellenli, kısıt programlama, arama stratejileri,

Sayfa Adedi : 112

Danışman : Prof. Dr. Bilal TOKLU

CONSTRAINT PROGRAMMING MODEL AND SEARCH STRATEGIES FOR THE
MIXED MODEL ASSEMBLY LINE BALANCING PROBLEM

(Ph. D. Thesis)

Hacı Mehmet ALAĞAŞ

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

April 2017

ABSTRACT

Mixed model assembly line is a type of assembly line where different models are produced successively in determined order without mass production. In this thesis study, mixed-model assembly line balancing problem is discussed. Minimization of cycle time is used as an objective while number of station in the line is fixed (as called Type 2 problem). Constraint programming method is used to solve the problem. Constraint programming model is established for Type 2 mixed model assembly line balancing problem. In order to increase the effectiveness of the model, specific solution search strategies have been developed for the problem. These search strategies consist of two steps; variable selection and value selection. For both steps, problem-specific selection rules have been established taking into account task times and priority relationships between tasks. Constraint programming model and the rules are tested with experimental sets in the literature. The results obtained with constraint programming are compared with mathematical model results and the better rules are determined. In addition to the established rules, a dynamic search heuristic is established. In the variable selection step of this heuristic, the rules obtained the best results from the proposed variable selection rules are used. In the value selection step, the tasks are assigned the stations taking into account the current values of the station times. Parameter values and the variable selection rules that are used in the heuristic are determined by experimental studies. Consequently, effective search strategies and the features of these strategies are determined for the problem and the effective dynamic search heuristic is proposed to be used in constraint programming.

Science Code : 90617

Key Words : Assembly line balancing, type 2 problem, mixed model, constraint programming, search strategies

Page Number : 112

Supervisor : Prof. Dr. Bilal TOKLU

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam süresince tüm bilgi birikimi ile yanımda olup kıymetli zamanını ayırarak her türlü desteklerini esirgemeyen ve katkısıyla beni yönlendiren danışman Hocam Sayın Prof. Dr. Bilal TOKLU'ya, değerli zamanlarını ayırarak kıymetli bilgi ve tecrübelerinden faydalanmama imkân veren tez izleme komitesi üyeleri “Kırıkkale Üniversitesi'nden” Sayın Prof. Dr. Burak BİRGÖREN ve “Gazi Üniversitesi'nden” Prof. Dr. Serpil EROL'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Tez savunma jürisinde yer alarak tezime değerli görüşleri ile katkı veren “Gazi Üniversitesi'nden” Prof. Dr. Cevriye GENCER'e ve “Selçuk Üniversitesi'nden” Doç. Dr. İsmail KARAOĞLAN'a teşekkür ederim. Araştırmam süresince büyük fedakârlıklarla bana her türlü konuda desteklerini esirgemeyen Doç. Dr. Mustafa YÜZÜKIRMIZI, Dr. Mehmet PINARBAŞI ve “Karabük Üniversitesi'nden” Yrd. Doç. Dr. Çağrı SEL'e teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca Kırıkkale Üniversitesi Endüstri Mühendisliği bölümünde ve Gazi Üniversitesi Endüstri Mühendisliğinde görev yapan tüm hocalarıma ve araştırma görevlisi arkadaşlarıma gösterdikleri yakın ilgi ve desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

Tüm eğitimim boyunca her türlü fedakârlığı gösteren, maddi ve manevi hiçbir destekten kaçınmayan çok kıymetli aileme, hayatımızı birleştirdiğimiz günden itibaren bana her türlü desteği veren sevgili eşime çok teşekkür ederim. Bu tez çalışması kıymetli Annem, Babam, Kardeşlerim, Eşim ve Oğullarıma armağan olsun.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	7
3. MONTAJ HATTI VE MONTAJ HATTI DENGELEME PROBLEMLERİ	19
3.1. Montaj Hattı Temel Kavramları.....	19
3.2. Montaj Hattı Dengeleme Problemleri	21
3.2.1. Montaj hattı dengeleme problemlerinin sınıflandırılması.....	22
3.3. Karma Modelli Montaj Hattı Dengeleme Problemi	25
4. KISIT PROGRAMLAMA	29
4.1. Kısıt Programlama Temel Kavramları	30
4.1.1. Tanım kümesi azaltma	31
4.1.2. Çözüm arama ve arama stratejileri.....	31
4.1.3. Kısıt yayılımı.....	33
4.2. Genel Kısıt Programlama Algoritması.....	34
5. KARMA MODELLİ MONTAJ HATTI DENGELEME PROBLEMİ İÇİN KISIT PROGRAMLAMA MODELİ	37
5.1. Tip 2 KMMHDP Kısıt Programlama Modeli	37
5.1.1. Deneysel çalışmalar ve sonuçları	39

	Sayfa
5.2. Tip 2 KMMHDP Değişken Seçim Kuralları.....	45
5.2.1. Görevin süresine bağlı kurallar (GSBK).....	47
5.2.2. Öncelik ilişkisine bağlı kurallar (ÖİBK).....	48
5.2.3. Öncelik ilişkisini ve görev süresini bağlı kurallar (Öİ_GSBK)	49
5.2.4. Kısıt programlama algoritması kuralları	50
5.2.5. Deneysel çalışmalar ve sonuçları	50
5.3. Tip 2 KMMHDP Statik Değer Seçim Kuralları.....	59
5.3.1. İstasyon numaralarına bağlı kurallar	60
5.3.2. İstasyona atanabilecek görev sayısına bağlı kurallar	60
5.3.3. İstasyona atanabilecek görevlerin süresine bağlı kurallar.....	61
5.3.4. Kısıt programlama algoritmasına özgü kurallar	61
5.3.5. Deneysel çalışmalar ve sonuçları	62
5.4. Dinamik Arama Sezgiseli.....	66
5.4.1. Deneysel çalışmalar ve sonuçları	74
6. SONUÇ.....	79
KAYNAKLAR	83
EKLER	91
EK-1. Statik değer seçim kuralları deneysel çalışmalar sonuçları.....	92
EK-2. Sezgisel algoritma 1. aşama deney sonuçları	104
EK-3. Sezgisel algoritma 2. aşama deney sonuçları	107
ÖZGEÇMİŞ	111

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Tek taraflı, düz, paralelliğin olmadığı KMMHDP literatürü.....	11
Çizelge 5.1. Her iki model için görev süreleri	39
Çizelge 5.2. Görevlerin E ve L değerleri	40
Çizelge 5.3. Çözüm sonucunda görevlerin atandığı istasyon numaraları.....	40
Çizelge 5.4. Model bazında istasyon süreleri	41
Çizelge 5.5. Deney setleri	42
Çizelge 5.6. Deneysel çalışmaların sonuçları	43
Çizelge 5.7. Deney setleri	51
Çizelge 5.8. GSBK kuralları çözüm sonuçları.....	53
Çizelge 5.9. ÖİBK kuralları çözüm sonuçları.....	55
Çizelge 5.10. Öİ_GSBK kuralları çözüm sonuçları.....	57
Çizelge 5.11. KP kuralları çözüm sonuçları	58
Çizelge 5.12. Seçilen kuralların zaman sınırsız olarak çalıştırılan MP sonuçları ile karşılaştırılması.....	59
Çizelge 5.13. Deney sonuçlarının zaman sınırlı MP sonuçları ile karşılaştırılması özet.....	63
Çizelge 5.14. Deney sonuçlarının zaman sınırsız MP sonuçları ile karşılaştırılması özet.....	64
Çizelge 5.15. Deney Setleri için çözüm sonucu üst sınır değerleri	64
Çizelge 5.16. Deney sonuçlarının üst sınır değerleri ile karşılaştırılması özet.....	65
Çizelge 5.17. KMMHDP için kullanılabilir değişken ve değer seçim ikilileri.....	65
Çizelge 5.18. Karşılaştırma için kullanılan değerler ve seçilen kural ikililerinin sonuçları.....	66
Çizelge 5.19. Modellerin görev süreleri	70
Çizelge 5.20. Modeller bazında minimum, maksimum ve toplam görev süreleri.....	71
Çizelge 5.21. Görevlerin ağırlık değerleri	72

Çizelge	Sayfa
Çizelge 5.22. Birinci aşama deney sonuçlarının zaman sınırsız MP sonuçları ile karşılaştırılması.....	74
Çizelge 5.23. Birinci aşama deney sonuçlarının üst sınır değerleri ile karşılaştırılması	75
Çizelge 5.24. $\alpha=10$ ile $\alpha=20$ arasındaki değerler için deney sonuçlarının zaman sınırsız MP sonuçları ile karşılaştırılması.....	76
Çizelge 5.25. $\alpha=10$ ile $\alpha=20$ arasındaki değerler için deney sonuçlarının üst sınır değerleri ile karşılaştırılması.....	76
Çizelge 5.26. KMMHDP çözümünde kullanılması önerilen arama stratejisi ve α değerleri	77
Çizelge 5.27. $\alpha=12$ alındığında iyi sonuç veren arama stratejilerinin sonuçları.....	77
Çizelge 5.28. $\alpha=13$ alındığında iyi sonuç veren arama stratejilerinin sonuçları.....	78
Çizelge 5.29. $\alpha=15$ alındığında iyi sonuç veren arama stratejilerinin sonuçları.....	78

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Tezde yapılan çalışmaların özeti	5
Şekil 3.1. 9 görevli bir montaj hattı için örnek öncelik diyagramı	20
Şekil 3.2. Birleştirilmiş öncelik diyagramı	21
Şekil 3.3. MHDP sınıflandırma diyagramı	23
Şekil 3.4. Çok modellenli (A) ve karma modellenli (B) montaj hattı	25
Şekil 3.5. Ele alınan montaj hattı dengeleme probleminin sınıflandırmadaki yeri.....	27
Şekil 4.1. Dallenma sırası $X_1-X_2-X_3$ olduğu durumda arama ağacı.....	32
Şekil 4.2. Dallenma sırası $X_3-X_2-X_1$ olduğu durumda arama ağacı.....	32
Şekil 4.3. Genel kısıt programlama algoritması.....	35
Şekil 5.1. Örnek problemin birleştirilmiş öncelik diyagramı	39
Şekil 5.2. İki modellenli Scholl probleminin çözüm sonuçlarının karşılaştırılması.....	43
Şekil 5.3. Değer Seçim Sezgiseli	73

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
A	Kısıt programlama arama stratejisi
AT	İstasyona atanan görevler kümesi
α	Ağırlık sınır değeri
C	Çevrim süresi
C_m	m modelinin çevrim süresi
D	Kısıt programlama karar değişkeninin tanım kümesi
DK	Denge kaybı
E_i	i görevinin atanabileceği ilk istasyon numarası
HE	Hat etkinliği
i	Görev indisi
j	Görev indisi
k	İstasyon indisi
L_i	i görevinin atanabileceği ilk istasyon numarası
m	Model indisi
M	Model sayısı
N	Toplam görev sayısı
Pr	Öncelik ilişkileri
S	Toplam istasyon sayısı
S_k	İstasyon süresi
SN	Tam sayılı karar değişkeni
t_i	i görevinin süresi
t_{im}	i görevinin m modeli için süresi
T	Bir ürünün toplam montaj süresi
UT	İstasyona atanmayan görevler kümesi
V	Görevlerin normalize ağırlık değerleri
X	Kısıt programlamada karar değişkenleri kümesi
x_{ik}	0-1 Karar değişkeni

Kısaltmalar**Açıklamalar**

AP	Amaç Programlama
DE	Düzgünlük Endeksi
EKY	En Kısa Yol
GA	Genetik Algoritma
GSBK	Görevin süresine bağlı kurallar
HE	Hat Etkinliği
İAD	İstasyonlar Arası Denge
İADE	İstasyonlar Arası Düzgünlük Endeksi
İİD	İstasyon İçi Denge
İİDE	İstasyon İçi Düzgünlük Endeksi
İKM	İstasyon Kurulum Maliyeti
İM	İşçilik maliyeti
KKA	Karınca Kolonisi Algoritması
KP	Kısıt programlama
KMMHDP	Karma modellenli montaj hattı dengeleme problemleri
Mat.M	Matematiksel model
MHDP	Montaj hattı dengeleme problemleri
MM	Maliyet Minimizasyonu
MP	Matematiksel programlama
ÖİBK	Öncelik ilişkisine bağlı kurallar
Öİ_GSBK	Öncelik ilişkisine ve görev süresine bağlı kurallar
S	Sezgisel
TA	Tabu arama
TB	Tavlama benzetimi
TO	Tamamlanma Oranı

1. GİRİŞ

Montaj hattı, ilk defa Henry Ford tarafından 1915'te Ford otomobil fabrikasında Model T'nin üretimi için kurulmuştur. Montaj hattı öncesi dönemde, aracın üretimi belirlenen sabit bir alanda yapılmaktaydı. Monte edilecek alt parçalar işçiler tarafından bu alana taşınmakta ve montaj işlemleri yapılarak aracın üretimi tamamlanmaktaydı. Henry Ford'un kurduğu montaj hattında ise, aracın ana gövdesi belirli bir hat üzerinde ilerlemekte, alt parçalar işçilerin yanında hazır bulunmakta ve belirlenen sıra ile montajı yapılarak aracın üretimi tamamlanmaktadır. Böylelikle, hem üretimde işçilerin belirli işleri yapması ile uzmanlaşması hem de taşımaların en aza indirilmesi ile üretim hızlanmış ve maliyetler azalmıştır. Günümüzde getirdiği avantajlar ile mobilyadan beyaz eşyaya, küçük ev aletlerinden otomobile kadar birçok ürünün üretim sürecinde kullanılmaktadır.

Montaj hattı bir malzeme taşıma sistemi ile birbirine bağlı istasyonlardan oluşmaktadır ve ürün montaj hattı üzerinde ilerlerken yapılması gereken montaj görevleri atandıkları istasyonlarda sıra ile yapılmaktadır. Bu sistemde en önemli problem hangi görevin hangi istasyonda yapılacağına belirlenmesidir. Görevler istasyonlara öyle dağıtılmalıdır ki görevlerin aralarındaki teknolojik zorunluluklardan kaynaklı ortaya çıkan öncelik ilişkileri bozulmamalı ve hattın üretim kapasitesi ürün talebini karşılayacak seviyede olmalıdır. Bu durumlar dikkate alınarak montaj hattında istasyon süreleri arasındaki farklılıklardan kaynaklı atıl süreyi en küçükleyecek şekilde hangi görevin hangi istasyona atanacağına belirlendiği problem montaj hattı dengeleme problemi olarak tanımlanmaktadır.

Montaj hattında atıl sürelerin en küçüklenmesi çevrim süresinin ve/veya istasyon sayısının en küçükleme ile sağlanabilmektedir. Montaj hattı dengeleme problemlerinde Tip 1 olarak isimlendirilen sabit çevrim süresi kısıtı altında istasyon sayısını en küçükleyen çalışmaların daha çok ele alındığı görülmektedir. Bunun karşın Tip 2 olarak isimlendirilen sabit istasyon sayısı kısıtı altında çevrim süresinin en küçüklenmesini amaçlayan çalışmaların ise az sayıda olduğunu yapılan literatür araştırmalarında da görülmektedir (Sivasankaran ve Shahabudeen, 2014).

Montaj hatları zamanla değişen koşulların etkisi altında kalarak standart kabul edilen düz tek modelli hat yerine farklı özelliklerde ve şekillerde tasarlanmıştır. İlk dönemlerde hat üzerinde tek tip model üretilirken, daha sonraları değişen ve çeşitlenen müşteri

taleplerinden dolayı hat üzerinde birden fazla model aynı zamanda veya birbirini takip eden sırada üretilmeye başlanmıştır. Böylelikle karma ve çok modellenli hatlar ortaya çıkmıştır. Çok modellenli hatlarda ürünler partiler halinde üretilmekte iken, karma modellenli hatlarda belirli bir sırada karma olarak üretilmektedir. Birden fazla modelin aynı hat üzerinde üretilmesi ile modellere göre görev sürelerinde meydana gelen farklılıklardan, bazı görevlerin bazı modellerde yapılmamasından ve öncelik ilişkilerinin farklılaşmasından dolayı hattın dengelenmesi de zorlaşmıştır. Ayrıca birden fazla modelin üretildiği hatlarda, hattın dengelenmesi ve ürün sıralamasının yapılması olmak üzere iki ana problem ortaya çıkmıştır. Araştırmacılar bu problemlerden öncelikle hattın dengelenmesini yapmışlar, ikinci aşamada ise ürün sıralamasını ele almışlardır.

Bu tez kapsamında çevrim süresinin en küçüklenmesinin amaçlandığı Tip 2 karma modellenli montaj hattı dengeleme problemi ele alınmıştır. Problemin çözümünde kısıt programlama yöntemi kullanılmıştır. Kısıt programlama yöntemi bir çok kombinatoriyal optimizasyon problemlerinin çözümünde kullanılmasına karşın, montaj hattı dengeleme probleminin çözümünde az sayıda kullanılmıştır (Topaloglu, Salum ve Supciller, 2012).

Kısıt programlama (KP), bilgisayar programlamanın ve matematiksel programlamanın avantajlarını kullanarak geliştirilen ve genel olarak kombinatoriyal optimizasyon problemlerinin çözümünde çokça kullanılan bir programlama yaklaşımıdır. Bu yaklaşım, bilgisayar programlamanın değişkenler arasındaki mantıksal ve matematiksel ilişkileri kolaylıkla tanımlayabilme esnekliğinden ve matematiksel programlamanın optimum çözümü bulma yeteneğinden faydalanılarak geliştirilmiştir. KP, yöneylem araştırması, yapay zekâ, graf teorisi ve programlama dillerinin melezlenmesi ile oluşturulmuş zeki bir sistemdir (Rossi, Van Beek ve Walsh, 2008). KP problemlerin optimum çözümünü bulan kesin sonuç veren algoritmalar sınıfında yer almaktadır (Talbi, 2009: 18-19). KP'nin en önemli özellikleri, modellemede farklı tipteki (sayısal veya sayısal olmayan) karar değişkenlerinin ve karar değişkenleri arasındaki ilişkileri tanımlayan kısıtların kolaylıkla tanımlanabilmesi, karar değişkenlerinin çözüm arama esnasında aldıkları değerlerin diğer değişkenlere etkisinin yayılımındaki etkinliği ve uygun çözümler için etkin arama stratejisi oluşturulmasına imkân sağlaması olarak sıralanabilir (Heipcke, 1999).

KP algoritması tanım kümesi azaltma, arama stratejisi ile çözümün aranması, kısıt yayılımı olmak üzere üç ana aşamadan oluşmaktadır. Bu üç aşamadan en önemlisi ve kısıt

programlamanın etkinliğini en çok etkileyen aşama çözüm arama aşamasıdır. İyi bir arama stratejisi, en uygun değişken seçim ve değer seçim stratejilerinin birleştirilmesi ile oluşturulmaktadır (Soto ve diğerleri, 2015). Bu tez çalışmasında da karma modellenli montaj hattı dengeleme problemi için kısıt programlama modeli kurulmuştur. Problemin girdi parametreleri olan görev süreleri ve öncelik ilişkileri temelinde değişken ve değer seçim kuralları oluşturulmuştur. Aşağıda verilen sorulara cevap aranmıştır:

- Girdi parametrelerine bağlı olarak karma modellenli montaj hattı dengeleme problemine özgü *değişken seçim* kuralları nasıl oluşturulabilir?
- Oluşturulan *değişken seçim* kurallarından hangilerinin performansı problemi çözmede daha etkindir?
- Etkin *değişken seçim* kurallarının özellikleri nelerdir?
- Girdi parametrelerine bağlı olarak karma modellenli montaj hattı dengeleme problemine *değer seçim* kuralları nasıl oluşturulabilir?
- Değişken ve değer seçim kural ikililerinden hangileri problemi çözmede daha etkindir?
- Etkin kuralların özellikleri nelerdir?

Bu sorulara cevap aranan çalışmalara ek olarak, karma modellenli montaj hattı dengeleme problemine özgü KP için bir dinamik arama sezgiseli geliştirilmiştir. Sezgisel algoritmada, değişken seçim kuralları olarak tez kapsamında belirlenen kurallar kullanılmıştır. Değer seçiminde ise istasyon sürelerinin anlık değişimlerini dikkate alarak görevin hangi istasyona atanacağına karar veren bir sezgisel algoritma kullanılmıştır.

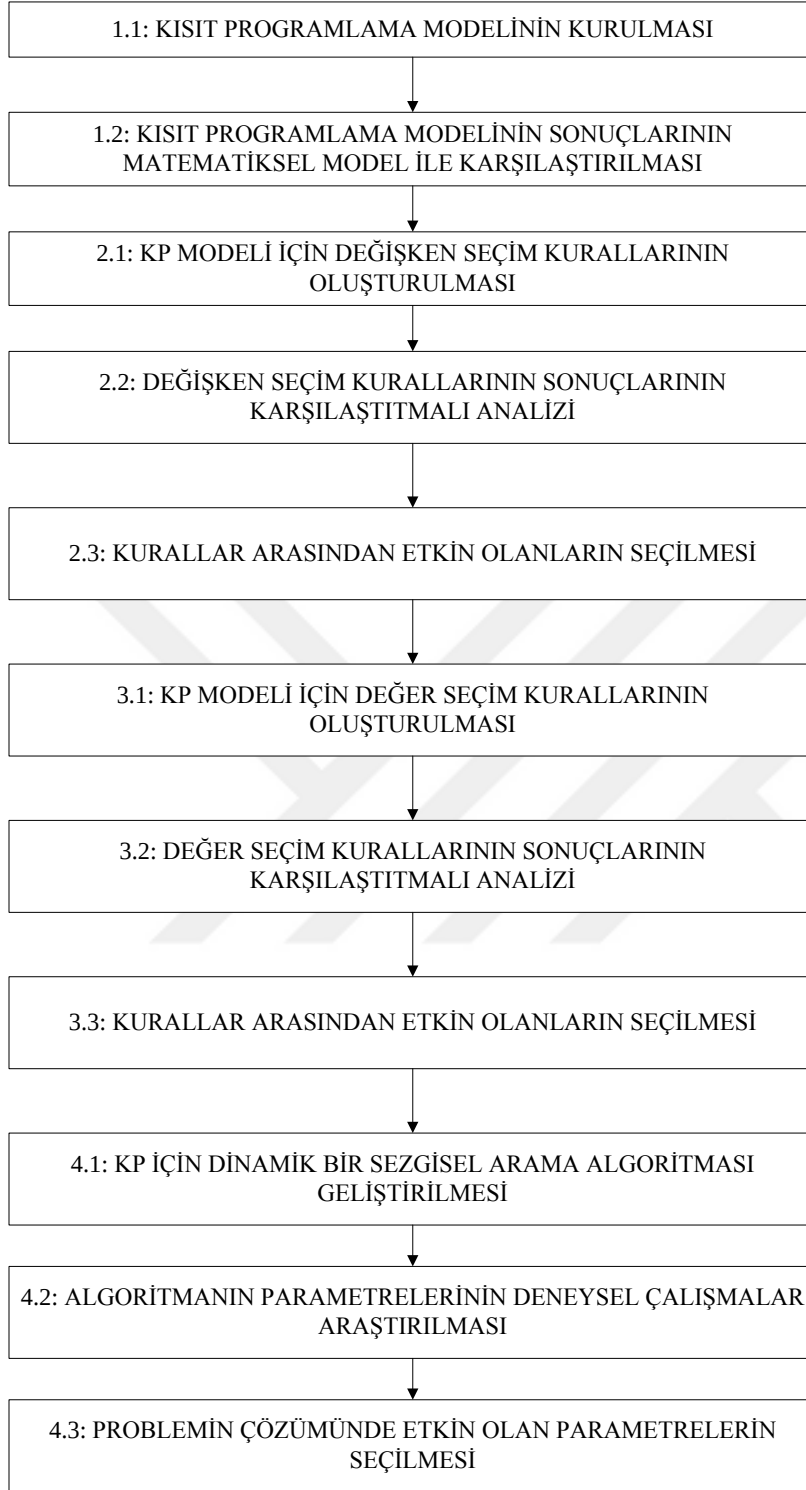
Tezin ikinci bölümünde karma modellenli montaj hattı dengeleme problemleri (KMMHDP) ile ilgili literatürde yer alan çalışmalardan bahsedilmiştir. Ayrıca genel olarak KP’de değişken seçimi ve değer seçimi üzerine yapılan çalışmalardan bahsedilmiştir. Tezin diğer çalışmalardan farkı ortaya konulmuştur.

Üçüncü bölümde montaj hattı dengeleme problemlerinin tanımı ile birlikte genel terimleri ve sınıflandırmaları verilmiştir. Ayrıca ele alınan karma modellenli montaj hatları ile ilgili bilgiler ve problemin matematiksel modeli bu bölümde yer almaktadır.

Dördüncü bölümde çözüm yöntemi olarak kullanılan kısıt programlamadan bahsedilmiştir. Kısıt programlamanın temel kavramları ve çözüm algoritması verilmiştir. Algoritmanın çözüm aşamaları ayrıntılı olarak anlatılmıştır.

Beşinci bölümde, ele alınan problem için kurulan KP modeli ve deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar verilmiştir. KP’de arama stratejilerinin geliştirilmesi amacıyla oluşturulan değişken seçim kurallarının özellikleri ve yapıları ayrıntılı bir şekilde anlatılmıştır. Yapılan deneysel çalışmaların sonucunda hangi değişken seçim kuralının daha iyi sonuç verdiği ve kuralların özellikleri belirlenmiştir. Değişken seçim kurallarının belirlenmesi sonrasında değer seçim kuralları üzerine çalışılmış ve oluşturulan değer seçim kurallarının özellikleri verilmiştir. Değişken seçim aşamasında belirlenen etkin kurallar burada kullanılarak etkin değişken-değer seçim kural ikilileri bulunmuştur. Tezin son aşamasında ise, problemin çözümünde etkin bir dinamik arama sezgiseli oluşturulmuş ve sezgiselin parametreleri deneysel çalışmalar sonucunda belirlenmiştir. Bu sezgiselde de değişken seçim kuralı olarak daha önce belirlenen değişken seçim kuralları kullanılmıştır. Bu tezde yapılan çalışmaların özeti Şekil 1.1’de verilmiştir.

Altıncı bölümde ise çalışmanın sonuçları değerlendirilmiştir ve bu çalışmanın sonuçları doğrultusunda gelecekte yapılabileceklerden bahsedilmiştir.



Şekil 1.1. Tezde yapılan çalışmaların özeti



2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Literatür araştırmasında, öncelikle montaj hattı dengeleme problemlerinden karma modeli, düz ve tek taraflı montaj hattı dengeleme problemleri için yapılan çalışmalar verilmiştir. Devamında ise, çözüm yöntemi olarak kullanılan kısıt programlama yönteminin kısa tarihçesinden ve kısıt programlama algoritmasının bir aşaması olan çözüm arama için geliştirilen arama stratejileri ile ilgili çalışmalardan bahsedilmiştir. Ayrıca kısıt programlama yöntemini montaj hattı dengeleme problemlerinin çözümünde kullanan az sayıda çalışma da verilmiştir. Bölüm sonunda tez çalışmasının literatürde yer alan çalışmalardan farkı ve özgünlüğü ortaya konulmuştur.

Montaj hattı dengeleme problemleri ile ilgili ilk çalışma Bryton (1954) tarafından yapılmıştır. Salveson (1955) ise 0-1 tamsayılı programlama modelini çalışmada önermiştir. Günümüze kadar birçok araştırmacı tarafından montaj hattı dengeleme problemlerinin farklı türleri ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır. Bu türlerden biri de karma modeli montaj hattı dengeleme problemleridir. MHDP'nin çok geniş bir konu olmasından dolayı literatürde bulunan çalışmalar düz, karma modeli, tek taraflı ve paralelliğin olmadığı montaj hattı dengeleme problemleri ile sınırlandırılarak özet olarak Çizelge 2.1'de verilmiştir.

Karma modeli montaj hattı ile ilgili ilk çalışma Arcus (1965) tarafından yapılmıştır. Modellerin talep yüzdelelerini kullanarak ağırlıklandırıldığı çevrim zamanlarını kullanarak COMSUAL metodunu ile görev atamalarını yapmıştır. Arcus (1965) çalışmada ağırlıklı çevrim süresi toplamını minimize etmiştir. Thomopoulos (1967) tek modeli montaj hattı dengeleme tekniğini karma modeli montaj hattı dengelemesi için uyarlamasını yapmıştır. Modellerin ağırlıklarını dikkate alarak minimum teorik istasyon sayısını ve çevrim süresini belirlemiş ve Kilbridge-Webster yöntemine göre atamaları yapmıştır. İşçilerin boş zamanlarını bir maliyet fonksiyonu olarak tanımlayıp minimizasyonunu amaçlamıştır. Thomopoulos (1970) modellerin öncelik ilişkilerinin birleştirilmesini ilk defa önermiştir. Düzensizlik indeksini kullanılarak istasyonlara görev atamasını yapmıştır. Macaskill (1972) modellere göre istasyon etkinliğini maksimize etmek için bir yöntem önermiştir. Gokcen ve Erel (1997) birlikte atanma/atanmama ve belirli istasyona atanma durumlarını da dikkate almışlardır. Amaç olarak istasyon sayısının minimizasyonunu, her bir model için belirli bir çevrim süresinden sapmanın minimizasyonunu ve atama kısıtlarının sağlanması

hedeflenmiştir. Amaç programlama kullanarak problemi çözmüşlerdir. Gokcen ve Erel (1998) çalışmalarında problemin 0-1 tamsayılı modelini kurmuşlardır. Erel ve Gokcen (1999) çalışmasında en kısa yol algoritmasını kullanarak istasyon sayısını minimize etmişlerdir. Haq, Rengarajan ve Jayaprakash (2006) istasyon sayısının minimizasyonu amaçladığı çalışmasında çözüm için genetik algoritma ve pozisyon ağırlığı yöntemini kullanarak başlangıç çözümünü bulduğu bir hibrit genetik algoritma kullanmıştır.

Karma modellenli montaj hatlarında araştırmacıların çok amaçlı modeller de kullandığı görülmektedir. Araştırmacılar amaç fonksiyonunda istasyon sayısının veya çevrim süresinin minimizasyonuna ek olarak; istasyon bazında modeller arasındaki süre farklılıkları, her bir model için fark eden hattın boş zamanının, düzgünlük indeksinin veya istasyon kurulum, işçilik gibi maliyetlerin minimizasyonunu gibi değerleri de dikkate alarak atamalar yapmışlardır. Rekiek, De Lit ve Delchambre (2000) çalışmasında öncelikle istasyon sayısını minimize etmeyi daha sonra ikinci aşamada ise tamamlanma süresinin minimizasyonunu amaçlamışlardır. Dengelemede, çevrim süresine ve istasyon içinde farklı modellerin farklı görev süresine bağlı olarak değişen istasyon sürelerine bağlı olan maliyet fonksiyonunu kullanmışlardır. Matanachai ve Yano (2001) istasyon sayısının minimizasyonu ile birlikte istasyonlar arası ve istasyon içi dengeyi de dikkate alan ilk çalışmadır. Sawik (2002) maksimum tamamlanma zamanını minimize etmeyi amaçlamıştır. İki aşamadan oluşan yöntemde ise önce iş yükü minimize etmiş, ikinci aşamada ise bir akış tipi çizelgeleme problemi çözülerek maksimum tamamlanma zamanı minimize edilmiştir. Karabatı ve Sayın (2003) çalışmalarında tip 2 karma modellenli montaj hattı dengeleme problemini ele almışlardır. En büyük alt çevrim süresini minimize etmeyi amaçlamışlardır. Simaria ve Vilarinho (2004) toplam çevrim süresini ve modellerin yüzdesi dikkate alınarak her bir istasyon içindeki denge minimize edilmişlerdir. Mendes, Ramos, Simaria ve Vilarinho (2005) tip 1 montaj hattı dengeleme problemini ele almıştır. İstasyon sayısının yanı sıra istasyonlar arası ve istasyon içi düzgünlük indeksini minimize etmeyi amaçlamışlardır. Bock (2008) istasyon sayısının minimizasyonunu ele alarak maliyet fonksiyonu olarak ileriki dönemlerin maliyetini şimdiki döneme çeken bir fonksiyon kullanmıştır. Cevikcan, Durmusoglu ve Unal (2009) işçileri takım olarak gruplayıp takımların boş zamanlarını ve istasyon sayısını minimize eden bir amaç ile hattı dengelemişlerdir. Hwang ve Katayama (2010) istasyon sayısının minimizasyonunun yanında istasyonlar arası sürenin varyasyonunu da azaltmayı amaçlamışlardır. Aynı zamanda model sıralamasını da yapmışlardır. Zhang ve Gen (2011) çevrim süresinin

minimizasyonu ile birlikte işçilerin beceri seviyelerine göre işçi atamasını da yapan çok amaçlı model önermişlerdir. Yagmahan (2011) çalışmasında denge gecikmesini, istasyonlar arası ve istasyon içi düzgünlük indeksini minimize ederek hattı dengelemiştir. Mamun, Khaled, Ali ve Chowdhury (2012) istasyon sayısı minimizasyonu, istasyonlar arası ve istasyon içi dengeyi göz önüne almışlardır. Görevlerin birlikte atanma veya atanamama durumlarını da dikkate almışlardır. Öztürk, Tunalı, Hnich ve Örnek (2013) çalışmalarında montaj hattını bir akış tipi çizelgeleme olarak ele alıp bütün taleplerin tamamlanma zamanının minimizasyonunu amaçlamışlardır. Yang, Gao ve Sun (2013) istasyon sayısının minimizasyonun yanında hattın yeniden dengelenmesinin maliyetini dikkate alarak görev ataması yapmıştır. Bu aşamaya kadar ele aldığımız çalışmalarda görev sürelerinin deterministik varsayıldığı hatlar için kullanılan amaç değerlerinden bahsedildi. Fattahi ve Samouei (2016) montaj hatlarının değişen durumlara göre yeniden dengelenmesini ele almışlardır. Çevrim süresinin minimizasyonu yanında en uygun işçi atamasını da yapmışlardır. Zhao, Hsu, Chang ve Li (2016) ürün kalitesi ve üretim etkinliğini birlikte artırmak amacıyla iki amaçlı bir model önermişlerdir. Çevrim süresi ile birlikte işçilerin mental iş yüklerini de minimize etmeyi amaçlamışlardır. Buyukozkan, Kucukkoc, Satoglu ve Zhang (2016) farklı bir modelleme tekniği kullanarak en büyük iş yüküne sahip istasyondan başlayarak sırasıyla diğer istasyonların iş yükünü bir önceki istasyonun iş yüküne göre dengeledikleri bir çalışma yapmışlardır. Çevrim süresinin minimizasyonunu amaçlamışlardır.

Görev sürelerinin stokastik varsayıldığı da deterministik hatlarda olduğu gibi ana amaçlar genel olarak istasyon sayısının veya çevrim süresinin minimizasyonu olarak ele alınmıştır. Ancak bunun yanında farklı değerlerin optimize edilmesi de amaca ekleyen çalışmalar mevcuttur. Chakravarty ve Shtub (1985) toplam işçilik maliyetinden, hazırlık maliyetinden ve elde bulundurma maliyetinden oluşan toplam üretim maliyetini minimize etmiştir. McMullen ve Frazier (1997) Tip 1 montaj hattını ele almıştır ve paralel işe izin verilmişlerdir. On adet görev atama kuralına göre görevler atanmışlardır. Bu atamaları simülasyonunu yaparak performanslarını karşılaştırmışlardır. McMullen ve Frazier (1998) ve McMullen ve Tarasewich (2003) karma modeli, paralel istasyonlu ve stokastik zamanlı montaj hattı dengelemeyi ele almışlardır. Çeşitli amaçları dikkate almasına rağmen asıl olarak Tip 1 problemini ele almışlardır. Hattın verimliliğini, çevrim zamanı içinde tamamlanan işlerin oranını ve bu ikisinin çarpımının maksimizasyonunun yanında, işçilik ve ekipman maliyetlerinin minimizasyonunu amaçlamışlardır. Merengo, Nava ve Pozzetti

(1999) istasyon sayısının minimizasyonunun yanında tamamlanamayan işlerin sayısının minimizasyonu amaçlanmışlardır. Kullanılan formülleri ve hesaplama adımlarını verilmişlerdir. Farklı montaj hattı tipleri için bu formülizasyonun değişimini tartışmışlardır. Bukchin, Dar-El ve Rubinovitz (2002) stokastik sürelerle bağlı olarak darboğaz istasyonu ve süresini belirleyerek hattın çıktı hızını maksimize etmeyi amaçlamışlardır. Zhao, Liu, Ohno ve Kotani (2007) Tip 1 montaj hattı dengeleme problemini çalışmışlardır. İşlerin belirlenen zamanda tamamlanmamasından kaynaklı olarak ortaya çıkan fazla zamanların beklenen değerlerinin minimizasyonunu amaçlamıştır. Venkatesh ve Dabade (2008) Tip 2 karma modellenli montaj hattını ele almışlardır. Genetik algoritma kullanarak dengeleme yapmışlardır. On farklı uygunluk değerini karşılaştırarak hangisinde daha iyi bir çözüm elde edildiğini belirlemişlerdir. Manavizadeh, Rabbani, Moshtaghi ve Jolai (2012) problemi istasyon sayısının minimizasyonu, çevrim süresinin minimizasyonu, istasyonlar arası dengeleme ve istasyon içi dengelemeyi birlikte amaçlayan çok amaçlı olarak modelleyip çözmüştür. Tiacci (2012) Görev atamaların yapılmış olan hattın çıktı hızı, kullanım oranı gibi çeşitli performans değerlerini belirlemek için simülasyon yapmıştır. Ayrıca, paralel istasyonların, ara stokların ve görev süresi değişkenliğinin etkisini incelemiştir. Stokastik ve deterministik görev sürelerinden farklı olarak, Van Hop (2006) görev süreleri bulanık kabul edip Tip 1 KMMHDP'yi geliştirdiği sezgisel yöntemle çözmüştür.

Amaçlarına göre özetleri verilen çalışmalarda genel olarak sezgisel yöntemler kullanılarak problemlerin çözümünün elde edildiği görülmektedir. Problemin zorluğundan dolayı kesin sonuç veren algoritmaların büyük problemlerin çözümünde yetersiz kalması sezgisel yöntem kullanımının en önemli sebebidir. Çizelge 2.1'deki özet gösterimde çalışmaların çözüm yöntemleri de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Tek taraflı, düz, paralelliğin olmadığı KMMHDP literatürü

Tip 1	Deterministik	• (Arcus, 1965) ()(S) • (Thomopoulos, 1967), (Boş zaman min.) (S) • (Thomopoulos, 1970), (DE) (S) • (Macaskill, 1972), (Model Bazlı HE Maks.) (S) • (Gokcen ve Erel, 1997), (Model bazlı Çev. Sür Sap. Min)(AP) • (Gokcen ve Erel, 1998), () (0-1 Programlama) • (Erel ve Gokcen, 1999), (Model bazlı Denge Kay. Min) (EKY) • (Rekiek ve diğerleri, 2000), (Tam. Süresi Min., MM)(GA) • (Matanachai ve Yano, 2001), (İİD, İAD) (Beam Search) • (Sawik, 2002), (Mak. Tamamlanma Zam. Min.)(Mat.M, S) • (Mendes ve diğerleri, 2005), (İİD, İAD, Per. Değ. Bul.)(TB, Sim.) • (Haq ve diğerleri, 2006)()(Konum Ağırlığı-GA hibrit) • (Bock, 2008), (MM) (Dist. Search, TA) • (Cevikcan ve diğerleri, 2009), (Boş zam. Min.) (Takım odaklı MHDP, S) • (Hwang ve Katayama, 2010), (İAD, Sıralama)(GA) • (Yagmahan, 2011), (Den. Gec., İİDE, İADE)(Çok Amaçlı KKA) • (Mamun ve diğerleri, 2012), (İİD, İAD) (GA) • (Yang ve diğerleri, 2013), (Model Bazında İş yükü Değ. Min.,Yeniden Den. Mal. Min.) (Çok Amaçlı GA)
	Stokastik	• (Chakravarty ve Shtub, 1985), (İM and İKM) (S) • (McMullen ve Frazier, 1997), (Farklı Per. Değ. Kar.) (S,Sim.) • (McMullen ve Frazier, 1998), (MM, HE, TO) (TB) • (Merengo ve diğerleri, 1999), (TO) (S) • (Bukchin ve diğerleri, 2002), (Çıktı hızı Maks.) (S) • (McMullen ve Tarasewich, 2003), (MM, HE, TO) (KKA) • (Zhao ve diğerleri, 2007), (Tamamlanmama Oranı) (S) • (Manavizadeh ve diğerleri, 2012), (İİD, İAD) (Çok amaçlı GA) • (Tiacchi, 2012), (Farklı Per. Değ. Hes.) (Sim.) • (Van Hop, 2006), (Bulanık Gör. Sür.) (S)
Tip 2	Deterministik	• (Karabatı ve Sayın, 2003), (C) (MM, S) • (Simaria ve Vilarinho, 2004), (C, İİD) (GA) • (Zhang ve Gen, 2011) (C, İşçi Ataması)(GA) • (Öztürk ve diğerleri, 2013)(Tamamlanma zamanı)(KP) • (Fattahi ve Samouei, 2016)(C, İşçi Ataması)(S) • (Zhao ve diğerleri, 2016)(C, Mental İşyükü Min.)(GA) • (Buyukozkan ve diğerleri, 2016)(C)(Arı kolonisi, TA)
	Stokastik	• (Venkatesh ve Dabade, 2008)(Uyg. Fonk. Kar.)(GA)

C: Çevrim süresi, İM: İşçilik Maliyeti, İKM: İstasyon Kurulum Maliyeti, S: Sezgisel, Sim: Simülasyon, MM: Maliyet Minimizasyonu, HE: Hat Etkinliği, TO: Tamamlanma Oranı, TB: Tavlama Benzetimi, KKA: Karınca Kolonisi Algoritması, İİD: İstasyon İçi Denge, İAD: İstasyonlar Arası Denge, GA: Genetik Algoritma, DE: Düzgünlük Endeksi, AP: Amaç Programlama, EKY: En Kısa Yol, Mat.M: Matematiksel Model, TA: Tabu Arama, İİDE: İstasyon İçi Düzgünlük Endeksi, İADE: İstasyonlar Arası Düzgünlük Endeksi, KP: kısıt programlama

Meta sezgisel kullanan çalışmalarda araştırmacıların genetik algoritmayı daha fazla kullandığı görülmektedir (Haq ve diğerleri, 2006; Hwang ve Katayama, 2010; Mamun ve diğerleri, 2012; Manavizadeh ve diğerleri, 2012; Rekiek ve diğerleri, 2000; Simaria ve

Vilarinho, 2004; Venkatesh ve Dabade, 2008; Yang ve diğerleri, 2013; Zhang ve Gen, 2011; Zhao ve diğerleri, 2016). Tavlama benzetimi (McMullen ve Frazier, 1998; Mendes ve diğerleri, 2005), karınca kolonisi (McMullen ve Tarasewich, 2003; Yagmahan, 2011), tabu arama (Bock, 2008; Buyukozkan ve diğerleri, 2016), demet arama (Matanachai ve Yano, 2001) meta sezgiselleri de araştırmacılar tarafından kullanılmıştır. Araştırmacılar tarafından simülasyon da başka bir yöntem ile bulunan atamaların performans değerlendirme aracı olarak kullanılmıştır (Fattahi ve Samouei, 2016; McMullen ve Frazier, 1997; Mendes ve diğerleri, 2005; Tiacci, 2012). Hat dengelemesinde çok fazla kombinasyon çıkması ve her biri için simülasyon modelinin ayrı ayrı çalıştırılmasından dolayı simülasyon çok zaman almaktadır. Bundan dolayı dengeleme aşamasında simülasyon tercih edilmediği görülmektedir. Bunun dışında amaç programlama (Gokcen ve Erel, 1997) ve en kısa yol (Erel ve Gokcen, 1999) algoritmaları ile de problemin çözüldüğü görülmektedir. Öztürk ve diğerleri (2013) ise bir çizelgeleme problemi gibi ele alarak çözdükleri çalışmada karma tamsayılı programlamayı ve kısıt programlamayı birlikte kullanmışlardır. Bahsedilen çalışmaların dışında kalan ve Çizelge 2.1’de verilen diğer çalışmalarda ise araştırmacılar kendi geliştirdikleri sezgisel yöntemleri kullanarak problemleri çözmüşlerdir.

Karma modellenli montaj hatları için incelediğimiz literatür araştırmasında hem deterministik hem de stokastik görev süreli Tip 2 karma modellenli hat dengeleme probleminin araştırmacılar tarafından daha az çalışıldığı görülmüştür. Sivasankaran ve Shahabudeen (2014) yaptıkları literatür çalışmasında bu çıkarımı desteklemişlerdir ve genel olarak montaj hattı çalışmalarında Tip 2 MHDP’nin daha az çalışıldığını özellikle de karma modellenli ve çok modellenli hatlarda çok az sayıda çalışma olduğunu vurgulamışlardır. Araştırmacıların kullandıkları çözüm yöntemleri bazında değerlendirdiğimizde ise daha çok sezgisel yöntemlerin kullanıldığı, optimum sonuç veren yöntemlere daha az rastlandığı görülmektedir.

Bu tez çalışmasında problemin çözümünde kısıt programlama yöntemi kullanılmıştır. Çizelgeleme (Sel, Bilgen, Bloemhof-Ruwaard ve Van der Vorst, 2015; Serra, Nishioka ve Marcellino, 2012), tedarik zinciri (Lee ve Lee, 2013; Rodrigues ve Magatão, 2007), üretim (Banaszak, Zaremba ve Muszyński, 2009; Soto ve diğerleri, 2012), personel çizelgeleme (He ve Qu, 2012; Qu ve He, 2009) ve atama (Bui, Pham ve Deville, 2013) gibi bir çok

kombinatoriyal optimizasyon probleminde kısıt programlama araştırmacılar tarafından başarılı bir şekilde uygulanmıştır.

Kısıt programlamanın temeli, Mackworth'nin (1977), yay tutarlılık tekniği ile birlikte ele aldığı, kısıt sağlama problemlerine dayanmaktadır. Ayrıca Lauriere (1978) kombinatoriyal problemlerin çözümü ve tanımlaması için ALICE programlama dilini geliştirerek bu konuda ilk çalışmaları yapmışlardır. 1980'lerde Prolog dili mantıksal programlama çalışma grubu tarafından geliştirilmiş ve temel mantıksal programlama algoritması yerine kısıt programlama çözüm algoritması kullanılmışlardır. Prolog II, eşitsizlik ve eşitlikler için kısıt programlama çözücüsü olarak 1980'lerde kullanılmıştır. Bu dili temel alarak, Colmerauer (1990), Jaffar ve Lassez (1987), Van Hentenryck (1989:20-55) ve Wallace, Novello ve Schimpf (1997) kısıt programlama için çeşitli diller ve bilgisayar programları geliştirmişlerdir. 1990'larda ise araştırmacılar Prolog tabanlı mantıksal kısıt programlama dilini temel alarak genel amaçlı programlama dillerini kısıt programlama özelliklerini sağlayacak şekilde kısıt programlama dillerine çevirmişlerdir (Lustig ve Puget, 2001). Bu programlara örnek olarak ILOG Solver for C++ gösterilebilir. Ayrıca bunların yanında, araştırmacılara ele aldıkları problemlere özgü çözüm algoritmaları geliştirmeye olanak sağlayan OZ (Smolka, 1995) ve CLAIRE (Caseau ve Laburthe, 1995) gibi diller de geliştirilmiştir. Van Hentenryck (1999: 32-77) "Optimization Programming Language(OPL)" geliştirmiştir. Bu dil hem matematiksel programlama hem de kısıt programlama için kullanılabilir. 2000'ler de ise IBM LOG Optimization Studio ve ECLiPSe programları geliştirilerek farklı sürümleri kullanıma sunulmuştur.

Kısıt programlama üç ana aşamadan oluşmaktadır. Bunlar; tanım kümesi azaltma, çözüm arama ve kısıt yayılımı aşamalarıdır (Apt, 2003: 54-80). Bu tez çalışması kapsamında yapılan çalışmalarda ise çözüm arama aşamasında kullanılan ve değişken ve değer seçim aşamalarını kapsayan arama stratejileri ele alınmıştır. Bu aşamada hangi değişkenden başlanarak dallanma yapılacağının ve bu değişkene hangi değer atanacağının belirlenmesi amacıyla kurallar oluşturarak etkin bir strateji belirlenmesi için araştırmacılar çalışmalar yapmışlardır. Bu çalışmalardan aşağıda bahsedilmiştir:

Christodoulou ve Stamatopoulos (2002) kabin görevlileri için çizelgeleme problemini ele almışlardır. İki alt problemten oluşan problemi kısıt programlama modelini kurup çözmüşlerdir. Birinci alt problemde uçuşların gruplaması yapılmaktadır. Örneğin, bir uçuş

görevlisinin hiç ara vermeden görev alacağı uçuşlar gruplamışlardır. Birinci aşamada eşleştirme için değişken seçiminde en yüksek uçuş süresine sahip olan uçuşlar önce seçilmiştir. İkinci aşamada, atama yapılacak uçuşun zaman dilimine kadar en düşük uçuş saatine sahip olan uçuş personeli seçilerek atama yapılmıştır.

Rousseau, Gendreau, Pesant ve Focacci (2004) zaman kısıtlı araç rotalama problemini çalışmışlardır. Problemi iki alt problem şeklinde ele almışlar ve rotaların oluşturulması aşamasını kısıt programlama olarak modellemişlerdir. Değişken seçimi için bir önceki aşamada seçilen düğüme direk bağlı olan düğümü seçerek en kısa yolu oluşturan bir strateji kullanmışlardır. Değer seçiminde ise alınan yolu kısaltacak şekilde düğümlere hangi sırada uğranacağını belirlemişlerdir. Birbirine uzaklığı en yakın mesafeye sahip olan düğümleri birbiri ardınca sıralamışlardır.

Boussemart, Hemery, Lecoutre ve Sais (2004) çalışmalarında ağırlıklı derecelendirme sezgiselini önermişlerdir. Bu sezgiselde problem bilgi toplamak amacıyla öncelikle rastgele değişken seçimi ile başlamaktadır. Bu aşamada kısıtların hangisinin kaç defa problemin çözüme ulaşmasını engellediği belirlenmektedir. Daha sonra bu kısıtlarla en fazla ilişkisi olan değişkenden başlanarak arama yapılmaktadır.

Grimes ve Wallace (2007) çalışmalarında ağırlıklı derecelendirme sezgiselinde ağırlıklandırma için yapılan örneklemede farklı yöntemlerin kullanılmasının çözüme etkisini araştırmışlardır. Bunu değişken seçim kuralları ile kombine ederek çözüme ulaşmada etkin örnekleme yöntemini belirlemişlerdir.

Wallace ve Grimes (2008) çalışmalarında farklı örnekleme ve değişken seçim stratejileri kullanarak ağırlıklı derecelendirme sezgiselinin deneysel çalışmalarla analizini yapmıştır. Rastgele seçimin örneklendirmede daha etkin olduğunu belirlemiştir. Ayrıca, farklı seçim stratejilerini literatürde bulunan farklı problem tiplerinde kullanarak algoritmaların etkinliğini araştırmıştır.

Qu ve He (2009) hemşire çizelgeleme problemini kısıt programlama ile modellemişlerdir ve bir iteratif çözüm içinde en fazla yoğunluğu olan hemşireyi seçerek dallanılmaktadır. Değer seçiminde ise öncelikle gece vardiyası için atama yapılmaktadır.

Balafoutis ve Stergiou (2010) çalışmasında hem değişken sıralamasında hem de kısıt tutarlılık algoritmalarında arama sırasında topladığı bilgileri kullanarak daha etkin bir arama yapan bir sezgisel önermiştir. Böylelikle hem arama ağacının daha hızlı budanmasını hem de tutarlılık aşamasında yapılan işlemlerin azalmasını sağlamıştır.

Crawford, Soto, Castro ve Monfroy (2011) belirledikleri değişken ve değer seçim kurallarının kombinasyonlarını kullanarak örnek problem olarak seçtiği N-vezir problemini çözmektedir. Bir seçim fonksiyonu ile kullanılan kural daha iyi bir çözüme ulaşmadığı durumda kuralı değiştirip aramaya devam etmektedir. Böylelikle daha etkin bir arama yapmışlardır. Crawford ve diğerleri (2013) benzer çalışmalarında seçim fonksiyonunda kullanılan değerlerin ağırlıklandırılmasında parçacık sürü optimizasyonu yönteminden yararlanmışlardır. Böylelikle daha etkin sonuçlar veren seçim fonksiyonunu belirlemişlerdir. Belirledikleri kuralları bu seçim fonksiyonunu kullanarak arama esnasında değiştirmişlerdir.

Soto ve diğerleri (2013) çalışmalarında kısıt programlama algoritmasının çalışması esnasında kullanılan kuralları zamanla değiştirerek aramayı daha etkin yapmışlardır. Belirledikleri sekiz kural arasından hangi kuralın seçileceğini genetik algoritma ve parçacık sürü optimizasyonu kullanarak karar vermişlerdir.

Soto ve diğerleri (2015) kısıt programlama için genel bir arama algoritması geliştirmişlerdir. Bu algorithmada arama esnasında çözümün etkinliğini artırmak amacıyla belirlediği değişken ve değer seçim stratejilerini bir performans fonksiyonuna bağlı olarak değiştirmektedir. Bu stratejiler dört adet değişken seçimi ve iki adet değer seçiminin kombinasyonundan oluşmaktadır. Algoritmanın performansını ölçmek için literatürde bulunan çeşitli problemler üzerinde deneysel çalışmalar yapmıştır. Bir diğer çalışmalarında Soto ve diğerleri (2015) güçlü bir veritabanı tekniği olan ve fonksiyonları derecelendirmede kullanılan ufuk çizgisi yöntemini kullanarak seçim fonksiyonunu belirlemişlerdir. Belirlenen fonksiyon ile değişken ve değer atama stratejilerini arama esnasında değiştirmişlerdir.

Siala, Hebrard ve Huguet (2015) montaj hattında araç sıralama problemi için kısıt programlama modelini kurmuşlar ve sezgisel bir çözüm algoritması önermişlerdir. Önerdikleri sezgiselde kuralları oluşturmak için problemi 4 ana kategoriye ayırmışlardır.

Bunlar: dallanma, arama, seçme ve birleştirme. Her bir aşama için ayrı kurallar oluşturup bunların kombinasyonlarını deneyerek en iyi sonucu veren kurallar kombinasyonunu belirlemişlerdir.

Bu çalışmalara ek olarak MHDP'nin çözümünde ise KP yöntemini kullanan çalışmalar, az sayıda da olsa literatürde yer almaktadır (Topaloglu ve diğerleri, 2012). Bu çalışmalar aşağıda verilmiştir:

Bockmayr ve Pisaruk (2001) MHDP'de KP'yi ilk uygulayan çalışmadır. Tamsayılı programlama ve KP birlikte kullandıkları çalışmalarından dal kesme yöntemine dayalı bir yöntem önermişlerdir. Yapılan sayısal deneyler MHDP'nin çözümünde KP'nin alternatif bir modelleme ve çözüm yöntemi olduğunu göstermişlerdir.

Del Valle, Márquez, Gasca ve Toro (2003) montaj hattında toplam montaj süresini minimize etmek amacıyla montaj görevlerinin seçilmesi ve sıralanması problemi için bir kısıt programlama modeli kullanmışlardır. Modelde Ve/Veya yapısındaki kısıtları kullanarak görevler arasında alternatif durumları dikkate almışlardır.

Pastor, Ferrer ve García (2007) kısıt programlama ile Tip 1 ve Tip 2 MHDP modellerini geliştirmişlerdir. Deneysel çalışmalarda tamsayılı programlama modeli ile geliştirdikleri modellerin karşılaştırmalarını çözüm değerlerini dikkate alarak yapmışlardır. Kısıt programlama büyük boyutlu deney setlerinde daha iyi sonuç verse de iki yöntemin birbirlerine üstün olduğunun söylenemeyeceği sonucuna ulaşmışlardır.

Topaloglu ve diğerleri (2012) çalışmalarında, alternatif öncelik ilişkilerinin kullanıldığı montaj hattı probleminde ve/veya kural yapısını kullanan bir model önermiştir. Tam sayılı programlamayı ve kısıt programlamayı kullanarak problemin çözümünü elde etmiştir. Kısıt programlamanın problemin çözümü için daha uygun olduğunu göstermişlerdir.

Alağuş, Yüzükırmızı ve Türker (2013) çalışmalarında Tip 2 stokastik görev süreli MHDP için bir model önermişlerdir. Modelde kısıt programlamayı görevlerin istasyonlara atanmasında kullanmışlar ve kapalı kuyruk ağı modelini de çıktı hızı değerlerini hesaplamada kullanmışlardır. Çıktı hızı en büyük olan atamayı optimum atama olarak belirlemişlerdir.

Öztürk ve diğerleri (2013) ise karma modellenli esnek MHDP ele almışlardır ve bir çizelgeleme probleminin çözümü mantığında çözerek taleplerin toplam tamamlanma zamanını minimize etmişlerdir. Kısıt programlama ve tamsayılı programlamayı birlikte kullanmışlardır. Öztürk, Tunalı, Hnich ve Ornek (2015) benzer şekilde ele aldıkları problemde paralel istasyonların da bulunduğunu kabul etmişlerdir.

Pınarbaşı, Yüzükırmızı ve Toklu (2016) ele aldıkları problemde görev sürelerinin stokastik olduğunu varsaymışlardır. İstasyonlar arasındaki stokastik durumların modellenmesinde kuyruk ağı yöntemlerini kullanmışlardır ve istasyonlara görev atamalarını kısıt programlama kullanarak yapmışlardır. Atamaların çıktı oranlarına göre optimum atama kombinasyonunu bulmuşlardır.

Yapılan bu tez ile literatüre aşağıdaki konularda katkı sağlanmıştır:

MHDP ile ilgili yapılan çalışmalar incelendiğinde, Çizelge 2.1’de görüldüğü üzere Tip 1 KMMHDP ile ilgili birçok çalışma olmasına karşın Tip 2 KMMHDP ile ilgili çalışma az sayıdadır. Sivasankaran ve Shahabudeen (2014) literatür taraması çalışmalarında da bu çıkarıma ulaşmışlardır. Tip 2 karma modellenli MHDP için kısıt programlama kullanarak yeni bir model geliştirmesi yönünden tez literatüre katkı sağlamaktadır.

Literatür araştırmasına göre, kısıt programlamada yapılan çalışmalara bakıldığında genel olarak yöntem özelinde değişken ve değer seçim kurallarının geliştirilmesi üzerine çalışmalar yapıldığı görülmektedir. Problem özelinde yapılan çalışmalarda araştırmacılar tarafından bazı kurallar kullanılmış olsa da, alternatif kurallar araştırılmamış ve problem parametrelerini dikkate alarak oluşturulabilecek etkin kuralların belirlenmesi üzerine bir çalışma yapılmadığı görülmektedir. Tezde yapılan çalışmada KMMHDP’nin girdi parametreleri dikkate alınarak problem için ilk defa değişken seçim ve değer seçim kuralları oluşturulmuştur. Bu kurallar deney setleri ile test edilmiş ve etkin kurallar belirlenmiştir. Böylelikle, probleme özgü arama stratejileri oluşturup literatüre katkı sağlanarak teze özgünlük katılmıştır.

Ayrıca tez kapsamında MHDP çözümü için dinamik bir sezgisel arama algoritması geliştirilerek literatüre katkı sağlanmıştır. Bu algoritma diğer kombinatoriyal optimizasyon

problemlerinin çözümü için de problemin özellikleri dikkate alınarak revize edilip uygulanabilir.



3. MONTAJ HATTI VE MONTAJ HATTI DENGEME PROBLEMLERİ

Bir ürün veya yarı mamul birden fazla alt parçadan oluşmaktadır. İmalat sürecinde, bir ürünün alt parçalarının bir araya getirilerek ürünün bir bütün olarak elde edilmesi işlemine montaj adı verilmektedir. Birbirine malzeme taşıma sistemi ile bağlı sıralı iş istasyonlarından oluşan, ürünün montajı için gerekli görevlerin aralarındaki teknolojik öncelik ilişkileri dikkate alınarak belirlenen sırada belirlenen işçiler tarafından yapıldığı sisteme montaj hattı denilmektedir.

Montaj hattında ürünün kesikli ama düzenli bir akış ile hat boyunca ilerlemesinden dolayı kesikli akış tipi üretim sistemlerinde sınıflandırılmaktadır. Beyaz eşya, otomotiv, mobilya gibi birçok sektörde kullanılan bir üretim sistemidir. Yüksek işçi ve makine verimliliği, işin sürekli olarak tekrar edilmesi ile çalışanların işte uzmanlaşması, ürün kalitesinde ve iş süresinde standartlaşma sağlaması, işçilere iş yükünün çalışanlara dengeli dağıtılması ve süreç içi stokların azalması gibi yararlarından dolayı birçok firmanın üretim sistemi içerisinde yerini almıştır.

3.1. Montaj Hattı Temel Kavramları

Montaj hattı için kullanılan temel kavramlar aşağıdaki gibidir.

Operasyon/görev/işlem: Bir montaj işleminde, yapılması gereken işlemlerin bölünebildiği en küçük kısmıdır. i indisi ile gösterilir. Toplam görev sayısı N ile ifade edilir.

Görev süresi: Bir görevi tamamlamak için gerekli süredir. t_i ile gösterilir.

İş istasyonu: Montaj hattı üzerinde görevlerin yapılması için belirlenen alandır. k indisi ile gösterilir. Toplam istasyon sayısı S ile ifade edilir.

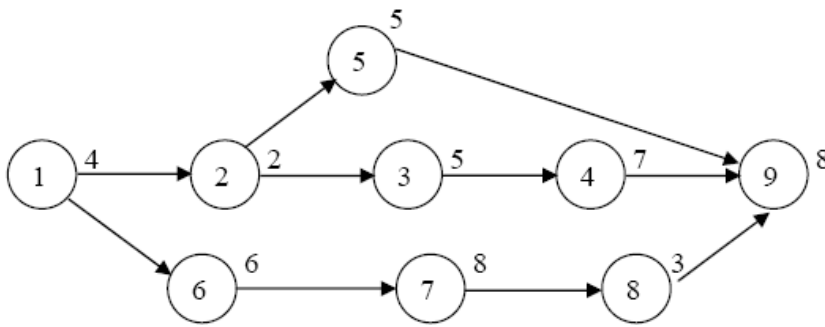
İstasyon süresi: İstasyona gelen bir parça için, o istasyonda yapılacak görevlerin süreleri toplamı istasyon süresini verir. k istasyonunun süresi S_k ile gösterilir ve montaj hattında bir istasyonun süresi, çevrim süresine eşit veya küçük olmak zorundadır.

Çevrim süresi: Montaj hattında, ürünün istasyonda işlemlerinin tamamlanabilmesi için gerekli olan en büyük süredir. Talebe bağlı olarak değiştiği gibi en büyük görev süresine de bağlıdır. Çevrim süresi üretim hızını vermektedir. Çevrim süresi C ile gösterilir. Talebe bağlı olarak toplam çalışma süresinin toplam talebe oranlanması ile bulunmaktadır. Diğer bir şekilde ise istasyona atanan görevlerin süreleri toplamı alındığında en büyük istasyon süresi de çevrim süresi olarak kabul edilebilmektedir.

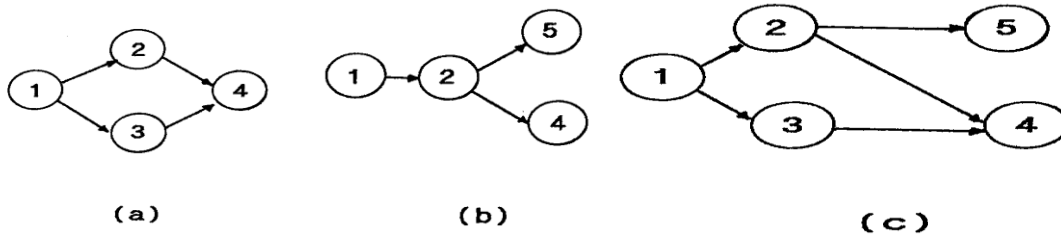
Toplam görev süresi: Bir ürünün üretiminde montaj hattında yapılan bütün görevlerin standart süreleri toplamıdır. T ile gösterilir.

İstasyon gecikme süresi / boş zaman: Çevrim süresi ile iş istasyonunun süresi arasındaki fark iş istasyonunun boş zamanını verir. Bir istasyonun boş zaman $C - S_k$ olarak hesaplanır.

Öncelik ilişkisi diyagramı: Ürünün montajında teknik zorunluluklardan dolayı işlerden bazıları yapılmadan diğer işler yapılamaz. Bu sebepten dolayı işler arasında öncelik sonralık ilişkilerini oluşturulan diyagrama öncelik ilişkileri diyagramı denir. 9 görevli bir ürün montajı için öncelik diyagramının örneği ağ yapısı şeklinde Şekil 3.1’de verilmiştir. Çok modelli hatlarda ise modellerin farklı öncelik diyagramları birleştirilerek tek bir diyagram şeklinde gösterilmektedir. Şekil 3.2’de a ve b diyagramları iki farklı modelin öncelik diyagramıdır. Birleştirilmiş öncelik diyagramı ise Şekil 3.2-c’de görülmektedir.



Şekil 3.1. 9 görevli bir montaj hattı için örnek öncelik diyagramı



Şekil 3.2. Birleştirilmiş öncelik diyagramı

Denge kaybı: Bir montaj hattında istasyonlarda oluşan boş sürelerin ortalamasının çevrim süresine bölünmesi ile bulunur. Montaj hattında istenen ve esas olan denge kaybının en az olmasıdır. $DK = \frac{(S * C - \sum t_i)}{S * C} * 100$ eşitliği ile hesaplanır.

Hat etkinliği: Montaj hattının verimliliğini verir ve $HE = \frac{\sum t_i}{S * C}$ ile hesaplanır.

3.2. Montaj Hattı Dengeleme Problemleri

Montaj hatlarının kullanıldığı üretim sistemlerinde, genel olarak son ürün montaj hatlarında birleştirilerek elde edilmektedir. Bundan dolayı müşteri taleplerinin zamanında ve hızlı karşılanması hattın iyi tasarlanması ile mümkündür. Montaj hatlarının en verimli şekilde kurulması hat etkinliğini maksimize veya bir başka şekilde ifade edersek istasyonlar arası süre farklılığından kaynaklanan denge kaybını minimize edilmesi ile sağlanabilir. Bu amaçla yapılan görevlerin öncelik ilişkilerini dikkate alarak istasyonlara dağıtılması işi montaj hattı dengelemesi olarak isimlendirilmiştir. Görevlerin bir veya birden fazla amacı dikkate alarak istasyonlara nasıl dağıtılacağı problemi ise montaj hattı dengeleme problemi (MHDP) olarak tanımlanmıştır.

Montaj hattı dengeleme problemi ilk olarak Bryton (1954) tarafından bir tez çalışmasında ele alınmıştır. Bilimsel olarak montaj hattının ele alındığı ilk çalışma olarak literatüre girmiştir. Montaj hatlarının dengelenmesi ile ilgili ilk makale Salveson'un (1955) çalışmasıdır. Bu çalışmada montaj hattı dengeleme probleminin 0-1 tam sayılı modelini ortaya koymuştur. Modelde istasyonlardaki boş zamanı en küçüklemeyi amaçlamıştır. Bu çalışmadan günümüze kadar birçok çalışma yapılmış olan montaj hattı ve montaj hattı dengeleme konuları endüstri mühendisliğinin önemli çalışma alanlarından birisi olmuştur.

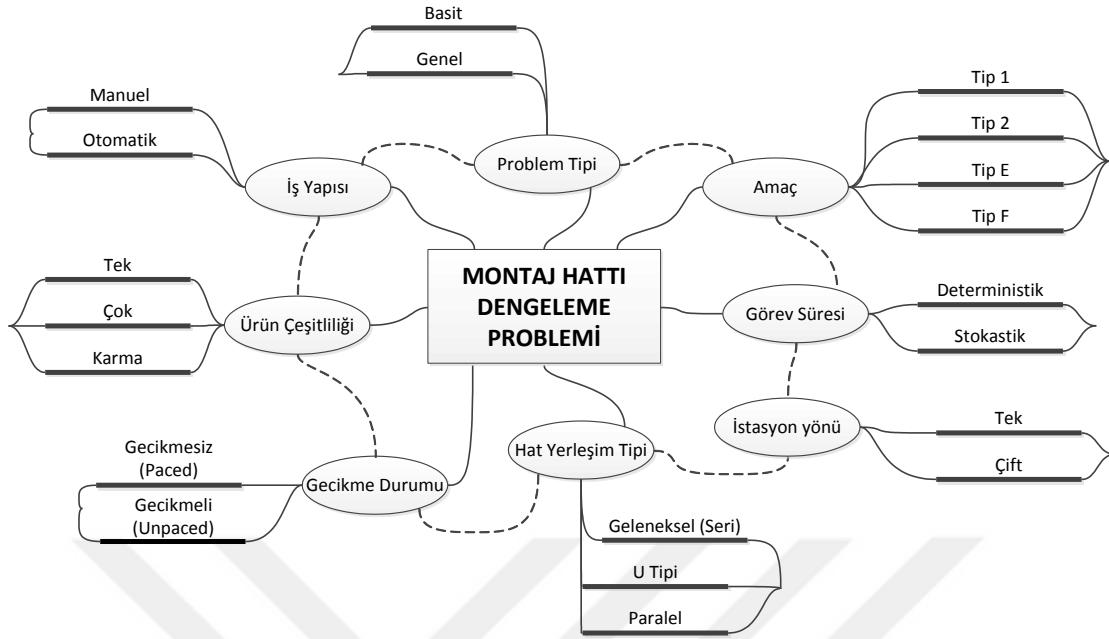
MHDP görevlerin istasyonlara atanmasında aşağıdaki temel kısıtların sağlanması gereklidir:

- Bütün görevler en az bir istasyona atanmalıdır.
- İstasyonun açılması için en az bir görevin o istasyona atanmış olması gerekir.
- Görevler bölünemezler ve süreleri belirlidir.
- Her bir istasyon için toplam süre, hattın çevrim süresini geçemez.
- Görevler istasyonlara atanırken aralarındaki öncelik ilişkileri bozulmadan atama yapılmalıdır.

Bu ana kısıtların yanında hattın özellikleri ve görevlerin özellikleri dikkate alınarak iki görevin birlikte aynı istasyona atanmaması veya atanması, bir görevin sadece belirli bir istasyona atanması gibi çeşitli kısıtlar da MHDP’de dikkate alınabilir.

3.2.1. Montaj hattı dengeleme problemlerinin sınıflandırılması

MHDP geçmişten günümüze araştırmacıların tarafından birçok çalışmanın yapıldığı endüstride önemli bir problemdir tipidir. Zaman içerisinde gelişen üretim şartlarının etkisine ve değişen müşteri taleplerine bağlı olarak MHDP literatürde çeşitli özelliklerine göre sınıflandırılmıştır. Hat üzerinde üretilen model sayısı, dengelemede kullanılan amaç, görev sürelerinin değişkenlik durumu, ürünün gecikme durumu, hattın yerleşim tipi, işin yapısı, problemin tipi ve istasyon yönü göz önüne alınarak Şekil 3.3’te verilen MHDP sınıflandırma diyagramı oluşturulmuştur.



Şekil 3.3. MHDP sınıflandırma diyagramı

MHDP problem tipine göre ikiye ayrılır. Basit MHDP, hat dengeleme problemlerinin en basit ve orijinal halidir. Bu problem tipine paralel istasyonlar, bölgeleme kısıtları, kaynak kısıtları gibi bazı kısıtlamalar veya faktörler eklenirse problem Genel MHDP olarak adlandırılır.

Sistemde bulunan ürün çeşitliliğine göre MHDP tek, çok ve karma modellenli hatlar olarak üçe ayrılır. Öncelikle basit MHDP olarak da tanımlanan problemde hat üzerinde tek model üretildiği varsayılmaktadır. Buna karşılık diğer bir tip olan çok modellide ise birden fazla model belirli sayıda partiler halinde aynı hat üzerinde üretilmektedir. Karma modellenli hatlarda ise parti büyüklüğü bir kabul edilerek farklı modeller aynı hat üzerinde eş zamanlı üretilmektedir.

Görev zamanlarına göre ise, görev zamanının sabit olması (Deterministik MHDP) ve değişken olması (Stokastik MHDP) olarak ikiye ayrılmaktadır. Değişken olduğu durumlarda bir olasılık dağılımına uyduğu kabul edilen görev zamanları hattın modellenmesinde kullanılmaktadır.

Çevrim zamanının her istasyon için eşit olarak verildiği ve işlerin zamanında tamamlandığının varsayıldığı hatlar gecikmesiz hatlar olarak adlandırılır. Bu tip hatlarda

ürünler istasyonlar arasında eş zamanlı olarak yer değiştirmektedir. Gecikmeli hatlar, bir iş tamamlanana dek istasyona başka bir işin alınmadığı hatlardır. Bu tip hatlarda ürünler işlemleri bitene kadar istasyondan ayrılmaz ancak gecikme miktarları göz önünde bulundurulmalıdır.

Genel itibari ile montaj hatları araştırmacılar tarafından istasyonların yerleşim tipine göre geleneksel (seri/düz), U-tipi ve paralel olarak sınıflandırılarak ele alınmıştır. U-tipi hatlarda ilgili görevin hem öncül görevlerinin hem de ardıl görevlerinin atanıp atanmadığı kontrol edilmekte ve herhangi bir taraftaki görevlerin tamamı atanmış ise görev atama yapılabilir görevler kümesine dâhil edilmektedir. Böylelikle işler U şeklinin sağ veya sol tarafındaki istasyonlara atanmaktadır (Özcan ve Toklu, 2009). Paralel istasyonlar ise genel olarak görev sürelerinin çevrim süresinden yüksek olduğu durumlarda istenen çıktının sağlanması için aynı görevin iki ayrı istasyona atanması gerekliliğinden ortaya çıkmıştır. Görev, istasyon veya hattın paralellliği olmak üzere farklı durumlar için hat yerleşimi düzenlenmektedir.

Hat dengeleme problemlerinde çeşitli alt amaçlar dikkate alınsa da ana amaç olan hat etkinliğinin maksimize edilmesidir. MHDP’de araştırmacıların hattın verimliliğini artırmak için genel olarak 4 tip amaca göre dengeleme çalışmalarını yaptıkları görülmektedir. Sabit çevrim zamanı kısıtı altında istasyon sayısının en küçüklenmesinin amaçlandığı Tip 1, sabit istasyon sayısı ile çevrim zamanının en küçüklenmesinin amaçlandığı Tip 2, belirlenen bir etkinlik fonksiyonuna göre istasyon sayısının ve çevrim süresinin en küçüklenmesinin amaçlandığı Tip E ve doğrudan uygun görev ataması ile hat dengesinin kurulmasını amaçlayan Tip F olarak sınıflandırılır.

Montaj hatları istasyonların hat üzerinde yerleşim durumlarına göre ise tek ve çift taraflı olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Tek taraflıda hatlarda sadece sağ veya sol tarafına istasyonlar yerleştirilmektedir. Büyük boyutlu ürünlerin üretimi esnasında ise ürünün yapısı gereği işlerin bir kısmı sağ tarafta bir kısmı da sol tarafta yapılmak zorundadır. Bu tip hatlarda istasyonlar hattın her iki yönünde kurulmaktadır ve çift taraflı hatlar olarak isimlendirilir (Özcan ve Toklu, 2009).

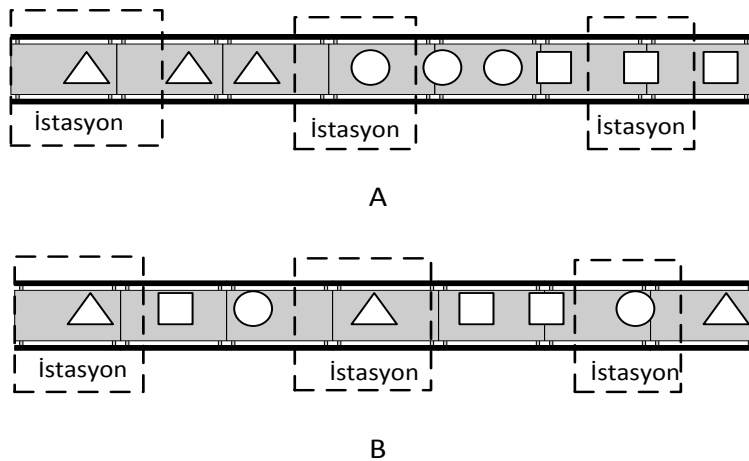
Bunlara ek olarak iş yapısı ve çözüm yöntemlerine göre sınıflandırmalar da mevcuttur. Daha ayrıntılı sınıflandırmalar ve bilgiler için, montaj hatlarının sınıflandırmalarını,

problemin çözüm yöntemlerini ve montaj hattı ile ilgili terimlerin tanımlarını içeren Baybars (1986), Erel ve Sarin (1998), Becker ve Scholl (2006), Boysen, Flidner ve Scholl (2007), Battaia ve Dolgui (2013) ve Sivasankaran ve Shahabudeen'in (2014) yaptıkları literatür çalışmalarına başvurulabilir.

3.3. Karma Modelli Montaj Hattı Dengeleme Problemi

Tek modelli montaj hatları homojen standart ürünlerin yüksek miktarlarda üretimi için tasarlanmış hatlardır ve değişken müşteri taleplerine uygun değildir. Ancak, değişken müşteri talepleri ve artan model çeşitliliğine uyumlu esnek bir montaj hattının kurulması zorunluluğu ortaya çıkmıştır. Benzer üretim karakteristiğine sahip birden fazla ürünün aynı hat üzerinde üretilmesi ile karma modelli montaj hatları ortaya çıkmıştır (Özcan, Kellegöz ve Toklu, 2011). Bu hat tiplerinde görev sürelerinin modellere göre değişmesi veya görevin ilgili modelin özelliğine göre yapılmayabilmesi, modellerin toplam talepteki oranlarında zaman içinde farklılıklar oluşması gibi durumlardan dolayı hatların dengelenmesi daha karmaşık ve daha zor bir hal almıştır.

Karma ve çok modelli montaj hatları farklı modellerin aynı hat üzerinde üretildiği hatlardır ve aralarında parti büyüklüklerine göre bir farklılık vardır. Çok modelli montaj hattı dengeleme problemlerinde aynı hat üzerinde üretilen modellerin parti büyüklükleri yüksektir ve yığın üretimi mevcuttur (Şekil 3.4-A). Karma modelli montaj hattı dengeleme probleminde ise parti büyüklüğü bir alınır ve modeller hat üzerinde karma bir sıra ile ilerler (Şekil 3.4-B) (Van Zante-de Fokkert ve de Kok, 1997).

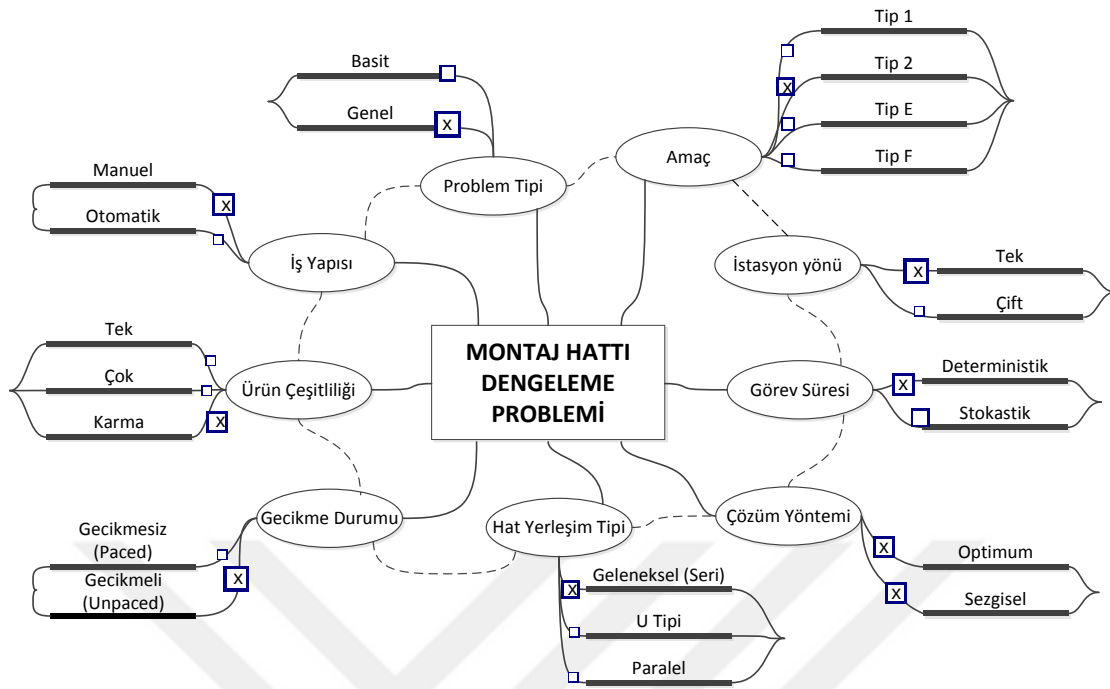


Şekil 3.4. Çok modelli (A) ve karma modelli (B) montaj hattı

KMMHDP de, Bölüm 3.2.1’de montaj hatları için bahsedilen karakteristik özelliklere göre sınıflara ayrılmaktadır. Literatürde özellikle amaçlarına göre sınıflandırma ön plana çıkmaktadır. Bunun yanında sürelerinin deterministik veya stokastik olması ve hattın yerleşim düzeni (düz, U tipi, paralel vs.) sınıflandırmada en çok kullanılan özellikler olarak karşımıza çıkmaktadır.

Bu tez çalışmasında karma modelli montaj hattı dengeleme problemi ele alınmıştır. Probleme sabit istasyon sayısı kısıtı altında çevrim süresinin minimizasyonu amaçlanmıştır (Tip 2 KMMHDP). Hattın düz, tek taraflı bir hat olduğu, görev sürelerinin deterministik olduğu ve paralelliğin olmadığı varsayılmıştır. Ele alınan problemin literatürdeki yeri Şekil 3.5’te verilmiştir. Probleme ilişkin varsayım ve kabuller aşağıdaki gibidir:

- Görev zamanları deterministik ve bilinmektedir.
- İstasyon sayısı bilinmektedir ve sabittir.
- Bir görev bir istasyona mutlaka atanmalıdır.
- Bütün görevler atanmak zorundadır.
- Görevler bölünemezler.
- Her bir modelin öncelik diyagramları belirlidir ve bilinmektedirler. Görev ataması esnasında bozulmamalıdır.
- Her bir istasyonda aynı ücret özelliklerine sahip bir işçi yer almaktadır.
- Hatta birden çok model karma olarak üretilmektedir.



Şekil 3.5. Ele alınan montaj hattı dengeleme probleminin sınıflandırmadaki yeri.

Bu varsayım ve kabullere göre problemin notasyonları ve Gokcen ve Erel (1998) tarafından önerilen 0-1 tamsayıli matematiksel modeli aşağıdaki gibidir:

i, j Görev indisi

k İstasyon indisi

m Model indisi

N Birleştirilmiş öncelik diyagramındaki görevlerin sayısı

M Hat üzerinde üretilen modellerin sayısı

S İş istasyonu sayısı

C_m m modelinin çevrim süresi

t_{im} i görevinin m modeli için görev süresi

$(i, j) \in \text{Pr}$ Öncelik ilişkisi kısıtı, i görevi mutlaka j görevinden önce yapılmalıdır.

x_{ik} =1 eğer i görevi k istasyonuna atanmış ise

=0 diğer durumlarda

$$\text{Min} \sum_{m=1}^M C_m \quad (3.1)$$

$$\sum_{k=1}^S x_{ik} = 1 \quad i = 1, \dots, N \quad (3.2)$$

$$\sum_{k=1}^S k * x_{ik} - \sum_{k=1}^S k * x_{jk} \leq 0 \quad (i, j) \in \text{Pr} \quad (3.3)$$

$$\sum_{i=1}^N t_{im} * x_{ik} \leq C_m \quad k = 1, \dots, S; m = 1, \dots, M \quad (3.4)$$

$$x_{ik} \in \{0, 1\} \quad i = 1, \dots, N; k = 1, \dots, S \quad (3.5)$$

Matematiksel modelde, amaç fonksiyonu (3.1) modellerin çevrim sürelerinin toplamını en küçükleme. Denklem (3.2) ile görevlerin her birinin kesin olarak bir istasyona atanması sağlanır. Denklem (3.3) eşitsizliği ile görevler arasındaki öncelik ilişkileri sağlanmıştır. Denklem (3.4) ise istasyon süresinin çevrim süresinden küçük veya eşit olmasını sağlamaktadır. Ayrıca benzer şekilde çevrim süresinin en büyük istasyon süresinden büyük veya eşit olmasını sağlamaktadır. Karar değişkeninin tipi ise denklem (3.5) ile tanımlanmıştır.

Bu tez kapsamında, KMMHDP matematiksel modeli temel alınarak problemin kısıt programlama modeli oluşturulmuştur. Kısıt programlamanın genel yapısından ve çözüm algoritmasının adımları ile ilgili bilgiler Bölüm 4'te verilmiştir.

4. KISIT PROGRAMLAMA

Kısıt programlama, yapay zekâ, yöneylem araştırması, bilgisayar programlama ve matematiksel mantık gibi tekniklerin kombinasyonu olarak geliştirilen bir problem çözme yöntemidir. KP yönteminde, yöneylem araştırmasının entegrasyonu ile problem belli bir amaca göre çözülerek optimum çözüm elde edilebilmektedir. Yapay zeka teknikleri çözüm arama aşamasına entegre edilerek daha etkin arama stratejileri kurulabilmektedir. Bilgisayar programlama ise, programlama esnekliği ile bir matematiksel programlamaya göre, kısıt programlamaya daha esnek bir yapı kazandırmaktadır. Matematiksel mantık ise özellikle kısıtların oluşturulmasında mantıksal ifadelerin kullanımına olanak sağlamaktadır.

KP genellikle matematiksel modellemeye bir alternatif olarak kullanılmaktadır. Bu açıdan Heipcke (1999) çalışmasında KP ile matematiksel programlamayı karşılaştırmıştır. Kısıt programlama genel yapısıyla değişkenlerden, değişkenlerin alabileceği değerleri içeren tanım kümelerinden ve değişkenler arasındaki ilişkileri gösteren kısıt kümesinden oluşur. Matematiksel programlama ise karar değişkenlerinden ve karar değişkenlerinin matematiksel denklemler ile oluşan kısıtlardan oluşmaktadır. Kısıt programlamada sadece matematiksel kısıtlar değil “eğer”, “ve/veya” gibi mantıksal kısıtlar da kullanılmaktadır. Böylelikle daha geniş ve esnek bir kısıt oluşturma yapısı sunulmaktadır. Buna ek olarak, karar değişkenleri olarak kısıt programlamada tam, ikili, rasyonel ve reel sayılar ile mantıksal(doğru-yanlış) ve sembolik ifadelerden oluşan değişkenler tanımlanabilmektedir. Bu yapısı ile matematiksel programlamaya göre daha farklı karar değişkeni yapısı kurmak mümkündür. Ayrıca veri yapısı olarak daha karmaşık yapılar tanımlanabilmektedir. Her iki yöntemde problemin çözümünde birerleme algoritmalarını kullanmaktadır. Matematiksel programlamada dal kesme algoritması kullanılmaktadır. Böylelikle uygun ve optimum çözümler elde edilmektedir. Kısıt programlamada ise benzer şekilde dal kesme algoritması kullanılmaktadır ancak farklı olarak herhangi bir değişkene atanan değere göre diğer değişkenlerin tanım kümesinden uygun olmayan değerler kısıt tutarlılığı algoritmaları ile çıkarılmaktadır. Böylelikle uygun çözümler elde edilmektedir. Kullanılan arama algoritmaları yönünden ise kısıt programlamada sezgisel algoritmaların kullanılması ile arama prosedürünün daha etkin hale getirilmesi mümkündür. Arama stratejileri de denilen bu yapıda dallanma yapılacak değişkenlerin seçiminde ve bu değişkene atanacak değerlerin seçiminde bir kurallı yapı oluşturulduğunda KP çözüme daha hızlı ulaşmaya

olarak vermektedir. Matematiksel programlamaya göre daha esnek olan bu yapısı sayesinde problemlere özgü arama stratejisi belirleme imkânı sunmaktadır.

Bir problemin kısıt programlama ile çözülmesi için aşağıdaki üç adım izlenmelidir:

- Problemin kısıt programlama modelinin kurulması gerekmektedir. Bunun için matematiksel programlamada olduğu gibi karar değişkenlerinin ve tanım kümesinin ve bir de karar değişkenlerinden oluşan kısıtların oluşturulmalıdır.
- Bu oluşturulan model bir bilgisayar programı vasıtası ile bilgisayar ortamına aktarılmalıdır.
- Uygun bir arama stratejisi belirlenerek problem kısıt programlama algoritması ile çözülmelidir.

4.1. Kısıt Programlama Temel Kavramları

Bir problem kısıt programı modeli olarak (X,D,C) şeklinde üçlü gösterimle ifade edilir (Apt, 2003: 54-80). Burada;

X karar değişkenleri dizisini ifade eder ve $X = \{x_1, \dots, x_n\}$ şeklinde ifade edilir.

D karar değişkenlerinin alabileceği değerleri içeren tanım kümesini tanımlar. Tanım kümesi (domain) olarak ifade edilen bu bildirim matematiksel olarak şöyle ifade edilir:
 $v_i \in D(x_i) \ i = 1, \dots, n$.

$C = \{C_1, \dots, C_m\}$ kısıtları ifade eder. C , X karar değişkenleri arasındaki ilişkiyi ifade etmekte ve $var(C_j) = (x_1, \dots, x_k)$ ise değişkenlerin alt dizisini ifade etmektedir.

Kısıt programlama olarak modellenen bir probleminin uygun bir çözüme sahip olması için değişkenlerin kendi tanım kümelerinde yer alan değerlerden birini alması ve bu değerlerin bütün kısıtları sağlıyor olması gerekir. Bu atama karar değişkenleri ve aldığı değerler seti şeklindedir ve $Z = \{(x_1, v_1), (x_2, v_2), \dots, (x_r, v_r)\}$ gibi ifade edilir.

Kısıt programlama amaç fonksiyonunun olup olmamasına göre iki tipte sınıflandırılır. Kısıt sağlama problemleri amaç fonksiyonu olmadan modellenir ve uygun bir çözüm veya bütün çözümler bulunana kadar çalıştırılabilir. Amaç fonksiyonu eklenerek çözülen kısıt programlama problemleri ise Kısıt Optimizasyonu Problemleri olarak adlandırılır. Bu tip problemlerde modele en büyükleme veya en küçükleme şeklinde bir amaç fonksiyonu eklenir. Kısıt programlama en genel anlamıyla aşağıdaki aşamalardan oluşmaktadır.

4.1.1. Tanım kümesi azaltma

Tanım kümesi azaltma her bir değişken için tanım kümesinden kısıtlara göre uygun olmayan değerlerin tanım kümesinden çıkarılmasıdır. Örneğin, X_1 tanım kümesi $[2, \dots, 5]$ ise ve X_2 tanım kümesi $[1, \dots, 6]$ ise ve $X_1 \geq X_2$ bir kısıt ise; burada X_1 'in alabileceği tanım kümesi $[2, \dots, 5]$ ve X_2 'nin alabileceği tanım kümesi $[1, \dots, 5]$ olarak güncellenecektir. X_2 'nin tanım kümesinden 6 çıkarılacaktır. Bu şekilde her bir değişkenin kısıtlara göre tanım kümesinin güncellenmesi tanım kümesi azaltma olarak adlandırılmıştır.

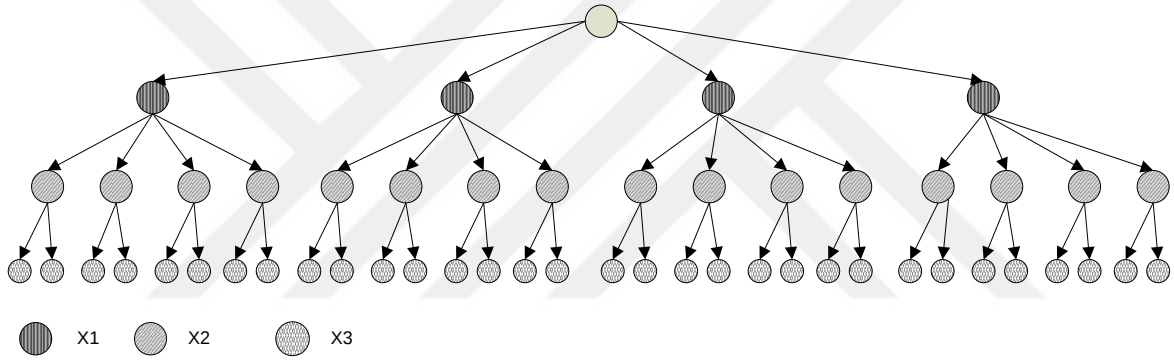
4.1.2. Çözüm arama ve arama stratejileri

Çözüm arama aşamasında değişkenlere problemin kısıtlarını sağlayan değerlerin atanması için arama gerçekleştirilir. Bu aşama bir ağaç mantığında kurgulanır ve arama ağacı olarak isimlendirilir. Arama ağacı yapısında, karar değişkeni bir düğüm olarak ve değişkenlerin alabileceği olası değerler ise dallar olarak gösterilir. Arama ağacı seçilen bir değişkene değer ataması ile başlanarak ve sırasıyla diğer değişkenlerin de seçilip değer atanması ile devam eden bir düğüm-dal yapısıdır. Bütün değişkenlere kısıtlara uygun bir değer atanması ile tamamlanır ve problemin bir çözümü elde edilmiş olur. Eğer arama esnasında bir karar değişkeni için kısıtları da göz önüne alarak atanacak uygun bir değer bulunamazsa geri dönüş algoritması çalışır ve diğer dallar denenir. Geri dönüş algoritması ile uygun çözümün olmadığı düğümden aranmayan bir önceki düğüme geri dönülerek komşu düğümlerin aranması ile kısıt programlama algoritması ilerler. Böylelikle arama ağacı iteratif olarak oluşturulur.

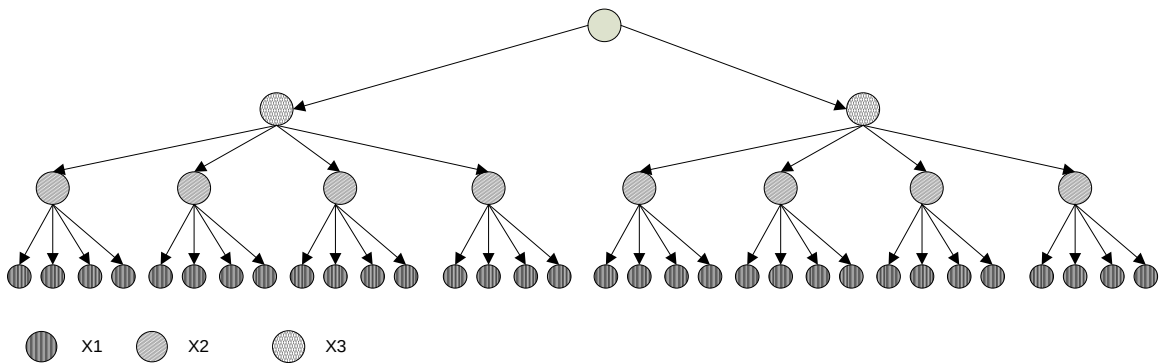
Kısıt programlamada arama ağacı, değişkenin yani düğümün seçilmesi ve ardından bu değişkene atanacak değerini yani ilerlenecek dalın seçilmesi adımlarının tekrarı ile oluşturulmaktadır. Bu aşamada değişkenin ve değerini rastgele seçilmesi yerine belli

kurallara bağılı olarak seçimin yapılması ile arama ağacını oluşturmak hem çözümü hızlandıracaktır, hem de NP-zor problemlerde daha iyi çözümleri bulmayı sağlayacaktır. Arama ağacında müdahil olunabilecek iki aşama, sırasıyla değişken seçimi ve bu değişkene hangi değerin atanacağını bulması aşamalarıdır.

Hangi değişkenden dallanmaya başlanacağı ve sıra ile hangi dallara geçileceği çözüm ağacında bulunan düğüm sayısını etkilemektedir. Örneğin, tanım kümesindeki uygun değer sayısı $X_1=X_2=4$ ve $X_3=2$ olan değişkenler için eğer değişkenlere değer atama sırası $X_1-X_2-X_3$ şeklinde olursa oluşacak düğüm sayısı $1+4+(4*4)+(4*4*2)=53$ adet olacaktır (Şekil 4.1). Bir diğer atama sıralamasında $X_3-X_2-X_1$ olursa $1+2+(2*4)+(2*4*4)=43$ adet düğüm oluşacaktır (Şekil 4.2).



Şekil 4.1. Dallanma sırası $X_1-X_2-X_3$ olduğu durumda arama ağacı



Şekil 4.2. Dallanma sırası $X_3-X_2-X_1$ olduğu durumda arama ağacı

Değişken seçiminden sonraki adım ise seçilen değişkenin alacağı değerin belirlenmesidir. Değişkene tanım kümesi içerisinde yer alan ve amaca göre en çok etkin değerin öncelikle atanması optimum çözüme daha hızlı bir şekilde ulaşmayı sağlayarak algoritmanın etkinliğini artıracaktır.

Değişken ve değer seçim kuralları statik ve dinamik kurallar olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Statik kural yapısında kural algoritma başlangıcında oluşturulmaktadır ve model çalışması sürecince değiştirilmemektedir. Dinamik yapıda ise, modelin çalışması esnasında elde edilen çözümler dikkate alınarak kural değiştirilebilmektedir. Ayrıca, dinamik yapıda problemin çözüm sonuçları anlık kontrol edilerek değişken seçiminde ve/veya değer atamasında o anki duruma göre kararlar alınabilmektedir.

Çözüm aramada uygun bir çözüm bulunmadığı anda geri dönüş algoritması ile bir önceki düğüme dönülüp farklı dallar denenir. Geri dönüş algoritması, değer almayan bir değişkenin tanım kümesinde atanacak uygun bir değer bulunmadığında bir önceki seçilen değişkenin değerinin değiştirilerek farklı bir daldan dallanmaya devam edilmesini veya seçilen değişkenin tanım kümesindeki bütün değerler denendiğinde bir önceki düğüme dönülerek yeniden bir değişken seçilmesini sağlar.

Değişken seçimi ve değer ataması kısıt programlamada önemli bir aşama olarak öne çıkmaktadır. Örneğin, bir montaj hattında bir görev öncelik ilişkilerinin de etkisi ile sadece bir istasyona atanıyorsa ve bu değişkenden değil de başka bir değişkenden dallanma başlamış ise, her seferinde geri dönüş algoritması ile bu değişkenin değeri bulunana kadar hatalı dallar aranacaktır. Bundan dolayı gereksiz yere birçok dal taranmış olacaktır.

4.1.3. Kısıt yayılımı

Kısıt yayılımı, değer atanan bir değişkenin durumuna göre diğer değişkenlerin tanım kümesinde bulunan değerlerin kısıtlar göz önüne alınarak azaltılmasıdır. Bu aşamada amaç dallanma esnasında çözümsüzlüğe götürecek olan dalların olabildiğince önceden bulunarak budanmasıdır. Böylelikle geri dönüşler azaltılacak ve uygun çözümlere daha hızlı ulaşılabilecektir.

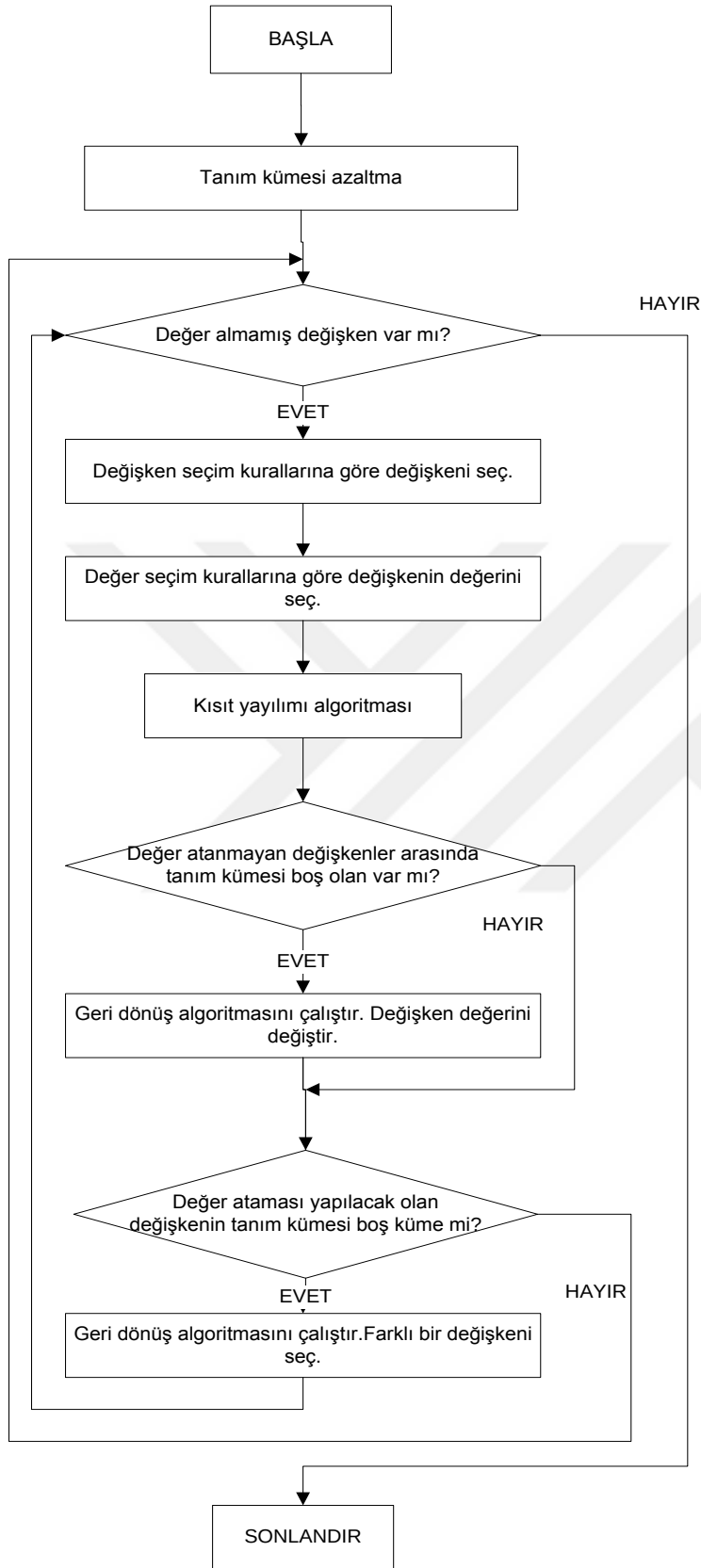
Bölüm 4.1.1'deki örneği kullanarak kısıt yayılımı açıklanacak olursa; eğer öncelikle X_1 değer atanacak değişken olarak seçilmiş ve $X_1=3$ değerini almış olsun. Bu durumda X_2 , 4 ve 5 değerlerini alamayacaktır. Bu iki değer X_2 tanım kümesinden çıkarılacaktır. Benzer şekilde X_2 önce seçilmiş ve 4 değerini almış olsa, X_1 'in tanım kümesinden 2 ve 3 değerleri çıkarılacaktır. Bu şekilde yapılan işlemlerin bütününe kısıt yayılımı denir. Bu aşamada yapılan, atanan değerlere göre bütün diğer değişkenlerin tanım kümelerinin yeniden

düzenlenmesi ve böylelikle kısıtlara uygun olmayan değerlerin tanım kümelerinden çıkarılmasıdır. Kısıt programlamada arama algoritmalarında yay tutarlılık, alan tutarlılık veya k-tutarlılık gibi algoritmalar kullanılarak kısıt yayılımı yapılmaktadır.

4.2. Genel Kısıt Programlama Algoritması

Bölüm 3.1.'de bahsedilen terimlerle ilgili açıklamalar çerçevesinde genel bir KP çözüm arama algoritması Şekil 4.3'te verilmiştir. KP çözüm arama algoritmasında çözüm için aramaya başlamadan önce kısıt programlama her bir değişkenin tanım kümesini kısıtlara göre yeniden düzenler ve tanım kümelerinden kısıtlara uygun olmayan değişkenler çıkarılır. Bu aşama kısıt programlamada tanım kümesi azaltma olarak tanımlanır. Eğer bu aşamada en az bir değişkenin tanım kümesi boş küme ise modellemede hata yapılmıştır ve arama başlamadan algoritma sonlanır. Arama başlangıcında değer ataması yapılmayan değişken olup olmadığı kontrol edilir. Eğer değer almayan bir değişken yok ise bütün değişkenler değer almıştır ve arama sonlandırılır. Eğer değer almayan en az bir değişken varsa değişken seçim kurallarına göre yeniden değişken seçimi yapılır. Seçilen bu değişkene tanım kümesi içerisinde bulunan bir değer seçilir ve atanır. Bu aşamada değer seçim kuralları kullanılır. Değer atamasının ardından kısıt yayılımı algoritması kullanılarak değişkenlerin tanım kümeleri yeniden düzenlenir. Bu aşamadan sonra arama için yeniden bir kontrol yapılır ve değer atanmayan değişkenlerden tanım kümesi boş olan bir değişkenin olup olmadığı kontrol edilir. Eğer tanım kümesi boş değişken var ise geri dönüş algoritması çalıştırılarak değişkenin değeri değiştirilir. Eğer tanım kümesi boş olan değişken yok ise aramaya devam edilir ve tekrar başa dönülüp arama yeniden başlatılır. Bu algoritmanın tekrarı ile bütün değişkenlere uygun değerlerin atanması ile arama tamamlanır ve problemin bir çözümü elde edilmiş olur.

Bu tez çalışmasında da ele alınan Tip 2 KMMHDP için KP algoritmasının çözüm arama aşamasında kullanılan değişken ve değer seçim kuralları oluşturulmuştur. Bu kuralların etkinliği deneysel çalışmalarla test edilmiştir. Ayrıca bir dinamik sezgisel arama algoritması da önerilmiştir. Bölüm 5'te, oluşturulan KP modeli ve bu modelin geliştirilmesi için yapılan çalışmalar yer almaktadır.



Şekil 4.3. Genel kısıt programlama algoritması



5. KARMA MODELLİ MONTAJ HATTI DENGELEME PROBLEMİ İÇİN KISIT PROGRAMLAMA MODELİ

Bu bölümde, Tip 2 KMMHDP için oluşturulan kısıt programlama modeli ve modelle daha iyi çözümlerin elde edilmesini sağlayan çözüm arama stratejilerine ilişkin yapılan çalışmalar verilecektir. Arama stratejisinin iki alt aşaması olan değişken seçimine ve değer seçimine ilişkin oluşturulan kurallardan bahsedilecektir. Ayrıca, modelin ve kuralların etkinliğini araştırmak için yapılan deneysel çalışmalar ve bunların sonuçları yer almaktadır. Son olarak, geliştirilen dinamik arama sezgiselinden ve deneysel çalışmaların sonuçlarından bahsedilecektir.

5.1. Tip 2 KMMHDP Kısıt Programlama Modeli

Matematiksel model dikkate alınarak Tip 2 KMMHDP için kısıt programlama modeli oluşturulmuştur. Kısıt programlama modelinde görevin atandığı istasyon numarası değerine karşılık gelen SN karar değişkeni tamsayı değerleri almaktadır ve tanım kümesi pozitif tamsayı değerlerini kapsamaktadır. Çevrim sürelerinin toplamının minimize edilmesinin amaçlandığı Tip 2 KMMHDP kısıt programlama modeli şu şekildedir:

Amaç:

$$\text{Min } z = \sum_{m=1}^M C_m \quad (5.1)$$

Kısıtlar:

$$SN_i \leq SN_j \quad (i, j) \in \text{Pr} \quad (5.2)$$

$$SN_i \leq L_i \quad i = 1, \dots, N \quad (5.3)$$

$$SN_i \geq E_i \quad i = 1, \dots, N \quad (5.4)$$

$$\exists [SN_i] = k \quad k = 1, \dots, S \text{ ve } i = 1, \dots, N \quad (5.5)$$

$$C_m \geq \sum_{i=1}^N t_{im} * Y_{ik} \quad k=1.....S \text{ ve } m=1.....M \quad (5.6)$$

$$SN_i \in [E_i, L_i] \text{ ve tamsayı} \quad (5.7)$$

$$Y_{ik} = \begin{cases} 1, & (SN_i = k) \\ 0, & (SN_i \neq k) \end{cases} \quad (5.8)$$

Amaç (5.1), modellerin çevrim sürelerinin toplamının minimizasyonunu ifade etmektedir. Kısıt (5.2) görevler arasındaki öncelik ilişkilerini sağlamaktadır. Eğer i görevi j görevinden önce yapılması gerekiyor ise i görevinin atandığı istasyonun j görevinin atandığı istasyondan önce veya aynı olmasını garanti etmektedir. Kısıt (5.3) görevin atanabileceği son istasyon numarasının hesaplanan L değerinden küçük olmasını, kısıt (5.4) ise hesaplanan E değerinden büyük olmasını sağlamaktadır. Kısıt (5.5) istasyonun açılması için gerek ve yeter şart olan bir istasyona en az bir görevin atanmasını garanti etmektedir. Her bir model için çevrim süresinin ilgili modelin en yüksek istasyon süresine eşit olması kısıt (5.6) ile sağlanmaktadır. Kısıt (5.7) ve (5.8) değişkenlerin tanım kümelerini ve tipini tanımlamaktadır.

Burada kullanılan E ve L değerleri Gokcen ve Erel (1997) tarafından önerilen formüllerle Denklem 5.9 ve 5.10 ile hesaplanmıştır. Formüllerde kullanılan çevrim süresi değeri için teorik çevrim süresi değeri alınmıştır.

$$E_i = \max_{m=1,...,M} \left[\frac{t_{im} + \sum_{j \in PR_i} t_{jm}}{C_m} \right]^+ \quad (5.9)$$

$$L_i = \min_{m=1,...,M} \left(K + 1 - \left[\frac{t_{im} + \sum_{j \in S_i} t_{jm}}{C_m} \right]^+ \right) \quad (5.10)$$

5.1.1. Deneysel çalışmalar ve sonuçları

Bu kısımda deneysel çalışmalardan önce KP modeli bir örnek üzerinde açıklanacaktır. Örnek problem verileri Simaria ve Vilarinho'nun (2004) çalışmasından alınmıştır. 25 görev bulunan örnek montaj hattı, istasyon sayısı 8 olduğu varsayılarak dengelenmiştir. Hat üzerinde 2 model üretilmektedir. Problemin birleştirilmiş öncelik diyagramı Şekil 5.1'de verilmiştir. Modellerin görev süreleri ise Çizelge 5.1'de verilmiştir. Çizelgede görev sürelerinden "0" olanlar ise ilgili model için o görevin yapılmadığını belirtmektedir. Çizelge 5.2'de ise görevler için hesaplanan E ve L değerleri verilmiştir.

Çizelge 5.2. Görevlerin E ve L değerleri

Görev No	E	L	Görev No	E	L	Görev No	E	L	Görev No	E	L
1	1	1	8	3	6	15	5	7	22	4	7
2	1	5	9	2	6	16	3	6	23	7	7
3	1	1	10	2	5	17	3	7	24	8	7
4	2	5	11	2	5	18	4	6	25	8	8
5	2	3	12	4	6	19	5	7			
6	1	4	13	3	5	20	5	7			
7	1	7	14	2	7	21	4	7			

Problemin kısıt programlama modeli ILOG CPLEX Optimization Studio 12.6 CP Solver ile modellenmiştir. Problemin çözümünde elde edilen atama değerleri Çizelge 5.3'te yer almaktadır. Ayrıca her bir istasyon için modellerin istasyon süreleri Çizelge 5.4'teki gibidir.

Bu sonuçlara göre model 1 için çevrim süresi 182 ve model 2 için çevrim süresi 175 ve bunların toplamından oluşan optimum amaç değeri 357'dir.

Çizelge 5.3. Çözüm sonucunda görevlerin atandığı istasyon numaraları

Görev No	İstasyon No	Görev No	İstasyon No	Görev No	İstasyon No
1	1	10	4	19	6
2	1	11	3	20	7
3	1	12	5	21	6
4	4	13	3	22	6
5	2	14	2	23	7
6	3	15	5	24	8
7	7	16	5	25	8
8	5	17	5		
9	2	18	6		

Çizelge 5.4. Model bazında istasyon süreleri

İstasyon No	Model 1	Model 2
1	150	170
2	167	154
3	176	114
4	175	175
5	182	166
6	174	174
7	132	172
8	166	37

Bu tez kapsamında kullandığımız veri setleri Simaria (2006) doktora tezinden ve www.assembly-line-balancing.de sitesinden alınmıştır. Problemlerdeki görev sayıları 25, 28, 30, 45, 70, 75 ve 297'dir. Problemlerdeki model sayıları ise 2, 3 veya 4 olarak değişmektedir. 25, 28, 30 görevli problemlerde 8 istasyon, 45 görevli problemde 12 istasyon, 70 ve 75 görevli problemlerde 20 istasyon ve 297 görevli problemde ise 45 istasyon kurulduğu varsayılmıştır. Çizelge 5.5'te deney setlerinin verileri verilmiştir.

Deney setleri matematiksel programlama modeli ve önerilen kısıt programlama modeli kullanılarak çözülmüştür. Problemlerin modellenmesinde ve çözümünde ILOG CPLEX Optimization Studio 12.6 programı kullanılmıştır. Her bir deney seti bir saat zaman sınırı ile çözdürülmüştür, yalnızca 297 görevli deney setleri çok büyük olmasından dolayı iki saat zaman sınırlı çalıştırılmıştır. Çözüm sonuçları, zaman sınırı içinde elde edilen en iyi değer ile bu değere ulaşılan zamanı gösteren CPU zamanı değerlerine göre karşılaştırmalı olarak Çizelge 5.6'da verilmiştir. Bu çizelgeye göre sekiz deney setinde tam sayılı programlama modeli ile zaman sınırı içinde optimum sonuç elde edilmiştir. Kısıt programlama modeli ise altı deney setinde optimum sonuca ulaşmıştır. On dört problemin sekizinde kısıt programlama modeli matematiksel modele göre eşit veya daha iyi sonuçlara ulaşmıştır.

Çizelge 5.5. Deney setleri

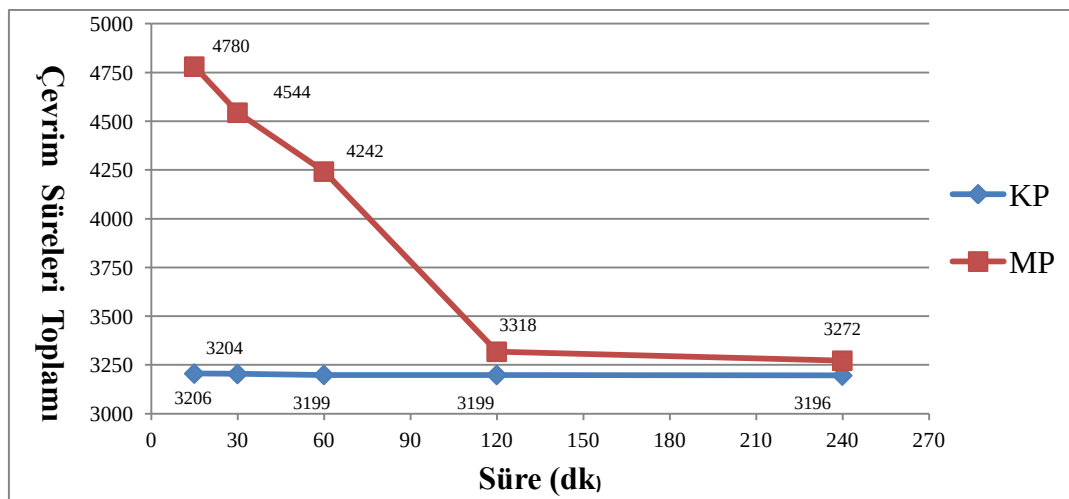
	Model sayısı	Görev sayısı	İstasyon Sayısı
Simaria_ Vilarinhio	2	25	8
Simaria_ Vilarinhio	3	25	8
Heskiaoff	2	28	8
Heskiaoff	3	28	8
Sawyer	2	30	8
Sawyer	3	30	8
Kilbridge	2	45	12
Kilbridge	3	45	12
Tongue	2	70	20
Tongue	3	70	20
WeeMag	2	75	20
WeeMag	4	75	20
Scholl	2	297	45
Scholl	4	297	45

Bu sonuçlara ek olarak iki modelli Scholl problemi uzun süreli çalıştırılarak kısıt programlama ve matematiksel programlamanın sonuçları karşılaştırılmıştır. Şekil 5.2’de verilen grafikte de görüldüğü üzere kısıt programlama modeli daha kısa sürede daha iyi sonuçlara ulaşmaktadır.

Çizelge 5.6. Deneysel çalışmaların sonuçları

	Matematiksel model		Kısıt Programlama	
	En iyi değer	Çözümü Bulduğu zaman	En iyi değer	Çözümü Bulduğu zaman
Simaria_Vilarinhio 2	357*	0,3	357	0,2
Simaria_Vilarinhio 3	497*	0,5	497	1
Heskiaoff 2	488*	610	490	42
Heskiaoff 3	664*	2	665	180
Sawyer 2	367*	0,7	367	7
Sawyer 3	658*	2,5	658	17
Kilbridge 2	375*	460	376	1040
Kilbridge 3	597*	240	602	123
Tongue 2	403	1460	400	2980
Tongue 3	615	100	612	524
WeeMag 2	154	235	159	28
WeeMag 4	311	290	322	2240
Scholl 2	3318	5520	3199	2918
Scholl 4	6511	6120	6472	4300

* Optimum değer



Şekil 5.2. İki modelli Scholl probleminin çözüm sonuçlarının karşılaştırılması

Çizelge 5.6’da verilen deneysel çalışmaların sonuçlarına ek olarak, KP modelinin KMMHDP-2 girdi parametreleri olan model sayısı, istasyon sayısı ve görev sayısının değişiminde nasıl etkilendiği analiz edilmiştir. Analizlerde 25 görevli Simaria_Vilarinhio ve 30 görevli Sawyer deney setleri kullanılmıştır. Bu analizlere ilişkin değerlendirmeler aşağıda verilmiştir:

İstasyon Sayısı Değişimi: İstasyon sayısı değişikliği 25 görevli ve 2 modelli örnek problem üzerinde yapılan çalışmalar ile ortaya konulmuştur. 5 ve 8 istasyon sayısı alınarak deneyler yapılmıştır. Hesaplanan E ve L değerlerine göre ve öncelik ilişkileri olmadığını varsayıldığında 5 istasyon için $4 \cdot 10^8$ adet kombinasyon ve 8 istasyon için ise bu sayı $5 \cdot 10^{11}$ adet olmaktadır. İstasyon sayısı 3 artmasına karşılık kombinasyon sayısı yaklaşık 1125 kat artmıştır. Bu durum, kısıt programlama modelinde karar değişkenlerinin tanım kümesinde yer alan değerlerin sayısını artırmaktadır ve optimum çözüme ulaşmak daha zorlaşmaktadır.

Model Sayısı Değişimi: 25 görevli örnek problem model sayısındaki değişikliğin analizi için kullanılmıştır. Hat üzerinde 2 ve 3 model üretildiği varsayılmıştır ve sabit 5 istasyon sayısına göre araştırmalar yapılmıştır. Model sayısının ve modellerin değişimi ile görev süreleri her bir modelde farklılaştırmaktadır. Buna bağlı olarak E ve L değerlerinin değişmesi sonucunda kombinasyon sayısı azalabileceği gibi daha da artabilmektedir. Bütün bunlara göre model sayısının değişmesi problemin çözümünü zorlaştıracığı sonucuna kesin olarak varılamaz.

Görev Sayısı Değişimi: Montaj hatlarında görev sayısındaki artış hem çözümü zorlaştırmaktadır hem de çözüm süresini artırmaktadır. Bir montaj hattı probleminde görev sayısındaki 1 artış, ilgili görevin E ve L değerlerine bağlı olarak kombinasyon sayısının artmasına sebep olacaktır. Bu yüzden problemin arama uzayını büyüttüğünden çözüm süresi de artmaktadır. Görev sayısı yani karar değişkeni sayısındaki artış kısıt programlama modeli ile optimum çözümün elde edilmesi daha zordur ve boyut büyüdükçe imkansız hale gelir.

5.2. Tip 2 KMMHDP Değişken Seçim Kuralları

Bölüm 5.1’de ayrıntıları verilen ve matematiksel model ile mukayesesi yapılan KP modelinde standart arama algoritması kullanılmıştır. Bu bölümde ve gelecek bölümlerde ise tezin özünü teşkil eden Tip 2 KMMHDP için arama stratejilerine ilişkin yapılan çalışmalar verilecektir.

Kısıt programlamada en önemli aşama olan çözüm arama aşamasında arama stratejisinin iyi belirlenmesi çözümün kalitesine direk etki etmektedir. Değişken ve değer seçimi olmak üzere iki aşamadan oluşan arama stratejilerinde ilk olarak değişken seçimine ilişkin kurallar üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Değişken seçiminin öneminden ve çözüme olan etkisinden Bölüm 4.1.2’de bahsedilmiştir. KP’de değişken seçimi ile ilgili çalışmalarda, araştırmacıların daha çok kısıt programlama algoritmasının özelliklerinden faydalanarak kurallar oluşturduğu literatür araştırmasında yer verilmişti. Bunun yanında problem özelinde girdi parametrelerini dikkate alınarak da etkin kurallar oluşturulabilmektedir. Bu amaçla ele aldığımız Tip 2 KMMHDP için kurallar oluşturulmuş ve etkinlikleri araştırılmıştır. Etkin kuralların özellikleri belirlenerek, benzer problemlerin çözümünde kısıt programlama kullanan araştırmacılar için, kural oluşturulmasında dikkate alınması gereken durumlar belirtilmiştir.

Arama stratejisinin kullanıldığı kısıt programlama algoritmasını açıklamak amacıyla, algoritmanın kaba kodu KP Algoritma 1’de verilmiştir:

KP Algoritma 1: Çöz Z (SN, D, C), A

Girdiler:

Görevler= N

istasyonlar= S

Model= M

Her bir model ve görev için görev süreleri

Görevlerin öncelik ilişkileri

Her bir görev için E ve L değerleri

Değer atanan görevler kümesi= $AT = \emptyset$

Değer atanmayan görevler kümesi= $UT = \forall \text{ görevler}$

Run tanım kümesi azaltma

While $UT \neq \emptyset$ do

A değişken seçim kuralına göre SN_i değişkenini seç

SN_i tanım kümesinden v değerini rastgele seç.

Run Kısıt Yayılımı

If $D_j = \emptyset; j \in UT$ then

Run Yüzeysel Geri Dönüş

```

        If  $D_i = \emptyset$ ; i seçilen görev için then
            Run Geri Dönüş
        End If
    End If
End While
Outputs:
    Görevlerin atandığı istasyon numaraları
    İstasyon Süreleri
    Çevrim Süreleri toplamı

```

Algoritmaya girdi olarak; görev, istasyon ve model sayıları, görev süreleri, her bir görev için E ve L değerleri ve görevlerin öncelik ilişkileri girilmektedir. Başlangıçta Değer atanan değişkenler kümesi boş küme ve değer atanmayan değişkenler kümesi de bütün görevleri kapsamaktadır. Algoritma başlangıcında tanım kümesi azaltmada görevlerin E ve L değerleri ile öncelik ilişkilerine bağlı olarak her bir görevin tanım kümesinden atanması uygun olmayan istasyon numaraları çıkarılır. A arama stratejisinde kullanılan değişken seçim kuralına göre bir görev istasyona atanmak üzere seçilir. Görevin atanacağı istasyon numarası, tanım kümesinde yer alan istasyon numaralarından biri A arama stratejisinin değer seçim kuralına göre seçilerek görev bu istasyon numarasına atanır. Görevin atandığı istasyona göre kısıt yayılımı algoritması çalıştırılır ve diğer görevlerin tanım kümeleri yeniden düzenlenir. Düzenleme sonucunda, eğer istasyona atanmayan bir görevin tanım kümesi boş küme ise yüzeysel geri dönüş algoritması çalıştırılır ve daha önce seçilen görevin atandığı istasyon numarası değiştirilir. Eğer seçilen görevin tanım kümesi boş küme ise yani atanabileceği başka bir istasyon numarası kalmamış ise geri dönüş algoritması çalıştırılır ve bir başka görev istasyona atanmak üzere A arama stratejisi ile seçilir. Bütün görevler uygun istasyonlara atanana kadar bu işlemler tekrarlanır. Bir uygun atama bulununca istasyon süreleri, çevrim süresi ve görevlerin atandığı istasyonların numaraları çıktı olarak elde edilir. Bu algoritma bütün dallar denene kadar veya durdurma kriteri belirlenmiş ise durdurma kriteri sağlanana kadar tekrar edilir.

Algoritmada kullanılabilecek probleme özgü değişken seçim kuralları problemin girdi parametreleri dikkate alınarak belirlenmiştir. KMMHDP problemi için hangi görevden başlanarak atama yapılacağının belirlenmesi amacıyla, görev süresine bağlı 6 adet, öncelik ilişkisi bağlı 8 adet ve bu iki parametreyi birlikte dikkate alan 4 adet olmak üzere toplam 18 kural oluşturulmuştur. Oluşturulan bu 18 kural ile KP algoritmasının tanım kümesinin büyüklüğünü dikkate alan 2 kuralı kullanılarak literatürde yer alan problem setleri ile deneyler yapılmıştır. Her bir kuralın özelliği kategoriler bazında aşağıda açıklanmıştır:

5.2.1. Görevin süresine bağlı kurallar (GSBK)

KMMHDP için, görev sürelerine bağlı kurallar hem modeller bazında görev sürelerinin değişkenliği hem de görevler arasındaki süre farklılıkları dikkate alınarak oluşturulmuştur. Bu kurallar:

GSBK I: Her bir görevin modeller bazında süreleri karşılaştırılarak en küçük süre belirlenir. İkinci adımda ise, görevler birbiri arasında karşılaştırılarak belirlenen bu değerler arasından en büyük değere sahip olan görevden başlanarak sırasıyla görevler istasyonlara atanır. $\text{Max}_{i=1..N} \left(\text{Min}_{m=1..M} t_{im} \right)$

GSBK II: Her bir görevin modeller bazında süreleri karşılaştırılarak en büyük süre belirlenir. İkinci adımda ise, görevler birbiri arasında karşılaştırılarak belirlenen bu değerler arasından en büyük değere sahip olan görevden başlanarak sırasıyla görevler istasyonlara atanır. $\text{Max}_{i=1..N} \left(\text{Max}_{m=1..M} t_{im} \right)$

GSBK III: Her bir görevin modeller bazında ortalama süreleri belirlenir. İkinci adımda ise, görevler birbiri arasında karşılaştırılarak belirlenen bu değerler arasından en büyük değere

sahip olan görevden başlanarak sırasıyla görevler istasyonlara atanır. $\text{Max}_{i=1..N} \left(\frac{\sum_{m=1}^M t_{im}}{M} \right)$

GSBK IV: Her bir görevin modeller bazında ortalama süreleri belirlenir. İkinci adımda ise, görevler birbiri arasında karşılaştırılarak belirlenen bu değerler arasından en küçük değere

sahip olan görevden başlanarak sırasıyla görevler istasyonlara atanır. $\text{Min}_{i=1..N} \left(\frac{\sum_{m=1}^M t_{im}}{M} \right)$

GSBK V: Her bir görevin modeller bazında toplam süreleri belirlenir. İkinci adımda ise, görevler birbiri arasında karşılaştırılarak belirlenen bu değerler arasından en büyük değere

sahip olan görevden başlanarak sırasıyla görevler istasyonlara atanır. $\text{Max}_{i=1..N} \left(\sum_{m=1}^M t_{im} \right)$

GSBK VI: Her bir görevin modeller bazında toplam süreleri belirlenir. İkinci adımda ise, görevler birbiri arasında karşılaştırılarak belirlenen bu değerler arasından en küçük değere

sahip olan görevden başlanarak sırasıyla görevler istasyonlara atanır.
$$\text{Min}_{i=1...N} \left(\sum_{m=1}^M t_{im} \right)$$

5.2.2. Öncelik ilişkisine bağlı kurallar (ÖİBK)

Görevler arasındaki öncelik ilişkileri görevin atanabileceği istasyon numarasını etkileyen en önemli etkidir. Öncelik ilişkisi görevin atanabileceği istasyon numarasını diğer görevlere bağlı olarak kısıtlandırır. Buna bağlı olarak oluşturulabilecek kurallar şu şekildedir:

ÖİBK I: Her bir görev için takip eden işlerin sayısı bulunur. Bu değerler arasından en büyük değere sahip görevden başlanarak sırasıyla görevler istasyonlara atanır.

$$\text{Max}(\text{NumAllSuccessors}(i)) \quad i = 1...N$$

ÖİBK II: Her bir görev için takip eden işlerin sayısı bulunur. Bu değerler arasından en küçük değere sahip görevden başlanarak sırasıyla görevler istasyonlara atanır.

$$\text{Min}(\text{NumAllSuccessors}(i)) \quad i = 1...N$$

ÖİBK III: Her bir görev için öncesinde gelen işlerin sayısı bulunur. Bu değerler arasından en büyük değere sahip görevden başlanarak sırasıyla görevler istasyonlara atanır.

$$\text{Max}(\text{NumAllPredecessors}(i)) \quad i = 1...N$$

ÖİBK IV: Her bir görev için öncesinde gelen işlerin sayısı bulunur. Bu değerler arasından en küçük değere sahip görevden başlanarak sırasıyla görevler istasyonlara atanır.

$$\text{Min}(\text{NumAllPredecessors}(i)) \quad i = 1...N$$

ÖİBK V: Görevlerin atanabileceği en yüksek istasyon numarası (E_i) değerlerinden en büyük değere sahip olan görevden başlanarak sırasıyla görevler istasyonlara atanır. $\text{Max}_{i=1...N} E_i$

ÖİBK VI: Görevlerin atanabileceği en düşük istasyon numarası (E_i) değerlerinden en küçük değere sahip olan görevden başlanarak sırasıyla görevler istasyonlara atanır. $\text{Min}_{i=1...N} E_i$

ÖİBK VII: Görevlerin atanabileceği en yüksek istasyon numarası (L_i) değerlerinden en büyük değere sahip olan görevden başlanarak sırasıyla görevler istasyonlara atanır. $\text{Max}_{i=1...N} L_i$

ÖİBK VIII: Görevlerin atanabileceği en düşük istasyon numarası (L_i) değerlerinden en küçük değere sahip olan görevden başlanarak sırasıyla görevler istasyonlara atanır. $\text{Min}_{i=1...N} L_i$

5.2.3. Öncelik ilişkisini ve görev süresini bağlı kurallar (Öİ_GSBK)

Görevler arasındaki öncelik ilişkileri ve görev süresi birlikte dikkate alınarak kurallar oluşturulmuştur. Modeller bazında görev sürelerinin farklılık göstermesi kural yapılarında kullanılmıştır. Bu kurallar şu şekildedir:

Öİ_GSBK I: Her bir görev için kendisinin ve takip eden işlerin sürelerinin toplamı her bir model için ayrı ayrı hesaplanır, bu değerlerden büyük olanı bulunur ve bir diziye kaydedilir. Bu dizideki değerlerden en büyük değere sahip olan görevden başlanarak

sırasıyla görevler istasyonlara atanır. $\text{Max}_{j=1...N} \left(\text{Max}_{m=1...M} \left(t_{jm} + \sum_{i \in \text{AllSucc}(j)} t_{im} \right) \right)$

Öİ_GSBK II: Her bir görev için kendisinin ve takip eden işlerin sürelerinin toplamı her bir model için ayrı ayrı hesaplanır, bu değerlerden küçük olanı bulunur ve bir diziye kaydedilir. Bu dizideki değerlerden en büyük değere sahip olan görevden başlanarak

sırasıyla görevler istasyonlara atanır. $\text{Max}_{j=1...N} \left(\text{Min}_{m=1...M} \left(t_{jm} + \sum_{i \in \text{AllSucc}(j)} t_{im} \right) \right)$

Öİ_GSBK III: Her bir görev için kendisinin ve öncesinde gelen işlerin sürelerinin toplamı her bir model için ayrı ayrı hesaplanır, bu değerlerden büyük olanı bulunur ve bir diziye kaydedilir. Bu dizideki değerlerden en büyük değere sahip olan görevden başlanarak

sırasıyla görevler istasyonlara atanır. $\text{Max}_{j=1...N} \left(\text{Max}_{m=1...M} \left(t_{jm} + \sum_{i \in \text{Allpred}(j)} t_{im} \right) \right)$

Öİ_GSBK IV: Her bir görev için kendisinin ve öncesinde gelen işlerin sürelerinin toplamı her bir model için ayrı ayrı hesaplanır bu değerlerden küçük olanı bulunur ve bir diziye

kaydedilir. Bu dizideki değerlerden en büyük değere sahip olan görevden başlanarak

sırasıyla görevler istasyonlara atanır.
$$\text{Max}_{j=1\dots N} \left(\text{Min}_{m=1\dots M} \left(t_{jm} + \sum_{i \in \text{Allpred}(j)} t_{im} \right) \right)$$

5.2.4. Kısıt programlama algoritması kuralları

Kısıt programlamada yöntemin özelliğinden gelen bazı kurallar da mevcuttur. Bu kurallardan iki tanesi kullanılmıştır.

KP I: Maksimum DomainSize: Görevlerden tanım kümesindeki değer sayısı en büyük olandan başlanarak görevler istasyonlara atanır.

KP II: Minimum DomainSize: Görevlerden tanım kümesindeki değer sayısı en küçük olandan başlanarak görevler istasyonlara atanır.

5.2.5. Deneysel çalışmalar ve sonuçları

Yukarıda ayrıntılı bir şekilde açıklanan her bir kuralın problemin çözümüne etkisini ölçmek amacıyla deneysel çalışmalar yapılmıştır. Deneylerin sonuçları matematiksel programlama modeli ve standart kısıt programlama modeli sonuçları ile karşılaştırılarak kurallar arasından etkin olanlar belirlenmiştir.

Matematiksel model, kısıt programlama modeli ve kurallı kısıt programlama modelleri ILOG CP/Cplex 12.6 ile modellenmiştir. Deney setleri 3600 saniye süre ile sınırlandırılarak çözülmüştür. Yalnızca büyük bir problem olan 297 görevli Scholl deney seti 7200 saniye süre sınırlı olarak çalıştırılmıştır. Deneyler farklı öncelik ilişkisine ve 28 ile 297 arasında değişen farklı görev sayısına sahiptir. Model sayısı 2, 3 ve 4 olarak değişmektedir. 12 deney seti için farklı istasyon sayılarına göre deneyler yapılmıştır. Deney setlerinin verileri Çizelge 5.7’de verilmiştir.

Çizelge 5.7. Deney setleri

	Model sayısı	Görev sayısı	İstasyon Sayısı
Heskiaoff	2	28	8
Heskiaoff	3	28	8
Sawyer	2	30	8
Sawyer	3	30	8
Kilbridge	2	45	12
Kilbridge	3	45	12
Tongue	2	70	20
Tongue	3	70	20
WeeMag	2	75	20
WeeMag	4	75	20
Scholl	2	297	45
Scholl	4	297	45

Problemlerin çözüm sonuçlarının analizi ve karşılaştırmaları oluşturulan kural kategorileri dikkate alınarak ayrı ayrı yapılmıştır. Daha sonrasında ise bütün kategorilerin birbirlerine göre karşılaştırılması ve genel çıkarımlar verilmiştir.

Görevin süresine bağlı kurallara göre yapılan deneylerin sonuçları Çizelge 5.8’de verilmiştir. Bu sonuçlara göre:

GSBK I kurallı modelin sonuçları matematiksel model ile karşılaştırıldığında 2 problem için daha kötü olduğu diğer 10 problemde daha iyi bir sonucu veya aynı sonucu verdiği görülmektedir. Standart kısıt programlama modeli ile karşılaştırıldığında ise tüm problemler için eşit veya daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Genel olarak da bu kuralın daha kısa sürede iyi sonuçlara ulaştığı söylenebilir.

GSBK II kurallı modelin sonuçları matematiksel model ile karşılaştırıldığında 2 problem için daha kötü olduğu diğer 10 problemde daha iyi bir sonucu veya aynı sonucu verdiği görülmektedir. Standart kısıt programlama modeli ile karşılaştırıldığında ise tüm problemler için eşit veya daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Karşılaştırmalara göre, GSBK II’nin iyi sonuçlara daha kısa sürede ulaştığı söylenebilir.

GSBK III ve GSBK IV kuralları benzer yapıda kurallar olup birinde büyük değere sahip görevden, diğerinde ise küçük değere sahip görevden başlanarak atama yapılmaktadır. Öncelikle büyük değer sahip görevden başlayarak seçim yapan GSBK III kuralı ile matematiksel modele, kısıt programlama modeline ve GSBK IV'e göre daha iyi sonuçlara ulaşılmıştır. 12 deneyden 10 tanesinde matematiksel modele göre aynı veya daha iyi sonuç elde edilmiştir. Ancak, öncelikle küçük değerlerden başlayarak görev seçimi yapan GSBK IV kuralının iyi sonuçlar bulmada yetersiz kaldığı ve problemin sonucuna kötü etki eden bir kural olduğu görülmektedir.

Benzer yapıdaki bir diğer görev ikilisi olan GSBK V ve GSBK VI kurallarıyla elde edilen sonuçların değerlendirmesi yapıldığında da büyük değere sahip olan görevden başlanarak çözümün aranmaya başlanması ile daha düşük çevrim süresine sahip atamalar bulunduğu görülmektedir. GSBK V ile sadece 2 deneyde iyi sonuçlar elde edilememiştir. GSBK IV kuralına benzer şekilde küçük değere sahip görevlerden başlayarak seçim yapan GSBK VI kuralı ile daha iyi sonuçlar elde edilememiştir.

Kurallar birbiri içinde karşılaştırıldığında ise GSBK II kuralının daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir. Matematiksel model ve standart kısıt programlama modellerinin sonuçları ile diğer kuralların sonuçları genel değerlendirildiğinde ise büyük değerleri dikkate alarak atama yapmaya başlayan kuralların daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir.

Çizelge 5.8. GSBK kuralları çözüm sonuçları

	MP		Standard KP		GSBK I		GSBK II		GSBK III	
	Çözümü		Çözümü		Çözümü		Çözümü		Çözümü	
	En İyi Değer	Bulduğu zaman	En İyi Değer	Bulduğu zaman	En İyi Değer	Bulduğu zaman	En İyi Değer	Bulduğu zaman	En İyi Değer	Bulduğu zaman
Heskiaoff 2	488*	610	490	42	488	43	488	128	488	452
Heskiaoff 3	664*	2	665	180	664	11	664	18	664	8
Sawyer 2	367*	0,7	367	7	367	0,35	367	0,4	367	0,2
Sawyer 3	658*	2,5	658	17	658	0,45	658	0,8	658	0,4
Kilbridge 2	375*	460	376	1040	375	11	375	3	375	98
Kilbridge 3	597*	240	602	123	597	3590	598	61	598	96
Tongue 2	403	1460	400	2980	397	25	399	13	398	68
Tongue 3	615	100	612	524	603	190	600	105	604	265
WeeMag 2	154	235	159	28	156	5	155	53	155	437
WeeMag 4	311	290	322	2240	312	304	311	186	311	488
Scholl 2	3318	5520	3199	2918	3170	1438	3165	366	3162	1616
Scholl 4	6511	6120	6472	4300	6396	1551	6388	1300	6393	777
	MP		Standard KP		GSBK IV		GSBK V		GSBK VI	
	Çözümü		Çözümü		Çözümü		Çözümü		Çözümü	
	En İyi Değer	Bulduğu zaman	En İyi Değer	Bulduğu zaman	En İyi Değer	Bulduğu zaman	En İyi Değer	Bulduğu zaman	En İyi Değer	Bulduğu zaman
Heskiaoff 2	488*	610	490	42	489	72	488	472	489	230
Heskiaoff 3	664*	2	665	180	665	775	664	9	664	129
Sawyer 2	367*	0,7	367	7	367	3,2	367	0,15	367	3
Sawyer 3	658*	2,5	658	17	658	2,5	658	0,3	658	2,5
Kilbridge 2	375*	460	376	1040	376	325	375	64	376	120
Kilbridge 3	597*	240	602	123	600	555	598	90	602	245
Tongue 2	403	1460	400	2980	406	10	400	26	405	118
Tongue 3	615	100	612	524	608	222	604	248	608	222
WeeMag 2	154	235	159	28	158	271	156	10	158	17
WeeMag 4	311	290	322	2240	315	28	310	197	315	350
Scholl 2	3318	5520	3199	2918	3198	323	3168	1700	3199	182
Scholl 4	6511	6120	6472	4300	6447	1702	6401	1086	6450	600

* Optimum değer

Öncelik ilişkisine bağlı kurallara (ÖİBK) göre yapılan deneylerin sonuçları Çizelge 5.9'da verilmiştir. Bu sonuçlara göre:

ÖİBK I ve ÖİBK II, bu iki kural her bir görevden sonra gelen görev sayısının toplamının en büyük ve en küçük değerlerine göre çalışmaktadır. Bu iki kuralın sonuçlarını, matematiksel model sonuçları karşılaştırdığımızda belirgin bir üstünlüğe sahip

olmadıklarını görmekteyiz. Ancak, çok büyük bir problem olan Scholl montaj hattı probleminde matematiksel modele göre kısıt programlama modelinin sahip olduğu üstünlük bu kurallarda da görülmektedir. Standart kısıt programlama modelinin sonuçlarına göre bu kurallardan elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında daha iyi sonuçlar elde edildiği söylenebilir. ÖİBK II'nin kısmen daha iyi olduğu söylenebilir ancak daha etkin kurallar mevcuttur.

ÖİBK III ve ÖİBK IV benzer şekilde öncelik ilişkisine göre görevin kendisinden önce gelen görevlerin sayısına bağlı kurallardır. Bu kuralların sonuçlarına bakıldığında matematiksel model sonuçlarına göre belirgin bir üstünlük sağlayamadığı görülmektedir. Standart kısıt programlama modeline göre ise daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Bu iki kural da genel değerlendirme yapıldığında diğer kurallara göre etkin kurallar olmadıkları görülmüştür.

ÖİBK V ve ÖİBK VI kuralları ise Denklem 5.9 ile hesaplanan E değerlerini dikkate alan kurallardır. Bu değerlerin en büyük ve en küçük değerlerine göre görev seçimi yapıp atama yapılmıştır. Sonuçlara baktığımızda her iki kural da hem en iyi değeri bulma hem de bu değere ulaşana kadar geçen süre bakımından etkinliğinin yetersiz olduğu söylenebilir. Standart kısıt programlama modeline göre ise daha kısa sürede daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir.

ÖİBK VII ve ÖİBK VIII kuralları ise Denklem 5.10 ile hesaplanan L değerlerine bağlıdır. Bu değerlerin en büyük ve en küçük değerlerine göre görev seçimi yapıp atama yapılmıştır. Bu kurallar için de benzer yorumlar yapılabilir. Matematiksel model sonuçları ile bu kuralların sonuçları karşılaştırıldığında iyi sonuçları bulmada yetersiz kaldığı görülmektedir.

Genel olarak ÖİBK'lara ilişkin sonuçlar değerlendirildiğinde, bu kuralların iyi sonuçların elde edilmesinde yetersiz kaldığı görülmüştür. Bundan dolayı KP çözüm algoritmasında kullanılması uygun değildir. Bununla birlikte kısıt programlama modellerinde değişken seçimi için kurallar kullanmanın, standart kısıt programlama modeline göre genel olarak daha iyi sonuçlar verdiği bu deneyler sonucunda da görülmüştür.

Çizelge 5.9. ÖİBK kuralları çözüm sonuçları

	MP		Standard KP		ÖİBK I		ÖİBK II		ÖİBK III		ÖİBK IV	
	En	Çözümü	En	Çözümü	Çözümü		Çözümü		Çözümü		En	Çözümü
	İyi	Bulduğu	İyi	Bulduğu	En İyi	Bulduğu	En İyi	Bulduğu	En İyi	Bulduğu	İyi	Bulduğu
	Değer	zaman	Değer	zaman	Değer	zaman	Değer	zaman	Değer	zaman	Değer	zaman
Heskiaoff 2	488*	610	490	42	489	224	488	508	489	41	489	27
Heskiaoff 3	664*	2	665	180	664	32	664	240	664	130	664	158
Sawyer 2	367*	0,7	367	7	367	1,3	367	0,95	367	0,3	367	1,6
Sawyer 3	658*	2,5	658	17	658	1,7	658	2,5	658	3	658	8
Kilbridge 2	375*	460	376	1040	376	180	376	115	376	8	376	105
Kilbridge 3	597*	240	602	123	599	440	599	523	600	170	599	123
Tongue 2	403	1460	400	2980	400	27	404	65	406	557	401	555
Tongue 3	615	100	612	524	603	425	610	105	609	87	606	38
WeeMag 2	154	235	159	28	158	356	158	343	156	42	160	33
WeeMag 4	311	290	322	2240	314	376	314	310	312	285	312	172
Scholl 2	3318	5520	3199	2918	3277	931	3260	332	3254	1073	3286	2504
Scholl 4	6511	6120	6472	4300	6651	563	6516	1592	6487	687	6658	1146
	MP		Standard KP		ÖİBK V		ÖİBK VI		ÖİBK VII		ÖİBK VIII	
	En	Çözümü	En	Çözümü	Çözümü		Çözümü		Çözümü		En	Çözümü
	İyi	Bulduğu	İyi	Bulduğu	En İyi	Bulduğu	En İyi	Bulduğu	En İyi	Bulduğu	İyi	Bulduğu
	Değer	zaman	Değer	zaman	Değer	zaman	Değer	zaman	Değer	zaman	Değer	zaman
Heskiaoff 2	488*	610	490	42	489	63	489	4	489	9	489	88
Heskiaoff 3	664*	2	665	180	664	10	664	44	664	61	664	367
Sawyer 2	367*	0,7	367	7	367	0,6	367	0,6	367	0,5	367	0,5
Sawyer 3	658*	2,5	658	17	658	3	658	2,5	658	0,4	658	1
Kilbridge 2	375*	460	376	1040	376	50	377	13	375	180	377	25
Kilbridge 3	597*	240	602	123	600	546	599	100	599	70	601	170
Tongue 2	403	1460	400	2980	405	210	400	175	404	25	404	58
Tongue 3	615	100	612	524	609	50	603	125	604	230	608	225
WeeMag 2	154	235	159	28	158	27	159	428	156	54	158	72
WeeMag 4	311	290	322	2240	313	482	316	194	313	313	314	174
Scholl 2	3318	5520	3199	2918	3199	1237	3289	511	3201	1056	3258	386
Scholl 4	6511	6120	6472	4300	6507	1200	6646	1453	6409	980	6639	1035

* optimum değer

Öncelik ilişkisini ve görev süresini bağlı kurallar (Öİ_GSBK) ile yapılan deneylerin sonuçları Çizelge 5.10'da verilmiştir. Bu sonuçlara göre:

Öİ_GSBK I ve Öİ_GSBK II kuralları görevlerin öncelik ilişkilerinde kendilerinden sonra yer alan görevlerin süreleri toplamına bağlı kurallardır. Bu kuralların iyi sonuçları elde etmede yetersiz kaldıkları görülmektedir. Özellikle büyük boyutlu problemlerde bu sonuç

daha net ortaya çıkmaktadır. Matematiksel modele göre ve standart KP modeline göre bazı problemlerde iyi sonuç elde edilmiş olsa da baskın olarak iyi sonuçların elde edildiği söylenemez. Problemin çözümünde kullanılması uygun değildir.

Öİ_GSBK III ve Öİ_GSBK IV ise öncesinde yer alan görevlerin sürelerinin toplamına bağlı kurallardır. Benzer şekilde bu kurallarında iyi çözümleri bulmada etkin kurallar olmadıkları sonuçlarda görülmektedir.

Bu kategorideki kurallarda iyi çözümleri bulmada problem boyutu büyüdükçe matematiksel modellemeye göre daha iyi sonuçlar elde edilmiş olsa da standart KP'ye göre iyi sonuçlar elde edilememiştir. Bu kategoride yer alan kuralların etkin olmadığı sonucuna varılmıştır.

Çizelge 5.10. Öİ_GSBK kuralları çözüm sonuçları

	MP		Standard KP		Öİ_GSBK I		Öİ_GSBK II	
	En İyi Değer	Çözümü Bulduğu zaman	En İyi Değer	Çözümü Bulduğu zaman	En İyi Değer	Çözümü Bulduğu zaman	En İyi Değer	Çözümü Bulduğu zaman
Heskiaoff 2	488*	610	490	42	489	16	489	9
Heskiaoff 3	664*	2	665	180	664	1	664	27
Sawyer 2	367*	0,7	367	7	367	1,69	367	0,53
Sawyer 3	658*	2,5	658	17	658	9	658	7
Kilbridge 2	375*	460	376	1040	376	568	376	180
Kilbridge 3	597*	240	602	123	599	350	599	105
Tongue 2	403	1460	400	2980	400	145	400	139
Tongue 3	615	100	612	524	601	380	600	325
WeeMag 2	154	235	159	28	156	219	157	476
WeeMag 4	311	290	322	2240	313	544	314	62
Scholl 2	3318	5520	3199	2918	3304	1307	3282	200
Scholl 4	6511	6120	6472	4300	6642	477	6636	1264
	MP		Standard KP		Öİ_GSBK III		Öİ_GSBK IV	
	En İyi Değer	Çözümü Bulduğu zaman	En İyi Değer	Çözümü Bulduğu zaman	En İyi Değer	Çözümü Bulduğu zaman	En İyi Değer	Çözümü Bulduğu zaman
Heskiaoff 2	488*	610	490	42	488	505	489	7
Heskiaoff 3	664*	2	665	180	664	53	664	51
Sawyer 2	367*	0,7	367	7	367	0,38	367	0,36
Sawyer 3	658*	2,5	658	17	658	25	658	5
Kilbridge 2	375*	460	376	1040	375	528	375	65
Kilbridge 3	597*	240	602	123	599	358	599	17
Tongue 2	403	1460	400	2980	404	7	400	565
Tongue 3	615	100	612	524	609	73	607	529
WeeMag 2	154	235	159	28	156	103	156	32
WeeMag 4	311	290	322	2240	312	323	311	433
Scholl 2	3318	5520	3199	2918	3276	210	3242	725
Scholl 4	6511	6120	6472	4300	6535	893	6487	1089

* optimum değer

KP yöntemine özgü kuralların sonuçları Çizelge 5.11’de verilmiştir. Bu sonuçlar değerlendirildiğinde:

KP I kuralında daha iyi sonuçlara bazı problemler için ulaşılmış olsa da genel olarak etkin bir kural değildir. KP II kuralında ise 3 problem haricinde diğerleri için matematiksel modelin sonuçlarına göre aynı veya daha iyi sonuçlara ulaşılmıştır. Ayrıca her iki kuralında iyi sonuçları bulmada standart kısıt programlama modeline göre daha başarılı

olduğu söylenebilir. Süre olarak bakıldığında KP II kuralının özellikle problem boyutu büyüdüğünde daha kısa sürede çözümler bulunduğ görülmektedir.

Çizelge 5.11. KP kuralları çözüm sonuçları

	MP		Standard KP		KP I		KP II	
	Çözümü		Çözümü		Çözümü		Çözümü	
	En İyi Değer	Bulduğu zaman	En İyi Değer	Bulduğu zaman	En İyi Değer	Bulduğu zaman	En İyi Değer	Bulduğu zaman
Heskiaoff 2	488*	610	490	42	489	189	488	362
Heskiaoff 3	664*	2	665	180	664	324	664	56
Sawyer 2	367*	0,7	367	7	367	8,5	367	0,5
Sawyer 3	658*	2,5	658	17	658	3,5	658	1,2
Kilbridge 2	375*	460	376	1040	376	120	375	89
Kilbridge 3	597*	240	602	123	601	340	598	220
Tongue 2	403	1460	400	2980	404	335	400	15
Tongue 3	615	100	612	524	612	61	601	85
WeeMag 2	154	235	159	28	157	74	156	18
WeeMag 4	311	290	322	2240	317	358	312	379
Scholl 2	3318	5520	3199	918	3278	1556	3175	1451
Scholl 4	6511	6120	6495	2659	6470	1634	6418	1082

* optimum değer

Değişken seçim kuralları için yapılan deneyler sonucunda araştırma sorularından bir problem için ne türlü kurallar oluşturulabileceği ve bu kurallardan etkin olanlarının özelliklerinin araştırılmıştır. Bu deneyler sonucunda aşağıdaki çıkarımlar yapılmıştır:

Çıkarım 1: Yapılan deneyler sonucunda GSBK ve KP kural kategorilerinde bulunan kuralların, diğer kural kategorilerindekilere göre hem iyi sonuçları elde etmeleri hem de kısa sürede bu sonuçlara ulaşmaları yönünden belirgin bir şekilde etkin olduğu görülmektedir.

Çıkarım 2: GSBK ve KP kategorilerindeki kurallar değerlendirildiğinde ise beş kuralın etkinliği ön plana çıkmaktadır. Bunlar: GSBK I, GSBK II, GSBK III, GSBK V ve KP II kurallarıdır. Bu kurallarla özellikle görev sayısı, model sayısı ve istasyon sayısı arttığında daha düşük çevrim süreleri elde edilmektedir.

Çıkarım 3: Matematiksel model sonuçları ve kısıt programlama modellerinin sonuçları karşılaştırıldığında matematiksel modelin 28 ve 30 görev sayısına sahip olan problemlerde

daha kısa sürede kesin sonuçlar verdiği görülmektedir. 45 görev sayısına sahip problemde ise yaklaşık sonuçlar vermektedir. 70 ve 75 görev sayısına sahip olan problemlerde ise kısıt programlama modelleriyle iyi sonuçlar elde edilebilmektedir. 297 göreve sahip olan çok büyük boyutlu problemi ise kısıt programlama modelleri hem daha kısa sürede çözmüş hem de çok daha iyi sonuçlara ulaşmıştır.

Çıkarım 4: Deneyler sonucunda varılan diğer bir sonuç ise, oluşturulan kurallardan en büyük değerleri dikkate alarak atamaya başlayan kurallar ile en küçük değeri dikkate alarak atamaya başlayan kurallara göre daha iyi sonuçları elde edilmektedir. Eğer bir montaj hattı için kısıt programlama modeli kurulacak ise, atamaya başlanacak görevin seçiminde en büyük değeri dikkate alan kurallar kullanılmalıdır. Çizelge 5.12’de seçilen kuralların ve zaman sınırı olmadan çalıştırılan MP sonuçları karşılaştırıldığında kurallı yapının zaman sınırlı olarak çalıştırılmasına rağmen deney setlerinin çoğunluğunda daha iyi sonuçlar elde edilmektedir.

Çizelge 5.12. Seçilen kuralların zaman sınırsız olarak çalıştırılan MP sonuçları ile karşılaştırılması

Deney Seti	Zaman							
	Sınırsız MP	Zaman sınırlı MP	Standart KP	GSBK I	GSBK II	GSBK III	GSBK V	KP II
Heskiaoff 2	488*	488*	490	488	488	488	488	488
Heskiaoff 3	664*	664*	665	664	664	664	664	664
Sawyer 2	367*	367*	367	367	367	367	367	367
Sawyer 3	658*	658*	658	658	658	658	658	658
Kilbridge 2	375*	375*	376	375	375	375	375	375
Kilbridge 3	597*	597*	602	597	598	598	598	598
Tongue 2	400	403	400	397	399	398	400	400
Tongue 3	607	615	612	603	600	604	604	601
Weemag 2	154	154	159	156	155	155	156	156
Weemag 4	311	311	322	312	311	311	310	312
Scholl 2	3204	3318	3199	3170	3165	3162	3168	3175
Scholl 4	6420	6511	6495	6396	6388	6393	6401	6418

* optimum değer

5.3. Tip 2 KMMHDP Statik Değer Seçim Kuralları

Kısıt programlama algoritmasında aramanın ikinci aşaması olan değer seçim aşamasında, değişken seçim kuralına göre seçilen değişkene atanacak olan değer, değişkenin tanım

kümesi içerisinde seçilmektedir. Literatürde değer seçim kuralları genellikle tanım kümesi içerisindeki en küçük veya en büyük değerlerin seçilmesi şeklinde oluşturulduğu görülmektedir. Tez çalışması kapsamında KMMHDP için kurulan modelde kullanılan karar değişkenleri bir görevin atanacağı istasyon numarası değerlerini almaktadır. Bu aşamada görevin hangi istasyon numarasına atanacağını belirlenmesine yönelik kurallar oluşturulmuştur. Bu kurallar; istasyon numaralarının önceliklendirilmesine göre 4 adet, istasyona atanabilecek görev sayısına göre 2 adet, istasyona atanabilecek işlerin sürelerinin toplamına göre 4 adet ve kısıt programlamaya özgü yöntemle bağlı 4 adet olmak üzere toplamda 14 adettir. Bunlar kategori bazında sırasıyla şu şekildedir:

5.3.1. İstasyon numaralarına bağlı kurallar

Bu kategorideki kurallar değişkenin tanım kümesinde yer alan değerlerin en büyüğüne, en küçüğüne ve kurulacak olan montaj hattı için orta istasyona yakınlık ve uzaklığına bağlı olarak bir değer seçilmesi şeklinde tanımlanmıştır.

Kural 1: Değişkenin değer sınırları içinde olan en büyük istasyon numarasının seçilmesi.

Kural 2: Değişkenin değer sınırları içinde olan en küçük istasyon numarasının seçilmesi.

Kural 3: Değişkenin değer sınırları içinde olan ve ortadaki istasyona en uzak olan istasyon numarasının seçilmesi.

Kural 4: Değişkenin değer sınırları içinde olan ve ortadaki istasyona en yakın olan istasyon numarasının seçilmesi.

5.3.2. İstasyona atanabilecek görev sayısına bağlı kurallar

Her bir görevin hesaplanan E ve L değerleri dikkate alınarak, her bir istasyon numarasına atanabilecek görevlerin sayısına bağlı olarak oluşturulan kurallardır.

Kural 5: Görevlerin E ve L değerleri dikkate alınarak her bir istasyona atanabilecek bütün işlerin toplam sayısı bulunur. Bu değerlerden değişkenin tanım kümesi içinde olan en büyük katsayıya sahip olan istasyon numarası seçilir.

Kural 6: Görevlerin E ve L değerleri dikkate alınarak her bir istasyona atanabilecek bütün işlerin toplam sayısı bulunur. Bu değerlerden değişkenin tanım kümesi içinde en küçük katsayıya sahip olan istasyon numarası seçilir.

5.3.3. İstasyona atanabilecek görevlerin süresine bağlı kurallar

Her bir görev için hesaplanan E ve L değerleri dikkate alınarak her bir istasyon numarası için atanabilecek görevlerin sürelerinin toplamı temel alınarak oluşturulan kurallardır. Görevlerin süreleri model bazında karşılaştırılarak en büyük, en küçük ve ortalama değerleri dikkate alınmıştır ve buna bağlı olarak dört kural oluşturulmuştur.

Kural 7: Modeller bazında her bir görev için en büyük görev süresi belirlenir. Görevlerin E ve L değerleri dikkate alınarak bir istasyona atanabilecek tüm görevlerin süreleri toplamı hesaplanarak bir diziye kaydedilir. Bu dizideki değerlere göre değişkenin tanım kümesi içinde yer alan en küçük katsayıya sahip olan istasyon numarası seçilir.

Kural 8: Modeller bazında her bir görev için en küçük görev süresi belirlenir. Görevlerin E ve L değerleri dikkate alınarak bir istasyona atanabilecek tüm görevlerin süreleri toplamı hesaplanarak bir diziye kaydedilir. Bu dizideki değerlere göre değişkenin tanım kümesi içinde yer alan en küçük katsayıya sahip olan istasyon numarası seçilir.

Kural 9: Model bazında ortalama görev süreleri dikkate alınarak E ve L değerlerine göre bir istasyona atanabilecek görevlerin süreleri toplamı bulunur ve her bir istasyon numarası için bir diziye kaydedilir. Bu dizideki değerlere göre değişkenin tanım kümesi içerisinde yer alan en büyük ağırlığa sahip olan istasyon numarası seçilir.

Kural 10: Model bazında ortalama görev süreleri dikkate alınarak E ve L değerlerine göre bir istasyona atanabilecek görevlerin süreleri toplamı bulunur ve her bir istasyon numarası için bir diziye kaydedilir. Bu dizideki değerlere göre değişkenin tanım kümesi içerisinde yer alan en küçük ağırlığa sahip olan istasyon numarası seçilir.

5.3.4. Kısıt programlama algoritmasına özgü kurallar

Kısıt programlama algoritmasına özgü iki kural yapısı deneylerde kullanılmıştır. Bu kurallardan ValueImpact kuralı seçilen değişkene atanan değer için arama alanının ortalama

azaltılmasını dikkate alan bir kuraldır. Arama alanında sağlanan azalma ne kadar fazla ise o değerin atanması bu oranda iyidir. ValueSuccessrate ise seçilen değişkene atanan değerin başarılı bir şekilde atanma oranını dikkate alır. Bir değerin başarı oranı, değer n defa atanması için seçilmiş ve bu seçimlerden f defa başarısız olmuş ise $(n - f) / n$ ile hesaplanır.

Kural 11: En büyük ValueImpact değerine sahip istasyon numarasının öncelikli olarak seçilmesi.

Kural 12: En küçük ValueImpact değerine sahip istasyon numarasının öncelikli olarak seçilmesi.

Kural 13: En büyük ValueSuccessrate değerine sahip istasyon numarasının öncelikli olarak seçilmesi.

Kural 14: En küçük ValueSuccessrate değerine sahip değişkenin istasyon numarasının öncelikli olarak seçilmesi.

5.3.5. Deneysel çalışmalar ve sonuçları

Deneysel çalışmalar kapsamında Çizelge 5.5'te verilen deney setleri kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda, değişken seçimine ilişkin çalışmaların sonuçları dikkate alınarak iyi sonuç verdiği belirlenen değişken seçim kuralları ile değer seçimi için oluşturulan kurallar eşleştirilerek arama stratejileri oluşturulmuştur. Deneyler değişken seçimi için yapılan deneylerde olduğu gibi zaman sınırlı olarak çalıştırılmıştır. Deneylerin sonuçları EK-1'de verilmiştir.

Deneysel çalışmaların sonuçları zaman sınırlı MP sonuçları ile karşılaştırıldığında, kural ikilerinin kaç deney setinde aynı veya iyi sonuç verdiğinin sayıları Çizelge 5.13'te yer almaktadır. Buna göre, 17 kural ikilisinin 10 deney setinde ve 6 kural ikilisinin 11 deney setinde aynı veya daha iyi sonuçları bulunduğu görülmektedir.

Çizelge 5.13. Deney sonuçlarının zaman sınırlı MP sonuçları ile karşılaştırılması özeti

	Kural 1	Kural 2	Kural 3	Kural 4	Kural 5	Kural 6	Kural 7
GSBK I	8	10	8	8	9	9	10
GSBK II	8	10	9	8	9	9	10
GSBK III	7	10	11	8	9	10	11
GSBK V	8	10	11	8	9	10	11
KP II	9	8	9	8	9	8	9
	Kural 8	Kural 9	Kural 10	Kural 11	Kural 12	Kural 13	Kural 14
GSBK I	9	8	7	9	10	9	9
GSBK II	10	7	8	11	9	10	9
GSBK III	10	8	8	10	9	9	9
GSBK V	11	8	9	10	9	10	9
KP II	10	9	8	9	10	9	9

Deneyisel çalışmaların sonuçlarının benzer şekilde zaman sınırsız olarak çalıştırılan MP sonuçlarıyla da karşılaştırılmış ve sonuçlara ilişkin sayısal değerler Çizelge 5.14'te verilmiştir. Bu sonuçlara göre, 11 kural ikilisi için 10 deney setinde ve 2 kural ikilisi için ise 11 deney setinde aynı veya daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Her ne kadar bu 13 kural ikilisi problemin çözümünde kullanılabilir olsa da, araştırmacılara yol göstermesi için bu sayının azaltılması daha uygun olacaktır. Bu aşamada deney sonuçlarına analiz edildiğinde, büyük boyutlu Scholl deney setleri için zaman sınırsız MP sonuçlarının karşılaştırmada yetersiz kaldığı görülmektedir. Bundan dolayı, sadece değişken seçim kuralları kullanılan deneyler göz önüne alınarak Scholl 2 deney seti için 3175 ve Scholl 4 deney seti için 6393 amaç değerleri bir sınır olarak belirlenmiştir. Çizelge 5.15'te yer alan üst sınır değerleri kullanılarak yeniden bir karşılaştırma yapılmıştır. Buna göre, 5 kural ikilisinde 10 deney seti için aynı veya daha iyi sonuçlar elde edildiği Çizelge 5.16'daki verilerde görülmektedir. Bu karşılaştırma sonuçlarına göre, KMMHDP'nin çözümünde kullanılması önerilen değişken ve değer seçim kural ikilileri Çizelge 5.17'de verilmiştir. Kural ikililerinden dört tanesinde görev süresi temelinde oluşturulmuş değer seçim kuralı, bir tanesinde de kısıt programlama kurallarından ValueImpact kuralı kullanılmaktadır.

Çizelge 5.14. Deney sonuçlarının zaman sınırsız MP sonuçları ile karşılaştırılması özeti

	Kural 1	Kural 2	Kural 3	Kural 4	Kural 5	Kural 6	Kural 7
GSBK I	7	8	7	7	7	8	9
GSBK II	7	8	9	7	7	9	9
GSBK III	6	8	11	7	7	10	10
GSBK V	7	8	10	7	8	10	10
KP II	8	8	8	8	9	7	8
	Kural 8	Kural 9	Kural 10	Kural 11	Kural 12	Kural 13	Kural 14
GSBK I	9	7	7	9	8	7	9
GSBK II	9	7	8	11	7	8	9
GSBK III	10	6	8	10	7	7	9
GSBK V	10	8	9	10	8	9	9
KP II	10	9	7	8	10	9	8

Çizelge 5.15. Deney Setleri için çözüm sonucu üst sınır değerleri

Deney Seti	Üst Sınır Değeri
Heskiaoff 2	488
Heskiaoff 3	664
Sawyer 2	367
Sawyer 3	658
Kilbridge 2	375
Kilbridge 3	597
Tongue 2	400
Tongue 3	607
Weemag 2	154
Weemag 4	311
Scholl 2	3175
Scholl 4	6393

Çizelge 5.16. Deney sonuçlarının üst sınır değerleri ile karşılaştırılması özeti

	Kural 1	Kural 2	Kural 3	Kural 4	Kural 5	Kural 6	Kural 7
GSBK I	6	8	8	7	7	8	9
GSBK II	7	8	8	8	7	8	9
GSBK III	7	8	9	7	7	9	10
GSBK V	6	8	9	8	7	8	10
KP II	8	7	7	8	9	8	8
	Kural 8	Kural 9	Kural 10	Kural 11	Kural 12	Kural 13	Kural 14
GSBK I	9	8	8	8	8	7	9
GSBK II	9	8	9	10	7	8	8
GSBK III	10	6	8	9	8	7	7
GSBK V	10	8	9	9	7	8	7
KP II	9	9	8	8	9	9	8

Çizelge 5.17. KMMHDP için kullanılabilir değişken ve değer seçim ikilileri

Değişken seçim kuralı	Değer seçim kuralı
GSBK III	Kural 7
GSBK V	Kural 7
GSBK III	Kural 8
GSBK V	Kural 8
GSBK II	Kural 11

Seçilen kural ikililerinin sonuçları ve karşılaştırmada kullanılan veriler Çizelge 5.18’de birlikte verilmiştir. Bu sonuçlar değerlendirildiğinde, kural ikilileri ile Kilbridge 3 ve Scholl 4 deney setleri için iyi sonuçlar elde edilemediği ancak diğer deney setlerinde iyi sonuçlar elde edildiği görülmektedir. Değişken seçiminde olduğu gibi değer seçiminde de

sürelerle bağlı kurallar daha iyi sonuçlar üretmiştir. Ayrıca kuralların oluşturulmasında dikkate alınması gereken ikinci bir husus ise küçük ağırlığa sahip değerlerin önce seçilmesi iyi sonuçların elde edilmesinde daha etkin olmaktadır.

Çizelge 5.18. Karşılaştırma için kullanılan değerler ve seçilen kural ikililerinin sonuçları

Deney Setleri	Üst Sınır Değeri	Zaman Sınırsız MP	Zaman sınırlı MP	Standart KP	GSBK III + Kural 7	GSBK III + Kural 8	GSBK V + Kural 7	GSBK V + Kural 8	GSBK II + Kural 11
Heskiaoff 2	488*	488*	488*	490	488	488	488	488	488
Heskiaoff 3	664*	664*	664*	665	664	664	664	664	664
Sawyer 2	367*	367*	367*	367	367	367	367	367	367
Sawyer 3	658*	658*	658*	658	658	658	658	658	658
Kilbridge 2	375*	375*	375*	376	375	375	375	375	375
Kilbridge 3	597*	597*	597*	602	599	599	599	599	598
Tongue 2	400	400	403	400	397	397	396	396	398
Tongue 3	607	607	615	612	599	600	599	599	604
WeeMag 2	154	154	154	159	154	154	154	154	154
WeeMag 4	311	311	311	322	310	310	310	310	311
Scholl 2	3175	3204	3318	3199	3160	3162	3164	3173	3164
Scholl 4	6393	6420	6511	6495	6560	6614	6850	6766	6419

* optimum değer

5.4. Dinamik Arama Sezgiseli

Bu bölümde, değer seçim aşaması için geliştirilen dinamik yapının entegre edildiği KP dinamik arama sezgiseli anlatılacaktır. Geliştirilen bu dinamik arama sezgiseli, kısıt programlama çözüm arama algoritmasının genel yapısı bozmamaktadır, yani kesin sonuç veren algoritma olma özelliğini değiştirmemektedir.

Önerilen dinamik arama sezgiselinin kullanıldığı kısıt programlama modelinde girdi olarak istasyon sayısı, görev sayısı, model sayısı, görev süreleri, α sınır parametresi ile görevlerin ağırlık değerleri kullanılmaktadır. Ayrıca kısıt programlama algoritmasının girdileri olan değişkenler, değişken tanım kümeleri ve kısıtlar tanımlanmıştır. Değişken seçim kuralı olarak, tez kapsamında daha önce belirlenen beş değişken seçim kuralı kullanılmıştır. Kullanılacak değişken seçim kuralı algoritmada başlangıçta tanımlanmıştır. Algoritmada öncelikle girilen değişken seçim kuralına göre, bir görev istasyona atanmak üzere seçilmektedir. Görevin seçilmesinden sonra ise, görevin atanacağı istasyon numarası belirlenmektedir. Bu aşamada istasyon numarasının seçimi için önerilen sezgisel yöntemde, görevin atanacağı istasyon numarası istasyon dolulukları ve seçilen görevin

görev süresine göre hesaplanan ağırlık değeri dikkate alınarak belirlenmektedir. Eğer görevin ağırlık değeri(V), α ağırlık alt sınır değerinden küçük ise tanım kümesi içinde yer alan istasyon numaralarından en büyük istasyon süresine sahip olan istasyona atanır. Eğer görevin ağırlık değeri(V), $(100 - \alpha)$ ağırlık üst sınır değerinden büyük ise tanım kümesi içinde yer alan istasyon numaralarından en küçük istasyon numarasına sahip olan istasyon numarasına atanır. Eğer görevin ağırlık değeri(V), α ağırlık alt sınırından büyük ve $(100 - \alpha)$ ağırlık üst sınırından küçük ise tanım kümesi içerisinde yer alan istasyonlardan birine rastgele atanmaktadır. Görev bir istasyona atandıktan sonra, kısıt yayılımı algoritması çalışır ve diğer değişkenlerin tanım kümesinden uygun olmayan değerler çıkarılır. Bu aşamadan sonra iki kontrol yapılır. Birincisinde atanmayan görevler arasında tanım kümesi boş olan var ise geri dönüş algoritması çalıştırılır ve seçilen değişkenin değeri değiştirilir. İkinci kontrolde ise seçilen değişkenin tanım kümesi boş ise geri dönüş algoritması çalıştırılır ve değişken değiştirilir. Genel yapısını anlattığımız algoritmanın kaba kodu KP Algoritma 2’de verilmiştir.

KP Algoritma 2: Çözüm arama sezgiseli

Inputs:

Görev Sayısı= N
 İstasyon Sayısı= S
 Model Sayısı= M
 Görev Süresi= t_{im}
 Atanan görevler kümesi= AT
 Atanamayan görevler kümesi= UT
 Ağırlık1= V_{1i}
 Ağırlık2= V_{2i}
 Ağırlık3= V_{3i}
 Ağırlık alt sınırı (α)
 Ağırlık üst sınırı ($100 - \alpha$)
 $Z(SN, D, C), A$

Run *tanım kümesi azaltma*

While $UT \neq \emptyset$ do

Seç SN_i A kuralına göre.

Run Değer seçim sezgiseli:

If $CPUTime \leq \max CPUTime / 3$

If $V_{1i} \leq \alpha$

Forall $k \in S$ and $m \in M$

If $SN_i = k$

Hesapla $S_{km} = \sum_{i \in N} t_{im}$

Forall $k \in S$

Hesapla $S_k = \sum_{m \in M} S_{km}, \forall k$

Bul $\text{Max}_{k \in S} S_k ; k \in D_i$
Seç k ;
Assign i görevini k istasyonuna $SN_i = k$.
 If $\alpha < V_{1i} < (100 - \alpha)$
Seç k *random*, $k \in D_i$;
Ata i görevini k istasyonuna $SN_i = k$.
 If $V_{1i} \geq (100 - \alpha)$
 Forall $k \in S$ and $m \in M$
 If $SN_i = k$
Hesapla $S_{km} = \sum_{i \in N} t_{im}$
 Forall $k \in S$
Hesapla $S_k = \sum_{m \in M} S_{km}, \forall k$
Bul $\text{Min}_{k \in S} S_k ; k \in D_i$
Seç k ;
Assign i görevini k istasyonuna $SN_i = k$.
 If $\text{maxCPUTime}/3 > \text{CPUTime} < 2(\text{maxCPUTime})/3$
 If $V_{2i} \leq \alpha$
 Forall $k \in S$ and $m \in M$
 If $SN_i = k$
Hesapla $S_{km} = \sum_{i \in N} t_{im}$
 Forall $k \in S$
Hesapla $S_k = \sum_{m \in M} S_{km}, \forall k$
Bul $\text{Max}_{k \in S} S_k ; k \in D_i$
Seç k ;
Assign i görevini k istasyonuna $SN_i = k$.
 If $\alpha < V_{2i} < (100 - \alpha)$
Seç k *random*, $k \in D_i$;
Ata i görevini k istasyonuna $SN_i = k$.
 If $V_{2i} \geq (100 - \alpha)$
 Forall $k \in S$ and $m \in M$
 If $SN_i = k$
Hesapla $S_{km} = \sum_{i \in N} t_{im}$
 Forall $k \in S$
Hesapla $S_k = \sum_{m \in M} S_{km}, \forall k$
Bul $\text{Min}_{k \in S} S_k ; k \in D_i$
Seç k ;
Assign i görevini k istasyonuna $SN_i = k$.
 If $\text{CPUTime} \geq 2(\text{maxCPUTime})/3$

```

If  $V_{3i} \leq \alpha$ 
  Forall  $k \in S$  and  $m \in M$ 
    If  $SN_i = k$ 
      Hesapla  $S_{km} = \sum_{i \in N} t_{im}$ 
    Forall  $k \in S$ 
      Hesapla  $S_k = \sum_{m \in M} S_{km}, \forall k$ 
    Bul  $Max_{k \in S} S_k; k \in D_i$ 
    Seç  $k$ ;
    Assign  $i$  görevini  $k$  istasyonuna  $SN_i = k$  .
If  $\alpha < V_{3i} < (100 - \alpha)$ 
  Seç  $k$  random,  $k \in D_i$  ;
  Ata  $i$  görevini  $k$  istasyonuna  $SN_i = k$  .
If  $V_{3i} \geq (100 - \alpha)$ 
  Forall  $k \in S$  and  $m \in M$ 
    If  $SN_i = k$ 
      Hesapla  $S_{km} = \sum_{i \in N} t_{im}$ 
    Forall  $k \in S$ 
      Hesapla  $S_k = \sum_{m \in M} S_{km}, \forall k$ 
    Bul  $Min_{k \in S} S_k; k \in D_i$ 
    Seç  $k$ ;
    Assign  $i$  görevini  $k$  istasyonuna  $SN_i = k$  .

Run Kısıt yayılımı
If  $D_i = \emptyset; i \in UT$  then
  Run Backtrack (değişkene atanan değeri değiştir)

  If  $D_i = \emptyset; i$  seçilen görev then
    Run Backtrack (Değişkeni değiştir)
  End If
End If
End While
OutPuts:
  Görevlerin atandığı istasyon numaraları
  İstasyon süreleri
  Çevrim Süreleri Toplamı

```

Algoritmada kullanılan 3 farklı ağırlık değeri şu şekilde hesaplanmıştır:

Çizelge 5.19’da üç model için görev süreleri verilmiştir. Bu sürelere göre her bir görev için minimum, maksimum ve toplam görev süreleri bulunmuştur (Çizelge 5.20). Minimum, maksimum ve toplam görev süreleri içerisinde en büyük değerler belirlenir. Her bir

sütunda bulunan değerler ilgili sütun için belirlenen en büyük değere bölünüp 100 ile çarpılarak 0-100 arasında değerlere normalize edilmiştir (Çizelge 5.21).

Algoritmada minimum, maksimum ve toplam görev sürelerine bağlı olarak her bir deney seti için hesaplanan ağırlıklar kullanılmıştır. Kısıt programlama algoritmasının toplam çalışma süresi üçe ayrılmıştır ve ilk 1/3'lik kısımda V_{1i} ağırlık değerleri, ikinci 1/3'lik kısımda V_{2i} ağırlık değerleri ve üçüncü 1/3'lik kısımda ise V_{3i} ağırlık değerleri kullanılmıştır. Böylelikle algoritmada farklı çözüm alanlarının taranması amaçlanmıştır. Şekil 5.3'te değer seçim sezgiselinin şeması verilmiştir.

Çizelge 5.19. Modellerin görev süreleri

Görev No	Görev Süreleri			Görev No	Görev Süreleri		
	Model 1	Model 2	Model 3		Model 1	Model 2	Model 3
1	34	34	0	15	92	93	92
2	100	100	100	16	19	21	20
3	80	80	80	17	48	48	48
4	127	118	127	18	102	115	102
5	93	93	93	19	44	46	44
6	33	33	33	20	0	30	0
7	47	47	47	21	14	14	14
8	86	86	86	22	41	41	0
9	82	0	82	23	41	41	41
10	84	84	84	24	0	90	90
11	0	0	90	25	95	95	100
12	89	83	89	26	92	92	92
13	46	46	0	27	99	99	99
14	0	0	50	28	37	37	31

Çizelge 5.20. Modeller bazında minimum, maksimum ve toplam görev süreleri

Görev No	Minimum	Maksimum	Toplam	Görev No	Minimum	Maksimum	Toplam
1	0	34	68	15	92	93	277
2	100	100	300	16	19	21	60
3	80	80	240	17	48	48	144
4	118	127	372	18	102	115	319
5	93	93	279	19	44	46	134
6	33	33	99	20	0	30	30
7	47	47	141	21	14	14	42
8	86	86	258	22	0	41	82
9	0	82	164	23	41	41	123
10	84	84	252	24	0	90	180
11	0	90	90	25	95	100	290
12	83	89	261	26	92	92	276
13	0	46	92	27	99	99	297
14	0	50	50	28	31	37	105

Çizelge 5.21. Görevlerin ağırlık değerleri

Görev No	V _{1i}	V _{2i}	V _{3i}	Görev No	V _{1i}	V _{2i}	V _{3i}
1	0	27	18	15	78	73	74
2	85	79	81	16	16	17	16
3	68	63	65	17	41	38	39
4	100	100	100	18	86	91	86
5	79	73	75	19	37	36	36
6	28	26	27	20	0	24	8
7	40	37	38	21	12	11	11
8	73	68	69	22	0	32	22
9	0	65	44	23	35	32	33
10	71	66	68	24	0	71	48
11	0	71	24	25	81	79	78
12	70	70	70	26	78	72	74
13	0	36	25	27	84	78	80
14	0	39	13	28	26	29	28

5.4.1. Deneysel çalışmalar ve sonuçları

Algoritmanın etkinliğinin araştırılması ve α parametresinin değerinin belirlenmesi amacıyla deneyler Çizelge 5.7’de verilen 12 deney seti ile yapılmıştır. Algoritma Java Eclipse Luna programı ile modellenmiştir. Modellemede IBM ILOG Cplex CP Optimizer Java eklentileri de kullanılmıştır. Deney setleri bir saat zaman sınırlı olarak çalıştırılmıştır. Yalnızca görev sayısı çok fazla olan 297 görevli Scholl deney setleri 2 saat zaman sınırı ile çalıştırılmıştır.

Deneysel çalışmalarda ağırlık alt sınır değerini ve ağırlık üst sınır değerini belirlemekte kullanılan α bilinmeyen ve belirlenmesi gereken bir parametredir. Bu parametrenin değerini belirlemek amacıyla, öncelikli olarak değeri 10-15-20-25-30 alınarak ve değişken seçim kuralları ile eşleştirilerek 12 deney seti için algoritma çalıştırılmıştır. Bu deneylerin sonuçları Ek-2’de verilmiştir. Çizelge 5.22’de α değeri ve değişken seçim kuralları temelinde kaç deney setinde zaman sınırsız MP sonuçlarına göre aynı veya daha iyi sonuçlar elde edildiği verilmiştir. Çizelge 15’te yer alan üst sınır değerleri ile sonuçların karşılaştırılması ise Çizelge 5.23’te verilmiştir. Her iki karşılaştırma verilerine göre sonuçlar değerlendirildiğinde $\alpha=15$ alındığında diğer değerlere göre daha iyi sonuçlar elde edildiği görülmektedir. Ayrıca $\alpha=25$ ve $\alpha=30$ alındığında ise daha az deney setinde iyi sonuçlar elde edilmektedir.

Çizelge 5.22. Birinci aşama deney sonuçlarının zaman sınırsız MP sonuçları ile karşılaştırılması

α değeri	GSBK I + Sezgisel	GSBK II + Sezgisel	GSBK III + Sezgisel	GSBK V + Sezgisel	KP II + Sezgisel	Ortalama
10	10	10	10	10	10	10
15	10	10	11	10	11	10,4
20	9	10	10	10	10	9,8
25	9	10	10	9	9	9,4
30	9	9	9	10	10	9,4

Çizelge 5.23. Birinci aşama deney sonuçlarının üst sınır değerleri ile karşılaştırılması

α değeri	GSBK I + Sezgisel	GSBK II + Sezgisel	GSBK III + Sezgisel	GSBK V + Sezgisel	KP II + Sezgisel	Ortalama
10	9	9	9	9	9	9
15	9	10	11	9	11	10
20	8	9	8	9	10	8,8
25	7	8	9	8	8	8
30	8	8	8	8	9	8,2

İkinci aşamada ise, birinci aşamada iyi sonuç elde edilen $\alpha=15$ değerine yakın değerler dikkate alınarak, 10'dan büyük ve 20'den küçük bütün α tam sayı değerleri için deneyler yapılmış ve sonuçları irdelenmiştir. Bu deneylerin sonuçları Ek-3'te verilmiştir.

Deneylerin sonuçlarına göre, hangi değişken seçim kuralı ve hangi α değeri için önerilen yöntemin daha iyi performansa sahip olduğuna karar verebilmek amacıyla, zaman sınırsız MP sonuçları ve Çizelge 5.15'te yer alan üst sınır değerleri dikkate alınarak karşılaştırmalar yapılmıştır. Zaman sınırsız MP sonuçları ile karşılaştırıldığında kaç tane deney setinde aynı veya daha iyi sonuç elde edildiği Çizelge 5.24'te verilmiştir. Çizelge 5.25'te ise benzer şekilde üst sınır değerleri ile yapılan karşılaştırmaların sonuçları yer almaktadır. Bu sonuçlara göre $\alpha=12$, $\alpha=13$ ve $\alpha=15$ için algoritmanın daha çok sayıda deney setinde iyi sonuç verdiği belirlenmiştir. Ayrıca değişken seçim kuralları bazında değerlendirildiğinde ise, GSBK III ve KP II değişken seçim kuralları kullanıldığında daha fazla deney setinde iyi sonuçlar elde edilmiştir.

Yapılan karşılaştırmalar sonucunda, $\alpha=12$, $\alpha=13$ ve $\alpha=15$ değerleri ile GSBK III+sezgisel ve KP II+sezgisel sonuçları tekrar ele alındığında 10 ve üstü iyi sonuç veren eşleştirmeleri seçilmiştir. Buna göre Tip 2 KMMHDP kısıt programlama modelinde iyi sonuçların elde edilebilmesi için, dinamik arama sezgiselinde kullanılacak değişken seçim kuralları ve α değerleri Çizelge 5.26'da verilmiştir. Buna ek olarak, seçilen kural yapılarının deney sonuçları $\alpha=12$ için Çizelge 5.27'de $\alpha=13$ için Çizelge 5.28'de ve $\alpha=15$ için Çizelge 5.29'da verilmiştir. Sonuçlar değerlendirildiğinde standart KP modeline göre bütün deneylerin daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir. Zaman sınırlı ve sınırsız MP modellerine göre ise genel olarak daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Ancak, Kilbridge 3 deney setinde 1 yaklaşık değerler elde edilmiştir. Weemag 2 deney seti için 2 deneyde

matematiksel model ile aynı sonuç elde edilmesine karşın diğerlerinde 1 veya 2 yaklaşık değerler elde edilmiştir.

Çizelge 5.24. $\alpha=10$ ile $\alpha=20$ arasındaki değerler için deney sonuçlarının zaman sınırsız MP sonuçları ile karşılaştırılması

α değeri	GSBK I + Sezgisel	GSBK II + Sezgisel	GSBK III + Sezgisel	GSBK V + Sezgisel	KP II + Sezgisel	Satır Ortalaması
10	10	10	10	10	10	10
11	9	10	10	10	10	9,8
12	10	10	10	10	10	10
13	10	10	10	10	10	10
14	10	10	10	10	10	10
15	10	10	11	10	11	10,4
16	10	10	10	10	9	9,8
17	10	10	10	10	9	9,8
18	10	10	10	10	10	10
19	10	11	10	10	10	10,2
20	9	10	10	10	10	9,8
Sütun Ortalaması	9,8	10,1	10,1	10,0	9,9	

Çizelge 5.25. $\alpha=10$ ile $\alpha=20$ arasındaki değerler için deney sonuçlarının üst sınır değerleri ile karşılaştırılması

α değeri	GSBK I + Sezgisel	GSBK II + Sezgisel	GSBK III + Sezgisel	GSBK V + Sezgisel	KP II + Sezgisel	Satır Ortalaması
10	9	9	9	9	9	9
11	8	8	9	9	9	8,6
12	9	9	10	9	9	9,2
13	8	9	10	10	9	9,2
14	9	9	8	9	9	8,8
15	9	10	11	9	11	10
16	8	9	10	9	9	9
17	9	9	9	8	8	8,6
18	8	9	8	8	9	8,4
19	9	9	8	9	9	8,8
20	8	9	8	9	10	8,8
Sütun Ortalaması	8,55	9,00	9,09	8,91	9,18	

Çizelge 5.26. KMMHDP çözümünde kullanılması önerilen arama stratejisi ve α değerleri

Arama stratejisi	α Değeri
GSBK III + sezgisel	12
GSBK III + sezgisel	13
GSBK III + sezgisel	15
KP II + sezgisel	15

Çizelge 5.27. $\alpha=12$ alındığında iyi sonuç veren arama stratejilerinin sonuçları

Deney setleri	Üst Sınır Değeri	Zaman Sınırsız MP	Zaman Sınırlı MP	Standart KP model	GSBK III + sezgisel
Heskiaoff 2	488*	488*	488*	490	488
Heskiaoff 3	664*	664*	664*	665	664
Sawyer 2	367*	367*	367*	367	367
Sawyer 3	658*	658*	658*	658	658
Kilbridge 2	375*	375*	375*	376	375
Kilbridge 3	597*	597*	597*	602	598
Tongue 2	400	400	403	400	399
Tongue 3	607	607	615	612	600
Weemag 2	154	154	154	159	155
Weemag 4	311	311	311	322	311
Scholl 2	3175	3204	3318	3199	3173
Scholl 4	6393	6420	6511	6472	6387

* optimum değer

Çizelge 5.28. $\alpha=13$ alındığında iyi sonuç veren arama stratejilerinin sonuçları

Deney setleri	Üst Sınır Değeri	Zaman Sınırsız MP	Zaman Sınırlı MP	Standart KP model	GSBK III + sezgisel
Heskiaoff 2	488*	488*	488*	490	488
Heskiaoff 3	664*	664*	664*	665	664
Sawyer 2	367*	367*	367*	367	367
Sawyer 3	658*	658*	658*	658	658
Kilbridge 2	375*	375*	375*	376	375
Kilbridge 3	597*	597*	597*	602	598
Tongue 2	400	400	403	400	399
Tongue 3	607	607	615	612	600
Weemag 2	154	154	154	159	156
Weemag 4	311	311	311	322	310
Scholl 2	3175	3204	3318	3199	3174
Scholl 4	6393	6420	6511	6472	6384

* optimum değer

Çizelge 5.29. $\alpha=15$ alındığında iyi sonuç veren arama stratejilerinin sonuçları

Deney Setleri	Üst Sınır Değeri	Zaman Sınırsız MP	Zaman Sınırlı MP	Standart KP model	GSBK III + sezgisel	KP II + sezgisel
Heskiaoff 2	488*	488*	488*	490	488	488
Heskiaoff 3	664*	664*	664*	665	664	664
Sawyer 2	367*	367*	367*	367	367	367
Sawyer 3	658*	658*	658*	658	658	658
Kilbridge 2	375*	375*	375*	376	375	375
Kilbridge 3	597*	597*	597*	602	598	598
Tongue 2	400	400	403	400	398	400
Tongue 3	607	607	615	612	600	599
Weemag 2	154	154	154	159	154	154
Weemag 4	311	311	311	322	311	310
Scholl 2	3175	3204	3318	3199	3166	3160
Scholl 4	6393	6420	6511	6472	6383	6392

* optimum değer

6. SONUÇ

Montaj hattı dengeleme problemi yaklaşık 75 yıldır araştırmacılar tarafından ele alınan çok geniş bir konudur. Günümüzde, sanayide birçok iş kolunda montaj hatlarının kullanılmasından dolayı da güncelliğini kaybetmemektedir. İlk kurulduğu tarihten itibaren montaj hattı dengeleme problemleri değişen koşullara bağlı olarak araştırmacılar tarafından çeşitli özelliklerine göre sınıflandırılmıştır. Bu sınıflandırmalardan biri de tek, karma ve çok modelli olmak üzere hat üzerinde üretilen model sayısı dikkate alınarak yapılmıştır. Bu tez çalışmasında montaj hatlarında müşteri taleplerinin çeşitlenmesinden dolayı birden fazla modelin eş zamanlı olarak üretildiği karma modelli montaj hattı dengeleme problemi ele alınmıştır. Ele alınan montaj hattının karma, tek taraflı, düz ve paralelliğin olmadığı bir hat olduğu varsayılmıştır. Bu hattın dengelenmesi, sabit istasyon sayısı kısıtı altında çevrim süresinin minimizasyonunu ifade eden Tip 2 amacına göre yapılmıştır.

Problemin çözümünde kombinatoriyal problemlerin çözümünde kullanılan ancak montaj hattı dengeleme problemlerinin çözümünde kullanımına az sayıda rastlanan kısıt programlama yöntemi kullanılmıştır. Tip 2 karma modelli montaj hattı dengeleme probleminin kısıt programlama modeli kurularak matematiksel modelle karşılaştırılmıştır. Problem boyutu büyüdükçe kısıt programlama aynı zaman sınırı içinde daha düşük çevrim sürelerine ulaşılmıştır.

Kısıt programlama çözüm algoritması tanım kümesi azaltma, çözüm arama ve kısıt yayılımı olmak üzere üç aşamadan oluşmaktadır. Bu aşamalardan çözüme etkisi en yüksek olan aşama çözüm arama aşamasıdır. Dallanma ve budama üzerine çalışan arama sürecinde değişkenlerin ve değerlerin seçimi belirli bir strateji ile yapılabilmektedir. Tip 2 KMMHDP'ye özgü oluşturulabilecek arama stratejileri için değişken ve değer seçimi olmak üzere iki aşamada araştırma yapılmıştır. Öncelikle değişken seçimi ile ilgili kurallar araştırılmıştır. Problemin girdi parametrelerine göre 3 kategoride kural yapıları kurulmuştur. Bunlar; görev süresi, öncelik ilişkileri ve her ikisinin birlikte dikkate alınmasından oluşan kurallardır. Bu kural kategorilerinden görev süresine bağlı olarak oluşturulan kuralların diğer kategorilere göre daha iyi sonuçlar verdiği yapılan deneyler sonucunda belirlenmiştir. Görev sürelerinin, amaç değeri olan çevrim süresinin hesaplanmasında kullanılmasından dolayı problemin çözümünde bu kuralların daha etkin olduğu görülmüştür. Problemin çözümünde kullanılmasının uygun olduğu belirlenen

kurallar GSBK I, GSBK II, GSBK III, GSBK V ve KP II kurallarıdır. Değişken seçim kuralları için yapılan deneysel çalışmaların sonuçlarına göre, amaç değerinin hesaplanmasında direk etkili olan girdi parametrelerinin kural yapısında kullanılması ile daha iyi çözüm sonuçlarına ulaşılmaktadır. Ayrıca, kural yapısı olarak büyük ağırlığa sahip değişkenin öncelikle seçilmesi ile problemin çözümünde daha iyi sonuçlar elde edilmektedir.

Değer seçim aşamasında ise, değerlerin kendi aralarında önceliklendirilmesini, istasyona atanabilecek görev sayısını ve istasyona atanacak görevlerin süreleri toplamı dikkate alınarak üç kategoride kurallar oluşturulmuştur. Bu aşamada yapılan deneylerde, değişken seçim aşamasında belirlenen kurallar ile değer seçim kuralları birleştirilerek arama stratejileri oluşturulmuştur. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, beş adet kural ikilisinin problemin çözümünde kullanılmasının uygun olacağı belirlenmiştir. Değişken seçim kurallarında elde edilen sonuca benzer şekilde görev süresine bağlı oluşturulan kurallar problemin çözümünde daha etkindir. Ayrıca kural yapısı olarak, değerler arasında en küçük ağırlığa sahip değerlerin öncelikle seçilmesini öngören kurallar ile daha iyi çözümler elde edilmektedir. KMMHDP'nin çözümünde kullanılması uygun olan kural ikilileri GSBK III+kural 7, GSBK III+kural 8, GSBK V+kural 7, GSBK V+kural 8 ve GSBK II+Kural 11'dir.

Değişken seçimi ve değer seçimi için yapılan araştırmaların sonucuna göre, montaj hattı dengeleme problemlerinin çözümünde kısıt programlama yöntemi kullanılacak ise, amaca direk etkisi bulunan parametreler dikkate alınarak değişken ve değer seçim kuralları belirlenmelidir. Böylelikle daha iyi sonuçlara daha kısa sürede ulaşmak mümkün olmaktadır.

Son olarak probleme özgü bir dinamik arama sezgiseli geliştirilmiştir. Bu algoritmada, anlık olarak istasyon süreleri kontrol edilmekte ve görevin atanacağı istasyon numarası görevin ağırlık değerine ve anlık istasyon sürelerine göre seçilmektedir. Değişken seçim kuralı olarak ise tez kapsamında daha önce belirlenen beş değişken seçim kuralı kullanılmıştır. Algoritmada α parametresi ile görev ağırlıkları kontrol edilerek, görevin en büyük istasyon süresine sahip istasyona mı, en küçük istasyon süresine sahip istasyona mı yoksa rastgele bir istasyona mı atanacağına karar verilmektedir. Hangi değişken kuralı ve hangi α parametresinin algoritmada kullanılmasının uygun olacağına karar vermek

amacıyla deneysel çalışmalar yapılmıştır. Deneysel çalışmalar sonucunda, α değerine ve değişken seçim kuralına göre birleştirilen dört arama stratejisinin problemin çözümünde kullanılmasının daha uygun olacağı bulunmuştur. Bu stratejiler; GSBK III+Dinamik arama sezgiseli_ α =12, GSBK III+Dinamik arama sezgiseli_ α =13, GSBK III+Dinamik arama sezgiseli_ α =15 ve KP II+Dinamik arama sezgiseli_ α =15'dir

Bu tezde ele alınan Tip 2 KMMHDP problemi ile ilgili az sayıda çalışma yapılmış olmasından dolayı yapılacak yeni çalışmalar ile problemin çözümüne ilişkin yeni yöntemler geliştirilebilir. Sivasankaran ve Shahabudeen (2014) çalışmalarında da belirttiği üzere U tipi, çift taraflı, stokastik vb. farklı tiplerdeki montaj hattı dengeleme problemleri için de tip 2 amacını dikkate alan az sayıda çalışma olduğu görülmektedir. Bu montaj hattı tipleri için de kısıt programlama algoritmaları tez kapsamında önerilen değişken ve değer seçim kural yapıları dikkate alınarak geliştirilebilir. Ayrıca, kısıt programlamanın esnekliğinden faydalanılarak montaj hattında farklı kısıtların dikkate alındığı montaj hattı dengeleme problemleri modellenenebilir. Bunlara ek olarak, problemin çözümünde önerilen kısıt programlama modeli için yeni sezgisel arama algoritmaları oluşturulabilir. Montaj hattı dışında farklı bir çalışma konusu olarak ise, kombinatoriyal optimizasyon problemleri kısıt programlama yöntemi ile tez kapsamında önerilen kural yapıları dikkate alınıp probleme özgü kurallar oluşturularak çözülebilir.



KAYNAKLAR

- Alağaç, H. M., Yüzükırmızı, M. ve Türker, A. K. (2013). Stokastik Montaj Hatlarının Kısıt Programlama Ve Kapalı Kuyruk Ağları İle Dengelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 28(2), 231-240.
- Apt, K. (2003). *Principles of constraint programming*, Cambridge: Cambridge University Press, 54-80.
- Arcus, A. L. (1965). A computer method of sequencing operations for assembly lines. *International Journal of Production Research*, 4(4), 259-277.
- Balafoutis, T. and Stergiou, K. (2010). Evaluating and improving modern variable and revision ordering strategies in CSPs. *Fundamenta Informaticae*, 102(3), 229-261.
- Banaszak, Z., Zaremba, M. and Muszyński, W. (2009). Constraint programming for project-driven manufacturing. *International Journal of Production Economics*, 120(2), 463-475.
- Battaia, O. and Dolgui, A. (2013). A taxonomy of line balancing problems and their solution approaches. *International Journal of Production Economics*, 142(2), 259-277.
- Baybars, I. (1986). A survey of exact algorithms for the simple assembly line balancing problem. *Management Science*, 32(8), 909-932.
- Becker, C. and Scholl, A. (2006). A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing. *European Journal of Operational Research*, 168(3), 694-715.
- Bock, S. (2008). Using distributed search methods for balancing mixed-model assembly lines in the automotive industry. *Or Spectrum*, 30(3), 551-578.
- Bockmayr, A. and Pisaruk, N. (2001, 18-20 June). *Solving an assembly line balancing problems by combining IP and CP*. Paper presented at the 6th Annual Workshop of ERCIM Working Group on Constraints, Prague, Czech Republic.
- Boussemart, F., Hemery, F., Lecoutre, C. and Sais, L. (2004, 22 - 27 August). *Boosting systematic search by weighting constraints*. Paper presented at the 16th European Conference on Artificial Intelligence, Valencia, Spain.
- Boysen, N., Fliedner, M. and Scholl, A. (2007). A classification of assembly line balancing problems. *European Journal of Operational Research*, 183(2), 674-693.
- Bryton, B. (1954). *Balancing of a continuous production line*, Master Science Thesis, Northwestern University, Graduate School of Natural and Applied Sciences Northwestern, 4-9.
- Bui, Q. T., Pham, Q. D. and Deville, Y. (2013, 16-20 September). *Solving the agricultural land allocation problem by constraint-based local search*. Paper presented at the International Conference on Principles and Practice of Constraint Programming, Uppsala, Sweden,.

- Bukchin, J., Dar-El, E. M. and Rubinovitz, J. (2002). Mixed model assembly line design in a make-to-order environment. *Computers & Industrial Engineering*, 41(4), 405-421.
- Buyukozkan, K., Kucukkoc, I., Satoglu, S. I. and Zhang, D. Z. (2016). Lexicographic bottleneck mixed-model assembly line balancing problem: Artificial bee colony and tabu search approaches with optimised parameters. *Expert Systems with Applications*, 50, 151-166.
- Caseau, Y. and Laburthe, F. (1995). The CLAIRE documentation. *LIENS Report*, Ecole Normale Supérieure, Paris, 96-105.
- Cevikcan, E., Durmusoglu, M. B. and Unal, M. E. (2009). A team-oriented design methodology for mixed model assembly systems. *Computers & Industrial Engineering*, 56(2), 576-599.
- Chakravarty, A. K. and Shtub, A. (1985). Balancing mixed model lines with in-process inventories. *Management Science*, 31(9), 1161-1174.
- Christodoulou, G. and Stamatopoulos, P. (2002, 11-12 April). *Crew Assignment by Constraint Logic Programming*. Paper presented at the 2nd Hellenic Conference on Artificial Intelligence SETN-2002, Thessaloniki, Greece.
- Colmerauer, A. (1990, 13-14 November). *An introduction to Prolog III*. Paper presented at the Symposium on Computational Logic, Brussels, Luxembourg.
- Crawford, B., Soto, R., Castro, C. and Monfroy, E. (2011, 30 May – 3 June). *A hyperheuristic approach for dynamic enumeration strategy selection in constraint satisfaction*. Paper presented at the International Work-Conference on the Interplay Between Natural and Artificial Computation, La Palma, Canary Islands.
- Crawford, B., Soto, R., Monfroy, E., Palma, W., Castro, C. and Paredes, F. (2013). Parameter tuning of a choice-function based hyperheuristic using particle swarm optimization. *Expert Systems with Applications*, 40(5), 1690-1695.
- Del Valle, C., Márquez, A. A., Gasca, R. M. and Toro, M. (2003, 3-5 September). *On selecting and scheduling assembly plans using constraint programming*. Paper presented at the International Conference on Knowledge-Based and Intelligent Information and Engineering Systems, Oxford, UK.
- Erel, E. and Gokcen, H. (1999). Shortest-route formulation of mixed-model assembly line balancing problem. *European Journal of Operational Research*, 116(1), 194-204.
- Erel, E. and Sarin, S. C. (1998). A survey of the assembly line balancing procedures. *Production Planning & Control*, 9(5), 414-434.
- Fattahi, P. and Samouei, P. (2016). An analytical approach for single and mixed-model assembly line rebalancing and worker assignment problem. *Journal of Industrial and Systems Engineering*, 9(1), 79-91.
- Gokcen, H. and Erel, E. (1997). A goal programming approach to mixed-model assembly line balancing problem. *International Journal of Production Economics*, 48(2), 177-185.

- Gokcen, H. and Erel, E. (1998). Binary integer formulation for mixed-model assembly line balancing problem. *Computers & Industrial Engineering*, 34(2), 451-461.
- Grimes, D. and Wallace, R. J. (2007, 23-27 September). *Sampling strategies and variable selection in weighted degree heuristics*. Paper presented at the Principles and Practice of Constraint Programming–CP, Providence, RI, USA.
- Haq, A. N., Rengarajan, K. and Jayaprakash, J. (2006). A hybrid genetic algorithm approach to mixed-model assembly line balancing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 28(3), 337-341.
- He, F. and Qu, R. (2012). A constraint programming based column generation approach to nurse rostering problems. *Computers & Operations Research*, 39(12), 3331-3343.
- Heipcke, S. (1999). Comparing constraint programming and mathematical programming approaches to discrete optimisation—the change problem. *Journal of the Operational Research Society*, 50(6), 581-595.
- Hwang, R. and Katayama, H. (2010). Integrated procedure of balancing and sequencing for mixed-model assembly lines: a multi-objective evolutionary approach. *International Journal of Production Research*, 48(21), 6417-6441.
- Internet: Assembly line balancing data sets for MMALBP. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Falb.mansci.de%2Findex.php%3Fcontent%3Dclassview%26content2%3Dclassview%26content3%3Dclassviewd%26content4%3Dclassview%26classID%3D58%26type%3Ddl++&date=2017-05-15>, Son Erişim Tarihi: 15.05.2017
- Jaffar, J. and Lassez, J.L. (1987, 21-23 January). *Constraint logic programming*. Paper presented at the Proceedings of the 14th ACM SIGACT-SIGPLAN Symposium on Principles of Programming Languages, Munich, Germany.
- Karabatı, S. and Sayın, S. (2003). Assembly line balancing in a mixed-model sequencing environment with synchronous transfers. *European Journal of Operational Research*, 149(2), 417-429.
- Lauriere, J. L. (1978). A language and a program for stating and solving combinatorial problems. *Artificial Intelligence*, 10(1), 29-127.
- Lee, J. and Lee, K. (2013). Modeling and optimization of closed-loop supply chain considering order or next arrival of goods. *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, 9(9), 3639-3654.
- Lustig, I. J. and Puget, J.-F. (2001). Program does not equal program: Constraint programming and its relationship to mathematical programming. *Interfaces*, 31(6), 29-53.
- Macaskill, J. (1972). Production-line balances for mixed-model lines. *Management Science*, 19(4-part-1), 423-434.
- Mackworth, A. K. (1977). Consistency in networks of relations. *Artificial Intelligence*, 8(1), 99-118.

- Mamun, A. A., Khaled, A. A., Ali, S. M. and Chowdhury, M. M. (2012). A heuristic approach for balancing mixed-model assembly line of type I using genetic algorithm. *International Journal of Production Research*, 50(18), 5106-5116.
- Manavizadeh, N., Rabbani, M., Moshtaghi, D. and Jolai, F. (2012). Mixed-model assembly line balancing in the make-to-order and stochastic environment using multi-objective evolutionary algorithms. *Expert Systems with Applications*, 39(15), 12026-12031.
- Matanachai, S. and Yano, C. A. (2001). Balancing mixed-model assembly lines to reduce work overload. *IIE Transactions*, 33(1), 29-42.
- McMullen, P. R. and Frazier, G. V. (1997). A heuristic for solving mixed-model line balancing problems with stochastic task durations and parallel stations. *International Journal of Production Economics*, 51(3), 177-190.
- McMullen, P. R. and Frazier, G. V. (1998). Using simulated annealing to solve a multiobjective assembly line balancing problem with parallel workstations. *International Journal of Production Research*, 36(10), 2717-2741.
- McMullen, P. R. and Tarasewich, P. (2003). Using ant techniques to solve the assembly line balancing problem. *IIE Transactions*, 35(7), 605-617.
- Mendes, A. R., Ramos, A. L., Simaria, A. S. and Vilarinho, P. M. (2005). Combining heuristic procedures and simulation models for balancing a PC camera assembly line. *Computers & Industrial Engineering*, 49(3), 413-431.
- Merengo, C., Nava, F. and Pozzetti, A. (1999). Balancing and sequencing manual mixed-model assembly lines. *International Journal of Production Research*, 37(12), 2835-2860.
- Özcan, U., Kellegöz, T. and Toklu, B. (2011). A genetic algorithm for the stochastic mixed-model U-line balancing and sequencing problem. *International Journal of Production Research*, 49(6), 1605-1626.
- Özcan, U. and Toklu, B. (2009). Balancing of mixed-model two-sided assembly lines. *Computers & Industrial Engineering*, 57(1), 217-227.
- Özcan, U. and Toklu, B. (2009). A new hybrid improvement heuristic approach to simple straight and u-type assembly line balancing problems. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 20(1), 123-136.
- Öztürk, C., Tunali, S., Hnich, B. and Ornek, A. (2015). Cyclic scheduling of flexible mixed model assembly lines with parallel stations. *Journal of Manufacturing Systems*, 36, 147-158.
- Öztürk, C., Tunali, S., Hnich, B. and Örnek, M. A. (2013). Balancing and scheduling of flexible mixed model assembly lines. *Constraints*, 18(3), 434-469.
- Pastor, R., Ferrer, L. and García, A. (2007). Evaluating optimization models to solve SALBP. *Lecture Notes in Computer Science*, 4705, 791-803.

- Pınarbaşı, M., Yüzükırmızı, M. and Toklu, B. (2016). Variability modelling and balancing of stochastic assembly lines. *International Journal of Production Research*, 54(19), 5761-5782.
- Qu, R. and He, F. (2009, 22-24 October). *A hybrid constraint programming approach for nurse rostering problems*. Paper presented at the Applications and Innovations in Intelligent Systems XVI, Nottingham, UK.
- Rekiek, B., De Lit, P. and Delchambre, A. (2000). Designing mixed-product assembly lines. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 16(3), 268-280.
- Rodrigues, L. C. and Magatão, L. (2007, 4-10 November). *Enhancing supply chain decisions using constraint programming: a case study*. Paper presented at the Mexican International Conference on Artificial Intelligence, Aguascalientes, Mexico.
- Rossi, F., Van Beek, P. and Walsh, T. (2008). Constraint programming. In F. van Harmelen, V. Lifschitz and B. Porter (Eds.), *Handbook of Knowledge Representation*. Amsterdam: Elsevier Press, 181-211.
- Rousseau, L. M., Gendreau, M., Pesant, G. and Focacci, F. (2004). Solving VRPTWs with constraint programming based column generation. *Annals of Operations Research*, 130(1-4), 199-216.
- Salveson, M. E. (1955). The assembly line balancing problem. *Journal of Industrial Engineering*, 6(3), 18-25.
- Sawik, T. (2002). Monolithic vs. hierarchical balancing and scheduling of a flexible assembly line. *European Journal of Operational Research*, 143(1), 115-124.
- Sel, C., Bilgen, B., Bloemhof-Ruwaard, J. and van der Vorst, J. (2015). Multi-bucket optimization for integrated planning and scheduling in the perishable dairy supply chain. *Computers & Chemical Engineering*, 77, 59-73.
- Serra, T., Nishioka, G. and Marcellino, F. J. (2012, 8-12 October). *The offshore resources scheduling problem: detailing a constraint programming approach*. Paper presented at the 18th Principles and Practice of Constraint Programming, Québec City, QC, Canada.
- Siala, M., Hebrard, E. and Huguet, M. J. (2015). A study of constraint programming heuristics for the car-sequencing problem. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 38, 34-44.
- Simaria, A. S. (2006). *Assembly line balancing: new perspectives and procedures*. Ph. D. Thesis, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal.
- Simaria, A. S. and Vilarinho, P. M. (2004). A genetic algorithm based approach to the mixed-model assembly line balancing problem of type II. *Computers & Industrial Engineering*, 47(4), 391-407.
- Sivasankaran, P. and Shahabudeen, P. (2014). Literature review of assembly line balancing problems. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 73(9-12), 1665-1694.

- Smolka G. (1995) The Oz Programming Model. In Van Leeuwen J. (Eds.), *Computer Science Today. Lecture Notes in Computer Science*. Berlin: Springer, 324-343.
- Soto, R., Crawford, B., Misra, S., Palma, W., Monfroy, E., Castro, C. and Paredes, F. (2013). Choice functions for autonomous search in constraint programming: Ga Vs. Pso. *Tehnicki Vjesnik-Technical Gazette*, 20(4), 621-627.
- Soto, R., Crawford, B., Palma, W., Galleguillos, K., Castro, C., Monfroy, E., Johnson, F. and Paredes, F. (2015). Boosting autonomous search for CSPs via skylines. *Information Sciences*, 308, 38-48.
- Soto, R., Crawford, B., Palma, W., Monfroy, E., Olivares, R., Castro, C. and Paredes, F. (2015). Top-k based adaptive enumeration in constraint programming. *Mathematical Problems in Engineering*, 2015, 1-12.
- Soto, R., Kjellerstrand, H., Durán, O., Crawford, B., Monfroy, E. and Paredes, F. (2012). Cell formation in group technology using constraint programming and Boolean satisfiability. *Expert Systems with Applications*, 39(13), 11423-11427.
- Talbi, E.-G. (2009). *Metaheuristics: from design to implementation*. New Jersey: John Wiley & Sons Press, 19-20.
- Thomopoulos, N. T. (1967). Line balancing-sequencing for mixed-model assembly. *Management Science*, 14(2), B-59-B-75.
- Thomopoulos, N. T. (1970). Mixed model line balancing with smoothed station assignments. *Management Science*, 16(9), 593-603.
- Tiacci, L. (2012). Event and object oriented simulation to fast evaluate operational objectives of mixed model assembly lines problems. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 24, 35-48.
- Topaloglu, S., Salum, L. and Supciller, A. A. (2012). Rule-based modeling and constraint programming based solution of the assembly line balancing problem. *Expert Systems with Applications*, 39(3), 3484-3493.
- Van Hentenryck, P. (1989). *Constraint satisfaction in logic programming*. Cambridge: MIT press, 20-55.
- Van Hentenryck, P. (1999). *The OPL optimization programming language*. Cambridge: MIT Press, 32-77.
- Van Hop, N. (2006). A heuristic solution for fuzzy mixed-model line balancing problem. *European Journal of Operational Research*, 168(3), 798-810.
- Van Zante-de Fokkert, J. I. and de Kok, T. G. (1997). The mixed and multi model line balancing problem: a comparison. *European Journal of Operational Research*, 100(3), 399-412.
- Venkatesh, J. V. L. and Dabade, B. M. (2008). Evaluation of performance measures for representing operational objectives of a mixed model assembly line balancing problem. *International Journal of Production Research*, 46(22), 6367-6388.

- Wallace, M., Novello, S. and Schimpf, J. (1997). ECLiPSe: A platform for constraint logic programming. *International Constitutional Law Systems Journal*, 12(1), 159-200.
- Wallace, R. J. and Grimes, D. (2008). Experimental studies of variable selection strategies based on constraint weights. *Journal of Algorithms*, 63(3), 114-129.
- Yagmahan, B. (2011). Mixed-model assembly line balancing using a multi-objective ant colony optimization approach. *Expert Systems with Applications*, 38(10), 12453-12461.
- Yang, C. J., Gao, J. and Sun, L. Y. (2013). A multi-objective genetic algorithm for mixed-model assembly line rebalancing. *Computers & Industrial Engineering*, 65(1), 109-116.
- Zhang, W. and Gen, M. (2011). An efficient multiobjective genetic algorithm for mixed-model assembly line balancing problem considering demand ratio-based cycle time. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 22(3), 367-378.
- Zhao, X., Liu, J., Ohno, K. and Kotani, S. (2007). Modeling and analysis of a mixed-model assembly line with stochastic operation times. *Naval Research Logistics (NRL)*, 54(6), 681-691.
- Zhao, X. S., Hsu, C. Y., Chang, P. C. and Li, L. (2016). A genetic algorithm for the multi-objective optimization of mixed-model assembly line based on the mental workload. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 47, 140-146.





EKLER

EK-1. Statik değer seçim kuralları deneysel çalışmalar sonuçları

Çizelge 1.1. Heskiaoff 2 deney sonuçları

	Kural 1		Kural 2		Kural 3		Kural 4		Kural 5	
	En iyi değer	Çözümü Bulduğu zaman	En iyi değer	Çözümü Bulduğu zaman	En iyi değer	Çözümü Bulduğu zaman	En iyi değer	Çözümü Bulduğu zaman	En iyi değer	Çözümü Bulduğu zaman
GSBK I	489	513	488	170	489	18	489	2	489	9,5
GSBK II	489	90	488	1035	489	46	489	2	489	1
GSBK III	489	32	488	219	488	214	489	3	488	47
GSBK V	489	33	488	233	488	192	489	3	488	45
KP II	488	975	489	33	489	4	489	18	488	281
	Kural 6		Kural 7		Kural 8		Kural 9		Kural 10	
	En iyi değer	Çözümü Bulduğu zaman	En iyi değer	Çözümü Bulduğu zaman	En iyi değer	Çözümü Bulduğu zaman	En iyi değer	Çözümü Bulduğu zaman	En iyi değer	Çözümü Bulduğu zaman
GSBK I	489	17	489	6	489	9	489	10	489	20
GSBK II	489	45	489	2	489	1	489	1	489	70
GSBK III	489	16	488	1230	488	45	489	10	489	13
GSBK V	489	15	488	1188	488	48	488	45	489	13
KP II	489	5	489	6	488	327	488	285	489	3
	Kural 11		Kural 12		Kural 13		Kural 14			
	En iyi değer	Çözümü Bulduğu zaman	En iyi değer	Çözümü Bulduğu zaman	En iyi değer	Çözümü Bulduğu zaman	En iyi değer	Çözümü Bulduğu zaman		
GSBK I	489	13	488	7	489	1	489	6		
GSBK II	488	10	488	432	488	96	488	12		
GSBK III	488	12	489	9	488	162	489	6		
GSBK V	488	12	489	9	488	198	489	6		
KP II	489	6	488	1334	489	82	488	82		

EK-1.(devam) Statik değer seçim kuralları deneysel çalışmalar sonuçları

Çizelge 1.2. Heskiaoff 3 deney sonuçları

	Kural 1		Kural 2		Kural 3		Kural 4		Kural 5	
	Çözümü		Çözümü		Çözümü		Çözümü		Çözümü	
	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman
GSBK I	664	628	664	192	665	23	665	5	664	1028
GSBK II	665	93	664	768	665	29	665	8	664	372
GSBK III	665	51	664	368	664	256	664	864	664	1452
GSBK V	664	763	664	344	664	321	665	17	664	526
KP II	664	1035	664	1236	664	489	665	7	664	124
	Kural 6		Kural 7		Kural 8		Kural 9		Kural 10	
	Çözümü		Çözümü		Çözümü		Çözümü		Çözümü	
	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman
GSBK I	665	25	664	827	664	925	665	8	665	27
GSBK II	665	36	664	785	664	436	665	6	665	34
GSBK III	664	120	664	372	664	225	664	368	665	15
GSBK V	664	186	664	262	664	217	664	317	664	394
KP II	665	32	664	567	664	234	664	482	665	18
	Kural 11		Kural 12		Kural 13		Kural 14			
	Çözümü		Çözümü		Çözümü		Çözümü			
	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman		
GSBK I	664	84	664	32	664	1238	665	7		
GSBK II	664	113	664	713	664	982	664	157		
GSBK III	664	173	665	9	664	876	664	256		
GSBK V	664	142	664	1365	664	973	664	102		
KP II	665	38	664	1283	664	1038	664	1045		

EK-1.(devam) Statik değer seçim kuralları deneysel çalışmalar sonuçları

Çizelge 1.3. Sawyer 2 deney sonuçları

	Kural 1		Kural 2		Kural 3		Kural 4		Kural 5	
	özümü		çözümü		çözümü		çözümü		özümü	
	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman
GSBK I	367	1,4	367	0,1	367	0,2	367	2	367	0,5
GSBK II	367	1,6	367	1,9	367	1,7	367	0,3	367	1,6
GSBK III	367	1,4	367	1	367	0,2	367	1,5	367	1,8
GSBK V	367	1,1	367	1,2	367	1,6	367	0,5	367	0,5
KP II	367	0,7	367	0,1	367	1,3	367	1,9	367	1,6
	Kural 6		Kural 7		Kural 8		Kural 9		Kural 10	
	özümü		çözümü		çözümü		çözümü		özümü	
	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman
GSBK I	367	0,2	367	0,7	367	1,3	367	0,5	367	0,1
GSBK II	367	1,1	367	0,7	367	0,2	367	0,6	367	1,5
GSBK III	367	0,3	367	1,3	367	0,1	367	1,2	367	1,5
GSBK V	367	2	367	1,8	367	1,5	367	1,7	367	1,7
KP II	367	1,8	367	0,8	367	0,8	367	2	367	1,8
	Kural 11		Kural 12		Kural 13		Kural 14			
	özümü		çözümü		çözümü		özümü			
	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman		
GSBK I	367	1,8	367	0,8	367	1,5	367	0,4		
GSBK II	367	1,1	367	1,5	367	1	367	1,3		
GSBK III	367	1,3	367	1,7	367	1,1	367	0,3		
GSBK V	367	1,5	367	0,4	367	1,5	367	0,1		
KP II	367	1,8	367	0,5	367	0,1	367	1,5		

EK-1.(devam) Statik değer seçim kuralları deneysel çalışmalar sonuçları

Çizelge 1.4. Sawyer 3 deney sonuçları

	Kural 1		Kural 2		Kural 3		Kural 4		Kural 5	
	Çözümü		Çözümü		Çözümü		Çözümü		Çözümü	
	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman
GSBK I	658	16	658	6	658	8	658	10	658	4
GSBK II	658	6	658	5	658	8	658	14	658	16
GSBK III	658	10	658	10	658	5	658	2	658	9
GSBK V	658	3	658	6	658	14	658	11	658	16
KP II	658	17	658	10	658	3	658	5	658	4
	Kural 6		Kural 7		Kural 8		Kural 9		Kural 10	
	Çözümü		Çözümü		Çözümü		Çözümü		Çözümü	
	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman
GSBK I	658	4	658	9	658	6	658	9	658	5
GSBK II	658	9	658	6	658	8	658	2	658	9
GSBK III	658	18	658	8	658	3	658	14	658	11
GSBK V	658	5	658	1	658	3	658	15	658	8
KP II	658	17	658	8	658	4	658	13	658	10
	Kural 11		Kural 12		Kural 13		Kural 14			
	Çözümü		Çözümü		Çözümü		Çözümü			
	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman		
GSBK I	658	15	658	6	658	10	658	14		
GSBK II	658	8	658	2	658	6	658	2		
GSBK III	658	9	658	10	658	8	658	10		
GSBK V	658	3	658	8	658	7	658	15		
KP II	658	13	658	17	658	16	658	3		

EK-1.(devam) Statik değer seçim kuralları deneysel çalışmalar sonuçları

Çizelge 1.5. Killbridge 2 deney sonuçları

	Kural 1		Kural 2		Kural 3		Kural 4		Kural 5	
	Çözümü		Çözümü		Çözümü		Çözümü		Çözümü	
	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman
GSBK I	375	96	375	49	375	24	375	82	375	61
GSBK II	375	174	375	177	375	73	375	96	375	137
GSBK III	375	55	375	41	375	86	375	101	375	63
GSBK V	375	59	375	168	375	71	375	22	375	19
KP II	375	12	375	85	375	113	375	101	375	16
	Kural 6		Kural 7		Kural 8		Kural 9		Kural 10	
	Çözümü		Çözümü		Çözümü		Çözümü		Çözümü	
	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman
GSBK I	375	85	375	49	375	128	375	54	375	74
GSBK II	375	149	375	96	375	40	375	87	375	162
GSBK III	375	32	375	63	375	105	375	19	375	41
GSBK V	375	16	375	104	375	113	375	125	375	69
KP II	375	31	375	42	375	38	375	123	375	68
	Kural 11		Kural 12		Kural 13		Kural 14			
	Çözümü		Çözümü		Çözümü		Çözümü			
	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman		
GSBK I	375	13	375	197	375	20	375	72		
GSBK II	375	62	375	21	375	80	375	124		
GSBK III	375	80	375	35	375	89	375	38		
GSBK V	375	17	375	47	375	125	375	170		
KP II	375	155	375	106	375	77	375	32		

EK-1.(devam) Statik değer seçim kuralları deneysel çalışmalar sonuçları

Çizelge 1.6. Killbridge 3 deney sonuçları

	Kural 1		Kural 2		Kural 3		Kural 4		Kural 5	
	Çözümü		Çözümü		Çözümü		Çözümü		Çözümü	
	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman
GSBK I	598	153	599	148	599	529	598	76	598	200
GSBK II	598	684	599	47	599	185	599	16	599	11
GSBK III	598	54	599	109	599	1662	599	7	598	902
GSBK V	598	58	599	106	599	1543	599	7	598	864
KP II	598	103	598	76	599	354	599	34	598	765
	Kural 6		Kural 7		Kural 8		Kural 9		Kural 10	
	Çözümü		Çözümü		Çözümü		Çözümü		Çözümü	
	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman
GSBK I	599	611	599	323	599	1353	599	20	599	141
GSBK II	601	25	599	2350	600	58	598	1709	600	193
GSBK III	597	2022	599	1123	599	281	599	13	599	1200
GSBK V	597	2150	599	1243	599	241	599	10	599	1084
KP II	598	235	598	563	599	143	598	1032	599	877
	Kural 11		Kural 12		Kural 13		Kural 14			
	Çözümü		Çözümü		Çözümü		Çözümü			
	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman		
GSBK I	599	142	599	155	599	147	599	144		
GSBK II	598	644	598	618	598	613	598	723		
GSBK III	599	117	599	140	599	110	599	116		
GSBK V	599	102	599	122	599	96	599	137		
KP II	599	154	598	369	598	342	598	985		

EK-1.(devam) Statik değer seçim kuralları deneysel çalışmalar sonuçları

Çizelge 1.7. Tongue 2 deney sonuçları

	Kural 1		Kural 2		Kural 3		Kural 4		Kural 5	
	Çözümü		Çözümü		Çözümü		Çözümü		Çözümü	
	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman
GSBK I	398	1483	398	2854	400	110	398	1053	397	1725
GSBK II	400	95	397	708	397	731	397	845	396	660
GSBK III	397	1840	397	2310	400	75	397	2574	396	2001
GSBK V	399	2450	397	2310	400	111	397	587	396	2131
KP II	397	2094	400	36	400	184	398	2690	397	2303
	Kural 6		Kural 7		Kural 8		Kural 9		Kural 10	
	Çözümü		Çözümü		Çözümü		Çözümü		Çözümü	
	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman
GSBK I	400	112	396	628	398	834	398	622	398	2622
GSBK II	396	1335	396	698	396	1201	396	132	396	1468
GSBK III	396	2035	397	740	396	2370	397	41	396	3427
GSBK V	396	3295	397	1093	396	862	396	904	396	2793
KP II	398	50	400	48	400	45	398	3354	400	21
	Kural 11		Kural 12		Kural 13		Kural 14			
	Çözümü		Çözümü		Çözümü		Çözümü			
	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman		
GSBK I	400	6	397	3592	399	671	400	2		
GSBK II	398	764	397	3092	400	220	398	3049		
GSBK III	397	1032	397	1757	398	1150	398	662		
GSBK V	397	3444	396	182	399	2403	398	1533		
KP II	399	344	400	10	400	9	400	8		

EK-1.(devam) Statik değer seçim kuralları deneysel çalışmalar sonuçları

Çizelge 1.8. Tongue 3 deney sonuçları

	Kural 1		Kural 2		Kural 3		Kural 4		Kural 5	
	Çözümü		Çözümü		Çözümü		Çözümü		Çözümü	
	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman
GSBK I	598	211	605	85	599	1788	600	1182	602	600
GSBK II	598	240	599	1541	604	900	602	333	598	1729
GSBK III	599	773	600	39	603	275	599	1700	598	1680
GSBK V	598	1134	604	76	600	261	600	458	603	490
KP II	598	431	603	698	598	369	604	84	603	400
	Kural 6		Kural 7		Kural 8		Kural 9		Kural 10	
	Çözümü		Çözümü		Çözümü		Çözümü		Çözümü	
	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman
GSBK I	605	16	602	46	603	570	601	202	604	46
GSBK II	600	1135	601	1089	603	480	601	523	602	299
GSBK III	601	783	599	1340	599	87	602	620	605	463
GSBK V	603	520	600	373	599	1280	599	868	602	767
KP II	599	689	601	1194	600	388	601	1322	601	238
	Kural 11		Kural 12		Kural 13		Kural 14			
	Çözümü		Çözümü		Çözümü		Çözümü			
	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman		
GSBK I	602	1440	601	718	603	67	601	1251		
GSBK II	604	990	600	710	603	140	601	484		
GSBK III	602	210	600	282	598	1335	601	584		
GSBK V	598	1446	602	1667	601	350	602	1558		
KP II	598	662	599	201	599	208	604	73		

EK-1.(devam) Statik değer seçim kuralları deneysel çalışmalar sonuçları

Çizelge 1.9. WeeMag 2 deney sonuçları

	Kural 1		Kural 2		Kural 3		Kural 4		Kural 5	
	Çözümü		Çözümü		Çözümü		Çözümü		Çözümü	
	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman
GSBK I	158	3328	155	434	155	862	156	1494	155	1276
GSBK II	158	46	155	1418	154	2766	157	2825	155	325
GSBK III	156	800	155	1220	154	192	155	1617	155	182
GSBK V	158	1911	155	1010	154	266	155	1166	155	1908
KP II	155	2224	155	2348	154	220	154	354	155	1461
	Kural 6		Kural 7		Kural 8		Kural 9		Kural 10	
	Çözümü		Çözümü		Çözümü		Çözümü		Çözümü	
	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman
GSBK I	154	2660	154	2614	154	1400	155	1111	155	1495
GSBK II	154	190	154	113	154	102	155	262	154	221
GSBK III	154	1510	154	1620	154	411	155	208	155	246
GSBK V	154	242	154	161	154	122	155	1896	154	153
KP II	154	1090	154	1136	154	3224	155	120	154	1091
	Kural 11		Kural 12		Kural 13		Kural 14			
	Çözümü		Çözümü		Çözümü		Çözümü			
	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman		
GSBK I	155	318	155	879	155	2000	154	3560		
GSBK II	154	1112	155	1824	155	49	155	916		
GSBK III	155	347	154	1457	156	37	155	225		
GSBK V	155	660	155	931	155	742	155	119		
KP II	154	162	155	1438	155	572	155	2826		

EK-1.(devam) Statik değer seçim kuralları deneysel çalışmalar sonuçları

Çizelge 1.10. WeeMag 4 deney sonuçları

	Kural 1		Kural 2		Kural 3		Kural 4		Kural 5	
	özümü		çözümü		çözümü		çözümü		özümü	
	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman
GSBK I	313	2490	310	1048	310	412	311	1723	309	1282
GSBK II	310	230	310	30	311	1378	309	1068	311	1033
GSBK III	318	980	309	1506	310	54	312	746	314	66
GSBK V	317	100	310	100	310	403	311	163	315	95
KP II	312	3358	313	53	313	442	315	144	314	1020
	Kural 6		Kural 7		Kural 8		Kural 9		Kural 10	
	özümü		çözümü		çözümü		çözümü		özümü	
	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman
GSBK I	309	145	309	143	309	177	309	1055	309	128
GSBK II	311	109	311	118	311	112	311	993	311	110
GSBK III	310	814	310	706	310	790	314	60	310	627
GSBK V	310	264	310	243	310	327	315	100	310	266
KP II	312	225	312	242	312	250	314	982	312	234
	Kural 11		Kural 12		Kural 13		Kural 14			
	özümü		çözümü		çözümü		özümü			
	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman		
GSBK I	311	331	311	1348	311	947	310	1222		
GSBK II	311	1584	312	759	311	1710	312	1305		
GSBK III	310	1460	311	210	312	1625	311	23		
GSBK V	309	988	311	320	311	27	309	50		
KP II	311	331	310	345	310	353	312	182		

EK-1.(devam) Statik değer seçim kuralları deneysel çalışmalar sonuçları

Çizelge 1.11. Scholl 2 deney sonuçları

	Kural 1		Kural 2		Kural 3		Kural 4		Kural 5	
	Çözümü		Çözümü		Çözümü		Çözümü		Çözümü	
	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman
GSBK I	3180	3554	3452	2806	3208	3362	3554	3570	3258	3376
GSBK II	3180	2727	3286	2866	3177	3328	3164	2491	3210	2273
GSBK III	3168	3012	3416	3586	3180	3111	3159	2690	3285	2091
GSBK V	3202	3107	3312	1303	3180	3112	3166	3256	3203	2591
KP II	3168	1886	3167	271	3185	875	3173	1207	3162	1269
	Kural 6		Kural 7		Kural 8		Kural 9		Kural 10	
	Çözümü		Çözümü		Çözümü		Çözümü		Çözümü	
	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman
GSBK I	3738	3505	3168	1277	3156	1210	3158	2142	3172	3108
GSBK II	3184	3229	3162	2870	3172	2309	3168	3108	3168	1298
GSBK III	3168	1533	3160	2901	3164	1791	3219	3194	3166	3519
GSBK V	3179	2002	3162	2545	3173	2928	3168	2292	3163	2139
KP II	3170	167	3167	1680	3169	108	3162	2098	3164	2150
	Kural 11		Kural 12		Kural 13		Kural 14			
	Çözümü		Çözümü		Çözümü		Çözümü			
	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman		
GSBK I	3177	1457	3232	1332	3218	2398	3188	2595		
GSBK II	3164	3448	3215	1177	3218	900	3166	1433		
GSBK III	3169	1597	3220	982	3232	2803	3180	1408		
GSBK V	3173	3067	3198	2967	3202	1190	3181	1681		
KP II	3184	1302	3158	1556	3169	324	3173	294		

EK-1.(devam) Statik değer seçim kuralları deneysel çalışmalar sonuçları

Çizelge 1.12. Scholl 4 deney sonuçları

	Kural 1		Kural 2		Kural 3		Kural 4		Kural 5	
	Çözümü		Çözümü		Çözümü		Çözümü		Çözümü	
	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman
GSBK I	6486	2558	6626	3588	6395	2971	6470	3181	6520	3511
GSBK II	6636	2248	7344	2018	6407	2277	6413	3556	6443	3593
GSBK III	6560	2868	6511	3392	6405	3528	6502	3131	6554	3600
GSBK V	6606	3600	6469	2774	6636	2655	6466	3058	6505	3543
KP II	6441	347	6418	1150	6427	118	6412	3412	6394	2524
	Kural 6		Kural 7		Kural 8		Kural 9		Kural 10	
	Çözümü		Çözümü		Çözümü		Çözümü		Çözümü	
	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman
GSBK I	6405	1932	6892	3592	6636	6352	6589	6852	6497	6782
GSBK II	6413	3018	6653	7012	6862	6523	6995	7120	6483	5860
GSBK III	6411	2372	6560	6957	6850	7180	7025	6480	6406	3269
GSBK V	6408	2707	6614	7180	6766	7053	7956	6540	6926	5492
KP II	6444	394	6467	2768	6415	1682	6399	4560	6423	1173
	Kural 11		Kural 12		Kural 13		Kural 14			
	Çözümü		Çözümü		Çözümü		Çözümü			
	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman		
GSBK I	6398	2492	6675	2762	6570	2291	6384	1758		
GSBK II	6419	1608	6626	3293	6536	2513	6403	2428		
GSBK III	6419	1689	6548	3567	7179	3600	6418	2631		
GSBK V	6418	2625	6588	1832	6524	3404	6406	3405		
KP II	6444	1381	6404	1436	6374	2139	6434	1342		

EK-2. Sezgisel algoritma 1. aşama deney sonuçları

Çizelge 2.1. $\alpha=10$ için deney sonuçları

Deney setleri	GSBK I + sezgisel		GSBK II + sezgisel		GSBK III + sezgisel		GSBK V + sezgisel		KP II + sezgisel	
	Çözümü		Çözümü		Çözümü		Çözümü		Çözümü	
	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman
Heskiaoff 2	488	31	488	100	488	195	488	38	488	217
Heskiaoff 3	664	177	664	195	664	231	664	136	664	45
Sawyer 2	367	3,5	367	3	367	2,5	367	6,5	367	6
Sawyer 3	658	2	658	10	658	1,5	658	10	658	0,5
Kilbridge 2	375	15	375	25	375	9	375	73	375	33
Kilbridge 3	599	486	598	146	598	60	598	124	598	14
Tongue 2	398	746	397	626	398	240	398	89	400	11
Tongue 3	601	2264	599	223	598	2062	600	2506	600	422
Weemag 2	156	127	155	367	155	715	155	2048	155	2062
Weemag 4	311	175	309	1719	310	489	311	405	310	972
Scholl 2	3162	6055	3173	709	3167	3493	3166	653	3158	2477
Scholl 4	6406	5051	6395	4279	6397	1449	6407	1011	6403	2829

Çizelge 2.2. $\alpha=15$ için deney sonuçları

Deney setleri	GSBK I + sezgisel		GSBK II + sezgisel		GSBK III + sezgisel		GSBK V + sezgisel		KP II + sezgisel	
	Çözümü		Çözümü		Çözümü		Çözümü		Çözümü	
	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman
Heskiaoff 2	488	103	488	1343	488	140	488	224	488	23
Heskiaoff 3	664	6	664	1	664	415	664	80	664	13
Sawyer 2	367	11	367	1	367	0,5	367	6,5	367	1
Sawyer 3	658	5	658	6	658	9	658	3	658	12
Kilbridge 2	375	66	375	21	375	68	375	23	375	63
Kilbridge 3	599	781	598	302	598	516	598	50	598	1302
Tongue 2	399	2991	398	603	398	491	397	1426	400	188
Tongue 3	600	1277	598	2550	600	1114	600	2315	599	3194
Weemag 2	155	367	155	456	154	629	155	2469	154	710
Weemag 4	311	437	311	190	311	547	311	945	310	3570
Scholl 2	3161	2819	3171	730	3165	1721	3184	3534	3160	2854
Scholl 4	6395	6059	6393	4149	6383	1138	6380	1731	6392	6107

EK-2.(devam) Sezgisel algoritma 1. aşama deney sonuçları

Çizelge 2.3. $\alpha=20$ için deney sonuçları

Deney setleri	GSBK I + sezgisel		GSBK II + sezgisel		GSBK III + sezgisel		GSBK V + sezgisel		KP II + sezgisel	
	Çözümü		Çözümü		Çözümü		Çözümü		Çözümü	
	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman
Heskiaoff 2	488	49	488	152	488	172	488	13	488	10
Heskiaoff 3	664	138	664	959	664	320	664	305	664	113
Sawyer 2	367	6,5	367	1	367	1	367	1	367	1
Sawyer 3	658	3	658	11	658	3	658	5	658	3
Kilbridge 2	375	109	375	363	375	123	375	63	375	74
Kilbridge 3	598	3470	598	399	599	33	598	600	598	106
Tongue 2	398	1383	399	1147	397	948	398	136	400	30
Tongue 3	600	3120	599	1736	600	3230	602	344	600	2248
Weemag 2	156	379	155	56	155	297	156	34	156	372
Weemag 4	312	305	311	187	310	1825	311	1400	311	669
Scholl 2	3176	4179	3163	6048	3176	2223	3164	3774	3163	6681
Scholl 4	6392	5791	6402	6430	6399	5754	6404	5251	6388	562

Çizelge 2.4. $\alpha=25$ için deney sonuçları

Deney setleri	GSBK I + sezgisel		GSBK II + sezgisel		GSBK III + sezgisel		GSBK V + sezgisel		KP II + sezgisel	
	Çözümü		Çözümü		Çözümü		Çözümü		Çözümü	
	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman
Heskiaoff 2	488	1420	488	1290	488	204	488	1452	488	47
Heskiaoff 3	664	236	664	129	664	478	664	348	664	61
Sawyer 2	367	8	367	1	367	1	367	8	367	1
Sawyer 3	658	4	658	3	658	8	658	1	658	1
Kilbridge 2	375	75	375	139	375	515	375	134	375	65
Kilbridge 3	598	327	598	3381	598	115	598	53	590	190
Tongue 2	399	541	398	3245	398	911	398	9	400	51
Tongue 3	601	3246	602	1678	602	529	600	1936	602	2169
Weemag 2	156	202	155	323	156	40	156	533	155	291
Weemag 4	312	372	311	796	311	108	310	3220	312	189
Scholl 2	3191	1116	3180	6335	3174	1988	3178	1516	3164	5341
Scholl 4	6414	5908	6416	6100	6396	2366	6431	5908	6396	606

EK-2.(devam) Sezgisel algoritma 1. aşama deney sonuçları

Çizelge 2.5. $\alpha=30$ için deney sonuçları

Deney setleri	GSBK I + sezgisel		GSBK II + sezgisel		GSBK III + sezgisel		GSBK V + sezgisel		KP II + sezgisel	
	Çözümü		Çözümü		Çözümü		Çözümü		Çözümü	
	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman
Heskiaoff 2	488	323	488	519	488	86	488	175	488	214
Heskiaoff 3	664	340	664	261	664	139	664	1263	664	127
Sawyer 2	367	11	367	1	367	2	367	6	367	1
Sawyer 3	658	3	658	1	658	12	658	1	658	1
Kilbridge 2	375	126	375	257	375	106	375	550	375	6
Kilbridge 3	598	3155	598	1568	598	60	598	105	598	977
Tongue 2	397	1548	400	5	398	1196	397	224	399	1278
Tongue 3	602	2445	601	2323	603	584	599	3344	602	924
Weemag 2	156	25	155	258	156	109	155	687	155	10
Weemag 4	311	2953	310	2581	311	2230	311	2885	311	389
Scholl 2	3186	852	3187	875	3183	2044	3176	4214	3157	494
Scholl 4	6431	6469	6441	7108	6425	1264	6418	1923	6405	7146

EK-3. Sezgisel algoritma 2. aşama deney sonuçları

Çizelge 3.1. $\alpha=11$ için deney sonuçları

Deney setleri	GSBK I + sezgisel		GSBK II + sezgisel		GSBK III + sezgisel		GSBK V + sezgisel		KP II + sezgisel	
	Çözümü		Çözümü		Çözümü		Çözümü		Çözümü	
	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman
Heskiaoff 2	488	736	488	268	488	626	488	42	488	13
Heskiaoff 3	664	38	664	2	664	57	664	84	664	50
Sawyer 2	367	1	367	0,45	367	2	367	3	367	3
Sawyer 3	658	1	658	6	658	3	658	8	658	17
Kilbridge 2	375	2	375	4	375	72	375	4	375	57
Kilbridge 3	599	670	598	365	598	352	598	923	598	1132
Tongue 2	400	120	397	1243	398	403	397	2485	400	170
Tongue 3	602	762	599	2292	601	391	601	3100	600	2385
Weemag 2	155	150	155	457	156	98	156	63	156	55
Weemag 4	312	320	311	49	311	109	311	1073	311	1293
Scholl 2	3162	1038	3180	5263	3164	2233	3168	1279	3165	4628
Scholl 4	6400	5926	6406	7094	6403	2281	6401	718	6400	1605

Çizelge 3.2. $\alpha=12$ için deney sonuçları

Deney setleri	GSBK I + sezgisel		GSBK II + sezgisel		GSBK III + sezgisel		GSBK V + sezgisel		KP II + sezgisel	
	Çözümü		Çözümü		Çözümü		Çözümü		Çözümü	
	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman
Heskiaoff 2	488	255	488	123	488	82	488	246	488	577
Heskiaoff 3	664	149	664	158	664	98	664	9	664	12
Sawyer 2	367	9	367	2	367	3	367	2	367	2
Sawyer 3	658	1	658	1	658	10	658	7	658	3
Kilbridge 2	375	2	375	74	375	19	375	2	375	131
Kilbridge 3	599	654	598	256	598	362	599	175	598	148
Tongue 2	400	102	400	153	399	560	397	1250	400	5
Tongue 3	602	1461	598	357	600	2106	602	253	600	3301
Weemag 2	156	23	155	214	155	360	155	3421	155	1478
Weemag 4	310	1592	311	140	311	101	311	687	311	389
Scholl 2	3162	5740	3158	3805	3173	5909	3174	2801	3161	1651
Scholl 4	6403	6524	6405	4055	6387	1097	6402	2819	6404	1267

EK-3.(devam) Sezgisel algoritma 2. aşama deney sonuçları

Çizelge 3.3. $\alpha=13$ için deney sonuçları

Deney setleri	GSBK I + sezgisel		GSBK II + sezgisel		GSBK III + sezgisel		GSBK V + sezgisel		KP II + sezgisel	
	Çözümü		Çözümü		Çözümü		Çözümü		Çözümü	
	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman
Heskiaoff 2	488	112	488	190	488	6	488	36	488	704
Heskiaoff 3	664	47	664	61	664	2	664	37	664	17
Sawyer 2	367	1	367	5	367	5	367	0,75	367	3
Sawyer 3	658	7	658	8	658	4	658	1	658	1
Kilbridge 2	375	8	375	18	375	80	375	50	375	34
Kilbridge 3	599	259	598	186	598	112	598	198	598	53
Tongue 2	398	308	399	245	399	458	398	523	400	258
Tongue 3	599	3440	598	2278	600	1755	599	3592	602	1696
Weemag 2	155	43	155	64	156	33	156	185	156	278
Weemag 4	311	960	311	93	310	1554	311	1895	311	859
Scholl 2	3179	1462	3168	4349	3157	5704	3175	2649	3168	1590
Scholl 4	6409	2035	6397	1600	6384	1203	6377	5714	6398	1240

Çizelge 3.4. $\alpha=14$ için deney sonuçları

Deney setleri	GSBK I + sezgisel		GSBK II + sezgisel		GSBK III + sezgisel		GSBK V + sezgisel		KP II + sezgisel	
	Çözümü		Çözümü		Çözümü		Çözümü		Çözümü	
	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman
Heskiaoff 2	488	548	488	705	488	86	488	193	488	58
Heskiaoff 3	664	129	664	47	664	296	644	89	664	52
Sawyer 2	367	2	367	0,85	367	1	367	1	367	0,7
Sawyer 3	658	7	658	4	658	9	658	13	658	1
Kilbridge 2	375	21	375	13	375	60	375	56	375	206
Kilbridge 3	599	826	598	406	598	423	598	503	598	1236
Tongue 2	399	2508	398	1532	398	3506	399	2453	400	101
Tongue 3	602	1379	598	1087	599	1950	600	2646	600	1780
Weemag 2	155	1583	155	306	155	1717	155	1807	156	48
Weemag 4	311	1498	311	276	311	521	310	802	311	1084
Scholl 2	3185	4229	3172	2402	3178	2219	3167	1277	3158	3424
Scholl 4	6376	1992	6401	6450	6394	5053	6401	3091	6404	2020

EK-3.(devam) Sezgisel algoritma 2. aşama deney sonuçları

Çizelge 3.5. $\alpha=16$ için deney sonuçları

Deney setleri	GSBK I + sezgisel		GSBK II + sezgisel		GSBK III + sezgisel		GSBK V + sezgisel		KP II + sezgisel	
	Çözümü		Çözümü		Çözümü		Çözümü		Çözümü	
	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman
Heskiaoff 2	488	339	488	116	488	58	488	637	488	187
Heskiaoff 3	664	5	664	292	664	6	664	159	664	72
Sawyer 2	367	0,75	367	6	367	6	367	0,8	367	3
Sawyer 3	658	7	658	9	658	5	658	1	658	2
Kilbridge 2	375	22	375	241	375	52	375	75	375	14
Kilbridge 3	598	596	598	365	598	188	598	614	598	128
Tongue 2	400	95	400	103	398	3513	397	3463	400	86
Tongue 3	600	2294	598	2227	600	1027	601	1152	600	1163
Weemag 2	156	561	155	56	155	270	155	416	156	15
Weemag 4	311	105	310	1880	311	1303	311	1373	312	118
Scholl 2	3183	2600	3158	3115	3170	5004	3172	5425	3158	4720
Scholl 4	6405	974	6398	2471	6381	1196	6397	2950	6388	3125

Çizelge 3.6. $\alpha=17$ için deney sonuçları

Deney setleri	GSBK I + sezgisel		GSBK II + sezgisel		GSBK III + sezgisel		GSBK V + sezgisel		KP II + sezgisel	
	Çözümü		Çözümü		Çözümü		Çözümü		Çözümü	
	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman
Heskiaoff 2	488	635	488	326	488	56	488	580	488	213
Heskiaoff 3	664	186	664	283	664	197	664	330	664	252
Sawyer 2	367	1	367	5	367	3	367	2	367	6
Sawyer 3	658	11	658	5	658	1	658	1	658	3
Kilbridge 2	375	23	375	13	375	96	375	105	375	72
Kilbridge 3	598	678	598	489	598	368	598	1425	598	1268
Tongue 2	398	273	399	185	397	3563	397	924	400	331
Tongue 3	600	2945	600	1974	600	224	600	296	602	946
Weemag 2	156	196	155	1309	155	550	155	2449	156	41
Weemag 4	311	2833	310	557	311	1202	311	106	312	420
Scholl 2	3173	4497	3173	4593	3174	4145	3183	3656	3168	2573
Scholl 4	6400	3231	6400	1734	6408	3838	6394	6588	6403	755

EK-3.(devam) Sezgisel algoritma 2. aşama deney sonuçları

Çizelge 3.7. $\alpha=18$ için deney sonuçları

Deney setleri	GSBK I + sezgisel		GSBK II + sezgisel		GSBK III + sezgisel		GSBK V + sezgisel		KP II + sezgisel	
	Çözümü		Çözümü		Çözümü		Çözümü		Çözümü	
	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman
Heskiaoff 2	488	406	488	286	488	336	488	951	488	58
Heskiaoff 3	664	26	664	128	664	285	664	90	664	20
Sawyer 2	367	3	367	7	367	1	367	0,9	367	4
Sawyer 3	658	4	658	9	658	1	658	7	658	4
Kilbridge 2	375	28	375	29	375	28	375	36	375	182
Kilbridge 3	598	986	598	785	598	243	599	230	598	1368
Tongue 2	398	906	397	1413	398	758	398	2558	400	54
Tongue 3	602	2532	600	998	601	1019	601	41	600	2496
Weemag 2	155	2435	155	1511	155	1768	156	9	156	200
Weemag 4	311	2916	311	1064	311	357	311	1770	311	393
Scholl 2	3176	595	3174	3357	3182	4590	3177	2091	3168	7191
Scholl 4	6405	5138	6400	5097	6400	3888	6400	5818	6396	2518

Çizelge 3.8. $\alpha=19$ için deney sonuçları

Deney setleri	GSBK I + sezgisel		GSBK II + sezgisel		GSBK III + sezgisel		GSBK V + sezgisel		KP II + sezgisel	
	Çözümü		Çözümü		Çözümü		Çözümü		Çözümü	
	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman	En iyi değer	Bulduğu zaman
Heskiaoff 2	488	695	488	551	488	47	488	5	488	28
Heskiaoff 3	664	21	664	576	664	578	664	203	664	25
Sawyer 2	367	2	367	2	367	0,7	367	0,75	367	2
Sawyer 3	658	1	658	8	658	6	658	4	658	1
Kilbridge 2	375	47	375	4	375	13	375	2	375	28
Kilbridge 3	599	36	598	723	598	338	599	136	598	796
Tongue 2	398	378	397	1306	399	603	398	107	400	51
Tongue 3	603	884	600	2158	601	3445	600	162	599	3096
Weemag 2	156	338	154	1474	155	947	155	128	156	47
Weemag 4	311	2331	311	110	311	486	311	667	311	287
Scholl 2	3172	5624	3176	2858	3176	5873	3168	3880	3151	5238
Scholl 4	6401	3390	6394	2545	6400	2485	6409	1627	6402	1680

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : ALAĞAŞ, Hacı Mehmet
 Uyruğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 25.02.1984, Kayseri
 Medeni hali : Evli
 Telefon : 0 (536) 944 62 76
 Fax : 0 (318) 357 24 59
 e-mail : hmalagas@gmail.com



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Doktora	Gazi Üniversitesi / Endüstri Mühendisliği	Devam ediyor
Yüksek lisans	Kırıkkale Üniversitesi/Endüstri Mühendisliği	2012
Lisans	Yıldız Teknik Üniversitesi./Endüstri Mühendisliği	2008
Lise	Kayseri Sema Yazar Anadolu Lisesi	2002

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2009-Halen	Kırıkkale Üniversitesi	Araştırma Görevlisi
2007-2009	Boytaş Mobilya A.Ş.	Üretim Planlama

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

- Alağuş, H. M. ve Toklu, B. (2017). Problem Specific Variable Selection Rules for Constraint Programming: A Type II Mixed Model Assembly Line Balancing Problem Case. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, (İncelemede).
- Alağuş, H. M., Pınarbaşı, M., Yüzükırmızı, M. ve Toklu, B. (2016). Karma modellenli tip-2 montaj hattı dengeleme problemi için bir kısıt programlama modeli. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 22(4), 340-348.
- Pınarbaşı, M., Alağuş, H. M., Yüzükırmızı, M. and Toklu, B. (2015). Analysis of Bowl Effects on Stochastic Assembly Line. *International Journal of Engineering Research*, 7(2), 41.
- Alağuş, H. M., Yüzükırmızı, M. ve Türker, A. K. (2013). Stokastik montaj hatlarının kısıt programlama ve kapalı kuyruk ağları ile dengelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 28(2), 231-240.
- Pınarbaşı, M., Sel, Ç., Alağuş, H. M. and Yüzükırmızı, M. (2013). Integrated definition modeling and Taguchi analysis of flexible manufacturing systems: aircraft industry application. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 68 (9-12), 2169–2183.
- Pınarbaşı, M., Alağuş, H. M., Yüzükırmızı, M. and Toklu, B. (2014, 14-16 October). *Analysis of bowl effects on assembly line using queueing networks and constraint programming procedure*. Paper presented at the *CIE44 & IMSS'14*, Adile Sultan Palace, Turkey, İstanbul.
- Pınarbaşı, M., Alağuş, H. M., Yüzükırmızı, M. and Toklu, B. (2013, 1-4 July). *Constraint programming based solution procedure for assembly line balancing problem with task assignment restrictions*. Paper presented at the 26th European Conference on Operational Research, Sapienza University of Rome, Italy, Rome.
- Alağuş, H. M., Pınarbaşı, M., Yüzükırmızı, M. ve Toklu, B. (2014, 25 – 27 Haziran). *Çok modellenli montaj hatları dengeleme problemi için bir kısıt programlama modeli*. 34. Yöneylem Araştırması ve Endüstri Mühendisliği Ulusal Kongresinde (YAEM 2014) sunuldu, Uludağ Üniversitesi, Bursa.
- Pınarbaşı, M., Sel, Ç., Alağuş, H. M. ve Yüzükırmızı, M. (2010, 30 June-2 July). *Improving flexible manufacturing systems performance using taguchi experimental design*. Yöneylem Araştırması ve Endüstri Mühendisliği 30. Ulusal Kongresinde (YA/EM 2010) sunuldu, Sabancı Üniversitesi, İstanbul.

Hobiler

Kayak, Futbol, Doğa yürüyüşü, Seyahat etmek.



GAZİ GELECEKTİR..