GAZİ ÜNİVERSİTESİ

Gazi

1926

DİNAMİK VE STOKASTİK HÜCRESEL İMALAT SİSTEMİ TASARIMI PROBLEMİNE ÇÖZÜM YAKLAŞIMLARI

Hüsamettin BAYRAM

DOKTORA TEZİ

ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ARALIK 2015

Hüsamettin BAYRAM tarafından hazırlanan "DİNAMİK VE STOKASTİK HÜCRESEL İMALAT SİSTEMİ TASARIMI PROBLEMİNE ÇÖZÜM YAKLAŞIMLARI" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalında DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

DanışmanYrd. Doç. Dr. Ramazan ŞAHİN
Endüstri Mühendisliği, Gazi Üniversitesi ……..…….

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

İkinci Danışman Prof. Dr. Orhan TÜRKBEY
Endüstri Mühendisliği, Gazi Üniversitesi ...……

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

Başkan : Prof. Dr. İhsan ALP
İstatistik Bölümü, Gazi Üniversitesi ...……

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

Üye : Prof. Dr. Hadi GÖKÇEN
Endüstri Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum ...……

Üye : Prof. Dr. Fulya ALTIPARMAK BAYKOÇ
Endüstri Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum ...……

Üye : Doç. Dr. Kadir ERTOĞRAL
Endüstri Mühendisliği, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum .....……

Üye : Doç. Dr. Saadettin Erhan KESEN
Endüstri Mühendisliği, Selçuk Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum ...……

Tez Savunma Tarihi: 25./12/2015

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

……..…….

Prof. Dr. Metin GÜRÜ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

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

- 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 çalışmasında 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.

Hüsamettin BAYRAM

25/12/2015

DİNAMİK VE STOKASTİK HÜCRESEL İMALAT SİSTEMİ TASARIMI PROBLEMİNE ÇÖZÜM YAKLAŞIMLARI

(Doktora Tezi)

Hüsamettin BAYRAM

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Aralık 2015

ÖZET

Pazarların ve arz kaynaklarının küreselleşmesi ile müşteri taleplerinin farklılaşması ve değişkenlik kazanması, imalat sistemlerinin bu durumlara ayak uydurması zorunluluğunu doğurmuştur. Bu şartlarla baş edebilmek için benimsenebilecek üretim yaklaşımlarından bir tanesi de Hücresel İmalat Sistemidir (HİS). Hücresel imalat, atölye ve akış tipi üretim sistemlerinin avantajlı yönlerini birleştiren modern bir üretim kavramıdır. Bu yaklaşım sayesinde sistemin üretim hacminden neredeyse hiç taviz vermeden çok sayıda ürün çeşidi aynı anda üretilebilmektedir. Ancak tüm üretim sistemlerinin tasarımında olduğu gibi değişken talepler nedeniyle HİS'in tasarımında da sistem zamanla yeniden düzenlenmeye ihtiyaç duyar. Talep kaynaklı belirsizlikler HİS tasarımı esnasında göz önünde bulundurulmalıdır. Bu çalışmada talep belirsizliği ve değişkenliği şartları altında bir HİS'in tasarımı hedeflenmiştir. Bunun için öncelikle problem deterministik ve çok dönemli dinamik şartlar altında ele alınmıştır. Bu problemi çözmek için Doğrusal Programlama ve Tavlama Benzetimi temelli bir bütünleşik yaklaşım önerilmiştir. Bu yeni yaklaşımın bulduğu çözümlerin kalitesi literatürdeki farklı bir yaklaşım ve GAMS optimizasyon yazılımı ile bulunan sonuçlarla kıyaslanmıştır. Problem için bir seri alt sınır önerilmiş ve alt sınırların kalitesiyle ilgili sayısal analiz yapılmış, böylece kaliteli bir alt sınır verecek yöntem belirlenmiştir. Ardından bu çözüm yaklaşımı temel alınarak, problemin belirsizlik şartları altındaki durumu için iki farklı çözüm yaklaşımı daha önerilmiştir. Bu yaklaşımlarda Tavlama Benzetimi ve Doğrusal Programlamanın yanı sıra Monte Carlo benzetimi de kullanılmıştır. Belirsizlik şartları altındaki problem çok amaçlı optimizasyon özelliğini de barındırmaktadırlar. Son olarak ise, bu iki çözüm yaklaşımı arama uzayını aramaları esnasında elde ettikleri Pareto çözüm sayısı ve koşum zamanı açısından birbirileri ile kıyaslanarak değerlendirilmişlerdir.

Bilim Kodu	:	906.1.141
Anahtar Kelimeler	:	Hücresel İmalat Sistemi Tasarımı, Tavlama Benzetimi, Doğrusal Programlama, Benzetim, Çok Amaçlı Optimizasyon
Sayfa Adedi	:	109
Danışman	:	Yrd. Doç. Dr. Ramazan ŞAHİN
İkinci Danışman	:	Prof. Dr. Orhan TÜRKBEY

SOLUTION APPROACHES FOR THE DYNAMIC STOCHASTIC CELLULAR MANUFACTURING SYSTEM DESIGN PROBLEM

(Ph. D. Thesis)

Hüsamettin BAYRAM

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

December 2015

ABSTRACT

Globalization of markets and supply sources, together with diversity and variability of customer demands, force manufacturing systems to keep up with these conditions. One of the manufacturing system types that can be adopted to deal with these conditions is Cellular Manufacturing Systems (CMS). Cellular manufacturing is a modern concept in manufacturing which combines advantageous aspects of job shops and flow shops. In a CMS a large variety of products can be manufactured with almost no sacrifice from production volume. As in the cases of all other manufacturing systems, due to the varying demands over time, CMSs must be reconfigured from time to time. Uncertainty of demands should also be considered during the design stage of a CMS. In this study, design of a CMS under demand uncertainty and variability was pursued. Firstly, the problem was only considered deterministically and under multi-period (dynamic) conditions. A solution approach that is based on Linear Programming and Simulated Annealing was proposed. The quality of the results found by this novel solution approach was compared to those found by another approach from the literature and those found by the GAMS optimization software. A series of lower bounds were proposed and they were numerically analyzed. Thus, a method to obtain good lower bounds was determined. In the following section, two different solution approaches, which are based on that solution approach, were suggested for the stochastic version of the problem under consideration. The stochastic problem under consideration has multi-objective optimization property. The solution approaches use Monte Carlo simulation along with Simulated Annealing and Linear Programming. Finally, these two approaches were compared to each other in terms of the number of Pareto optimal solutions found throughout their searches over the search space and the run times.

Science Code	:	906.1.141
Key Words	:	Cellular Manufacturing System Design, Simulated Annealing, Linear Programming, Simulation, Multi-objective optimization
Page Number	:	109
Supervisor	:	Assist. Prof. Dr. Ramazan ŞAHİN
Co-Supervisor	:	Prof. Dr. Orhan TÜRKBEY

TEŞEKKÜR

Bu doktora tezi çalışması süresince hem yönlendirici, hem güler yüzlü hem de cana yakın tutumuyla bana sadece danışman değil, aynı zamanda bir ağabey olan ve bilimsel katkılarıyla tezimin ilerleme sürecinde bana yol gösteren, sayın danışman hocam Yrd. Doç. Dr. Ramazan ŞAHİN'e müteşekkirim. Ayrıca tez ikinci danışmanım olan sayın Prof. Dr. Orhan TÜRKBEY ve tez izleme jürilerinde bana tavsiyeleriyle tezimin şekillenmesinde büyük rol oynayan sayın Prof. Dr. Fulya ALTIPARMAK BAYKOÇ ve sayın Doç. Dr. Kadir ERTOĞRAL hocalarıma da teşekkür ederim.

Doktoram süresince gösterdiği sabrı ve desteği için eşim İlknur'a ve doktoramın ikinci yılında ailemize katılan oğlum Abdullah Ercan'a sevgilerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET..... iv

ABSTRACT..... v

TEŞEKKÜR..... vi

İÇİNDEKİLER..... vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ..... ix

ŞEKİLLERİN LİSTESİ..... x

SİMGELER VE KISALTMALAR..... xi

1.GİRİŞ..... 1

2.LİTERATÜR ARAŞTIRMASI..... 5

2.1. İmalat Sistemlerinin Tasarımı..... 5

2.2. Hücresel İmalat Sistemlerinin Tasarımı..... 12

2.3. Tesis Düzenlemesi ve Hücresel İmalat Sistemi Tasarımında Dinamik Yaklaşım..... 16

2.3.1.Dinamik tesis düzenlemesi problemi ile ilgili çalışmalar..... 17

2.3.2.Dinamik hücresel imalat sistemi tasarımı problemi ile ilgili çalışmalar..... 19

2.4. Tesis Düzenlemesi ve Hücresel İmalat Sistemi Tasarımında Stokastik Yaklaşım..... 25

2.4.1.Stokastik tesis düzenlemesi problemi ile ilgili çalışmalar..... 25

2.4.2.Stokastik hücresel imalat sistemi tasarımı problemi ile ilgili çalışmalar..... 29

2.5. Hücresel İmalat Sistemi Tasarımında Ele Alınan Özellikler..... 31

3.DİNAMİK HÜCRESEL İMALAT SİSTEMİ TASARIMI..... 37

3.1. Problem Tanımı ve Varsayımlar..... 37

3.2. Problemin Matematiksel Modeli..... 39

3.2.1.Problemin tam sayılı matematiksel modeli..... 40

3.2.2.Tam sayılı matematiksel modelin açıklaması..... 42

3.2.3.Matematiksel modelin doğrusallaştırılması..... 43

Sayfa

3.2.4.Problemin karmaşıklık sınıfı..... 44

3.3. Önerilen Çözüm Yaklaşımı..... 45

3.3.1.Önerilen çözüm yaklaşımının algoritması..... 46

3.3.2.Tavlama benzetimi..... 49

3.3.3.Çözüm gösterimi ve komşuluk mekanizmaları..... 51

3.3.4.Doğrusal programlama..... 57

3.3.5.Alt problem matematiksel modeli..... 57

3.3.6.Tavlama benzetimi ve doğrusal programlama arayüzü..... 60

3.4. Rotalama ve Akış Karar Değişkenlerinin Tam Sayı Değerlere Yuvarlanması.... 61

3.5. Alt Sınır Yaklaşımları..... 62

3.6. Örnek Problem Çözümleri ve Çözüm Yaklaşımının Değerlendirilmesi..... 72

4.STOKASTİK DİNAMİK HÜCRESEL İMALAT SİSTEMİ TASARIMI PROBLEMİ..... 77

4.1. Stokastik Dinamik HİS Tasarımı Probleminin Tanımı..... 77

4.2. Çözüm Yaklaşımları..... 78

4.2.1.Benzetim entegre edilmiş çözüm yaklaşımı..... 80

4.2.2.Sonuç benzetimli çözüm yaklaşımı..... 84

4.3. Welch'in *t* Testi..... 87

4.4. Pareto Optimallik..... 89

4.5. Çözüm Yaklaşımları ile Elde Edilen Çözüm Kümelerinin Kıyaslamaları..... 90

4.6. Çözüm Yaklaşımlarının Değerlendirilmesi..... 90

5.SONUÇ ve DEĞERLENDİRME..... 95

KAYNAKLAR..... 99

ÖZGEÇMİŞ..... 109

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 3.1. Alt sınırların karşılaştırılması..... 71

Çizelge 3.2. Problemlerin boyut parametreleri..... 73

Çizelge 3.3. Problem çözüm ve alt sınır değerlerinin kıyaslanması..... 74

Çizelge 4.1. BEY ve SBY'nin Pareto çözüm sayıları açısından kıyaslama sonuçları..... 93

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. Sürece göre yerleşime bir örnek..... 7

Şekil 2.2. Ürüne göre yerleşime bir örnek..... 8

Şekil 2.3. HİS'de yerleşim düzenine bir örnek..... 9

Şekil 2.4. HİS'in farklı imalat sistemleri ile kıyaslanması (Morad, 2000)..... 10

Şekil 3.1. Dinamik HİS tasarımı için önerilen çözüm yaklaşımı algoritmasının akış diyagramı..... 50

Şekil 3.2. TB safhasında kullanılan örnek bir çözüm gösterimi..... 52

Şekil 3.3. Bir dönem için konum değiştirme komşuluk mekanizmasının işleyişi..... 53

Şekil 3.4. Bir dönem için hücre değiştirme komşuluk mekanizmasının işleyişi..... 54

Şekil 3.5. Bir dönem için makine değiştirme komşuluk mekanizmasının işleyişi..... 54

Şekil 3.6. Müteakip dönemlerde makine kopyalama komşuluk mekanizmasının işleyişi..... 55

Şekil 3.7. Müteakip dönemlerde makine ekleme komşuluk mekanizmasının işleyişi.. 55

Şekil 3.8. Müteakip dönemlerde makine çıkarma komşuluk mekanizmasının işleyişi. 56

Şekil 3.9. Bir dönem için makine tipi değiştirme komşuluk mekanizmasının işleyişi.. 56

Şekil 4.1. Benzetim entegre çözüm yaklaşımı (BEY) algoritmasının gösterimi..... 81

Şekil 4.2. Sonuç benzetimli yaklaşım (SBY) algoritmasının gösterimi..... 85

Şekil 4.3. SBY ve BEY çözümlerinin kıyaslanması için bir benzetim algoritması..... 91

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklama
A	Birim hücre içi taşıma maliyeti
AFD_1	Hücresel düzen çözümü ile ilgili maliyet değeri
AFD_2	Ürün akış ve rotalama ile ilgili maliyet değeri
AFD_T	Toplam amaç fonksiyonu değeri
B^U	Bir hücrece bulunabilecek en fazla makine sayısı
B^L	Bir hücrece bulunabilecek en az makine sayısı
C	Makinenin dönemlik kapasitesi
c, d	Hücre indisleri
$Ç_1$	Bir hücresel düzen çözümü
$Ç_2$	Ürün akış ve rota çözümü
D	Talep
E	Birim hücrelerarası taşıma maliyeti
F, G, W	Ürün akış karar değişkenleri
f, g, w	ürün rota karar değişkeni
i, j	Makine türü indisi
K	Konumlar kümesi
k, l	Konum indisleri
L	Konumların aynı hücrede olup olmadığını gösteren parametre
M	Makine tipleri kümesi
N	Hücreler kümesi
P	Ürünler kümesi
p	Ürün indisi
Q	Makine ekleme karar değişkeni
R	Ürün işlemleri kümesi
r	İşlem indisi
S	Benzetim çevrim sayısı

Simgeler	Açıklama
s	Benzetim çevrim sayaç indisi
$\mathbf{S^{Ba}}$	Başlangıç sıcaklığı
$\mathbf{S^{Bi}}$	Bitiş sıcaklığı
$\mathbf{S^{M}}$	Mevcut sıcaklık
T	Dönemler kümesi
t	Dönem indisi
y, y'	Makine kurma ve kaldırma karar değişkenleri
λ	Konumları arasındaki mesafe
δ	Makine kurma maliyetleri
θ	Makine kaldırma maliyeti
β	Makine sabit maliyeti
μ	Makine değişken maliyeti
γ	Makine satın alma maliyeti
π	İşlem süresi
α	İşlem yeteneği

Kısaltmalar	Açıklama
AFD	Amaç fonksiyonu değeri
BEY	Benzetim entegre yaklaşım
DP	Doğrusal programlama
DTDP	Dinamik tesis düzenlemesi problemi
GA	Genetik algoritma
HİS	Hücresel imalat sistemi
KÇ	Komşu çözüm
MÇ	Mevcut çözüm
SBY	Sonuç benzetimli yaklaşım
SDTDP	Stokastik dinamik tesis düzenlemesi problemi
TA	Tabu arama
TB	Tavlama benzetimi
TDP	Tesis düzenlemesi problemi

1. GİRİŞ

Pazarların ve üretim kaynaklarının küreselleşmesi, müşteri taleplerinin farklılaşması ve çok hızlı bir şekilde değişmesi, imalat sektörünü yakından ilgilendiren ve temelden etkileyen bazı neticeleri doğurmuştur. Kısalan ürün yaşam çevrimleri, çetin fiyat ve kalite rekabeti, talebin hızla karşılanması gerekliliği bu durumların açığa çıkardığı bazı sonuçlardır. İmalat sistemleri ise böyle şartlarla baş edebilmek ve ürünleri tüketiciye düşük maliyet, yüksek kalite ve mümkün olan en çabuk şekilde ulaştırabilmek için, verimliliklerini ve üretkenliklerini artırmak zorundadırlar. Aynı zamanda bu şartlar imalat sistemlerini, ürün tasarımındaki ve talep hacimlerindeki değişimlere mümkün olan en az yatırım ile uyum sağlamalarını gerektirmektedir. Bu gibi şartlarla mücadele etmek için geliştirilen üretim yaklaşımlarından biri de HİS yaklaşımıdır.

HİS'in ana fikri, karmaşık bir imalat tesisinin her biri az sayıda makineden oluşan hücrelere bölünüp, bu hücrelerde benzer üretim gereksinimlerine sahip ürünlerden oluşan ürün ailelerinin üretiminin yapılmasıdır. Yani bir ürün ailesine ait tüm ürünler bu aileye tahsis edilen bir hücrede gerekli olan tüm işlemlerini gerçekleştirebilir. Bu sayede süreçler arası stoklar azaltılıp, toplam üretim zamanları kısalırken, üretimin kontrolü de daha basit bir hal alacaktır. Ancak bu ve bunun gibi HİS ile sağlanabilecek birçok avantajdan yararlanılabilmek için, HİS tasarımının çok iyi bir şekilde yapılması gerekmektedir.

HİS'lerin işletmelere faydaları oldukça fazla olmakla beraber, böyle bir sistemin tasarımını en iyi şekilde yapabilmek için, verilmesi gereken birçok kararı da beraberinde getirmektedir. Ayrıca tasarımı yapılacak HİS'de ele alınan kısıtlar ve tasarımın kapsamı genişletildiğinde, tasarım probleminin boyutu oldukça büyümektedir. Literatürde incelenen çalışmalarda, HİS tasarımı yaklaşımlarının birçoğu, bu kapsam ve kısıtların az bir kısmını ele alan tasarım yaklaşımları önermişlerdir. Bu çalışmalardan bazıları tasarım özelliklerinden birçoğunu ihmal etmiş, bazıları ise çalışmalarına çokça tasarım özelliği eklemelerine rağmen bu tasarım özelliklerini uygun bir şekilde ele almadıklarından kaliteli tasarımlar yapılamamıştır. Bu sebepten HİS tasarımı literatürüne kapsamlı bir çalışma ile katkıda bulunmaya gereksinim vardır.

Bu çalışmanın amacı, literatürde daha önce hiç ele alınmadığı kadar kapsamlı bir şekilde, talep kaynaklı belirsizliklerin olduğu bir ortamda, hücrelerin ve makinelerin yeniden düzenlemeleri ile birlikte, bir üretim tesisinde bulunan pek çok üretim kısıtının dikkate alındığı, çok dönemli bir HİS tasarımı yaklaşımı önermektir. Bu problem Stokastik Dinamik HİS tasarımı olarak da adlandırılmaktadır.

Bu çalışmada, yeni bir HİS tasarımı yaklaşımı önermek için aşağıdaki adımlar izlenmiştir.

1. Öncelikle konuya ilişkin literatür taranarak, literatürde genel olarak HİS tasarımının ele alınışı ile çok dönemli olma ve belirsizlik şartları altında HİS tasarımı ve tesis düzenlemesi çalışmaları incelenmiştir. Ardından da literatürde ele alınan ve çalışmanın konusu ile ilgili olan HİS özellikleri irdelenmiştir.
2. Daha sonra tezin ana konusu olan tasarım problemi belirsizlik varsayımı (diğer bir ifadeyle stokastiklik) ihmal edilip, geriye kalan tüm özellikleri dahil edilmek suretiyle çok dönemli bir HİS tasarımı problemi önerilmiştir.
3. Önerilen çok dönemli dinamik HİS tasarımı probleminin öncelikle bir matematiksel modeli ortaya konmuştur.
4. Probleme özgü, Tavlama Benzetimi (TB) ve Doğrusal Programlama (DP) yaklaşımlarını birlikte kullanan bir melez çözüm yaklaşımı önerilmiştir.
5. Daha sonra bu problemin çözümlerinin amaç fonksiyonu değerleri ve çözüm zamanları açısından karşılaştırma yapmak için alt sınır değerleri bulan matematiksel modeller ortaya konmuştur.
6. Bir kısmı literatürden derlenmiş, kalanları da rasgele üretilmiş toplam 50 problem için alt sınır değerleri elde edilmiştir. Aynı problemler geliştirilen meta-sezgisel tabanlı melez yaklaşım ile çözülmüş ve sonuçlar alt sınır veya optimal sonuçlarla kıyaslanmıştır. Ayrıca problemin asıl matematiksel modeli GAMS paket programı ile sınırlandırılmış zaman ile çözülmüş ve sonuçlar bu karşılaştırmaya dahil edilmiştir.
7. Etkinliği önceki bölümde gösterilmiş olan, yeni geliştirilmiş melez yaklaşım temel alınarak, stokastik talep durumunu dikkate alan, simülasyon tabanlı ve çok amaçlı olmak üzere iki çözüm yaklaşımı önerilmiştir. Bu yaklaşımlarla elde edilen çözümler yine simülasyon yardımıyla ve istatistiksel olarak birbiriyle karşılaştırılmıştır. Bu bölümde karşılaştırması yapılan iki yaklaşım ile ilgili değerlendirmelere de yer verilmiştir.

8. Son bölümde ise, bu çalışmada ele alınan HİS tasarım problemlerine yönelik geliştirilen melez yaklaşımlar ile ilgili değerlendirmeler ve gelecek çalışmalara yönelik yorumlara yer verilmiştir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bu bölümde tez konusu ile ilgili literatürdeki çalışmalardan bahsedilmiştir. Öncelikle üretim sistemlerinin tasarımı konusundan bahsedilip çeşitli üretim sistemleri incelenmiştir. Bu üretim sistemleri, avantajları ve dezavantajları açısından incelenmiş ve HİS tasarımı ile ilişkili yönleri tartışılmıştır. Daha sonra, tesis düzenlemesi ve HİS tasarımında sırasıyla çok dönemli tasarımların nasıl yapıldığı ve belirsizlik şartlarının nasıl ele alındığı irdelenmiştir. Özellikle HİS tasarımı ve tesis düzenlemesi problemini dinamik veya stokastik olarak ele alan çalışmalar bu literatür araştırması bölümünün ana içeriğini teşkil etmektedir. Çalışmanın ana konusunun HİS tasarımı olmasına karşın, tesis düzenlemesinin de bu çalışmaya dahil edilmesinin iki sebebi vardır. Bunlardan birincisi çalışmada ele alınan HİS tasarımının sadece hücre oluşturma değil hem hücrelerin içindeki hem de hücrelerin kendi aralarındaki yerleşimleri de yapmasındandır. HİS tasarımında yerleşim kararlarının da verilmesi problemin kapsamını ve zorluğunu artırmasına karşın yapılan tasarımın kalitesini olumlu yönde etkilemektedir. Hücre içindeki makinelerin konumlarının ve hücrelerin kendi aralarındaki konumlarının belirlenmesi kararı tesis düzenlemesi problemine oldukça benzemektedir. İkinci sebep ise, tesis düzenlemesi literatüründe dinamik yeniden düzenleme ve belirsizlik konularının HİS tasarımı literatüründekine göre daha kapsamlı bir şekilde ele alınmış olmasıdır. Farklı yaklaşımları barındıran çalışmalar tesis düzenlemesi literatüründe sayıca fazla ve nitelikçe daha zengindir. Bu sebeplerden dolayı literatür incelemesinde sadece HİS tasarımı değil tesis düzenlemesi de ele alınmıştır. Son olarak ise bu çalışma ile ilgili olan ve literatürde HİS tasarımında ele alınan bazı tasarım özellikleri ayrıntılı olarak anlatılmıştır.

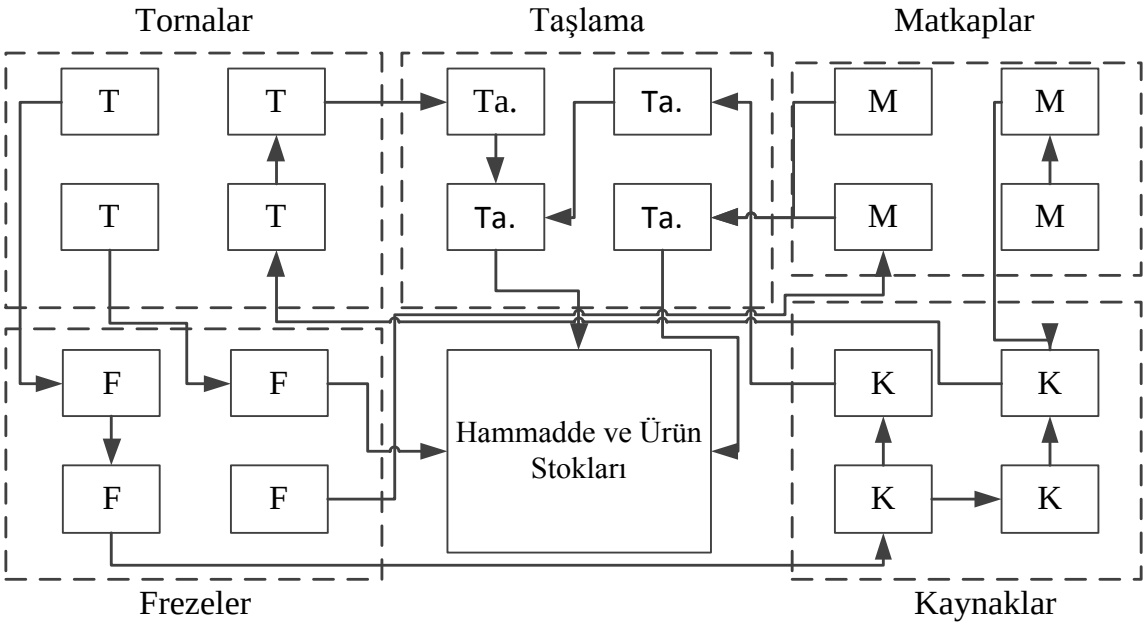
2.1. İmalat Sistemlerinin Tasarımı

İmalat sistemlerinin tasarımı, sistemde yer alması planlanan makine, ekipman ve iş gücü gibi üretim kaynaklarının düzenlenmesidir. Bu kararlar imal edilecek olan ürünler, ürünlerin hacimleri, üretim gereksinimleri ve bunun gibi birçok tasarım parametresine bağımlıdır. İmalat sistemlerinin tasarımının en önemli kararlarından bir tanesi de sistemin yerleşimini belirlemektir. Bir imalat sisteminin yerleşim şekli, bu sistemin tasarımında oldukça büyük önem arz eder. Makinelerin ve imalat ekipmanlarının uygun bir şekilde düzenlenmesi, bir sistemin çalışma şeklini ve performansını doğrudan etkiler. Böyle bir

tasarımda sistemin üretim hacmi ve ürün çeşitliliği verilecek tasarım kararlarının en önemli parametresi olarak anılabilir. İmalat sistemleri, üretim kaynaklarının (makine, bölüm vb. gibi) yerleşimlerine göre sınıflandırılabilirler. Yaygın olarak kullanılan temel yerleşim türlerinden aşağıda bahsedilmiştir.

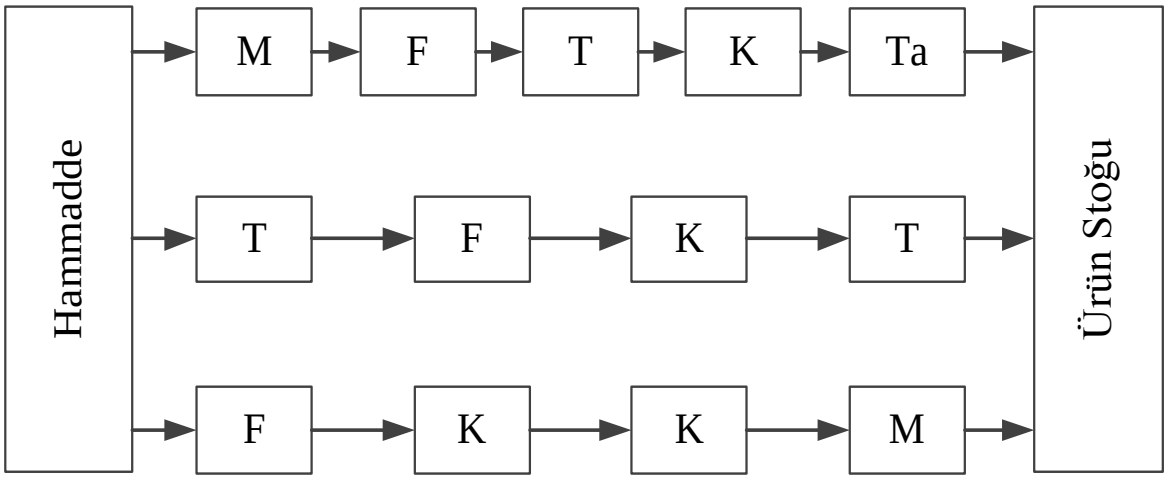
Sabit ürün yerleşimli sistemler, imal edilecek olan ürünün çok büyük olması durumunda kullanılan bir sistemdir. Böyle sistemlerde ürünün bir imalat bölümünden diğer bir imalat bölümüne taşınması mümkün veya pratik olmadığından malzemeler, işçiler ve imal ekipmanları ürünün olduğu yere taşınırlar. Bu tip sistemlerde imal edilen ürünlere örnek olarak gemiler, uçaklar vb. verilebilir.

Sürece göre yerleşimli sistemler ya da fonksiyonel yerleşim olarak da adlandırılan bu sistemler, en sık karşılaşılan imalat sistemlerinden biridir. Bu tip yerleşimde benzer işlemleri gerçekleştiren makineler bir arada gruplandırılırlar. Bu yerleşim tipinin en öne çıkan özelliği esnek olmasıdır. Bu esneklikle anlatılmak istenen, makine arızalarına ve ürün taleplerindeki değişimlere karşı sistemin hemen adapte olması ve imalatın olağan akışının neredeyse hiç bozulmadan devam etmesidir. Dolayısıyla bu tip yerleşim tipi, ürün çeşitliliğinin ve talep dalgalanmalarının fazla, üretim hacimlerinin ise düşük olduğu, atölye tipi üretim sistemleri için uygundur. Bu tip sistemlerin en büyük dezavantajı ise ürünlerin makineler arasında yığınlar halinde taşınması ile süreç içi stokların ve üretim zamanlarının artmasıdır. Malzeme taşımalarını ve bu malzemeler ile ilişkili akışları kontrol etmek oldukça zordur. Çünkü bu tip sistemlerde üretilecek ürünlerin tesis içerisinde geçirdikleri zamanın %95'ini işlemler için beklemeler ve işlemler arasındaki taşınmalar oluşturmaktadır (Askin ve Standridge, 1993: 96). Bu tip yerleşimlerde makinelerin kullanım oranları oldukça düşük ve çizelgeleme faaliyetleri de karmaşık ve zordur. Aşağıdaki Şekil 2.1'de sürece göre yerleştirilmiş bir sisteme örnek verilmiştir. Bu şekilde görüldüğü üzere her biri bir harf ile gösterilmiş olan makine tiplerinden aynı ya da benzer işleri yapanlar bir arada gruplandırılarak bölümler oluşturulmuştur. Buradaki bölümler, imalat tesisinin ihtiyaçları doğrultusunda torna bölümü, freze bölümü, matkap bölümü, taşlama bölümü gibi bölümler olabilir.



Şekil 2.1. Sürece göre yerleşime bir örnek

Ürüne göre yerleşimli sistemler, imalatı yapılan ürünlerin süreç akışlarına göre düzenlenmiş sistemlerdir. İsminden de anlaşılacağı üzere, bu sistemlerde makineler ya da bölümler ürünlerin işlem sıralarına göre sıralanarak, ürünlerin üretim zamanlarının kısaltılması hedeflenir. Birden fazla üretim hattı bulundurabilen bu sistemler, ürün çeşitliliğinin az ve üretim hacminin çok yüksek olduğu durumlarda kullanılırlar. Süreç içi stoklar yok denecek kadar az ve malzeme taşıma faaliyetleri oldukça etkindir. Birim maliyetler ise oldukça düşüktür. Öte yandan bu tip sistemler yeterince esnek olmadıklarından, ürün çeşitliliğinin arttığı, talep hacimlerinin büyük dalgalanmalar yaşadığı ortamlarda verimsiz hale gelebilirler. Çalışma stratejisi sebebiyle önüne geçilen süreç içi stoklar tasarımcısının karşısına tamamlanmış ürün stokları şeklinde dönebilir. Makine arızaları gibi sebeplerden dolayı imalat hattının tamamen durması gibi sorunlarla karşılaşılabilir. Şekil 2.2'de ürüne göre yapılmış bir yerleşim verilmiş, ürünlerin akışları da oklar ile gösterilmiştir. Burada verilen her bir hat bir ürün tipine ait olup farklı ürünler farklı hatlarda üretilmektedir. Bu üretim sistemlerine örnek olarak montaj hatları veya sürekli akış ile imalat yapan endüstriler verilebilir.



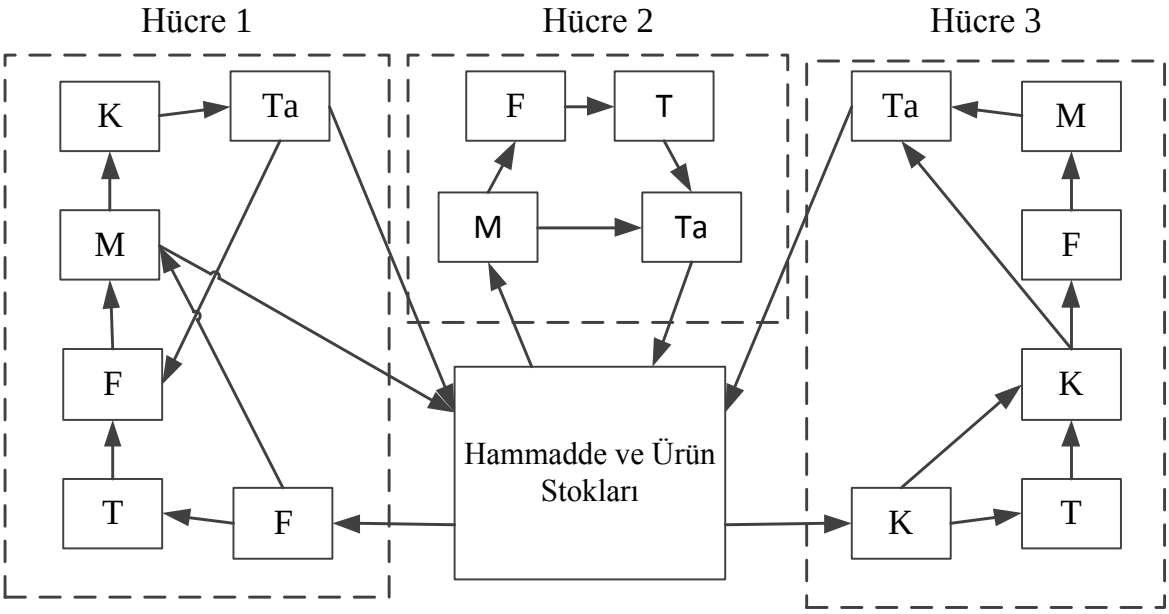
Şekil 2.2. Ürüne göre yerleşime bir örnek

Hücresel yerleşim ise günümüz modern imalat sistemlerinin temel aldığı yaklaşımlardan biridir. Günümüzde, hem hacim hem de ürün açısından değişken olan müşteri talebi, kısalan ürün yaşam döngüleri ve artan küresel rekabet gibi faktörler imalat sektörünün bu koşullara uyum sağlamasını gerektirmiştir. Bu gibi koşullar, imalatçıların en yüksek kalitede ürünü, en uygun fiyata sunarken diğer yandan da yaşanabilecek değişimlere hızla ayak uydurabilmesini sağlayabilecek şekilde esnek olmasını gerektirmiştir. Bu duruma çözüm olarak önerilen imalat yaklaşımlarından biri de HİS'dir. HİS atölye tipi yerleşim ile akış tipi yerleşimin avantajlarını birleştirmektedir.

Hücresel yerleşim düzeni, her bir ürün için ayrı bir üretim hattı oluşturmak veya makineleri fonksiyonlarına göre gruplandırmak yerine, öncelikle ürünleri ürün aileleri şeklinde bir araya getirir. Daha sonra ise bu ürün ailelerini "hücre" adı verilen ve her biri ideal olarak bir ürün ailesinin tamamını işleyebilen makine guruplarına atar. Hücresel imalat bu yönüyle atölye tipi tasarıma yakın bir esneklik sunarken öte yandan da akış tipi tasarımın sunduğuna yakın bir üretim kapasitesi ve yönetim kolaylığı sunar.

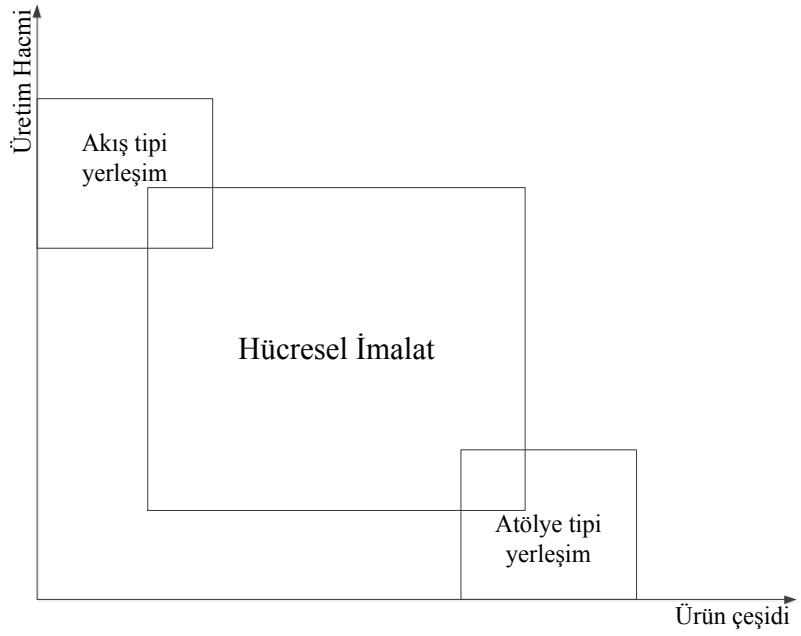
Hücresel yerleşim, makine, işçi gibi üretim kaynaklarının bir arada gruplandırılması ile oluşturulur. Hücresel yerleşimindeki bu gruplandırma, sürece göre yerleşim ve ürüne göre yerleşimde yapılan gruplandırmadan farklı olarak, ürün ailesi adı verilen benzer özelliklere ve benzer üretim ihtiyaçlarına sahip ürünler temel alınarak yapılır. İdeal olarak, her bir üretim hücresi bir ürün ailesinin tüm üretim ihtiyaçlarını karşılayacak şekilde kurulur ve bu ürün ailesini işleyebilecek makinelerin gruplandırılması ile oluşturulur. Dolayısıyla

hücreler arası taşımalar hücresel yerleşimde istenmez ve bu taşımalar olmayacak şekilde kurulmaya çalışılırlar. Sürece göre yerleşimin esneklik avantajından faydalanmak, öte yandan da malzeme taşıma ile ilgili dezavantajları en aza indirgemek mantığı üzerine kurulmuştur. Her bir hücre kendi içinde bir akış tipi yerleşim olarak da düşünülebilir. Şekil 2.3'te hücresel yerleşime bir örnek verilmiştir.



Şekil 2.3. HİS'de yerleşim düzenine bir örnek

İmalat sistemlerinin seçimi üretim hacimleri ile çok sıkı ilişkilidir. Şekil 2.4'te üretim hacmi ve ürün çeşitliliği dikkate alınarak, seçilmesi uygun olan üretim sistemlerinin çeşitleri şematik olarak verilmiştir. Bu şekle göre, üretim hacminin ve ürün çeşidinin çok yüksek olduğu durumlar hariç, ürün çeşidi ve sayısı perspektifinden birçok durumda hücresel imalatın uygun bir üretim sistemi tasarımı olduğu söylenebilir.



Şekil 2.4. HİS'in farklı imalat sistemleri ile kıyaslanması (Morad, 2000)

HİS'in başlıca avantajları şöyledir:

1. Taşıma mesafelerinin kısalması: Oluşturulan ürün ailelerinin tek bir hücre içinde işlenmesi, makineler arası ürün taşımaların sadece bir hücre içinde sınırlı kalmasını sağlar bu da malzeme taşıma faaliyetlerinin kısa mesafelerde olmasını sağlar. Ayrıca taşımalar tek hücre içinde olmak suretiyle daha basit bir hal alır (Wemmerlöv ve Johnson, 1997).
2. İmalat zamanlarının kısalması ve süreç içi stokların azalması: Hücresel imalatın en öne çıkan yararı üretim zamanlarının kısalması ve süreç içi stokların azalmasıdır. Bu iki durum, ürünlerin tesis içinde geçirdikleri toplam zamanın azalmasının bir sonucu olarak elde edilmektedir. Hücresel imalatta işlem görecek ürünlerin bir hücre içerisinde, yığın şeklinde taşımaya gereksinim duymadan birer birer makineler arası aktarımı, hem üretim sürelerinin kısalmasını hem de hücreye giren hammaddenin, hücreden çıktığında tüm operasyonlarını tamamlamış ve neredeyse sevkiyata hazır halde bulunması ile süreç içi stokların azalmasını sağlar. Bu avantajlar bir hücresel imalat sisteminden sağlanması beklenen en temel avantajlardır (Kusiak ve Chow, 1988).
3. Hazırlık zamanlarının kısalması: Grup teknolojisi neticesinde, hücrelerde birbirine benzer ürünler üretilmekte ve bu ürünler birbirine benzer operasyon gereksinimlerine

sahip olmaktadırlar. Bu durum ise bir hücrede iki farklı ürün üretimi arasında yapılacak hazırlıkların toplam zamanlarının kısalmasını sağlamaktadır. (Wemmerlöv ve Hyer, 1989).

4. Malzeme taşıma maliyetleri ve malzeme taşımaya harcanan sürelerin kısalması: İdeal bir HİS'de, herhangi bir ürün ailesine ait bir ürünün tüm operasyonlarının bir hücrede işlenebilmesi öngörülür. Bu ise tüm taşımaların hücre içinde ve çoğu zaman ara ürün yığınlarını taşımakta kullanılan forklift vb gibi ekipmanlara ihtiyaç duymaksızın gerçekleştirilir. Dolayısıyla bir hücre içinde gerçekleştirilen taşımaların maliyetleri az olmakta, bu taşımalara fazladan zaman harcanmamaktadır (Burbidge, 1992).
5. Alan gereksiniminin azaltılması: Temel olarak süreç içi stokların azalması ile depolama ihtiyaçlarının azalması, HİS'lerde stokların azalmasını sağlar. Azalan alan ihtiyacı ise üretim yapan işletmenin yüklendiği kira bedeli gibi maliyetleri azaltmanın yanında taşımaların daha kısa mesafeler arasında gerçekleşmesi gibi olumlu sonuçları da beraberinde getirir (Wemmerlöv & Hyer, 1989).
6. Üretim ve stok kontrolünün kolaylaşması: Makinelerin hücreler şeklinde gruplandırılması çizelgelemesi yapılacak üretim istasyonların sayısını azaltmak suretiyle üretim kontrolünü kolaylaştırır. Ayrıca her bir hücrenin belli ölçüde diğer hücrelerden bağımsız olması, bir ürün veya ürün ailesi için üretim planlamada yapılacak değişikliklerin tüm üretim sistemini değil sadece bir hücreyi etkileyecek düzeyde kalmasını sağlar. Ayrıca üretim sürelerinin kısalması tam zamanında üretim gibi üretim felsefelerinin uygulanabilmesini mümkün kılmak suretiyle stok için yapılan üretimi en aza indirir ve stok yönetimi de kolaylaşır (Aktürk ve Türkcan, 2000; Singh, 1993).
7. Ürün kalitesinde artış: HİS'lerde bir ürünün tüm operasyonları veya operasyonlarının birçoğu bir hücre içinde gerçekleşir ve dolayısıyla ürün akışları genellikle adet bazında ve bir işçi kontrolünde gerçekleşir. Bu ise üretim hatalarının ve bu hataların kaynaklarının anında tespitini kolaylaştırır. Üretim hatalarının kaynaklarının anında tespiti ve düzeltilmesi yoluyla üretim kalitesinde iyileşmeler sağlanır (Burbidge, 1992).
8. Çalışanların iş tatmini ve memnuniyetinin artması: Hücresel imalatta bir ürüne ait operasyonların küçük bir alan içerisinde ve az sayıda işçi ile gerçekleştirilmesi ile işçilerin ürünün hammaddeden nihai ürün haline kadar ilerleyişini görmeleri onlarda iş tatminini artıran bir unsurdur. Ayrıca yine işçilerin aynı hücre içinde birden fazla farklı işte çalışmaları da yapılan işi ve işyerini sahiplenme duygusunu artıran etmenlerdendir (Wemmerlöv & Hyer, 1989).

Avantajlarına rağmen başarılı bir HİS kurmak oldukça zor bir görevdir. Bir HİS uygun bir şekilde kurulmadığında bu avantajların birçoğu gerçekleştirilemeyebilir. Hatta teorik olarak sürece göre yerleşim ve ürüne göre yerleşim alternatiflerinin avantajlı yönlerini birleştirmesi planlanan bir HİS uygun bir şekilde planlanmadığında, bu alternatiflerden bile daha kötü bir performans sergileyebilir. Kaliteli bir HİS tasarımı, birçok sistem tasarım kararının doğru bir şekilde verilmesine ve tasarım varsayımlarının uygun bir şekilde yapılmasına bağlıdır. Ayrıca, bu tasarım kararlarından mümkün olduğunca çoğunun eş zamanlı olarak verilmesi de gereklidir. Bu ise, HİS tasarımı probleminin boyutunu oldukça büyütür. Örneğin tesis düzenleme problemi ele alındığında, tasarım konusu olan sadece bölümlerin tesisteki en uygun yerlerinin belirlenmesidir. Ancak bir HİS tasarımında, ürün ailelerinin ve makine hücrelerinin belirlenmesinin yanı sıra, bu hücrelerin tesis üzerindeki göreceli konumları, hücreler içindeki makinelerin konumları ve ürünlerin hangi hücrelerde işlenip hangi makineler arasında taşınacağı da belirlenmelidir. Bu kararlar birbirinden ayrı olarak ve sırayla verilebileceği gibi, hepsi veya birkaçı eş zamanlı olarak da verilebilir. İşte bu kararların bir arada verilmesi problemin zorluğunu ciddi şekilde artırsa da, Heragu (1994) ve Alfa, Chen ve Heragu (1992) tarafından da belirtildiği üzere, bu kararların eş zamanlı verilmesi optimal sonuçların elde edilebilmesi için gereklidir. Takip eden bölümde HİS tasarımını ele alan çalışmalardan bazılarına değinilecektir.

2.2. Hücresel İmalat Sistemlerinin Tasarımı

Grup teknolojisi kavramın bir ürünü olan HİS'lerin tasarımı art arda veya eş zamanlı olarak gerçekleştirilmesi gereken üç tane planlama safhasından oluşmaktadır (Jajodia, Minis, Harhalakis ve Proth, 1992):

1. Makineler ve bunlar gibi üretim kaynaklarının hangilerinin bir araya getirileceği belirlenerek, HİS hücrelerinin oluşturulması (hücre oluşturma veya hücre formasyonu)
2. HİS hücrelerinin içindeki makinelerin birbirilerine göre olan konumlarının belirlenmesi (hücre içi yerleşim)
3. HİS hücrelerinin tesisteki yerlerinin belirlenmesi (hücreler arası yerleşim)

Farklı aşamaları bulunan HİS tasarımının tek bir problem şeklinde bir tanımı olmadığı gibi, sistematik hale getirilmiş tek bir çözüm yöntemi de bulunmamaktadır. Literatürde HİS tasarımına yönelik çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalar HİS tasarımının farklı

boyutlarını, farklı kısıtlarla ele almışlar ve çok farklı çözüm yöntemleri önermişlerdir. Bu kısımda genel olarak HİS tasarımını ele alan çalışmalara değinileceklerdir.

HİS tasarımının yukarıda verilen tasarım safhalarından birincisi olan hücre oluşturma, HİS tasarımı literatüründe en çok ele alınan konudur. Bu konu Saxena ve Jain (2011) tarafından HİS tasarımının en önemli safhası olarak ifade edilmiştir. Özet olarak makinelerin, üretilecek olan ürünlerin çeşitli özellikleri göz önünde bulundurularak, ortak özelliklere ve ihtiyaçlara sahip ürünleri işleyecek şekilde gruplandırılmalarıdır. Selim, Askin ve Vakharia (1998) bu konuda derin bir inceleme yaparak literatürdeki yöntemleri kıyaslamışlardır. Bu yazarların da belirttiği gibi, bu konuda yapılan ilk çalışmalar, makine-ürün çakışıklık matrisi (incidence matrix) adı verilen, hangi ürünün hangi makineye gereksinim duyduğunu gösteren bir matris kullanmıştır. Hücre oluşturma kararlarını bu matrisi kullanarak yapan çalışmalar arasında King (1980), Chan ve Milner (1982) ile King ve Nakornchai (1982) sayılabilir. Ancak tam birbirinden bağımsız hücreler oluşturulamadığı ve çakışıklık matrisi gösteriminin ürünlerin operasyon sıraları gibi bazı özellikleri ihmal ettiğinden, hücreler arası akışların hacmi tam olarak hesaplanamamaktaydı. Buna ek olarak, hücre boyutu gibi bazı kısıtlar da çakışıklık matrisini kullanan yaklaşımlarda kullanılamadığından, farklı yaklaşımlara yönelimler olmuştur. Askin ve Subramaniam (1987) ile Shafer ve Rogers (1991) matematiksel programlama yaklaşımını önermişlerdir. Ancak bu yaklaşımlar da problem boyutu büyüdükçe, hesaplama yükü açısından uygulanamaz hale geldiğinden farklı yaklaşımlar aranmıştır. NP-zor sınıfında yer alan hücre oluşturma probleminin çözümü için meta-sezgisel yaklaşımlar kullanılmıştır. Harhalakis, Nagi ve Proth (1990) ve Boctor (1991) Tavlama Benzetimi (TB), Onwubolu ve Songore (2000) Tabu Arama (TA),Venugopal ve Narendran (1992), Zhao ve Wu (2000), Onwubolu ve Mutingi (2001) Genetik Algoritma (GA) yöntemlerini kullanmışlardır. Hücre oluşturma probleminin NP-zor sınıfında yer alması ve problemin sürekli yeni kısıtlar ve özellikler ile zenginleştirilmesinden dolayı, problemin çözümü için GA, TA, TB ve benzeri meta-sezgisel algoritmaların kullanımı yaygınlaşmıştır.

HİS tasarımının diğer safhaları olan hücre içi ve hücreler arası yerleşim ile ilgili yapılmış çalışmalar da bulunmaktadır. Bu çalışmalar genel olarak HİS tasarımının yerleşim ile ilgili safhalarını tesis düzenlemesi yaklaşımlarından da faydalanarak çözebilmektedirler. Ayrıca bu çalışmalar hücre içi ve hücreler arası yerleşimi ayrı ayrı ele aldıkları gibi bir arada da

alabilmektedirler. Örneğin, bazı çalışmalar hücre oluşturma kararlarının önceden bilindiği varsayımıyla ve hücre oluşturma kararlarının bir parametre olarak kullanıldığı problemlere çözüm üretmişlerdir. Bu çalışmalardan bazıları şunlardır. Jajodia ve diğerleri (1992) hücre içi ve hücreler arası yerleşim problemlerini çözmek için tavlama benzetimi temelli bir yaklaşım önermişlerdir. Das (1993) tesisteki makine hücrelerinin yerlerini belirlemek için tam sayılı matematiksel modelli bir yaklaşım önermiştir. Önerdiği yaklaşım, dört aşamalı bir sezgisel yöntemden oluşmaktadır. Bazargan-Lari ve Kaebernick (1996) doğrusal olmayan amaç programlama yaklaşımını kullanarak, hücre içi ve hücreler arası yerleşim kararlarını birleştirmişlerdir. Daha sonra ele aldıkları problemi TB ile çözmüşlerdir. Won (1997) ise geri yönlü akışları en aza indirgeyen optimal makine sıralamasını bulmak için bir doğrusal programlama modeli ve bir çözüm yöntemi önermiştir. Wang, Lin ve Wu (1998) hücre içi ve hücreler arası yerleşim problemlerini eş zamanlı olarak çözmüşlerdir. Çalışmalarında problemi tanımlayan bir matematiksel model ile birlikte bir TB algoritması da önermişlerdir.

Ho ve Moodie (2000) hücreler arası yerleşimin belirlenmesi için melez bir algoritma önermişlerdir. Geliştirdikleri yaklaşım bir arama algoritması ile farklı doğrusal programlama (DP) modellerini birleştirmektedir. Algoritma hücrelerin yerleşimi ve ürün rotalarını bir arada tespit etmektedir. Ancak bu çalışmada da yazarlar, hücre oluşturma kararlarının verildiğini ve önceden bilindiğini varsaymışlardır. Salum (2000) ise iki aşamalı bir yaklaşım ile hücre yerleşimini tespit etmeyi ve böylece ürün teslim zamanlarını kısaltmayı hedeflemiştir. Bu yaklaşım birinci aşamada, ürünlerin bekleme zamanlarını tespit edip makineler arasındaki ürün akışlarını belirlemektedir. İkinci aşamada ise, birinci aşamada belirlenen makinelerin benzerlik ölçekleri kullanılarak, birbirileri arasında yüksek benzerlik ölçeği bulunan makineler bir araya yerleştirilmek suretiyle makinelerin yerleşimi tespit edilmektedir.

Lee ve Chiang, (2001) makine hücrelerinin iki yönlü doğrusal akışlı bir yerleşimde nasıl yerleşeceklerinin tespiti için, üç aşamalı bir yaklaşım önermişlerdir. Hücreler arası akışların sayısını en aza indirgemeyi amaçlayan çalışmaların aksine bu çalışmada yazarlar, hücreler arası taşımaların maliyetini düşürmeye çalışmışlardır. Chiang ve Lee (2004a) farklı bir çalışmalarında ise, önceki çalışmalarında ortaya koydukları problemi, GA ve optimal bölme (optimal partition) yaklaşımı adı verilen bir yaklaşımla çözmüşlerdir. Bu yaklaşıma göre doğrusal yerleşime sahip makine sıralarından oluşan çözüm popülasyonu

GA'ya has işlemlerle belirlenirken, dinamik programlama yaklaşımı ile de, her bir makine sırasının birbirinden bağımsız makine hücreleri oluşturacak şekilde nereden bölüneceğine karar verilmiştir. Böylece hücreler arası akışın maliyetini en aza indirgemeye çalışmışlardır. Yine aynı yazarlar (Chiang ve Lee, 2004b) aynı problemi bir kez de, TB ile dinamik programlamayı birleştirerek oluşturdukları bir metot ile çözmüşlerdir. Yazarlar bahsedilen üç çalışmalarında da hücre oluşturma ve hücreler arası yerleşim konusunu ele almışlardır

Wang ve Sarker (2002) ise hücreler arası taşımaların en aza indirgenmesi için, hücreler arası yerleşim problemini ele almışlardır. Problemi karesel atama problemi olarak modellemişler ve geliştirdikleri üç-çift kıyaslama sezgiseli ile çözmüşlerdir. Chaieb ve Korbaa (2003) hücre içi yerleşim probleminde, hücre içindeki makinelerin doğrusal veya dairesel olarak yerleştirilmesi hususuna değinmişlerdir. Problem, bir hücredeki makinelerin konumlarının, üretim süreçlerine en uygun şekilde ve taşıma zamanlarını en aza indirgeyecek şekilde belirlenmesidir. Hücre içi makine konumlarının belirlenmesi için birerleme yöntemini kullanmışlardır. Ancak yazarların da belirttiği üzere, bu yöntemin kabul edilebilir zamanda sonuçlar üretebilmesi, hücre oluşturma işleminin daha önceden gerçekleştirildiği ve her bir hücre içinde az sayıda makine olduğu durumlarda geçerlidir. Solimanpur, Vrat ve Shankar (2004), hücreler arası yerleşim problemini ele almışlar ve problemi karesel atama problemi olarak modellemiştir. Yazarlar problemin çözümü için karınca kolonisi algoritması kullanmışlardır. Ayrıca geliştirdikleri algoritmayı, tesis düzenlemesinde kullanılan algoritmalar ile kıyaslamışlardır. Buna göre geliştirdikleri algoritmanın karesel atama problemi olarak modellenen tesis düzenleme probleminin çözümü için önerilen farklı algoritmalara göre daha iyi çözümler ürettiğini göstermişlerdir. Kulkarni ve Shanker (2007) önerdikleri iki aşamalı yaklaşımda, iki karesel atama problemini art arda çözerek, bir HİS tasarımında hem hücreler içi hem de hücreler arası yerleşim problemini çözmüşlerdir. Sonra problemin çözümü için GA'dan faydalanmışlardır. (Tavakkoli-Moghaddam, Javadian, Javadi ve Safaei, 2007a) hücre oluşturma kararının önceden verildiğini kabul ettikleri çalışmalarında hücre içi ve hücreler arası taşımların maliyetlerinin minimizasyonu ile ilgilenmişlerdir. Chang, Wu ve Wu (2013) hem hücre oluşturma, hem hücre içi hem de hücreler arası yerleşimin belirlenmesi için iki aşamalı bir matematiksel model ve iki aşamalı Tabu arama algoritması tabanlı bir meta-sezgisel önermişlerdir. Yazarlar yaptıkları çalışmada, bu kararları art arta veren bir çözüm yaklaşımı izlemişlerdir.

Bu noktaya kadar HİS tasarımında hücre oluşturma ve yerleşim kararlarını (hücre içi yerleşim ve hücreler arası yerleşim) tek tek veya sıralı olarak ele alan yaklaşımlardan bazıları irdelenmiştir. Bu yaklaşımlarda kararların bir tanesi ya da birkaçını ele aldıkları görülmüştür. Ancak bu kararları bir arada veren çalışmalar da en az diğerleri kadar önem arz etmektedir. Zira bu üç tasarım kararının bir arada verilmesi optimal çözümlere erişebilmek için gereklidir (Alfa ve diğerleri., 1992; Heragu 1994). Yakın zamanda bu kararların bir arada verildiği çalışmalar önem kazanmış ve bu tipte çalışmaların sayısı artmıştır. Aktürk ve Türkcan (2000) çalışmalarında, hücreler arası yerleşim problemi ile birlikte hücre oluşturma problemlerini birlikte ele alıp eş zamanlı olarak bu problemleri çözen bir yaklaşım önermişlerdir. Problemi ifade eden bir karışık tamsayılı model geliştirmişler ve modelde hücre boyutu, kullanım oranı ve kar seviyesi ile ilgili kısıtları ele almışlardır. Yazarların geliştirdikleri model, birçok tasarım özelliğini bir arada ele aldığından başarılı tasarımlar yapabilmiştir. Tasarımda ele aldıkları özelliklerden bazıları üretim hacimleri, işlem süreleri, ürün işlem sıraları ve alternatif işlem rotalarıdır. Wu, Chu, Wang ve Yan (2006, 2007) HİS'in yerleşim düzeni ve hücre oluşturma kararlarının bir arada verilmesinin önemine değinip bu kararları bir arada veren matematiksel modeller ve GA tabanlı çözüm yaklaşımları önermişlerdir. Kia ve diğerleri (2012) çok sıralı yerleşimde ele aldıkları hücre yerleşimi ve hücre oluşturma probleminde, ürün akışları ve rotaları ile ilgili maliyetlerin yanı sıra birçok makine ile ilişkili maliyeti de göz önünde bulundurmuşlardır. Mahdavi, Teymourian, Baher ve Kayvanfar (2013) ele aldıkları HİS tasarım probleminde hücre oluşturma ve yerleşim kararları verilirken, hücre içi tersine ve ileri akışları, hücreler arası taşımaların yapıldığı mesafeleri ve istisnai ürünleri en aza indirgemeye çalışılmıştır.

2.3. Tesis Düzenlemesi ve Hücresel İmalat Sistemi Tasarımında Dinamik Yaklaşım

HİS tasarımı ve tesis düzenlemesinde dinamiklik ifade eden şartlar, dönemsel olarak değişen talepler veya ürün akışları ile birlikte sistemdeki bölümlerin, makinelerin veya hücrelerin yeniden düzenlemelerini içermektedir. Bu çalışmalar aşağıda verilen alt bölümlerde incelenmiştir.

2.3.1. Dinamik tesis düzenlemesi problemi ile ilgili çalışmalar

Tesis düzenlemesi, tesis içerisinde düzgün bir iş akışı elde etmek için, bölümler ve makineler gibi üretim kaynaklarının düzenlenmesidir. Tesis düzenlemesi kararları çok yüksek maliyetli kararlardır ve alınan kararlar tasarımı yapılan üretim sistemlerinin performansını uzun dönemler boyunca etkiler. İyi bir tesis düzenlemesinde malzemelerin taşıma mesafelerinin veya taşımalarla ilgili maliyetlerin en aza indirgenmesi istenir. Ancak tesis düzenlemesinin en önemli tasarım parametrelerinden olan, bölümler arası malzeme akışlarını belirleyen akış matrisleri, dönemsel olarak değişiklik gösterebilir. Bu değişimler ürün tasarımındaki değişiklikler, bazı ürünlerin üretiminin sonlandırılması ve yeni ürünlerin üretilmeye başlanması gibi sebeplerden kaynaklanabilir. Bu sebepten tesis düzenlemesinde faydalanılan bir diğer yaklaşım da planlama döneminin, ara düzenlemelerin yapılabildiği daha kısa ara dönemlere bölünmesidir. Bu yaklaşım dinamik yaklaşım olarak da adlandırılır. Bu yaklaşımda temel olarak taşıma maliyetleri ile birlikte, tesisteki üretim kaynaklarının yeniden düzenlenmesi faaliyetlerinin maliyetlerinin düşürülmesi hedeflenir. Bu probleme Dinamik Tesis Düzenlemesi problemi (DTDP) adı verilir.

DTDP, tesis düzenlemesi literatürünün geniş yer kaplayan bir alt dalıdır. DTDP ilk kez Rosenblatt (1986) tarafından önerilmiştir. Yazar bu çalışmasında DTDP'nin çözümü için dinamik programlama tabanlı bir çözüm prosedürü önermiştir. Çalışma DTDP'nin önerildiği ilk çalışma olması bakımından önemlidir. Yazarın önerdiği çözüm yaklaşımı küçük problemler için tüm senaryoları kullanırken büyük problemler için sınırlandırılmış sayıdaki iyi düzenlemelerin kullanılmasını önermiştir. Ancak yazar çalışmasında bu iyi düzenlemelerin nasıl bulunacağı ile ilgili net bir öneride bulunmamıştır. Urban (1993) CRAFT sezgisel yöntemine benzer bir sezgisel yöntem geliştirerek, DTDP'ye çözüm aramıştır. Lacksonen ve Enscore (1993) literatürdeki beş farklı sezgiseli DTDP'ye uyarlamışlardır.

DTDP için tesis düzenleme üzerine geliştirilmiş sezgisellerin uyarlanmasının ardından, meta-sezgisel yaklaşımların kullanımı yaygınlık kazanmaya başlamıştır. 1994'te yaptıkları çalışmalarında Conway ve Venkataramanan, bir meta-sezgisel algoritma olan Genetik Algoritmanın (GA) DTDP'nin çözümü için uygulanabilirliğini incelemişler ve iki adet test problemi için buldukları sonuçları raporlamışlardır. Kaku ve Mazzola (1997) Tabu Arama

(TA) meta-sezgiselini DTDP'ye uygulamışlardır. TA'nın DTDP'ye uygulanması neticesinde mevcut olan test problemlerinin üçte biri için daha iyi çözümler üretmeyi başarmışlardır. Balakrishnan ve Cheng (2000) de GA'yı DTDP'nin çözümünde kullanmışlardır. Ancak yazarlar özellikle GA'nın arama operatörleri olan çaprazlama ve mutasyon ile yeni nesillerin üretim stratejilerinde değişikliğe gitmişlerdir. Balakrishnan, Cheng ve Conway (2000), Urban (1993) tarafından önerilen sezgiseli daha da geliştirerek iki farklı yaklaşım sunmuşlardır. Baykasoğlu ve Gindy (2001) Tavlama Benzetimi (TB) sezgiselini ilk kez DTDP'ye uygulamışlardır. Balakrishnan, Cheng, Conway ve Lau (2003), bir önceki GA kullandıkları çalışmalarını geliştirerek yine GA tabanlı hibrit bir yöntem ile DTDP'ye çözüm aramışlardır. Erel, Ghosh ve Simon (2003), DTDP çözümü için üç aşamalı bir yaklaşım önermişlerdir. Birinci aşamada T adet dönem, bir ağırlıklandırma şeması kullanılarak ağırlıklandırılır ve birleşik akış verileri kullanılarak elde edilen statik tesis düzenlemesi problemleri çözülür. İkinci aşamada DTDP'ye çözümler bulmak için dinamik programlama ve ilk aşamada bulunan çözümler kullanılır. Üçüncü aşamada ise ikinci aşamada bulunan çözümler rasgele sezgisel bir yöntem kullanılarak iyileştirilmeye çalışılır. McKendall ve Shang (2006) melez karınca sistemi adı verilen bir metodu ilk kez DTDP'ye uygulamışlardır. Önerilen sezgisel üç farklı şekilde uygulanmış ve önerilen yaklaşımların literatürden alınan farklı test problemleri üzerinde güzel sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Daha sonra McKendall, Shang ve Kuppusamy (2006), TB'yi kullanan iki farklı yaklaşım önermişlerdir. Birinci yaklaşım TB'nin DTDP'ye doğrudan uygulanması iken, ikinci yaklaşım ise bir önceki yaklaşımdaki TB algoritmasına ileri bak/geri bak stratejisinin eklenmiş halidir. Rodriguez, MacPhee, Bonham ve Bhavsar (2006), TA ve GA meta-sezgisellerini temel alan melez bir çözüm algoritması önermişlerdir. Bu yaklaşıma göre GA'daki çaprazlama işlemi sonrası üretilen her bir çocuk TA süreçleri ile iyileştirilir. Yazarlar elde ettikleri sonuçları dinamik programlama, GA ve diğer GA temelli melez algoritmalarla elde edilen sonuçlarla da kıyaslamışlardır. Balakrishnan ve Cheng (2009) DTDP'yi dönen planlama ufku (rolling horizon) adı verilen kavram ile genişletmişlerdir. DTDP'de çok dönemli plan ilk dönem başında bir kez düzenlenirken, dönen planlama ufkunda bundan farklı olarak ilk dönem sonunda ilk döneme ait bilgiler çıkarılıp planlama ufkunun en sonuna bir dönem daha eklenir. Bu bilgiler ışığında yapılan planlama yeniden hesaplanmaktadır.

Şahin ve Türkbey (2009) TB ve TA yaklaşımlarının melezlenmesi ile yeni bir çözüm metodu sunmuşlardır. Bu yaklaşım TB'yi temel almakla beraber aynı çözümlerin yeniden ziyaretini kısıtlayarak çözüm süresini azaltmak için TA yaklaşımındaki gibi tabu listeleri kullanmaktadır. Yazarlar geliştirdikleri algoritmanın performansını TB ve TA algoritmaları ile ayrı ayrı kıyaslamak suretiyle test etmişlerdir. Şahin, Ertoğral ve Türkbey (2010) ise tesis düzenlemesi problemine bir bütçe kısıtı ekleyerek genişlettikleri DTDP'nin TB meta-sezgiseli yardımıyla çözülmesini önermişlerdir. Şahin (2011) ise DTDP'yi niteliksel ve niceliksel olarak iki amacın var olduğu bir problem olarak sunmuştur. Niteliksel olarak tesislerin yakınlık değeri, niceliksel olarak ise de malzeme taşıma maliyetlerini ele almıştır. Çok amaçlı optimizasyon modeli oluşturan yazar bu çalışmasında TB algoritmasını kullanmıştır. McKendall ve Liu (2012) çalışmalarında üç farklı TA yaklaşımını sunmuşlardır. Bunlardan birincisi TA'nın doğrudan uygulanması, ikincisi ise farklı çeşitlendirme (diversification) ve yoğunlaştırma (intensification) stratejilerini barındırmaktadır. Üçüncü yöntem ise kabul edilebilecek belli sayıdaki en iyi hareketten bir tanesinin rasgele seçilmesini içermektedir.

DTDP'de tüm tesisleri eşit boyutlu kabul eden yaklaşımların dışında, Dunker, Radons, ve Westkämper (2005) tarafından eşit olmayan alanlı DTDP'nin çözümünü önermişlerdir. Bu çalışmada yazarlar GA ve dinamik programlama tekniklerini bir arada kullanmak suretiyle eşit olmayan alanlı DTDP'ye çözüm aramışlardır. McKendall ve Hakobyan (2010) ise eşit olmayan boyutlu DTDP'yi sınır araştırma tekniği ile başlangıç çözümü üretip bulunan başlangıç sonucunu TA yaklaşımı ile iyileştirmesine dayanan bir metot önermişlerdir.

2.3.2. Dinamik hücresel imalat sistemi tasarımı problemi ile ilgili çalışmalar

Rheault, Drolet, ve Abdulnour (1995) hücre oluşturma probleminin dinamik olarak ele alınabileceğini ilk kez ortaya koymuş ve çalışmalarında Dinamik Hücresel İmalat Sistemi (DHİS) tasarımını ele almışlardır. Yazarlar bunun için beş aşamalı bir tasarım kavramını ortaya atmışlardır. Schaller, Erengüç ve Vakharia (1998) ise talebin değişken olduğu ortamlarda, envanter planlama kararlarının hücre oluşturma kararları ile nasıl bir araya getirilebileceğini incelemişlerdir. Yazarlar geliştirdikleri modellerinde, elde edilecek kararlardan bir tanesini hücre oluşturma kararı olarak belirlemişlerdir. Ayrıca ele aldıkları problemin karmaşıklığından ötürü, farklı alt sınır metotlarının etkinliğini de

incelemişlerdir. Wicks ve Reasor (1999) ise çalışmalarında, HİS'lerin etkinliğinin talepteki dalgalanmalara ve değişikliklere karşı hassas olduğuna dikkat çekmişlerdir. Yazarlar ortaya koydukları DHİS modelinde, ele alınması gereken üç amacın varlığına dikkat çekmişlerdir. Yazarlara göre bu amaçlar, hücreler arası akışların, mükerrer makinelerin ve hücre yeniden düzenlemelerinin en küçüklenmesidir. Ortaya koyulan problemin çözümü için GA'dan faydalanmışlardır.

DHİS tasarımında kapsamlı ilk çalışmalardan birini Mungwattana (2000) gerçekleştirmiştir. Çalışmasında ürün rotalarının esnekliğini de içeren bir matematiksel model geliştirmiştir. Problemi çözmek için bir TB yaklaşımı önermiş ve kabul edilebilir zamanda kaliteli çözümler üretebilmiştir. Wang, Wu ve Liu (2001), bir DHİS tasarımında yerleşim problemini ele almış ve problemde ürün talebinin ürün yaşam döngüsüne bağlı olarak zamanla değiştiğini varsaymışlardır. Geliştirdikleri problemin çözümü için TB meta-sezgiselinden yararlanmışlardır. Toplam hücre içi ve hücrelerarası malzeme taşıma maliyetinin en aza indirgenmesini problemin amacı olarak belirlemişlerdir. Ancak hücre oluşturma kararlarının, problem çözülmeye başlamadan önce verildiğinin ve makine hücrelerinin önceden bilindiği varsayımına dayalı olarak, sadece yerleşim probleminin çözümünü araştırmışlardır.

Chen ve Cao (2004) üretim planlama ve HİS tasarımı kararlarını entegre ederek, hücreler arası taşıma maliyetleri, üretim hücrelerinin kurma maliyeti, stok tutma maliyeti, ürün işleme maliyeti ve sistemin farklı dönemlerde farklı parçalar üretmesi için gerekli olan hazırlık maliyetlerinin toplamından oluşan bir amaç değerini en aza indirgemek olan bir matematiksel model sunmuşlardır. Aynı yazarlar takip eden başka bir çalışmalarında ise (Cao ve Chen, 2005), hücre oluşturma ve hücrelere makine atama kararlarını entegre etmek suretiyle, sağlam (robust) bir HİS tasarımı elde etmeyi hedeflemişlerdir. Çalışmalarında makine maliyetlerinin ve beklenen hücreler arası taşıma maliyetlerinin düşürülmesini hedeflemişlerdir. Bir hücrenin oluşturulup oluşturulmaması kararının da verildiği çalışmalarında, probleme iki aşamalı Tabu Arama (TA) temelli bir yaklaşım ile çözüm aramışlardır.

Tavakkoli-Moghaddam, Aryanezhad, Safaei ve Azaron (2005a) hücreler arasındaki ürün taşımalarının yığınlar halinde gerçekleştirilmesi hususunu bir varsayım ile modellerine eklemek suretiyle, hücre oluşturma problemini incelemişlerdir. Ayrıca, alternatif işlem

rotaları, ürün işlem sıraları, makine kapasiteleri ve mükerrer makineler gibi önemli tasarım özelliklerini de çalışmalarında ele aldıkları probleme dahil etmişlerdir. Problemde makinelerin sabit ve iş yüküne bağlı maliyetleri ile hücreler arası taşımaların ve yeniden düzenleme maliyetlerinin en küçüklenmesi amaç olarak belirlenmiştir. Problemin zorluğundan ötürü, TB, GA ve TA olmak üzere üç meta-sezgisel algoritma ile probleme çözüm önermişlerdir. Yazarlar yaptıkları bu çalışma sonucunda, bu üç algoritma arasından TB'yi optimale yakın çözümler bulma hususunda daha başarılı bulmuşlardır. Tavakkoli-Moghaddam, Javadian, Javadi, ve Safaei (2005b) optimal hücre sayısının belirlenmesini hedefleyen çalışmalarında, makine amortisman ve yer değiştirme maliyetleri ile hücreler arası taşımaları en küçüklemeye çalışmışlardır. Bu çalışmada da bir önceki çalışma olduğu gibi, alternatif işlem rotaları, ürün işlem sıraları, makine kapasiteleri, mükerrer makineler ve yığın taşımalar göz önünde bulundurulmuştur. Problemin çözümü için, memetik algoritma ve TB temelli bir yaklaşım önermişlerdir. Önerilen yaklaşımın performansını ölçmek için, aynı problemleri Lingo optimizasyon yazılımıyla da çözmüşler ve elde ettikleri çözümleri karşılaştırmışlardır.

Defersha ve Chen (2006a) hücre yeniden düzenleme, alternatif işlem rotaları, parti bölme, işlem sıraları, mükerrer makineler, makine kapasiteleri, hücreler arasında iş yükü dengelenmesi, işlem maliyetleri, fason ürettirme, hazırlık maliyetleri, hücre boyutu ve makine komşuluk kısıtları gibi özellikleri barındıran kapsamlı bir DHİS tasarımı modeli önermişlerdir. Bir sonraki çalışmalarında (Defersha ve Chen, 2006b) ise, önceki çalışmalarında geliştirdikleri probleme benzer özellikler içeren bir problemi çözmek için iki aşamalı bir GA tabanlı meta-sezgisel önermişlerdir. Böylece DHİS tasarımı ile makine hücreleri ve ürün aileleri tespit edilmektedir. GA tabanlı iki aşamalı sezgiselin birinci aşamasında, birbirinden bağımsız hücreler oluşturulurken, ikinci aşamada ise birinci aşamada bulunan çözüm kademeli olarak iyileştirilmektedir. Defersha ve Chen (2008a) çalışmalarında yine kapsamlı bir model ile dinamik hücre formasyonu hususuna eğilmiş ve parti büyüklüğünün üretim kalitesini hesaba katmışlardır. Ele aldıkları çalışma, daha önceki çalışmaların da ele aldıkları hücre yeniden düzenleme, alternatif işlem rotaları, işlem sıraları, makine kapasiteleri, hücreler arasında iş yükü dengelenmesi, hücre boyutu ve makine komşuluk kısıtları gibi özellikler de barındırmaktadır. Problemin çözümü için GA ve Doğrusal Programlama (DP) tabanlı bir meta-sezgisel önermişlerdir. Geliştirdikleri algoritma çözüm uzayının tam sayı değişkenlerle tanımlı kısmında arama yaparken, arama esnasında ziyaret edilen her bir çözüme karşılık gelen sürekli değişkenlerin değerlerini DP

yardımıyla, bir alt problemin çözülmesi neticesinde tespit etmektedir. Yazarlar bir sonraki çalışmalarında (Defersha ve Chen, 2008b) ise paralel GA yaklaşımı ile benzer bir problemi çözmek için bir yaklaşım geliştirmişlerdir.

Saidi-Mehrabad ve Safaei (2007), DHİS tasarımında hücrelerin dinamik olarak yeniden düzenlenmesini amaçlayan bir model ortaya koymuşlardır. Modelde her planlama dönemindeki hücre sayısının değişebilmesi özelliğini de dâhil edip, minimum değeri aranan amaç fonksiyonunda makine maliyetleri, makine yer değiştirme ve hücrelerarası taşıma maliyetlerini ele almıştır. Problemin çözümü için ise, bir Sinir Ağları yaklaşımı önermişlerdir. Lingo optimizasyon yazılımını kullanarak buldukları optimal sonuçlar ile sinir ağları yaklaşımı ile buldukları sonuçları karşılaştırarak çözümlerin kalitesini teyit etmişlerdir. Tavakkoli-Moghaddam, Javadian, Safaei, Vasei ve Azaron (2007b) ise yeni bir bulanık doğrusal karışık tam sayılı matematiksel model ile DHİS tasarımı konusunu incelemişlerdir. Modelde ürün taleplerinin hem çok dönemli hem de bulanık olarak ifade edildiği varsayılmış ve amaç fonksiyonuna makineler ile alakalı amortisman, işlem, yer değiştirme maliyetleri ile hücreler arası taşıma maliyetlerinin en küçüklenmesi hedeflenmiştir. Taşıma yığın boyutunu sabit olarak ele aldıkları bu problemde ayrıca, alternatif işlem planları, işlem sıraları, makine yer değiştirme, mükerrer makineler ve hücre sayısı esnekliğini de göz önüne alıp problemi GA yaklaşımı ile çözmüşlerdir. Safaei, Saidi-Mehrabad, ve Jabal-Ameli (2008a) ise, hücre içi ve hücreler arası taşımaların yığın boyutlarının ve taşıma maliyetlerinin farklı olarak düşünüldüğü bir DHİS tasarım modeli önermişlerdir. Bu yazarlar da alternatif işlem rotaları, işlem sıraları ve mükerrer makineler gibi özellikleri tasarımlarında kullanmışlardır. HİS tasarımında yerleşim hususlarını kısmen ihmal ettikleri modellerinde, makine yer değiştirme maliyetlerini sadece bir makinenin bir hücreden diğerine taşınması olarak düşünmüşlerdir. Safaei, Saidi-Mehrabad, Tavakkoli-Moghaddam ve Sassani (2008b) ise, DHİS tasarımında sadece hücre oluşturma hususunu ele alıp taleplerin yanında makine kapasitelerini de bulanık olarak ifade etmişlerdir. Çalışmalarında bulanık programlama yaklaşımından faydalanarak, problemin karışık tam sayılı matematiksel modelini çözmüşlerdir. Tavakkoli-Moghaddam, Safaei ve Sassani (2008) tam sayılı bir matematiksel model ile ifade ettikleri DHİS tasarımı yaklaşımında, sadece hücre oluşturma hususunu incelerken alternatif işlem rotalarını da hesaba katmışlardır. Modelin amaç fonksiyonunda, hücreler arası taşıma maliyetlerinin yanı sıra makine maliyetleri de düşünülmüştür. Yazarlar sundukları bu problemin çözümü için TB meta-sezgiselini önermişlerdir.

Ahkioon, Bulgak ve Bektaş (2009a) DHİS tasarımı sistemdeki hücre yeniden düzenlemesi, operasyon sırası, mükerrer makineler, makine kapasiteleri, alternatif işlem rotaları ve makine satın alma gibi özellikleri dikkate alan bir problem ortaya koymuşlardır. Yazarlar önerdikleri problem için karışık tam sayılı bir matematiksel model önermişler ve önerdikleri bu modeli CPLEX optimizasyon yazılımı ile çözmüşlerdir. Ahkioon, Bulgak ve Bektaş (2009b) sundukları doğrusal olmayan karışık tam sayılı matematiksel modelde, parti bölme hususunun yanı sıra mükerrer makineler, makine kapasiteleri, alternatif işlem rotaları ve ürün işlem sıralarını da ele almışlardır. Safaei ve Tavakkoli-Moghaddam (2009), DHİS tasarımında kullanılan birçok özellikle birlikte, çok dönemli hücre oluşturma kararları ve hücre içi taşımayı da ele almışlardır. Ayrıca fason imalat ve stok tutma maliyetlerini de modele ilave etmişlerdir. Böylece çözümlerde dış kaynak kullanımı ve üretim arasındaki en uygun ödünleşmeyi araştırmışlardır.

Aramoon-Bajestani, Rabbani, Rahimi-Vahed ve Khoshkhou (2009) DHİS tasarımında hücre oluşturma kararlarını veren, doğrusal olmayan karışık tam sayılı ve çok amaçlı matematiksel modeller sunmuşlardır. Modelde alternatif işlem planları ve makine yer değiştirme konusu da dikkate alınmıştır. Modelin amaçları, hücrelerin iş yükü farkının en küçüklenmesi yanı sıra makine, makine yer değiştirme ve hücreler arası taşıma maliyetleridir. Deljoo, Mirzapour-Al-e-hashem, Deljoo ve Aryanezhad (2010) DHİS tasarımının hücre oluşturma başlığı altında, bazı çalışmalarda yapılan hesap hatalarına dikkat çekmek suretiyle, yeni bir hücre oluşturma matematiksel modeli önermişlerdir. Önerdikleri modeli GA yardımıyla çözmüşlerdir.

Aryanezhad, Mirzapour-Al-e-hashem ve Deljoo (2009) hücre oluşturma problemini dinamik olarak ele alan ve aynı zamanda işçi atama kararlarını da veren, bir matematiksel model sunmuşlardır. Bu çalışmada sunulan matematiksel model, geleneksel DHİS çalışmalarından farklı olarak, iki farklı ana maliyet kalemi içermektedir. Bunlardan birincisi alışılmış olan üretim maliyetleri, hücreler arası taşıma maliyetleri ve makine maliyetleri gibi makine temelli maliyetlerdir. İkincisi ise, insan temelli maliyetlerdir. Yani işe alma, işten çıkarma, eğitim ve işçi ücretlerinden oluşan, doğrudan iş gücü ile alakalı maliyet kalemleridir. Mahdavi, Aalaei, Paydar ve Solimanpur (2010) çalışmalarında, Aryanezhad ve diğerlerinin (2009) çalışmasında olduğu gibi işçi ile ilgili maliyetlere de

modellerinde yer vermişlerdir. Doğrusal olmayan matematiksel modellerinde, DHİS tasarımının yeniden düzenleme özelliği ile birlikte işlem zamanları, üretim hacimleri, makine kapasiteleri, alternatif işçiler, işçi kapasiteleri, işe alma ve çıkarma ile işçi atama gibi özellikleri de hesaba katmışlardır.

Rafiee, Rabbani, Rafiei ve Rahimi-Vahed (2011) DHİS'de hücre oluşturma ve stok parti büyüklüğü için kapsamlı bir matematiksel model önermişlerdir. Ele alınan model, makine satın alma, yeniden düzenleme, hücreler arası ve hücre içi malzeme taşıma, makine işlem, fason imalat, stok, bozuk parça değiştirme maliyetleri ile alternatif işlem rotaları, makine kapasitesi, işlem sıraları, hücre kapasitesi ve makine bozulmalarını da hesaba katmaktadır. Yazarlar ele aldıkları bu problemi çözmek için Parçacık Sürüsü Optimizasyonu (PSO) sezgisel yaklaşımını kullanmışlardır. Saxena ve Jain (2011) kapsamlı bir DHİS tasarımı modeli önermişlerdir. Önerdikleri modelde daha önceki birçok modelde bulunan özelliklerin tamamına yakınını barındırmanın yanı sıra, kesici takım ihtiyacı gibi özellikleri de modellerinde kullanmışlardır. Önerdikleri problemleri Lingo yazılımı ile çözerek, bu tip problemlerde meta-sezgisel kullanımının gerekliliğine dikkat çekmişlerdir.

Kia ve diğerleri (2012), DHİS tasarımı için yeni karışık tam sayılı doğrusal olmayan bir matematiksel model önermiş ve modellerinde hücre oluşturma kararlarının yanı sıra, hücredeki makinelerin yerleşiminin nasıl olacağını da belirlemeyi hedeflemişlerdir. Modelleri alternatif işlem rotaları, işlem sıraları, işlem zamanları, ürünlerin üretim hacimleri, makine satın alma kararları ile birlikte mükerrer makineler, makine kapasiteleri, parti bölme, hücre içi ve hücreler arası yerleşim, makinelerin çok sıra yerleşimi ve makine yer değiştirme özelliklerini içermektedir. Ayrıca bu modelde, her bir ürünün her dönemde işleneceği makineler, makinelerin kesin konumları ve hücreleri oluşturan makineler ile birlikte belirlenebilmektedir. Çok sıra yerleşim planı sayesinde, hücrelerin şekillerinin esnek bir şekilde belirlenebilmesi sağlanırken, böylece makinelerin yer değiştirme maliyetleri de daha isabetli olarak belirlenebilmektedir. Makinelerin konumları bilindiği için, hücreler arası ve hücre içi taşımaların maliyetleri hesaplanırken, konumlar arası mesafe dikkate alınarak bu maliyetler doğru bir şekilde hesaplanabilmektedir. Aynı zamanda yazarların sunduğu model, birçok model tarafından ihmal edilebilen aynı hücre içindeki aynı tipten iki makine arasındaki taşımaları da hesaba katmaktadır. Yazarlar geliştirdikleri bu kapsamlı DHİS tasarımı modelini, TB temelli bir sezgisel yöntem ile çözmüşlerdir.

Bu tez çalışmasının DHİS tasarımı bölümü, Kia ve diğerlerinin (2012) çalışmalarında ele aldıkları model üzerine inşa edilmiş ve yazarların kullandıkları varsayımların birçoğu modelde ele alınmıştır. Ayrıca ele alınan kavramsal modelin benzerliği sayesinde, Kia ve diğerlerinin (2012) sunduğu test problemleri de doğrudan kullanılabilmiştir. Bu bakımdan bu çalışma tez çalışması için önem arz etmektedir.

2.4. Tesis Düzenlemesi ve Hücresel İmalat Sistemi Tasarımında Stokastik Yaklaşım

Bir üretim sistemi tasarlanırken, sistemdeki belirsizlikler ve öngörülemez değişiklikler de hesaba katılmalıdır. Belirsizlikler hesaba katılmadığında, tasarlandığı şartlar içinde en iyi şekilde planlanmış bir üretim sisteminin performansında bile, zaman içerisinde düşüşler yaşanabilir. Bu performans düşüşleri üretim kalitesinde ve çıktı hacminde gerileme, maliyetlerde artış ve hatta tüm sistemin tamamen durması şeklinde karşılaşılabilir. Bu sebeplerden ötürü, HİS tasarımı ve tesis düzenlemesi ile ilgili çalışmalarda bu belirsizlik hususuna değinilmiştir. Aşağıdaki başlıklarda literatürde tesis düzenlemesi ve HİS tasarımını stokastik şartlar altında inceleyen çalışmalara yer verilmiştir.

2.4.1. Stokastik tesis düzenlemesi problemi ile ilgili çalışmalar

Stokastik tesis düzenlemesi probleminde ürün talepleri ve bunun neticesi olan bölümler arası ürün akışlarının, deterministik olarak değil stokastik olarak bilindiği varsayılır. Deterministik tesis düzenlemesi probleminde genelde, taşıma maliyetleri veya taşıma mesafelerinin en küçüklenmesi amaç olarak alınmışken, stokastik tesis düzenlemesi probleminde amaç, planlaması yapılan tesisin farklı senaryo şartları altında iyi sonuçlar üretebiliyor olmasına dayalıdır. Böyle çözümlere stotastik tesis düzenlemesinde sağlam (robust) çözümler adı verilir.

Shore ve Tompkins (1980) belirsizlik altında tesis düzenlemesini ele alan ilk çalışma olarak nitelendirilmiştir. Çalışmalarının amacı, güncel ve gelecekteki ürün taleplerine yanıt verebilen yerleşim düzenleri oluşturmaktır. Yazarlar bu şekilde yerleşim düzenleri oluşturabilmek için sistematik bir yaklaşım önermişlerdir. Gupta (1986) çalışmasında bölümler arası akışları deterministik olarak almak yerine, bu akışları Monte Carlo benzetimi yardımıyla belirlemiştir. Her bir bölüm çifti arasındaki akışın, bir diğerinden bağımsız ve parametreleri bilinen bir normal dağılıma uyduğu farz edilmiştir. CRAFT

sezgiseli kullanılarak, her bir rasgele senaryo için bir yerleşim düzeni üretilmiş ve her bir yerleşimde de bölümler arası mesafeler hesaplanıp kaydedilmiştir. Benzetim neticesinde her bir bölüm çifti arasındaki ortalama mesafe bulunmuştur. Daha sonra elde edilen tüm yerleşim düzenleri arasında, ortalama mesafelere göre en az farklı yerleşim en iyi çözüm olarak önerilmiştir. Rosenblatt ve Lee (1987) stokastik tesis düzenlemesi ile ilgili ilk çalışmalardan birini yapmışlardır. Yazarlar tek planlama dönemi için stokastik talep altında sağlam yerleşim aramışlardır. Bunun için bir örnek olması açısından, dört tane tesis için oluşabilecek 12 farklı yerleşim alternatifi belirlemişler ve ele aldıkları örnekte üç ürün türü olduğunu varsaymışlardır. Ardından her ürün talebi için eşit olasılıklarla gerçekleşebilecek üç (düşük, orta ve yüksek) seviye seçmiş ve bu seviyeler neticesinde oluşabilecek toplam 27 farklı senaryo belirlemişlerdir. Daha sonra düzenleme alternatiflerinin her bir senaryodaki maliyetlerini hesaplayıp beklenen maliyet, minimax pişmanlık ve optimal olma sayısını bulmuşlar ve her bir amaç altında en iyi çözümü üreten yerleşim düzenini belirlemişlerdir. Yazarlar burada farklı senaryolar altında, optimal olma veya optimale belli bir yakınlık içerisinde bulunma şartını sağlayan yerleşim alternatiflerini, sağlam olarak nitelemişlerdir. Yazarların ortaya koydukları bu yöntem, oluşması muhtemel durumların ayrık senaryolar şeklinde ifade edilebildiği ve çözüm alternatifi sayısının az olduğu durumlarda oldukça uygun bir yöntemdir. Ancak birçok şart altında bu yöntemin uygulanması mümkün değildir. Yine de tesis düzenlemesinde stokastikliği ele alan ilk çalışma olması açısından birçok çalışmaya yol gösterici olmuştur.

Kouvelis ve Kiran (1991) ise sağlamlıktan ziyade, optimal olma durumunu incelemişlerdir. Hem tek dönemli hem de çok dönemli tasarım şartları altında, inceledikleri tesis düzenlemelerinin birbirinden farklı ayrık ürün karışımı senaryoları altında, nasıl davrandığını inceleyen bir yaklaşım önermişlerdir. Her bir üretim senaryosuna bir olasılık değeri atadıkları çalışmalarında, karesel atama formülasyonunu kullanarak verimli alternatif yerleşim düzenlerini bulmuşlardır. Aynı problemin çok dönemli hali için ise, dinamik programlamadan yararlanmışlardır. Kouvelis, Kurawarwala, ve Gutierrez (1992) tesis tasarımında sağlamlığın, talebin belirsiz olduğu ortamlarda önemli olduğuna dikkat çekmişlerdir. Sağlam bir yerleşim planını, gerçekleşmesi olası talep senaryolarının birçoğunda, optimal olmasa bile optimale yakın kalitede planlar olarak tanımlamışlardır. Yazarlar talebin belirsiz olarak ele alındığı, hem tek dönemli hem de çok dönemli tasarım ortamlarında, sağlam çözümler üretmek üzere algoritmalar önermişlerdir. Karesel atama formülasyonunu kullandıkları bu algoritmalarda, tek dönem ve çok dönem için sağlam

yerleşimler bulmak üzere sistematik bir yol önererek, literatüre katkıda bulunmuşlardır. Bu tek dönemli problemde, karesel atama formülasyonunu, Dal-Sınır için uyarlamak suretiyle tüm talep senaryoları için optimal çözüme müsaade edilen, belirli bir uzaklığa kadar aralıklarda sağlam yerleşimler bulan bir yaklaşımdır. Çok dönemli durumda ise, eklenen yer değiştirme maliyetlerinden ötürü problem daha da karmaşıklaşmıştır. Bunun için, orta boyutlu problemlere kadar başarılı sonuçlar veren bir sistematik yaklaşım önermişlerdir. Ayrıca yazarlar, problemin çok dönemli halinde yer değiştirilmesi zor bölümleri de hesaba katmışlar ve bu tip bölümlere "anıt" (monument) adını vermişlerdir.

Savsar (1991), STDP'de farklı yerleşimler geliştirmek ve bunları değerlendirmek için bir benzetim algoritması önermiştir. Ele aldığı özellikler ve probleme yaklaşımı açısından, Gupta'nın (1986) çalışmasına benzeyen bu yaklaşımda, benzetim, rassal akışlar üretmek, yakınlık derecelerinin tespit edilmesi ve gelecekteki olası değişimlerin maliyetlerinin tahmin edilmesi için kullanılır. Rosenblatt ve Kropp (1992) tek dönemli stokastik tesis düzenlemesi problemini incelemişlerdir. Ele aldıkları problemde, her birinin gerçekleşme ihtimali bir olasılık değeri ile ifade edilen ayrık senaryolar olduğunu varsaymışlardır. Çalışmalarında beklenen taşıma maliyetlerinin en küçüklenmesi için, bu ayrık senaryolarla ifade edilen akış matrislerinin, olasılıklarının da hesaba katılarak, birleştirilmiş halinin çözülmesiyle elde edilebileceğini ifade etmişlerdir. Ardından geliştirdikleri yaklaşımın kalitesini, önerdikleri bir benzetim süreci ile de test etmişlerdir. Palekar, Batta, Bosch ve Elhence (1992) ise, ilk kez stokastik DTDP'yi ele almışlardır. Problemi, karesel tam sayılı programlama olarak modellemişlerdir. Ürün talepleri "iyimser", "kötümser" ve "en olası" olacak şekilde üç seviye ile belirtilmiş ve her bir seviye için de birer olasılık değeri tanımlanmıştır. Her dönemde, bölümler arası akış matrisinin olasılıkları belirlenir. Bir dönemden diğerine geçişler ise, Markov zinciri olarak modellenmiştir. Çözüm yaklaşımı olarak da, dinamik programlamadan faydalanmışlardır.

Montreuil, Venkatadri ve Ratliff (1993) çok değişken ortamlarda kurulması planlanan sistemler için, holografik yerleşimler kavramını ortaya atmışlardır. Buna göre bir holonik yerleşim, her bir makine tipinden makinelerin tesiste dağıtılabileceği fikrine dayanıyordu. Buna benzer bir fikri ise Benjaafar ve Sheikhzadeh (2000) stokastik tesis düzenlemesi problemine uygulamışlardır. Yazarların önerdiği yaklaşıma göre, aynı bölümlerin tesis üzerinde birden fazla kopyalarının kurulmasına müsaade ediliyordu. Yazarlar bu kavramı stokastik tasarıma uyarlamışlardır. Geliştirdikleri yöntem senaryo tabanlı olup, amacı

çokça olası senaryoda başarılı olabilen sağlam yerleşimler bulabilmektir. Her bir senaryo için gerekli olan kaliteli çözümleri optimal olarak veya sezgisel yaklaşımlarla bulmuşlardır. Çalışmalarında tesis yerleşiminde aynı bölümlerin birden fazla kopyalarının kullanılmasının, hem malzeme taşıma maliyetlerinin düşürülmesinde, hem de akış hacimleri ve taleplerdeki dalgalanmalarla baş edebilmek için etkin olduğunu göstermişlerdir. Çalışmalarında eriştikleri ilginç bir bulgu da, belirli bir sayıdan sonra bölümlerin kopyalarının istenenin aksi istikamette sonuçlar doğurmasıdır.

Yang ve Peters (1998), Rosenblatt ve Kropp'un (1992) yaptığı çalışmaya benzer bir çalışma ele almışlardır. Geliştirdikleri yaklaşım, beklenen malzeme taşıma maliyeti ve yeniden düzenleme maliyetlerinin en küçüklenmesini hedeflemiştir. Yazarlar çalışmalarında, talebin zamanla beraber değiştiği birçok dönem için, tek tip yerleşimli sağlam yaklaşım ile yeniden düzenleme maliyetlerinin yüklenildiği dinamik yaklaşımı kıyaslamışlardır. Beklenen taşıma maliyetlerini ise, bölümler arasındaki beklenen taşıma hacimlerine bağlı olarak hesaplamışlardır. Azadivar ve Wang (2000), ele aldıkları tesis düzenlemesi probleminde, ürünlerin sisteme gelişler arası sürelerini stokastik olarak kabul etmişlerdir. Bununla birlikte değişen ürün rotaları ve her bir bölümün alan ihtiyacı gibi operasyonel sistem kısıtlarını da göz önüne almışlardır. Problemin çözümü için, benzetim ve GA'yı birleştiren bir yaklaşım önermişlerdir. Bu yaklaşıma göre, GA yerleşim düzenini iyileştirmek üzere arama yapıp yeni çözümler üretirken, benzetim ile de üretilen her bir yerleşim çözümünün değerlendirilmesi yapılmaktadır. Geliştirdikleri algoritma GA ve benzetimi birleştirmesi sebebiyle, genel stokastik tesis düzenlemesi problemlerini çözebilmesine rağmen, GA tarafından bulunan her çözümün, ayrı ayrı benzetim ile değerlendirilmesi ciddi bir hesap yükünü de beraberinde getirmektedir.

Smith ve Norman (2000) eşit boyutlu olmayan bölümlerin tasarımının ele alındığı bir STDP üzerinde durmuşlardır. Stokastikliği, tesiste üretilmesi planlanan her bir ürün için bir beklenen değer ve bir varyans ile belirtmişlerdir. Çalışmalarının ana fikri, toplam malzeme taşıma maliyetlerinin belli bir istatistiksel yüzdesini en aza indirgemeye dayanmaktadır. Buna göre, toplam malzeme taşıma maliyetinin olasılık dağılımı, eğer yeterince sayıda ürün söz konusu ise normal dağılıma uyacaktır. Eşit olmayan bölüm boyutları göz önüne alınması sebebiyle, önemli bir çalışma olup yazarlar çözüm yaklaşımı olarak GA kullanmışlardır. Braglia, Zanoni ve Zavanella (2003) ise, Smith ve Norman'ın (2000) çalışmasına benzer bir şekilde, normal dağılıma uyan ürün talepleri ile bunların beklenen

değer ve varyans değerlerinin bilindiğini varsaymıştır. Yazarlar çalışmalarında, belirsizliklerin üretim oranlarına etkisini incelemişlerdir. Monte Carlo benzetiminden faydalanarak, makineler arasındaki ürünlerin akış miktarlarını tespit etmişler ve böylece en sağlam yerleşim düzenini bulmaya çalışmışlardır. Braglia, Zanoni ve Zavanella (2005) konu ile ilgili bir sonraki çalışmalarında, dinamik tasarım ortamlarında tesis düzenlemesinin analitik hususlarına eğilmişlerdir. Bu çalışmalarında, iki hususa dikkat çekmişlerdir. Bunlardan birincisi, bölümler arası akışları normal dağılıma uygun bir şekilde belirtilebilen problemlerde, bulunan bir yerleşim düzenine ait amaç fonksiyonu değeri de normal dağılıma uygun şekilde olur. İkinci husus olarak ise, en düşük beklenen maliyet değerine sahip tesis düzenlemesini tespit etmek için, sadece bölümler arası akış matrisinin beklenen değer kısmının kullanılmasının yeteceğidir. Yazarlar bu hususların doğruluğunu, Monte Carlo benzetimi yaklaşımını kullanarak göstermişlerdir.

Kulturel-Konak, Smith ve Norman (2004) ise, ürün taleplerinin bağımsız olmasına veya normal dağılım gibi herhangi bir dağılıma uymasına ihtiyaç duyulmayan bir yaklaşım önermişlerdir. Ayrıca, literatürdeki sadece belirli ayrık senaryoların analizine bağlı olan yaklaşımlardan da farklı olarak bu yaklaşımda, Monte Carlo benzetiminden faydalanarak sonsuz sayıdaki tüm olası senaryoları göz önüne almışlarıdır. Yazarlar, çalışmalarının optimizasyon safhasında ise, TA meta-sezgiselinden faydalanmışlardır. Krishnan, Cheraghi ve Nayak (2008), hem TDP'yi hem de DTDP'yi stokastik şartlar altında ele almış ve bunlar için çözüm yaklaşımları önermişlerdir. Belirsizliği ayrık senaryolarla ifade etmişlerdir. Önerdikleri yaklaşımlar maksimum kaybı en küçüklemeyi amaçlarken, çözüm uzayını aramak için GA meta-sezgiselinden yararlanmaktadır. Moslemipour ve Lee (2011) ise, esnek imalat sistemlerinin tasarımında, stokastik dinamik tasarım şartlarını ele almıştır. Ürün taleplerinin birbirinden bağımsız ve parametreleri bilinen normal dağılıma uyduğunu varsaymışlardır. Karar verici tarafından belirlenen bir güven seviyesi parametresi ile en küçüklenmesi hedeflenen maliyet amaç fonksiyonunun yüzdelik dilimi ifade edilmiştir. Problemi TB temelli bir meta-sezgisel yaklaşım ile çözmüşlerdir.

2.4.2. Stokastik hücresel imalat sistemi tasarımı problemi ile ilgili çalışmalar

Literatürde HİS tasarımının farklı boyutları ile ilgilenen, ancak HİS tasarımını deterministik olarak ele alan çalışmalar çok olmasına rağmen, HİS tasarımının

parametrelerini stokastik olarak ele alan çalışmalar oldukça azdır. Bu çalışmalarda, stokastik olarak ele alınan parametreler talep ve işlem zamanı gibi parametrelerdir. HİS tasarımının stokastik olarak ele alan ilk çalışmalardan biri, Seifoddini (1990) tarafından sunulmuştur. Yazar tek dönemlik tasarımı ele alan çalışmasında, ürün karışımının stokastikliğini göz önüne alarak, hücre oluşturma kararlarını vermeyi hedeflemiştir. Çalışmasında hücreler arası ürün taşıma maliyetlerinin beklenen değerini en aza indirgeyen olasılıklı bir yaklaşım önermiştir. Harhalakis, Ioannou, Minis, ve Nagi (1994) HİS tasarımında sağlamlık hususuna değinmişlerdir. Hücre oluşturma problemlerinde ürün taleplerinin rassal olarak ele alınmasını irdeleyip, hücreler arası taşıma maliyetlerinin beklenen değerini en küçüklemek için bir matematiksel model geliştirmişlerdir. Problemin çözümü için, daha önceki bir çalışmadan (Harhalakis ve diğerleri, 1990) uyarladıkları, deterministik bir sezgiseli kullanmışlardır. Algoritma talep değişimlerinin olduğu ortamlarda, tatmin edici sonuçlar üreten yerleşimler bulabilmektedir. Mungwattana (2000) ise, HİS tasarımında stokastik ve dinamik şartları bir arada göz önünde bulundurmak suretiyle, rotalama esnekliğini de hesaba katarak bir problem ortaya koymuştur. Önerdikleri bu problemin çözümü için TB kullanmışlardır. Arzi, Bukchin ve Masin (2001) talep değişkenliği ve parçalar arasındaki korelasyonun varlığını da dikkate alan, çok amaçlı bir hücre oluşturma metodolojisini ele almışlardır. Böylece hücrelerin yeniden tasarımına olan ihtiyacı ortadan kaldırmışlardır. Talep düzensizliği, fazladan sabit kapasite bulundurma, bitmiş ürün stoku tutma ve talep geri çevirme gibi yollarla tolere edilebilir ancak bu da maliyetlerin yükselmesine sebep olabilir. Bu yüksek maliyete sebep olan faktörlerin giderilmesi için, karışık tam sayılı matematiksel model önermişler ve bu problemi GA kullanarak çözmüşlerdir. Cao ve Chen (2005), ürün taleplerinin olasılıklı senaryolar ile ifade edildiği, sağlam bir hücre formasyonu problemini ele almış ve önerdikleri problemin beklenen hücreler arası taşıma maliyetleri ve makine maliyetlerini en küçüklemeyi amaçlamışlardır.

Tavakkoli-Moghaddam ve diğerleri (2007a) ise, hücre oluşturmanın daha önceden yapıldığını farz ettikleri HİS tasarımının yerleşim boyutu ile ilgilenmişlerdir. Taleplerin parametreleri bilinen normal dağılıma uyduğu kabul edilen çalışmalarında, hücre içi ve hücreler arası taşımaların maliyetlerin en küçüklenmesini hedeflemişlerdir. Bunun için problemi ifade eden doğrusal olmayan matematiksel bir model ortaya koymuşlar ve bu problemi Lingo optimizasyon yazılımı ile çözmüşlerdir. Pillai ve Chandrasekharan (2010) ise hücre oluşturma problemini, her biri bir gerçekleşme olasılığı ile ilişkilendirilmiş, ayrık

ürün karışımları senaryolarının olduğu şartlar altında değerlendirmişlerdir. Bu senaryoların gerçekleşme olasılıkları birer ağırlık değeri olarak kullanılarak, bu senaryolar birleştirilmek suretiyle tek bir birleştirilmiş senaryo elde etmişlerdir. Bu senaryoya göre yapılan çözüm neticesinde de, beklenen hücreler arası taşıma maliyetini en aza indirgeyen hücre formasyonunu elde etmişlerdir.

Ghezavati ve Saidi-Mehrabad (2011), HİS tasarımında stokastik hücre oluşturma problemini ele aldıkları çalışmalarında, kuyruk ağları teorisini uygulamak suretiyle, HİS tasarımındaki belirsizliği modellemeye çalışmışlardır. Bunu yaparken, üssel olasılık dağılımına uyduğunu farz ettikleri gelişler arası süreler ile işlem zamanlarından faydalanmışlardır. Hücreleri oluştururken, ortalama kullanım oranını veya diğer bir ifadeyle makinelerin kullanımda olma olasılığının maksimizasyonunu hedeflemişlerdir. Bu problemin çözümü için, GA ve TB tabanlı bir çözüm yaklaşımı önermişlerdir. Esmailnezhad, Fattahi ve Kheirkhah (2015) ise çalışmalarında gelişler arası süre, işlem zamanları ve makine bozulmalarının olasılıklı olarak ele alındığı bir hücre oluşturma problemini ele almışlardır. Problemin amacı etkin ortalama geliş oranını artırmaktır. Böylece bir ürüne ait işlenme sayısı artacak ve dolayısıyla da hücreler arası taşımaların sayısı düşecektir. Yazarlar problemin çözümü için GA ile değiştirilmiş PSO algoritmalarından faydalanmışlardır.

Bu tezde ele alınan stokastik HİS tasarımı problemi çok dönemli dinamik tasarım şartları da göz önüne alınarak incelemiştir. Bu çalışma HİS tasarımının üç tasarım aşamasını ele almanın yanı sıra birçok tasarım özelliğini de barındırarak literatürdeki çalışmalardan farklılık arz etmektedir.

2.5. Hücresel İmalat Sistemi Tasarımında Ele Alınan Özellikler

HİS tasarımı literatüründe dinamiklik ve stokastik şartları yanında pek çok tasarım özelliği ele alınmıştır. Bu özellikler, tasarımın gerçek hayat problemlerinin içerdiği şartlara uygun olması açısından katkıda bulunmaktadır. Bu bölümde, bu çalışmanın kapsamı ile ilgili olan ve literatürde ele alınan HİS tasarım özelliklerinden bahsedilecektir.

Hücre oluşturma ya da diğer adıyla hücre formasyonu, HİS tasarımında ele alınan en önemli alt problemlerden biridir. Hatta ilk HİS tasarımı çalışmalarında özellikle bu konu

ele alınmıştır. Hücre oluşturma, genel manasıyla, üretimi yapılacak ürünlerin işlem gereksinimleri de göz önüne alınarak, hangi hücrelerde hangi makinelerin bulunması gerektiği kararını verir. Bunu yaparken genelde aranan en önemli özellik, hücre bağımsızlığının sağlanmasıdır. Yani hücrelerde işlenen ürünlerin herhangi bir operasyon için hücre dışına çıkmadan tamamlandığı hücrelerin oluşturulması hedeflenir. Ancak birçok durumda hücreler arası taşınması gereken istisnai ürünler olmakta ve bu tip ürünler en aza indirgenmeye çalışılmaktadır.

Hücre içi yerleşim, oluşturulan hücreler içindeki makinelerin birbirilerine göre konumlarını düzenlemekle ilgili kararları içerir. Hücre formasyonu iyi yapılmış ancak hücre içi düzenlemesi iyi yapılmadığı durumlarda, hücrelerde akışlar karmaşıklaşır ve kontrol zorlaşır. Hücre içi yerleşim bir nevi akış tipi ya da diğer adıyla ürüne göre düzenlemiş bir küçük fabrika gibi düşünülebilir. İyi yapılmamış bir hücre içi yerleşimde, tersine akışların sayısı artar, makineler arasındaki taşınan ürünler hücre içi uzun mesafeler kat etmek zorunda kalırlar. Bu bakımdan hücre içi akışların iyi bir şekilde gerçekleşmesi için, hücre içi yerleşimin etkin olması iyi bir HİS tasarımının olmazsa olmazlarındandır.

Hücreler arası yerleşim, HİS tasarımının yerleşim kararlarından biridir. İdeal bir hücre formasyonunda hücreler arası akışlar istenmeyen durumlar olmasına rağmen, bu akışlara sebep olan istisnai ürünler çoğu zaman kaçınılmazdır. Bu gibi ürünlerin varlığı, hücreler arası akışlara neden olur. Hücreler arası akışlar, üretim zamanının artması başta olmak üzere süreç içi stokların, yığın tipi taşımaların ve ürün beklemelerinin de artmasına sebep olur. Genelde yığın şeklinde taşımalar gerektiren istisnai ürünler, HİS'in felsefesine aykırı olmakla beraber, tamamen ortadan kaldırılması oldukça zordur. Bundan dolayı, hücrelerin birbirine göre yerleşimlerinin belirlenmesi de önem kazanır. En azından hücreler arası akışların olduğu hücreler bir arada konumlandırılmak suretiyle, bu tip taşımalardan kaynaklı maliyetler en aza indirgenebilir. Bu nedenle, hücrelerin göreli konumlarının belirlenmesi de, HİS tasarımında dikkate alınması gereken hususlardan biridir.

Makine kapasiteleri, HİS tasarımında ele alınan gerçekçi tasarım özelliklerinden biridir. Bazı tasarım yaklaşımlarında, tasarımı kolaylaştırmak adına bu özellik ihmal edilebilmekte, makinelerin kapasitelerinin sınırsız olduğu varsayılmaktadır. Her bir makinenin, birim zaman cinsinden ifade edilen bir kapasitesinin olduğu varsayılabilir. Bu durum, makine satın alma kararları, farklı ürünlerin farklı makine tiplerinde işlenebilme

özelliği ve farklı makinelerdeki farklı operasyon zamanları ile birlikte ele alındığında önem ve değer kazanır. Bu nedenle makine kapasiteleri, kapsamlı bir HİS tasarımı yaklaşımlarında ele alınması gereken bir özelliktir.

Mükerrer makineler veya aynı makineden birden fazla bulundurulabilmesi durumu da, makine satın alma kararlarının verildiği ve makine kapasitelerinin göz önüne alındığı tasarım şartları altında ele alınacak bir durumdur. Makinelerin birden fazla kopyalarının bulundurulması, üretim sisteminde oluşabilecek darboğazların da giderilmesini sağlayabilecek hem operasyonel, hem de iktisadi boyutları olan bir karardır. Özellikle çok amaçlı makinelerin tasarımda birden fazla kopyasının bulunması, ürün rota alternatiflerinin fazlalaşmasını ve dolayısıyla sistem esnekliğinin elde edilmesini sağlar. Ayrıca, istisnai ürünlerin sebep olduğu hücreler arası akışlar da bu vasıtayla azaltılabilir. Yine, buna bağlı olarak, HİS tasarımında farklı hücre oluşturma alternatiflerinin oluşmasına imkân tanır. Defersha ve Chen (2006a; 2006b; 2009) ile Ahkioon ve diğerleri (2009a; 2009b) HİS tasarımının bu özelliğine çalışmalarında yer vermişlerdir.

İşlem sıraları, birçok üretim sisteminde, tasarımı yapılacak sistemin göz ardı edilemeyecek unsurlarından bir tanesidir. Çünkü ürünlerin işlem sıralarını değiştirmek mümkün değildir. Üretim sistemlerinin tasarımından önce, ürünlerin operasyon sıraları kesin olarak bilinmektedir. HİS tasarımına ilişkin yapılan ilk çalışmalarda, ürün-makine çakışıklık matrisi (incidence matrix) denilen, hangi ürünün hangi makinelerde operasyon gereksiniminin olduğu bilgisini tutan girdi parametresi kullanılmaktadır. Ancak, bu matris, ürünlerin operasyon sıraları hakkında bilgi vermemekte ve dolayısıyla ürünlerin operasyon sıralarına ilişkin bilgiler ihmal edilmekte idi. Yakın zamanda yapılan çalışmalarda, ürünlerin operasyon sıraları tasarımda ele alınması gereken temel özelliklerden biri olmuştur. Hatta bu özelliği dikkate almayan çalışmalar eleştirilmektedir (Onwubolu ve Mutingi, 2001; Papaioannou ve Wilson, 2010). Yine bu çalışmalarda, HİS tasarımında ürünlerin operasyon sıralarının göz önüne alınmasının, ürünlerin akış yapısının belirlenmesi açısından önemli olduğu da belirtilmiştir (Sarker ve Xu, 2000). Ayrıca operasyon sıralarının tasarım safhasında kullanılması, tesis içerisindeki ürün akışlarının maliyetlerinin doğru hesaplanması açısından önemli olduğuna da değinilmiştir (Harhalakis ve diğerleri, 1990; Cheng, Goh ve Lee, 1996).

Alternatif işlem rotaları, HİS tasarımında ele alınan konulardan biridir. Bir işlem rotası, bir ürünün tamamlanabilmesi için ziyaret etmesi gereken makineler topluluğudur. HİS tasarımında alternatif işlem rotaları ise, bir ürünün işlenebileceği farklı tiplerdeki makineler demektir (Ahkioon ve diğerleri, 2009a). Alternatif işlem rotalarının göz önüne alınması, problemin daha kolay olan makineler arası akışı belirten parametreyle ifade edilmesini engelleyerek problemin çözüm uzayını büyütür ve problemin karmaşıklığını artırır. Buna rağmen, alternatif işlem rotalarının göz önüne alınması, sistem tasarımcısının daha iyi HİS tasarımları elde etmesine olanak sağlar. Bir tasarımda alternatif işlem rotaları ihmal edilirse, tek bir işlem rotası olduğu varsayılır ve aynı operasyonu işleyebilecek diğer makineler ihmal edilir. Bu ise tasarımı yapılan sistemde daha iyi sonuçlara erişebilmenin yolunu kapattığı gibi, pratikte sistemin çıktı oranının düşmesine ve süreç içi stokların artmasına sebep olabilir. Ayrıca alternatif işlem rotalarının göz önüne alınması, HİS tasarımında istisnai ürünlerin ortadan kaldırılmasına veya en azından bu ürünlerin hacimlerinin düşürülmesine olanak sağlar. Bu şekilde çok daha iyi hücre tasarımları elde edilmiş olur (Logendran, Ramakrjshna, ve Sriskandarajah, 1994, Adil Rajamani ve Strong 1996; Papaioannou ve Wilson, 2010).

Parti bölme, büyük talep hacimlerini küçük yığınlara bölme işlemidir. Bu özellik, bir ürün türünün birden fazla iş merkezinde ya da hücrede eş zamanlı olarak üretilebilmesi durumunu ifade eder. İdeal şartlar altındaki bir geleneksel HİS tasarımında, bir ürüne ait talep, farklı hücrelere dağıtılmaksızın ve ürünler farklı işlemler için farklı hücreler arasında transfer edilmeksizin tek hücrede tamamlanması öngörülür. Bu yüzden ürün partilerinin farklı hücreler arasında paylaştırılması, HİS tasarımı literatüründe çok yaygın olarak ele alınmış bir uygulama değildir. Literatürde, HİS'de üretimin bu tasarım boyutunu düşünen az sayıda çalışma vardır (Logendran ve Ramakrishna, 1995; Defersha ve Chen, 2006a; Ahkioon ve diğerleri, 2009a; Saxena ve Jain, 2011, 2012; Kia ve diğerleri, 2012; Khaksar-Haghani, Kia, Mahdavi ve Kazemi, 2013). Bu özelliğin ele alınması daha çok fraktal yerleşim ve fraktal hücre tasarımında göz önüne alınmış bir tasarım boyutudur. Tasarım safhasında parti bölmenin göz önüne alınması, makine kullanım oranlarının iyileşmesi, hücrelerarası taşımaların, operasyon maliyetlerinin ve gerekli olan makine yatırım maliyetlerinin en aza indirgenmesine yardımcı olur (Defersha ve Chen, 2006a).

Fraktal yerleşim ve fraktal hücreler, Venkatadri, Rardin ve Montreuil (1997) tarafından önerilmiş ve Montreuil (1999) tarafından incelenmiş, fonksiyonel yerleşim olarak

tasarlanmış bir yerleşim düzenini, tıpkı HİS'lerde olduğu gibi, fiziksel olarak birbirinden ayrılmış hücrelere ayırır. Ancak bu yaklaşıma göre hücreler oluşturulurken ürün aileleri değil, "fabrika içinde fabrika" kavramı temel alınır. Buna göre aynı süreçlerin tekrar edilmesi ve aynı ürünün bütün hücrelerde üretilebilmesi durumu söz konusudur. Burada tüm iş istasyonları, hücreler arasında eşit olarak dağıtılmıştır. Genel olarak bir fraktal hücre, geleneksel grup teknolojisi hücresine göre daha fazla çeşitte ürün üretebilir. Bu sebepten ötürü, birbirinin kopyası fraktal hücreler oluşturulması yaygın bir uygulamadır. Öte yandan, eğer fraktal hücrelerde belli ürün gruplarında özelleşme başlayıp ilgili ürünlere ait tüm talep bir hücrede işlenmeye başlarsa, bu durumda fraktal hücreler geleneksel grup teknolojisi hücrelerine benzer.

Bu çalışmada Kia ve diğerleri (2012) ile Khaksar-Haghani ve diğerlerinin (2012) çalışmalarında olduğu gibi, HİS tasarımında fraktal hücre tasarımının özelliklerinden de esinlenilmiştir. Önerilen tasarım yaklaşımında elde edilen hücreler o kadar esnektir ki, bir ürüne ait tüm talep tek bir hücrede işlenebildiği gibi, talep birden fazla hücre arasında da paylaştırılabilir. Bu durum hücreler arası taşımaları en aza indirgeyip, hücre bağımsızlığını sağlamak için oldukça faydalıdır. Tasarım yaklaşımında fraktal hücreler, grup teknolojisi hücreleri veya bunların kombinasyonları arasından hangi strateji daha uygun ise, onun seçilmesine müsaade edilerek, hem grup teknolojisi hücrelerinin hem de fraktal hücrelerin avantajlarından faydalanılması hedeflenir. Eğer tüm ürünler, her biri birer hücreye ait olacak şekilde hücreler arasında dağılır ise, sistem tamamen geleneksel grup teknolojisi hücrelerine benzer. Öte yandan tüm hücrelerde tüm ürünler işlenir ama her bir ürüne ait talep hücreler arasında paylaştırılırsa, bu defa da sadece fraktal hücreler stratejisi uygulanmış olur.

Makine satın alma kararları ve makine maliyetleri, HİS tasarımının önemli bir unsurudur. Birçok HİS tasarımı çalışmasında, düzenlemesi yapılacak tesiste makinelerin hali hazırda bulunduğu ve satın alma kararlarının HİS tasarımından çok önceden verildiği kabul edilir. Oysa ki kapsamlı bir HİS tasarımında, üretilecek olan ürünler ve makinelerin ürün işleme ile ilgili yetenekleri bilindiği sürece, satın alınacak makinelerin kararlarının verilmesinin de modele eklenmesi, elde edilecek sonucun kalitesini artırmak adına önem arz etmektedir. Makine satın alma kararları, çok dönemli bir planlama ufkunda, kapasiteyi artırmak suretiyle esnekliği artırarak, sistemin talepte ve ürün karışımında yaşanacak değişimlere iyi yanıt vermesini sağlar. Ayrıca çok dönemin olduğu, malzeme taşıma ve yer değiştirme

maliyetleri arasında bir ödünleşmenin olduğu bir ortamda, makine satın alma kararlarının da karar sürecine dahil edilmesi, problemin zenginliğini ve çözümün genel kalitesini artırmaktadır. Ahkioon ve diğerleri. (2009a ;2009b) HİS tasarımında bu özelliğin dahil edilmesinin önemine dikkat çekmişlerdir.

Çok sıralı tesis düzenlemesinde, makineler arası ortalama mesafe, makinelerin bir hat boyunca sıralandığı tek sıra yerleşime göre daha kısa olmaktadır. Ayrıca tek sıra yerleşimde, akışı bozan geri yönlü akışların oluşması ihtimali, çok sıralı yerleşimlere göre daha fazladır (Kia ve diğerleri, 2012). Bu yüzden bu çalışmada da HİS tasarımı yapılırken, çok sıralı yerleşim düzenine göre yapılması düşünülmüştür.

Tesisin yeniden düzenlenmesi, ürün taleplerinin dönemsel olarak değiştiği ortamlarda, bir dönem için yapılan "en iyi" tasarım takip eden dönemler veya tüm planlama ufku göz önüne alındığında "en iyi" olmaktan uzak olabileceği durumlarda geçerlidir. Bunun sebebi ürün taleplerinin dönemlere göre değişmesi neticesinde, tesiste gerçekleşen taşımaların mesafelerinin uzaması ile taşıma maliyetlerinin yükselmesi, hücreler arası akışların artması ve dolayısıyla hücre bağımsızlığının azalması ile üretim zamanlarının kötüleşmesi sayılabilir. Bunun gibi olacak değişimlerin bilindiği varsayılan planlama ortamlarında, tesisin dinamik olarak yeniden düzenlenmesi göz önüne alınır. Bu kapsamda makinelerin yerleri değiştirilirken, hücreler de yeniden oluşturulabilir. Ancak dinamik yeniden düzenlemede, bu faaliyetlerin maliyetleri de göz önünde bulundurulur. Dolayısıyla bu tip tasarımlarda diğer maliyetlerle, yeniden düzenleme maliyetleri arasında bir ödünleşme vardır ve en iyi uzlaşı noktası aranır.

Talep belirsizliği, birçok imalat sisteminde tasarım belirlenirken, tasarımda bazı tahminler kullanılır. Ancak bu tahminler belirli bir miktarda belirsizlik içermektedir. Üstelik çok dönemli tasarımların ele alındığı çalışmalarda bu belirsizlik kaçınılmazdır. Shanker ve Vrat (1999) HİS tasarımında belirsizliğin ele alınmasının gerekliliğini şu üç sebep ile açıklamışlardır: (1) tasarım ve uygulama arasındaki göz ardı edilemez derecedeki uzun zaman dilimi, (2) kesin tahminler yapmanın maliyetinin yüksekliği ve (3) tasarım safhasında istatistiksel gözlemlerin eksikliğidir. Bu sebeplerden birincisinin geçerliliği, taleplerin çok dönemli olarak ele alındığı tasarımlarda oldukça yüksektir. Taleplerin dinamik olarak ele alındığı yaklaşımlarda, belirsizliğin de olduğu hesaba katılması gerekmektedir.

3. DİNAMİK HÜCRESEL İMALAT SİSTEMİ TASARIMI

HİS tasarımında ele alınması gereken önemli hususlardan biri de, kısa ürün yaşam çevrimleridir. Tasarım safhasında yeni çıkacak ürünlerin ve ürün taleplerindeki zamanla olan değişimlerin göz ardı edilmesi, HİS'de planlanmamış değişiklikler yapılmasını, bu değişiklerin sebep olduğu üretim kesintilerinin ve yeniden düzenlenme maliyetlerinin katlanılmasını gerektirir. Hücrelerin yeniden düzenlenmesi, makinelerin yeniden taşınması, kurulması ve kaldırılması, kayıp üretim zamanı gibi bazı maliyetleri beraberinde getirir. Bu sebepten ötürü, ürün taleplerindeki değişimlerin ve ürün ömürlerinin hücre tasarımında hesaba katılması uygun olur. Bu tip HİS tasarımı yaklaşımlarına DHİS tasarımı denir. (Rheault ve diğerleri, 1995). DHİS tasarımında hücrelerin yeniden düzenlenmesi ihtiyacı (hücre formasyonu, hücre içi yerleşim, hücrelerarası yerleşim) hesaba katılmalıdır.

3.1. Problem Tanımı ve Varsayımlar

Çalışmanın bu bölümünde ele alınan HİS tasarımı problemi, dinamik hücre yeniden düzenlemesini göz önüne alan, farklı üretim ihtiyaçlarına sahip ürünlerin üretildiği bir sistemdir. Bu problemde söz konusu olan sistemin tasarımında hücre formasyonu, hücre içi ve hücreler arası yerleşim, ürün akış ve ürün rotalama kararları beraber verilmektedir. Problemin varsayımları şu şekildedir:

1. Bu sistemde üretilen her bir ürün, belirli sayıda ve belirli sırada işlemden geçirilerek üretilmektedir. Ürünlerin işlem sıraları değiştirilemez ancak, aynı işlemi gerçekleştirebilen farklı konumlardaki farklı makinelerde işlenebilirler. Bir ürünün bir operasyonunu işleyebilecek aynı veya farklı tiplerde birden fazla makine bulunması sonucunda ürünün rotalama esnekliği sağlanmış olur.
2. Tüm ürünlerin tüm işlemlerinin her bir makine tipindeki gerçekleştirilme zamanları önceden bilinmektedir. Bir ürünün herhangi bir işleminin işlem zamanı, farklı makinelerde farklı sürelerde olabilir. Ayrıca tüm işlem zamanlarının planlama dönemleri boyunca değişmediği kabul edilir.
3. Ürün talepleri bilinmektedir. Bir döneme ait tüm talep ilgili dönemde, mevcut üretim kaynakları kullanılarak karşılanmalıdır.

4. Makinelerin dönemlik kapasiteleri her dönem aynı olmakla beraber, makine tiplerinin kapasiteleri birbirinden farklı olabilir. Her bir makine tipinin dönemlik ve birim zaman cinsinden ifade edilen (saat, dakika vb. gibi.) bir kapasitesi vardır. Bu kapasite kesinlikle aşılamaz.
5. Makineler çok amaçlı olabilirler. Yani, farklı ürünlerin farklı sıralardaki operasyonlarını işleyebilecek özellikte olan makineler olabilir. Bir makinede farklı işlemleri gerçekleştirmeye ilişkin hazırlık maliyetleri ihmal edilmiştir. Benzer şekilde işlenecek ürünler de, işlemlerinin gerçekleştirilebileceği makineler açısından esnektir. Bir ürün işlemi birden fazla çeşit makinede gerçekleştirilebilir. Ürün işlemlerini işleyebilecek makine tipleri ve bu işlemlerin her bir makine tipindeki süreleri bilinmektedir ve dönemden bağımsızdır.
6. Kapasitenin yetmemesi, bazı yüksek maliyetli taşımaların olması (hücrelerarası taşımalar vb gibi) veya farklı durumlar gerektirdiğinde, makine tiplerinden birden fazla yerleştirilebilir. Bu makineler başlangıç düzeninde olabileceği gibi, takip eden dönemlerdeki yeniden düzenlemelerde de eklenebilir.
7. Tüm makinelerin satın alma maliyetleri birbirinden farklı olabilir. İlk dönem de dâhil olmak üzere, eklenen tüm makinelerin satın alma maliyetleri göz önüne alınır. Herhangi bir planlama döneminde, eklenen bir makine takip eden dönemlerde çıkarılamaz. Gerçek şartlarda bu durum talebin düştüğü durumlarda, sisteme esneklik getirir ve makine arızalarında alternatif rotalar oluşmasını sağlar. Bu makinelerin tamamen çıkarılması, üreticiye makine saklama alanı gerektirebileceğinden veya satılması yüksek zarar ettirebileceğinden çıkarma kararını modelden tamamen çıkarmak gerçekliğe aykırı değildir.
8. Makineler, tesis düzeninde sadece önceden belirlenen konumlardan birine yerleştirilebilir. Bir dönemde bir konumda sadece bir makine bulunabilir, ancak bir konum herhangi bir dönem için makine yerleştirmeksizin boş bırakılabilir. İki dönem arasında makinelerin yerleri değiştirilebilir. Bir makine ilk kez kurulduğunda sadece kurma maliyeti söz konusu iken, takip eden dönemlerde yer değiştirme yapılırsa o makineye ait hem kurma hem de kaldırma maliyetleri yüklenilmiş olur. Yani bir makinenin yer değiştirme maliyeti, ilgili makinenin kurma ve kaldırma maliyetlerinin toplamı ile ifade edilir. Yer değiştirme maliyetleri dönemden ve kaldırma ile kurulumun yapıldığı konumlardan bağımsız olup, sadece makine tipine bağlıdır.
9. Tüm makinelerin boyutları aynıdır. Her makine, boş olduğu ya da boşaltıldığı sürece her konuma yerleştirilebilir.

10. Hücreler arası taşımaların maliyeti, hücre içi taşımaların maliyetinden fazladır. Bunun sebebi hücreler arası akışın, hücresel imalat sistemindeki ideal hücre içi akışı bozarak ürünlerin hücre dışına taşınmasıdır. Bu taşımalar gerçek HİS'de genelde partiler şeklinde yapıldığından, üretim zamanına da olumsuz etki yapar.
11. Hücre içi ve hücreler arasındaki tüm taşımaların maliyeti, taşımanın yapıldığı mesafe ve taşınan miktarla doğru orantılıdır.
12. Makinelerin satın alma maliyetinin yanı sıra, üzerinde gerçekleştirilen iş yüküne bağlı bir değişken maliyeti vardır. Aynı zamanda tesis düzeninde bulunan bir makinenin üzerinde işlem gerçekleştirilmesinden ve iş yükünden bağımsız olan bir de sabit maliyeti vardır. Bu maliyet bakım giderleri ve makine ile ilgili diğer sabit maliyetleri temsil eder.
13. Bir ürüne ait herhangi bir işlem birden fazla makineye paylaştırılabilir. Aralarında paylaşım yapılan makineler farklı hücrelerde dahi olabilirler.
14. Hücreler arasında fiziksel bir ayrım yoktur. Dolayısıyla hücreler yeniden düzenleneceği zaman, tesisin fiziksel yapısında değişiklik yapmaya gerek yoktur. Hücre yeniden düzenlemenin maliyeti sadece yapılacak makine yer değiştirme maliyetlerine bağlıdır.
15. Makinelerin yerleştirilebileceği konumların sayısı ve aralarındaki mesafe bellidir. Bu mesafeler bir mesafe cetvelinde belirtilmiştir.
16. Literatürdeki bazı çalışmalara benzer şekilde düzenlemede oluşturulacak hücre sayısı, bir hücrede bulunabilecek en az ve en fazla makine sayıları bilinmektedir. Bir hücreye atanacak en az makine sayısı sıfır olarak düşünüldüğünde, oluşturulacak hücre sayısı ile ilgili kısıt da ortadan kaldırılmış olabilir. Hücre sayısının, sistem tasarımcısı tarafından, bir hücre içinde oluşacağı tahmin edilen iş yüküne göre belirlendiği düşünülebilir. Öte yandan bir hücredeki en fazla makine sayısı da, hücre içindeki fazla makine kaynaklı olarak oluşabilecek karmaşıklaşmış ürün akışlarını engellemek adına düşünülmüştür.
17. Planlama dönemleri çeyrek, yarı yıl veya bir yıl gibi dönemler olabilir.

3.2. Problemin Matematiksel Modeli

Bir önceki bölümde varsayımları ve tanımı detaylı şekilde verilen problemin, tam sayılı doğrusal olmayan matematiksel modeli aşağıda verilmiştir. Probleme ait indisler, kümeler de detaylı olarak paylaşılmıştır.

3.2.1. Problemin tam sayılı matematiksel modeli

Aşağıda, bir önceki alt bölümde detaylı tanımı yapılan dinamik HİS tasarımı probleminin matematiksel modeli verilmiştir.

Modeldeki indisler ve kümeler,

- P, ürünler kümesi $P = \{1, \dots, |P|\}$,
- R_p , p ürününün işlemleri kümesi $R_p = \{1, \dots, |R_p|\}$,
- N, hücreler kümesi $N = \{1, \dots, |N|\}$,
- M, makine tipleri kümesi $M = \{1, \dots, |M|\}$,
- T, dönemler kümesi $T = \{1, \dots, |T|\}$,
- K, konumlar kümesi $K = \{1, \dots, |K|\}$,
- p, ürün indisi,
- r, işlem indisi,
- c, d, hücre indisleri,
- k, l, konum indisleri,
- i, j, makine türü indisi,
- t, dönem indisi,

şeklinde tanımlanmıştır.

Modelde kullanılan parametreler,

- A, hücre içi birim taşıma maliyeti,
- E, hücrelerarası birim taşıma maliyeti,
- D_{pt}, t döneminde p ürününe olan talep,
- λ_{kl} , k ve l konumları arasındaki mesafe,
- δ_i , bir i makinesini kurma maliyeti,
- θ_i, bir i makinesini bulunduğu konumdan kaldırma maliyeti,
- β_i, bir i makinesinin bir dönemlik sabit maliyeti,
- μ_i, i makinesini birim zaman kullanma maliyeti,
- γ_i, bir adet i makinesini satın alma maliyeti,
- B^U, bir hücrece bulunabilecek maksimum makine sayısı,
- B^L, bir hücrece bulunabilecek minimum makine sayısı,

- C_i, bir i makinesinin bir dönemdeki birim zaman cinsinden kapasitesi,
- π_{pri}, bir birim *p* ürününün *r.* işleminin *i* makinesinde işlenme süresi,
- α_{pri}, *p* ürününün *r.* işlemi *i* tip makinede işlenebiliyor ise 1, değilse 0,

şeklinde verilmiştir.

Problemde değerleri belirlenen karar değişkenleri ise,

- x_{ckit}, *t* döneminde *k* konumu *c* hücresine atanmış ve üzerinde *i* tipinden bir adet makine bulunuyorsa 1, değil ise 0,
- y_{kit}, *t-1* döneminde *k* konumunda bir adet *i* makinesi yok iken, *t* döneminde üzerine bir adet *i* makinesi yerleştirilmiş ise 1, değilse 0,
- y'_{kit}, *t-1* döneminde *k* konumunda bir adet *i* makinesi bulunuyor iken, *t* döneminde bir *i* makinesi yerleştirilmemiş ise 1, değilse 0,
- $F_{prcdklijt}$, *t* döneminde *p* ürününün *r.* işinin *c* hücresine atanmış, üzerinde *i* makinesi bulunan *k* konumunda işlenen ve *r+1.* işlemi için *d* hücresine atanmış, üzerinde *j* makinesi bulunan *l* konumuna hareket eden parça sayısı,
- f_{prckit}, *t* döneminde, *p* ürününün *r.* işinin *c* hücresine atanmış, üzerinde *i* makinesi bulunan *k* konumunda işlenen parça sayısı,
- Q_{it}, *t* dönemi başında hücresel düzene eklenen *i* tipinde makine sayısı,

şeklinde belirlenmiştir.

Amaç fonksiyonu;

$$
\begin{aligned}
min\ z = & \sum_{t\in T}\sum_{p\in P}\sum_{r\in R_p\{|R_p|\}}\sum_{c\in N}\sum_{\substack{d\in N\\ d\neq c}}\sum_{k\in K}\sum_{l\in K}\sum_{i\in M}\sum_{j\in M} F_{prcdklijt}\lambda_{kl}E \\
& + \sum_{t\in T}\sum_{p\in P}\sum_{r\in R_p\{|R_p|\}}\sum_{c\in N}\sum_{k\in K}\sum_{\substack{l\in K\\ l\neq k}}\sum_{i\in M}\sum_{j\in M} F_{prcclijt}\lambda_{kl}A \\
& + \sum_{t\in T}\sum_{i\in M} Q_{it}\gamma_i + \sum_{i\in M} Q_{i1}\delta_i + \sum_{t\in T}\sum_{c\in N}\sum_{k\in K}\sum_{i\in M} x_{ckit}\beta_i + \sum_{t\in T\{1\}}\sum_{k\in K}\sum_{i\in M} y_{kit}\delta_i \\
& + \sum_{t\in T\{1\}}\sum_{k\in K}\sum_{i\in M} y'_{kit} + \sum_{t\in T}\sum_{p\in P}\sum_{r\in R_p}\sum_{c\in N}\sum_{k\in K}\sum_{i\in M} f_{prckit}\pi_{pri}\mu_i
\end{aligned}
\tag{0.1}
$$

Kısıtlar;

$$f_{prckit} \leq x_{ckit}\alpha_{pri}D_{pt} \quad \forall \quad p\epsilon P, r\epsilon R_p, c\epsilon N, k\epsilon K, i\epsilon M, t\epsilon T \tag{0.2}$$

$$\sum_{c\in N}\sum_{k\in K}\sum_{i\in M} f_{prckit} = D_{pt} \quad \forall \quad p\epsilon P, r\epsilon R_p, t\epsilon T \tag{0.3}$$

$$\sum_{c\in N}\sum_{i\in M} x_{ckit} \leq 1 \quad \forall \quad k\epsilon K, t\epsilon T \tag{0.4}$$

$$\sum_{k\in K}\sum_{i\in M} x_{ckit} \leq B^U \quad \forall \quad c\epsilon N, t\epsilon T \tag{0.5}$$

$$\sum_{k\in K}\sum_{i\in M} x_{ckit} \geq B^L \quad \forall \quad c\epsilon N, t\epsilon T \tag{0.6}$$

$$\sum_{p\in P}\sum_{r\in R_p}\sum_{c\in N} f_{prckit}\pi_{pri} \leq C_i \quad \forall \quad k\epsilon K, i\epsilon M, t\epsilon T \tag{0.7}$$

$$\sum_{c\in N}\sum_{k\in K}\sum_{i\in M} F_{p,r-1,cdklijt} = f_{prdljt} \quad \forall \quad p\epsilon P, d\epsilon N, l\epsilon K, j\epsilon M, t\epsilon T, r\epsilon R_p\backslash\{1\} \tag{0.8}$$

$$\sum_{d\in N}\sum_{l\in K}\sum_{j\in M} F_{prcdklijt} = f_{prckit} \quad \forall \quad p\epsilon P, c\epsilon N, k\epsilon K, i\epsilon M, t\epsilon T, r\epsilon R_p\backslash\{|R_p|\} \tag{0.9}$$

$$\sum_{c\in N}\sum_{k\in K} x_{ckit} - \sum_{c\in N}\sum_{k\in K} x_{cki,t-1} = Q_{it} \quad \forall \quad i\epsilon M, t\epsilon T \setminus \{1\} \tag{0.10}$$

$$\sum_{c\in N}\sum_{k\in K} x_{cki1} = Q_{i1} \quad \forall \quad i\epsilon M \tag{0.11}$$

$$\left(1 - \sum_{c\in N} x_{cki,t-1}\right)\sum_{c\in N} x_{ckit} = y_{kit} \quad \forall \quad k\epsilon K, i\epsilon M, t\epsilon T \setminus \{1\} \tag{0.12}$$

$$\left(1 - \sum_{c\in N} x_{ckit}\right)\sum_{c\in N} x_{cki,t-1} = y'_{kit} \quad \forall \quad k\epsilon K, i\epsilon M, t\epsilon T \setminus \{1\} \tag{0.13}$$

$x_{ckit}, y_{kit}, y'_{kit}\epsilon\{0,1\}$; $Q_{it}, F_{prcdklijt}, f_{prckit} \geq 0$ ve tamsayı

3.2.2. Tam sayılı matematiksel modelin açıklaması

Yukarıda matematiksel modeli verilen DHİS tasarımı probleminin amaç fonksiyonu Eş. 0.1deki gibi sekiz terimin toplamından oluşmaktadır. Bunlardan birincisi hücrelerarası malzeme taşıma maliyetini, ikincisi ise hücre içi malzeme taşıma maliyetini ifade

etmektedir. Üçüncü terimden beşinci terime kadar olan ifadeler sırasıyla, makinelerin satın alma, ilk dönemlik kurulum ve dönemlik sabit maliyetleridir. Altıncı ve yedinci terimler ise sırasıyla makinelerin ikinci dönemden itibaren, yer değiştirmeye bağlı olan kurulum ve yer değiştirme maliyetleridir. Amaç fonksiyonunun son parçası olan sekizinci terim ise, ürünlerin rotalandıkları makinelerdeki işlenme maliyetleridir. Eş. 0.2, bir ürünün bir işleminin, sadece o işlemi gerçekleştirebilecek bir makinenin bulunduğu bir konuma rotalanabilmesini sağlar. Eş. 0.3 ise tüm işlemleri gerçekleştirilmemiş bir ürün bile kalmamasını sağlar. Eş. 0.4 bir konuma herhangi bir tipten sadece bir makine atanabileceğini, ya da ilgili konumun boş kalabileceğini ifade eder. Eş. 0.5 ve Eş. 0.6 ise, sırasıyla, bir hücrede bulunabilecek en az ve en çok makine sayısını belirlemektedir. Eş. 0.7 ise bir konumdaki bir makineye rotalanan ürün operasyonlarının toplamının, o konuma yerleştirilmiş makinenin dönemlik kapasitesini geçmemesini sağlar. Eş. 0.8 ve Eş. 0.9 ise akış korunumu kısıtlarıdır. Bu kısıtlar akış karar değişkenleri (F) ve rotalama karar değişkenleri (f) arasındaki ilişkiyi ve uyumu sağlar. Eş. 0.10 ve Eş. 0.11 ise, her dönemdeki makine satın alma ile ilgili karar değişkeninin (Q) hesaplanmasını sağlar. Eş. 0.12-0.13 ise hücre-konum-makine atama karar değişkeninin (x), makine kurma ve kaldırma karar değişkenleri ile ilişkisini düzenleyen ifadelerdir.

3.2.3. Matematiksel modelin doğrusallaştırılması

Eş. 0.12 ile Eş. 0.13 hücre-konum-makine atama karar değişkeninin (x_{ckit}), makine kurma ve kaldırma karar değişkenleri (y_{kit} ve y'_{kit}) ile ilişkisini düzenleyen ifadelerdir. Ancak bu iki ifade problemin matematiksel modelinin doğrusal yapısını bozmaktadır. Bu matematiksel modelin doğrusal programlama problemleri çözen yazılımlar ile çözülebilmesi için, doğrusallığı bozan ifadelerin doğrusallığı bozmayan ifadelere dönüştürülmeleri gerekmektedir. Bu yüzden Eş. 0.12 ve Eş. 0.13, aşağıda verilen Eş. 3.14-3.17 numaralı ifadelerle değiştirilirse matematiksel modelin doğrusal olması sağlanmış olur.

$$0{,}5 + y_{kit} + \sum_{c\epsilon N} x_{cki,t-1} - \sum_{c\epsilon N} x_{ckit} \geq 0 \qquad \forall \quad k\epsilon K, i\epsilon M, t\epsilon T \setminus \{1\} \qquad (0.14)$$

$$1{,}5y_{kit} + \sum_{c\epsilon N} x_{cki,t-1} - \sum_{c\epsilon N} x_{ckit} - 1 \leq 0 \qquad \forall \quad k\epsilon K, i\epsilon M, t\epsilon T \setminus \{1\} \qquad (0.15)$$

$$0{,}5 + y'_{kit} + \sum_{c\epsilon N} x_{ckit} - \sum_{c\epsilon N} x_{cki,t-1} \geq 0 \qquad \forall \quad k\epsilon K, i\epsilon M, t\epsilon T \setminus \{1\} \qquad (0.16)$$

$$1{,}5y'_{kit} + \sum_{c\epsilon N} x_{ckit} - \sum_{c\epsilon N} x_{cki,t-1} - 1 \leq 0 \qquad \forall \quad k\epsilon K, i\epsilon M, t\epsilon T \setminus \{1\} \qquad (0.17)$$

Yukarıdaki ifadeler, x_{ckit}, y_{kit} ve y'_{kit} ikili karar değişkenleri arasındaki ilişkiyi kurar. Buna göre Eş. 0.14'te, yeni dönemde (*t*), k konumuna, *i* tipinde bir makine kurulduğunda y_{kit} değişkeninin "1" değeri alması sağlanırken, Eş. 0.15'te ise ilgili konumda aynı bir tip makinenin kurulumunun olmadığı ya da o makinenin kaldırıldığı şartlarda y_{kit} değişkeninin "0" değeri alması zorlanmış olur. Eş. 0.16'da yeni dönemde (t), k konumundan i tipinde bir makine kaldırıldığında y'_{kit} değişkeninin "1" değeri alması sağlanırken, Eş. 0.17'de ise ilgili konumdan aynı bir tip makinenin kaldırılmadığı ya da o makinenin kurulduğu şartlarda y'_{kit} değişkeninin "0" değeri alması sağlanmış olur.

3.2.4. Problemin karmaşıklık sınıfı

Gerçek bir üretim ortamını daha kapsamlı bir şekilde ifade edebilmek için, yukarıda verilen matematiksel model HİS tasarımına dair birçok farklı tasarım faktörünü göz önüne almaktadır. Problem, hücre oluşturma, hücre içi ve hücreler arası tasarım özelliklerine ek olarak, hücre yeniden düzenleme özelliklerini de hesaba katar. Ayrıca model hücre boyutlarının esnek olduğu, parti bölmeye, alternatif rotalara ve aynı makineden birden fazla bulundurmaya müsaade edildiği, ürünlerin işlem sıralarına riayet edildiği bir problemi ifade eder. Tüm bu faktörler ve kararlar problemin zorluğunu artırıcı katkı yaparlar.

HİS tasarımında ele alınan en temel problem olarak nitelendirilebilecek olan hücre oluşturma problemi bile, tek başına kombinatoryel karmaşık bir problemdir. Ayrıca bu problemin dinamik bir ortamda ele alınması, problemin karmaşıklığını artıran bir unsurdur (Chen, 1998). Öte yandan karesel atama problemi de HİS tasarımında, hücre içi ve hücreler

arası yerleşimin formüle edilmesinde kullanılan bir yaklaşımdır. Tesis düzenlemesi problemlerinde de yaygınca kullanılan, karesel atama problemi formülasyonunun NP-zor olduğu Sahni ve Gonzalez (1976) tarafından gösterilmiştir. Ayrıca, alternatif ürün rotaları içerisinden, optimal ürün rotasının belirlenmesinin de Logendran ve diğerleri (1994) tarafından NP-zor problem sınıfında olduğu gösterilmiştir. Dolayısıyla burada ele alınmakta olan problem, yukarıda verilen kararları içerirken daha farklı model özelliklerini de barındırdığından NP-zor sınıfındadır. Bu sebepten ötürü, diğer NP-zor problemler gibi bu problemin de çözümü zordur ve probleme özgü çözüm yaklaşımlarıyla çözüm aramak uygundur.

3.3. Önerilen Çözüm Yaklaşımı

HİS tasarımı için önerilen matematiksel model, NP-zor sınıfında bir problemdir ve çözümü için kesin sonuç veren algoritmaların kullanımı en azından büyük problemler için verimsizdir. Çünkü bu tip problemlerin çözüm zamanları artan problem boyutu ile birlikte üssel olarak artar. Örneğin, optimizasyon yazılımlarında kullanılan dal sınır algoritması gibi algoritmalar, bir yandan yüksek miktarda bilgisayar belleği gerektirirken, öte yandan çözüm zamanı da çok uzun sürebilmektedir. Bu yüzden, bu tip problemler için, optimal çözümü garanti etmeyen, ancak kabul edilebilir zaman içinde ve kabul edilebilir kalitede çözümler üreten, probleme özel sezgisel yöntemler geliştirilmiştir. Ancak geliştirilen bu algoritmalar, açgözlü (greedy) mekanizmalar içerdiklerinden, optimal sonuçları bulamadan yerel en iyi çözümlere takılabilmektedirler. Bunun sebeplerinden biri, bu tip sezgisel algoritmaların arama esnasındaki başlangıç çözümüne bağlı olmasındandır. Bu sorunu aşmak üzere, meta-sezgiseller adı verilen çözüm yaklaşımları önerilmiştir. Bu yaklaşımlar da tıpkı sezgiseller gibi, kabul edilebilir zamanda iyi çözümler üretirken, problemden bağımsız mekanizmaları ile yerel en iyi çözümlere takılmaktan kurtulabilirler. Bu tip meta-sezgisel algoritmaların en yaygınları, TB, GA, TA ve parçacık sürüsü algoritmalarıdır. Bu çalışmada geliştirilen çözüm algoritması da TB algoritması temeli üzerine oturtulmuştur. Özet olarak ifade edilecek olursa, geliştirilen çözüm yaklaşımı problem çözümü neticesinde verilecek olan kararları ikiye bölüp bunların bir kısmını TB, bir kısmını da DP yardımıyla bulmaya çalışır. Bu yaklaşımın detayları aşağıdaki alt bölümlerde anlatılmıştır.

3.3.1. Önerilen çözüm yaklaşımının algoritması

Çalışmada ele alınan problemin matematiksel modeli incelendiğinde, karar değişkenlerinin bir kısmının 0-1 (binary) değişkenler, geri kalanlarının ise tam sayı değişkenler olduğu görülmektedir. Bu problemin çözümü, en küçük problemler için bile ciddi hesaplama yükü, bellek ve zaman gerektirmektedir. Tam sayı değişkenler ve özellikle de 0-1 değişkenler, problemin çözümünü zorlaştıran iki etmendir. Bu sebepten ötürü, 0-1 değişkenler ve diğer tam sayı değişkenleri ayrı ayrı ele alarak, problemin karar değişkenleri ve bunlarla ilişkili kısıtları ayrıştırarak çözüm üreten melez bir yaklaşım önerilmiştir.

Bu yaklaşımda eş zamanlı olarak, 0-1 karar değişkenlerinin değerleri tavlama benzetimi adımları ile belirlenirken, genel DP ile de geriye kalan karar değişkenlerinin değerleri sürekli olduğu varsayılarak ve 0-1 değişkenlere uygun bir şekilde belirlenir. Çözüm yaklaşımına ait TB ve doğrusal programlama temelli algoritma aşağıda verilmiştir.

1. Mevcut sıcaklığı, başlangıç sıcaklığını kullanarak başlat : $S^M \leftarrow S^{Ba}$
2. Rassal olarak çok dönemli bir başlangıç hücresel düzenleme çözümü oluştur ve bunu mevcut çözüm olarak kaydet ($Ç_1^M$). Bu çözüme ait hücresel düzenleme ile ilgili maliyetleri hesapla (AFD_1^M).
3. Bu düzenlemeye ait DP alt problemini oluştur ve bu problemi çözerek akış ve rotalama için çözümü bul ($Ç_2^M$). Bu çözüme ait maliyetleri hesapla (AFD_2^M). Amaç fonksiyonu değeri toplamını kaydet (AFD_T^M).
4. Bulunan ilk çözümü ($Ç_1^M$ ve $Ç_2^M$) en iyi çözüm olarak sakla ($Ç_1^*$ ve $Ç_2^*$). İlgili çözüme ait amaç fonksiyonu değerlerini (AFD_1^* ve AFD_2^*) ve toplamlarını (AFD_T^*) en iyi çözüme ait olmak üzere hafızada tut.
5. Çevrim (epoch) sayısı kadar yürüt:

5.1. Bir komşu hücresel düzenleme çözümü üret ($Ç_1^K$) ve bu çözüme ait hücresel düzenleme ile ilgili maliyetleri hesapla (AFD_1^K).

5.2. Komşu çözüme ait DP alt problemini oluştur ve bu problemi çözerek akış ve rotalama için çözümü bul ($Ç_2^K$). Bu çözüme ait maliyetleri hesapla (AFD_2^K). Amaç fonksiyonu değeri toplamını kaydet (AFD_T^K)..

5.3. Eğer bulunan komşu çözüm en iyi çözümden daha iyi ise ($AFD_T^K \leq AFD_T^*$), en iyi çözümü güncelle: $AFD_T^* \leftarrow AFD_T^K, Ç_1^* \leftarrow Ç_1^K, Ç_2^* \leftarrow Ç_2^K$.

5.4. Eğer bulunan komşu çözüm, mevcut çözümden daha iyi ise ($AFD_T^K \leq AFD_T^M$) mevcut çözümü güncelle: $AFD_T^M \leftarrow AFD_T^K, Ç_1^M \leftarrow Ç_1^K, Ç_2^M \leftarrow Ç_2^K$.

5.5. Eğer bulunan komşu çözüm, mevcut çözümden daha kötü ise ($AFD_T^K > AFD_T^M$), tek düze olasılık dağılımından bir U rassal sayısı üret. $\Delta = AFD_T^K - AFD_T^M$ olmak üzere, eğer $U \leq e^{-\Delta/S^M}$ ise komşu çözümü kötü olmasına rağmen kabul et. Mevcut çözümü güncelle: $AFD_T^M \leftarrow AFD_T^K, Ç_1^M \leftarrow Ç_1^K, Ç_2^M \leftarrow Ç_2^K$.

6. Sıcaklığı, soğutma çizelgesine uygun bir şekilde düşür. Eğer, $S^M \leq S^{Bi}$ ise aramayı durdur. Yoksa adım 5'e geri dön.
7. Gevşetilmiş (sürekli değerler) olarak belirlenen ürün rotalarını ve ürün akışlarını, alt matematiksel modelin özel halini kullanarak tam sayı yap. Bulunan çözümleri ($Ç_1^*$ ve $[Ç_2^*]$) ve amaç fonksiyonu değerlerini ($AFD_1^*, [AFD_2^*]$ ve $[AFD_T^*] = AFD_1^* + [AFD_2^*]$) nihai sonuç olarak raporla.

Geliştirilen bu çözüm yaklaşımı, görüldüğü gibi yedi adımdan oluşmaktadır. Birinci adımda öncelikle, arama süresince kullanılacak olan sıcaklığa (S^M) en yüksek sıcaklık olan başlangıç sıcaklığı (S^{Ba}) ile ilk değer ataması gerçekleştirilir. İkinci adımda ise, bir hücresel düzenlemeye karşılık gelen bir çözüm üretilir. $Ç_1^M$, hangi dönemde hangi makinelerin hangi hücrelerde ve hangi konumlarda bulunduğunu belirleyen, hücresel düzenleme çözümüdür. Bu çözümde, ürün akışları ve ürün rotaları henüz belirlenmemiştir. Ardından, bu çok dönemli hücresel düzenlemeye bağlı olarak hesaplanabilen, makine satın alma, makine yer değiştirme ve ilk kurulum maliyetleri ile makine sabit maliyetleri toplanarak amaç fonksiyonu değerinin ilk kısmı hesaplanır (AFD_1^M).

Üçüncü adımda, hücresel düzenlemesi belirlenen çözümün, ürün akışları ve ürün rotalarını da belirlemek üzere doğrusal programlamadan faydalanılır. Öncelikle bu düzenlemeye uygun, doğrusal programlama alt problemi adı verilen bir matematiksel model oluşturulur. Algoritma ziyaret edilen her bir hücresel düzenleme çözümü için bu alt problemi uyarlamakta ve çözmektedir. Bu alt problem adı verilen matematiksel model çözülerek, ürün akış ve rotaları optimal olarak tespit edilir. Ancak burada, çözüm zamanından tasarruf sağlamak adına akış ve rotalara ilişkin karar değişkenleri, orijinal matematiksel modelden farklı olarak tam sayı değil, sürekli değerler alacak şekilde gevşetilmiş olarak bulunurlar. Elde edilen rotalar ve akış çözümü ($Ç_2^M$) kullanılarak, makinelerdeki ürünlerin işlenme maliyetleri, hücre içi ve hücreler arası taşıma maliyetleri bulunmuş olur (AFD_2^M). İkinci ve

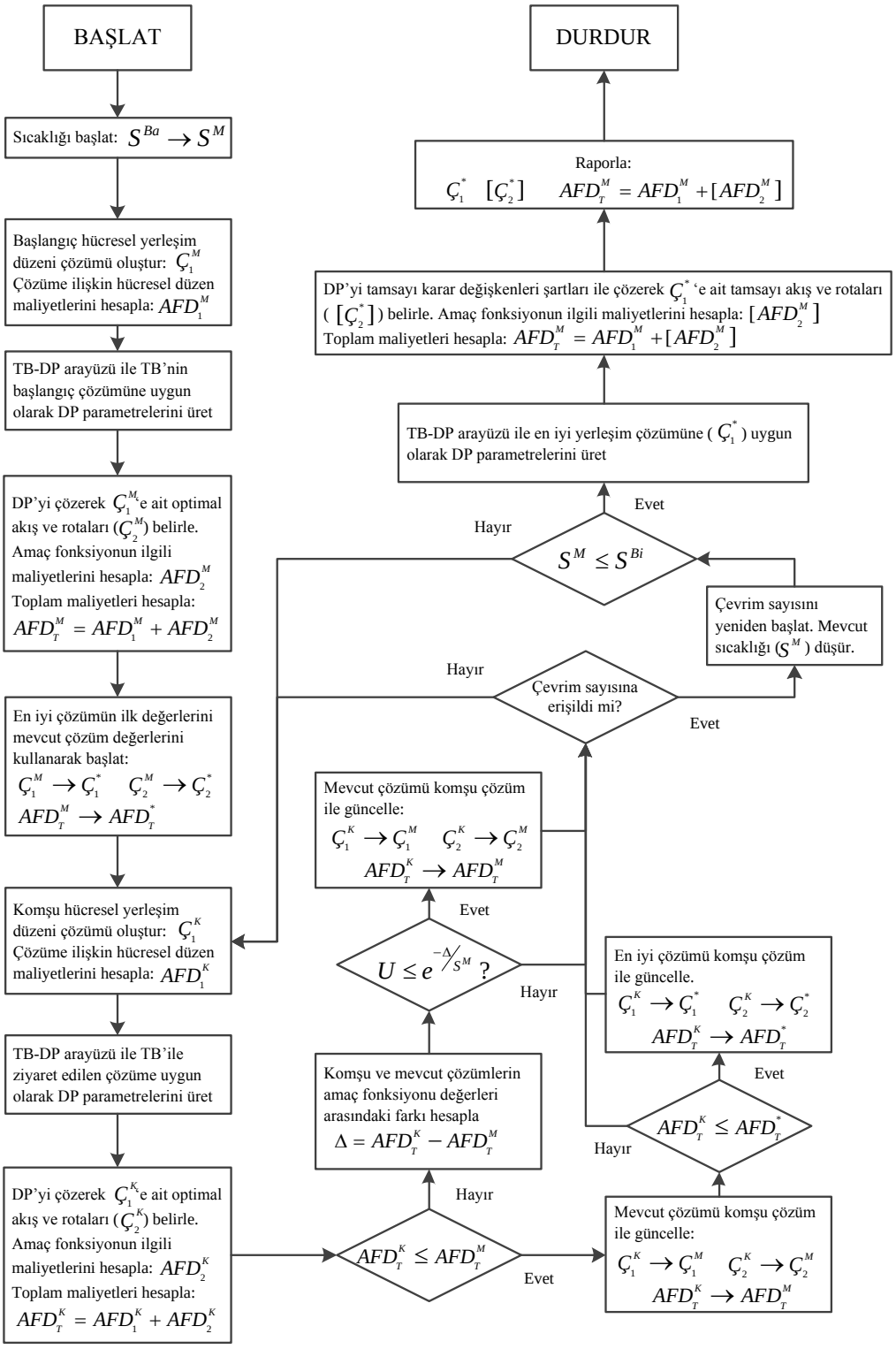
üçüncü adımda bulunan çözümler ($Ç_1^M$ ve $Ç_2^M$), aslında tek bir çözüme ait ayrıştırılmış kararların iki parçasıdır. Aynı şekilde, bu iki çözümden hesaplanan amaç fonksiyonu değerlerinin toplamı da ($AFD_1^M + AFD_2^M$) tek bir çözümün amaç fonksiyonu değeridir (AFD_T^M). Burada elde edilen amaç fonksiyonu değerleri, TB aramasında kullanılır. Dördüncü adımda ise, en iyi çözüm ($Ç_1^*$ ve $Ç_2^*$) ve buna ait amaç fonksiyonu değerlerinin (AFD_1^*, AFD_2^* ve AFD_T^*) ilk değerleri mevcut çözüm kullanılarak başlatılır (initialization).

Beşinci adımda arama süreci başlatılır. Öncelikle mevcut hücresel düzenleme çözümünden komşuluk mekanizmaları kullanılmak suretiyle bir komşu çözüm ($Ç_1^K$) üretilerek, bu düzenlemeye ait ilgili maliyetler hesaplanır (AFD_1^K). Bu maliyetler makine satın alma, makine yer değiştirme ve ilk kurulum maliyetleri ile makine sabit maliyetlerdir. Daha sonra ilgili çok dönemli hücresel düzenlemeye göre DP alt problemi düzenlenir ve çözülür. Böylece komşu çözümün akış ve rotalama çözümleri ($Ç_2^K$), yani hangi ürünün hangi operasyonunun kaç tanesinin hangi makinede işleneceği kararı ile makineler arası ürün akışlarının her bir ürün için kaçar tane olacağı belirlenmiş olur. Bu çözüme ait maliyet de hesaplanarak kaydedilir (AFD_2^K). Komşu çözümün toplam maliyeti de böylece elde edilir ($AFD_T^K = AFD_1^K + AFD_2^K$). Eğer ki komşu çözümün toplam maliyeti (AFD_T^K) en iyi çözümün maliyetinden (AFD_T^*) düşük ise öncelikle en iyi çözüm ve maliyeti güncellenir ($AFD_T^* \leftarrow AFD_T^K, Ç_1^* \leftarrow Ç_1^K, Ç_2^* \leftarrow Ç_2^K$). Değil ise en iyi çözümle ilgili herhangi bir güncelleme yapılmaz. Ardından TB'nin bir adımı olan kabul-ret süreçleri çalıştırılır. Bu adımlara göre, komşu çözümün toplam maliyeti mevcut çözümün maliyetinden düşükse ($AFD_T^K \leq AFD_T^M$) komşu çözüm kabul edilir ($AFD_T^M \leftarrow AFD_T^K, Ç_1^M \leftarrow Ç_1^K, Ç_2^M \leftarrow Ç_2^K$). Eğer daha iyi değil ise, TB'nin bir özelliği olarak, kötü çözüm rassal olarak kabul veya ret edilir. Bunun için öncelikle sürekli tek düze dağılıma (continuous uniform probability distribution) uygun bir rassal sayı üretilir (U). Daha sonra $\Delta = AFD_T^K - AFD_T^M$ olmak üzere eğer $U \leq e^{-\Delta/S^M}$ ise, komşu çözüm mevcut çözümden kötü olmasına rağmen kabul edilir ve mevcut çözüm, komşu çözüme ait bilgiler kullanılarak güncellenir ($AFD_T^M \leftarrow AFD_T^K, Ç_1^M \leftarrow Ç_1^K, Ç_2^M \leftarrow Ç_2^K$). Kabul ret adımları öncelikle çevrim sayısı (epoch length) kadar sıcaklık düşürülmeksizin tekrar edilir. Her bir çevrimin tamamlanmasının ardından sıcaklık, soğutma çizelgesine uygun bir şekilde düşürülür. Bu düşürme neticesinde de TB'nin bir özelliği olarak, kötü çözümlerin kabul edilme olasılığı düşürülmüş olur. Her bir sıcaklık seviyesinde, çevrim sayısı kadar komşu çözüm üretilmesinin ardından, yavaş yavaş aramanın en düşük sıcaklığı olan S^{Bi}'ye ulaşıldığında ise arama sonlandırılır.

Bu noktaya kadar elde edilen sonuç, akış ve rotalama değerleri gevşetilmiş bir sonuçtur ($Ç_2^*$). Aramada rota ve akışı gevşetilmiş bir şekilde arama yapılması, genel bir doğrusal programlama modeli olması sebebiyle, tam sayı aramaya göre ciddi zamansal avantaj sağlaması sebebiyle tercih edilir. Ancak bu değerlerin, problemin orijinal matematiksel modeline uygun bir şekilde tam sayı olarak elde edilmesi gerekmektedir. Bu nedenle, Bölüm 3.4'de anlatıldığı şekilde, makine kapasiteleri de göz önüne alınmak suretiyle, tam sayı değerlere uygun bir akış ve rotalama çözümü ($[Ç_2^*]$) ve bunların amaç fonksiyonu değeri ($[AFD_2^*]$) elde edilmiş olur. Buradaki $[Ç_2^*]$ çözümüne ait olan amaç fonksiyonu değeri, yuvarlatılmamış çözüm değerine eşit ya da daha büyüktür ($[AFD_2^*] \geq AFD_2^*$). Winston ve Goldberg'de (2003: 54) belirtildiği üzere, bu şekilde yapılacak bir yuvarlama, bu tip problemlerde kabul edilebilir kalitede çözümler üretir. Elde edilen sonuca ait toplam amaç fonksiyonu değeri ($[AFD_T^*] = AFD_1^* + [AFD_2^*]$) ve çözümler ($Ç_1^*$ ve $[Ç_2^*]$) ise raporlanır. Bu çözüm yaklaşımının algoritmasının akış diyagramı aşağıda verilmiştir.

3.3.2. Tavlama benzetimi

İlk kez Kirkpatrick, Gelatt ve Vecchi (1983) tarafından önerilen TB, metallere uygulanan tavlama ısıl işlemine benzerliği sebebiyle bu ismi almıştır. Tavlama işleminde belirli bir sıcaklığa kadar ısıtılan malzeme, mümkün olduğunca yavaş ve kontrollü bir şekilde soğutulmak suretiyle, içinde barındırdığı hatalardan arındırılıp çekirdek boyutları büyütülmüş olur. Benzer bir şekilde tavlama benzetimi yaklaşımında da, sıcaklık gibi sürekli azalan bir olasılık ile kötü sonuçları da aramaya dâhil edilir. Böylece aramanın yerel en iyi sonuçlardan birine takılıp kalmasının önüne geçilmiş olunur.



Şekil 3.1. Dinamik HİS tasarımı için önerilen çözüm yaklaşımı algoritmasının akış diyagramı

TB, kombinatoryal optimizasyon problemleri olarak adlandırılan, sonlu sayıda çözüm alternatifinin bulunduğu çözüm uzayı ile temsil edilen problemlerde, oldukça başarılı sonuçlar elde eden bir meta-sezgisel yaklaşımdır. Hatta, teorik olarak belli şartlarda

optimum sonuca ulaşabileceği bilinmektedir. Aşağıda bir en küçükleme problemi için kullanılabilecek TB meta-sezgiseline ait algoritma verilmiştir. Burada, kabul edilmiş bir mevcut çözümden (MÇ) üretilebilecek olan komşu çözüm (KÇ) kümesi KK(MÇ) ile ifade edilmiştir. Sırasıyla başlangıç, bitiş ve mevcut sıcaklıklar S^{Ba}, S^{Bi} ve S^{M} olarak gösterilmiştir.

1. Başlangıç sıcaklığı mevcut sıcaklık olarak atanır: $S^{M} \leftarrow S^{Ba}$
2. Çözüm uzayından bir başlangıç çözümü seçilerek *MÇ* olarak başlatılır.
3. *MÇ*'ye ait amaç fonksiyonu değeri, *f(MÇ)*, hesaplanır. *MÇ* ve *f(MÇ)* en iyi çözüm olarak ve onun amaç fonksiyonu değeri olarak kaydedilir: $Ç^{*} \leftarrow MÇ$ ve $f(Ç)^{*} \leftarrow f(MÇ)$. Ardından aramaya başlanır:
4. Arama adımları:

4.1. *KK(MÇ)*'den bir komşu çözüm, *KÇ*, seçilir.

4.2. *KÇ*'ye ait amaç fonksiyonu değeri, *f(KÇ)*, hesaplanır.

4.3. *f(KÇ)* < *f(MÇ)* ise çözüm KÇ doğrudan kabul edilir (*MÇ* ← *KÇ*) ve adım 5'e gidilir.

4.4. *f(KÇ)* > *f(MÇ)* ise Δ= *f(KÇ)* - *f(MÇ)* hesaplanır.

4.5. 0 ve 1 arası tekdüze dağılımdan bir *U* rassal sayısı üretilir.

4.6. Eğer $U \leq e^{-\Delta/S^{M}}$ ise *KÇ* kabul edilir (*MÇ* ← *KÇ*).

4.7. Eğer $f(Ç)^{*} < f(KÇ)$ ise en iyi çözüm komşu çözüm kullanılarak güncellenir: $Ç^{*} \leftarrow KÇ$ ve $f(Ç)^{*} \leftarrow f(KÇ)$

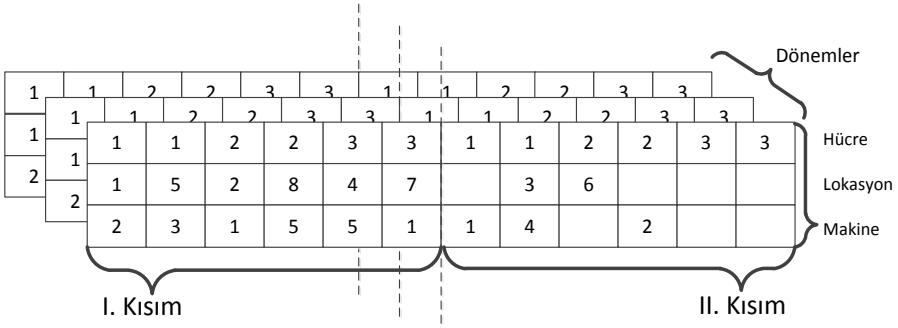
5. İlgili sıcaklık seviyesinde çevrim (epoch) sayısı kadar çözüm arandıysa, sıcaklık çizelgesine uygun olarak sıcaklık düşürülür ve S^{M} güncellenir.
6. Eğer $S^{M} < S^{Bi}$ ise arama durdurulur, en iyi çözüm ($Ç^{*}$) ve amaç fonksiyonu değeri ($f(Ç)^{*}$) raporlanır. Yoksa 4. adımdan devam edilir.

3.3.3. Çözüm gösterimi ve komşuluk mekanizmaları

Çözüm gösterimi ve komşuluk mekanizması, TB algoritması da dâhil olmak üzere, meta-sezgisel algoritmalarda arama esnasında kullanılan unsurlardır.. Bunların kalitesi hem arama sürecinin etkinliğini, hem arama zamanını hem de nihai çözüm kalitesini doğrudan etkiler. Bu çalışmanın konusu olan problemin çözümü için geliştirilen algoritmanın kullandığı komşuluk mekanizmaları ve çözüm gösterimleri aşağıda anlatılmıştır.

Çözüm Gösterimi

Önerilen çözüm yaklaşımının TB ile yürütülen kısmında, hücreleri oluşturan makinelerin tipleri ve sayıları ile hücre içi ve hücreler arası yerleşim kararları verilmektedir. Yani makinelerin hangi konumlara atanacağının yanı sıra, hangi konum-makine ikilisinin hangi hücreye dâhil olacağı da gösterim ile belirlenmektedir. Önerilen çözüm gösterimi Şekil 3.2'de verilmiştir.



Şekil 3.2. TB safhasında kullanılan örnek bir çözüm gösterimi

Şekil 3.2'de verilen çözüm gösterimi, elektronik ortamda üç boyutlu bir matris olarak değerlendirilmelidir. Üçüncü boyuttaki her bir iki boyutlu alt matris, bir döneme ait hücresel düzenleri gösterir. Bir alt matriste toplam $C \times B^U$ kadar sütun bulunmaktadır. Her matristeki bir sütun ise, bir makine-hücre-konum atamasını ifade eder. Bir sütundaki üç değerden herhangi biri değer almadı ise, o satırın atama olarak bir karşılığı olmadığı anlaşılır. Ayrıca matrisler birinci ve ikinci kısım olarak ikiye ayrılır. Birinci kısımdaki sütunların sayısı $C \times B^L$ kadardır ve tamamının bir değer alması gerekmektedir. Bu sayede hücrelerin minimum makine sayıları sağlanmış olmaktadır. İkinci kısımda ise, tüm sütunlardaki elemanların bir değer alması gibi bir zorunluluk yoktur.

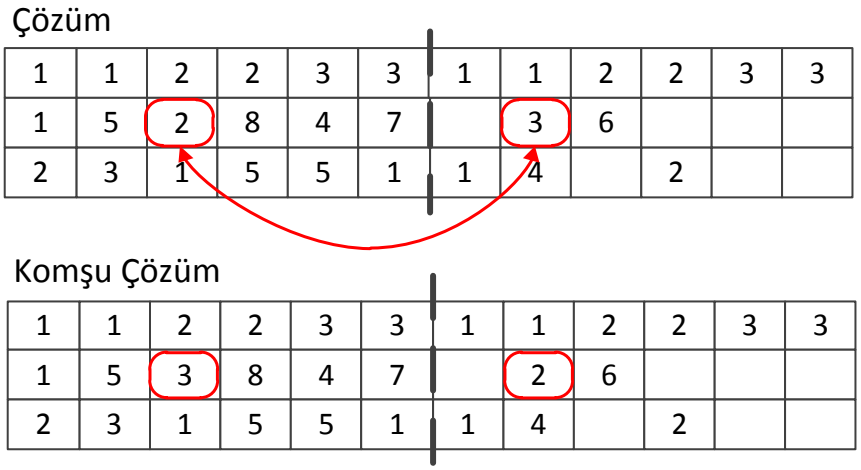
Bu matris problem boyutundan bağımsız olarak, üç tane satırdan oluşmaktadır. Bu satırlar yukarıdan aşağı olmak üzere sırasıyla, hücre numaraları, konum numaraları ve makine tipi numaralarıdır. Birinci satırdaki hücre numaraları, her bir hücrenin içinde barındırabileceği makine sayısı kadar tekrar eder. İkinci satırda ise HİS'in kurulacağı tesiste makinelerin kurulabileceği konumların numaraları vardır. Bu satırdaki numaralar sadece birer kez tekrar eder. Çünkü bir makine sadece bir hücreye atanır ve üzerinde sadece bir adet makine bulunabilir. Üçüncü satırda bulunan makine numaralarında ise, herhangi bir kısıtlama

yoktur. Her makine numarası hücre kapasiteleri ve konum sayısı müsaade ettiği kadar tekrar edebilir.

Komşuluk Mekanizmaları

Çözüm algoritması TB üzerine inşa edildiğinden ve TB'nin adımları da bir iyileştirme sezgiseli olarak çalıştığından, algoritma komşu çözümler bularak ilerlemektedir. Komşu çözümler bulmak için, TB çözüm algoritmasına uygun olarak, çözüm gösterimi üzerinde değişiklikler yapmak suretiyle komşu bir çözüm üretilir. Komşu çözüm üretmek için, algoritmanın içinde önceden tanımlanmış bu işlemlere komşuluk mekanizmaları adı verilir. Çözüm yaklaşımında önerilen komşuluk mekanizmaları şu şekildedir.

1. Konum değiştir: Rasgele bir dönem seçilir. Bu döneme ait hücresel düzen matrisinin rasgele iki sütunu seçilir. Bu sütunlardaki ikinci satır elemanları birbiriyle değiştirilir. Eğer sütunlardan biri birinci kısma, diğeri de ikinci kısma ait ise ve ikinci kısma ait sütunun ikinci satır elemanı "0" ise bu komşuluk mekanizması kullanılmaz. Bu mekanizmanın işleyişi Şekil 3.3'te örnek olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Bir dönem için konum değiştirme komşuluk mekanizmasının işleyişi

2. Hücre değiştir: Rasgele bir dönem seçilir. Bu döneme ait hücresel düzen matrisinin, rasgele iki sütunu seçilir. Seçilen ilk sütundaki ikinci satır elemanı, diğer sütunun ikinci satır elemanı ile değiştirilir. Aynı işlem üçüncü satır elemanları için de uygulanır. Eğer sütunlardan biri çözüm gösteriminin birinci kısmına, diğeri de ikinci kısmına ait ise ve

ikinci kısma ait sütunun satır elemanlarından herhangi biri “0” ise bu komşuluk mekanizması kullanılmaz. Bu mekanizmanın işleyişi Şekil 3.4’te örnek olarak gösterilmiştir.

Çözüm

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

Komşu Çözüm

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

Şekil 3.4. Bir dönem için hücre değiştirme komşuluk mekanizmasının işleyişi

3. Makine konumu değiştir: Rasgele bir dönem seçilir. Bu döneme ait hücresel düzen matrisinin rasgele iki sütunu seçilir. Bu sütunlardaki üçüncü satır elemanları birbiriyle değiştirilir. Eğer sütunlardan biri birinci kısma, diğeri de ikinci kısma ait ise ve ikinci kısma ait sütunun üçüncü satır elemanı “0” ise bu komşuluk mekanizması kullanılmaz. Bu mekanizmanın işleyişi Şekil 3.5’te örnek olarak gösterilmiştir.

Çözüm

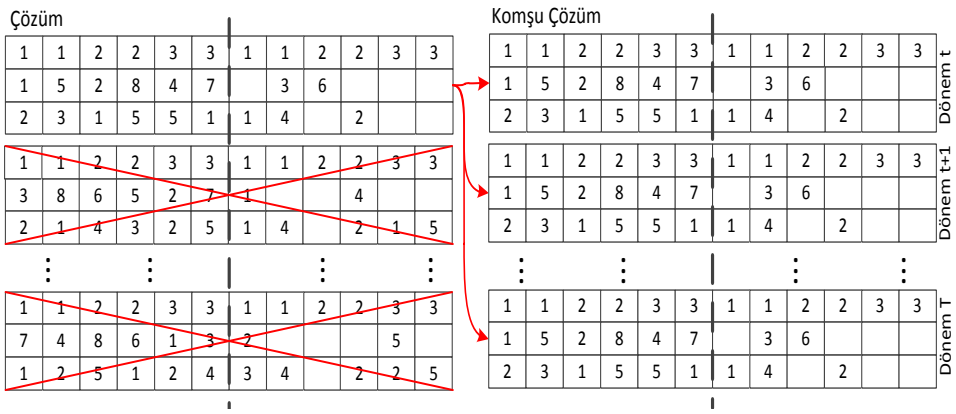
1	1	2	2	3	3	1	1	2	2	3	3
1	5	2	8	4	7		3	6			
2	3	1	5	5	1	1	4		2		

Komşu Çözüm

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

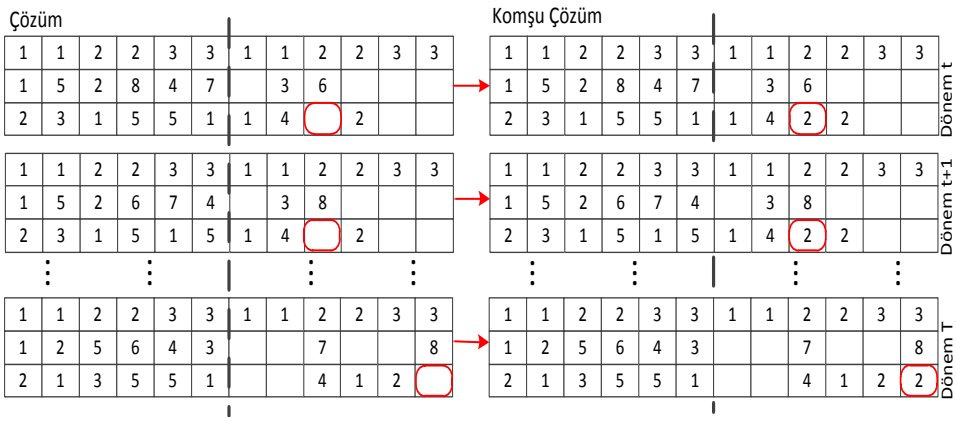
Şekil 3.5. Bir dönem için makine değiştirme komşuluk mekanizmasının işleyişi

4. Dönem kopyala: Rasgele seçilen bir döneme ait gösterim %50 olasılıkla kendinden önceki dönemlere, %50 olasılıkla da kendinden sonraki dönemlere kopyalanır. Böylece bu dönemler için yeniden düzenleme maliyetleri sıfırlanmış olur. Bu mekanizmanın işleyişi Şekil 3.6'da örnek olarak gösterilmiştir.



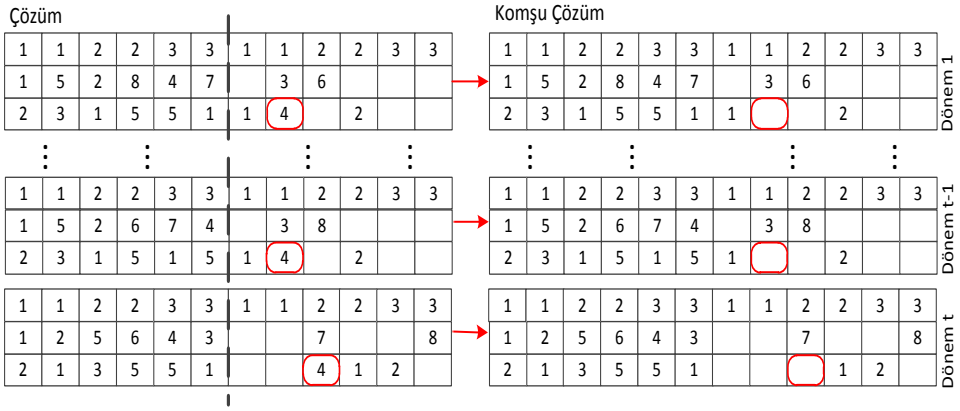
Şekil 3.6. Müteakip dönemlerde makine kopyalama komşuluk mekanizmasının işleyişi

5. Makine ekle: Rasgele seçilen bir makine tipi, rasgele seçilen bir dönem ve onu takip eden her dönem için, çözüm gösteriminde üçüncü satırda boş bulunan yerlerden birine veya atama olmayan sütunlardan herhangi birinin üçüncü satırına yerleştirilir. Eğer ki mevcut çözümde, herhangi bir dönem için ilgili dönemin talebini karşılayacak kadar makine mevcut değil ise, bu komşuluk mekanizması herhangi bir olasılığa bağlı olmaksızın doğrudan yürütülür. Aksi halde bir olasılığa bağlı olarak yürütülür. Bu mekanizmanın işleyişi Şekil 3.7'de örnek olarak gösterilmiştir.



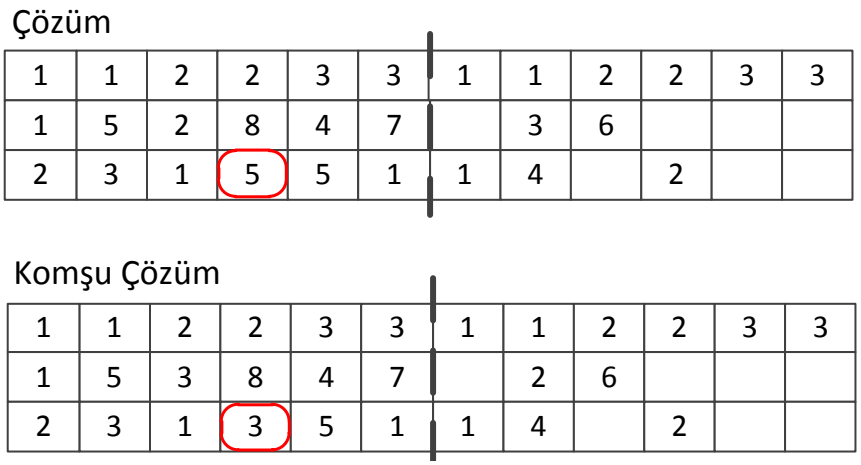
Şekil 3.7. Müteakip dönemlerde makine ekleme komşuluk mekanizmasının işleyişi

6. Makine çıkar: Rasgele seçilen bir makine tipi, rasgele seçilen bir dönemden geriye doğru olmak ve ilgili her dönemden birer tane olmak üzere çıkarılır. Makine çıkarma komşuluk mekanizmasının çalıştırılması, mevcut çözümde talebi işleyecek kadar kapasite bulunuyor olması şartına bağlıdır. Yani mevcut çözümdeki makinelerin sayısı talepleri karşılayacak kadar kapasite sunmuyorsa, makine çıkarma mekanizması ile komşu üretilmez. Bu mekanizmanın işleyişi Şekil 3.8'de örnek olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Müteakip dönemlerde makine çıkarma komşuluk mekanizmasının işleyişi

7. Makine tipi değiştir: Tüm dönemlere ait alt matrislerin üçüncü satırlarında ve ataması olan rasgele seçilmiş bir makine numarası, rasgele seçilmiş başka bir makine numarası ile değiştirilir. Bu mekanizmanın işleyişi Şekil 3.9'da örnek olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.9. Bir dönem için makine tipi değiştirme komşuluk mekanizmasının işleyişi

3.3.4. Doğrusal programlama

Doğrusal Programlama (DP), kısıtlı kaynakların kullanımını en iyi şekilde sağlamak için kullanılan, matematiksel programlamanın bir özel halidir. DP'de çözülebilecek olan matematiksel model, doğrusallık varsayımlarını sağlamalıdır. DP, 1947 yılında Dantzig'in Simplex metodu adını verdiği yöntemi geliştirmesi ile çok farklı alanlardaki problemlerin çözümünde kullanılmıştır. Bir DP modeli, karar değişkenleri, kısıtlar ve bir amaç fonksiyonundan oluşur. Amaç fonksiyonu, verilen sistemde en küçüklenmesi (minimizasyon) veya en büyüklenmesi (maksimizasyon) hedeflenen doğrusal bir matematiksel ifadedir.. Karar değişkenleri ise, amaç fonksiyonunun çıktısını değiştiren, karar vericinin en uygun değerlerini belirlemeye çalıştığı doğrusal programlama bileşenidir. Bir de bu karar değişkenlerinin değerleri belirlenirken, sağlanması gereken kısıtlar söz konusudur. DP'de, tüm kısıtları sağlayan bir karar değişken değerleri kümesi, bir olurlu (fizibil) çözüme karşılık gelirken, çözüm uzayı ise tüm olurlu çözümlerin kümesidir. DP'de karar değişkenleri, sürekli değerler alabildiği için en küçük problem uzayı için bile, sonsuz sayıda alternatif söz konusudur. Öte yandan, amaç fonksiyonunun en iyi değerini veren karar değişken değerleri kümesi de probleme ait optimal veya diğer bir ifadeyle en iyi çözümdür. Doğrusal programlamanın temel özelliği amacın ve kısıtların, karar değişkenlerinin doğrusal bir fonksiyonu olmasıdır.

3.3.5. Alt problem matematiksel modeli

Arama esnasında, ziyaret edilen her bir hücresel düzenleme çözümü ($Ç_1^K$) sadece her bir dönemde, hangi makinelerin hangi konumlara ve hangi konumların da hangi hücrelere atanacağını ifade etmektedir. Dolayısıyla da buradan sadece makine satın alma ve makine yer değiştirme kararları verilirken ($Ç_1^K$), bunlarla ilgili olan makine satın alma, makine kurma, makine kaldırma ve makine sabit giderlerini içeren, amaç fonksiyonunun sadece birinci kısmı hesaplanabilmektedir (AFD_1^K). Ancak, ilgili düzenleme için ürünlerin ne kadarının hangi makinelerde işlenip hangi makineler arasında ne kadarlık akış olacağını belirten kararlar henüz verilmemiştir ($Ç_2^K$). Bu akış ve rotalama bilgileri, ziyaret edilen çözümün kalitesini tespit edebilmek adına, her bir komşu çözüm için ayrı ayrı hesaplanmalıdır. Ziyaret edilen çözümlere ait akış ve rotalama bilgilerini hesaplayabilmek için, bir alt-problem çözülmelidir. Genel doğrusal programlama ile çözümü yapılan alt problem matematiksel modeli aşağıda verilmiştir.

Modeldeki indisler ve kümeler,

- P, ürünler kümesi $P = \{1, \dots, |P|\}$,
- R_p, p ürününe ait işlemler kümesi $R_p = \{1, \dots, |R_p|\}$,
- K, konumlar kümesi $K = \{1, \dots, |K|\}$,
- T, dönemler kümesi $T = \{1, \dots, |T|\}$,
- p, ürün indisi,
- r, işlem indisi,
- k, l , konum indisleri,
- t, dönem indisi,

şeklinde tanımlanmıştır.

Modelde kullanılan parametreler,

- A, birim ürün, birim mesafe hücre içi taşıma maliyeti,
- E, birim ürün, birim mesafe hücreler arası taşıma maliyeti,
- D_{pt}, t döneminde p ürününe olan talep,
- λ_{kl}, k ve l konumları arasındaki mesafe,
- L_{klt}, t döneminde k ve l konumlarındaki makineler aynı hücreye atanmış ise 1, değilse 0,
- μ_{kt}^{x}, k konumundaki makinenin t dönemindeki birim zaman kullanım maliyeti,
- C_{kt}^{x}, t döneminde k konumundaki makinenin kapasitesi,
- π_{prkt}^{x}, bir birim p ürününün r. işleminin t döneminde k konumunda işlenme süresi,
- α_{prkt}^{x}, p ürününün r. işlemi t döneminde k konumunda işlenebiliyorsa 1, değilse 0,

şeklinde verilmiştir.

Problemde değerleri belirlenen karar değişkenleri ise,

G_{prklt}, t döneminde p ürününün r. işinin k konumundaki makinede işlenen ve $r+1$. işlemi için l konumundaki makineye hareket eden parça sayısı,

g_{prkt}, t döneminde, p ürününün r. işinin k konumundaki makinede işlenen parça sayısı,

şeklinde belirlenmiştir.

Amaç Fonksiyonu;

$$min\ z = \sum_{t\epsilon T}\sum_{p\epsilon P}\sum_{r\epsilon R_p\{|R_p|\}}\sum_{k\epsilon K}\sum_{l\epsilon K} G_{prklt}\lambda_{kl}(1 - L_{klt})E$$

$$\sum_{t\epsilon T}\sum_{p\epsilon P}\sum_{r\epsilon R_p\{|R_p|\}}\sum_{k\epsilon K}\sum_{l\epsilon K} G_{prklt}\lambda_{kl}(L_{klt})A + \sum_{t\epsilon T}\sum_{p\epsilon P}\sum_{r\epsilon R_p}\sum_{k\epsilon K} g_{prkt}\pi^{x}_{prkt}\mu^{x}_{kt} \quad (0.18)$$

Kısıtlar;

$$g_{prkt} \leq \alpha^{x}_{prkt}D_{pt} \qquad \forall \quad p\epsilon P, r\epsilon R_p, k\epsilon K, t\epsilon T \quad (0.19)$$

$$\sum_{k\epsilon K} g_{prkt} = D_{pt} \qquad \forall \quad p\epsilon P, r\epsilon R_p, t\epsilon T \quad (0.20)$$

$$\sum_{p\epsilon P}\sum_{r\epsilon R_p} g_{prkt}\pi^{x}_{prkt} \leq C^{x}_{kt} \qquad \forall \quad k\epsilon K, t\epsilon T \quad (0.21)$$

$$\sum_{k\epsilon K} G_{prklt} = g_{p,r+1,lt} \qquad \forall \quad p\epsilon P, l\epsilon K, t\epsilon T, r\epsilon R_p\backslash\{|R_p|\} \quad (0.22)$$

$$\sum_{l\epsilon K} G_{prklt} = g_{prkt} \qquad \forall \quad p\epsilon P, k\epsilon K, t\epsilon T, r\epsilon R_p\backslash\{|R_p|\} \quad (0.23)$$

$$G_{prklt}, g_{prkt} \geq 0$$

Yukarıda verilen alt problem matematiksel modeli (Eş. 0.18-0.23), daha önce de belirtildiği gibi, geliştirilen çözüm yaklaşımı ile ziyaret edilen her bir hücresel düzenleme çözümü ($Ç_1^K$), diğer bir ifadeyle makine-hücre-konum ataması kararı için, ilgili çözüm ziyaret edilir edilmez bulunmalıdır. Bu matematiksel modelin bulduğu akış ve rota bilgileri, gevşetilmiş G_{prklt} ve g_{prkt} değişkenleri ile ifade edilir. Alt problem matematiksel modelinin amaç fonksiyonu (Eş. 0.18), üç ayrı maliyet bileşeninin toplanması neticesinde elde edilmektedir. Bunlardan birincisi, hücreler arası taşıma maliyetleridir. Bu, farklı hücrelere atanmış farklı konumlardaki makineler arasındaki, ürün taşımalarının maliyetlerinin toplanması ile elde edilir. İkinci bileşen ise, aynı hücrede bulunan farklı konumlara atanmış makineler arasındaki, ürün akışlarını kullanarak hücre içi taşıma maliyetini hesaplamaktadır. Bu iki bileşende de kullanılan L_{klt} parametresi, ziyaret edilen her bir hücresel düzenleme çözümü için ($Ç_1^K$) üretilmekte ve alt-problem matematiksel modeline parametre olarak gelmektedir. Oysa ki hatırlanacağı üzere orijinal problemin

matematiksel modelinde, bu atama kararı da bir karar değişkeni ile ifade edilmekte idi. ($Ç_1^K$) ile bu karar verildiği için, hücresel düzenleme atamaları artık bir karar değişkeni olmaktan çıkmış ve alt problem matematiksel modelinde parametreye dönüşmüştür.

3.3.6. Tavlama benzetimi ve doğrusal programlama arayüzü

Geliştirilen çözüm yaklaşımında, ziyaret edilen her bir hücresel düzenleme çözümüne (makine-konum-hücre ataması) karşılık, doğrusal programlama ile ürünlerin akış ve rotaları belirlenerek, bunlara ilişkin maliyetlerin hesaplanması gerekmektedir. Bunun için doğrusal programlama parametrelerinin her seferinde, hücresel düzenleme çözümlerine uyarlanması gerekmektedir. Çözüm yaklaşımında bu işlem bir arayüz vasıtasıyla gerçekleştirilmektedir. Bu arayüz, orijinal problemin bazı parametrelerini dönüştürmek suretiyle, alt problem matematiksel modeline uyarlamaktadır. Arayüzün orijinal problemden alıp dönüştürdüğü parametreler: μ_i, π_{pri}, α_{pri}, C_i olup, arayüzün dönüştürmesi neticesinde bunlara karşılık üretilen parametreler sırasıyla μ_{kt}^x, π_{prkt}^x, α_{prkt}^x, C_{kt}^x,'dir. Dikkat edilirse, bütün orijinal parametrelerdeki *i* indisi *k* ve *t* indisleri ile yer değiştirmiştir. Bunun sebebi, alt problem matematiksel modelinin makine tiplerini tanımamasından ileri gelmektedir. Her bir dönemde, bir konumdaki makine tipi değişebileceği için, *t* dönem indisi gerekmektedir. Bunun yerine alt problem matematiksel modeli, bir dönemde bir konuma atanan makinenin özelliklerini bilmek istemektedir. Bunlar ise yukarıdaki verilen sıraya göre, bir dönemde ilgili konumdaki makinenin işlem değişken maliyeti, işlem zamanları, ürün işlemi gerçekleştirme yetisi ve maliyetleridir. Algoritma içerisinde her ne kadar bu işlemler TB çözüm gösterimi kullanılarak ve doğrudan matrisler üzerinden yürütülse de, bu arayüz işleminin kolayca ifade edilip anlaşılabilmesi için, arayüz işleminin matematiksel ifadesi aşağıda verilmiştir. Algoritma içerisinde bir değişkene değer atamak suretiyle değil de, TB çözüm gösterimi ile üretilmesine rağmen, diyelim ki x_{ckit}^* orijinal modeldeki gibi ve modelin ilgili kısıtlarını sağlayan ikili makine-konum-hücre atama değişkenleri olsun. Bu durumda arayüzün ürettiği parametreler şu şekilde olur:

$$\pi^{x}_{prkt} = \sum_{c\epsilon N}\sum_{i\epsilon M} x^{*}_{ckit}\pi_{pri} \qquad \forall \quad p\epsilon P, r\epsilon R_p, k\epsilon K, t\epsilon T \qquad (0.24)$$

$$\alpha^{x}_{prkt} = \sum_{c\epsilon N}\sum_{i\epsilon M} x^{*}_{ckit}\alpha_{pri} \qquad \forall \quad p\epsilon P, r\epsilon R_p, k\epsilon K, t\epsilon T \qquad (0.25)$$

$$\mu^{x}_{kt} = \sum_{c\epsilon N}\sum_{i\epsilon M} x^{*}_{ckit}\mu_{i} \qquad \forall \quad k\epsilon K, t\epsilon T \qquad (0.26)$$

$$C^{x}_{kt} = \sum_{c\epsilon N}\sum_{i\epsilon M} x^{*}_{ckit}C_{i} \qquad \forall \quad k\epsilon K, t\epsilon T \qquad (0.27)$$

Orijinal matematiksel modelden alınıp alt problem matematiksel modeline uyarlanan parametrelerin haricinde, bir de L_{klt} parametresi vardır. Bu parametre de yukarıda bahsi geçen parametreler gibi, DP-TB arayüzü tarafından üretilmektedir ve aynı şekilde hücresel düzenleme çözümüne uygun olarak üretilmektedir. Bu karar değişkeni, farklı konumlara yerleştirilen iki makine arasındaki taşımaların mahiyetini, yani hücre içi veya hücreler arası olduğuna dair bilgiyi taşır. Bu parametre, eğer t döneminde farklı k ve l konumları aynı hücrede ise 1, değil ise 0 değerini almaktadır. Parametrenin hesaplanışının matematiksel gösterimi şu şekildedir.

$$L_{klt} = \sum_{c\epsilon N}\left(\sum_{i\epsilon M} x^{*}_{ckit}\sum_{i\epsilon M} x^{*}_{cljt}\right) \qquad \forall \quad k\epsilon K, t\epsilon T, k \neq l \qquad (0.28)$$

3.4. Rotalama ve Akış Karar Değişkenlerinin Tam Sayı Değerlere Yuvarlanması

Çalışmada ele alınan dinamik HİS tasarımı, orijinal matematiksel modeline ait ve akış ve rotalamayı belirten değişkenler ($F_{prcdklijt}$ ve f_{prckit}) aslında tam sayı olarak belirtilmiştir. Daha önce de belirtildiği gibi, bu değişkenler hangi makineler arasında hangi üründen ne kadar ürün taşındığını ve hangi makinelere kaçar tane ürün rotalandığını belirtmektedir. Oysa geliştirilen çözüm algoritmasının araması esnasında, her bir ziyaret edilen hücresel düzenleme çözümünün akış-rotalama çözümleri belirlenirken, genel doğrusal programlamanın, tam sayı doğrusal programlamaya göre zamansal açıdan avantajından faydalanmak için, bu değişkenler sürekli (continuous) kabul edilmektedir. Ancak, probleme dair geçerli bir çözüm olarak sunulabilmesi için, bu değerlerin de tam sayı olması gerekmektedir. Her bir ziyaret edilen çözüm için tam sayı değerler hesaplamak uzun zaman alacağından, tüm arama sürecinde elde edilen en iyi çözüm için bu yuvarlama

işlemi yapılır. Ancak makine kapasite kısıtları ve akış korunumu kısıtları, yuvarlamanın göz kararıyla veya rasgele yapılamasını engeller. Bu yüzden, en iyi hücresel düzenleme çözümü için alt-problem matematiksel modeli son defa, ancak bu kez rota ve akış değişkenlerine tamsayı olma şartı getirilerek yürütülür. Neticesinde, tüm aramanın en iyi hücresel düzenleme çözümü ve buna uygun tam sayı akış ve rota değişkenlerine sahip olarak elde edilmiş olur. Bu yuvarlama işleminde hiçbir ikili karar değişkeni bulunmadığı için bu yuvarlama işlemi optimal sonuç elde edilecek şekilde çok kısa sürede tamamlanabilmektedir. Ancak yine de büyük problemlere ait yuvarlama işlemlerinde tam sayılı DP çözücüsü için bir zaman sınırlaması getirilebilir. Bu yaklaşımın sezgisel doğasından ötürü bu yuvarlama işlemi için bulunacak olan bir olurlu çözüm zaten çoğu zaman yeterli olacaktır.

3.5. Alt Sınır Yaklaşımları

Geliştirilen çözüm yaklaşımının performansını ölçmek için, literatürde, Kia ve diğerlerinin (2012) yaptığı çalışma haricinde uygun problem veri seti bulunamamıştır. Öte yandan, Kia ve diğerleri (2012) tarafından verilen örnek problem sayısı da toplam 9 adettir ve yetersizdir. Ayrıca, özellikle de büyük boyutlu problemler için çalışmamızda elde edilen sonuçların, Kia ve diğerlerinin (2012) yaptığı çalışmada verilen sonuçlardan yüksek oranda kaliteli çıkması sebebiyle, çözümlerin kalitesini mutlak bir ölçeğe göre test etme ihtiyacı doğmuştur. Problem boyutunun büyümesi ile birlikte, örnek problemlerin en iyi (optimal) çözümlerini de elde etmek mümkün olmadığından, problemler için birer alt sınır çözüm değeri elde edilmesi uygun bulunmuştur.

Bu çalışmadaki gibi, amaç fonksiyonunun en küçüklenmesinin hedeflendiği bir optimizasyon problemi ele alınırsa, problemin kısıtlarını sağlayan herhangi bir çözüm, problemin üst sınırı olabilir. Diğer bir ifadeyle, bir arama yapıldığını farz edersek, arama esnasında bulunan en küçük amaç fonksiyonunu veren bir olurlu (fizibil) çözüm, problemin üst sınırı olur. Öte yandan böyle bir problemin alt sınırı ise, problemin en iyi çözümünün (optimal) değerine eşit veya daha küçük bir değer alabilir. Alt sınır değeri, en iyi çözümün bilinmediği ya da bulunamadığı en küçükleme problemlerinde, en iyi çözümün erişebileceği en düşük değeri temsil eder. Tam sayı ve 0-1 değişkenler içeren bir problemin matematiksel modelini kullanarak, tam sayı ve 0-1 değişkenleri gevşetmek suretiyle alt sınır değeri elde etmek, en basit alt sınır elde etme yöntemlerinden biridir.

Ancak bu şekilde elde edilen alt sınırlar ile problem, çözüm araması esnasında bulunan üst sınır arasındaki fark genelde çok yüksek olmakta, bunun sebebi ise genelde alt sınır değerinin sıkı olmamasından ileri gelmektedir. Böyle bir durumda elde edilen alt sınırın, geliştirilen algoritmanın performansını kıyaslamak için kullanılması uygun olmamaktadır.

Bu çalışmada ele alındığı gibi, tam sayılı matematiksel modellerin alt sınırlarının elde edilmesinde kullanılan bir diğer yöntem de Lagrange gevşetmesidir. Bu yöntem özet olarak, modeldeki bazı kısıtlar seçilerek, modelin kısıtları arasından çıkarılır. Sonra bu çıkarılan kısıtlar, sağ taraf değerleri ile bir araya getirilip bir Lagrange çarpanı ile birlikte amaç fonksiyonuna eklenir. Bu yöntemde sıkı alt sınırlar elde edilebilmesine rağmen asıl sorun, hangi kısıtların çıkarılacağının ve iyi bir alt sınır verecek Lagrange çarpanının değerinin belirlenmesinin ayrı bir çaba gerektirmesidir.

Bu tip dinamik veya diğer bir ifadeyle çok dönemli tesis düzenlemesi ve HİS tasarımı çalışmalarında, alt sınır elde etmek için izlenen bir yol daha vardır. Buna göre, öncelikle dönemler arası yeniden düzenleme maliyetleri ihmal edilir ve her bir dönemin talebi ya da bölümler arası akışı ayrı ayrı kullanılarak, her bir dönem için ayrı çözüm yapılıp optimal sonuçları ve bunların amaç fonksiyonu değerleri elde edilir. Daha sonra bu amaç fonksiyonu değerlerinin toplamı, bir alt sınır değeri olarak kullanılır. Ancak burada ele alınan problemin, tek dönem halinin bile oldukça karmaşık olması sebebiyle, her bir dönemin tek tek optimal sonuçlarını elde etmek de zaman alıcı olmaktadır. Bu yüzden, bu yaklaşım da uygun bulunmamıştır.

Bu çalışmada alt sınır değerleri elde etmek için, yukarıda bahsedilen alt sınır yaklaşımlarından farklı olarak, problemin yapısına özgü alt sınır matematiksel modelleri kullanılmıştır. Bunlardan birincisi (AS1) problemin orijinal matematiksel modelinin tüm tam sayı ve ikili karar değişkenlerinin gevşetilmesi ile elde edilmiştir. İkinci alt sınır (AS2) ise, orijinal matematiksel modeldeki Eş. 0.7'nin Eş. 3.29 ile değiştirilmesi ve yine tüm tam sayı ve ikili karar değişkenlerinin gevşetilmesi ile elde edilmiştir.

$$\sum_{p\epsilon P}\sum_{r\epsilon R_p}\sum_{c\epsilon N} w_{prckit}\pi_{pri} \leq C_i x_{ckit} \qquad \forall \quad i\epsilon M, t\epsilon T, k\epsilon K \tag{0.29}$$

Üçüncü alt sınır matematiksel modeli ise tesis üzerindeki konumlar ve hücreler ihmal edilerek oluşturulmuştur. Buna göre bu alt sınırda tüm akışların hücre içi ve minimum mesafe üzerinden gerçekleştiği varsayılmış ve eklenecek makine sayıları tam sayı olarak hesaplanmıştır. Akış ve rota karar değişkenlerinin gevşetildiği bu alt sınıra ait matematiksel aşağıda verilmiştir.

Modeldeki indisler ve kümeler,

- P, ürünler kümesi $P = \{1, \dots, |P|\}$,
- R_p, p ürününün işlemleri kümesi $R_p = \{1, \dots, |R_p|\}$,
- M, makine tipleri kümesi $M = \{1, \dots, |M|\}$,
- T, dönemler kümesi $T = \{1, \dots, |T|\}$,
- P, ürün indisi,
- r, işlem indisi,
- i, j, makine türü indisi,
- t, dönem indisi,

şeklinde tanımlanmıştır.

Modelde kullanılan parametreler,

- A, birim hücre içi taşıma maliyeti,
- $|K|$, konum sayısı,
- $|N|$, hücre sayısı,
- D_{pt}, t döneminde p ürününe olan talep,
- λ_{kl}, k ve l konumları arasındaki mesafe,
- λ^*, iki farklı konum arasındaki mümkün en kısa mesafe $\lambda^* = \min_{k \neq l} \lambda_{kl} \mid k, l \epsilon K$,
- δ_i, bir i makinesinin kurma maliyeti,
- β_i, bir i makinesinin bir dönemlik sabit maliyeti,
- π_{pri}, bir birim p ürününün r. işleminin i makinesinde işlenme süresi,
- μ_i, i makinesini birim zaman kullanma maliyeti,
- γ_i, bir birim i makinesini satın alma maliyeti,
- B^U, bir hücrece bulunabilecek maksimum makine sayısı,
- B^L, bir hücrece bulunabilecek minimum makine sayısı,
- C_i, bir i makinesinin bir dönemdeki kapasitesi,

- α_{pri}, *p* ürününün *r.* işlemi *i* tip makinede işlenebiliyor ise 1, değilse 0,

şeklinde verilmiştir.

Problemde değerleri belirlenen karar değişkenleri ise,

- x_{it}, *t* döneminde yerleşim düzenine atanmış *i* tipinden makine sayısı,
- W_{prijt}, *t* döneminde *r.* işlemi *i* makinesinde gerçekleştirilip *r+1.* işlemi için *j* makinesine hareket eden *p* ürününe ait ürün sayısı (akış karar değişkeni),
- w_{prit}, *t* döneminde, *r.* işlemi *i* makinesinde işlenen p tipi ürün sayısı (rotalama karar değişkeni),
- Q_{it}, *t* dönemi başında hücresel düzene eklenen *i* tipinde makine sayısı,

şeklinde belirlenmiştir.

Amaç fonksiyonu;

$$min\ z = \sum_{t\epsilon T}\sum_{p\epsilon P}\sum_{r\epsilon R_p\{|R_p|\}}\sum_{i\epsilon M}\sum_{\substack{j\epsilon M\\ j\neq i}} W_{prijt}A\lambda^* + \sum_{t\epsilon T}\sum_{p\epsilon P}\sum_{r\epsilon R_p}\sum_{c\epsilon N}\sum_{i\epsilon M} w_{prit}\pi_{pri}\mu_i$$
$$+\sum_{t\epsilon T}\sum_{i\epsilon M} Q_{it}\gamma_i + \sum_{r\epsilon R_p}\sum_{i\epsilon M} x_{it}\beta_i + \sum_{t\epsilon T}\sum_{i\epsilon M} Q_{it}\delta_i \qquad (0.30)$$

Kısıtlar;

$$\sum_{p\epsilon P}\sum_{r\epsilon R_p} w_{prit}\pi_{pri} \leq C_i x_{it} \qquad \forall \quad i\epsilon M, t\epsilon T \qquad (0.31)$$

$$\sum_{i\epsilon M} w_{prit} = D_{pt} \qquad \forall \quad p\epsilon P, r\epsilon R_p, t\epsilon T \qquad (0.32)$$

$$Q_{i1} = x_{i1} \qquad \forall \quad i\epsilon M \qquad (0.33)$$

$$Q_{it} = x_{it} - x_{i,t-1} \qquad \forall \quad i\epsilon M, t\epsilon T\backslash\{1\} \qquad (0.34)$$

$$\sum_{i\epsilon M} W_{p,r-1,ijt} = w_{prjt} \qquad \forall \quad p\epsilon P, j\epsilon M, t\epsilon T, r\epsilon R_p\backslash\{1\} \qquad (0.35)$$

$$\sum_{j\epsilon M} W_{prijt} = w_{prit} \qquad \forall \quad p\epsilon P, i\epsilon M, t\epsilon T, r\epsilon R_p\backslash\{|R_p|\} \qquad (0.36)$$

$$w_{prit} \leq x_{it}\alpha_{pri}D_{pt} \qquad \forall \quad p\epsilon P, r\epsilon R_p, i\epsilon M, t\epsilon T \qquad (0.37)$$

$$\sum_{i\epsilon M} x_{it} \leq K \qquad \forall \quad t\epsilon T \qquad (0.38)$$

$$\sum_{i\epsilon M} x_{it} \leq |N|B^{U} \qquad \forall \quad t\epsilon T \qquad (0.39)$$

$$\sum_{i\epsilon M} x_{it} \leq |N|B^{L} \qquad \forall \quad t\epsilon T \qquad (0.40)$$

Bu alt sınır (AS3) matematiksel modelinde, hücre içi akışlara göre yüksek maliyeti olmasından ötürü tüm hücreler arası akışlar ihmal edilmiştir. Ayrıca görüldüğü gibi bu matematiksel model, makinelerin atandığı konumlarla ilgili herhangi bir bilgi içermediğinden ve dolayısıyla orijinal matematiksel modeldeki gibi yer değiştirme maliyetleri hesaplanamayacağından, bu maliyetler ihmal edilmiştir. Ayrıca tüm taşımalarda, farklı makinelerin en fazla λ^{*} kadar birbirilerinden uzakta olabileceği düşünülerek, taşımaların maliyetlendirilmesi sağlanmıştır. Amaç fonksiyonu (Eş. 0.30) beş adet ifadenin toplamından elde edilmektedir. Bunlardan birincisi hücreler arası taşıma maliyetleridir. İkincisi ürünlerin makinelerdeki işlenme maliyeti, üçüncüsü ve dördüncüsü ise sırasıyla makinelerin satın alma ve dönemlik sabit giderleridir. Amaç fonksiyonundaki son ifade ise satın alınan makinelerin ilk kez kurulum maliyetini ifade etmektedir. Eş. 0.31 makinelerin kapasite kısıtıdır. Eş. 0.32 tüm ürünlerin tüm işlemlerinin gerçekleştirilmesini sağlar. Eş. 0.33 ve Eş. 0.34 ise makine satın alma kararlarının karar değişkenini hesaplar. Eş. 0.35 ve Eş. 0.36 ise akış korunumu kısıtlarıdır ve akış ile rotalama karar değişkenleri arasındaki dengeyi muhafaza eder. Eş. 0.37 ise ürünlerin sadece kendilerini işleyebilecek yeteneğe sahip makinelere sahip makinelere rotalanmasını sağlar. Eş. 0.38, makine atamalarında, tesis zeminindeki konum sayısının aşılmamasını sağlar. Öte yandan Eş. 0.39 ve Eş. 0.40 ise hücrelerin sahip olabileceği en az ve en fazla makine sayıları parametresinden faydalanarak tesis zemininde bulunması gereken en az ve en fazla makine sayılarını belirlemektedir.

Dördüncü alt sınır matematiksel modeli (AS4), her bir hücreye atanacak makine tiplerinin sayısını tam sayı olarak belirlemektedir. Ürünlerin makinelerdeki işlem zamanları, makinelerin satın alma ve sabit maliyetleri ile ilk kurulum maliyetleri, problemin asıl matematiksel modeline uygun olarak hesaplanmaktadır. Alt sınır matematiksel modelinde, konum indisleri çıkarıldığı için, makine yer değiştirmeleri toplam maliyet hesabında ihmal

edilmektedir. Ayrıca, orijinal matematiksel modelde müsaade edilen ve kesin bir şekilde hesaplanabilen, aynı hücre içindeki aynı tipteki iki makine arasındaki doğrudan malzeme transferleri de bu sebepten ötürü ihmal edilmektedir. Ancak, birbirini takip eden iki operasyon farklı hücrelerdeki aynı tipten iki makine arasında gerçekleşiyor ise, bu taşıma orijinal modelden kısmen farklı olarak hesaba katılmaktadır. Tüm farklı tip makineler arasındaki uzaklıklar, konumlar arası mesafe cetvelindeki iki farklı konum arasındaki, en düşük mesafe olarak kabul edilmektedir. Optimizasyon esnasında, aralarındaki malzeme transferi yoğun olan makineler mümkün olduğunca yakın konumlara atandığından, bu kabul sonucu açığa çıkan alt sınır ve orijinal model arasındaki amaç fonksiyonu farkı da en aza indirgenmektedir. Ayrıca orijinal matematiksel modeldeki akış ve rotalama değişkenleri olan, tamsayı $F_{prcdklijt}$ ve f_{prckit} gevşetilmek suretiyle bunların yerine yine akış ve rotalamayı temsil eden sürekli $W_{prcdijt}$ ve w_{prcit} karar değişkenleri kullanılarak alt sınır matematiksel modelinin kısa sürede çözülmesi ve ilgili değerin elde edilmesi hedeflenmiştir. Kullanılan alt sınır matematiksel modeline ait eşitlikler ve simgeler aşağıdaki verilmiştir.

Modeldeki indisler ve kümeler,

- P, ürünler kümesi $P = \{1, \dots, |P|\}$,
- R_p, p ürününün işlemleri kümesi $R_p = \{1, \dots, |R_p|\}$,
- N, hücreler kümesi $N = \{1, \dots, |N|\}$,
- M, makine tipleri kümesi $M = \{1, \dots, |M|\}$,
- T, dönemler kümesi $T = \{1, \dots, |T|\}$,
- P, ürün indisi,
- r, işlem indisi,
- c, d, hücre indisleri,
- i, j, makine türü indisi,
- t, dönem indisi,

şeklinde tanımlanmıştır.

Modelde kullanılan parametreler,

- A, birim hücre içi taşıma maliyeti,
- E, birim hücrelerarası taşıma maliyeti,
- $|K|$, konum sayısı,

- D_{pt}, *t* döneminde *p* ürününe olan talep,
- λ_{kl}, *k* ve *l* konumları arasındaki mesafe,
- λ^*, iki farklı konum arasındaki mümkün en kısa mesafe. $\lambda^* = \min_{k \neq l} \lambda_{kl} \mid k, l \epsilon K$,
- δ_i, bir *i* makinesinin kurma maliyeti,
- β_i, bir i makinesinin bir dönemlik sabit maliyeti,
- π_{pri}, bir birim *p* ürününün *r*. işleminin *i* makinesinde işlenme süresi,
- μ_i : *i* makinesini birim zaman kullanma maliyeti,
- γ_i, bir birim *i* makinesini satın alma maliyeti,
- B^U, bir hücrece bulunabilecek maksimum makine sayısı,
- B^L, bir hücrece bulunabilecek minimum makine sayısı,
- C_i, bir i makinesinin bir dönemdeki kapasitesi,
- α_{pri}, *p* ürününün *r*. işlemi *i* tip makinede işlenebiliyor ise 1, değilse 0,

şeklinde verilmiştir.

Problemde değerleri belirlenen karar değişkenleri ise,

- x_{cit}, *t* döneminde *c* hücresine atanmış *i* tipinden makine sayısı,
- $W_{prcdijt}$, *t* döneminde *r*. işlemi *c* hücresindeki *i* makinesinde gerçekleştirilip *r+1*. işlemi için *d* hücresindeki *j* makinesine hareket eden *p* ürününe ait ürün sayısı (akış karar değişkeni),
- w_{prcit}, *t* döneminde, *r*. işlemi *c* hücresindeki *i* makinesinde işlenen *p* tipi ürün sayısı (rotalama karar değişkeni),
- Q_{it}, *t* dönemi başında hücresel düzene eklenen *i* tipinde makine sayısı,

şeklinde belirlenmiştir.

Amaç fonksiyonu;

$$min\ z = \sum_{t \in T} \sum_{p \in P} \sum_{r \in R_p \{|R_p|\}} \sum_{c \in N} \sum_{\substack{d \in N \\ d \neq c}} \sum_{i \in M} \sum_{j \in M} W_{prcdijt} E \lambda^*$$

$$+ \sum_{t \in T} \sum_{p \in P} \sum_{r \in R_p \{|R_p|\}} \sum_{c \in N} \sum_{i \in M} \sum_{\substack{j \in M \\ j \neq i}} W_{prccijt} A \lambda^* + \sum_{t \in T} \sum_{p \in P} \sum_{r \in R_p} \sum_{c \in N} \sum_{i \in M} w_{prcit} \pi_{pri} \mu_i \qquad (0.41)$$

$$+ \sum_{t \in T} \sum_{i \in M} Q_{it} \gamma_i + \sum_{r \in R_p} \sum_{c \in N} \sum_{i \in M} x_{cit} \beta_i + \sum_{t \in T} \sum_{i \in M} Q_{it} \delta_i$$

Kısıtlar;

$$\sum_{p\in P}\sum_{r\in R_p} w_{prcit}\pi_{pri} \leq C_i x_{cit} \qquad \forall \quad c\epsilon N, i\epsilon M, t\epsilon T \qquad (0.42)$$

$$\sum_{c\in N}\sum_{i\in M} w_{prcit} = D_{pt} \qquad \forall \quad p\epsilon P, r\epsilon R_p, t\epsilon T \qquad (0.43)$$

$$Q_{i1} = \sum_{c\in N} x_{ci1} \qquad \forall \quad i\epsilon M \qquad (0.44)$$

$$Q_{it} = \sum_{c\in N} x_{cit} - \sum_{c\in N} x_{ci,t-1} \qquad \forall \quad i\epsilon M, t\epsilon T\{1\} \qquad (0.45)$$

$$\sum_{c\in N}\sum_{i\in M} W_{p,r-1,cdijt} = w_{prdjt} \qquad \forall \quad p\epsilon P, d\epsilon N, j\epsilon M, t\epsilon T, r\epsilon R_p\backslash\{1\} \qquad (0.46)$$

$$\sum_{d\in N}\sum_{j\in M} W_{prcdijt} = w_{prcit} \qquad \forall \quad p\epsilon P, c\epsilon N, i\epsilon M, t\epsilon T, r\epsilon R_p\backslash\{|R_p|\} \qquad (0.47)$$

$$w_{prcit} \leq x_{cit}\alpha_{pri}D_{pt} \qquad \forall \quad p\epsilon P, r\epsilon R_p, c\epsilon N, i\epsilon M, t\epsilon T \qquad (0.48)$$

$$\sum_{c\in N}\sum_{i\in M} x_{cit} \leq |K| \qquad \forall \quad t\epsilon T \qquad (0.49)$$

$$\sum_{i\in M} x_{cit} \leq B^U \qquad \forall \quad c\epsilon N, t\epsilon T \qquad (0.50)$$

$$\sum_{i\in M} x_{cit} \geq B^L \qquad \forall \quad c\epsilon N, t\epsilon T \qquad (0.51)$$

$x_{cit} \geq 0$ ve tamsayı, $Q_{it} \geq 0, W_{prcdijt} \geq 0, w_{prcit} \geq 0$

Geliştirilen bu matematiksel model yardımı ile çok dönemli dinamik HİS tasarımı probleminin çözümü için önerilen DP ve TB entegrasyonlu yaklaşımın performansının test edilmesi amaçlanmıştır. Geliştirilen bu matematiksel modelin amaç fonksiyonu (Eş. 0.41), altı adet ifadenin toplanması ile elde edilmiştir. Bunların birincisi hücreler arası maliyetlerin toplamını, ikincisi hücre içi taşımaların maliyetlerini, üçüncüsü ürünlerin işleme maliyetlerini, dördüncüsü makine satın alma maliyetlerini, beşincisi sahip olunan makinelerin sabit maliyetlerini, altıncısı ise satın alınan makinelerin ilk kurulum maliyetlerini hesaba katar. Alt sınır matematiksel modelinin on adet kısıt vardır. Eş. 0.42, bir dönemde, bir hücredeki, bir makine tipine atanacak işlemlerin toplam süresinin, bu hücreye atanan ilgili makine tipinin sayısını da göz önünde bulundurarak, bunların toplam kapasitesini geçmemesini sağlar. Eş. 0.43, bir ürün talebine karşılık gelen tüm işlemlerin, ilgili dönem içerisinde tamamlanmasını sağlar. Eş. 0.44 ve Eş. 0.45, sırasıyla ilk dönem ve

takip eden dönemlere ait makine satın alma karar değişkenlerinin değerlerini belirler ve satın alınan bir makinenin tesis düzeninden çıkarılmasını engeller. Eş. 0.46 ve Eş. 0.47 ise bu makinelerin akış ve rotalama karar değişkenleri arasındaki ilişkiyi belirleyen akış korunumu kısıtlarıdır. Eş. 0.48, bir hücreye rotalama yapılabilmesi için, ilgili hücrede ürünün gerekli işlemin gerçekleştirebilecek makinelerin bulunması şartını sağlar. Eş. 0.49, yapılacak düzenlemede atanacak makine sayısının, tesis zeminindeki sayısından fazla olmasını engellerken, Eş. 0.50 ve Eş. 0.51 ise, hücrede bulunması gereken en az ve en fazla makine sayılarına ilişkin kısıtları karşılar.

AS3'de olduğu gibi bu matematiksel modelde de konumlarla ilgili bir bilgi yoktur. Dolayısıyla AS3'deki gibi yine makine yer değişim bilgisi ihmal edilmektedir. Farklı tip makineler veya makine tipinden bağımsız olarak farklı hücrelerdeki makineler arasındaki tüm taşımaların minimum mesafe (λ^*) üzerinden maliyetlendirilmesi düşünülmüştür. Bu durum her ne kadar alt-sınırın gevşek olmasına sebep olabilecek gibi gözükse de, orijinal problemin optimal çözümlerinde de aralarında yoğun akış gerçekleşecek makineler mümkün olan en yakın yerlere konumlandırılmaya çalışılacağından, yeterince sıkı alt sınırlar sunmaktadır. Ayrıca alt sınır matematiksel modeli, aynı hücre içerisindeki iki aynı tip makine arasındaki taşımaları ve ilişkili maliyetleri de ihmal etmektedir. Aynı makinede gerçekleşebilecek iki işlem genel itibariyle, taşınmayıp birbirini takip eden işlemler aynı makinede yapılmaya zorlandığından, burada ihmal edilen taşıma maliyeti de düşük miktarda olmakta ve alt sınırın sıkılığını neredeyse hiç etkilememektedir.

Geliştirilen alt sınırlardan AS1 ve AS2, problemin orijinal matematiksel modelinden türetilmiştir. Bunlardaki tüm karar değişkenleri, orijinal matematiksel modelden gelen ikili ve tam sayı karar değişkenlerinin gevşetilmiş halleridir. Dolayısıyla bu iki alt sınıra ait karar değişkenlerinin sayısı orijinal matematiksel modeldeki ile aynıdır ve tüm karar değişkenleri süreklidir. AS3'te ise karar değişkenlerinin sayısı, akış ve rotalama değişkenlerinin indislerinin azalması ve makine kurulum ve kaldırma karar değişkenlerinin tamamen çıkarılması sebebiyle oldukça azalır. Ancak, AS3'te, kurulum kararı verilecek olan makinelerin sayısının tam sayı olarak belirtilmesi, AS3'ün çözüm zorluğunu, AS1 ve AS2'ye göre bir miktar artırır. AS4'te ise her bir hücreye atanacak olan makinelerin sayısı tam sayı olarak ve ayrı ayrı belirlenir. Dolayısıyla hem bu karara ait karar değişkenine, hem de rotalama ve akış karar değişkenlerine hücre indisleri gelmesi sebebiyle, AS4'teki karar değişkenleri sayısı AS3'tekinden fazladır. Dolayısıyla AS4'ü elde etmek için geçen

zamanın, AS3'ü elde etmek için gereken zamandan fazla olması beklenir. Öte yandan hem AS4'te hem de AS3'te, problemin orijinal matematiksel modelinde bulunan ikili tip karar değişkenlerinin olmaması çözüm zamanını olumlu yönde etkilemektedir.

Kia ve diğerleri (2012)'de verilen dokuz örnek problem kullanılmak suretiyle, üç farklı matematiksel model temel alınarak üretilen dört tane alt sınır değeri birbirileriyle kıyaslanmıştır. Matematiksel modeller, GAMS yazılımında, CPLEX çözücüsü kullanılarak ve her bir alt sınır matematiksel modeline ait koşum optimal sonuç elde edilinceye kadar çalıştırılarak elde edilmiştir. Bu alt sınırların değerleri Çizelge 3.1'deki gibidir. Çizelgede, her bir probleme ait en yüksek alt sınır değeri (*) işaretiyle belirtilmiştir.

Çizelge 3.1. Alt sınırların karşılaştırılması

Problem No	Optimal	Alt Sınır 1	Alt Sınır 2	Alt Sınır 3	Alt Sınır 4
1	67608,00	52898,00	53041,20	56356,99	67578,51*
2	103434,00	53959,00	65196,03	85059,00	103434,00*
3	148843,75	112680,00	127553,75	148575,95	148575,95*
4	190399,26	101390,00	148036,97	178686,88	190199,26*
5	-	136924,00	215773,66	263373,60	278481,53*
6	-	155868,00	165682,47	200410,94	204483,72*
7	-	187903,00	214889,77	254095,33	271103,99*
8	-	204407,00	253010,03	323213,66	334865,52*
9	-	234307,50	277597,24	355429,11	373642,31*

Hesaplamalar neticesinde, diğer alt sınırlar ile kıyaslandığında AS1'in oldukça düşük kaldığı ve sıkı bir alt sınır olmaktan oldukça uzak olduğu görülmektedir. Ayrıca AS1 ve AS2 arasındaki tek fark olan Eş. 0.29, AS2'nin ciddi miktarda iyileşmesini sağlamıştır. Ancak AS1 ve AS2'de makine sayılarının tam sayı olarak belirtilmemesinden ötürü bu alt sınırlar AS3 ve AS4'e göre zayıf kalmışlardır. AS3'te özellikle makinelerin tam sayı alacak şekilde belirtilmesi ve makine sayıları ile ilgili olarak verilen kısıtların kullanılması da alt sınırı sıkılaştırmaya yaramıştır. Ancak AS3'de hücrelerin ihmal edilmesi ve tüm taşımaların hücre içi taşımalarmış gibi düşük maliyetle hesaplanması alt sınırın halen istenen sıkılığa erişememesine sebep vermiştir. Hücrelere makine atama kararlarını verecek şekilde düzenlenen AS4 ile bu sorun aşılarak hücreler arası taşımalar da maliyetlendirilebilmiştir. Yapılan alt sınır karşılaştırması neticesinde AS4'ün diğer alt sınırlara göre daha sıkı çözümler sunduğu gözlemlenmiştir. Bundan ötürü, çalışmanın

ilerleyen bölümlerinde örnek problemlerin çözümündeki kıyaslamalarda AS4 kullanılmıştır.

3.6. Örnek Problem Çözümleri ve Çözüm Yaklaşımının Değerlendirilmesi

Geliştirilen dinamik hücresel imalat sistemi tasarımı yaklaşımının performansını test etmek için, ilk dokuzu literatürden derlenmiş, geri kalanları ise rasgele üretilmiş toplam 50 test problemi kullanılmıştır. Yine bu yaklaşımın performansını test etmek için, bu problemlerin tamamı alt sınır matematiksel modeline uyarlamak suretiyle de çözülmüştür. Ayrıca ilk dokuz problem için literatürdeki sonuçlar (Kia ve diğerleri, 2012) ile karşılaştırmalar yapılmıştır. Tüm problemlerin orijinal matematiksel modeli, GAMS optimizasyon yazılımı kullanılarak 10 saat süresince koşturulmuş ve bu süre sonunda elde edilen sonuçlar kıyaslamaya dahil edilmiştir. Geliştirilen algoritmanın çalıştırılması için, MATLAB ve GUROBI yazılımları bir arada kullanılmıştır. Çizelge 3.1'de çözümü yapılan problemlerin boyutları ile ilgili parametre bilgileri verilmiştir. Çizelge 3.2'de ise, önerilen çözüm yaklaşımı ile elde edilen sonuçlar verilmiştir. Çizelgede |P|, |R|, |K|, |T|, |N|, |M| sırasıyla ürün, işlem, konum, dönem, hücre ve makine tipi sayılarını ifade etmektedir.

Çizelge 3.2. Problemlerin boyut parametreleri

Prb. No	|P|	|R|	|K|	|T|	|N|	|M|	Prb. No	|P|	|R|	|K|	|T|	|N|	|M|
1	2	2	4	2	2	2	26	10	7	12	2	4	10
2	2	3	5	2	2	3	27	15	6	6	4	3	8
3	3	3	6	2	2	4	28	15	6	8	3	4	10
4	4	3	7	2	3	4	29	15	6	10	2	4	8
5	4	4	9	3	3	4	30	15	6	12	2	4	10
6	5	3	8	2	3	5	31	20	5	6	4	3	8
7	5	3	8	3	3	5	32	20	5	8	3	4	10
8	5	4	11	3	3	5	33	20	5	10	2	4	8
9	6	3	10	4	3	6	34	20	5	12	2	4	10
10	8	4	12	3	4	8	35	25	4	6	4	3	8
11	12	4	15	2	4	8	36	25	4	8	3	4	10
12	15	3	8	3	4	8	37	25	4	10	2	4	8
13	20	4	9	2	4	10	38	25	4	12	2	4	10
14	25	3	9	2	4	10	39	30	3	6	4	3	8
15	30	3	9	2	4	10	40	30	3	8	3	4	10
16	40	3	12	2	5	10	41	30	3	10	2	4	8
17	20	3	16	2	6	12	42	30	3	12	2	4	10
18	15	3	16	3	6	12	43	35	3	6	4	3	8
19	15	4	16	2	6	15	44	35	3	8	3	4	10
20	20	3	16	2	8	12	45	35	3	10	2	4	8
21	15	3	8	3	4	8	46	35	3	12	2	4	10
22	25	3	9	2	4	10	47	40	3	6	4	3	8
23	10	7	6	4	3	8	48	40	3	8	3	4	10
24	10	7	8	3	4	10	49	40	3	10	2	4	8
25	10	7	10	2	4	8	50	40	3	12	2	4	10

Çizelge 3.3. Problem çözüm ve alt sınır değerlerinin kıyaslanması

	Geliştirilen Yaklaşım				Kia ve diğerleri (2012)		GAMS/CPLEX (3.6×10^4s)		Alt Sınır	
Prb. No.	Maksimum	Ortalama	Minimum	Zmn. (sn)	Sonuç	Fark (%)	Sonuç	Fark (%)	Sonuç	Fark (%)
1	*67608,00	*67608,00	*67608,00	21,5	67705,43	-0,14	*67608,00	0,00	67578,51	0,0
2	*103434,00	*103434,00	*103434,00	35,0	104273,40	-0,81	*103434,00	0,00	103434,00	0,0
3	*148843,75	*148843,75	*148843,75	58,1	153772,66	-3,31	*148843,75	0,00	148575,95	0,2
4	191452,93	190663,43	*190399,26	96,3	202016,58	-6,1	*190399,26	0,00	190199,26	0,1
5	292530,87	289759,91	287787,94	527,7	319125,53	-10,9	283574,60	1,49	278481,53	3,2
6	212673,23	209314,17	205121,34	151,2	239174,64	-16,6	205117,41	0,00	204483,72	0,3
7	277894,84	275463,66	274444,2	325,8	336417,29	-22,6	271947,06	0,92	271103,99	1,2
8	354696,88	349553,44	343376,2	1102,7	428877,71	-24,9	350269,79	-1,97	334865,52	2,5
9	391102,61	382798,30	377739,69	1161,9	483149,76	-27,9	407883,25	-7,39	373642,31	1,1
10	495809,46	480982,60	471923,41	1997,6	—	—	543812,57	-13,22	464322,52	1,6
11	384456,67	381130,96	376377,64	2131,3	—	—	—	—	369832,57	1,7
12	420470,42	418305,17	412671,57	822,0	—	—	426268,20	-3,19	399951,50	3,1
13	596893,78	583298,23	576938,5	806,5	—	—	580975,50	-0,69	571460,50	0,9
14	478995,37	477500,32	476412,93	926,7	—	—	488971,17	-2,57	476378,08	0,0
15	589234,42	578603,92	570580,72	1051,7	—	—	—	—	559300,11	2,0
16	700998,12	685367,78	672397,18	3319,7	—	—	—	—	665792,00	1,0
17	457214,69	456794,31	456332,79	3987,7	—	—	—	—	456312,81	0,0
18	498110,44	491367,78	486322,19	6796,1	—	—	—	—	486318,43	0,0
19	466568,75	463092,39	461804,46	4494,6	—	—	—	—	461797,88	0,0
20	463276,57	438932,82	433782,02	3845,5	—	—	—	—	431726,73	0,5
21	411049,6	395942,72	392462,52	737,2	—	—	392462,52	0,00	378447,03	3,6
22	479102,13	477697,30	475486,92	805,7	—	—	480642,72	-1,07	472924,00	0,5
23	103925,23	102340,11	101460,1	1335,6	—	—	—	—	99576,24	1,9
24	53608,88	52275,84	51579,2	1569,3	—	—	—	—	50881,39	1,4
25	68038,08	67223,43	66190,08	1754,0	—	—	—	—	62807,31	5,1
26	40757,11	40131,45	39953,45	2472,6	—	—	—	—	38748,70	3,0
27	114582,83	112892,22	111698,32	1796,3	—	—	—	—	109135,40	2,3
28	94692,03	92961,84	91660,25	2271,8	—	—	—	—	88631,13	3,3
29	56819,79	55192,21	53090,58	1821,4	—	—	—	—	51586,48	2,8
30	64853,36	61026,33	59587,55	3238,1	—	—	—	—	57535,86	3,4
31	122946,29	122812,60	122225,35	1802,0	—	—	—	—	117715,33	3,7
32	90363,43	86852,18	85836,19	2282,4	—	—	—	—	82570,19	3,8
33	78854,64	76187,82	75028,52	2146,5	—	—	—	—	72635,95	3,2
34	61019,21	57458,07	55868,66	3505,8	—	—	—	—	54166,63	3,0
35	106402,04	106026,18	105945,75	1748,6	—	—	—	—	104859,38	1,0
36	86917,52	86322,93	86138,61	2252,7	—	—	—	—	83911,86	2,6
37	45640,51	44702,61	43130,5	1648,2	—	—	—	—	42345,00	1,8
38	51759,94	51391,06	51160,33	2779,0	—	—	—	—	50038,83	2,2
39	94159,09	93364,24	92757,58	1113,4	—	—	96684,89	-4,06	91715,54	1,1
40	68596,29	67949,08	67823,27	1591,4	—	—	—	—	66494,42	2,0
41	54088,96	53857,40	53378,99	1278,5	—	—	—	—	51745,15	3,1
42	46908,33	44802,21	42948,67	2183,5	—	—	—	—	42253,44	1,6
43	119755,53	118856,46	118504,94	1382,5	—	—	130561,96	-9,23	115064,73	2,9
44	90534,27	89300,38	88504,3	1858,6	—	—	—	—	86770,66	2,0
45	57123,82	55690,24	55430,4	1565,2	—	—	—	—	53380,89	3,7
46	48096,22	47752,35	47294,32	2458,3	—	—	—	—	45392,67	4,0
47	161569,27	159672,39	158366,69	1695,9	—	—	—	—	154257,76	2,6
48	103153,78	100285,34	98922,44	2150,1	—	—	—	—	96175,24	2,8
49	65030,64	63586,98	62657,56	1936,8	—	—	—	—	60768,11	3,0
50	55535,55	54958,93	54189,79	3351,2	—	—	—	—	52281,94	3,5

Üretilen ve literatürden derlenen test problemleri geliştirilen algoritma ile 10'ar kez çözülmüş ve bu sonuçlar Çizelge 3.3'de verilmiştir. Çizelgedeki "Maksimum", "Ortalama", "Minimum." ve "Zmn." sütunları, sırasıyla bu yürütümlerin en kötü, ortalama ve en iyi çözümleri ile ortalama çözüm zamanlarını vermektedir. Ardından her bir problem için GAMS optimizasyon yazılımı kullanılarak, alt sınır matematiksel modeli ile alt sınır sonuçlar bulununcaya kadar çalıştırılmıştır. Son olarak, GAMS optimizasyon yazılımı ile problemin orijinal matematiksel modeli 10 saat süreyle sınırlandırılarak çözülmüş ve bu

süre sonunda elde edilen en iyi çözüm değeri bulunmuştur. Çizelge 3.3'de verilen bu sonuçlar incelendiğinde, Kia ve diğerlerinin (2012) çalışmalarından alınan test problemlerinin (ilk dokuz problem) hepsinde, önerilen yaklaşımın çözüm sonuçları Kia ve diğerlerinin (2012) yaklaşımından daha iyi sonuçlar bulmuştur. Problem boyutu arttıkça, geliştirilen algoritmanın sunduğu çözüm kalitesi ile Kia ve diğerlerinin (2012) sunduğu yaklaşımın çözüm kalitesi arasındaki fark artmaktadır. Bu fark Kia ve diğerlerinin (2012) çözdüğü en büyük problem olan 9 numaralı problemde %28 seviyesini bulmaktadır. Yani geliştirilen algoritma ile Kia ve diğerleri (2012) tarafından sunulan çözüm yöntemi ile bulunan sonuçlar, % 0,14-% 27,9 arasında değişen oranlarda iyileştirmeler sağlanmıştır. İyileştirme oranları hesaplanırken, geliştirilen yaklaşıma ait "minimum" sütunu kullanılmıştır. Bu oranlar, iki algoritma ile elde edilen sonuçların aralarındaki farkın "minimum" sütunundan gelen değere bölünmesi ile elde edilmiştir.

$$\frac{\left(AFD^{Kia} - AFD^{Min}\right)}{AFD^{Min}} \tag{0.52}$$

İkinci aşamada, geliştirilen çözüm yaklaşımı ile elde edilen sonuçlar, GAMS yazılımı ile orijinal matematiksel modelin 10 saat yürütülmesi neticesinde elde edilen sonuçlarla kıyaslanmıştır. GAMS yazılımı, ilk 4 problem için kanıtlanmış optimal çözümleri bulabilmiştir. Bu çözümlerin sonuçları Çizelge 3.3'de de (*) işaretiyle belirtilmiştir. Geliştirilen algoritma, bu dört problem için de optimal sonuçlara ulaşmıştır. GAMS programı ile olurlu çözümlerin bulunduğu tüm problemler için ise geliştirilen çözüm yaklaşımı daha iyi çözümler bulmuştur. Örneğin, GAMS'in 10 saatlik çalıştırılması sonucunda olurlu bir çözüm bulunan 10. problem için, geliştirilen yaklaşım %13 oranında daha iyi bir çözüm bulabilmiştir. Çizelge 3.3'nin ilgili sütununda "—" işareti verilen satırlara karşılık gelen problemler için, 10 saat sonunda GAMS yazılımının bir çözümün bulamadığı gösterilmektedir. Bunun temel sebebi, problemlerin boyutlarının artmasıdır. Bu yüzden, herhangi bir çözüm bulunamayan problemlerin çözüm sonuçlarını kıyaslayabilmek için, sadece alt sınır değerleri kullanılabilecektir.

Alt sınır matematiksel modeli her bir problem için düzenlenmiş ve GAMS yazılımı bu modelin optimal sonucu elde edilene kadar çalıştırılmıştır. Alt sınır değeri adından da anlaşılabileceği gibi, bulunabilecek en uç noktayı ifade eder. Optimal çözüm değerinin, alt sınırdan büyük olması beklenir. Ama bazı durumlarda alt sınır ve optimal sonuç birbiri ile

aynı değere sahip olabilir. Bunun bir örneği, 2 numaralı problemde görülmüştür. 2 numaralı problem için optimal çözüm değeri ile alt sınır değeri ile aynıdır ve 103434,0'lık bir maliyet değeri bulunmuştur. Bu çalışmadaki gibi bir minimizasyon problemi için, optimal sonucun bu değerden daha düşük olamayacağı anlaşılmalıdır. Alt Sınır ≤ Optimal Sonuç ≤ Üst sınır olduğundan ve geliştirilen algoritma ile elde edilen sonuçlar üst sınır olarak düşünülebileceğinden, alt sınır değerleri ile geliştirilen algoritmanın ürettiği sonuçlar arasındaki farkın dar olmasından iki yönlü çıkarım yapılabilir. Birinci çıkarım, alt sınırın kaliteli bir alt sınır olduğu ve probleme özgü kıyaslamalarda kullanılabilecek kalitede sonuçlar üretebildiğidir. İkinci çıkarım ise, geliştirilen algoritmanın optimal çözüme yakın çözümler üretebildiğidir. Anlaşılacağı üzere alt sınır ile algoritmanın ürettiği sonuç arasındaki farkın bir kısmı, alt sınırın bir miktar gevşek kalmasından bir kısmı da geliştirilen algoritmanın optimalden uzak olmasından olabilir. Geliştirilen algoritmanın, optimal sonucu bulduğu veya alt sınır değerinin optimal değer ile çakıştığı bir durum da olabilir.

Alt sınır değerleri ile geliştirilen algoritmanın ürettiği değerler kıyaslandığında aradaki farkın en yüksek % 4 civarında olduğu gözlemlenmiştir. Buradaki farkın bir kısmının alt sınır ile optimal sonuç arasındaki farktan kaynaklandığını düşünülürse optimal sonuca %4'ten daha iyi bir oranda yaklaşıldığı sonucu çıkarılabilir. En kötümser durumda bile, bu farkın tamamının geliştirilen yöntemin bulduğu sonucun optimal sonuca uzaklığı olduğu şeklinde bir değerlendirme yapılsa bile, geliştirilen algoritmanın kaliteli sonuçlar bulmakta gayet başarılı olduğu söylenebilir. Zira optimizasyon yazılımlarının çözüm bile bulamadığı süreden daha kısa zaman zarfında, %4 ve hatta altında bir fark ile optimal sonuca yaklaşmak, geliştirilen sezgisel bir algoritma için olumlu olarak değerlendirilebilir.

4. STOKASTİK DİNAMİK HÜCRESEL İMALAT SİSTEMİ TASARIMI PROBLEMİ

Ürün karışımı ve talepteki değişkenlikler, bir hücresel imalat sisteminin performansının düşmesine sebep olur (Saad, 2003). Bu değişkenlikler belirsizlikten kaynaklandığı gibi, daha önceden öngörülebilir değişiklikler de söz konusu olabilir. Bu durumlardan ilki stokastik yaklaşım ile ele alınırken, ikincisi ise yeniden düzenlemelerin göze alındığı dinamik yaklaşım ile ele alınır. Stokastik yaklaşımda, belirsizlik karşısında kötüleşme ihtimali düşük olan (robust) sağlam çözümler aranırken, dinamik yaklaşımda ise, değişim miktarının bilindiği bir talep karşısında, yer değiştirme ve taşıma maliyetleri arasındaki ödünleşim göz önüne alınarak, en uygun çözüm aranır. Stokastik dinamik yaklaşım ise, yer değiştirmelerin göz önüne alınıp her bir dönem için taleplerin stokastik olarak bilindiği bir tasarımı ele alır. Stokastik dinamik yaklaşım, ayrı ayrı olarak hem dinamik hem de stokastik yaklaşımın en genel hali şeklinde ifade edilebilir. Bu bölümde stokastik dinamik HİS (SDHİS) tasarımı için çözüm yaklaşımları önerilecektir.

4.1. Stokastik Dinamik HİS Tasarımı Probleminin Tanımı

SDHİS tasarımında amaç, sistem veya çevre koşulları kaynaklı belirsizliklerin ve değişimlerin olduğu bir ortamda, en uygun hücre oluşturma, hücre içi yerleşim ve hücreler arası yerleşim kararları verilmektedir. Ele alınan SDHİS tasarımı probleminde, belirsizliğin tek kaynağının ürün taleplerinin öngörülemezliği olduğu varsayılmış ve sistemden kaynaklanabilecek diğer sebepler ihmal edilmiştir. Her bir dönemdeki bir ürüne ait talebin parametreleri önceden bilinen bir normal dağılıma uyduğu ve bu parametrelerinin de bilindiği varsayılmaktadır. Ayrıca her bir ürünün talebinin diğer dönemlerdeki taleplerinden ve diğer ürünlere olan taleplerden bağımsız olduğu varsayılmıştır.

Burada ele alındığı şekliyle, SDHİS tasarımının amacı, bir HİS'teki hücreleri oluşturan makine tiplerinin ve sayılarının yanı sıra, bunların hücre içindeki birbirilerine göre göreceli konumlarının ve hücrelerin kendi aralarındaki konumlarının da belirlenmesidir. Oysa bu problemin dinamik halinde ise (Bölüm 3.2), bu kararların yanı sıra çok dönemli olarak, hangi ürünün hangi operasyonunun hangi makinede işleneceği kararı ve ürünlerin hangi makineler arasında akacağı kararı verilmektedir. Ancak gerçek taleplerin ne olacağı önceden kesin olarak bilinemediğinden, bu kararların da kesin olarak verilmesi mümkün

olmamaktadır. Ancak bu kararlar hücre içi akış, hücreler arası akış ve ürünlerin işlenme maliyetleri olarak karşılık bulmaktadır. Dolayısıyla çok dönemli olarak hücre oluşturma ve yerleşim kararları verilen bir sistemde, talepler stokastik olarak alınsa da, bu maliyetler göz ardı edilemez. Bu yüzden burada basit bir varsayım yapılmış ve gerçek talepler gerçekleştiğinde, sistem karar vericilerinin mevcut hücre düzenini kullanarak optimal rota ve akış kararlarını verebilecekleri varsayılmıştır. Geliştirilecek olan çözüm yaklaşımı da bu varsayım üzerine oturtulmuştur. Verilmiş olan bir yerleşim düzeni için, Bölüm 3.3.5'teki matematiksel model kullanılarak, bu akış ve rotaların optimal olarak belirlenmesi çok kolay olduğundan, bu varsayımın gerçekçi bir varsayım olduğunu düşünebiliriz.

4.2. Çözüm Yaklaşımları

Problemin deterministik dinamik halinde (Bölüm 3.2) Bölüm 3.3'teki matematiksel model kullanılarak, verilen bir hücresel düzen için ürün akışları ve ürün rotaları doğrusal programlama aracılığıyla rahatlıkla bulunabiliyordu. Ancak problem stokastik şartlar altında ele alındığında, talebin olasılıklı yapısı gereği, burada farklı bir yaklaşım kullanılmasına gereksinim duyulmuştur.

Braglia ve diğerleri (2005) tarafından gösterildiği üzere, konumlar arasındaki akış hacimlerinin parametreleri bilinen bağımsız normal dağılımla belirtildiği durumlarda, bir yerleşim düzeninin taşıma maliyetlerinin dağılım parametreleri de normal dağılımın toplanabilme özelliği sayesinde, kapalı form da belirlenebilir. Ancak burada ele alınan problemde, özellikle de makinelerin kapasite kısıtlarının olmasından ve problemde akışların hangi makineler arasında gerçekleşeceğinin talep hacminden bağımsız olmamasından ötürü, böyle bir yaklaşım kullanılamamaktadır. Bu durumun üstesinden gelebilmek için, talebin Monte Carlo benzetimi aracığıyla üretilmesi, değerlendirilmesi ve benzetimin stokastik problemlerin çözümüne bir şekilde uyarlanması uygun bulunmuştur. Bu bölümde, SDHİS tasarımı problemi için iki çözüm yaklaşımı önerilmiştir. Bu yaklaşımlar Bölüm 3.3'te önerilen çözüm yaklaşımı üzerine oturtulmuş olmakla beraber, her ikisi de Monte Carlo benzetimini kullanmakta ve çok amaçlı optimizasyon yapmaktadırlar.

Bu yaklaşımlar, benzetim sonucu olarak üç amaç değeri üreterek arama esnasında buldukları sonuçları, bu üç amaç ile değerlendirmektedirler. Yani iki çözüm yaklaşımı da,

çok amaçlı optimizasyon yapmakta ve elde edilen çözümler üç tane amaç fonksiyonu üzerinden değerlendirilmektedirler. Bu amaçlar şu şekildedir:

Fizibilite oranı ya da olurlu olma oranı, bir hücresel düzenleme çözümünün gelen bir talebi tamamen karşılayabilmek suretiyle üretebilme ihtimalidir. Diğer bir ifadeyle, gerçekleşebilecek bir talep, hücresel düzenlemedeki mevcut makinelerle üretilemeyebilir. Dolayısıyla hücresel düzenleme çözümünde, bir veya birkaç dönem için, elde bulunan makineler gerçekleşen talebi üretecek kapasiteye sahip olmayabilir. Bu durum hücresel düzenlemenin olurlu olmadığı bir durumu (infizibil) ifade eder. Fizibilite oranı olarak ifade edilen bu amaç, bir hücresel düzenleme çözümünün gerçekleşecek olan talepleri, her biri kendi dönemi içerisinde olmak üzere, üretebilme ihtimalini ifade eder. Bu oranın mümkün olduğunca yüksek olması ve hücresel düzenleme çözümünün çok farklı talep senaryolarına cevap verebilecek özellikte olması istenir. Benzetimde üretilen talep senaryolarının yüzdesel olarak olurlu çözüm üretilebilenlerinin oranı bu amaç değerini verir. Örneğin, eğer bir hücresel düzenleme çözümü, rassal olarak üretilen çok dönemli talep senaryolarının yarısına olurlu çözüm üretebiliyor ancak, yarısında eldeki makinelerin talebi yetersiz kalıyor ise bu hücresel düzenleme çözümünün fizibilite oranı %50 olarak hesaplanır.

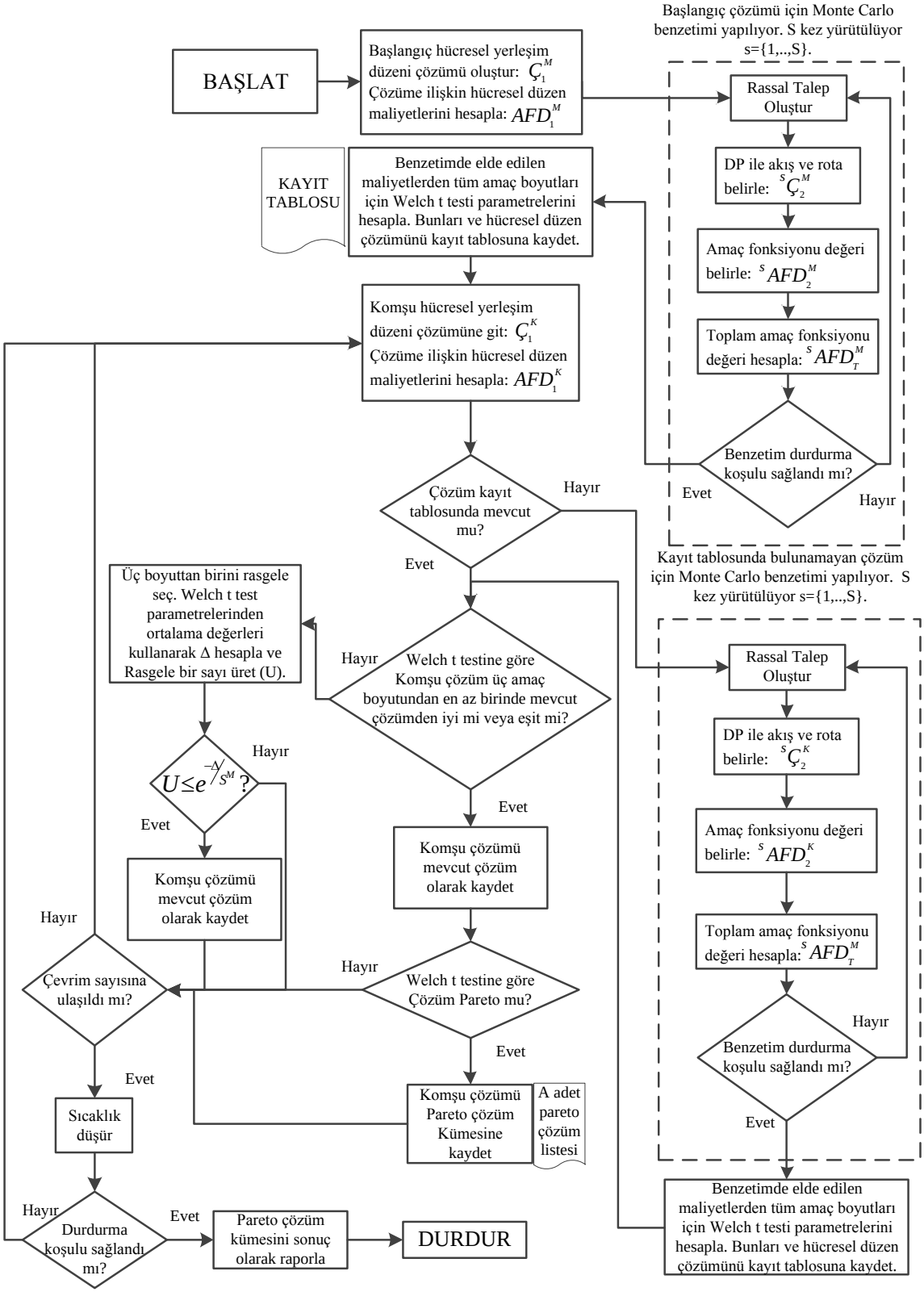
Ortalama maliyet, ziyaret edilen her bir hücresel düzenleme çözümünün benzetim neticesinde üretebildiği olurlu çözümlerin maliyetlerinin ortalamasıdır. Bu oran, bir hücresel düzenleme çözümünün olurlu akış ve rotalama çözümü üretebildiği, rassal talep senaryolarındaki toplam maliyetlerinin beklenen değeridir. Genel ifadeyle, bir hücresel düzenleme çözümü, çok fazla sayıda ve çeşitte makine içermek suretiyle yüksek fizibilite oranına sahip olabilir. Ayrıca yine bu sayede ve güzel bir yerleşim ile makineler arası akışlar ve işleme maliyetleri de en aza indirgenmiş olabilir. Ancak böyle bir durum makinelere ilişkin satın alma maliyetlerini ve sabit maliyetlerini artırarak amaç fonksiyonuna olumsuz katkıda bulunur. Bu yüzden bir hücresel düzenlemenin yüksek fizibilite oranına sahip olması istenirken, bir yandan da düşük maliyetle bu üretimleri gerçekleştirebilmesi istenir.

Yüzdelik maliyet, SDHİS tasarımının çok amaçlı optimizasyonunda kullanılan üçüncü amaç boyutudur. Ortalama maliyet ve fizibilite oranı, bir hücresel düzenlemenin kalitesini ölçmek için makul amaçlar olsalar da yeterli değillerdir. Bu yüzden yüzdelik maliyet adı

verilen, belirli bir olasılık aralığı içerisinde (percentile), bir hücresel düzenleme neticesinde açığa çıkabilecek, toplam maliyetin ulaşabileceği en yüksek maliyet de bir amaç boyutu olarak kullanılmıştır. Bu maliyet, çok dönemli bir hücresel düzenlemenin sağlamlığını (robustness) ölçmek için gereklidir. Tesis düzenlemesi ve HİS tasarımında sağlamlık, bir hücresel düzenlemenin birçok senaryo altında, kaliteli çözümler üretebilmesini ifade eder. Örneğin bir hücresel düzenleme, yüksek fizibilite oranı ve düşük ortalama maliyete sahip olmasına rağmen, özellikle bazı yüksek talep senaryolarında maliyetinin ciddi olarak artması durumuyla karşı karşıya olabilir. Bu istenmeyen bir durumdur. Bu yüzden bir hücresel düzenleme, sadece ürettiği olurlu çözümler için değerlendirilerek, önceden belirlenmiş bir olasılıkla (örn. %95 gibi) ulaşabileceği en yüksek toplam maliyet belirlenebilir. Bu amaç fonksiyonunun da en aza indirgenmesi hedeflenir ve bir hücresel düzenlemenin sağlamlığını ölçmek için kullanılır.

4.2.1. Benzetim entegre edilmiş çözüm yaklaşımı

Bu çalışmada, SDHİS tasarımı problemine önerilen birinci yaklaşım Benzetim Entegre edilmiş Yaklaşımdır (BEY). Bu yaklaşıma, Monte Carlo benzetimi adımlarını arama esnasında eş zamanlı olarak kullanması nedeniyle bu isim verilmiştir. Yani diğer bir ifadeyle, benzetim aşamaları çözüm yaklaşımına gömülüdür, denebilir. Bu çözüm yaklaşımının akış şeması Şekil 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.1. Benzetim entegre çözüm yaklaşımı (BEY) algoritmasının gösterimi

Benzetim entegre edilmiş çözüm yaklaşımı (BEY) olarak adlandırılan bu yaklaşımda, çözüm aramaya öncelikle bir başlangıç çok dönemli hücresel düzenleme çözümü üretilerek

başlar ve bu çözüm doğrudan mevcut çözüm ($Ç_1^M$) olarak atanır. Üretilen çözüm gösterim şemasının (Bölüm 3.3.3) özelliği sayesinde, bir hücrede olabilecek en az ve en çok makine sayıları gibi özellikleri doğrudan sağlar. Daha sonra bu elde edilen başlangıç çözümü, problem parametrelerinde belirlenen Monte Carlo sayısı (S) kadar rassal talep ile benzetime alınır. Benzetimin her bir çevriminde, rasgele üretilmiş talep senaryoları kullanılır. Her bir çevrimde, bu senaryolardan sırayla bir tanesi için doğrusal programlama yürütülerek, optimal akış ve rotalar ve bunlara ilişkin maliyetler Bölüm 3.3.5'te verilen alt problem matematiksel model çözülerek belirlenir. Bu her bir çevrimde alt problemin DP ile çözülmesinde talep parametresi ve hücresel düzenleme çözümüne ilişkin parametreler uygun olarak düzenlenmektedir. Bu adımlardan bazılarında senaryoya bağlı olarak olurlu çözüm üretilemeyebilir. Olurlu çözüm üretilebilen durumların maliyetleri temel alınarak, Welch *t* testinin parametreleri belirli adımlar izlenmek suretiyle üretilir. Bu *t* testi parametrelerinin üretimi Bölüm 4.3'de detaylı olarak anlatılacaktır. Daha sonra ilgili hücresel düzenleme çözümü ile birlikte hesaplanan Welch *t* testi parametreleri, daha sonra aynı çözümün tekrar ziyaret edilmesi ihtimaline karşın kayıt tablosu adı verilen, son ziyaret edilen belli bir sayıda çözüme ait bilgilerin saklandığı tabloya kaydedilir. Bu tablo benzetim adımlarının koşumunda tasarruf sağlayarak, toplam koşum süresinin kısalmasına yardımcı olan geçici bir hafızadır.

Başlangıç çözümüne ait Welch *t* testi parametrelerinin belirlenmesinin ve bu çözümün tabloya kaydedilmesinin ardından, mevcut çözüme komşu bir hücresel düzenleme çözümü ($Ç_1^K$) üretilir. Üretilen her bir komşu hücresel düzenleme çözümünün, daha önce ziyaret edilmiş bir çözüm olması ihtimali vardır. Bu yüzden her bir komşu çözüm benzetime alınmadan önce, kendisi için kayıt tablosunda benzetim sonuçlarının daha önceden kaydedilip edilmediği kontrol edilir. Eğer ziyaret edilen komşu çözüme ait bilgiler, geçici hafızalı kayıt tablosunda bulunabiliyorsa benzetim adımlarına geçilmeden doğrudan buradaki veriler kullanılır. Ancak, komşu çözüm için bu bilgiler kayıt tablosunda bulunamaz ise, benzetim başlatılır. Başlangıç çözümü için yapılan tüm benzetim adımları tekrar edilerek, aynı şekilde bu komşu çözüme ait Welch *t* testi parametreleri hesaplanır.

Benzetimlerin tamamlanmasının ardından, komşu çözümün yeni mevcut çözüm olarak kabul edilip edilmemesi ile ilgili test istatistiksel olarak yapılır. Burada, daha önceden oluşturulmuş *t* testi parametreleri kullanılarak, Welch *t* testi gerçekleştirilir. Eğer komşu çözüm en az bir boyutta bile mevcut çözüm tarafından baskılanamıyor ise, komşu çözüm

doğrudan mevcut çözüm olarak kabul edilir. Ardından Pareto kümesine dahil olup olamayacağı, halihazırda kümede bulunan çözümlerle kıyaslanmak suretiyle belirlenir. Eğer kümedeki çözümlerden hiçbiri, Welch *t* testi ile kıyaslanarak istatistiksel olarak komşu çözüme baskın gelemiyorlarsa, çözüm Pareto kabul edilip listeye alınır. Pareto olmayan, yani listedeki başka bir çözüm tarafından 3 amaç boyutunda birden baskılanan çözümler, bu listeye alınmazlar.

TB'nin standart hali, tek amaç ile çalışmak üzere geliştirilmiştir. Ancak buradaki gibi çok amacın bulunduğu optimizasyon problemlerinde, TB'nin standart halinde bulunmayan, bazı işlemlere gereksinim duyulur. Çok amaçlı optimizasyon probleminin tüm amaç boyutlarında, baskılanan kötü bir komşu çözümün kabul veya ret kararının verilmesinde de, böyle özel bir işleme gereksinim duyulmuştur. Baskılanan bir komşu çözümün kabul veya ret kararını vermek için, bu üç amaçtan biri rasgele seçilir. Seçilen amaç boyutu için, standart TB'nde olduğu gibi, komşu ve mevcut çözümün amaç fonksiyonu değerleri arasındaki değişimi ifade eden Δ değeri hesaplanır. Burada önemli olan husus, her bir amaç boyutu ayrı ölçeklerde değerlere sahip olduğu için, ayrı sıcaklık değerlerine ihtiyaç duyar ve bu yüzden de Δ kullanılarak hesaplanacak olan kabul olasılığı da, rasgele seçilmiş olan amaç boyutuna ait olan sıcaklık olmalıdır. Üretilen rasgele bir sayıdan (U) faydalanarak ve bu kabul olasılığına bağlı olarak, baskılanmış komşu çözüm ya mevcut çözüm olarak kabul edilir ya da mevcut çözüm değiştirilmez. Bu şekilde olasılıklı kabul-ret testine tabi tutulan hiçbir komşu çözümün, Pareto kümesine girip girmeyeceği test edilmez. Çünkü böyle bir çözümü baskılayan mevcut çözüm veya mevcut çözümden de kaliteli çözümler zaten pareto kümesinde bulunmaktadır. Bu yüzden, algoritmanın verimliliği açısından bu karşılaştırma yapılmadan ilerlenir. Bundan sonraki aşamalarda TB'nin standart adımları ilerletilerek devam edilir. Sıcaklıklar her çevrim sayısı kadar komşu çözüm üretilmesinin ardından soğutma çizelgesine uygun olarak düşürülür. Üç amaç boyutu için ayrı ayrı tutulan sıcaklıklar, en düşük seviyeye eriştiğinde arama sonlandırılır.

Bu yaklaşımın avantajı, çözüm uzayında yapılan arama esnasında, Monte Carlo benzetimi kullanmak suretiyle bulunan çözümlerin, nihai performans ölçütü kullanılarak incelenmiş olmasıdır. Ayrıca benzetimi yapılacak sistemdeki taleplerin dağılımının, BEY'in çalışması üzerinde bir etkisi bulunmamaktadır. Farklı olasılık dağılımlarına tabi ürün taleplerinin olduğu durumlarda da, bu yöntem faydalı sonuçlar üretebilmektedir. Öte yandan bu yaklaşım, ziyaret ettiği her yeni çözüm için Monte Carlo benzetimi ve bu benzetimin

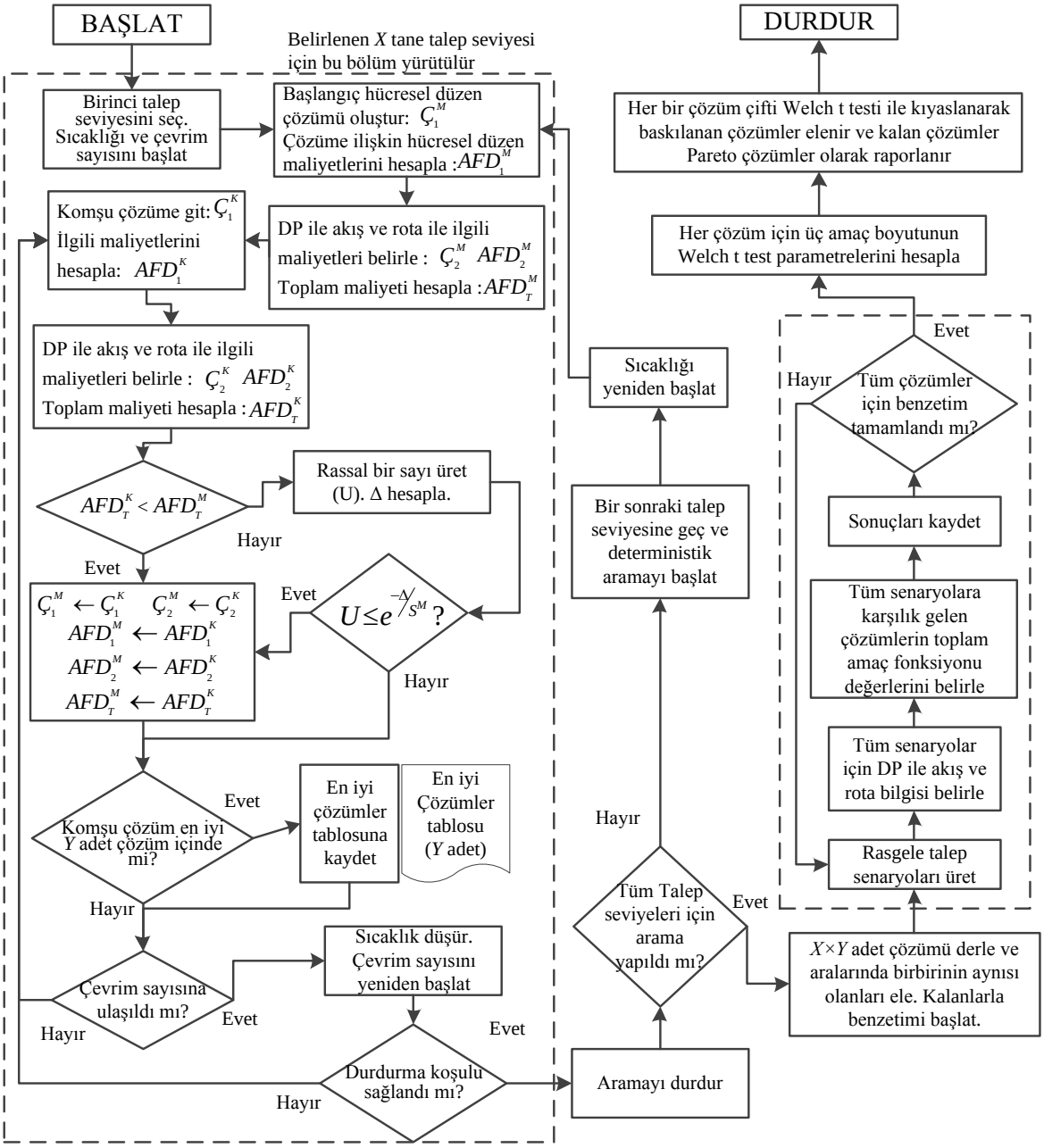
içinde de defalarca doğrusal programlama ile hesaplama yaptığı için, ciddi bir hesap yüküne katlanmaktadır. Bu hesap yükünün bir nebze azaltılması adına, kayıt tablosu kullanılmıştır.

4.2.2. Sonuç benzetimli çözüm yaklaşımı

Stokastik ve dinamik tasarım şartları altında, HİS tasarımı yapmak için geliştirilen bir diğer yaklaşım da Sonuç Benzetimli Yaklaşım'dır (SBY). Bu yaklaşım ismini arama sürecinin sonunda yaptığı benzetimden almaktadır. Bu yaklaşımın adımlarını gösteren akış şeması Şekil 4.2'de verilmiştir. Bu yaklaşıma göre, önce X tane deterministik talep seviyesi belirlenir. Bu seviyelerin her biri birer talep senaryosudur. Ancak bir önceki bölümde anlatılan BEY'in benzetim safhasındaki senaryolardan farklı olarak bu yaklaşımda, talep senaryoları bir sistematik içerisinde üretilirler. Bu senaryolar taleplerin normal dağılıma uyduğu varsayımına dayalı olarak ve farklı z değerleri kullanılarak belirlenir. Belirlenen z değeri, ilgili senaryoda tüm dönemlerdeki tüm ürünler için aynı olduğu farz edilerek oluşturulur. Diyelim ki p ürününün t dönemindeki talebinin ortalaması ve standart sapması sırasıyla D_{pt}^{μ} ve D_{pt}^{σ} olsun. Eğer ki çözülecek senaryodaki z değeri, senaryonun talep seviyesi olarak seçilmiş ise, bu senaryonun talepleri aşağıdaki gibi belirlenir.

$$D_{pt} = D_{pt}^{\mu} + zD_{pt}^{\sigma} \qquad \forall \quad p\epsilon P, t\epsilon T \qquad (0.53)$$

Bir senaryo için belirlenen talep seviyesine ilişkin hesaplamada, Eş. 0.53'de verilen ifade kullanılır. SBY ele alındığında talep seviyesi, sadece ürün rotasının ve akışlarının belirlenmesi safhasında gereklidir. Dolayısıyla bir talep seviyesi için gerçekleştirilen bir arama boyunca, bu şekilde belirlenen bir talep seviyesi ilgili alt problem matematiksel modelinin parametresi olarak kullanılır ve bu talep seviyesi için gerçekleştirilen arama boyunca talep seviyesi değiştirilmez. Algoritma yürütülmeye başlamadan önce farklı talep seviyelerine karşılık gelen z değerleri arama parametresi olarak verilmelidir. Örneğin z değeri, -2 ile +2 aralığında, 0.5 aralıklarla olmak üzere 9 farklı seviyede verilebilir. Belirlenen talep seviyelerinin geniş ve sık bir aralıkta olması, stokastik çözüm uzayında kaliteli çözümler bulmak için faydalı olsa da, bunların sayısının artırılması arama zamanının ciddi olarak artmasına sebebiyet verir. Bu yüzden, bu aralığın mümkün olduğunca geniş, ama toplam çözüm zamanını kabul edilebilir sınırların da dışına çıkarmadan, kaliteli çözümler üretecek kadar da sık olması gerekir.



Şekil 4.2. Sonuç benzetimli yaklaşım (SBY) algoritmasının gösterimi

SBY algoritması öncelikle deterministik olarak aramanın gerçekleştirileceği birinci talep seviyesinin seçilmesi ile başlar. Ardından bir hücresel düzenleme çözümü üretilerek bu başlangıç çözümü aynı zamanda mevcut çözüm olarak da atanır ($Ç_1^M$) ve düzenleme ile ilgili olan makine satın alma, makine kurma, kaldırma ve makine sabit maliyetleri toplanarak, toplam maliyetlerin birinci kısmı (AFD_1^M). elde edilir. Belirlenen hücresel düzenlemeye binaen, ürün akış ve rotaları ($Ç_2^M$) belirlenerek buna bağlı olan ürün taşıma ve ürün işleme maliyetleri belirlenir (AFD_2^M). Böylece başlangıç çözümüne ait toplam

maliyet (AFD_T^M) tespit edilmiş olur. Buna müteakip bir komşu hücresel düzenleme çözümü üretilir ($Ç_1^K$) ve bu çözüm için de benzer adımlar izlenir. Önce hücresel düzenleme ile ilgili maliyetler (AFD_1^K). hesaplanır ve DP vasıtasıyla $Ç_2^K$. ve AFD_2^K elde edilir. Toplam maliyet (AFD_T^K). hesaplanarak kaydedilir. Komşu ve mevcut çözümün toplam maliyetleri kıyaslanır ve eğer komşu çözümün toplam maliyeti mevcut çözümden düşük ise, komşu çözüm doğrudan yeni mevcut çözüm olarak kabul edilir. Aksi takdirde, maliyetler arasındaki fark ve mevcut sıcaklık değerlerinden faydalanılarak bir olasılık değeri hesaplanır ve bu değer tek düze dağılımdan üretilmiş bir rassal sayı (U) ile kıyaslanarak kabul veya ret edilir. Kabul veya ret edilsin, ziyaret edilen tüm çözümler, amaç fonksiyonu değerleri (AFD_T^K) dikkate alınarak, ziyaret esnasında bulunan en iyi Y tane çözüm içerisine girip girmedikleri test edilir. Arama esnasında bu liste sürekli güncellenir. Her bir talep seviyesi ile arama yapılırken bu liste en baştan doldurulur ve ilgili talep seviyesinde arama tamamlandıktan sonra bulunan en iyi çözümler saklanır. Bulunan komşu çözümün bu listeye girip giremediğinin test edilmesinden sonra, çevrim sayısına ve en düşük sıcaklığa ulaşılıp ulaşılamadığı kontrolleri gerçekleştirilir. Bunlar TB algoritmasının standart adımları olduğundan burada detaylı olarak bahsedilmeyecektir. Belirlenen şekilde X adet talep seviyesi için deterministik olarak X kez arama yapıldıktan sonra elde edilen $X \times Y$ adet çözümün benzetimden faydalanılarak analiz edilmesi gerekmektedir. Bu aşamada zamansal açıdan tasarruf sağlamak için, $X \times Y$ adet çözüm içerisinde birbirinin aynısı olan çözümler sadeleştirilerek, her hücresel düzenleme örneğinden birer tane kalması sağlanır. Böylece benzetim ve bunu müteakip gerçekleştirilecek olan Pareto kümesi tespiti öncesi, çözüm sayısı sadeleştirilmiş olur.

Tüm talep seviyeleri için arama gerçekleştirildikten ve çözümler kümesi sadeleştirildikten sonra, SBY'nin benzetim safhasına geçirilir. Bulunan her bir hücresel düzenleme için, S tane rasgele talep senaryosu üretilir. Bu talep senaryolarına karşılık olarak, hücresel düzenleme çözümlerinin cevap verip veremedikleri (fizibilite) ve oluşan maliyetler kaydedilir. Bir sonraki safhada, bu hücresel düzenlemelerin birbirileri ile kıyaslanmaları gerekmektedir. Benzetim sonucunda elde edilen maliyetler kullanılarak, SDHİS tasarım probleminin üç amaç boyutu için, Welch t testi parametreleri elde edilir ve çözümler ikili olarak kıyaslanarak, kümedeki herhangi bir çözüm tarafından tüm boyutlarda baskılanan çözümler Pareto kümesinden çıkarılırlar. Nihai olarak ulaşılan Pareto çözümler kümesi ise, SBY'nin hücresel düzenleme çözüm kümesi olarak raporlanır.

4.3. Welch'in *t* Testi

SDHİS tasarımı probleminin çözümü için önerilen yaklaşımlardan, hem SBY hem de BEY benzetimde stokastik parametre (talep) içermektedir. Bu nedenden ötürü, elde edilen çözümlerin gerek arama esnasında gerekse de arama sonrası kıyaslamalarında, istatistiksel tekniklerin kullanılması faydalıdır. İstatistiksel yöntemler, çözümlerin kaliteleri aralarındaki farkların istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığının tespit edilmesini sağlar. Bu çalışmada farklı boyutlu ve farklı varyansa sahip örneklem kümelerinin kıyaslanması için Welch'in *t* testi kullanılmıştır.

Welch'in *t* testi, örneklem boyutlarının ve varyansların farklı olduğu durumlarda, iki örnekleme ait ortalamaların kıyaslanmasında kullanılan bir yöntemdir. Buna göre diyelim ki, $\overline{X_1}, s_1^2$ ve n_1 birinci örneklem kümesinin sırasıyla ortalaması, varyansı ve örneklem sayısı ise, *t* istatistiği ve serbestlik derecesi (ν) sırasıyla Eş. 4.2 ve Eş. 4.3'e göre hesaplanır:

$$t = \frac{\overline{X_1} - \overline{X_2}}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}} \tag{0.54}$$

$$v = \frac{\left(\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}\right)^2}{\left(\frac{1}{n_1 - 1}\right)\left(\frac{s_1^2}{n_1}\right)^2 + \left(\frac{1}{n_2 - 1}\right)\left(\frac{s_2^2}{n_2}\right)^2} \tag{0.55}$$

Yukarıda verilen *t* istatistiği, benzetimi yapılıp kıyaslaması yapılacak her bir çözüm çiftinin, tüm amaç boyutları için ayrı ayrı hesaplanır. Bir boyut için test gerçekleştirilmeden önce, H_0 hipotezi kurulur. Bu hipoteze göre $\delta_{1,2} = \overline{X_1} - \overline{X_2}$ ve $H_0: \delta_{1,2} = 0$'dir. Yani H_0 hipotezine göre, iki örneklem kümesinin ortalamaları arasında bir fark bulunmamaktadır. H_1 hipotezine göre ise örneklem ortalamalarından birinin diğerinden büyük olduğu varsayımı test edilir: $H_1: \delta_{1,2} < 0$ veya $H_1: \delta_{1,2} > 0$. Bu duruma göre, iki örneklem ortalamasından biri diğerinden büyüktür. Bunun için hesaplanan *v* serbestlik derecesi ve aranan güven aralığı için (α), *t* dağılımı tablosundan *t* değerleri bulunarak H_0 ve H_1 hipotezlerinin kabulü veya reddi için test edilir. Yani $t > t_{1-\alpha}$ ise, $H_1: \delta_{1,2} > 0$ kabul edilir, $H_0: \delta_{1,2} = 0$ reddedilir. $t < t_\alpha$ ise, $H_1: \delta_{1,2} < 0$ kabul edilir,

$H_0: \delta_{1,2} = 0$ reddedilir. t istatistiğinin t_α ve $t_{1-\alpha}$'ya göre aldığı tüm diğer değerler için ise, $H_0: \delta_{1,2} = 0$ hipotezi kabul edilir. Yani örneklem kümelerinin ortalama değerleri arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark yoktur denilir.

Bu çalışmada ele alınan SDHİS tasarımı problemi, üç boyutta optimize edilmektedir. Bu boyutlardan birincisi ortalama maliyettir. DP yardımıyla Monte Carlo benzetimi gerçekleştirilen bir hücresel düzenlemenin ortalama maliyeti ($\overline{X_1^{Ort}}$), benzetim neticesinde elde edilen olurlu çözümlerin maliyetleri toplamının, olurlu çözümlerin sayısına bölümü ile elde edilir. Burada olurlu çözümlerin sayısı, örneklem sayısını (n_1^{Ort}), olurlu çözümlerin maliyetlerinin standart sapması da, örneklem standart sapmasını (s_1^{Ort}) verir. Bu şekilde, birinci boyut olan ortalama maliyet için, Welch t testi parametrelerinin elde edilmesi oldukça kolaydır.

Problemin ikinci amaç boyutu ise yüzdelik maliyettir. Oluşabilecek maliyetlerin belirli bir yüzdelik kısmının, bu maliyetten aşağı olacağı düşünülür ve bir çözüm için mümkün olduğunca düşük olması istenir. Bu maliyetin hesaplanabilmesi için, belirli sayıda olurlu çözümün elde edilmiş olması gerekmektedir. Diyelim ki p^α hesaplanması istenen yüzdelik maliyetin yüzdelik dilimini ifade etsin. Buna göre, gereken en az örneklem sayısı (n^{min}), Eş 4.4'de verildiği gibi hesaplanmaktadır. Örneğin, %95 yüzdelik maliyetin hesaplanabilmesi, en az 10 olurlu çözümün bulunmuş ve en küçükten büyüğe sıralanmış olması gerekmektedir. 10 olurlu çözüm için bu sıralamadaki en büyük ya da diğer bir ifadeyle en küçükten en büyüğe sıralanmış değerler arasında 10. değer %95'lik maliyeti vermektedir.

$$n^{min} = \frac{50}{100 - p^\alpha} \tag{0.56}$$

Bu amaç boyutu, bir ortalama değer olmadığından, olurlu maliyetler kümesine ait yüzdelik maliyet değerlerinin, Welch'in t testinde doğrudan kullanılması mümkün değildir. Bu yüzden olurlu maliyetler kümesi, her biri n^{min} adet maliyet içeren alt kümelere bölünmüştür. Her bir alt kümenin en büyük elemanı, alt kümenin yüzdelik maliyetini vermek üzere, oluşturulabilen alt küme sayısı örneklem sayısını (n_1^Y), alt kümelerden elde edilen yüzdelik maliyetlerin ortalaması ortalama yüzdelik maliyeti ($\overline{X_1^Y}$) ve bunların

standart sapması da yüzdelik maliyetin standart sapmasını (s_1^Y) vermektedir. Eş. 0.54 ve Eş. 0.55'de verilen ifadelerle, Welch *t* testi parametreleri hesaplanmak suretiyle, iki hücresel düzenleme çözümü, benzetim neticesinde elde ettikleri maliyetler değerlendirilerek, ikinci amaç boyutu olan yüzdelik maliyetler açısından kıyaslanmış olur.

Amaç boyutlarından üçüncüsü ise fizibilite oranıdır ve benzetim esnasında elde edilen çözümlerden kaçta kaçının olurlu olduğunu belirtir. Bu oranın da doğrudan Welch *t* testinde kullanımı mümkün değildir. Bu yüzden ikinci amaç boyutu olan yüzdelik maliyetteki gibi, bazı işlemlere gereksinim duymaktadır. Bir hücresel düzenleme çözümü için yüksek fizibilite oranı istenen bir özelliktir. İki hücresel düzenleme çözümünün fizibilite oranlarının istatistiksel olarak kıyaslanması için, olurlu olsun veya olmasın tüm benzetim sonuçları alt kümelere bölünür. Her bir alt kümedeki olurlu çözümlerin yüzdelik oranı, o kümenin fizibilite oranını verirken, alt küme sayısı örneklem sayısını (n_1^F), alt kümelerden elde edilen fizibilite oranlarının ortalaması, ortalama fizibilite oranını ($\overline{X_1^F}$) ve bunların standart sapması da fizibilite oranlarının standart sapmasını (s_1^F) vermektedir. Buna göre Eş. 0.54 ve Eş. 0.55'de verilen ifadelerle, Welch *t* testi parametreleri hesaplanır. Böylece iki hücresel düzenleme çözümü, benzetim neticesinde olurlu olma durumları değerlendirilerek, üçüncü amaç boyutu olan fizibilite oranları açısından kıyaslanmış olur.

4.4. Pareto Optimallik

SDHİS tasarımı, üç adet amaç boyutunun optimizasyonunu gerektirmektedir. Ancak bu üç amaç boyutu birbiriyle çelişmektedir. Hücresel düzenleme planında, makinelerin artırılması toplam kapasitenin artırılmış olması sebebiyle fizibilite oranını artırır. Öte yandan çok sayıda makine, makinelerin hem ilk yatırım maliyetini hem de makinelerin bulundurulmasına bağlı olan sabit maliyetlerin artmasına sebep olur. Üstelik bu amaç boyutları birbirileriyle çatışmanın yanı sıra, hepsi aynı birimlerde de ifade edilememektedir. Birinci ve ikinci amaç boyutları maliyet ile ilgili olup para birimleri ile ifade edilirlerken, üçüncü amaç boyutu ise sadece bir oran olup herhangi bir birim ile ifade edilmemektedir. Dolayısıyla bu amaç fonksiyonlarının tek bir amaç değerine indirgenmesi oldukça zordur. Bu çalışmada, çok amaçlı optimizasyon problemlerinde farklı amaçları çok iyi bir şekilde ele alabilen, Pareto optimallik yaklaşımı kullanılacaktır. Bu yaklaşıma göre, elde edilmiş amaç fonksiyonlarından birinde elde edilecek iyileşme, diğer boyutların en az birinde bir kötüleşme olmaksızın elde edilemez. Yani, çözüm yaklaşımının elde ettiği

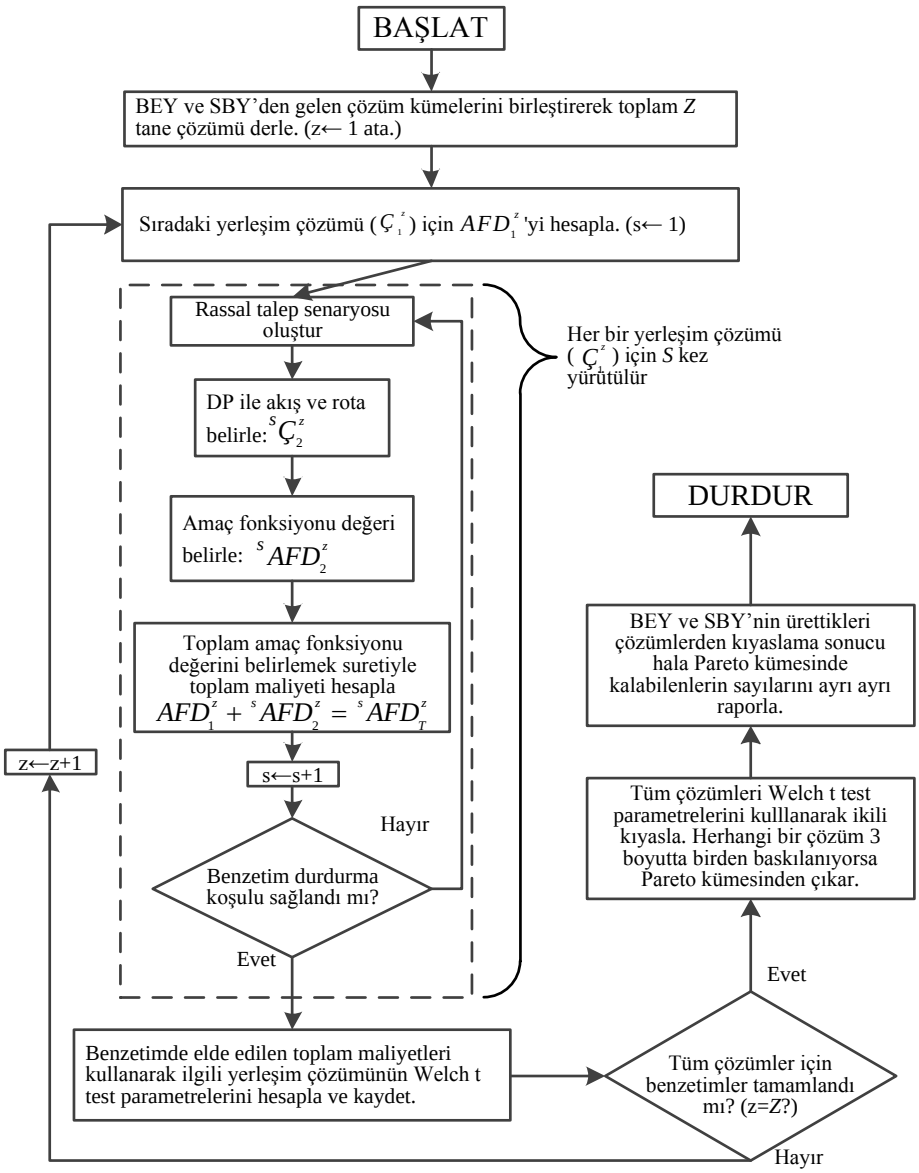
çözümler kümesinde, çözümlerden hiçbiri tüm boyutlarda birden, kümedeki bir diğer çözümden iyi olamaz. Sistem tasarımcısı ise, elde edilen Pareto çözümler kümesindeki hücresel düzenleme çözümlerinden birinin seçimini yapmak suretiyle, sistem tasarımını seçebilecektir.

4.5. Çözüm Yaklaşımları ile Elde Edilen Çözüm Kümelerinin Kıyaslamaları

Çalışmada, SDHİS tasarımı problemi tanımlanmış ve biri Benzetim Entegre Yaklaşım diğeri de Sonuç Benzetimli Yaklaşım olmak üzere, iki çözüm yaklaşımı önerilmiştir. Ancak bu yaklaşımların ürettiği çözümler, kalite açısından henüz kıyaslanmamıştır. Her bir çözüm yaklaşımının, aynı problem için ürettiği çözüm kümeleri kendi aralarında Pareto olsalar da, iki yaklaşım ile elde edilen çözüm kümeleri kıyaslandığında nasıl bir durumun ortaya çıkacağı bilinmemektedir. Bu nedenle, elde edilen çözümleri kıyaslamak için bir prosedür uygulanmıştır. Buna göre, hem BEY hem de SBY ile elde edilen hücresel düzenleme çözümlerinin, rasgele taleplerden oluşturulmuş talep senaryo şartlarındaki maliyetleri ve fizibilite durumları değerlendirilmiş ve her bir senaryo için *t* testi parametreleri üretilmiştir. Ardından bu çözümler ikili kıyaslamalara tabi tutularak, en kaliteli çözümleri hangi yaklaşımın verdiği Çizelge 4.1'de sunulmuştur.

4.6. Çözüm Yaklaşımlarının Değerlendirilmesi

SDHİS tasarımı için önerilen iki yaklaşım olan, SBY ve BEY'in her birinin sundukları çözümler, kendi içlerinde Pareto optimal çözüm kümeleridir. Ancak, bu iki çözüm yönteminin birbirilerine göre, çözüm üretmekteki başarılarının kıyaslanması gereklidir. Bu iki yaklaşım tarafından sunulan çözümlerin birleştirilmesi ile elde edilen çözümler kümesindeki elemanlardan kaçar tanesinin Pareto optimal olduğunun ve bunların kaçar tanesinin SBY ve BEY'e ait olduğunun ayrıca tespit edilmesi gerekmektedir. Bunun için benzetim temelli ve çok amaçlı basit bir kıyaslama algoritması önerilmiştir. Bu algoritmanın adımları Şekil 4.3'te verilmiştir.



Şekil 4.3. SBY ve BEY çözümlerinin kıyaslanması için bir benzetim algoritması

Değerlendirme için kullanılan algoritmada ilk adım olarak, SBY ve BEY ile üretilen hücresel düzenleme çözümleri derlenir ve Z adet hücresel düzenleme çözümü ($Ç_1^Z$) elde edilmiş olur. Ardından benzetim algoritmasına başlanır. Sıradaki çözümün, hücresel düzenleme ile ilgili olup talepten bağımsız olan maliyetleri bir kez hesaplanır (AFD_1^Z) ve her bir benzetim çevrimi sonunda, ilgili çözümün toplam maliyetleri (${}^sAFD_T^Z$) hesaplanacağı zaman kullanılır. İlk hücresel düzenleme çözümü için, S kez rassal talep senaryosu oluşturulur ve her senaryo için rota ve akış çözümleri (${}^sÇ_2^Z$) belirlenmek suretiyle, S kez benzetim çevrimleri koşturulur. S kez yapılan çevrim sonunda, sadece olurlu çözüm durumları için toplam maliyetler (${}^sAFD_T^Z$) hesaplanır. Bu çözüm için koşturulan benzetimin ardından, elde edilen olurlu çözümlerden faydalanılarak

Bölüm 4.3'te anlatıldığı şekilde, üç amaç boyutu için *t* testi parametreleri hesaplanır. Bu adımlar, çözüm kümesindeki tüm hücresel düzenleme çözümleri için tekrar edildikten sonra, Welch *t* testi safhasına geçilir. Bu safhada her bir çözüm çifti Welch *t* testi uygulanarak, ikili kıyaslanmak suretiyle her üç amaç boyutunda birden, herhangi bir diğer çözüm tarafından baskılanan çözüm, Pareto optimal olma özelliğini yitirir. Bu şekilde yapılan değerlendirmeler sonucunda, hem BEY hem de SBY için kalan Pareto çözümlerin sayısı raporlanır. Bu çalışmada kullanılan 50 adet test problemi, hem BEY hem de SBY ile çözülmüş ve elde edilen çözümler, bu prosedür uygulanmak suretiyle kıyaslanmıştır. Çizelge 4.1'de bu değerlendirme süreci öncesi ve sonrası olmak üzere, BEY ve SBY tarafından raporlanan Pareto optimal kümesine giren çözümlerin sayıları verilmiştir.

Çizelge 4.1. BEY ve SBY'nin Pareto çözüm sayıları açısından kıyaslama sonuçları

	Koşum zamanları (saniye)			Değerlendirme Öncesi				Değerlendirme Sonrası		
	BEY	**SBY**		**BEY**	**SBY**	**Fark**		**BEY**	**SBY**	**Fark**
1	$4{,}5 \times 10^2$	$2{,}7 \times 10^2$		25	8	17		25	8	17
2	$6{,}5 \times 10^2$	$3{,}4 \times 10^2$		54	38	16		30	38	-8
3	$8{,}5 \times 10^2$	$3{,}0 \times 10^2$		52	42	10		24	33	-9
4	$1{,}5 \times 10^3$	$4{,}0 \times 10^2$		50	62	-12		22	55	-33
5	$4{,}5 \times 10^3$	$1{,}5 \times 10^3$		76	86	-10		4	64	-60
6	$1{,}9 \times 10^3$	$5{,}6 \times 10^2$		63	88	-25		25	73	-48
7	$3{,}5 \times 10^3$	$7{,}8 \times 10^2$		97	26	71		34	26	8
8	$8{,}6 \times 10^3$	$2{,}7 \times 10^3$		58	60	-2		18	55	-37
9	$1{,}0 \times 10^4$	$3{,}0 \times 10^3$		75	55	20		8	45	-37
10	$1{,}8 \times 10^4$	$8{,}0 \times 10^3$		25	78	-53		12	68	-56
11	$3{,}6 \times 10^4$	$1{,}2 \times 10^4$		25	89	-64		25	89	-64
12	$1{,}1 \times 10^4$	$4{,}0 \times 10^3$		14	69	-55		12	69	-57
13	$1{,}0 \times 10^4$	$5{,}6 \times 10^3$		27	104	-77		24	104	-80
14	$8{,}4 \times 10^3$	$4{,}9 \times 10^3$		17	128	-111		17	128	-111
15	$1{,}1 \times 10^4$	$5{,}4 \times 10^3$		17	124	-107		16	118	-102
16	$4{,}7 \times 10^4$	$1{,}8 \times 10^4$		7	118	-111		7	118	-111
17	$6{,}4 \times 10^4$	$1{,}7 \times 10^4$		20	83	-63		20	83	-63
18	$9{,}5 \times 10^4$	$3{,}0 \times 10^4$		29	62	-33		27	52	-25
19	$7{,}0 \times 10^4$	$2{,}3 \times 10^4$		21	113	-92		21	113	-92
20	$5{,}4 \times 10^4$	$1{,}8 \times 10^4$		22	73	-51		22	73	-51
21	$9{,}2 \times 10^3$	$4{,}1 \times 10^3$		11	61	-50		11	58	-47
22	$1{,}0 \times 10^4$	$5{,}1 \times 10^3$		25	90	-65		23	90	-67
23	$7{,}5 \times 10^3$	$2{,}8 \times 10^3$		6	59	-53		0	59	-59
24	$1{,}2 \times 10^4$	$5{,}7 \times 10^3$		20	104	-84		10	99	-89
25	$1{,}3 \times 10^4$	$3{,}3 \times 10^3$		49	60	-11		4	60	-56
26	$3{,}0 \times 10^4$	$8{,}9 \times 10^3$		43	93	-50		24	83	-59
27	$1{,}2 \times 10^4$	$3{,}8 \times 10^3$		12	42	-30		1	34	-33
28	$1{,}8 \times 10^4$	$8{,}7 \times 10^3$		30	93	-63		13	92	-79
29	$2{,}2 \times 10^4$	$7{,}2 \times 10^3$		24	85	-61		14	85	-71
30	$3{,}7 \times 10^4$	$1{,}2 \times 10^4$		43	90	-47		25	76	-51
31	$1{,}2 \times 10^4$	$6{,}6 \times 10^3$		3	109	-106		2	73	-71
32	$1{,}8 \times 10^4$	$8{,}1 \times 10^3$		14	98	-84		13	78	-65
33	$2{,}1 \times 10^4$	$6{,}7 \times 10^3$		43	83	-40		23	83	-60
34	$3{,}7 \times 10^4$	$1{,}3 \times 10^4$		18	94	-76		13	91	-78
35	$1{,}2 \times 10^4$	$5{,}5 \times 10^3$		10	134	-124		3	87	-84
36	$1{,}8 \times 10^4$	$8{,}1 \times 10^3$		18	77	-59		10	55	-45
37	$2{,}2 \times 10^4$	$7{,}0 \times 10^3$		20	104	-84		12	72	-60
38	$3{,}6 \times 10^4$	$1{,}1 \times 10^4$		41	84	-43		22	68	-46
39	$8{,}1 \times 10^3$	$5{,}0 \times 10^3$		6	70	-64		4	70	-66
40	$1{,}5 \times 10^4$	$7{,}2 \times 10^3$		13	70	-57		8	50	-42
41	$1{,}9 \times 10^4$	$6{,}3 \times 10^3$		8	95	-87		4	74	-70
42	$3{,}2 \times 10^4$	$1{,}0 \times 10^4$		21	97	-76		13	78	-65
43	$9{,}6 \times 10^3$	$4{,}3 \times 10^3$		9	60	-51		3	60	-57
44	$1{,}6 \times 10^4$	$6{,}7 \times 10^3$		10	78	-68		6	75	-69
45	$2{,}0 \times 10^4$	$6{,}4 \times 10^3$		22	64	-42		15	64	-49
46	$3{,}0 \times 10^4$	$1{,}0 \times 10^4$		26	87	-61		18	78	-60
47	$1{,}2 \times 10^4$	$5{,}5 \times 10^3$		5	91	-86		3	71	-68
48	$1{,}7 \times 10^4$	$8{,}6 \times 10^3$		27	96	-69		22	82	-60
49	$1{,}9 \times 10^4$	$6{,}1 \times 10^3$		18	51	-33		14	51	-37
50	$3{,}8 \times 10^4$	$1{,}3 \times 10^4$		23	93	-70		17	79	-62

Bu benzetim algoritması ile yapılan kıyaslama sonrasında, görülmüştür ki SBY, BEY'e göre çok daha fazla Pareto optimal çözüm üretebilmektedir. Sadece 1, 2, 3, 7 ve 9. Problemlerde, BEY'nin kıyaslama öncesi SBY'den daha fazla çözüm üretebildiği görülmektedir. Ancak BEY ve SBY'nin ürettikleri çözümler kıyaslandığında, BEY'nin SBY'ye üstünlüğü sadece 1 ve 7 numaraları problemlerde devam etmekle beraber 7. problemde üretilen Pareto optimal çözümler sayındaki fark azalmıştır.

İki algoritma zamansal açıdan incelendiğinde de, SBY lehine bir avantaj olduğu görülmektedir. Tüm durumlarda SBY, BEY'e göre daha büyük Pareto çözüm kümeleri ve daha kaliteli çözümler üretirken, bunu daha kısa sürede yapmaktadır. Üstelik koşumların çok ciddi kısmında bu fark, BEY'in harcadığı zamanın yarısından az olmaktadır.

SBY ve BEY yaklaşımları, Monte Carlo benzetimini kullanma, çok amaçlı optimizasyon yapma, DP ve TB üzerine inşa edilmiş olma gibi bir çok ortak özellik barındırsalar da, elde edilen sonuçlar neticesinde SBY'nin BEY'e bir üstünlüğünün olduğu açıktır. SBY'de aramanın deterministik yapılmasına ve nihai kıyaslamada kullanılandan farklı amaç değerleri kullanılarak arama yapılmasına rağmen, SBY tarafından BEY'e göre daha fazla Pareto optimal çözüm bulunmasının 2 sebebi olduğu düşünülmektedir. Birinci sebep, SBY tarafından üretilen kesikli deterministik senaryoların, stokastik çözüm uzayını BEY'in yaptığı aramaya göre daha güzel temsil etmesidir. Yani SBY'de deterministik aramaların gerçekleştirileceği farklı talep seviyeleri, bu tez çalışmasındaki gibi uygun bir şekilde ve bir sistematik içerisinde belirlendiğinde, BEY'in arama yaptığı stokastik çözüm uzayı daha güzel temsil edilmektedir. Aradaki farkın ikinci sebebi ise, SBY'nin her seferinde farklı başlangıç çözümleri kullanmasıdır. Örneğin, iki yakın talep seviyesi için tek bir hücresel düzenleme çözümü optimal çözüm olabilir. Aynı zamanda birebir aynı kalitede alternatif çözümler de olabilir. Birbirine müteakip iki aramanın her birinde, bu alternatif çözümlerden birer tanesinin bulunmasının da, bulunan Pareto optimal çözüm sayısını artırdığı düşünülmektedir.

5. SONUÇ ve DEĞERLENDİRME

Hücresel imalat sistemleri, grup teknolojisi kavramından türetilmiş modern bir üretim yaklaşımıdır. Bu yaklaşıma göre, makineler daha önceden oluşturulmuş olan ürün ailelerini işleyecek şekilde gruplara ayrılmaktadır. Bu işleme hücre oluşturma adı verilir. Ayrıca bir HİS tasarlanırken, oluşturulan bu hücrelerin içindeki makinelerin birbirilerine göre konumları ile hücrelerin tesis içerisindeki göreceli konumları da düşünülmelidir. Bu kararların hepsinin aynı anda verilmesi, başarılı bir HİS tasarımı için gerekli iken, bu kararların birlikte ele alınması problemin çözümünü oldukça zorlaştırmaktadır.

Hücresel imalat sistemlerinin tasarımında ele alınması gereken diğer iki konu da, stokastikliği göz önüne alan sağlam tasarım ile sistemdeki değişimleri göz önüne alan dinamik tasarımdır. Talep hacmindeki ve ürünlerdeki değişimlerden ötürü, hücresel imalat sistemlerinin ara ara yeniden düzenlenmeye ihtiyaçları vardır. Bu yeniden düzenlemeler, sadece malzeme taşıma, ürün işleme maliyetlerinin değil, tesislerin yeniden düzenlenmesi maliyetlerinin de hesaba katılmasını beraberinde getirmektedir. Bilhassa çok dönemli taleplerdeki tahminlerin isabetsiz olmasından dolayı, tasarımı etkileyen bir de belirsizlik faktörü vardır. Belirsiz şartlar altında tasarlanan bir sistemin, gerçekleşmesi olası birçok senaryo altında iyi davranması, yani sağlam olması istenir. Bu gibi hususların tasarıma katılması, problemin çözümünü zorlaştırmanın yanı sıra, literatürdeki mevcut yaklaşımlardan farklı, yeni yaklaşımlar kullanmayı da gerekli kılar.

Literatürde hücresel imalat sistemine yönelik çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Ancak SDHİS tasarımı ile ilgili çalışmalar, bir elin parmaklarının sayısını geçmeyecek kadar azdır. Bu çalışmalarda ise araştırmacılar problemi basitleştirici varsayımlara başvurmaktadırlar. Örneğin bazı çalışmalar stokastikliği farklı olasılıklarla ifade edilen ayrık senaryolarla ele almışlardır. Bazı çalışmalar, hücre içi yerleşim veya hücre oluşturma kararlarının önceden ele alındığını varsaymış, ürünlerin rota ve akışları ile ilgili kararları modellerine hiç dâhil etmemişlerdir. Literatürde SDHİS tasarımı ile ilgili yapılan çalışmaların bu eksik yanları görülmüş ve bu tez çalışmasında SDHİS tasarımının hem model olarak hem de çözüm yöntemleri olarak literatüre katkı yapılması hedeflenmiştir.

Çalışmanın ilk safhasında, daha sonra sunulacak olan SDHİS tasarımı problemine temel oluşturması açısından, dinamik hücresel imalat sistemi tasarımı problemi incelenmiştir.

Burada bu problemin çözülmesi için, melez bir çözüm yaklaşımı geliştirilmiş ve literatürde ele alınan benzer bir matematiksel modelden ve çözüm yaklaşımından faydalanılmıştır. Geliştirilen algoritma, MATLAB programlama dili ile kodlanmış ve GUROBI optimizasyon yazılımının MATLAB entegrasyonu kullanılarak oluşturulmuştur. Geliştirilen çözüm yaklaşımı, doğrusal programlama ile TB meta-sezgiselini kullanmak suretiyle, literatürdeki verilen problemler için bulunan çözümlerden çok daha kaliteli çözümler üretmeyi başarmıştır. Bu çözüm yaklaşımının TB kısmı hücreleri oluşturulan makineleri, makinelerin hücreler içerisindeki konumlarını ve hücrelerin tesis üzerindeki konumlarını belirlemektedir. Öte yandan doğrusal programlama ise, ürünlerin hangi işlerinin hangi makinelerde işleneceğini ve makineler arasındaki hücre içi ve hücreler arası akışları belirlemektedir.

Çalışmanın bu safhasında kullanılabilecek olan örnek problemlerin sayıca çok az olmasından dolayı, literatürde verilen problemlere ilave olarak rasgele test problemleri üretilmiş ve çözülen problem sayısı arttırılmıştır. Ancak bu problemler için de kıyaslama yapmak için hiçbir değer bulunmaması, bu problem için özel bir alt sınır matematiksel modeli geliştirmeyi gerekli kılmıştır. Geliştirilen bu alt sınır yaklaşımı, temel olarak Bölüm 3.2'de verilen matematiksel modeldeki 0-1 değer alan değişkenlerin, bir mantık çerçevesinde tamsayı değişkenlere dönüştürülmesini içerir. Geliştirilen bu alt sınır matematiksel modeli kullanılarak, hem çok dar alt sınırlar elde edilmiş hem de geliştirilen melez çözüm algoritmasının etkinliği kanıtlanmıştır. Geliştirilen bu alt sınır matematiksel modeli, GAMS optimizasyon yazılımı kullanılarak çözülmüştür. Ayrıca, yine çözüm kalitesini göstermek için, GAMS optimizasyon yazılımı Bölüm 3.2'de verilen matematiksel modelin de çözümünde kullanılmıştır. NP-zor yapıdaki problemler için optimal çözümlerin bulunması hem zaman açısından hem de belek kapasitesi açısından belli bir boyuta kadar yapılabilmektedir. Bu tez çalışmasında ele alınan problemin zorluğu nedeniyle, problemlerin GAMS yazılımı ile çözülmesi çok zaman almaktadır. Bu nedenle çözüm zamanı GAMS yazılımında tüm problemler için 10 saat ile sınırlandırılmıştır. Geliştirilen melez algoritma ile bulunan sonuçlar, GAMS yazılımı ile elde edilen çözümlerden daha iyi olmuştur. Böylece geliştirilen melez algoritma ile bulunan çözümlerin kalitesi, soru işareti bırakmayacak şekilde gösterilmiştir.

Dinamik hücresel imalat sistemi tasarımı probleminin çözümü için önerilen melez algoritma temel alınarak, SDHİS tasarımı problemini çözecek bir algoritmanın

geliştirilmesi düşünülmüştür. Buna göre, taleplerin birbirinden bağımsız ve parametreleri bilinen normal dağılıma uyduğu varsayımına dayanarak, çok dönemli yerleşim planı ve hücre oluşturma kararları verilmeye çalışılmıştır. Bu kararları vermek üzere, her biri Monte Carlo benzetimi yaklaşımını kullanan ve çok amaçlı optimizasyon yapan iki yaklaşım önerilmiştir. Yaklaşımların ele aldıkları amaç boyutları ortalama maliyet, yüzdelik maliyet ve bir hücresel düzenlemenin gerçekleşecek bir talep senaryosu durumuna, cevap verme olasılığını ifade eden fizibilite oranlarıdır. TB ve doğrusal programlamanın da kullanıldığı bu yaklaşımlardan ilki BEY olup, arama esnasında simülasyon kullanmaktadır. Arama esnasında bulunan çözümler, Pareto optimal olma durumlarına göre kaydedilmekte ve arama bittiğinde en son bulunan Pareto optimal çözümler raporlanmaktadır. İkinci yaklaşım olan SBY ise, bir sistematik çerçevesinde belirlenen ve belli sayıdaki talep senaryolarında deterministik aramalar yapmak suretiyle, hücresel düzenlemeler elde etmektedir. Bu yaklaşım, deterministik uzayda yaptığı aramalar neticesinde elde ettiği çözümleri, en son safhada benzetim ile kıyaslamaktadır. Kıyaslama sonucunda, hiçbir çözüm tarafından istatistiksel olarak baskılanmayan çözümler, Pareto optimal olarak sunulmaktadır.

SDHİS tasarımı için önerilen bu yaklaşımlardan ilki, benzetimi arama esnasında kullandığı için ciddi hesaplama yüküne katlanmakta ve çözüm süreleri uzun olmaktadır. Ancak bu yaklaşımın çalışması için, taleplerin normal veya başka bir dağılıma bağlı olma gereksinimi yoktur. Bu açıdan güçlüdür. Diğer yaklaşımda ise, deterministik arama senaryolarının belirlenmesinde tanımlanan süreçte sadece normal dağılımı ele almıştır. Farklı dağılımlarla çalışmak için, farklı süreçler tanımlanması ve denenmesi gerekmektedir. Öte yandan bu ikinci yaklaşım, hesaplama açısından birinci yaklaşıma göre avantajlıdır. Bu yaklaşımlardan hangisinin daha çok Pareto optimal çözüm ürettiğinin tespit edilmesi için, bir benzetim ve istatistiksel karşılaştırmadan faydalanan bir algoritma da kullanılmıştır. Bunun karşılaştırma sonucunda, ikinci çözüm yaklaşımının daha kısa sürede daha çok Pareto optimal çözüm üretebildiği görülmüştür.

Hem deterministik hem de stokastik dinamik hücresel imalat sistemi tasarımının yapıldığı bu tez çalışması ile literatüre önemli bir katkı sağlandığı düşünülmektedir. Bu tez çalışmasının, gelecekte bu konuda yapılacak çalışmalara yol göstereceği düşünülmektedir. Gelecekte yapılabilecek çalışmalar için aşağıdaki öneriler düşünülebilir.

1. Ele alınan parametrelerden birçoğunda zaman indisi bulunmamaktadır. Taleplere ek olarak, zamanla değişen maliyetler ve kapasiteler tasarıma zenginlik katabilecektir.
2. Stokastik dinamik problemde, sadece taleplerin değişkenliği varsayılmıştır. Oysa ki kullanımının mümkün olduğu gösterilen entegre benzetim yaklaşımı, makinelerin dönemlik kapasitelerinin de belirsiz olduğu durumların göz önüne alınabilmesini mümkün kılabilir.
3. Bu çalışmada TB meta-sezgisel algoritması temel alınmıştır. Ancak başarısı kanıtlanmış farklı meta-sezgisel algoritmalarda, problemin çözümü için kullanılabilirler.

KAYNAKLAR

Adil, G. K., Rajamani, D. ve Strong, D. (1996). Cell formation considering alternate routeings. *International Journal of Production Research*, 34(5), 1361-1380.

Ahkioon, S., Bulgak, A. A. ve Bektas, T. (2009a). Cellular manufacturing systems design with routing flexibility, machine procurement, production planning and dynamic system reconfiguration. *International Journal of Production Research*, 47(6), 1573-1600.

Ahkioon, S., Bulgak, A. A. ve Bektas, T. (2009b). Integrated cellular manufacturing systems design with production planning and dynamic system reconfiguration. *European Journal of Operational Research*, 192(2), 414-428.

Aktürk, M. S. ve Türkcan, A. (2000). Cellular manufacturing system design using a holonistic approach. *International Journal of Production Research*, 38(10), 2327-2347.

Alfa, A. S., Chen, M. ve Heragu, S. S. (1992). Integrating the grouping and layout problems in cellular manufacturing systems. *Computers & Industrial engineering*, 23(1), 55-58.

Aramoon-Bajestani, M., Rabbani, M., Rahimi-Vahed, A. R. ve Khoshkhou, G. B. (2009). A multi-objective scatter search for a dynamic cell formation problem. *Computers & operations research*, 36(3), 777-794.

Aryanezhad, M. B., Deljoo, V. ve Mirzapour Al-e-hashem, S. M. J. (2009). Dynamic cell formation and the worker assignment problem: a new model. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 41(3-4), 329-342.

Arzi, Y., Bukchin, J. ve Masin, M. (2001). An efficiency frontier approach for the design of cellular manufacturing systems in a lumpy demand environment. *European Journal of Operational Research*, 134(2), 346-364.

Askin, R. G. ve Subramaniam, S. P. (1987). A cost-based heuristic for group technology configuration. *International Journal of Production Research*, 25(1), 101-113.

Askin, R. G. ve Standridge, C. R. (1993). *Modeling and analysis of manufacturing systems*. New York: Wiley, 96.

Azadivar, F. ve Wang, J. (2000). Facility layout optimization using simulation and genetic algorithms. *International Journal of Production Research*, 38(17), 4369-4383.

Balakrishnan, J. ve Cheng, C. H. (2000). Genetic search and the dynamic layout problem. *Computers & Operations Research*, 27(6), 587-593.

Balakrishnan, J., Cheng, C. H. ve Conway, D. G. (2000). An improved pair-wise exchange heuristic for the dynamic plant layout problem. *International Journal of Production Research*, 38(13), 3067-3077.

Balakrishnan, J., Cheng, C. H., Conway, D. G. ve Lau, C. M. (2003). A hybrid genetic algorithm for the dynamic plant layout problem. *International Journal of Production Economics*, 86(2), 107-120.

Balakrishnan, J. ve Cheng, C. H. (2009). The dynamic plant layout problem: Incorporating rolling horizons and forecast uncertainty. *Omega*, 37(1), 165-177.

Baykasoğlu, A. ve Gindy, N. N. (2001). A simulated annealing algorithm for dynamic layout problem. *Computers & Operations Research*, 28(14), 1403-1426.

Bazargan-Lari, M. ve Kaebernick, H. (1996). Intra-cell and inter-cell layout designs for cellular manufacturing. *International Journal of Industrial Engineering*, 3, 139-150.

Benjaafar, S. ve Sheikhzadeh, M. (2000). Design of flexible plant layouts. *IIE Transactions*, 32(4), 309-322.

Boctor, F. F. (1991). A Linear formulation of the machine-part cell formation problem. *The International Journal of Production Research*, 29(2), 343-356.

Braglia, M., Zanoni, S. ve Zavanella, L. (2003). Layout design in dynamic environments: Strategies and quantitative indices. *International Journal of Production Research*, 41(5), 995-1016.

Braglia, M., Zanoni, S. ve Zavanella, L. (2005). Layout design in dynamic environments: analytical issues. *International Transactions in Operational Research*, 12(1), 1-19.

Burbidge, J. L. (1992). Change to group technology: process organization is obsolete. *The International Journal of Production Research*, 30(5), 1209-1219.

Cao, D. ve Chen, M. (2005). A robust cell formation approach for varying product demands. *International Journal of Production Research*, 43(8), 1587-1605.

Chaieb, I. ve Korbaa, O. (2003). Intra-cell machine layout associated with flexible production and transport systems. Presented in *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 217(7), 883-897.

Chan, H. M. ve Milner, D. A. (1982). Direct clustering algorithm for group formation in cellular manufacture. *Journal of Manufacturing Systems*, 1(1), 65-75.

Chang, C. C., Wu, T. H. ve Wu, C. W. (2013). An efficient approach to determine cell formation, cell layout and intracellular machine sequence in cellular manufacturing systems. *Computers & Industrial Engineering*, 66(2), 438-450.

Chen, M. (1998). A mathematical programming model for system reconfiguration in a dynamic cellular manufacturing environment. *Annals of Operations Research*, 77, 109-128.

Chen, M. ve Cao, D. (2004). Coordinating production planning in cellular manufacturing environment using Tabu search. *Computers & Industrial Engineering*, 46(3), 571-588.

Cheng, C. H., Goh, C. H. ve Lee, A. (1996). Solving the generalized machine assignment problem in group technology. *Journal of the Operational Research Society*, 794-802.

Chiang, C. P. ve Lee, S. D. (2004a). A genetic-based algorithm with the optimal partition approach for the cell formation in bi-directional linear flow layout. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 17(4), 364-375.

Chiang, C. P. ve Lee, S. D. (2004b). Joint determination of machine cells and linear intercell layout. *Computers & Operations Research*, 31(10), 1603-1619.

Dantzig, G. B., (1947). Maximization of a linear function of variables subject to linear inequalities, 1947. Published in T.C. Koopmans (ed.), *Activity Analysis of Production and Allocation*, Wiley & Chapman-Hall, pp. 339–347.

Das, S. K. (1993). A facility layout method for flexible manufacturing systems. *The International Journal of Production Research*, 31(2), 279-297.

Defersha, F. M. ve Chen, M. (2006a). A comprehensive mathematical model for the design of cellular manufacturing systems. *International Journal of Production Economics*, 103(2), 767-783.

Defersha, F. M. ve Chen, M. (2006b). Machine cell formation using a mathematical model and a genetic-algorithm-based heuristic. *International Journal of Production Research*, 44(12), 2421-2444.

Defersha, F. M. ve Chen, M. (2008a). A linear programming embedded genetic algorithm for an integrated cell formation and lot sizing considering product quality. *European Journal of Operational Research*, 187(1), 46-69.

Defersha, F. M. ve Chen, M. (2008b). A parallel genetic algorithm for dynamic cell formation in cellular manufacturing systems. *International Journal of Production Research*, 46(22), 6389-6413.

Deljoo, V., Mirzapour Al-e-hashem, S. M. J., Deljoo, F. ve Aryanezhad, M. B. (2010). Using genetic algorithm to solve dynamic cell formation problem. *Applied Mathematical Modelling*, 34(4), 1078-1092.

Dunker, T., Radons, G. ve Westkämper, E. (2005). Combining evolutionary computation and dynamic programming for solving a dynamic facility layout problem. *European Journal of Operational Research*, 165(1), 55-69.

Erel, E., Ghosh, J. B. ve Simon, J. T. (2003). New heuristic for the dynamic layout problem. *Journal of the Operational Research Society*, 54(12), 1275-1282.

Esmailnezhad, B., Fattahi, P. ve Kheirkhah, A. S. (2015). A stochastic model for the cell formation problem considering machine reliability. *International Journal of Industrial Engineering*, 1-15.

Ghezavati, V. R. ve Saidi-Mehrabad, M. (2011). An efficient hybrid self-learning method for stochastic cellular manufacturing problem: A queuing-based analysis. *Expert Systems with Applications*, 38(3), 1326-1335.

Gupta, R. M. (1986). Flexibility in layouts: a simulation approach. *Material Flow*, 3(4), 243-250.

Harhalakis, G., Nagi, R. ve Proth, J. M. (1990). An efficient heuristic in manufacturing cell formation for group technology applications. *The International Journal of Production Research*, 28(1), 185-198.

Harhalakis, G., Ioannou, G., Minis, I. ve Nagi, R. (1994). Manufacturing cell formation under random product demand. *The International Journal of Production Research*, 32(1), 47-64.

Heragu, S. S. (1994). Group technology and cellular manufacturing. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 24(2), 203-215.

Ho, Y. C. ve Moodie, C. L. (2000). A hybrid approach for concurrent layout design of cells and their flow paths in a tree configuration. *International Journal of Production Research*, 38(4), 895-928.

Jajodia, S., Minis, I., Harhalakis, G. ve Proth, J. M. (1992). CLASS: computerized layout solutions using simulated annealing. *The International Journal of Production Research*, 30(1), 95-108.

Kaku, B. K. ve Mazzola, J. B. (1997). A tabu-search heuristic for the dynamic plant layout problem. *INFORMS Journal on Computing*, 9(4), 374-384.

Khaksar-Haghani, F., Kia, R., Mahdavi, I. ve Kazemi, M. (2013). A genetic algorithm for solving a multi-floor layout design model of a cellular manufacturing system with alternative process routings and flexible configuration. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 66(5-8), 845-865.

Kia, R., Baboli, A., Javadian, N., Tavakkoli-Moghaddam, R., Kazemi, M. ve Khorrami, J. (2012). Solving a group layout design model of a dynamic cellular manufacturing system with alternative process routings, lot splitting and flexible reconfiguration by simulated annealing. *Computers & Operations Research*, 39(11), 2642-2658.

King, J. R. (1980). Machine-component grouping in production flow analysis: an approach using a rank order clustering algorithm. *International Journal of Production Research*, 18(2), 213-232.

King, J. R. ve Nakornchai, V. (1982). Machine-component group formation in group technology: review and extension. *The International Journal of Production Research*, 20(2), 117-133.

Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D. ve Vecchi, M. P. (1983). Optimization by simulated annealing. science, 220(4598), 671-680.

Kouvelis, P. ve Kiran, A. S. (1991). Single and multiple period layout models for automated manufacturing systems. *European Journal of Operational Research*, 52(3), 300-314.

Kouvelis, P., Kurawarwala, A. A. ve Gutierrez, G. J. (1992). Algorithms for robust single and multiple period layout planning for manufacturing systems. *European journal of operational research*, 63(2), 287-303.

Krishnan, K. K., Cheraghi, S. H. ve Nayak, C. N. (2008). Facility layout design for multiple production scenarios in a dynamic environment. *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, 3(2), 105-133.

Kulkarni, P. C. ve Shanker, K. (2007). A genetic algorithm for layout problems in cellular manufacturing systems. Presented in *IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, 2007 (pp. 694-698).

Kulturel-Konak, S., Smith, A. E. ve Norman, B. A. (2004). Layout optimization considering production uncertainty and routing flexibility. *International Journal of Production Research*, 42(21), 4475-4493.

Kusiak, A. ve Chow, W. S. (1988). Decomposition of manufacturing systems. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, 4(5), 457-471.

Lacksonen, T. A. ve Enscore Jr, E. E. (1993). Quadratic assignment algorithms for the dynamic layout problem. *The International Journal of Production Research*, 31(3), 503-517.

Lee, S. D. ve Chiang, C. P. (2001). A cut-tree-based approach for clustering machine cells in the bidirectional linear flow layout. *International Journal of Production Research*, 39(15), 3491-3512.

Logendran, R., Ramakrjshna, P. ve Sriskandarajah, C. (1994). Tabu search-based heuristics for cellular manufacturing systems in the presence of alternative process plans. *The International Journal of Production Research*, 32(2), 273-297.

Logendran, R. ve Ramakrishna, P. (1995). Manufacturing cell formation in the presence of lot splitting and multiple units of the same machine. *The International Journal of Production Research*, 33(3), 675-693.

Mahdavi, I., Aalaei, A., Paydar, M. M. ve Solimanpur, M. (2010). Designing a mathematical model for dynamic cellular manufacturing systems considering production planning and worker assignment. *Computers & Mathematics with Applications*, 60(4), 1014-1025.

Mahdavi, I., Teymourian, E., Baher, N. T., & Kayvanfar, V. (2013). An integrated model for solving cell formation and cell layout problem simultaneously considering new situations. *Journal of Manufacturing Systems*, 32(4), 655-663.

McKendall, A. R. ve Shang, J. (2006). Hybrid ant systems for the dynamic facility layout problem. *Computers & Operations Research*, 33(3), 790-803.

McKendall, A. R., Shang, J. ve Kuppusamy, S. (2006). Simulated annealing heuristics for the dynamic facility layout problem. *Computers & Operations research*, 33(8), 2431-2444.

McKendall, A. R. ve Hakobyan, A. (2010). Heuristics for the dynamic facility layout problem with unequal-area departments. *European Journal of Operational Research*, 201(1), 171-182.

McKendall Jr, A. R. ve Liu, W. H. (2012). New tabu search heuristics for the dynamic facility layout problem. *International Journal of Production Research*, 50(3), 867-878.

Montreuil, B., Venkatadri, U. ve Ratliff, H. D. (1993). Generating a layout from a design skeleton. *IIE transactions*, 25(1), 3-15.

Montreuil, B. (1999). Fractal layout organization for job shop environments. *International Journal of Production Research*, 37(3), 501-521.

Morad, N. (2000). Genetic Algorithms Optimization for the machine layout Problem. *International Journal of the Computer, the Internet and Management*, 8(1), 1-15.

Moslemipour, G. ve Lee, T. S. (2012). Intelligent design of a dynamic machine layout in uncertain environment of flexible manufacturing systems. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 23(5), 1849-1860.

Mungwattana, A. (2000). *Design of cellular manufacturing systems for dynamic and uncertain production requirements with presence of routing flexibility*. (Doctoral dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2000).

Onwubolu, G. C. ve Songore, V. (2000). A tabu search approach to cellular manufacturing systems. *Production Planning & Control*, 11(2), 153-164.

Onwubolu, G. C. ve Mutingi, M. (2001). A genetic algorithm approach to cellular manufacturing systems. *Computers & Industrial engineering*, 39(1), 125-144.

Palekar, U. S., Batta, R., Bosch, R. M.ve Elhence, S. (1992). Modeling uncertainties in plant layout problems. *European Journal of Operational Research*, 63(2), 347-359.

Papaioannou, G. ve Wilson, J. M. (2010). The evolution of cell formation problem methodologies based on recent studies (1997–2008): Review and directions for future research. *European journal of operational research*, 206(3), 509-521.

Pillai, M. V. ve Chandrasekharan, M. P. (2010, Aralık). *Manufacturing cell formation under probabilistic product mix*. Presented in 2010 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (pp. 580-584).

Rafiee, K., Rabbani, M., Rafiei, H. ve Rahimi-Vahed, A. (2011). A new approach towards integrated cell formation and inventory lot sizing in an unreliable cellular manufacturing system. *Applied Mathematical Modelling*, 35(4), 1810-1819.

Rheault, M., Drolet, J. R. ve Abdulnour, G. (1995). Physically reconfigurable virtual cells: a dynamic model for a highly dynamic environment. *Computers & Industrial Engineering*, 29(1), 221-225.

Rodriguez, J. M., MacPhee, F. C., Bonham, D. J. ve Bhavsar, V. C. (2006). Solving the dynamic plant layout problem using a new hybrid meta-heuristic algorithm. *International Journal of High Performance Computing and Networking*, 4(5-6), 286-294.

Rosenblatt, M. J. (1986). The dynamics of plant layout. *Management Science*, 32(1), 76-86.

Rosenblatt, M. J. ve Lee, H. L. (1987). A robustness approach to facilities design. *International Journal of Production Research*, 25(4), 479-486.

Rosenblatt, M. J. ve Kropp, D. H. (1992). The single period stochastic plant layout problem. *IIE Transactions*, 24(2), 169-176.

Saad, S. M. (2003). The reconfiguration issues in manufacturing systems. *Journal of Materials Processing Technology*, 138(1), 277-283.

Safaei, N., Saidi-Mehrabad, M. ve Jabal-Ameli, M. S. (2008a). A hybrid simulated annealing for solving an extended model of dynamic cellular manufacturing system. *European Journal of Operational Research*, 185(2), 563-592.

Safaei, N., Saidi-Mehrabad, M., Tavakkoli-Moghaddam, R. ve Sassani, F. (2008b). A fuzzy programming approach for a cell formation problem with dynamic and uncertain conditions. *Fuzzy Sets and Systems*, 159(2), 215-236.

Safaei, N. ve Tavakkoli-Moghaddam, R. (2009). Integrated multi-period cell formation and subcontracting production planning in dynamic cellular manufacturing systems. *International Journal of Production Economics*, 120(2), 301-314.

Sahni, S. ve Gonzalez, T. (1976). P-complete approximation problems. *Journal of the Association for Computing Machinery*, 23(3), 555-565.

Saidi-Mehrabad, M. ve Safaei, N. (2007). A new model of dynamic cell formation by a neural approach. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 33(9-10), 1001-1009.

Salum, L. (2000). The cellular manufacturing layout problem. *International Journal of Production Research*, 38(5), 1053-1069.

Sarker, B. R. ve Xu, Y. (2000). Designing multi-product lines: job routing in cellular manufacturing systems. *IIE transactions*, 32(3), 219-235.

Saxena, L. K. ve Jain, P. K. (2011). Dynamic cellular manufacturing systems design: a comprehensive model. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 53(1-4), 11-34.

Saxena, L. K. ve Jain, P. K. (2012). An integrated model of dynamic cellular manufacturing and supply chain system design. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 62(1-4), 385-404.

Savsar, M. (1991). Flexible facility layout by simulation. *Computers & industrial engineering*, 20(1), 155-165.

Schaller, J. E., Erengüç, S. S. ve Vakharia, A. J. (1998). A methodology for integrating cell formation and production planning in cellular manufacturing. *Annals of Operations Research*, 77, 1-21.

Seifoddini, H. (1990). A probabilistic model for machine cell formation. *Journal of Manufacturing Systems*, 9(1), 69-75.

Selim, H. M., Askin, R. G. ve Vakharia, A. J. (1998). Cell formation in group technology: review, evaluation and directions for future research. *Computers & Industrial Engineering*, 34(1), 3-20.

Shafer, S. M. ve Rogers, D. F. (1991). A goal programming approach to the cell formation problem. *Journal of Operations Management*, 10(1), 28-43.

Shanker, R. ve Vrat, P. (1999). Some design issues in cellular manufacturing using the fuzzy programming approach. *International Journal of Production Research*, 37(11), 2545-2563.

Shore, R. H. ve Tompkins, J. A. (1980). Flexible facilities design. *AIIE Transactions*, 12(2), 200-205.

Singh, N. (1993). Design of cellular manufacturing systems: an invited review. *European journal of operational research*, 69(3), 284-291.

Smith, A. E. ve Norman, B. A. (2000). Evolutionary design of facilities considering production uncertainty. In Parmee, I. C. (Ed.) *Evolutionary Design and Manufacture*. Springer London, pp. 175-186.

Solimanpur, M., Vrat, P. ve Shankar, R. (2004). Ant colony optimization algorithm to the inter-cell layout problem in cellular manufacturing. *European Journal of Operational Research*, 157(3), 592-606.

Şahin, R. ve Türkbey, O. (2009). A new hybrid tabu-simulated annealing heuristic for the dynamic facility layout problem. *International Journal of Production Research*, 47(24), 6855-6873.

Şahin, R., Ertoğral, K. ve Türkbey, O. (2010). A simulated annealing heuristic for the dynamic layout problem with budget constraint. *Computers & Industrial Engineering*, 59(2), 308-313.

Şahin, R. (2011). A simulated annealing algorithm for solving the bi-objective facility layout problem. *Expert Systems with Applications*, 38(4), 4460-4465.

Tavakkoli-Moghaddam, R., Aryanezhad, M. B., Safaei, N. ve Azaron, A. (2005a). Solving a dynamic cell formation problem using metaheuristics. *Applied Mathematics and Computation*, 170(2), 761-780.

Tavakkoli-Moghaddam, R., Safaei, N. ve Babakhani, M. (2005b). Solving a dynamic cell formation problem with machine cost and alternative process plan by memetic algorithms. In Lupanov, O. B., Kasim-Zade, O.M., Chaskin, A. V., Steinhöfel, K. (Eds.) *Stochastic Algorithms: Foundations and Applications*. Springer Berlin Heidelberg, pp. 213-227.

Tavakkoli-Moghaddam, R., Javadian, N., Javadi, B. ve Safaei, N. (2007a). Design of a facility layout problem in cellular manufacturing systems with stochastic demands. *Applied Mathematics and Computation*, 184(2), 721-728.

Tavakkoli-Moghaddam, R., Aryanezhad, M. B., Safaei, N., Vasei, M. ve Azaron, A. (2007b). A new approach for the cellular manufacturing problem in fuzzy dynamic conditions by a genetic algorithm. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems: Applications in Engineering and Technology*, 18(4), 363-376.

Tavakkoli-Moghaddam, R., Safaei, N. ve Sassani, F. (2008). A new solution for a dynamic cell formation problem with alternative routing and machine costs using simulated annealing. *Journal of the Operational Research Society*, 59(4), 443-454.

Urban, T. L. (1993). A heuristic for the dynamic facility layout problem. *IIE transactions*, 25(4), 57-63.

Venkatadri, U., Rardin, R. L. ve Montreuil, B. (1997). A design methodology for fractal layout organization. *IIE transactions*, 29(10), 911-924.

Venugopal, V. ve Narendran, T. T. (1992). A genetic algorithm approach to the machine-component grouping problem with multiple objectives. *Computers & Industrial Engineering*, 22(4), 469-480.

Wang, T. Y., Lin, H. C. ve Wu, K. B. (1998). An improved simulated annealing for facility layout problems in cellular manufacturing systems. *Computers & Industrial Engineering*, 34(2), 309-319.

Wang, T. Y., Wu, K. B. ve Liu, Y. W. (2001). A simulated annealing algorithm for facility layout problems under variable demand in cellular manufacturing systems. *Computers in Industry*, 46(2), 181-188.

Wang, S. ve Sarker, B. R. (2002). Locating cells with bottleneck machines in cellular manufacturing systems. *International Journal of Production Research*, 40(2), 403-424.

Wemmerlöv, U. ve Hyer, N. L. (1989). Cellular manufacturing in the US industry: a survey of users. *The International Journal of Production Research*, 27(9), 1511-1530.

Wemmerlöv, U. ve Johnson, D. J. (1997). Cellular manufacturing at 46 user plants: implementation experiences and performance improvements. *International Journal of Production Research*, 35(1), 29-49.

Winston, W. L. ve Goldberg, J. B. (2004). *Operations research: applications and algorithms* (3. baskı). Boston: Duxbury press, pp.64.

Wicks, E. M. ve Reasor, R. J. (1999). Designing cellular manufacturing systems with dynamic part populations. *IIE transactions*, 31(1), 11-20.

Won, Y. D. (1997). A linear programming approach to linear machine layout problem. *Journal of Industrial Mathematics*, 2, 47.

Wu, X., Chu, C. H., Wang, Y. ve Yan, W. (2006). Concurrent design of cellular manufacturing systems: a genetic algorithm approach. *International Journal of Production Research*, 44(6), 1217-1241.

Wu, X., Chu, C. H., Wang, Y. ve Yan, W. (2007). A genetic algorithm for cellular manufacturing design and layout. *European Journal of Operational Research*, 181(1), 156-167.

Yang, T. ve Peters, B. A. (1998). Flexible machine layout design for dynamic and uncertain production environments. *European Journal of Operational Research*, 108(1), 49-64.

Zhao, C. ve Wu, Z. (2000). A genetic algorithm for manufacturing cell formation with multiple routes and multiple objectives. *International Journal of Production Research*, 38(2), 385-395.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı	: BAYRAM, Hüsamettin
Uyruğu	: T.C.
Doğum tarihi ve yeri	: 25.08.1984, Ankara
Medeni hali	: Evli
Telefon	: 0 (505) 626 50 41
e-mail	: husamettinb@gmail.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Doktora	Gazi Üniversitesi	Devam Ediyor.
Yüksek lisans	Technische Universität Hamburg-Harburg	2009
Lisans	Yıldız Teknik Üniversitesi	2007
Lise	Ankara Kalaba Anadolu Lisesi	2002

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2010-Halen	Hitit Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

Yabancı Dil

İngilizce (YDS-2015: 95)

Yayınlar

1. Bayram, H., ve Sahin, R. (2013). A new simulated annealing approach for the traveling salesman problem. Mathematical and Computational Applications, 18(3), 313-322.
2. Bayram, H., ve Sahin, R., 2016 , A Comprehensive Mathematical Model for Dynamic Cellular Manufacturing System Design and a Linear Programming Embedded Hybrid Solution Technique, *Computers & Industrial Engineering*, 91(1), 10-29.
3. Bayram, H. Şahin, R. ve Durmaz, E.D. The Dynamic Single Row Facility Layout Problem (European Journal of Operations Research dergisinde değerlendiriliyor.)

GAZİ GELECEKTİR...