

**HÜCRESEL İMALAT SİSTEMLERİNDE İNSAN-MAKİNA
HÜCRELERİ OLUŞTURMA PROBLEMİ İÇİN ÇOK AMAÇLI BİR
MATEMATİKSEL PROGRAMLAMA YAKLAŞIMI**

Gökçe KILIÇ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

HAZİRAN 2008

ANKARA

Gökçe KILIÇ tarafından hazırlanan HÜCRESEL İMALAT SİSTEMLERİNDE İNSAN-MAKİNA HÜCRELERİ OLUŞTURMAK İÇİN ÇOK AMAÇLI BİR MATEMATİKSEL PROGRAMLAMA YAKLAŞIMI adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Yrd. Doç. Dr. Feyzan ARIKAN (ÖKTEMER)
Endüstri Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Zülal GÜNGÖR
Endüstri Mühendisliği ABD, Gazi Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Feyzan ARIKAN (ÖKTEMER)
Endüstri Mühendisliği ABD, Gazi Üniversitesi

Prof. Dr. Selim AKTÜRK
Endüstri Mühendisliği ABD, Bilkent Üniversitesi

Tarih: 18/06/2008

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Nermin ERTAN
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Gökçe KILIÇ

**HÜCRESEL İMALAT SİSTEMLERİNDE İNSAN-MAKİNA HÜCRELERİ
OLUŞTURMA PROBLEMİ İÇİN ÇOK AMAÇLI BİR MATEMATİKSEL
PROGRAMLAMA YAKLAŞIMI
(Yüksek Lisans Tezi)**

Gökçe KILIÇ

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Haziran 2008**

ÖZET

İmalat sistemlerinin dört temel bileşeni; insan, ekipman, operasyon kuralları ve malzemedir. Hücresel imalat sistemlerinin etkin tasarımı, bu bileşenlerin beraberce ele alınmasını gerekli kılar.

Hücresel imalat sistemlerinin tasarımının ilk ve en önemli problemlerinden biri hücre oluşturma problemidir. Bu çalışmada; hücre oluşturma probleminin çözümü için imalatın dört temel bileşenini dikkate alınarak parça- makina ve insan hücrelerini eşzamanlı oluşturan bir matematiksel model önerilmiştir. Model, alternatif rotaları, parça taleplerini dikkate alan, fason imalata, parti büyüklüklerinin bölünmesine izin veren, çok amaçlı 0-1 karışık tamsayılı programlama modelidir. Modeldeki amaçlar, işlem zamanlarının minimizasyonu, satın alınan makina sayısının ve bakımlarının minimizasyonu, hazırlık zamanlarının minimizasyonu, fason imalat maliyetinin, hücreler arası taşımanın ve işe alınan makine operatörlerinin minimizasyonudur. Tümü maliyet minimizasyonu paydasında tek bir kalemde birleştirilmiştir.

Önerilen model, literatürden seçilen bir veri kümesinin probleme adaptasyonu kullanılarak incelenmiştir. Model performansı, farklı boyutlardaki problemler için çözüm zamanı, düğüm ve iterasyon sayısı kriterlerine göre

değerlendirilmiştir. Önerilen matematiksel modelin, küçük ve orta ölçekli problemlerde uygulanabilir ve faydalı bir yöntem olmaya aday olduğu gözlenmiştir.

Bilim Kodu : 906.1.141
Anahtar Kelimeler : İnsan-Makine Hücre Oluşturma Problemi, Hücresel İmalat, Çok Amaçlı Matematiksel Programlama.
Sayfa Adedi : 125
Tez Yöneticisi : Yrd. Doç. Dr. Feyzan ARIKAN (ÖKTEMER)

**A MULTI OBJECTIVE MATHEMATICAL PROGRAMMING APPROACH
FOR HUMAN-MACHINE CELL FORMATION PROBLEM IN CELLULAR
MANUFACTURING SYSTEMS**

(M.Sc. Thesis)

Gökçe KILIÇ

**GAZI UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

June 2008

ABSTRACT

Four basic components of manufacturing systems are human, equipment, operating rules and material. The efficient design of cellular manufacturing systems necessitate the consideration of these components altogether.

Cell formation problem is the first and one of the most important problems in cellular manufacturing system design. In this study; a mathematical model which forms part-machine and human cells simultaneously is proposed to solve cell formation problem by taking into account four basic components of manufacturing. The model is a multi-objective mixed integer mathematical model which considers alternative routings, part demands and allows subcontracting, lot splitting. The objectives in the model are minimizing the operation time, the number of purchased machines and their set up time, subcontracting cost, the number of intercellular movements of parts and the number of employed machine operators. All the terms are unified as cost minimization.

The proposed model is analysed with a sample problem of which data set adapted from the literature. The model performance is investigated according to run time, the number of nodes and iterations measures by using different size

problems. It has been observed that the proposed mathematical model is a candidate for efficient and usable tool in small and medium sized problems.

Science Code : 906.1.141
Key Words : Human-Machine Cell Formation Problem, Cellular
Manufacturing, Multi Objective Mathematical
Programming
Page Number : 125
Adviser : Asist. Prof. Dr. Feyzan ARIKAN (ÖKTEMER)

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla ben yönlendiren Sayın Hocam Yrd. Doç. Dr. Feyzan ARIKAN ÖKTEMER'e en derin teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, Sayın Bölüm Başkanımız Prof. Dr. Zülal GÜNGÖR'e teşekkür ederim.

Tüm hayatım boyunca olduğu gibi bu çalışmam boyunca da moral ve manevi desteğini esirgemeyen aileme, anlayış ve desteğinden ötürü sevgili eşim Cem ÖGER'e en içten teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca çalışmalarımın her aşamasında bana destek olan, sayın çalışma arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Çalışmamda bana maddi destek sağlayan TÜBİTAK'a teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xi
1. GİRİŞ	1
2. HÜCRESEL İMALAT SİSTEMİ İLE İLGİLİ TEMEL KAVRAMLAR.....	5
2.1. Hücre Oluşturma Problemi	7
2.1.1. Çok amaçlı hücre oluşturma problemi	8
2.1.2. Parti bölünmesinin dikkate alındığı hücre oluşturma problemi	12
2.1.3. Alternatif rotaların dikkate alındığı hücre oluşturma problemi	13
2.1.4. İnsan faktörünün dikkate alındığı hücre oluşturma problemi	16
3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	21
3.1. Çok Amaçlı Hücre Oluşturma Problemi.....	22
3.2. Parti Bölünmesinin Dikkate Alındığı Hücre Oluşturma Problemi	32
3.3. Alternatif Rotaların Dikkate Alındığı Hücre Oluşturma Problemi.....	33
3.4. İnsan Faktörünün Dikkate Alındığı Hücre Oluşturma Problemi	48
4. PROBLEMİN TANIMI	60
4.1. Modelin Varsayımları	62
4.2. Matematiksel Model	63
4.3. Örnek Bir Veri Seti İle Çözüm	70
4.4. Modelin Varyasyonları	76

Sayfa

4.4.1. Parti bölünmesine izin vermeyen model	76
4.4.2. Dış kaynak kullanımına (fason imalata) izin vermeyen model.....	79
4.4.3. Alternatif rotalara izin vermeyen model	81
5. MODELİN PERFORMANS ETKİNLİĞİ.....	85
5.1. Modelin Rassal Veri Setlerine Sahip Problemlere Uygulanması	85
6. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME.....	88
KAYNAKLAR	90
EKLER.....	99
EK-1 Ana modele ait örnek problem GAMs kodu	100
EK-2 Ana modelin GAMs kodunun örnek problem verileri ile elde edilen sonuç dosyası	104
EK-3 Ana modelin performans etkinliğini değerlendirmek için oluşturulan rassal veri setleri için kullanılan Visual Basic kodu	108
ÖZGEÇMİŞ.....	112

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Örnek operatör becerileri	7
Çizelge 2.2. İki amaçlı üç uygun çözümlü bir minimizasyon problemi	9
Çizelge 2.3. Amaç fonksiyonları ve hücreyel imalat sistemleri ile ilgili faydaları [Arıkan, 2002]	11
Çizelge 2.4. Alternatif rotaların operasyonlarla gösterimi için bir örnek matris	13
Çizelge 2.5. Alternatif rotaların makinalarla gösterimi için bir örnek matris	14
Çizelge 2.6. ARG etkinliğinin hesaplanması için örnek bir başlangıç parça makina matrisi	16
Çizelge 2.7. ARG etkinliğinin hesaplanması için başlangıç parça makina matrisinin çözüm matrisi	16
Çizelge 3.1 Çok amaçlı hücre oluşturma çalışmaları	30
Çizelge 3.2. Alternatif rotaların dikkate alındığı hücre oluşturma çalışmaları	45
Çizelge 3.3. İnsan faktörünün dikkate alındığı çalışmalar	56
Çizelge 4.1. Üretilcek parçalara ait parti büyüklükleri, hücreler arası taşıma maliyetleri ve talepler	70
Çizelge 4.2. Örnek problem için parçaların operasyonlarının yapılabileceği makinalar	71
Çizelge 4.3. Örnek problem için operasyonların yapılabileceği makinalar işlem zamanları ve hazırlık maliyetleri (makina, zaman, hazırlık maliyeti)	71
Çizelge 4.4. İşletmedeki makinalara ait bakım maliyeti, makina kapasiteleri ve makina alım maliyetleri	71
Çizelge 4.5. Modelde kullanılan hücre sayısı, hücre alt ve üst sınırı, farklı makina çiftleri ve iş yükü faktörü	72
Çizelge 4.6. Operatör becerilerine ait veriler	73
Çizelge 4.7. Model çıktısı sonucu parçaların X_{ijkl} değerleri (üretildiği hücre; makina tipi; üretim oranı)	74

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.8. Model çıktısı sonucu hücrelere atanan makinalar ve operatörlere ait beceriler	75
Çizelge 4.9. Parti bölünmesine izin vermeyen model çıktısı sonucu parçaların X_{ijkl} değerleri (üretildiği hücre; makina tipi; üretim oranı)	77
Çizelge 4.10. Parti bölünmesine izin vermeyen model çıktısı sonucu hücrelere atanan makinalar ve operatörlere ait beceriler	78
Çizelge 4.11. Dış kaynak kullanımına izin vermeyen model çıktısı sonucu parçaların X_{ijkl} değerleri (üretildiği hücre; makina tipi; üretim oranı) ..	80
Çizelge 4.12. Dış kaynak kullanımına izin vermeyen model çıktısı sonucu hücrelere atanan makinalar ve operatörlere ait beceriler.....	81
Çizelge 4.13. Alternatif rotalara izin vermeyen model çıktısı sonucu parçaların X_{ijkl} değerleri (üretildiği hücre; makina tipi; üretim oranı)	83
Çizelge 4.14. Alternatif rotalara izin vermeyen model çıktısı sonucu hücrelere atanan makinalar ve operatörlere ait beceriler	83
Çizelge 5.1. Modelin performans etkinliği için üretilen problem boyutları ve çözüm parametreleri	86
Çizelge 5.2. Alternatif rota etkinliği η_{ARG} hesaplama için gerekli parça makina matrisi	86
Çizelge 5.3. Alternatif rota etkinliği η_{ARG} hesaplama için sonuç parça makina matrisi	87

1. GİRİŞ

Günümüzde işletmelerin rekabet güçlerini koruyabilmeleri; üretimde hız, kalite, esneklik, sürekli gelişim ve ürün çeşitlilik faktörlerine daha fazla önem vermeleri sayesinde sağlanabilmektedir. Müşteri ihtiyaçlarının saptanmasında, tasarımda üretimde ve sevkiyatta sürat faktörü hayati bir önem arz etmektedir. Üretim ve pazar arama anlayışları değişmekte ve müşteri isteklerine göre ürünler tasarlamak, üretmek ve bunu en hızlı şekilde pazara sunmak artık kaçınılmaz hale gelmektedir. Seri üretim yapan, ürün yelpazesi dar işletmeler yerine, üretim ve planlamada esnek, dinamik ve müşteri isteklerine bağlı ürün çeşitliliklerine uyum sağlayabilen işletmeler ön plana çıkmaya başlamıştır. İşte böyle bir ortamda, işletmeler; verimlilik ve rekabet hedeflerine ulaşmalarında etkin Hücresel İmalatı tercih etmektedirler.

Hücresel İmalat; Grup Teknolojisinin imalat sistemlerine uygulanması olarak 1950'lerin sonlarında geliştirilmiştir. Hücresel İmalat, benzer parçaların tanımlanıp “parça aileleri” ve bunların işlem göreceği makinaların gruplanarak “makina hücreleri” olarak belirlenmesine dayanan bir üretim yönetim felsefesidir. Bu gruplandırma, parçaların imalat ve tasarım açısından benzerliklerinden yararlanmak amacıyla yapılır. Bu amacı elde edebilmek için imalat hücrelerinin belirlenmesi gerekmektedir. İmalat hücrelerinin belirlenmesi; literatürde hücresel formasyon, hücre tasarımı ya da hücre oluşturma problemi olarak adlandırılmaktadır.

Hücre oluşturma problemi, hücresel imalata geçiş için ilk ve en önemli problemlerden biridir. Başarılı bir hücresel imalat sistemi uygulaması için imalat hücrelerine ait dikkate alınması gereken dört temel unsur; insan, ekipman, malzeme ve operasyon kurallarıdır [Bidanda ve ark., 2005]. Literatürdeki çalışmalar genellikle son üç unsuru dikkate alarak, operasyon kuralları, parçaların geçirmesi gereken operasyonlar, bu operasyonların gerçekleştirilmesi için kullanılan makinalar, üretilen parçaların talep miktarları, üretim parti büyüklükleri, hazırlık ve işlem zamanları, alternatif üretim rotalarının varlığı ve fason imalat gibi birçok özellik üzerinde yoğunlaşmışlardır. Oysa hücresel imalat sistemlerinin tasarımında; insan unsuru, ekipman kullanımına yönelik “teknik beceriler” ve takım çalışmasına uyum, problem

çözebilme, karar verebilme yeteneği v.b. şekilde detaylandırılabilen “kişisel beceriler” ile bu becerilere bağlı maliyetler, diğer üç unsura ait özelliklerin yanı sıra dikkate alınmalıdır.

Günümüzün gelişmiş teknolojiler kullanan üretim sistemlerinde dahi, insan, sistemin vazgeçilmez bir ögesidir. Parçaların hazırlanması, takım ve aparatların bağlanması, makinaların kodlama ve veri girişlerinin gerçekleştirilmesi, parçaların işlenmesi ya da işlenmesinin takibi, kalite kontrol ve benzeri birçok alanda yeri doldurulamayan bir unsur olarak karşımıza çıkmaktadır.

Literatürde hücre oluşturma problemi dahilinde insan unsurunu dikkate alan çalışmalar genellikle daha önceden oluşturulmuş veya aşamalı bir yaklaşımın önceki aşamalarında oluşturulan parça makina hücrelerine operatörlerin atanması ile ilgilenmişlerdir. Operatörlerin makinaya atandığı durumlarda, bir diğer deyişle makina kullanımı için gerekli operatöre ait teknik ve kişisel becerilerin önem kazandığı imalat sistemlerinde, operatör atamasının hücre oluşturma problemi ile eş zamanlı dikkate alınması tasarım problemi için önemlidir. Verilecek stratejik kararlardan olan makinaların satın alınması, parçaların fason imalata gönderilmesi, bu makinaları kullanacak olan operatörlerin beceri ve beceri seviyelerine bağlı maliyetlere göre şekil alacaktır. Dolayısıyla, tasarım aşamasında belirlenecek olan hücre yapısını doğrudan doğruya etkileyecektir. Literatürde eş zamanlı operatör ataması yapan iki çalışma mevcuttur. Bunlardan ilki Min ve Shin’in [Min ve Shin, 1993] matematiksel modelleme yaptıkları çalışmadır. Bu çalışmada, operatörler parçalara atanmakta ve operatörlerin parçaları işleme düzeylerinin 0-5 skolasında değerlendirildiği bir parça-operatör matrisinden yararlanılarak atama yapılmaktadır. Bu çalışmada geliştirilen matematiksel modelde; operatörlerin atamasında teknik ve kişisel becerilerden hangilerinin ne seviyede dikkate alındığı, parça operatör matrisinin neye göre değerlendirildiği belirtilmemiştir ve model harici elemanlara izin vermemektedir. Önerilen iki aşamalı sezgisel çözüm yöntemi ile de operatörlerin eşzamanlı atamasının yerine, ilk aşamada oluşturulan hücrelere ataması yapılmıştır. Çalışmalardan ikincisi, Li’nin eşzamanlı atama için geliştirdiği sezgiseldir. Yalnızca operatörlerin değil, çok sayıda 0-1 matristen oluşan bileşenin hücrelere atanması için

tasarlanmış olan bu sezgiselde; operatörlerin bir teçhizat, malzeme, takım vb. gibi değerlendirilmiş olması nedeniyle, operatörün teknik ve kişisel yapısı dikkate alınmamıştır. Ayrıca iki çalışmada da parçaların işlenebilmesi için gerekli operasyonlar, operasyonların gerçekleşmesi için gerekli makinalar, makinaların alım maliyetleri, makinaların kapasiteleri, parçaların talep değerleri, parçaların farklı makinalardaki farklı işlem zamanları ve hazırlık zamanları, parçaların hücreler arası taşınması gibi imalat sisteminin temel yapısını oluşturan özellikler dikkate alınmamıştır.

Bu çalışmada, operatörlerin teknik ve kişisel beceri seviyelerine göre makinalara atandığı, alternatif rotaların, parça taleplerinin dikkate alındığı, fason imalata ve parti büyüklüklerinin bölünmesine izin veren bir imalat sisteminde; parça, makina ve insan hücrelerinin eşzamanlı oluşturulması problemini gerçeği en iyi yansıtmak amacıyla çok amaçlı bir matematiksel model geliştirilmiştir. Modeldeki amaçlar; parçaların bağımsız hücrelerde üretilmesi, satın alınan makina sayısının minimizasyonu, makinaların bakımlarının ve hazırlık zamanlarının azaltılması, imalat sistemi dışında gerçekleştirilen parça operasyonlarının en azlanması, parçaların atandıkları hücrelerin dışında yapılan operasyonlarının azaltılması ve satın alınan makinalara atanan operatörlerin teknik ve kişisel becerilerinin minimizasyonudur. Bu amaçlar birer maliyet terimine dönüştürülerek, matematiksel model toplam maliyetin minimizasyonunu dikkate alan bir modele dönüştürülmüş, böylece amaçların eşzamanlı çözümü sağlanmıştır.

Yapılan çalışmanın akışına göre, ikinci bölümde temel kavramlardan bahsedilmiştir. İlk olarak; hücresel imalat sistemi ile ilgili temel kavramlar açıklanmış daha sonra hücre oluşturma problemi tanımlanmıştır. Hücre oluşturma problemi, bu çalışmada dikkate alınan unsurlara göre sınıflandırılarak açıklanmıştır. İlk olarak, çok amaçlı hücre oluşturma problemi ve çok amaçlı optimizasyon tekniklerine değinilmiş; parti bölünmesini, alternatif rotaları dikkate alan hücre oluşturma problemlerinden bahsedilmiştir. Daha sonra, hücresel imalat sistemlerinde dikkate alınan insan unsurları ve bu unsurlardan operatör atama stratejileri açıklanmıştır.

Üçüncü bölümde; literatür taramasına yer verilmiştir. Sırasıyla, hücresel imalat sistemlerinde çok amaçlı hücre oluşturma problemleri, parçalara ait üretim özelliklerinden alternatif rotaları dikkate alan çalışmalar ve hücresel imalat sistemlerinde insan unsurunu dikkate alan çalışmalar sunulmuştur.

Dördüncü bölümde; ele alınan problemin sözel tanımına ve geliştirilen matematiksel modele yer verilmiştir. Modelin varsayımları, kullanılan değişkenler, parametreler, amaçlar ve kısıtlar tanımlanmıştır. Modelin çalışma sistemi bir örnek problem kullanılarak sunulmuştur. Daha sonra, ele alınan problemin gerçek yaşamda karşılaşılabilecek farklı varsayımları için model varyasyonlarına değinilmiştir.

Beşinci bölümde geliştirilen bu modelin performans etkinliği, literatürdeki mevcut problemler referans alınarak oluşturulan rassal veri setleri üzerinde denenmiştir. Elde edilen sonuçlar, çözüm zamanları iterasyon sayıları ve düğüm sayılarına göre değerlendirilmiştir. Önerilen modelin etkin çözümler verdiği gözlemlenmiştir.

Son bölümde; yapılan bu çalışma, geliştirilen model ve elde edilen sonuçlar açısından değerlendirilmiştir. Geliştirilen modelin literatüre ve hücre oluşturma problemi ile ilgilenen üretim sistemlerine katkısı tartışılmış ve geleceğe yönelik çalışmalara değinilmiştir.

2. HÜCRESEL İMALAT SİSTEMİ İLE İLGİLİ TEMEL KAVRAMLAR

Kitlesel İmalat Sistemi: Düşük seviyede ürün çeşitliliği, yüksek miktarda üretimin yapıldığı üretim sistemidir. Sanayi devrimi ile başlayan ve üretilen ürünlerin tamamının talep bulabildiği bu nedenle müşteri ihtiyaçlarının dikkate alınmadığı dönemde ortaya çıkmış üretim sistemleridir. Belirli ürün ve ürün gruplarında (un, şeker, ekmek vb.) halen bu üretim tipi yaygındır.

Parti Tipi İmalat Sistemi: Yüksek seviyede ürün çeşitliliği ve düşük miktarda üretimin yapıldığı üretim sistemidir. Küreselleşmeye bağlı sürekli artan müşteri ihtiyaçlarının dikkate alındığı günümüz işletmelerinin genel üretim sistemi yapısıdır.

Grup Teknolojisi: İşletmelerin düşük ürün miktarı, yüksek ürün çeşitliliğinde kitlesel imalat sistemlerindeki yüksek verimlilik ve rekabet avantajı amaçlarına ulaşabilmesi gereklidir. Bunu sağlayabilmek için yararlanılan felsefelerden biri grup teknolojisi felsefesidir. Grup teknolojisi felsefesi, üç farklı yöndeki benzerliğin tanınması ve kullanımını aşağıdaki şekilde vurgular [Hyer ve Wemmerlöv, 1985]:

- Benzer aktivitelerin birlikte yapılması
- Benzer görevlerin standart hale getirilmesi
- Yineleyen problemlerin ve çözüm yöntemlerinin etkin bir şekilde saklanması

Grup teknolojisi; ürünler ve aktivitelerdeki benzerlikleri temel alarak, bu özellikleri ele alınan sistem için faydalı hale getirmeyi amaçlayan, imalat ve mühendislik yönetim felsefesi olarak tanımlanabilir [Selim ve ark., 1998].

Hücreli İmalat Sistemi: Hücreli İmalat Sistemleri, grup teknolojisi felsefesinin imalata uygulaması olarak 1950'lerin sonlarında geleneksel imalat sistemleri yerine daha etkin sistemler arayışına girilmesi sonucunda ortaya çıkmıştır. Hücreli imalat sisteminin ana fikri, imalat sistemini birçok hücreye bölerek benzer üretim işlemi özelliklerine sahip parçaların aynı hücre içerisinde işlenmesini sağlamak ve

retkenliği arttırmaktır. Bir imalat hücresi, belli bir grup parçanın imalatı için tasarlanmış ve düzenlenmiş makinalardan oluşan bir kümedir [Wemmerlöv ve Hyer, 1986].

Yüksek rn çeşitliliği ve düşük üretim hacimlerine sahip geleneksel parti tipi üretimle, hücresel üretim farkı şudur: geleneksel sistemde üretim yapısının temel özellikleri; genel amaçlı tezgâhlar, nitelikli işgücü, yüksek miktarlarda malzeme taşınması, hazırlık sürelerinin uzunluğu ve esnekliktir. Bu sistemde genel amaçlı tezgâhlar kullanılarak elde edilen esnekliğin bedeli düşük tezgâh hızları, uzun hazırlık süreleri, yüksek yarı ürün stoku ve bunların getirdiği maliyet olarak ödenmektedir. Oysa hücresel imalatta benzer yapıda parçaların işlendiği tezgâhlar bir araya toplanmakta ve böylece fabrika içinde parça benzerliklerine ya da ürün ağaçlarına dayalı bir gruplandırma oluşmaktadır.

Parça-Makina Matrisi: en genel haliyle parçaların hangi makinalarda işlem göreceğinin özetlendiği matris yapısıdır. Matematiksel gösterimi $A=[a_{ij}]$ şeklinde olan ve i parçası j makinasında işlem görüyorsa $a_{ij}=1$; diğer durumda $a_{ij}=0$ olarak tanımlanır.

Blok Diagonal Yapı: Bir $X=[x_{ij}]$ matrisinin $x_{ij} \neq 0$ elemanları için satır kümesi $R_1, \dots, R_k, R_{k+1}$ olarak ve sütün kümesi de $C_1, \dots, C_k, C_{k+1}$ olarak ($1 \leq k$ ve $i \in C_i$) paralanabiliyorsa X blok diagonal yapıdadır, denir [Crama ve Oosten, 1996].

Harici eleman: Kşegendeki blokların dışında kalan $x_{ij}=1$ 'lere harici eleman denir. Harici eleman iki veya daha fazla hücre arasında interaktif hareket yaratan parçalar ve/veya makinalardır [Shafer ve ark., 1992].

Boşluk (Void): Kşegendeki blokların içinde kalan $x_{ij}=0$ 'lara boşluk denir. Boşluk, gerçekte birbiri ile doğrudan bağlantısı olmayan parça ve makinaların aynı hücrede yer aldığını gösterir.

İnsan: İki ayağı üzerinde dolaşan, sözle anlaşılan, akıl ve düşünme yeteneği olan en gelişmiş canlı olarak tanımlanır.

Teknik Beceri: İnsana özgü, insanların alet, makina, teçhizat kullanabilmeleri, bilgisayara kod yazabilme, CNC, torna, freze tezgahlarını kullanabilme gibi teknik yeteneklerdir. Kişiden kişiye ve yapılan işten işe değişen becerilerdir. Sonradan edinilebilen ve çalışma ile artabilen yeteneklerdir.

Kişisel Beceri: İnsanların kişiliğinden kaynaklanan ve doğuştan getirdiği bazı kişisel yeteneklerdir. Bunlara örnek olarak; kişilerde iletişim kurabilme, problemleri anında görebilme, müdahale edebilme, inisiyatif kullanabilme, karar verebilme, sorumluluk alma vb. sayılabilir.

Çizelge 2.1’de Norman ve arkadaşları [Norman ve ark., 2002] referans alınarak oluşturulmuş, kişisel ve teknik becerilere örnek olarak verilebilecek beceri çeşitleri yer almaktadır.

Çizelge 2.1. Örnek operatör becerileri

TEKNİK BECERİLER	KİŞİSEL BECERİLER
CNC torna operasyonu	İletişim
Delme operasyonu	Problem çözme
Makine hazırlığı	Uyuşmazlık çözümü
Denetleme	Karar verme yeteneği
CNC öğütme	Liderlik
Parça bağlama ve sökme	Takım çalışması uyumu
Freze kullanma	İnisiyatif kullanma
Bilgisayar veri girişi	Risk yönetimi

2.1. Hücre Oluşturma Problemi

Hücre Oluşturma Problemi: Hücresel imalat sistemlerinin ilk ve en önemli problemi hücre oluşturma problemidir. Parçaların benzer tasarım özellikleri ve işlem ihtiyaçları doğrultusunda parça aileleri olarak ve ilgili makinaların hücreler olarak gruplanması problemi şeklinde tanımlanır [Chu, 1989].

2.1.1. Çok amaçlı hücre oluşturma problemi

Çok amaçlı hücre oluşturma probleminin daha iyi açıklanabilmesi için öncelikle çok amaçlı optimizasyon kavramı ve çok amaçlı optimizasyon yöntemlerine değinilmiştir.

Çok amaçlı optimizasyon: İki ve/veya daha fazla amaç fonksiyonuna sahip problemlerin optimizasyonu ile ilgilenir [Cohon, 1978]. Genel bir çok amaçlı optimizasyon problemi aşağıdaki gibi tanımlanır [Zitzler ve Thielle, 1999]:

$$\min/\max y = f(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)) \quad (2.1)$$

s.t.

$$x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in X \quad (2.2)$$

$$y = (y_1, y_2, \dots, y_n) \in Y \quad (2.3)$$

Burada x karar vektörü, y amaç vektörü, X parametre uzayı ve Y amaç uzayıdır.

Çok amaçlı optimizasyon problemlerinde klasik anlamda bir optimal çözüm söz konusu değildir. Problemden bulunan amaçların birbiriyle çatışması (birini iyileştirmek için diğerinden ödün verme zorunluluğu) nedeniyle baskın çözüm ve etken çözüm kavramları ortaya çıkmıştır.

Baskın çözüm: x_1 ve x_2 uygun çözüm uzayında tanımlı iki nokta ve

$$f_n(x_2) \geq f_n(x_1) \quad n=1,2,\dots,N$$

$$f_n(x_2) > f_n(x_1) \quad \text{en az bir } n \text{ için}$$

şartları sağlanıyorsa x_2 baskın çözümdür. Bir diğer deyişle x_1 , x_2 tarafından domine edilmiştir.

Uygun bir x çözümü elde edildiğinde onu domine eden başka bir çözüm elde edilemiyorsa mevcut çözüm etken çözüm olarak tanımlanır. Bir etken çözüm kümesi

içerisinden diğerlerine tercih edilen çözüm en iyi uzlaşan çözümdür [Arıkan, 1996]. Bu tanımlar aşağıdaki küçük örnekle açıklanabilir:

Çizelge 2.2’de gösterilen minimizasyon problemi için iki farklı amaç ve üç uygun çözüm olsun.

Çizelge 2.2. İki amaçlı üç uygun çözümlü bir minimizasyon problemi

Uygun Çözüm	$f_1(x)$	$f_2(x)$
A	5	10
B	6	8
C	7	11

Çizelge 2.2’de görüldüğü gibi C uygun çözümü A ve B çözümleri tarafından domine edilmiştir. Diğer bir deyişle A ve B çözümleri C çözümüne göre baskındır. Bu çözümler içerisinden karar verici tarafından biri tercih edilecektir. Tercih işlemi karar verici tarafından sezgisel olarak yapılabileceği gibi matematiksel yöntemler de kullanılabilir. Sonuçta elde edilen çözüm, en iyi uzlaşan çözüm olarak tanımlanır.

Çok amaçlı optimizasyon yöntemleri: Tabucanon [Tabucanon, 1988] tarafından; çok amaçlı optimizasyon yöntemleri; ikincil dereceli amaçların kısıt haline getirilmesi, bütün amaçların kombinasyonundan tek bir amaç fonksiyonu oluşturulması ve tüm amaçların kısıt olarak alınması olmak üzere üçe ayrılmıştır. Bu çalışmada ele alınan amaçlar; bir maliyet paydasında toplanmak suretiyle tek bir amaç fonksiyonu haline getirilmiştir.

Çok amaçlı hücre oluşturma problemi: Hücre oluşturma, her bir organizasyonda değişen uygulamalarıyla oldukça karmaşık bir problemdir. Hücre oluşturma denilince, parça çeşitlerinin kümesini belirlemek ve bunların işleneceği uygun makina gruplarının belirlenmesi problemi anlaşılmaktadır. Bunların yanı sıra makina esnekliği, hücre yerleşimi, malzeme taşıma ekipmanlarının çeşidi, takım ve bağlayıcı sayısı ve tipi, vb. seviyelerinde birçok stratejik seviyede konular vardır. Dahası her bir anlamlı hücre yapısı, yüksek üretim hızı, düşük ara stok miktarı, her bir iş

istasyonunda kısa kuyruklar, yüksek makina kullanımı vb. gibi taktik ve operasyonel amaçlarla uyumlu olmalıdır. Çok amaçlı hücre oluşturma problemi; parçaları benzer özelliklerinden yararlanarak aileler haline getirilip, ilgili makinaların hücre olarak birleştirilmesi işleminin iki yada daha çok amaca hizmet edecek şekilde ele alındığı problem olarak tanımlanabilir.

Çok amaçlı hücre oluşturma çalışmalarında yer alan amaçlar ve bu amaçların dikkate alınmasının sisteme sağlayacağı katkılar Arıkan [Arıkan, 2002] tarafından yapılan çalışmada Çizelge 2.3 ile açıklanmıştır.

Arıkan'ın çalışmasında dört başlık altında toplanan amaç fonksiyonları kısaca şöyle açıklanmıştır. Birinci amaç fonksiyonları grubu; doğrudan blok diagonal yapıyı oluşturmaya yönelik olarak, parçaların bağımsız hücrelerde üretilmesine yönelik amaç fonksiyonlarıdır. Birbirinden olabildiğince bağımsız olarak tasarlanmış her hücre, sistemin bütününün kontrolünü dikkate değer biçimde basitleştirir. Çalışanların potansiyel yetki ve sorumlulukları net bir şekilde ortaya çıkar. Ayrıca üst üste gelen işlemler sayesinde bekleme zamanları kısalır. İkinci amaç fonksiyonları grubu; iş yükü ve kapasite dengeleme ile ilgilidir ve sistemin verimliliğinin artırılmasında önemli rol oynarlar. Hem hücre içi hem de hücreler arası dengeli kapasite kullanımı, makinaların aşırı yüklenmesinden kaynaklanan arızaların giderilmesini sağlar. Tamir bakım süreleri dolayısıyla sistem içi bekleme ve stoklar azalır. Üçüncü amaç fonksiyonları grubu, yatırım maliyetlerinin ve harici eleman maliyetlerinin minimizasyonunu kapsar. Bu grup sistemin mali performansını geliştirerek, araştırma geliştirme faaliyetlerine kaynak aktarımı sağlar. Dördüncüsü ise hazırlık zamanlarının minimizasyonudur. Bu amaç; literatürde tasarım aşamasında ele alındığı gibi tasarım sonrasındaki çizelgeleme çalışmalarında da ele alınmaktadır. Hazırlık zamanlarının azaltılması ile sistem içi stoklar azalacak, böylece bekleme zamanları kısılacaktır.

Çizelge 2.3. Amaç fonksiyonları ve hücresele imalat sistemleri ile ilgili faydaları
[Arıkan, 2002]

Amaçlar	Hücresele imalat ile ilgili faydaları
Parçaların bağımsız hücrelerde üretilmesi • Harici eleman sayısının minimizasyonu • Hücreler arası harici parça hareket sayısının, maliyetinin veya ağırlıklı uzaklığının minimizasyonu • Toplam benzerliğin maksimizasyonu/benzemezliğin (uzaklığın)minimizasyonu	a) Sistemin kontrolünü basitleştirecek b) Malzeme taşıma için daha az işçilik ve teçhizat gereksinimi, böylece maliyetlerde azalma, yerleşim düzeninde basitleşme ve yerden kazanç c) Malzeme taşımanın azalması nedeniyle sistem içi malzemelerde daha az zarar-zıyan d) Çalışanın sorumluluk, bağımsızlık ve saygınlığındaki artış sonucunda kalitenin gelişmesi ve çalışmada yüksek iş tatmini e) Üst üste gelen operasyonlar sayesinde bekleme zamanlarının kısalması
İşyükü ve kapasite dengelenmesi ile ilgili amaç fonksiyonları • Hücreler arası/hücre içi ortalama iş yükü dengesizliğinin minimizasyonu • Hücreler arası/hücre içi ortalama iş yükü dengesizliğinden sapmaların minimizasyonu • Faydalı kapasitenin maksimizasyonu	a) Makinaların aşırı yüklemelerinden doğan arıza sürelerinde kısalma b) Sistemin verimliliğinde artış c) Çalışanların verimliliğinde artış d) Aylak kapasitenin azalması e) Bekleme zamanlarının azalması ve böylece sistem içi stokların azalması
Maliyet minimizasyonu • Darboğaz makina satın alma maliyetinin minimizasyonu • Fason imalat maliyetinin minimizasyonu • Hücreler arası transfer maliyetinin minimizasyonu • İşlem maliyetinin minimizasyonu • Yatırım maliyetlerinin minimizasyonu	a) Mali performansta gelişme b) Ürün ve işlem için araştırma geliştirme faaliyetlerine daha çok kaynak aktarımı c) Geleceğe yönelik yatırım planları d) Rekabet avantajları
Hazırlık zamanlarının minimizasyonu	a) Azalan hazırlık zamanları parti büyüklüklerinin de azaltılabilmesini sağlayacağından Tam Zamanında Üretim uygulamasına adaptasyonu kolaylaştırır. b) Küçük parti büyüklükleri, sistem içi stokları azaltacak böylece bekleme zamanları kısılacaktır. c) Kısalan bekleme zamanları ile geleceğe yönelik daha hızlı ve gerçekçi tahminler d) Rekabet avantajları

Yapılan bu tez çalışmasında; ele alınan üretim özellikleri eşit bir birim ile (maliyet olarak) ifade edilmiş ve amaçların eşzamanlı olarak dikkate alınması sağlanmıştır. Literatürde yer alan amaç fonksiyonlarından; parçaların üretim zamanlarının minimizasyonu parçaların işlem maliyetlerinin minimizasyonu olarak, satın alınan makina sayısının minimizasyonu makinaların satın alma, bakım maliyetlerinin minimizasyonu olarak, hazırlık zamanlarının minimizasyonu hazırlık maliyetlerinin

minimizasyonu olarak, parçaların bağımsız hücrelerde üretilmesine yönelik amaçlarından hücreler arası taşımaların ve fason imalat minimizasyonu, hücreler arası taşımanın ve fason imalatın maliyetinin minimizasyonu olarak alınmıştır. Hücresel imalat sistemlerinde hücre tasarımının ayrılmaz bir parçası olan insan unsuru ise makinaları kullanan operatörlerin maliyetlerinin minimizasyonu olarak dikkate alınmıştır. Literatürdeki çok amaçlı hücresel imalat sistemi tasarımı çalışmaları Bölüm 3.1’de ayrıntılı olarak incelenmiştir.

2.1.2. Parti bölünmesinin dikkate alındığı hücre oluşturma problemi

Parti bölünmesi; büyük ürün yığınlarının daha küçük partilere bölünmesi ile birden fazla üretim merkezinde eşzamanlı işlem yapılması olanağının sağlanması anlamına gelmektedir. Parti bölünmesi ilk olarak, yığın imalat sistemlerindeki çizelgeleme problemlerinde kullanılmıştır. Parti bölünmesi ile akış zamanının azaltılması [Jacobs ve Bragg, 1996] ve daha iyi teslim tarihi performansı [Wagner ve Ragatz, 1994] elde edilir. Hücresel imalat sistemlerinde parti bölünmesi yine çizelgeleme kararlarının verilmesi aşamasında [Süer ve ark., 1999] kullanılmıştır.

Parti bölünmesini dikkate alan hücre oluşturma problemi; hücresel imalat sistemlerinde hücre oluşturma aşamasında, parça taleplerinin bir veri olarak kullanıldığı çalışmalarda yararlanılabilen ve üretilecek ürün partilerinin tamamının bir hücreye atanması yerine iki ya da daha fazla hücrede üretilmesine izin verildiği hücre oluşturma problemi olarak tanımlanabilir.

Bu tez çalışmasında, parti bölünmesi matematiksel model geliştirilirken dikkate alınmıştır. Bölüm 3.2’de literatürdeki, parti bölünmesini dikkate alan hücre oluşturma problemleri incelenmiştir.

2.1.3. Alternatif rotaların dikkate alındığı hücre oluşturma problemi

Alternatif rotalar; bir parçanın bir makinada üretilmesi yerine birden fazla farklı makinada, farklı işlem zamanları, farklı kaliteler ve farklı hazırlık zamanları ile üretilmesidir. Yani bir parça tipi yalnız bir makinada değil, aynı makinanın sistemde yinelenen bir benzerinde ya da farklı tipte bir makinada üretilmektedir. Alternatif rotaları dikkate alan hücre oluşturma problemi; parçaların üretimlerinde alternatif rotaların göz önünde bulundurulduğu hücre oluşturma problemi olarak tanımlanabilir.

Hücreli imalat sistemlerinde, tasarım probleminde dikkate alınan parça makina matrisi, alternatif rotalar olması halinde farklılık gösterir. Literatürde alternatif rotaların gösterimi için iki farklı parça makina matrisi kullanılmaktadır. Bunlardan ilki, alternatif makinaların hangi proseslerde olduğunu ve bu makinalarda işlem zamanlarının ve maliyetlerinin gösterildiği matrislerdir. Örnek olarak; Çizelge 2.4'deki parça makina matrisi incelenebilir. Bu matriste satırlar ve sütunlar, sırasıyla parçalar ve parçaların operasyonları şeklinde oluşturulur. Matrisin içerisinde yer alan üçerli verilerden ilki makina tipini, ikincisi makina işlem zamanını ve üçüncüsü makina işlem maliyetini göstermektedir. Birinci tip gösterimde tüm veriler matrisin içerisinde yer almaktadır.

Çizelge 2.4. Alternatif rotaların operasyonlarla gösterimi için bir örnek matris

Parça Numarası	Operasyon		
	1	2	3
1	1, 10, 21	2, 5, 8	
	2, 12, 18		
2	3, 8, 9	1, 14, 12	2, 12, 10
			3, 9, 15
3	2, 5, 10	1, 8, 9	
4	2, 12, 14	3, 5, 8	1, 8, 10
			2, 6, 12

İkinci gösterim şeklinde ise alternatif rotalar ayrı ayrı tanımlanmakta parçaların işlem zamanları ve maliyetleri farklı sütunlarda gösterilmektedir. Çizelge 2.4'deki örnek parça makina matrisinin aynısı için ikinci gösterim şekli Çizelge 2.5'deki gibi olacaktır.

Çizelge 2.5. Alternatif rotaların makinalarla gösterimi için bir örnek matris

Parça Numarası	Alternatif Rotalar			Toplam Zaman	Toplam Maliyet
	Makina				
1	1	2		15	29
	2	2		17	26
2	3	1	2	34	31
	3	1	3	31	36
3	2	1		13	19
4	2	3	1	25	32
	2	3	2	23	34

Alternatif rotaların dikkate alındığı hücre tasarımı problemlerinin çözüm etkinliğinin karşılaştırılması için literatürde bazı yöntemler kullanılmaktadır [Sofianopoulou, 1999]. Bunlardan bazıları; hücreler arası taşımanın miktar ya da maliyetinin karşılaştırılması, makinalar arası iş yükünün karşılaştırılması şeklindedir [Adil ve ark., 1996]. Ayrıca yapılan çalışmaların çoğunda problem karmaşıklığının azaltılması için alternatif rotalardan birinin seçilmesi ilk olarak ele alınmış ve oluşturulan hücrelerin etkinliklerinin karşılaştırılması daha sonra yapılmıştır. Böyle durumlarda ise alternatif rotaların olmadığı durumdaki karşılaştırma yöntemlerinden olan gruplama etkinliği indeksi, gruplama etkililiği indeksi, harici eleman sayısı, boşluk sayısı ve hücreler arası taşıma ölçütleri aynen kullanılmıştır.

Alternatif rotaların mevcut olduğu sistemlerin özel olarak değerlendirilmesi için ise literatürde yalnız bir çalışma [Sarker ve Li, 1998] yapılmış ve alternatif rotaların olduğu bir parça makina matrisinde gruplama etkinliğinin hesaplanması için yeni bir ölçüt tanımlamıştır. Sarker ve Li tarafından geliştirilen bu ölçüt alternatif rota gruplama etkinliği (Alternative Routing Grouping Efficiency, ARG efficiency) olarak adlandırılmıştır. Eş. 2.4'deki gibi hesaplanmaktadır.

$$\eta_{ARG} = \frac{\left(1 - \frac{e_o}{e}\right)}{\left(1 + \frac{e_o}{e}\right)} * \frac{\left(1 - \frac{e_v}{o}\right)}{\left(1 + \frac{e_v}{o}\right)} \quad (2.4)$$

Burada;

- e = Alternatif planların dahil olduğu orijinal parça makina matrisindeki toplam 1'lerin sayısı
- o = Alternatif planların dahil olduğu orijinal parça makina matrisindeki toplam 0'ların sayısı
- e_o = Çözüm sonrası elde edilen parça makina matrisindeki diagonal blokların içerisindeki boşlukların (void) sayısı
- e_v = Çözüm sonrası elde edilen parça makina matrisindeki diagonal blokların dışında kalan harici elemanların (exceptional element) sayısı

Başlangıç matrisinde bulunan elemanların sayısı elde edilen çözüm matrisindeki harici eleman sayısından büyük olacağından ve aynı şekilde başlangıç matrisinde yer alan boşlukların sayısı çözüm matrisindeki boşluklardan büyük olacağından tanımlanan ARG etkinliği normalize edilmiş olmaktadır. Yani elde edilecek sayı 0 ve 1 aralığında olacaktır. Bu ölçütün diğer bir özelliği ise her matrisin e_o/e ve e_v/o değerleri kendi boyutuna uygun olarak hesaplanacağından parça makina matrisinin boyutundan da bağımsız olmasıdır. Böylece boşluk sayısı ve harici eleman sayısından daha yansız ve doğru bir karşılaştırma yapılabilmesi sağlanmaktadır.

ARG etkinliğinin hesaplaması aşağıdaki örnek [Sarker ve Li, 1998] ile açıklanmıştır.

Örnek: Çizelge 2.6 bir başlangıç parça makina matrisi ile parçaların işlem görmesi gereken makineler ve işlem alternatifleri verilmiştir. Söz konusu matris ele alınarak tercih edilmiş olduğu varsayılan alternatif rotaları gösteren çözüm matrisi Çizelge 2.7'de verilmiştir.

Çizelge 2.6. ARG etkinliğinin hesaplanması için örnek bir başlangıç parça makina matrisi

Operasyonlar	1			2		3		4		5	
Parçalar	Rotalar										
Makinalar	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1			1		1	1		1	1		1
2		1	1	1			1				
3	1			1	1				1	1	
4	1	1				1	1	1		1	

Çizelge 2.7. ARG etkinliğinin hesaplanması için başlangıç parça makina matrisinin çözüm matrisi

	Rotalar				
Makinalar	2	7	5	9	11
2	1	1			
4	1	1			
1			1	1	1
3			1	1	

ARG etkinliğinin hesaplanmasında, çözüm matrisindeki boşluk ve harici elemanlar Eş. 2.4’de aşağıdaki şekilde yerine koyularak 0,9166 değeri elde edilmiştir.

$$\eta_{ARG} = \frac{\left(1 - \frac{e_o}{e}\right)}{\left(1 + \frac{e_o}{e}\right)} * \frac{\left(1 - \frac{e_v}{o}\right)}{\left(1 + \frac{e_v}{o}\right)} = \frac{\left(1 - \frac{0}{21}\right)}{\left(1 + \frac{0}{21}\right)} * \frac{\left(1 - \frac{1}{23}\right)}{\left(1 + \frac{1}{23}\right)} = 0,9166$$

Bu tez çalışmasında, parçaların alternatif rotalarının dikkate alındığı bir matematiksel model geliştirilmiştir. Bölüm 3.3’de literatürdeki alternatif rotaları dikkate alan hücre oluşturma problemleri ayrıntılı olarak incelenmiştir.

2.1.4. İnsan faktörünün dikkate alındığı hücre oluşturma problemi

İmalat sistemleri stratejik bir rekabet avantajı sağlamak için tasarımdan üretime kadar tüm aşamalarda insan faktörüne daha büyük bir önem vermek gerekliliği içindedirler. Buna paralel olarak, aynı düşünce hücreli imalat sistemlerinin

tasarımında da geçerlidir. Ele alınan sistemler bir bütün olarak tasarlanmalı ve parça, makina, alet, teçhizat, maliyet, kar, vb. unsurlarının tamamı dikkate alınırken insan unsuru da sistemin vazgeçilmez bir bütünü olarak tasarıma katılmalıdır.

Hücresel imalat sistemlerinin uygulamasında karşılaşılan zorluklar:

- Sistem değişikliklerini uygulamanın doğasından kaynaklanan bir zorluk vardır. Tüm üretim sistemini değiştirmek oldukça karmaşık ve zor bir iştir.
- Şirketler, ürün yenilikleri için serbestçe para harcar, ama süreç değişiklikleri için harcamak istemeyebilir.
- Değişime karşı olan direnç etkilidir.
- Karar verme için yanlış ölçütler seçilebilir. Kararlar, salt çıktı veya maliyetten çok, kalite, güvenilirlik, teslim süresi, ürün değişimi veya hacim değişimi için esneklik ölçütlerindeki rekabete dayanmalıdır.
- Çalışanların ilgisizliği sıkıntı yaratabilir.
- Çalışanların hücresel imalat sistemi tasarımında dikkate alınmamaları tepki yaratabilir.
- İnsan faktörünün maliyetinin dikkate alınmaması hesaplama hatalarına neden olabilir.
- Operatörlerin makine, parça, hücre ihtiyaçlarından hangisine göre dikkate alınacağını bilmemesi sistemde karmaşıklığa neden olabilir.

Tüm bu sorunların üstesinden gelmenin yolu çalışanları eğitmek ve bir şirket kültürü çevresinde toplayabilmektir. Bunun için yapılacak ilk ve en önemli adım ise insan faktörünü dikkate almaktır.

Chung yaptığı çalışmada hücresel imalat sistemleri, esnek imalat sistemleri gibi modern imalat sistemlerinde aşağıdaki sistem bileşenlerinin etkili olduğunu tespit etmiştir [Chung, 1996]:

- Belirli hedeflere (amaçlara) sahip olmak
- İnsanların teknoloji tarafından desteklendiği ya da tersi durumlarda insan merkezli bir düşünce sistemi (felsefe) kullanmak
- Teknoloji uyarlamasını yaşam döngüsüne kamadan önce insanların katılımının sağlanmasının önemi
- Pilot projelerin kullanımı
- Etkin eğitim programlarının uyarlanması
- Teknoloji uyarlamasının en üst seviyeler tarafından desteklenmesi
- Yeni teknolojiye karşı oluşan tepkiyle etkin bir şekilde baş edebilme
- Yeni teknolojiye uyum konusunda performans değerlendirme ve ödüllendirme sistemini geliştirme
- Organizasyonun yapısını yeni teknolojiye uygun şekilde değiştirme
- Organizasyon hiyerarşinin en altındakilerin desteklenmesi

Yukarıdaki etkenler içerisinde en çok sözü edilen unsur insandır. Çünkü insan,yeni bir teknolojinin uyarlamasında, tasarlanmasında ve geliştirilmesinde en önemli bileşendir.

Hücresel imalat sistemlerine dair literatürde hücre oluşturma problemi yüzlerce kez ele alınmış; parçaların işlem gereksinimleri, geçirmesi gereken operasyonlar, bu operasyonların gerçekleştirilmesi için kullanılan makinalar, üretilen parçaların talep miktarları, üretim parti büyüklükleri, hazırlık ve işlem zamanları, alternatif üretim rotalarının varlığı ve fason imalat gibi birçok özellik dikkate alınmıştır. Bu teknik özelliklerin kapsamında, hücresel imalat sisteminde hücrelere yalnızca parça ve makinaların atandığı varsayılmıştır. Oysa hücresel imalat sistemlerinin tasarımında; insan unsuru, ekipman kullanımına yönelik “teknik beceriler” ve takım çalışmasına uyum, problem çözebilme, karar verebilme yeteneği v.b. şekilde detaylandırılabilcek “kişisel beceriler” ile bu becerilere bağlı maliyetler, diğer unsurlara ait özelliklerin yanı sıra dikkate alınmalıdır.

İnsan unsurunun dikkate alındığı hücre oluşturma problemi, hücresel imalat sistemlerinde hücre oluşturma probleminde göre nadir olarak ele alınan problemlerdendir. İnsan hücresi oluşturma problemi olarak tanımlanmış olmasa dahi insan faktörünün işgücü olarak dikkate alındığı ve hücre kapasitelerinin belirlenmesinde bir etken olarak kabul edildiği çalışmalar bulunmaktadır ve bu çalışmalar literatür araştırması bölümünde açıklanacaktır. Bunların yanı sıra insan faktörünün hücre tasarımında direkt olarak dikkate alındığı ve insan hücresi kavramı olarak tasarım aşamasında insanların kullanıldığı çalışmalar da literatürde yer almaktadır. Son olarak insan faktörünün hücresel imalatta makina hücreleri ve parça ailelerinin oluşturulması aşamasından sonra operatör gruplarının (takımların) hücrelere atanması şeklinde ele alındığı çalışmalar da bulunmaktadır.

Bidanda ve arkadaşları [Bidanda ve ark., 2005] yaptıkları tarama çalışmasında, hücresel imalat sistemlerinin tasarımında ve uygulamasında başarıya ulaşabilmek için ekipman, malzeme, operasyon kuralları gibi özelliklerin yanı sıra insana dair teknik ve kişisel beceriler ele alınmasının gerekliliğini ortaya koymuşlardır. Operatör atamalarının, hücresel imalata etkilerini incelenmiştir.

Bu çalışmaya [Bidanda ve ark., 2005] göre hücresel imalat sistemlerinde insan ile ilgili olarak ele alınması gerekli sekiz ana konu sırasıyla şöyledir: Operatör atama stratejileri, yeteneklerin belirlenmesi, eğitim, iletişim, otomasyon, ödül/ceza sistemleri, takım çalışması ve uzlaşmazlık yönetimi. Bu tez çalışmasında ele alınan konu; operatörlerin makinalara atandığı bir hücre oluşturma problemini kapsadığından “operatör atama stratejileri” aşağıda, ilgili kaynak referans alınarak açıklanmıştır.

Operatör atama stratejileri: Operatörlerin hücre içi ya da hücrelerarası görevlere atanmasında; yönetici, mühendis veya takımın kullanacağı metotlar çok önemlidir. Operatörleri görevlere atamadan önce, hücreleri dengelemek ve senkronize etmek gerekir. Dengeleme, operasyonlar arası boş zamanı minimize etmeyi sağlamak üzere, bir iş akışını takip eden, birbirine bağlı operasyonların eşit iş yükü ile hücrelere

dağıtılması yöntemidir. Senkronizasyon, hücreler arasındaki ya da diğer operasyonlar arasındaki malzeme akışının etkin olarak zamanlanmasını sağlayan teknikler anlamına gelmektedir. Dengeleme ve senkronizasyonun; değer katılmamış zamanı, çıktı zamanını ve ara stok miktarını azaltmak için yapılması şarttır. Hat dengeleme problemleri matematiksel programlama, dinamik programlama ve sezgisel yaklaşımlar kullanılarak çözülebilir. Sezgisel yaklaşımlar, görevlerin iş istasyonlarına ileri, geri ya da iki yönlü atama prosedürlerini dikkate alırlar. Diğer yaklaşımlar, tavlama benzetimi ve genetik algoritmaları kullanmayı içerirler. Hat dengeleme yöntemlerinin ayrıntılı bir literatür araştırması için Scholl'un çalışması [Scholl, 1999] incelenebilir. Yüksek seviyedeki senkronizasyon ihtiyacı, operatörlerin becerilerine ve iş yükünü kaldırabilme kapasitelerine ve görevleri yapabilme hızlarına bağlı olarak belirlenen işçilik kapasitesi gibi çok sayıda insan faktörünün dikkate alınması zorunluluğuna neden olmaktadır. Son yıllarda insan faktörünü ergonomik açıdan ele alan bazı çalışmalar yapılmıştır [Carnahan ve ark., 2001].

Bu tez çalışmasında, hücre oluşturma problemi yalnız parça ve makinaların değil aynı zamanda operatörlerinde hücrelere atanmasını sağlayacak şekilde ele alınmıştır. Operatör atama stratejileri hakkında yapılan çalışmalar, literatür araştırması kapsamında Bölüm 3.4'de insan unsurunu dikkate alan hücre oluşturma problemleri incelenirken ayrıntılı olarak incelenecektir.

3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bu bölümde, ele alınan hücre oluşturma probleminin temel karakteristikleri dikkate alınarak, literatürdeki çalışmalar dört ana başlık altında incelenmiştir: Çok amaçlı hücre oluşturma ile ilgili çalışmalar, parti bölünmesini dikkate alan hücre oluşturma problemleri ile ilgili çalışmalar, alternatif rotaları dikkate alan hücre oluşturma problemleri ile ilgili çalışmalar ve insan unsurunu dikkate alan hücre oluşturma problemleri ile ilgili çalışmalar. Araştırma, Science Citation Index (SCI) ve Engineering Index (EI) kapsamındaki yayınlarla sınırlandırılmıştır.

Hücresel imalat sistemlerinin tasarım problemi ve çözüm teknikleri üzerine kapsamlı araştırmalar; King ve Nakorchai [King ve Nakorchai,1982], Moiser ve Taube [Moiser ve Taube, 1985], Wemmerlöv ve Hyer [Wemmerlöv ve Hyer, 1986], Singh [Singh, 1993], Heragu [Heragu, 1994], Offodile ve arkadaşları [Offodile ve ark., 1994], Selim ve arkadaşlarının [Selim ve ark., 1998] yaptığı çalışmalarda bulunabilir.

Literatür araştırması, tam metnine ulaşılabilen tüm çalışmalarla sınırlandırılmıştır. Bu araştırma kapsamında; çözümü bir sezgisel ile elde edilmiş olsa dahi matematiksel modele yer veren çok amaçlı hücre oluşturma problemleri, parti bölünmesini dikkate alan hücre oluşturma problemleri, çözüm yöntemi ister sezgisel isterse matematiksel modelleme olsun alternatif rotalara izin veren hücre oluşturma problemleri ve insan kavramı ve hücresel imalat sistemlerini birarada ele alan çalışmalar incelenmiştir. Araştırma sonucunda elde edilen çalışmalar; çok amaçlı hücre oluşturma problemleri amaçlarına göre, parti bölünmesini dikkate alan tek hücre oluşturma problemi çalışması, alternatif rotaları dikkate alan hücre oluşturma problemleri parça-makina-rota kriterlerine göre ve insan unsurunu dikkate alan çalışmalar ele aldıkları insan unsuruna göre değerlendirilmiş ve çizelgeler halinde özetlenmiştir.

3.1. Çok Amaçlı Hücre Oluşturma Problemi

Çok kriterli hücre tasarımı için kullanılan modern yaklaşımları inceleyen bir çalışma Mansouri ve arkadaşları (2000) tarafından yapılmıştır [Mansouri ve ark., 2000]. Daha önce yapılmış mevcut sınıflandırma çalışmalarına da yer verilmesinin yanı sıra çok kriterli karar verme açısından da literatürdeki çalışmalar sınıflandırılmıştır. Literatürden seçilen yayınlar girdileri, kriterler, çözüm yaklaşımı ve buna bağlı çıktıları ele alınarak değerlendirilmiştir. Çok kriterli hücre tasarımı için kullanılan modern yaklaşımları incelemek için Mansouri ve arkadaşları tarafından yapılan bu çalışmaya başvurulabilir.

Sankaran (1990) çalışmasında beş ayrı maliyet fonksiyonunun toplamını tek bir amaç fonksiyonu olarak ele alan bir çok amaçlı hücre tasarımı problemini ele almıştır [Sankaran, 1990]. Bu tek amaçlı modelin optimal çözüm iki seviyede yıkıma uğramaktadır. Bunlar, operasyon işlem maliyeti ve yatırım (bütçe) maliyetidir. Beş amaç fonksiyonu içerisinde bu iki optimal maliyet daha sonra tamsayı doğrusal hedef programlama ile birbirlerine bağlanır. Yazar tarafından ele alınan amaç fonksiyonları kümesi; ihtiyaç duydukları makina ve magazin (iki amaç) benzerliğine dayanan parça benzerliği, mümkün (uygun) makina kapasitesi, minimum ve maksimum toplam parça taşınması (iki amaç), makinalara yapılan optimal sermaye yatırımı ve optimal işlem maliyetidir.

Wei ve Gaither (1990) dört amaçlı bir model geliştirmişlerdir [Wei ve Gaither, 1990]. Bunlar; ortalama hücre kullanımı maksimizasyonu, hücrelerarası yük dengesi maksimizasyonu, hücre içi yük dengesi maksimizasyonudur. Darboğaz maliyeti parçanın üretim tesisinin dışında yapılma maliyetinin üretim tesisinde yapılma maliyetinden farkıdır. Bu çalışmada yazarlar küçük boyutlu problemler için 0-1 programlama modeli geliştirmişler, hem küçük boyutlu hem de büyük boyutlu problemler için sezgisel bir algoritmayla problemi çözmüşlerdir. Hem sezgisel ve hem de matematiksel model ile bu dört amaç fonksiyonunun tek bir ağırlıklı amaç fonksiyonunu maksimize etmeye çalışır.

Shafer ve Rogers (1991) yaptıkları çalışmada üç farklı durum için hedef programlama kullanmışlardır [Shafer ve Rogers, 1991]. Bu durumlar; tamamen baştan yepyeni bir sistem kurma, aynı zamanda hem mevcut makinaları kullanma hem de yeni ekipmanlar satın alma ve yalnızca mevcut makinaları kullanarak sistemi yeniden organize etmektir. Hem mevcut makinaların hem de yeni ekipmanların kullanıldığı model diğerlerine göre çok daha kullanıma uygun bir modeldir. Yazarlar tarafından dikkate alınan kriterler: hazırlık zamanlarının minimizasyonu (parça sıralama ile), hücreler arası taşımanın minimizasyonu, yeni malzeme ve ekipman satın alma maliyetinin minimizasyonu ve kabul edilebilir bir makina kullanım oranının elde edilmesidir. Önerilen hedef programlama modeli p-medyan modeli (parça ailelerinin oluşturulması) ile gezgin satıcı modelinin (parçaların optimal sıralamasının bulunması) bir kombinasyonudur. Daha sonra yazarlar bu modelin gerçek boyuttaki veri kümelerinin çözümü için bir sezgisel önermişlerdir.

Shafer ve arkadaşları (1992) harici elemanlar için bir matematiksel model geliştirmişlerdir [Shafer ve ark., 1992]. Başlangıç çözüm için herhangi bir hücre oluşturma prosedürü kullanırlar. Daha sonra harici elemanlar öncelikle parçaların tasarım ya da proses planlarında değişiklik yaparak giderilmeye çalışılır. Sonraki eleme aşamasında parçalar bir optimizasyon modeline göre taşeron firmalara ürettirilir ya da makinalar yinelenir. Yazarlar bu çalışmada üç maliyet faktörünü tek bir amaç fonksiyonunda dikkate almışlardır. Bunlar hücreler arası taşıma maliyeti, makina yineme maliyeti ve parçaların taşeron firmalarda üretim maliyetidir. Gerçekte ise her bir maliyete eşit ağırlığın verildiği bir ağırlıklandırma yöntemi kullanarak tek bir amaç fonksiyonu kullanmışlardır.

Venugopal ve Narendran (1992) makina-parça gruplama problemi için tek kriterli bir matematiksel model önermişlerdir [Venugopal ve Narendran, 1992]. Yazarlar hücreler arası taşıma ve toplam hücre yük dağılım değişimini minimize eden iki

amacı dikkate almışlardır. Genetik algoritma ile de uzlaşmacı ya da tatmin edici çözümler bulmuşlardır.

Dahel ve Smith (1993) hücreler arası taşımayı minimize eden bir 0–1 tamsayılı model ve ilk modelin sonuçlarına dayanan etkileşimi minimize eden ve esnek çok amaçlı bir model geliştirmişlerdir [Dahel ve Smith, 1993]. Bir hücrenin esnekliğini (rotalama esnekliği) ölçmek için hücrede işlenebilen farklı parça sayısını dikkate almışlardır. Daha yüksek derecede rotalama esnekliği daha fazla sayıda makina çeşidinin bir hücreye atanmasıyla gerçekleşmektedir. Bu da hücrelerdeki iş akışını artırmakta ve bu hücre içi taşımayı minimize etme amacını kötüye götürmektedir. Bu çalışmada kısıt yöntemi çok amaçlı modelin domine edilemeyen (baskın) çözümlerini bulmakta kullanılmıştır.

Logendran (1993) parçaların toplam hücre içi ve hücreler arası taşımalarını minimize eden ve hücre kullanımını maksimize eden bir model geliştirmiştir [Logendran, 1993]. Bu amaçlar ağırlıklandırma yöntemi ile tek bir amaç fonksiyonunda birleştirilmiştir. Orijinal model kareli tamsayılı programlama ile modellenmiş ve daha sonra doğrusal tamsayılı programlamaya çevrilmiştir.

Min ve Shin (1993) çalışmalarında makina-insan hücrelerinin oluşturulması için karışık tamsayılı bir hedef programlama modeli geliştirmişlerdir [Min ve Shin, 1993]. Amaçlar; işlem zamanlarının ve operatör maliyetlerinin minimizasyonu, operatör beceri eşleşmelerinin ve parça benzerliklerinin maksimizasyonudur. Çözüm için hem matematiksel modelleme hem de iki aşamalı bir sezgisel geliştirilmiştir.

Sankaran ve Kasilingam (1993) grup teknolojisi temelli esnek imalat sistemlerinde, hücre boyutu ve kapasite seçiminin hücre üyeliğini belirleyen bir tamsayılı matematiksel model geliştirmişlerdir [Sankaran ve Kasilingam, 1993]. Geliştirilen amaç fonksiyonu işlem maliyetlerinin, genel giderlerin, yıllık amortisman maliyetlerinin ve hücreler arası ve hücre içi taşımaların maliyetlerini içermektedir.

Diğer bir deyişle ağırlıklandırma yöntemi birden çok amaçla modelleme yapmakta kullanılmıştır. Bu modelin çözümü için yazarlar sezgisel bir algoritma önermişlerdir.

Gupta ve arkadaşları (1995) hem hücre içi hem de hücreler arası taşımaların ağırlıklı toplamını minimize eden bir matematiksel model geliştirmişlerdir [Gupta ve ark., 1995]. Genetik algoritma ile çözüm önermişlerdir. Bu çalışmada, hücrelere parça atama prosedüründeki minimum kabul edilebilir makina kullanım oranı dikkat edilmesi gereken hususlardandır.

Liang ve Taboun (1995) yaptıkları çalışmada akış hattı tipi üretimin verimliliği ile atölye tipi üretimin esnekliği arasında uzlaşmacı bir çözüm vermeyi amaçlayan tek-kriterli doğrusal olmayan tamsayılı bir matematiksel model geliştirmişlerdir [Liang ve Taboun, 1995]. Modelin amaçları; sistem esnekliğini (belirlenen hücrelerde üretilen parça türü sayısı ile hesaplanır) maksimize etmek ve sistem etkinliğini (parça benzerlik derecesi ile hesaplanır) maksimize etmektir. Yazarlar bu çalışmada hücreler arası taşımaya izin vermemişler ve tüm harici parçaların taşeron firmalara yaptırıldığı varsayılmıştır. Bu iki amacı tek bir amaç haline getirmek için ağırlıklandırma yöntemini kullanmışlardır. Daha sonra çözüm için iki aşamalı bir sezgisel önermişlerdir. İlk aşamada yaklaşık etkin çözümler (domine edilemeyen çözümler) hesaplanır, ikinci aşamada bu yaklaşık etkin çözümler içerisinde en iyi çözüm seçilir. Burada kısıt yöntemi yaklaşık etkin çözümlerin hesaplanmasında kullanılır.

Suresh ve arkadaşları (1995) hücre oluşturma için üç aşamalı hiyerarşik bir yaklaşım geliştirmişlerdir [Suresh ve ark., 1995]. Çözüm yaklaşımının birinci aşamasında bir yapay sinir ağı kümeleme tekniğiyle potansiyel parça aileleri ve onlara bağlı makina grupları oluşturulur. Karışık tamsayılı bir hedef programlama formülü ile ikinci aşamada, makinalar tek tek belirli sayıdaki hücrelere atanır. İkinci aşamadaki model hücre bağımsızlığını maksimize etme, yeni ekipmanların satın alınması maliyetinin minimizasyonu ve ortalama esnekliğinin maksimizasyonu olarak belirlenen çatışan amaçların tatmin edilmesini sağlamak için çalışır. Üçüncü aşama 0–1 tamsayılı

programlama modeli ile birden çok hücrede üretilen ailelerin hücreler arası trafik yoğunluğunu minimize etmeye çalışır.

Aktürk ve Balköse (1996) parçaların hem tasarım hem de üretim özelliklerini içeren bir kodlama şeması ile altı amaçlı bir modelde kullanılacak parça benzerlik ve parça farklılık katsayılarını hesaplamışlardır [Akturk ve Balkose, 1996]. Bu amaç fonksiyonları; tasarım ve üretim özelliklerine bağlı parça farklılıklarının (benzemezliliklerinin), işlem sıralarının değişikliğine bağlı parça farklılıklarının, toplam makina yatırım maliyetinin, her bir hücredeki iş yükü değişkenliğinin toplamının, farklı hücrelerdeki iş yükü değişkenliğinin ve bir parçanın kendi işlem sırasında atladığı makina sayısı ile hesaplanan harici makina sayısının minimizasyonu olarak tanımlanmıştır. Yazarlar bu çalışmada bu amaçları eşzamanlı olarak çözen bir çok amaçlı kümeleme analizi sezgiseli önermişlerdir. Analitik hiyerarşi prosesi (AHP) ile amaçların önceliklerini belirleyerek amaçları birleştirmişlerdir.

Boctor (1996) çalışmasında hücresel imalat sistemlerinin tasarımında üretim maliyetlerinin dikkate alınması gerektiğini vurgulamıştır [Boctor, 1996]. Amacı, makina yineleme maliyeti ve hücreler arası taşıma maliyetlerinin minimizasyonudur. Çalışmada; aynı yönlü olmayan başka bir deyişle, hücreler arası taşıma maliyetini minimize etmek için makina yineleme maliyetine, makina yineleme maliyetini minimize etmek içinse hücreler arası taşıma maliyetine katlanmanın gerektiği bu iki amacı her bir kritere eşit ağırlık verilerek ağırlıklandırma yöntemi ile tek bir amaç fonksiyonu olarak tanımlanmıştır. Bu optimizasyon modeli için iyi sonuçlar veren bir tavlama benzetimi kullanmıştır.

Gupta ve arkadaşları (1996) makina hücresi-parça gruplama problemi için üç model sunmuşlardır [Gupta ve ark., 1996]. Üçüncü modelleri toplam ağırlıklı hücre içi ve hücrelerarası taşımayı ve hücre yükü değişimlerini eşzamanlı olarak minimize eden tek-kriterli bir modeldir. Yazarlar çalışmalarında bu modelin çözümü için karar vericilere tatmin edici çözümler sunan bir genetik algoritma geliştirmişlerdir.

Ho ve Moodie (1996) parçaların esnek rotalara sahip olduğu bir üretim ortamı için iki aşamalı bir çözüm yöntemi geliştirmişlerdir [Ho ve Moodie, 1996]. Birinci aşamada parçaların rota benzerliklerine göre hesaplanan parça benzerliklerine dayanan bir sezgiselle ile parça aileleri oluşturulur. İkinci aşamada karışık tamsayılı matematiksel programlama ile makinalar parça ailelerine atanır. Bu aşamadaki amaç fonksiyonu üç maliyet fonksiyonunun bileşkesidir. Bu amaçlar; işlem maliyeti, makina yineleme maliyeti ve operasyonların atandığı hücrenin dışında yapılması ile ortaya çıkan ceza maliyetidir. Ceza maliyeti diğer bir deyişle hücreler arası taşıma maliyeti olarak da adlandırılabilir. Yazarlar, ikinci aşamadaki maliyet fonksiyonlarının tek bir amaç fonksiyonunda birleştirilmesi için ağırlıklandırma yöntemini eş ağırlıklarla kullanmışlardır.

Rajamani ve arkadaşları (1996) parçaların esnek operasyon planları olduğu varsayımı için bir karışık tamsayılı programlama modeli geliştirmişlerdir [Rajamani ve ark., 1996]. Modeldeki amaç fonksiyonu üç farklı maliyet fonksiyonunun toplamı olan yatırım, işlem ve malzeme taşıma maliyetlerinin ağırlıklı toplamıdır. Yazarlar tarafından gevşetilmiş doğrusal modelin çözümü için bir sütun oluşturma algoritması ve dal sınır tekniği kullanılmıştır.

Shanker ve Vrat (1998) çalışmalarında harici eleman eliminasyon maliyetini, kullanılmayan kapasite ve hücre dışı parça transfer maliyetini minimize etmeyi amaçlayan bir matematiksel model geliştirmişlerdir [Shanker ve Vrat, 1998]. Geliştirdikleri matematiksel modeli, amaçlara atanan hedeflerin bulanıklığını dikkate alarak bulanık doğrusal programlama ile çözmüşlerdir.

Aktürk ve Türkcan (2000) yaptıkları çalışmada parça ailesi ve makina hücresi oluşturma problemini hücre içi yerleşim problemi ile birlikte ele alan bütünleşik bir algoritma önermişlerdir [Akturk ve Turkcan, 2000]. Yapılan bu çalışma yapıldığı döneme kadar daha önce ele alınmamış bir çalışmadır. Bu çalışmada amaç karı maksimize etmektir. Her bir hücrenin oluşturulabilmesi için o hücrenin belirli bir karlılığa sahip olması gerekliliği şartı getirilmiştir. Holonistik yaklaşım kullanılarak yapılmış bu çalışmada bağımsız hücrelerin oluşturulması ve hürseler arası taşıma

yapılması olarak tanımlanmış iki alternatif çözüm bulunmaktadır. Geliştirilen bu holonistik yaklaşım yapılan deneysel çalışmalarla test edilmiş ve sonuçların tatmin edici olduğu görülmüştür.

Baykasoğlu ve Gindy (2000) bağımsız parça makina öncelikli bir hedef programlama formülasyonu geliştirmişlerdir [Baykasoglu ve Gindy, 2000]. Kaynak Elemanları olarak adlandırılan makinadan farklı üretime yardımcı elemanlar, parçaların işlem ihtiyaçlarını tanımlamada ve makinaların işlem kapasitelerini tanımlamada kullanılmıştır. Makinaların tek ve ortaklaşa kullanılan kapasite sınırlarının tanımlanması bu kaynak elemanları ile yapılmıştır. Böylece hem birbirinden bağımsız hücreler oluşturulması sağlanmış hem de bu bağımsız hücrelerin etkin kullanımı sağlanmıştır. Bu çalışmada ele alınan problemde; kayak elemanı tabanlı işlem sıraları, işlem zamanları, kapasiteler, talepler, hücre büyüklükleri, hücre esneklikleri, hücreler arasındaki iş yükü dengesi, hücre etkileşimi ve oluşturulan atölyelerde yinelenen her makina çeşidi gibi faktörlerin tümü dikkate alınmıştır. Oluşturulan model özel bir tabu arama algoritmasıyla çözülmüştür.

Malakooti ve Yang (2002) yaptıkları çalışmada çok kriterli karar verme yöntemini makina parça ailesi oluşturma için kullanmışlardır [Malakooti ve Yang, 2002]. Birbiriyle çatışan amaçlar için bir karar verme sistemi kurmuşlardır. Ele alınan amaçlar; makina kullanım oranının maksimizasyonu (daha yüksek bir verimlilik oranı elde etmek için), yinelenen makina sayısının minimizasyonu (daha düşük maliyet ve daha yüksek yer kullanımı için) ve harici elemanların sayısının minimizasyonudur (hücreler arası daha düşük bir trafik akışı sağlamak için). Bu yöntemde en çok tercih edilen alternatifi bulmak için tüm mümkün etken çözümler bulunur ve bu kümeden en çok tercih edilen alternatif seçilir. Önerilen yaklaşım üç adımdan oluşmaktadır; (i) verilen her hücre sayısı için bir kök alternatif oluşturulur, (ii) oluşturulan her kök alternatif için domine edilemeyen tüm alternatifler üretilir ve (iii) üretilen tüm bu alternatiflerden en çok tercih edilen alternatif seçilir.

Solimanpur ve arkadaşları (2004) tarafından yapılan çalışmada bağımsız hücrelerden oluşan bir hücresel imalat sistemi tasarımı için çok amaçlı bir tamsayılı matematiksel

programlama modeli geliştirilmiştir [Solimanpur ve ark., 2004]. Geliştirilen matematiksel modeli çözmek için çoklu uygunluk fonksiyonları kullanan bir genetik algoritma oluşturulmuştur. Bu çalışmanın hücreli imalat sistemlerinin tasarımı için yapılan diğer çalışmalardan farkı; arama yönlerinin bulunması için sistematik düzgün tasarım tabanlı bir teknik kullanması ve çözüm uzayının tek yönlü yerine çok yönlü aramasıdır. Literatürden seçilen dört problem üzerinde geliştirdikleri algoritmanın performansını değerlendirmişler ve çözümlerini sunmuşlardır.

Mukattash ve Al-Talat (2006) tarafından yapılan çalışmada hücreli imalat sistemlerinin tasarımı için matematiksel bilgisayarlı bir yaklaşım geliştirilmiştir [Mukattash ve Al-Talat, 2006]. Bu yöntem özdeğerler ve özvektörler kullanan bir benzerlik matrisinden yola çıkarak başlangıç hücrelerinin optimizasyonu ve ayrıştırılmasına dayanmaktadır. Parça atamaları literatürden seçilen herhangi bir yöntemle yapılabilir. Daha sonra geliştirilen bilgisayarlı yaklaşımla optimal sonuç ya da sonuçlar seçilmiştir. Algoritmanın etkinliği literatürde sıkça kullanılan üç performans ölçütü (gruplama etkinliği, gruplama etkililiği ve gruplama indeksi) ile test edilmiş ve orijinal matematiksel yaklaşımdan daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.

Yukarıda açıklanan çalışmalar, kronolojik sıra ile kullandıkları amaç fonksiyonları, geliştirilen yöntem ve yaklaşıma göre Çizelge 3.1’de özetlenmiştir.

Çizelge 3.1 Çok amaçlı hücre oluşturma çalışmaları

Sıra	Çalışma	Amaç Fonksiyonları	Yöntem	Yaklaşım
1	Sankaran, 1990	- Max makina parça benzerliği - Min işlem maliyeti - Min parça taşıma maliyeti - Min sermaye yatırım maliyeti	Hedef programlama	Sezgisel
2	Wei ve Gaither, 1990	- Max Ortalama hücre kullanımı - Max Hücreler arası yük dengesi - Max Hücre içi yük dengesi - Min Darboğaz maliyeti	0–1 tamsayılı matematiksel programlama	Matematiksel model + Sezgisel
3	Shafer ve Rogers, 1991	- Min Hazırlık zamanı - Min Hücreler arası taşıma - Min Yeni malzeme ekipman maliyeti	Hedef programlama	Sezgisel (p-medyan ve gezgin satıcı modelinin birleşimi)
4	Shafer ve ark., 1992	- Min Hücreler arası taşıma maliyeti - Min Makina yinleme maliyeti - Min Taşeron üretim maliyeti	Matematiksel modelleme	Amaçların ağırlıklandırılması ile çözüm
5	Venugopal ve Narendran, 1992	- Min Hücreler arası taşıma - Min Toplam hücreler arası yok dağılımı değişimi	Matematiksel modelleme	Matematiksel modelleme Genetik algoritma
6	Dahel ve Smith, 1993	- Max Rotalama esnekliği - Min Makina yatırım maliyeti	0-1 tamsayılı matematiksel programlama	Kısıt yöntemi ile domine edilemeyen çözüm arama
7	Logendran, 1993	- Min Hücre içi taşıma - Min Hücreler arası taşıma - Max Hücre kullanımı	Kareli tamsayılı programlama	Amaçların ağırlıklandırılması ve doğrusal programlama ile çözümü
8	Min ve Shin, 1993	- Max Parça benzerlikleri - Min İşlem zamanı - Max Beceri eşleşmesi - Min Operatör maliyeti	Karışık tamsayılı hedef programlama	Sezgisel
9	Sankaran ve Kasilingam, 1993	- Min İşlem maliyeti - Min Genel giderler - Min Yıllık amortisman maliyeti - Min Hücre içi taşıma maliyeti - Min Hücreler arası taşıma maliyeti	Tamsayılı matematiksel modelleme	Amaçların ağırlıklandırılması ve doğrusal programlama ile çözümü
10	Gupta ve ark., 1995	- Min Hücre içi taşıma - Min Hücreler arası taşıma	Matematiksel modelleme	Genetik Algoritma

Çizelge 3.1. (Devam) Çok amaçlı hücre oluşturma çalışmaları

Sıra	Çalışma	Amaç Fonksiyonları	Yöntem	Yaklaşım
11	Liang ve Taboun, 1995	- Max Sistem esnekliği (bir hücrede üretilen farklı parça sayısı) - Max Sistem etkinliği (parça benzerliği)	İki kriterli doğrusal olmayan tamsayılı matematiksel model	Ağırlıklandırma ile amaçların tek bir amaç haline getirilmesi ve iki aşamalı sezgisel
12	Suresh ve ark., 1995	2. aşama - Max Hücre bağımsızlığı - Min Yeni ekipman maliyeti - Max Rotalama esnekliği 3. aşama - Min Hücreler arası trafik	Üç aşamalı sezgisel bir algoritma (İkinci ve üçüncü aşaması matematiksel modelleme)	yapay sinir ağları ile parça makina ağlarının oluşturulması karışık tamsayılı hedef programlama 0-1 tamsayılı programlama
13	Aktürk ve Balköse, 1996	- Min Üretim özellikleri benzemezlilikleri - Min İşlem sıraları benzemezlilikleri - Min Toplam makina yatırım maliyeti - Min Her bir hücredeki iş yükü değişkenliği toplamı - Min Farklı hücrelerdeki iş yükü değişkenliğini - Min Harici makina sayısı	Çok amaçlı kümeleme analizi	AHP ile amaçların önceliklendirilmesi
14	Boctor, 1996	- Min Makina yinleme maliyeti - Min Hücreler arası taşıma maliyeti	Çok amaçlı modelleme amaçların ağırlıklandırılması	Tavlama benzetimi
15	Gupta ve ark., 1996	- Min Hücre içi taşıma - Min Hücreler arası taşıma - Min Hücre iş yükü değişimi	Toplam ağırlıklı amaç fonksiyonu	Genetik algoritma
16	Ho ve Moodie, 1996	- Min İşlem maliyeti - Min Makina yinleme maliyeti - Min Hücre dışına atanan operasyon ceza maliyeti	İki aşamalı modelleme (ikincisi matematiksel model)	Ağırlıklandırma ile amaçların tek bir fonksiyon haline dönüşmesi

Çizelge 3.1. (Devam) Çok amaçlı hücre oluşturma çalışmaları

Sıra	Çalışma	Amaç Fonksiyonları	Yöntem	Yaklaşım
17	Rajamani ve ark., 1996	- Min Yatırım maliyeti - Min İşlem maliyeti - Min Malzeme taşıma maliyeti	Matematiksel modelleme	Sütun oluşturma algoritması ve dal-sınır algoritması
18	Shanker ve Vrat, 1998	- Min Harici eleman maliyeti - Min kullanılmayan kapasite maliyeti - Min hücre dışı parça transfer maliyeti	Matematiksel modelleme	Bulanık doğrusal programlama
19	Akturk ve Turkcan, 2000	- Max Gelir - Min Gider	Karışık tamsayılı matematiksel programlama	İki aşamalı sezgisel
20	Baykasoglu ve Gindy, 2000	- Min Parça farklılıkları - Max Kapasite kullanımı - Min Hücre iş yükü dengesizliği - Max esneklik	Öncelikli hedef programlama	Tabu arama algoritması
21	Malakooti ve Yang, 2002	- Makina kullanım oranı maksimizasyonu - Yinelenen makina sayısı minimizasyonu - Harici eleman minimizasyonu	Üç aşamalı sezgisel	Hücre sayısı için kök alternatif Domine edilemeyen alternatifler En çok tercih edilen alternatif seçimi
22	Solimanpuri ve ark., 2004	- Max toplam parça benzerliği - Min toplam işlem maliyeti - Min toplam işlem zamanı - Min yatırım maliyeti	Matematiksel modelleme	Genetik algoritma
23	Mukattash ve Al-Talat, 2006	- Min Harici eleman - Min Boşluk (void)	Matematiksel modelleme	Bilgisayarlı matematiksel yaklaşım

3.2. Parti Bölünmesinin Dikkate Alındığı Hücre Oluşturma Problemi

Hücresel imalat sistemlerinin tasarımı aşamasında parti bölünmesini dikkate alan tek çalışma Defersha ve Chen [Defersha ve Chen, 2006]'e aittir. Çalışmada, parti bölünmesi bir üretim faktörü olarak hücre oluşturma için geliştirilmiş matematiksel modele eklenmiştir. Parti bölünmesinin yalnızca çizelgeleme aşamasında değil tasarım aşamasında ele alınmış olması hücrelerin daha esnek bir şekilde

oluşturulması açısından önemlidir. Bu nedenle, Defersha ve Chen'in çalışması bu tez çalışması gibi diğer bir çok hücre oluşturma problemine ışık tutması açısından kıymetlidir.

3.3. Alternatif Rotaların Dikkate Alındığı Hücre Oluşturma Problemi

Bu konuda ilk çalışma Tilsley ve Lewis (1977) tarafından yapılmıştır [Tilsley ve Lewis, 1977]. Makina arızaların ve tamir bakımlarında alternatif makinaların kullanılabilmesi için alternatif rotaların olduğu bir çalışma yapmışlardır. Lee ve arkadaşları (1997) yaptıkları çalışmada parça aileleri ve makina hücrelerinin oluşturulması için; ürünlerin üretim miktarlarının, alternatif rotaların ve üretim sıralarının üretim verisi olarak ele alındığı bir sistem için bir yöntem önermişlerdir [Lee ve ark., 1997]. Parça makina aileleri oluşturulması bir maliyet fonksiyonunun minimizasyonu şeklinde bir problem olarak ele alınmıştır. Çözüm için genetik algoritma kullanılmıştır. Makina zincir benzerliği olarak bir benzerlik katsayısı tanımlanmıştır. Bu benzerlik katsayısı makinalarda üretilen parçaların üretim hacimlerini de dikkate almaktadır. Daha sonra bu benzerlik katsayısına ve alternatif rotalara göre parçanın izlemesi gereken rota geliştirilen genetik algoritma ile belirleniyor. Daha sonra bir diğer genetik algoritma ile parça aileleri ve makinalar saptanıyor. Geliştirilen bu yöntem iki örnekle açıklanmıştır.

Askin ve arkadaşları (1997) yaptıkları çalışmada kullanıcı etkileşimli bir modelle esnek hücreler oluşturmak amacıyla bir yöntem geliştirmişlerdir [Askin ve ark., 1997]. Bu yöntemde bahsedilen esneklik; rotalama esnekliği (parçaların birden çok hücrede üretilmesi) ve talep esnekliği (parçaların değişen talep büyüklükleri ve parça çeşitliliğine çabuk karşılık verebilmesi) olarak düşünülmüştür. Yöntem kısaca dört adımdan meydana gelmektedir. Bu adımlar sırasıyla; operasyonların makinalara atanması, parçaların operasyon gereksinimlerine göre belirli makinalara atanması, makinaların hücrelere atanması ve son olarak oluşturulan hücrelerin değerlendirilmesi ve iyileştirilmesidir. Çoklu veri kümeleri kullanılarak bu yöntemin deney çalışmaları yapılmış ve sonuçlar literatürdeki diğer çalışmalarla

karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda gruplama etkinliği açısından daha iyi sonuçlar verdiğini göstermişlerdir.

Lozano ve arkadaşları (1997) çalışmalarında hücresel imalat sistemlerinin tasarımı ve yüklemesi problemine bir çözüm getirmişlerdir [Lozano ve ark., 1997]. Bunun için problemi tasarım ve yükleme olmak üzere iki aşamaya ayırmışlardır. Tasarım aşamasında iki durum göz önüne alınmıştır. Bunlar; proses planlarının her parça tipi için ayrıldığı durum ve bütünleşik parçalar için proses planlarının olmasıdır. Her iki durumda da geleneksel (klasik) bir gruplama yöntemi kullanılarak makina aileleri oluşturulmuştur. Literatürdeki mevcut dal sınır algoritması, bulanık kümeleme yöntemi, genetik algoritma, tavlama benzetimi ve tabu arama algoritması kullanılarak parça makina hücreleri oluşturulmuş ve en az hücreler arası taşımanın elde edildiği dal sınır yöntemi tercih edilmiştir. Daha sonraki aşamada yükleme problemi için hem makina ve hücre kullanımını dengede tutan hem de toplam taşımayı ve elde tutma maliyetini minimize edecek bir doğrusal programlama modeli geliştirilmiştir.

Ramabhatta ve Nagi (1998) alternatif rotaların olduğu bir sistem için matematiksel bir modelle hücresel imalat sistemi tasarımı yöntemi önermişlerdir [Ramabhatta ve Nagi, 1998]. Önerilen yöntem literatürde de sıkça kullanılan hücreler arası taşımaları azaltma amacındadır. Bunu gerçekleştirirken uzun dönemli ürün gereksinimleri, kaynakların kapasite kısıtları, makinaların fonksiyonelliği ve alternatif üretim rotaları gibi önemli üretim planlama unsurlarını da dikkate almaktadırlar. Tanımlanan bu problem NP-Zor yapıdadır. Bu nedenle problemin çözümü için sezgiseller geliştirilmiştir. Ancak geliştirilen sezgisellerle çözümlerde kötüleşme olmakta buna karşın gerçek yaşam problemleri için matematiksel modelin çözümü koşum zamanı nedeniyle mümkün olmamaktadır. Bu problemlerin üstesinden gelebilmek için çalışmalarında; 0–1 karışık tamsayılı doğrusal programlama modeli geliştirmişler, bu modelin çözümü için önceki sezgiselin çözümünü iyileştiren bir dal sınır algoritması önermişler ve alt sınıra makul değerler vererek yeni çözümler türeten bir yöntem önermişlerdir.

Wilhelm ve arkadaşları (1998) çalışmalarında makinaların belirli bir kapasitelerinin olduğu, alternatif makinaların kullanılabildiği, bir makina çeşidinden birden fazla bulunabildiği ve hücrelerin belirli sınırlarının olduğu gerçeğe daha çok yakın sistemlerin hücresel imalat yapılandırması için bir yöntem geliştirmişlerdir [Wilhelm ve ark., 1998]. Bu yöntemde tasarım kararları da alınmaktadır. Şöyle ki; her bir hücreye yerleştirilecek makinalar ve buna bağlı ürün aileleri, bu ailelerin planlama varsayımları, makina kapasitelerinin dikkate alınması ve ürün hacimlerinin bu hücrelerde üretilmesi sağlanmaktadır. Karışık tamsayılı doğrusal programlama modeli geliştirilmiş ve 12 test problemi üzerinde denemeler yapılarak problemin boyutları ve çözüm zamanları sunulmuştur.

Jeon ve arkadaşları (1998) çalışmalarında makina arızalarında alternatif rotaların kullanılmasına olanak sağlayan durum için hücre oluşturma probleminin çözümünü sağlayan iki aşamalı bir sezgisel önermişlerdir [Jeon ve ark., 1998]. Birinci aşamada, makina arızalarında kullanılabilecek alternatif rotaların sayısına bağlı olarak belirlenen yeni bir benzerlik katsayısı tanımlamışlardır. İkinci aşamada, hücresel imalat ortamında makina bozulmalarında hem çizelgeleme hem de operasyonel gereksinimleri karşılayan yeni bir yöntem geliştirmişlerdir. İkinci aşamada makina arızalarında çizelgelemenin ve operasyonel gereksinimlerin üretim ortamını nasıl etkilediği incelenmiştir. Geliştirilen yöntemin amacı; toplam stok tutma maliyeti, erken/geç teslimat maliyeti, işlem maliyeti ve makina yatırım maliyetlerinin minimizasyonu olarak belirlenmiştir.

Jeon ve arkadaşları (1998) çalışmalarında makinaların arızalanması durumunda alternatif makinaların kullanılabildiği bir üretim sistemi için bir benzerlik katsayısı tanımlamışlardır [Jeon ve ark., 1998]. Bu benzerlik katsayısını kullanarak parça makina ailelerini oluşturmak üzere bir P-Medyan modeli önermişlerdir.

Sofianopolou (1999) çalışmasında üretimin daha ekonomik olarak yapılmasını sağlayan hücresel imalat sistemi için hücre oluşturma problemini ele almıştır [Sofianopoulou, 1999]. Ele aldığı problemi tanımlarken bir ürünün oluşturulması için birden çok üretim planının var olduğu ve bir makina çeşidinden birden fazla

bulunabildiği bir üretim sistemindeki makina hücrelerinin oluşturulmasını dikkate alındığını varsaymıştır. Problemin tanımlamasını ve modellemesini matematiksel olarak yaptıktan sonra çözüm için özel olarak bu probleme adapte edilmiş bir tavlama benzetimi sezgiseli geliştirmiştir.

Caux ve arkadaşları (2000) çalışmalarında alternatif rotaların ve kapasite kısıtlarının olduğu durum için bir hücre oluşturma yöntemi geliştirmişlerdir [Caux ve ark., 2000]. Bu yöntemde verilen rotalar, makina kapasiteleri, üretilecek parça miktarları dikkate alınarak bir parça makina ailesi oluşturma yöntemi önerilmiştir. Önerilen yöntemin amacı hücreler arası taşımayı minimize etmek ve bunu gerçekleştirirken makinaların kapasite kısıtlarını göz ardı etmemektir. Her bir parça ailesinin bir alternatif rotayı tercih etmesini zorunlu kılan bu modelin çözümü için dal sınır tekniği ile birleştirilmiş bir tavlama benzetimi yöntemi önerilmiştir. Dal sınır tekniğiyle alternatif rotalardan birinin seçimi sağlanırken makina ve parça ailelerinin oluşturulmasında tavlama benzetimi kullanılmıştır. Çalışmanın sonunda yöntem sayısal bir örnek ile açıklanmıştır.

Von (2000) çalışmasında her bir parçanın alternatif üretim planları olduğu durumda parça makina kümeleme yöntemi geliştirmiştir [Von, 2000]. Kusiak'ın geliştirdiği P-Medyan modelinin yalnızca 0–1 matrisinden yararlanması ve oluşturulacak hücre sayısının önceden belirlenmiş olması gerekliliği dezavantajlarından kurtulmak için yeni bir algoritma önermiştir. Yazar çalışmasında makinalar arasında yeni bir benzerlik katsayısı tanımlamıştır. Bunu yaparken alternatif proses planlarının varlığını da dikkate almıştır. Geliştirdiği yeni P-Medyan modelinin uygulanabilirliğini göstermek için matematiksel örnekler sunmuştur.

Zhao ve Wu (2000) makina parça gruplama problemi için hücreler arası taşıma ve hücre içi taşıma maliyetleri minimizasyonu, toplam iş yükü değişimi minimizasyonu ve harici eleman minimizasyonu amaçlarını dikkate alan bir çok amaçlı genetik algoritma geliştirmişlerdir [Zhao ve Wu, 2000]. Bu çalışmada üretim hücreleri, parça rota sırası, üretim hacmi ve iş yükü gibi üretim verileri ile oluşturulmaktadır. Ayrıca parçaların alternatif rotalar ve yöntemlerle üretilmesinin önerilen yöntemle etkisi

araştırılmıştır. Genetik algoritma için özel genetik operatörler geliştirilmiş test problemleri üzerinde denemeler yapılarak sonuçlar sunulmuştur.

Adenso-Diaz ve arkadaşları (2001) parça tiplerinin farkı makinalarda üretilebildiği yani alternatif rotaların mevcut olduğu bir sistemde makina ailelerinin oluşturulması için bir yöntem önermişlerdir [Adenso-Diaz ve ark., 2001]. Bu yöntemde hücrelerin kapasiteleri önceden belirlenmiştir ve bunun yanı sıra bir hücrede aynı anda bulunamayacak makinalar ve mutlaka birlikte bulunması gereken makinaların olduğu bir sistem tasarlanmaktadır. Problemin çözümü için etkin bir tabu arama algoritması geliştirilmiş daha sonra daha büyük boyutlu problemlerin çözümü için bir tavlama benzetimi önerilmiştir.

Diallo ve arkadaşları (2001) çok yönlü makinalarda birden fazla işlemin yapılabilirdiği üretim sistemlerinde alternatif üretim planlarına sahip parçaların üretilebildiği durumda hücre oluşturma problemini ele almışlardır [Diallo ve ark., 2001]. Bu durumda problem iki kararın verilmesinde oluşmaktadır; makina hücrelerinin oluşturulması ve parçaların üretim planlarından birinin seçilmesi. Bu kararların verilmesi ile üretim sisteminin tasarlanması gerçekleşecektir ancak makinaların arızalanması durumunda sistemin esnekliğinin devam ettirilmesi de istenmektedir. Bu durumda makina arızalarını da dikkate alan bir model yazarlar tarafından geliştirilmiş ve küçük bir örnekle açıklanmıştır.

Udbin ve Shanker (2002) yaptıkları çalışmada alternatif rotaların önceden mevcut olduğu bir sistem için genetik algoritma ile bir hücresel imalat tasarımı yöntemi geliştirmişlerdir [Udbin ve Shanker, 2002]. Ele alınan problemin çözümü için bir tamsayılı programlama modeli önerilmiştir. Bu modelle yalnız parçaların ve makinaların hücrelere atanması değil aynı zamanda parçaların alternatif rotalarından da birinin seçilerek hücreye atanması sağlanmıştır. Bu çalışmada amaç hücreler arası taşımanın minimizasyonudur. Tamsayılı programlama modelinin çözümü için bir genetik algoritma geliştirilmiş ve sayısal bir örnek ile algoritmanın işleyişi ve sonuçları gösterilmiştir.

Mukattash ve arkadaşları (2002) hücre oluşturma probleminin karmaşık ve çok kriterli bir problem oluşundan yola çıkarak bu problemin çözümüne yönelik üç tane sezgisel yöntem geliştirmişlerdir [Mukattash ve ark., 2002]. Böylece hücre oluşturma problemine esnek bir çözüm getirmişlerdir. Hücre oluşturma problemi olarak tanımladıkları problemin içerisinde alternatif proses planları, çoklu alternatif makineler veya işlem zamanları dikkate alınmıştır. Her bir durum için bir sezgisel geliştirilmiştir.

Yin ve Yasuda (2002) çalışmalarında alternatif üretim rotaları, işlem sıraları, işlem zamanları, parçaların üretim hacimleri, makina kapasiteleri, makina yatırım maliyetleri, makina aşırı yüklemeleri, bir makina çeşidinden birden fazla bulunması, parçaların proses rotalarının yeniden düzenlenme maliyeti gibi birçok gerçek yaşam üretim unsurlarını dikkate alan bir model geliştirmişlerdir [Yin ve Yasuda, 2002]. Çalışmanın amacı daha önce literatürde hepsi bir arada alınmamış olan bu üretim özelliklerinin hepsinin eşzamanlı olarak dikkate alınmasıdır. Alternatif üretim rotaları, üretim sıraları, üretim zamanları ve ürün üretim miktarlarını dikkate alan bir benzerlik katsayısı tanımlanmıştır. Alternatif üretim rotalarının olduğu durumda makina kapasitelerinin ele alınmasının zorluğundan dolayı bununla başa çıkabilecek beş çözüm önerilmiştir. İki aşamadan oluşan bir sezgisel algoritma geliştirilmiştir. Daha önce önerilen benzerlik katsayısı ile ilk aşamada makina hücreleri oluşturulmaktadır. İkinci aşamada ise makina kapasitelerini dikkate alarak parça atamalarını ve bu parçaların seçilen rotalarını belirleyen bir yöntem önerilmiştir. Literatürden seçilen bazı problemler üzerinde önerilen sezgisel denenmiş ayrıca büyük boyutlu iki problem ile deney tasarımı yapılmıştır. 40 makina 64 parça boyutundaki problemin çözümü dört dakika sürmüştür.

Kim ve arkadaşları (2004) çalışmalarında, çok amaçlı bir makina hücresi oluşturma problemi ile ilgilenmişlerdir [Kim ve ark., 2004]. Parçaların rota ailelerinin tanımlanması ile tanımlanan makina hücrelerinin oluşturulmasında toplam hücreler arası taşıma ve maksimum makineler arası iş yükü dengesizliği eş zamanlı olarak minimize edilmeye çalışılmaktadır. Amaç fonksiyonlarının yanı sıra alternatif rotalar ve parça rotalarının makina sıralamaları parça ailelerinin gruplanmasında dikkate

alınmıştır. Ayrıca bu çalışmada makina hücrelerinin sayısı önceden belirlenmemiştir. Problemin karmaşıklığından dolayı iki aşamalı bir sezgisel önerilmiştir. Yapılan sayısal denemeler sonucunda sezgisel algoritmanın büyük boyutlu problemler için etkin çözümler verdiği görülmüştür.

Kizil ve Özbayrak (2004) yaptıkları çalışmada alternatif proses planlarından birini seçme ve hücre oluşturma olarak tanımlanan iki çatışan amaç arasındaki en iyi uzlaşan çözüm noktasını bulmak üzere bir çalışma gerçekleştirmişlerdir [Kizil ve Özbayrak, 2004]. Hücreler arası malzeme taşıma minimizasyonu hücresel imalat sistemlerinde çok gerekli fakat tek başına yeterli olmayan bir amaçtır. Bunun yanı sıra hücresel imalat sistemi tasarımı yaparken toplam iş yükünün de minimize edilmesi gerekir. Proses planı seçimi ve hücre oluşturma problemi tüm alternatif prosesleri için yapılması gereken ve zaman alıcı bir problem olarak tanımlanmıştır. Proses seçimini yapmak için işlem ve hazırlık zamanlarının minimizasyonunu sağlayan bir doğrusal karışık tamsayılı model geliştirmişlerdir. Aynı zamanda hücreler arası malzeme taşımanın da minimize edildiği bir hücre oluşturma yöntemi geliştirilmiştir.

Wu ve arkadaşları (2004) her bir parça için alternatif üretim planlarının olduğu durumda hücresel imalat sistemi tasarımı için bir yöntem geliştirmişlerdir [Wu ve ark., 2004]. Bu yöntemde problemi üç aşamaya bölmüşlerdir. Bunlar; alternatif üretim planlarından birinin seçimi, parça atama ve makina atama problemleridir. Üç aşamalı olarak bölünen bu problem yine aşamalı olarak çözülmüştür. Çözüm aşamasında tabu arama prosedüründen yararlanılmıştır. Literatürdeki bazı çalışmalar ve yazarlar tarafından üretilen problemlerde önerilen yöntemin üstünlükleri gösterilmiştir.

Malakooti ve arkadaşları (2004) çalışmalarında grup teknolojisinde parça ve makina ailelerinin oluşturulmasına dair bir yaklaşım önermişler ve bu yaklaşımın uygulandığı bir acil sistemden elde edilen sonuçları sunmuşlardır [Malakooti ve ark., 2004]. Çalışmalarında hücre oluşturma problemini çözerken aynı zamanda proses planlama ve üretim planlama da yapmaktadırlar. Sistemden elde edilen ve problemin

oluşturulmasında kullanılan veriler işlem sıraları, parça üretim hacimleri, parçaların alternatif rotaları ve parçaların işlem zamanlarıdır. Geliştirilen algoritma parça makina ailelerini oluştururken ve parçaların alternatif rotalarından birini seçerken malzeme akışını minimize etmeyi amaçlamaktadır. Önerilen algoritma iki yönlüdür. Birincisi geliştirilen tamsayılı programlama modelidir ki bu optimal çözümü sunmaktadır. Ayrıca ikinci olarak da bu matematiksel modele dayanan bir sezgisel önerilmiştir. Sezgisel algoritma ile problem aşamalı olarak çözülmektedir. Çalışmada önerilen model bir hastanenin acil servisinde uygulanmış ve sonuçlar makalede sunulmuştur.

Jayaswal ve Adil (2004) çalışmalarında hücreler arası malzeme taşıma, makina yatırımı ve makina işlem maliyetlerini minimize eden bir model geliştirmişlerdir [Jayaswal ve Adil, 2004]. Ele aldıkları sistemde; alternatif rotalar, ürün üretim miktarları, işlem sıraları ve hücre boyutu kısıtlamaları dikkate alınmaktadır. Böylece ele alınan problem klasik hücre oluşturma problemine göre çok daha karmaşık ancak çok daha gerçeğe yakın olmaktadır. Problemin matematiksel olarak modellenmesi yapılmış ve küçük boyutlu problemler için çözümü elde edilmiştir. Yalnız büyük boyutlu problemlerdeki hesaplama zamanı uzunluğu nedeniyle bir sezgisel geliştirilmiştir. Bu sezgisel tavlama benzetimi ile yerel arama prosedürlerinin bir arada kullanıldığı bir sezgiseldir ve 50 makina ve 100 parçadan oluşan bir örnek için çözümler elde edilmiştir.

Kim ve arkadaşları (2005) yaptıkları çalışmada alternatif rotaların olduğu bir üretim sisteminde, yıllık talep verisinin elimizde olduğu durumda hücresel imalat sistemi tasarımı için iki aşamalı sezgisel bir yöntem geliştirmişlerdir [Kim ve ark., 2005]. Geliştirilen yöntemin amaçları; hücreler arası taşımanın ve hücreler arası iş yükü dengesizliğinin minimizasyonudur. İki aşamalı sezgiselin ilk aşamasında alternatif rotalardan birinin seçimi yapılmakta, ikinci aşamada parça aileleri ve makina hücreleri oluşturulmaktadır.

Vin ve arkadaşları (2005) çalışmalarında alternatif rotaların, makina kapasitelerinin ve parça taleplerinin olduğu bir üretim sisteminde hücresel imalat sistemi tasarımı

problemini çözmeyi amaçlayan bir yöntem önermişlerdir [Vin ve ark., 2005]. Önerdikleri yöntem çok amaçlı grupta genetik algoritması olarak tanımlanmış ve rota seçimini yaparken aynı zamanda bütünleştirilmiş bir sezgiselle de hücre oluşturma problemini çözmektedir.

Bhide ve arkadaşları (2005) çalışmalarında alternatif üretim planlarının olduğu durumda hücre oluşturma probleminin çözümü için iki aşamalı bir sezgisel geliştirmişlerdir [Bhide ve ark., 2005]. Bu sezgiselin ilk aşamasında alternatif üretim planlarından birinin seçimi gerçekleştirilmekte, ikinci aşamasında ise parça aileleri ve makina hücreleri oluşturulmaktadır. Çalışmanın amacı alternatif planların bulunmasının sistem performansı ve esnekliği üzerine nasıl etkilerinin olduğunun araştırılmasıdır.

Yin ve arkadaşları (2005) çalışmalarında tüm parçaların malzeme akışlarını minimize etmeyi amaçlayan bir model önermişlerdir [Yin ve ark., 2005]. Bu konudaki diğer çalışmalardan bu çalışmayı ayıran özelliği ise doğrusal olmayan bir modelin kurulmuş olması ve bu modelin çözümü için bir sezgisel önerilmiş olmasıdır. Önerdikleri matematiksel modelin amaçları; toplam ağırlıklı hücre içi ve hücreler arası taşımanın minimizasyonu, hücre içi ve hücreler arası taşımanın gerçek ağırlıklarının hesaplanması, parçaların işlem sıralarının belirlenmesi, parçaların üretim miktarlarının belirlenmesi ve parçaların alternatif üretim rotalarından birinin belirlenmesidir.

Lei ve Wu (2005) çalışmalarında benzerlik katsayısına dayanan yöntemlerinin ve meta sezgisellerin hücre oluşturma problemine daha önce uygulandığından bahsetmiş ve bunların ikisinin bir arada kullanıldığı bir model geliştirmişlerdir [Lei ve Wu, 2005]. Bu çalışmada hibrit bir yaklaşım geliştirilmiştir. Bu yaklaşımın başlangıç prosedürü yeni bir benzerlik katsayısı yöntemine dayanan hiyerarşik bir kümeleme ile başlamaktadır. Kümeleme için tabu arama algoritması geliştirilmiştir. Önerilen algoritma literatürdeki problemlere uygulanmış ve tavlama benzetimi ve diğer tabu arama algoritmalarıyla elde edilen çözümlerle karşılaştırılmıştır. Genel hücre

oluşturma problemi için önerilen algoritmanın etkinliği böylece gösterilmeye çalışılmıştır.

Mahdavi ve arkadaşları (2006) çalışmalarında artan hücre tasarımı probleminin alternatif rotaların dikkate alındığında nasıl çözüleceğine dair bir yöntem geliştirmişlerdir [Mahdavi ve ark., 2006]. Bu yöntemde belirlenen hücrelerdeki çevrim zamanının minimizasyonu için bir sezgisel yöntem geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri sezgiseli dal sınır algoritması ve literatürdeki bir diğer çok aşamalı programlama tabanlı bir yöntemle karşılaştırmışlar ve daha az hesaplama ile optimal sonuca ulaşabildiklerini göstermişlerdir.

Hu ve Yasuda (2006) alternatif üretim planlarının olduğu bir üretim sisteminde hücre oluşturma için bütünleşik bir sezgisel algoritma geliştirmişlerdir [Hu ve Yasuda, 2006]. Genetik algoritma ile alternatif rotaların olduğu üretim sisteminde hücre oluşturma için önceden gerekli olan bilgilerden biri de hücre sayısıdır. Bunu önceden tahmin etmenin zorluğundan kurtulabilmek için gruplama genetik algoritmanın hücre sayısını tahmin etme özelliğinden yararlanılmıştır. Bu çalışmada genetik algoritma içerisinde yeni bir kromozom tanımlanarak hücre oluşturma problemi için hücre sayısı da problem çözümünde elde edilmesi sağlanmıştır. Genetik algoritmanın amacı ise hücre sayısını bulmak ve bunu yaparken minimum malzeme taşıma maliyetini sağlamaktır.

Jeon ve Leep (2006) çalışmalarında uzun döneli talep değişiklikleri ve makina arızalarında alternatif rotaların kullanımını dikkate alan yeni bir benzerlik katsayısı tanımlamışlardır [Jeon ve Leep, 2006]. Bu benzerlik katsayısını kullanan iki aşamalı bir sezgisel algoritma geliştirerek hücre oluşturma problemine çözüm getirmeyi hedeflemişlerdir. Tanımlanan yeni benzerlik katsayısı ile makina arızalarında kullanılabilecek alternatif rotaların sayısını belirlenmesi ilk aşamada gerçekleştirilmektedir. Önerilen algoritmanın birinci aşamasının öncelikli amacı bu yeni benzerlik katsayısı ile parça ailelerini genetik algoritma kullanarak oluşturmaktır. Talep değişikliklerinin ele alınmasının nedeni ise talep değişikliklerinde, teslim tarihi değişikliklerinde ve makina kapasitesi

değişikliklerinde oluşturulan hücresel tasarımın yeniden düzenlenmesinin zorluğudur. Bu nedenle de algoritmanın ikinci aşamasında parça ailelerine makinalar bir optimizasyon tekniği ile atanmaktadır. Bunun için geliştirilen optimizasyon tekniği hem ardışık hem de eşzamanlı çözüm sunan bir karışık tamsayılı matematiksel programlama modelidir. Bu modelin amacı ise çizelgeleme ve operasyonel gereksinimleri karşılama maliyetlerinin toplamının minimize edilmesidir.

Das ve arkadaşları (2007) toplam sistem maliyetini minimize eden ve seçilen üretim rotasına göre makina güvenilirliğini maksimize eden bir yöntem geliştirmişlerdir [Das ve ark., 2007]. Yazarlar çalışmalarında, bir parçanın birden çok proses planına göre birden çok makinada üretilbildiği bir sistemi dikkate almışlardır. Buna göre ele aldıkları sistemin güvenilirliğini seçilen proses planındaki makinaların güvenilirliğine bağlı olarak tanımlamışlardır. Hücresel imalat sistemi tasarımını da buna bağlı olarak; makinaların hücrelere atanması ve makinalara atanan parçaların ve seçilen alternatif üretim planının güvenilirliğini maksimize ederken aynı zamanda üretim maliyetlerini minimize edecek şekilde yapmayı amaçlamışlardır. Önerdikleri modelde sözü edilen üretim maliyetleri; parçanın işlem maliyeti, makinaların kullanım maliyeti ve hücreler arası taşıma maliyetidir. Sistem güvenilirliği ise seçilen üretim planındaki makinaların bozulmaları ile negatif ilişkili olarak tanımlanmıştır.

Arkat ve arkadaşları (2007) çalışmalarında yeni bir benzerlik katsayısı içeriği tanımlamışlardır [Arkat ve ark., 2007]. Tanımladıkları bu benzerlik katsayısını temel alan tavlama benzetimi temelli bir optimizasyon tekniği geliştirmişlerdir. Geçmişteki çalışmalarla karşılaştırabilmek için alternatif rotaların ve üretim miktarlarını dikkate almışlardır. Doğada da olduğu gibi tavlama benzetiminin hesaplama zamanını oldukça düşürdüğünü görmüşlerdir. Böylece büyük boyutlu problemlerin çözümü yapılabilmektedir. Son olarak geliştirilen bu tavlama benzetimi daha önce uygulanmış bir genetik algoritma ile karşılaştırılmış ve tavlama benzetiminin genetik algoritmanın elde ettiği sonuçları daha kısa zamanda verdiği görülmüştür.

Spiliopoulos ve Sofianopoulou (2007) yaptıkları çalışmada daha önce yapılmış alternatif rotaların varlığında hücre oluşturma problemlerine çözüm alanını daraltan bir sezgisel geliştirmişlerdir [Spiliopoulos ve Sofianopolou, 2007]. Bu sezgiselle gerçek yaşam problemlerinin boyutlarındaki alternatif rotaların varlığındaki hücre oluşturma probleminin çözümünü kolaylaştırmayı amaçlamışlardır. Geliştirilen bir matematiksel modelin içerisinde arama yapılan çözüm alanını daraltmayı amaçlayan bir sezgisel algoritma geliştirmişler ve 9 problem üzerinde denemeler yaparak sonuçlarını sunmuşlardır. Çözülen en büyük boyutlu problem 50 parça 30 makina boyutundadır ve bu sezgiselle çözümü 189 saniye sürmüştür.

Ameli ve Arkat (2008) çalışmalarında alternatif rotaların olduğu bir üretim sisteminde hücre oluşturma probleminin minimum hücreler arası taşıma sağlayacak şekilde çözümünü için bir yöntem önermişlerdir [Ameli ve Arkat, 2008]. Çalışmada alternatif üretim planlarının yanı sıra ürünlerin üretim hacimleri ve üretim sıraları da dikkate alınmıştır. Aynı zamanda makinaların güvenilirliğinin de alternatif rotaların varlığında nasıl değiştiği de bu çalışmada incelenmiştir.

Sormaz ve Rajaraman (2008) alternatif üretim planlarının olduğu bir üretim sistemi için eşzamanlı makina ve parça hücresi oluşturma problemini ele almışlardır [Sormaz ve Rajaraman, 2008]. Problem alan arama algoritması adı verilen algoritma ile iki karar alınmaktadır. Bunlar; alternatif üretim rotalarından hangisinin seçileceği ve parça ve makinaların üretim hücrelerine nasıl atanacağıdır. Bunun için bir matematiksel model geliştirilmiş ve problem alan arama algoritması ile çözümler elde edilmiştir.

Yukarıda açıklanan çalışmalar, tarih sırası ile dört temel özellik dikkate alınarak Çizelge 3.2.'de özetlenmiştir. Dört temel özellik sırası ile çalışmada ele alınan en büyük boyutlu problemin parça, makina varsa alternatif rota ve operasyon sayısı; amaç fonksiyonları; önerilen yöntem ve yaklaşımdır.

Çizelge 3.2. Alternatif rotaların dikkate alındığı hücre oluşturma çalışmaları

Çalışma	Parça, Makina (Rota, Operasyon)	Amaç Fonksiyonu(ları)	Yöntem	Yaklaşım
Lee ve ark., 1997	40 parça, 30 makina	Max Benzerlik katsayısı	Makina zincir benzerlik katsayısı tanımlanmıştır	Genetik algoritma
Askin ve ark., 1997	19 parça, 10 makina, 12 operasyon	Min Maliyet	4 aşamalı sezgisel	Genel atama modeli
Lozano ve ark., 1997	12 parça, 12 makina, 6 operasyon	- Min Hücreler arası taşıma - Min Elde tutma maliyeti	Tamsayılı Matematiksel Modelleme	Dal sınır algoritması
Sarker ve Li, 1998	-	-	Alternatif Rotaların olduğu durumda bir gruplama etkinliği ölçüm katsayısı geliştirmişlerdir.	-
Ramabhatta ve Nagi, 1998	40 parça, 50 makina	Min Hücreler arası taşıma	0-1 karışık tamsayılı Doğrusal Matematiksel modelleme	Dal sınır algoritması
Jeon ve ark., 1998	10 parça 7 makina 8 alternatif rota	- Birinci aşama: Max makina benzerlik katsayısı - İkinci aşama: Min maliyet	Matematiksel Modelleme	İki aşamalı sezgisel yaklaşım
Jeon ve ark., 1998	33 parça 33 makina	Max Benzerlik katsayısı	P-Medyan Modeli	6 adımdan oluşan bir sezgisel
Sofianopoulou, 1999	30 parça 14 makina	Min Hücreler arası taşıma	Matematiksel modelleme	Tavlama benzetimi
Caux ve ark., 2000	20 parça 20 makina 51 rota	Min Hücreler arası taşıma	İki tekniğin birleştirildiği Sezgisel Algoritma	Dal sınır algoritması Tavlama benzetimi
Won, 2000	26 makina 71 parça	Min Yeni tanımlanan makina benzerliği	Matematiksel modelleme	Yeni P-Medyan modeli ile çözüm
Zhao ve Wu, 2000	15 makina 30 parça	- Min Hücre içi ve Hücreler arası taşıma - Min Toplam iş yükü değişimi - Min Harici eleman	Çok amaçlı genetik algoritma modeli	Genetik algoritma

Çizelge 3.2. (Devam) Alternatif rotaların dikkate alındığı hücre oluşturma çalışmaları

Çalışma	Parça, Makina (Rota, Operasyon)	Amaç Fonksiyonu(ları)	Yöntem	Yaklaşım
Adenso-Diaz ve ark., 2001	60 makina 3 parça 12 operasyon	- Min Hücre içi taşıma maliyeti - Min Hücreler arası taşıma maliyeti	Matematiksel modelleme	Tabu arama ve daha büyük boyutlar için tavlama benzetimi
Diallo ve ark., 2001	5 makina 3 parça 3 alternatif rota	Max Makina arızalarında sistem sürdürülebilirliği	Matematiksel modelleme	Markov zincirleri Sezgisel algoritma
Udbin ve Shanker, 2002	20 makina 20 parça Toplam 51 alternatif rota	Min Hücreler arası taşıma	Tamsayılı matematiksel modelleme	Genetik Algoritma
Mukattash ve ark., 2002	5 parça 4 makina Toplam 11 alternatif rota	- Min Hücreler arası taşıma - Min harici eleman - Min boşluk	Sezgisel Algoritma	6 adımdan oluşan bir sezgisel
Yin ve Yasuda, 2002	40 makina 64 parça Toplam 128 alternatif rota	- Max parça benzerlik katsayısı - Min hücreler arası taşıma	Sezgisel	İki aşamalı sezgisel algoritma
Kim ve ark., 2004	40 parça 40 makina Toplam 100 alternatif rota	- Min Hücreler arası taşıma - Min Maksimum iş yükü dengesizliği	Matematiksel Modelleme	İki aşamalı sezgisel algoritma
Kizil ve Ozbayrak, 2004	20 parça 20 makina 3 alternatif rota	- Min Hücreler arası taşıma - Min İşlem zamanı - Min Hazırlık zamanı	Karışık tamsayılı doğrusal matematiksel modelleme	5 adımdan oluşan bir sezgisel
Wu ve ark., 2004	50 makina 50 parça Toplam 120 proses planı	Max Benzerlik katsayısı	Üç aşamalı ayrıştırma algoritması ile problem üçe ayrılır	Tabu arama
Malakooti ve ark., 2004	20 parça 20 makina 6 alternatif rota	Min Hücreler arası akış	Tamsayılı matematiksel modelleme	Matematiksel model çözümü ve aşamalı bir sezgisel

Çizelge 3.2. (Devam) Alternatif rotaların dikkate alındığı hücre oluşturma çalışmaları

Çalışma	Parça, Makina (Rota, Operasyon)	Amaç Fonksiyonu(ları)	Yöntem	Yaklaşım
Jayaswal ve Adil, 2004	100 parça 50 makina	- Min Hücreler arası taşıma maliyeti - Min Makina yatırım maliyeti - Min Makina işlem maliyeti	Matematiksel modelleme	Tavlama benzetimi ve Yerel Arama Prosedürü
Kim ve ark., 2005	7 parça 8 makina Toplam 20 alternatif rota	- Min taşıma - Min iş yükü dengesizliği	Çok amaçlı matematiksel modelleme	İki aşamalı sezgisel
Vin ve ark., 2005	56 makina Toplam 1620 operasyon	- Max Benzerlik katsayısı - Min Çok fonksiyonlu makina katsayısı - Min Esneklik katsayısı - Min Maliyet katsayısı	Çok amaçlı gruplama genetik algoritma	Sezgisel
Bhide ve ark., 2005	9 makina 9 işlem 4 alternatif rota	Max Alternatif rotalar gruplama katsayısı	Sezgisel algoritma	İki aşamalı sezgisel
Yin ve ark., 2005	20 makina 20 parça	- Min Hücreler arası taşıma - Min Hücre içi taşıma	Doğrusal olmayan matematiksel modelleme	Sezgisel Algoritma
Lei ve Wu, 2005	50 makina 100 parça	Min Hücreler arası taşıma	Matematiksel modelleme	Benzerlik katsayısı tabanlı hiyerarşik kümeleme Tabu arama
Mahdavi ve ark., 2006	10 makina 20 operasyon	Min Çevrim zamanı	9 adımdan oluşan bir sezgisel algoritma	Sezgisel
Hu ve Yasuda, 2006	70 parça 30 makina 5 alternatif rota	- Min hücre içi taşıma - Min hücreler arası taşıma	Genetik algoritma ve gruplama genetik algoritma	İki sezgiselin birleştirildiği bir sezgisel algoritma
Jeon ve Leep, 2006	10 parça 7 makina 7 operasyon 2 alternatif	- Birinci aşama Max benzerlik katsayısı - İkinci aşama Min toplam maliyet	İki aşamalı sezgisel	Birinci aşama genetik algoritma İkinci aşama matematiksel modelleme

Çizelge 3.2. (Devam) Alternatif rotaların dikkate alındığı hücre oluşturma çalışmaları

Çalışma	Parça, Makina (Rota, Operasyon)	Amaç Fonksiyonu(ları)	Yöntem	Yaklaşım
Das ve ark., 2007	12 parça 2 alternatif rota 3 operasyon 7 makina	- Min Parça işlem maliyeti - Min Makina kullanım maliyeti - Min Hücreler arası taşıma maliyeti - Max Sistem güvenilirliği	Çok amaçlı karışık tamsayı matematiksel modelleme	LINGO ile çözülmüştür
Arkat ve ark. 2007	30 parça, 4 alternatif rota 17 makina	- Max Makina zincir benzerlik katsayısı - Max Parça benzerlik katsayısı	Yeni bir benzerlik katsayısı tanımı	Tavlama Benzetimi tabanlı yaklaşım Genetik Algoritma Tabanlı yaklaşım
Spiliopoulos ve Sofianopolou, 2007	50 parça 6 makina 33 rota	Min Hücreler arası akış	Matematiksel modelleme	Sezgisel Algoritma ile çözüm
Ameli ve Arkat, 2008	17 makina 30 parça 4 alternatif rota	Min Hücreler arası taşıma	Matematiksel programlama	Matematiksel model çözümü
Sormaz ve Rajaraman, 2008	40 parça 30 makina	Min Harici eleman	Matematiksel modelleme	Alan araştırma algoritması

3.4. İnsan Faktörünün Dikkate Alındığı Hücre Oluşturma Problemi

Yapılan literatür incelemesi sonucunda, hücre oluşturma çalışmalarında ise insan unsuru diğer üretim faktörlerine göre nispeten daha az dikkate alındığı gözlenmiştir. Bunun nedeni olarak insan unsurunun modellemeye dâhil edilmesinde karşılaşılan zorluklar ve bu unsurun eklenmesiyle ortaya çıkacak olan modelleme karmaşıklığının artışı gösterilebilir.

Hücreyel imalat sistemlerinde insan faktörünü dikkate alan çalışmaların ele aldıkları konulardan ilki, çevrim zamanının minimize edecek şekilde belirli görevlere belirli operatörlerin atanmasıdır. Diğer bir konu, sağ taraf kısıtları ile beceri gereksinimlerinin tanımlanması, operatör ve beceri gereksinimlerine göre yapılan hedef programlama modellerinin geliştirilmesidir. İşçi görev etkinliği ölçütleri,

operatöre göre standart üretim zamanlarının değişimi, iyi eğitilmiş kalifiye elemanların işe alınması ve çalıştırılması bir diğer konu olarak dikkat çekmektedir. Parçaların belirli operatörler tarafından işlenmesinin yararları, bir hücreye atanan operatörün o hücrede başarılı olması ya da o hücreye atanmaması gerekliliği, operatörlerin makinaları kullanma becerileri vb. konuları da modellerde ele alınmıştır.

Bu tez çalışmasında, insan faktörü ele alınan sistemin temel özellikleri arasında yer alan parti bölünmesine izin verilmesi, alternatif rotaların dikkate alınması durumlarına göre incelenmiştir. Bu durumlardan ilkinde yani parti bölünmesine izin veren bir sistemde, operatörlerin parçalara atanması düşünülemez. Çünkü partiler bölünmekte ve bir partiyi üreten bir operatör olması durumunda operatörün de birden fazla hücrede yer alması gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Aynı şekilde ikinci durumda da yani alternatif rotaların dikkate alındığı bir sistemde de operatörlerin parçalara atanması düşünülemez. Çünkü bu durumda da alternatif rotalar söz konusu olacak ve yine parçalara atanan operatörlerin yine birden çok hücreye atanması ve hücreler arası hareketi ortaya çıkacaktır. Geliştirilen matematiksel modeller ise bu durumu da dikkate alacak şekilde tasarlanmadıkça operatör hareketleri göz ardı edilmiş olacak ve sistem karmaşıklığı artacaktır.

Bidanda ve ark. [Bidanda ve ark., 2005] tarafından yapılan tarama çalışmasına, hücreli imalat sistemlerinde insan unsuruyla ilgili ayrıntılı araştırma yapmak için başvurulabilir.

Russell ve arkadaşları (1991), operatörlerin makinalara atanma yöntemlerinin etkileri üzerine bir çalışma yapmışlardır [Russell ve ark., 1991]. Bu çalışmada operatör atama stratejileri en uzun kuyruğa atama (Longest Queue), kuyruktaki ilk işi en uzun bekleyen (first job in the line has waited longest) ve kuyruktaki işlerin toplam işlem zamanı en uzun olan (longest total processing time of jobs enqueued) olmak üzere üç tanedir. Bu üç stratejinin hücreli imalata olan etkisini araştırmak için bir benzetim çalışması sunulmuştur. Yaptıkları çalışmada insan unsuru yalnızca operatörün kapasitesi ya da bir parçayı üretebilme hızı olarak tanımlanmıştır.

Min ve Shin (1993) yaptıkları çalışmada insan ve makina hücrelerinin eşzamanlı olarak oluşturulması için bir matematiksel model oluşturmuşlardır [Min ve Shin, 1993]. Bu matematiksel model parça benzerliklerinin maksimizasyonu, işlem zamanları minimizasyonu, beceri eşleşmesi maksimizasyonu ve operatör ücretleri minimizasyonu olmak üzere dört amaca sahiptir. Operatörlerin parçalara atanmasını hedefleyen bu model, çok fazla kısıta sahip olması nedeniyle çalışmanın yapıldığı yıllarda etkin olarak çözülemediğinden ikiye bölünmüştür. İlk aşamada makina ve parçalar hücrelere atanırken ikinci aşamada çalışanlar beceri seviyelerine göre ilk aşamada oluşturulan hücrelere atanmıştır. Burada kullanılan değer olarak 0 (hiç eşleşme yok) ve 5 (mükemmel eşleşme) beceri eşleşmeleri varsayıma dayanan verilerdir ve hücrelerin beceri ihtiyacına dair bir kavram olmaması nedeniyle bir anlam ifade etmemektedir.

Shafer ve Charnes (1995) çalışmalarında hücresel imalatatta yükleme faktörlerinin hücresel imalatı nasıl etkilediğini araştırmak için bir benzetim çalışması yapmışlardır [Shafer ve Charnes, 1995]. Her hücreye bir operatör atandığı ve her makinaya bir operatörün atandığı durumlarda akış tipi yerleşimin hücresel yerleşime göre daha iyi sonuçlar verdiğini görmüştür.

Süer ve Sanchez-Bera (1997) yaptıkları çalışmada emek yoğun üretim hücrelerinde operatör atamalarının ve yerleşimlerinin verimlilik üzerinde merkezi rol oynamasına bağlı olarak diğer üretim hücrelerinden farklılık gösterdiğini belirtmişlerdir [Süer ve Sanchez-Bera, 1997]. Emek yoğun hücreyi ise hafif ağırlıklı, küçük ve pahalı olamayan makina ve teçhizatın kullanımının yanı sıra operatörlerin devamlı olarak işe gelmesinin ve her aşamada operatörlerin gerekli olduğu hücreler olarak tanımlamışlardır. Bu çalışmada alternatif operatör seviyelerini ve hücrelere ürün atamasını ve optimal ortak operatör dağılımını sağlayan matematiksel model için iki aşamalı hiyerarşik bir metodoloji önermişlerdir. Önerdikleri modelin ilk aşamasında karışık tamsayılı matematiksel programlama ile farklı operatör seviyeleri ve talepler için alternatif konfigürasyonlar elde edilmiştir. İkinci aşamada ise ortak operatör atama ve hücre yükleme için bir kareli atama formülasyonu ve iki farklı tamsayılı

programlama modeli önerilmiştir. Geliştirilen kareli atama modelinin hesaplama zorluğundan dolayı bu yöntemle hiç çözüm yapılmamış ikinci alternatif tercih edilmiştir. İkinci alternatifte ilk aşamada gerekli hücre sayısını belirleyen bir tamsayıli matematiksel programlama modeli geliştirilmiş ve son olarak da elde edilen hücre sayısına göre operatör atama ve hücre yüklemeyi yapan bir başka tamsayıli matematiksel model geliştirilmiştir. Bu metodoloji gerçek bir hücreli imalat sisteminden alınan örnek bir problem üzerinde gösterilmiştir.

Askin ve Huang (1997) çalışanların hücrelere atanması ve onlara ait eğitim programlarının belirlenmesine ilişkin iki farklı tamsayıli programlama modeli önermişlerdir [Askin ve Huang, 1997]. Yaptıkları çalışmadaki birinci model, bir hücre içerisindeki tüm çalışanların toplam eğitim gereksinimlerini dikkate alarak operatörlerin hücrelere atanmasını sağlayan bir modeldir. İkinci model ise, kişisel eğitim çizelgesini belirlemektedir. Çalışanlara ait ekipman operasyonu, yönetim, bakım ve kalite güvencesi kategorilerinden oluşan hem teknik hem de kişisel becerileri içeren bir örnek liste oluşturmuşlardır. Geliştirilen iki modelde de amaç maliyetlerin minimize edilmesidir. Modellerde hem teknik hem de kişisel beceriler dikkate alınmasına rağmen bir işin gerçekleştirilebilmesi için her bir farklı beceri için tek bir seviye belirlenmiştir. Oysaki her bir beceri için farklı beceri seviyelerinin bulunması gerçeği daha çok yansıtacaktır. Eckstein ve Rohleder (1998) çalışmalarında işletmelerin karlılıklarını artırabilmek için geçiş yapmak durumunda kaldıkları hücreli imalat sistemlerinin üzerindeki insan faktörünün etkilerini incelenmişlerdir [Eckstein ve Rohleder, 1998]. Bir benzetim çalışması ile hücreli imalat sistemi üzerindeki işçilik kısıtları ve öğrenme unutmaya gibi insani unsurların etkisini araştırmışlardır.

Süer ve SanchezBera (1998) üretim partilerinin bölünebildiği durumda emek yoğun üretim sistemlerinde hücrelere operatör atanması problemini ele almışlardır [Süer ve SanchezBera, 1998]. Öncelikle parti büyüklüklerinin ayrılmasının hazırlık zamanları açısından sisteme nasıl bir değişiklik getireceği konusu üzerinde durulmuştur. Çalışmada önerilen yaklaşım iki aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamada alternatif operatör seviyeleri oluşturulmaktadır. Bunun için geliştirilen matematiksel modelin

amacı maksimum üretim hızını sağlamaktır. İkinci aşamada ise hücrelere optimal operatör ve ürün atamaları yapılmaktadır. İki aşamalı yaklaşım için bir matematiksel model geliştirilmiş ve örnek bir veri setiyle çözüm elde edilmiştir.

Billionet (1999) tamsayılı programlamayı çalışanların yeteneklerini dikkate alan bir işgücü çizelgelemesine uygulamıştır [Billionet, 1999]. Daha yüksek beceri seviyelerine sahip çalışanların daha fazla ücret aldıkları ve buna karşın yüksek yetenekli çalışanların birden çok işi yapabildikleri bir sistem dikkate alınmıştır. Bunun tersi olarak da daha az yetenekli çalışanlar daha az maliyete neden olurken daha az sayıda göreve atanabilmektedirler. Bu çalışmada minimum çalışan maliyetini elde edebilmek için hangi becerilere sahip ne kadar operatörün sistemde bulunması gerektiğini hesaplayan bir matematiksel model geliştirilmiştir. Geliştirilen model verileri deterministiktir ve bir günlük ihtiyaçlara cevap vermektedir.

Borkhorst ve Slomp (2000) uzun döneme talep dalgalanmaları ve operatör eksikliğinde operatörlerin makinalara dağıtılmasıyla ilgili bir çalışma yapmışlardır [Borkhorst ve Slomp, 2000]. Çalışmada her bir makina ve çalışanın ne kadar bolluğa sahip ve ne kadar fonksiyonel olması gerektiği ve bu çalışanların üretim düzgünlüğünü sağlayacak şekilde atanmasını gerçekleştiren bir model önerilmiştir. Önerilen model çalışanların eğitim maliyetlerini minimize etmeyi amaçlamaktadır. Ağırlık faktörleri ile çalışanların potansiyellerinin değerlendirilmesi ve eğitim maliyetleri arasında uzlaşmacı bir çözüm bulmak için kullanılmıştır.

Suresh ve Slomp (2001) hücresel imalatla hücre tasarımı problemi için parça makina gruplamasının yanı sıra işgücü gruplamasını da içeren hiyerarşik bir metodoloji geliştirmişlerdir [Suresh ve Slomp, 2001]. Sezgisel olarak geliştirilen bu metodolojinin en önemli özellikleri içerisinde hızlı koşum zamanı ve interaktif karar ortamını dikkate almasıdır. Bu yöntem yapay sinir ağlarının büyük veri kümelerini hızlı kümeleme ve matematiksel modellemenin çok amaçlı optimizasyon özelliklerini bir arada kullanmaktadır. Bu prosedür üç aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada, parça aileleri ve bunlara bağlı makinalar yapay sinir ağları ile gruplandırılır. İkinci aşamada belirlenen parça aileleri belirli yükleme ile ilgili

parametrelere göre önceliklendirme yapılır. Son aşamada ise interaktif hedef programlama ile makinaların yeniden gruplandırılması ve operatörlerin atanması yapılır. Makina gruplama yapılırken kapasite kısıtları, yük dengesizliği minimizasyonu, parçaların hücrelerarası taşımalarının minimizasyonu, alınacak yeni makinaların minimizasyonu ve esneklik faktörler dikkate alınmıştır. Operatörlerin gruplanmasında fonksiyonel olarak belirlenmiş operatör havuzları parçalanmış ve hücreler için yeniden gruplanmıştır. Bu gruplama yapılırken faydacı bir yaklaşıma göre işçilik ve çapraz eğitim maliyetlerinin minimizasyonu, operatörlerin dengeli iş yüklerine sahip olmasının sağlanması, operatörlerin hücreler arası hareketlerinin minimizasyonu ve yeterli iş gücü esnekliğinin sağlanması etkenleri dikkate alınmışlardır.

Askin ve Huang (2001) yaptıkları çalışmada karışık tamsayılı bir hedef programlama modeli geliştirmişlerdir [Askin ve Huang, 2001]. Bu modelle operatörlerin hücrelere atanması için operatörlerin eğitim gereksinimleri, hücre içi takım motivasyonları, bireysel iş uyumu karşılaması, operatörlerin teknik ve yönetsel becerilerinin hücre ihtiyaçlarına adaptasyonunun sağlanması hedeflenmiştir. Söz konusu model fiziksel, organizasyonel ve teknik faktörleri ele almaktadır. Bu modelde de yazarların bir önceki çalışmasında olduğu gibi her bir farklı beceri çalışanların o beceriye sahip olup olmamasına bağlı olarak 0 ve 1 değerlerini almaktadır. Geliştirilen model üç farklı sezgiselle çözülmüş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

VanOyen ve arkadaşları (2001) çapraz eğitimin operatörlerin atanmasındaki yaralarına dikkat çeken bir çalışma gerçekleştirmişlerdir [VanOyen ve ark., 2001]. Yaptıkları çalışmada tek biri işi gerçekleştirmek üzere tek bir operatörün seçilmesi yerine bir araya gelen operatörlerin işbirliğinin nasıl bir etki oluşturacağını araştırmışlardır. Aslında çok sayıda beceriyi ve bu beceriler ait seviyeleri dikkate almamışlardır. Ayrıca modellerinde operatörlerin daha farklı işleri gerçekleştirebilmeleri için gerekli olan eğitim zamanları ve maliyetlerini de dikkate almamışlardır.

Hopp ve VanOyen (2001) çalışmalarında sistem performansını artırmak için çapraz eğitimin kullanılması konusunu ele almışlardır [Hopp ve VanOyen, 2001]. Birçok sistem karakteristiğini değerlendirmiş ve bu değerlendirmelere göre birçok çapraz eğitim yöntemleri önermişlerdir. Belirledikleri kriterler sistem performansının değerlendirmesi alanında oldukça önemlidir. Yalnız bu çalışmada çalışanlara ait özellikler teknik ve kişisel beceriler ve bunların farklı seviyeleri olarak ele alınmamıştır.

Li (2003) çalışmasında çok boyutlu hücre oluşturma problemi için bir çözüm yöntemi önermiştir [Li, 2003]. Bu çözüm yönteminin insan unsuru için de kullanılabileceğini çalışmasında göstermeye çalışmıştır. Önerdiği yöntem bir bütünleşik matris oluşturma yöntemidir. Bu yöntemde birbirinden bağımsız parça makina, parça operatör, makina operatör matrisleri bulunmaktadır. Bu matrisler 0–1 matrislerdir. Operatörler makinaları kullanabiliyorsa 1 kullanamıyorsa 0 değerini almaktadır. Matrislerin bütünleşik olarak gösterilmesi ve bu bütünleşik matrisi kullanarak parça makina operatör ailelerinin oluşturulması için bir sezgisel geliştirmişlerdir. Sayısal bir örnek ile çalışmalarını açıklamışlardır.

Juran ve Schruben (2004) çalışanların modellenmesinin sistem verimliliği üzerinde önemli bir etkisinin olduğu sistemler için bir yöntem geliştirmişlerdir [Juran ve Schruben, 2004]. Yarı iletken üretimi ve yatırım sistemleri gibi günümüzde önemi daha da artan sistemlerdeki işgücü seviyesinin az olmasına karşın çalışanların sistem performansı üzerinde oldukça etkili olduğu bilinmektedir. Bu sistemlerdeki çalışanların performansı direkt olarak işyerinin verimliliği üzerinde etkilidir. Bu çalışmada çalışanların demografik ve kişilik yapılarının etkili olduğu bir sistem için benzetim çalışması yapılmış ve benzer sistemlerde çalışanların özelliklerinin sistem performansı üzerindeki etkilerinin önemi vurgulanmıştır.

Fitzpatrick ve Askin (2005) yaptıkları çalışmada son yıllarda dikkat çeken bir konu olan üretim verimliliği üzerine çalışanların etkisini araştırmışlardır [Fitzpatrick ve Askin, 2005]. Çalışanların doğuştan gelen eğilimleri, içsel becerileri ve genelde ele alınan teknik becerilerinin dikkate alındığı bir matematiksel model geliştirmişlerdir.

Geliştirdikleri model bir matematiksel modeldir. Bu model ile takım çalışmasına uygun sistemler için bir takım seçme işlemi gerçekleştirmeyi hedeflemişlerdir. Geliştirdikleri modeli çözmek için bir sezgisel önermişlerdir.

Slomp ve arkadaşları (2005) hücresel imalat sistemi ortamında çapraz eğitimi ele almışlardır [Slomp ve ark., 2005]. Çapraz eğitim operatörlerin ve makinaların görev ataması esnasında doğrudan ya da dolaylı olarak etkilenmesine neden olmaktadır. Makinalar ve operatörler arasındaki bağlantı eğitilmiş yani kalifiye operatörlerin daha çok yüklenmesine daha az eğitilmiş operatörlerinse daha az iş yükü ile yüklenmeleri olarak tanımlanabilir. Bu da üretim tesislerindeki operatörler arasında iş yükü dengesizliği ile sonuçlanabilir. Bu dezavantajları ortadan kaldırmak için yazarlar çalışmalarında çapraz eğitim maliyetleri ve operatörler arasındaki iş yükü dengesizliği arasında bir en iyi uzlaşan çözüm sağlayacak bir tamsayı programlama modeli geliştirmişlerdir. Geliştirilen bu modelle belirli makinalar için çapraz eğitime alınacak olan operatörlerin seçilmesi sağlanmaya çalışılmıştır. Modelin özelliklerini ve gerçek yaşam problemlerine uygulanabilirliğini göstermek amacıyla sayısal bir örnek verilmiştir.

Süer ve Tummaluri (2008) çalışmalarında işçi ağırlıklı üretim sistemlerinde operatörlerin atanması problemini ele almışlardır [Süer ve Tummaluri, 2008]. Operatörlerin beceri seviyeleri ve klasik operasyon zamanlarından farklı olan, bu beceri seviyesine bağlı operasyon zamanları çalışmada dikkate alınan faktörlerdir. Yapılan çalışmada üç aşamalı bir sezgisel geliştirilmiştir. Birinci aşamada, alternatif hücre yapıları oluşturulmaktadır. İkinci aşamada, hücrelerin yüklenmesi ve ekip büyüklükleri belirlenmektedir. Üçüncü ve son aşamada ise, operatörlerin atanması yapılmaktadır. Çalışma aynı zamanda çok periyotlu bir çalışmadır. Geliştirilen sezgiselin her aşamasında matematiksel modelleme yaklaşımı kullanılmıştır. Max ve MaxMin olarak adlandırılan iki sezgisel geliştirilmiş ve üçüncü yani operatörlerin atanması aşamasında kullanılmıştır.

Yukarıda açıklanan çalışmaların kim/kimler tarafından yapıldığı, hangi insan unsurlarını dikkate alarak nasıl bir model geliştirip nasıl bir çözüm yöntemi önerdiği Çizelge 3.3’de tarih sırası ile özetlenmiştir.

Çizelge 3.3. İnsan faktörünün dikkate alındığı çalışmalar

Sıra No	Makale	Dikkate Alınan İnsan Faktörleri	Makale Çeşidi	Model/Teknik/Çözüm
1	Russel ve ark., 1991	Operatör kapasitesi Operatörün parça üretebilme hızı	Teorik çalışma (örnek problem)	Benzetim çalışması
2	Min ve Shin, [*] 1993	Operatörler parçaları 0-5 skalasına göre bir beceride üretebilmektedirler	Teorik çalışma (örnek problem)	Matematiksel Modelleme ile optimal çözüm bulunması ve modelin İki aşamalı sezgiselle çözümü
3	Shafer ve Charnes, 1995	Her hücreye operatör atanması ve her makineye operatör atanması durumları	Teorik çalışma (örnek problem)	Benzetim çalışması
4	Süer, Sanchez-Bera, 1997	Farklı operatör seviyeleri (sayı olarak)	Teorik çalışma + uygulama (gerçek problem)	Karışık tamsayıli matematiksel programlama ile kareli atama modeli
5	Askin ve Huang, 1997	Operatör eğitim zamanları ve maliyetleri	Teorik çalışma (örnek problem)	İki farklı matematiksel programlama modeli ile önce toplam eğitim zamanlarının belirlenmesi sonra eğitim programlarının düzenlenmesi
6	Eckstein ve Rohleder, 1998	İşçilik kısıtlar Öğrenme/unutma	Teorik çalışma (örnek problem)	Benzetim çalışması
7	Süer ve Sanchez-Bera, 1998	İşçi sayısı	Teorik çalışma (örnek problem)	Her aşamasında matematiksel modellemenin kullanıldığı üç aşamalı sezgisel algoritma geliştirilmesi
8	Billionet, 1999	Çalışanların yeteneklerine bağlı eğitim maliyeti	Teorik çalışma (örnek problem)	Matematiksel programlama ile optimal operatör sayısı ve becerisinin hesaplanması
9	Borkhorst ve Slomp, 2000	Çalışanların eğitim maliyeti	Teorik çalışma (örnek problem)	Çok amaçlı matematiksel programlama ile toplam eğitim maliyeti minimizasyonu

^{*} Hücre oluşturma aşamasında operatör ataması yapan ve bunun için matematiksel model geliştirilmiş tek çalışma.

Çizelge 3.3. (Devam) İnsan faktörünün dikkate alındığı çalışmalar

Sıra No	Makale	Dikkate Alınan İnsan Faktörleri	Makale Çeşidi	Model/Teknik/Çözüm
10	Suresh ve Slomp, 2001	İşçi bir makinayı kullanabilmekte ya da kullanamamaktadır (0-1 beceri matrisi)	Teorik çalışma (örnek problem)	Üç aşamalı sezgisel yaklaşımla alternatif hücre çözümleri oluşturulması ve AHP ile seçim
11	Askin ve Huang 2001	İşçi takımı oluşturma Çapraz Eğitim planları	Teorik çalışma (örnek problem)	Karışık tamsayılı hedef programlama modeline sezgisel bir çözüm yaklaşımı getirilmesi
12	VanOyen ve ark., 2001	Takım çalışmasının etkisi	Teorik çalışma (örnek problem)	Matematiksel modelleme ve sezgisel çözüm yaklaşımı
13	Hoop ve VanOyen, 2001	Çapraz Eğitim planları	Teorik çalışma (örnek problem)	Eğitim yöntemlerinin sistem performansına etkisinin benzetimle araştırılması
14	Norman ve ark., 2002	Operatörün teknik beceri seviyesi Operatörün kişisel beceri seviyesi	Teorik çalışma (örnek problem)	Karışık Tamsayılı Matematiksel Programlama ile optimal çözümü
15	Li, 2003 [†]	Operatör makina matrisi Operatör parça matrisi	Teorik çalışma (örnek problem)	Bütünleşik matris oluşturmak için kullanılan sezgisel bir yöntem
16	Juran ve Schruben, 2004	Operatör demografisi ve kişiliği	Teorik çalışma (örnek problem)	Benzetim çalışması
17	Fitzpatrick ve Aksin, 2005	İşçilerin teknik becerileri İşçilerin içsel (kişisel) becerileri	Teorik çalışma (örnek problem)	Matematiksel programlama ve sezgisel çözüm
18	Slomp ve ark., 2005	İşçi bir makinayı kullanabilmekte ya da kullanamamaktadır (0-1 beceri matrisi)	Teorik çalışma (örnek problem)	Tamsayılı matematiksel modelleme ile optimal çözüm
19	Bidanda ve ark., 2005	Operatörlerin hücresele imalat sistemi üzerine etkisi olan teknik ve kişisel özellikleri	Kalitatif Tarama ve İnceleme Yayını	-
20	Süer ve Tummalur i, 2008	9 skalalı operatör operasyon yapabilme beceri seviyesi Operatörlerin öğrenme ve unutmalarına bağlı işlem zamanları	Teorik çalışma (örnek problem)	Her aşamasında matematiksel modellemenin kullanıldığı üç aşamalı sezgisel algoritma geliştirilmesi

[†] Eşzamanlı operatör ataması yapan tek sezgisel çalışma

Yukarıda incelenmiş insan unsuru ile ilgili çalışmalar genellikle teorik çalışmalardır. İnsan unsuruna ait özellikler, varsayım ve kabullerle sayısallaştırılmıştır. İnsan unsurunun imalatındaki önemi göz önüne alındığında, uygulama çalışmalarında yakın gelecekte büyük bir artış olacağı düşünülmektedir.

Bu bölümde literatür araştırması genel başlığı altında incelenen tüm çalışmalar beraberce değerlendirildiğinde, tez çalışmasında hedeflenen insan-parça-makina hücrelerinin eşzamanlı oluşturulduğu birden çok amaçlı, alternatif rotaları dikkate alan, parti bölünmesine izin veren bir çalışmanın yer almadığı gözlenmiştir.

Hücresel imalat sistem tasarımı aşamasında parçaların hangi operasyonlarının makinalarda yapılabileceğinin bilindiği sistemler için, operatörlerin de dikkate alınması açısından bu çalışma, literatürdeki diğer tüm çalışmalardan ayrılmaktadır. Benzeri çalışmalar daha önce de literatürde mevcut olmasına karşın, bu çalışma hem üretim sistemlerinin ayrıntılı üretim özelliklerini hem de operatörlerin ayrıntılı atama karakteristiklerini dikkate alması açısından tek çalışma olma özelliği taşımaktadır.

Bu çalışma, yapılan diğer iki eşzamanlı çalışmadan insan unsurunu makinaların yalnızca kullanılıp kullanılamamasının ya da parçaların yalnızca işlenip işlenememesinin dikkate alındığı 0-1 matrislerinin yerine, makinaların kullanımı için teknik ve kişisel becerilerin önceden belirlenmiş seviyelerde olması gerekliliğini de içermesiyle ayrılmaktadır.

Tez çalışmasında dikkate alınan problemin özelliklerinden insan-parça-makina hücrelerinin eşzamanlı oluşturulması ve birden çok amacın dikkate alınması konusunda, sadece Min ve Shin'in çalışması [Min ve Shin, 1993] referans verilebilir. Fakat çalışmada, parça operatör matrisi 0-5 skalası ile değerlendirilmiş bu hipotetik yaklaşım nedeniyle teknik ve kişisel beceriler göz ardı edilmiştir. Ayrıca, geliştirilen matematiksel model harici elemanlara izin vermemektedir. Çalışmada önerilen iki aşamalı çözüm yöntemi neticesinde operatörler parça makina hücrelerine eşzamanlı atanamamakta ilk aşamada oluşturulan hücrelere atanmaktadır.

Bahsi geçen özelliklerden, insan-parça-makina hücrelerinin eşzamanlı oluşturulması ve operatörlerin makinalara atanması konusunda sadece Li'nin çalışması [Li, 2003] referans verilebilir. Li'nin yaptığı çalışmada da yalnızca operatörlerin makinaları kullanıp kullanamamalarını dikkate alan 0-1 operatör makina matrisleri yer almakta ve teknik ve kişisel becerilere yer verilmemektedir. Ayrıca Li'nin çalışmasında bir matematiksel model değil bir sezgisel yöntem kullanılmakta ve hücre oluşturma problemi sezgisel olarak çözülmektedir.

Yukarıda açıklanan iki çalışmada da dikkate alınmayan; parçaların işlenebilmesi için gerekli operasyonlar, operasyonların gerçekleşmesi için gerekli makinalar, makinaların alım maliyetleri, makinaların kapasiteleri, parçaların talep değerleri, parçaların farklı makinalardaki farklı işlem zamanları ve hazırlık zamanları, parçaların hücreler arası taşınması, gibi gerçek sistemlerde sıklıkla yer alan üretim özellikleri bulunmaktadır. Bu tez çalışmasında bahsi geçen üretim özellikleri dikkate alınmıştır.

4. PROBLEMİN TANIMI

Bu çalışmada ele alınan problem; parçaların üretim özelliklerini dikkate alan, makina hücrelerini oluştururken parça ailelerinin atamasını ve bu makinaları kullanacak operatörleri de makinaların daha önceden belirlenen beceri gereksinimlerine göre atandığı bir hücresel imalat hücresi oluşturma problemidir.

Parçalara ait özellikler; parçaların dönemlik taleplerinin olması, parçaların belirli operasyonlardan geçmesi gerekliliği, bu operasyonların gerçekleşmesi için bir makina ve/veya makinalara ihtiyaç duyuyor olmasıdır. Ayrıca, parçaların partiler halinde üretilmesi ve bu partilerin hücreler arasında bölünebilmesi, parçaların tamamının ya da kimi operasyonlarının imalat sisteminin dışında fason imalat kullanılarak üretilmesi olanağı ve parçaların hücreler arasında hareketine izin vermesi diğer teknik özellikler olarak gösterilebilir. Makinalara ait özellikler; belirli bir kapasiteye, satın alma ve operasyon maliyetine sahip olmalarıdır. Bunun yanı sıra makinalarda görevlendirilecek olan operatörlerin, o makinaların kullanımı için makinaların kullanımı için belirlenen teknik ve kişisel beceri seviyelerinin olması gerekliliği de makinaların teknik özellikleri içerisindedir. İnsana dair teknik ve kişisel beceriler ise; makina operatörleri olmaları ve belirli işler, operasyonlar, ya da parçalar üzerine yoğunlaşmak yerine, makinaların teknik ve kişisel becerisi ihtiyaçlarını minimum maliyetle karşılayabiliyor olmalarıdır. Operatörler, karşılayabildikleri teknik ve kişisel becerilerin seviyelerine bağlı olarak, üretim sistemlerinde bir maliyete neden olmaktadır. Beceri seviyelerine bağlı olarak değişen bu maliyetin, hücrelerin tasarımı aşamasında dikkate alınması gerekmektedir.

Operatörlerin tasarım aşamasında eşzamanlı olarak ele alınmasıyla; makinaların alım maliyetleri için yalnızca makinaların ve parçaların değil operatörlerin de dikkate alınması sağlanmaktadır. Diğer bir deyişle; sistem için yeni bir makina satın alınacaksa; o makinada işlenecek parçaların işlem zamanları, makinaya ait hazırlık zamanları, makinada işlenecek parçaların hücreler arası taşıma maliyetleri, makinanın alım maliyetinin yanı sıra o makinayı kullanacak olan operatörün beceri gereksinimleri ve bu beceri gereksinimlerini karşılamanın maliyeti de dikkate

alınmıştır. Böylece sistem bir bütün olarak ele alınmış olmakta aynı zamanda gerçek sistemlerin tasarlanmasında daha uygun bir model elde edilmiştir.

Geliştirilen matematiksel model, literatürdeki iki modeli temel olarak referans almaktadır. Bu modellerden ilki Defersha ve Chen [Defersha ve Chen, 2006] tarafından geliştirilen bir matematiksel modeldir. Bu modelde parçalara ait yukarıda sayılan üretim özellikleri dikkate alınmış ve parça ve makinaların hücresele imalat sistemi tasarımında dikkate alındığı bir model geliştirilmiştir. Bu tez çalışmasından farklı olarak Defersha ve Chen'in modelinde hücreler dönemlik olarak tasarlanmış ve dönemden döneme değişiklik gösterebildiği varsayılmıştır. Geliştirilen modelde ayrıca, insan unsuru ve operatörler göz ardı edilmiştir. İkinci model ise, Norman ve arkadaşlarının [Norman ve ark., 2002] çalışmasıdır. Bu çalışmada ise mevcut parça makina hücrelerine operatörlerin atanmasına yönelik ayrıntılı bir çalışma yapılmıştır. Çalışmada ayrıca operatörlerin operasyonlara atandığı varsayımı yapılmıştır. Çalışmada operatörlerin atanması aşamasında teknik ve kişisel beceriler tanımlanmış ve operatör atamaları operasyonların teknik ve kişisel gereksinimlerine göre yapılmıştır. Oysaki bazı üretim sistemlerinde, operatörler belirli operasyonları yapmak yerine belirli makinaların operatörleridir ve o makinada yapılabilen tüm operasyonları gerçekleştirebilmektedirler.

Yapılan bu tez çalışmasında, literatürden alınan geniş kapsamlı bu iki modelin göz ardı ettiği yönler de dikkate alınarak yeni bir matematiksel model geliştirilmiştir. Literatürde yer alan amaç fonksiyonlarından; parçaların üretim zamanlarının minimizasyonu parçaların işlem maliyetlerinin minimizasyonu olarak, satın alınan makina sayısının minimizasyonu makinaların satın alma maliyetinin minimizasyonu olarak, hazırlık zamanlarının minimizasyonu hazırlık maliyetlerinin minimizasyonu olarak, parçaların bağımsız hücrelerde üretilmesine yönelik amaçlarından hücreler arası taşımaların ve fason imalat minimizasyonu, hücreler arası taşımanın ve fason imalatın maliyetinin minimizasyonu olarak alınmıştır. Hücresele imalat sistemlerinde, hücre oluşturma probleminin ayrılmaz bir parçası olan insan unsuru ise makinaları kullanan operatörlerin maliyetlerinin minimizasyonu olarak dikkate alınmıştır.

Böylece çok amaçlı matematiksel model, tüm amaçların maliyet paydasında birleştirildiği tek amaçlı modele dönüştürülmüştür.

Bu çalışmada, operatörlerin makinaları kullanıp kullanamamaları, sözü edilen makinaların kullanımı için gerekli teknik ve kişisel becerileri seviyelerine göre belirlendiği, çok amaçlı bir matematiksel model önerilmiştir. Çalışmanın en önemli özelliklerinden biri; operatörlerin makinalara atandığı durumda, insan unsurunun makinaların yalnızca kullanılıp kullanılamaması yerine, makinaların kullanımı için gerekli beceriler, beceri seviyelerinin olması ve bu beceri seviyelerinin önceden belirlenmiş olmasıdır. Makinaların kullanımı için gerekli becerilerin onları kullanacak operatörler tarafından karşılanması gerekliliği sağ taraf sabitleriyle sağlanmış ve operatörlerin beceri seviyesi arttıkça maliyetlerinin artması da amaç fonksiyonundaki maliyet minimizasyonu ile modellenmiştir.

4.1. Modelin Varsayımları

Bu çalışmada ele alınan matematiksel model aşağıdaki varsayımlar altında geliştirilmiştir:

1. Her parça üretimi için farklı operasyonlardan geçmelidir.
2. Parçaların operasyonları bir ya da birden fazla makinada yapılabilir. Alternatif rotalara izin verilir.
3. Üretim için talep miktarları belirlenmiş ve bilinmektedir.
4. Dış kaynak kullanımına (fason imalata) izin verilir.
5. Ürünler partiler halinde üretilmekte ve parti büyüklükleri her parça için belirlenmiş ve bilinmektedir. Partilerin bölünmesine izin verilir.
6. Her makina bir operatör tarafından kullanılır.
7. Her makinanın kullanılabilmesi için farklı beceri çeşitlerinin farklı seviyelerde kullanıcıya ihtiyacı vardır.
8. Her operatörün becerileri seviyelere ayrılmıştır ve bu operatörün işe alımının maliyeti bu seviyeye bağlıdır.

4.2. Matematiksel Model

İndeksler

- i parça tipi
 j operasyon sayısı
 k makina indeksi
 l hücre indeksi
 m beceri indeksi
 π beceri seviyesi indeksi

Karar Değişkenleri

X_{ijkl} = i işinin j operasyonunun k makinasında l hücresinde üretilen kısmının tamamına oranı ($0 \leq X_{ijkl} \leq 1$)

$\bar{X}_{ij}$ = i işinin j operasyonunun fason imalatla üretilen kısmının tamamına oranı
 ($0 \leq \bar{X}_{ij} \leq 1$)

$P_{ijl} = \begin{cases} 1 & i \text{ işinin } j \text{ operasyonu } l \text{ hücresinde yapılıyorsa} \\ 0 & \text{diğer durumda} \end{cases}$

N_{kl} = l hücresindeki k makinası miktarı (adet)

$r_{kl} = \begin{cases} 1 & k \text{ makinası } l \text{ hücresinde bulunuyorsa} \\ 0 & \text{diğer durumda} \end{cases}$

$Y_{m\pi kl}$ = l hücresinde k makinasını kullanacak m becerisinin π seviyesindeki operatör sayısı

$W_{m\pi kl} = \begin{cases} 1 & l \text{ hücresinde } k \text{ makinasını kullanan operatör } m \text{ becerisinin } \pi \text{ seviyesinde ise} \\ 0 & \text{diğer durumda} \end{cases}$

Parametreler

- h_{ijk} i işinin j operasyonunun k makinasındaki işlem zamanı
 O_k k makinasının bir birim zaman çalışma maliyeti
 P_k k makinasının alım maliyeti

- d_i i parçasının talebi
 B_i i parçasının parti büyüklüğü
 μ_{ijk} k makinasında i parçasının j operasyonunun hazırlık maliyeti
 Φ_i i parçasının dışarıda yaptırılma (fason) maliyeti
 v_i bir adet i parçasının hücreler arası taşıma maliyeti
 $CT_{m\pi kl}$ k makinasında çalışan m becerisinin π seviyesindeki bir operatörün maliyeti
 Π_{ijk} i işinin j operasyonu k makinasında yapılıyorsa 1
 z i işinin j operasyonu yapılabileceği maksimum hücre sayısı
 C_k k makinasının kapasitesi
 wf iş yükü faktörü ($0 \leq wf \leq 1$)
 L hücre sayısı
 LB bir hücrede olması gereken minimum makina sayısı
 UB bir hücrede bulunabilecek maksimum makina sayısı
 SNL l hücresinde aynı anda bulunmaması gereken makina çiftleri kümesi
 SSL l hücresinde aynı anda bulunması gereken makina çiftleri kümesi
 $NSL_{k\pi}$ k makinasında çalışacak operatörün sahip olması gereken minimum π becerisi seviyesi
 $SL_{m\pi}$ bir operatörün m becerisinin π seviyesi
 $BigM$ 1 büyük bir sayı (oluşturulacak hücre sayısı ile bu hücrelere atanacak maksimum makina (veya operatör) sayısının çarpılmasıyla elde edilen sayının bir fazlasının seçilmesi yeterlidir)

Matematiksel Model

$$\begin{aligned}
 MinZ = & \sum_i^n \sum_j^{J_i} \sum_k^K \sum_l^L X_{ijkl} * h_{ijk} * O_k + \sum_k^K \sum_l^L P_k * N_{kl} + \\
 & \sum_i^n \sum_j^{J_i} \sum_k^K \sum_l^L \left[(X_{ijkl} * d_i) / B_i \right] * \mu_{ijk} + \sum_i^n \sum_j^{J_i} \bar{X}_{ij} * d_i * \Phi_i + \\
 & \frac{1}{2} \sum_i^n \sum_j^{J_i} \sum_l^L d_i * v_i |X_{ij+1kl} - X_{ijkl}| + \sum_m \sum_{\pi} \sum_k^K \sum_l^L CT_{m\pi k} * Y_{m\pi kl}
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

s.t.

$$\sum_k^K \sum_l^L d_i * X_{ijkl} = d_{ij} * (1 - \bar{X}_{ij}) \quad \forall i, j \in J_i \quad (4.2)$$

$$\sum_k^K \sum_l^L X_{ijkl} \leq 1 \quad \forall i, j \in J_i \quad (4.3)$$

$$\sum_l^L X_{ijkl} \leq \Pi_{ijk} \quad \forall i, j \in J_i, k \quad (4.4)$$

$$\sum_k^K X_{ijkl} \leq p_{ijl} \quad \forall i, j \in J_i, l \quad (4.5)$$

$$\sum_l^L p_{ijl} \leq z \quad \forall i, j \in J_i \quad (4.6)$$

$$\sum_i^n \sum_j^{J_i} d_i * h_{ijk} * X_{ijkl} \leq C_k * N_{kl} \quad \forall l \quad (4.7)$$

$$\frac{wf}{L} \sum_i^n \sum_j^{J_i} \sum_k^K \sum_l^L d_i * h_{ijk} * X_{ijkl} \leq \sum_i^n \sum_j^{J_i} \sum_k^K \sum_l^L d_i * h_{ijk} * X_{ijkl} \quad \forall i, j \in J_i, k \quad (4.8)$$

$$\sum_k^K N_{kl} \geq LB \quad \forall l \quad (4.9)$$

$$\sum_k^K N_{kl} \leq UB \quad \forall l \quad (4.10)$$

$$N_{kl} \leq \text{BigM1} * r_{kl} \quad \forall k, l \quad (4.11)$$

$$r_{kl} \leq N_{kl} \quad \forall k, l \quad (4.12)$$

$$r_{k^c l} + r_{k^d l} \leq 1 \quad (k^c, k^d) \in \text{SNL} \quad \forall l \quad (4.13)$$

$$r_{k^a l} - r_{k^b l} = 0 \quad (k^a, k^b) \in \text{SSL} \quad \forall l \quad (4.14)$$

$$\sum_{\pi} Y_{m\pi kl} \geq N_{kl} \quad \forall m, k, l \quad (4.15)$$

$$Y_{m\pi kl} \leq \text{BigM1} * W_{m\pi kl} \quad \forall m, \pi, k, l \quad (4.16)$$

$$W_{m\pi kl} \leq Y_{m\pi kl} \quad \forall m, \pi, k, l \quad (4.17)$$

$$r_{kl} * \text{NSL}_{km} \leq \sum_{\pi} W_{m\pi kl} * \text{SL}_{m\pi} \quad \forall m, k, l \quad (4.18)$$

$$\sum_{\pi} W_{m\pi kl} \leq 1 \quad \forall m, k, l \quad (4.19)$$

Amaç fonksiyonunda yer alan terimler, Eş. 4.1'deki sırasına göre şu şekilde açıklanabilir. İlk terim parçaların işlem maliyetlerini, ikinci terim makinaların satın alma maliyetini, üçüncü terim hazırlık maliyetini, dördüncü terim fason imalatla parçaların sistem dışında üretim maliyetini, beşinci terim parçaların hücreler arası taşıma maliyetini ve son terim makinaları kullanacak operatörlerin işe alım maliyetlerini göstermektedir. Daha önce de belirtildiği gibi bu çalışma çok amaçlı bir matematiksel model kurmayı hedeflemektedir. Kurulan çok amaçlı modelin çözümü için ise çok amaçlı optimizasyon tekniklerinden amaçların tek bir amaç fonksiyonu haline getirilmesi yöntemi kullanılmıştır. Burada amaçların birleştirilmesi için her bir amacın maliyeti dikkate alınmış ve böylece amaçların hepsi toplam maliyetin minimizasyonunu sağlamak amacıyla tek bir paydada toplanmıştır.

Kurulan modeldeki maliyet minimizasyonu amacındaki her bir terim literatürde hücresel imalat sistemlerinin tasarımı ile ilgili çalışmalarda dikkate alınan amaçlardan sağladığı faydaya göre bir gruba dahil edilebilir. Daha önce Bölüm 2.1.1'de çok amaçlı hücre oluşturma çalışmalarında yer alan amaçlar ve bu amaçların dikkate alınmasının sisteme sağlayacağı katkılar Çizelge 2.3'de belirtilmişti.

Bu çalışmada kurulan modelle Çizelge 2.3'de açıklanan amaçlardan birinci gruptaki amaçlar, modelin amaç fonksiyonundaki ilk terim olan parçaların işlem maliyetlerinin minimizasyonu ile sağlanmaktadır. Amaç fonksiyonundaki parçaların minimum maliyetle üretilmesi, parçaların bağımsız hücrelerde üretilmesi amacına hizmet etmektedir. İkinci amaç fonksiyonu grubundaki iş yükü ve kapasite dengeleme amaçları ise geliştirilen modelde Eş. 4.8 kısıt seti ile sağlanmaktadır. Bu kısıt ile toplam iş yükünün tamamı, belirlenen bir iş yükü faktörüne göre hücrelere dağıtılmaktadır. Böylece iş yükü dengelenmesi ile ilgili amaçlar sağlanmaktadır. Üçüncü amaç grubundaki maliyet minimizasyonu, geliştirilen matematiksel modelin temelini oluşturmaktadır. Parçaların bağımsız hücrelerde üretilmesi, malzeme taşıma, parçaların fason olarak üretilmesi, satın alınacak makina ve bu makinalara dair satın alma, operasyon maliyetleri ve bunların yanı sıra makinalara atanacak operatör maliyetleri amaç fonksiyonu ile sağlanmaktadır. Üçüncü amaç grubunu oluşturan hazırlık zamanlarının minimizasyonu ise yine geliştirilen matematiksel modelin

amaç fonksiyonunda dördüncü sırada gösterilen hazırlık maliyetinin minimizasyonu terimi ile sağlanmaktadır. Hazırlık zamanları yerine bunun maliyeti belirlenmiş ve böylece hazırlık zamanlarının da minimize edilmesi amaçlanmıştır.

Çizelge 2.3’de sayılan amaçlar ve hücresele imalat sistemleri ile ilgili katkıları geliştirilen matematiksel model yukarıda açıklandığı şekilde kapsamıştır. Bu çalışmada anılan bu amaçlar ve hücresele imalat sistemlerine katkıları konusunda insan faktörü ve insan faktörünün hücresele imalat sistemlerinde hücre oluşturma problemi içerisindeki yeri dikkate alınmamıştır. Oysaki insan faktörü hücresele imalat sistemlerinin tasarlanmasında gereken dört temel unsur içerisinde en önemlisidir [Bidanda ve ark., 2005]. Bu çalışmada insan unsuru göz önünde bulundurularak, makinaları kullanan operatörler ve bu operatörlerin sisteme getireceği maliyetlerin de dikkate alınmasını sağlayan bir amaç fonksiyonu terimi amaç fonksiyonuna dahil edilmiştir.

Eş. 4.2 ile parçaların üretim hücrelerinden birinde ya da fason imalatla üretilmesini sağlamaktadır. Bu kısıt, üretilecek olan miktar 0–1 arasında değişen sürekli bir değişken ile tanımlandığı için taleplerle çarpılarak oluşturulmuştur. Kısıt ile talebin tamamının bir yerde (hücrede ya da fason imalatla dışarıda) üretilmesi garantilenmiş olur. Eş. 4.3, i parçasının j . operasyonunun k hücresinde üretilecek olan üretim oranının 1’i geçmemesini sağlar. Bu kısıtta yer alan 1 talebin tamamını işaret ettiğinden, talebin tamamından fazlasının üretilmemesi garantilenmiş olur. Eş. 4.4; i parçasının j . operasyonunun eğer i parçasının j . operasyonunu k makinasında yapılabiliyorsa, k makinasına atanmasını sağlar. Eş. 4.5 ile i parçasının j operasyonu 1 hücresinde yapıp yapılmadığı kontrol edilir. Bu kısıt ile elde edilen sonuçlar daha sonraki kısıtlarda kullanılmaktadır. Örneğin; parçaların dolaşabileceği maksimum hücre sayısında kullanılır. Eş. 4.6 ile i parçasının tüm üretimi için dolaşabileceği maksimum hücre sayısı sınırlandırılır. Bir parçanın tüm operasyonları için dolaşabileceği maksimum hücre sayısı önceden belirlenmiş ve deterministik bir sayıdır ve bunun aşılması istenmektedir. Eş. 4.7 bir hücreye atanan ve k tipi makinada işlem gören tüm parça operasyonlarının toplam zamanının, o hücreye atanan k tipi makinaların toplam kapasitesini geçmesini engeller. Bu kısıt, bir

hücreye atanan k tipi makinaların kapasitelerinin aşılmaması sağlar. Eş. 4.8, hücreler arasındaki iş yükünü wf^* 'ye (iş yükü faktörüne) göre dengeler. Bu faktör hücreler arasındaki iş yükünün dengelenmesi için önceden belirlenmiş 0-1 arasında değişen sürekli bir parametredir. Bu parametreye göre, sistemde üretilen tüm parçaların tüm operasyonlarının işlem zamanları belirlenen hücre sayısına bölünür ve hücreler arasındaki iş yükü değişimin sapmasının belirli bir oranda kalmasını sağlar. Eş. 4.9 ve Eş. 4.10 oluşturulacak hücelere atanacak maksimum ve minimum makina sayısına uyulmasını sağlar. Bu kısıt ile hücrelerin oluşturulması için minimum bir makinaya sahip olmaları ve maksimum bir hücre boyutundan küçük olmaları sağlanmaktadır. Eş. 4.11 ve Eş. 4.12 ile k tipi makinadan 1 hücreye atanıp atanmadığı belirlenir. Daha sonra Eş. 4.13 ile aynı hücrede bulunmaması gereken makina çiftlerinin farklı hücelere atanması, Eş. 4.14 ile de aynı hücrede bulunması gereken makina çiftlerinin aynı hücreye atanması sağlanır.

Yukarıda açıklanan eşitsizlikler, daha önce de belirtildiği gibi Defersha ve Chen'in (2006) modeli referans alınarak oluşturulmuştur. Referans alınan modelde periyotlar da dikkate alındığından hücrelerin bir dönemden diğer döneme geçebileceği varsayımı söz konusudur. Bu tez çalışmasında hücresel formasyonun bir kere gerçekleştirileceği ve değişiklik yapılmayacağı bir sistem tasarlanması hedeflendiğinden ilgili periyot indisi modelden çıkarılarak kısıtlar yeniden düzenlenmiştir.

Eş. 4.15 ile her bir makinaya bir operatör atanması gerekli olduğundan, operatör sayısının makina sayısına eşit ya da daha büyük olması sağlanır. Eş. 4.16 ve Eş. 4.17 ile her makina tipine atanacak operatörler belirlenir. Eş. 4.18, makinalara atanan operatörlerin o makinanın en az o makinaya ait her beceri türünün gerekli seviyesinde olmasını sağlar. Eş. 4.19 ile operatörlerin becerilerinin tek bir beceri seviyesinin olması sağlanır.

Eş. 4.15-Eş. 4.19 arasında açıklanan kısıtlar temel mantık olarak Norman ve arkadaşlarının (2002) modelini referans almasına karşın problem spesifik kısıtlardır ve ele alınan problemin yapısına uygun olarak düzenlenmişlerdir. Norman ve

arkadaşlarının çalışmasında operatörlerin operasyonlara atanması durumu incelendiğinden hücreler ile bir bağlantı kurulmamıştır. Bu tez çalışmasında ise matematiksel model hücre oluşturma problemi ile eşzamanlı operatör ataması yapmakta aynı zamanda da operatörlerin makinalara atandığı durumu ele almaktadır. Bu nedenle oluşturulan kısıtlar bu probleme özgü ve orjinaldir.

Modelde amaç fonksiyonunda yer alan terimlerden $\frac{1}{2} \sum_i^n \sum_j^{J_i} \sum_l^L d_i * v |X_{ij+1kl} - X_{ijkl}|$ ifadesi doğrusal değildir. Mutlak değer olarak tanımlanan bu ifadenin doğrusallaştırılması için pozitif n_{ijl}^+ , n_{ijl}^- değişkenleri ve 0–1 δ_{ijl} değişkeni tanımlanır ve amaç fonksiyonu;

$$\frac{1}{2} \sum_i^n \sum_j^{J_i} \sum_l^L v_i * d_i * (n_{ijl}^+ + n_{ijl}^-) \quad (4.20)$$

olarak değiştirilir [Defersha ve Chen, 2006].

Buna ek olarak Eş. 4.21-Eş. 4.23 kısıtları, Defersha ve Chen'in matematiksel modeli [Defersha ve Chen, 2006] referans alınarak modele eklenmiştir:

$$\sum_k^K X_{ij+1kl} = \sum_k^K X_{ijkl} + n_{ijkl}^+ - n_{ijkl}^- \quad \forall i, j \in J_i, l \quad (4.21)$$

$$n_{ijl}^+ \leq \text{BigM} 2 * \delta_{ijl} \quad \forall i, j, l \quad (4.22)$$

$$n_{ijl}^- \leq \text{BigM} 2 * (1 - \delta_{ijl}) \quad \forall i, j, l \quad (4.23)$$

Yukarıda belirtilen üç kısıt ile modelin amaç fonksiyonu doğrusal hale getirilmiştir. Eş. 4.22 ve Eş. 4.23'te kullanılan BigM 2 parametresi, X_{ijkl} değeri masimum bir değerini alacağından birden büyük bir sayı olarak seçilmesi yeterlidir.

4.3. Örnek Bir Veri Seti İle Çözüm

Bu altbaşlıkta ele alınan problemin, önerilen matematiksel modelin ve elde edilen sonuçların açıklanabilmesi için örnek bir veri seti kullanılmıştır. Bu veri seti Kusiak [Kusiak, 1990] tarafından kullanılmış alternatif rotaların mevcut olduğu parça makina matrisi verileri, Defersha ve Chen [Defersha ve Chen, 2006] ve Norman ve arkadaşlarının [Norman ve ark., 2002] yaptığı iki çalışma referans alınarak, probleme adapte edilmek suretiyle oluşturulmuştur. Çizelge 4.1’de üretim için önceden belirlenmiş parti büyüklükleri, bir birim parçanın hücreler arasındaki taşıma maliyeti, fason olarak imal ettirilmesinin maliyeti ve parçalara ait talep miktarları verilmiştir. Üretim parti büyüklükleri dikkate alınarak yapılmaktadır. Örneğin, 2 numaralı parçanın tahmin edilen ya da belirlenen talebi 3550 birimdir ve üretimi 160 birimlik partiler halinde yapılmaktadır. Bu parçanın hücreler arasında taşınması için 16 birim ve fason imalatla üretilmesi için 30 birim maliyetle karşılaşılmaktadır.

Çizelge 4.1. Üretilcek parçalara ait parti büyüklükleri, hücreler arası taşıma maliyetleri ve talepler

Parça Numarası	Parti Büyüklüğü (B_i)	Hücreler arası taşıma maliyeti (v_i)	Fason imalat maliyeti (Φ_i)	Talep (d_i)
1	140	10	30	3500
2	160	16	30	3550
3	150	15	45	2950
4	100	12	40	3450
5	170	18	55	3560

Çizelge 4.2’de parçaların işlem gereği geçirecekleri operasyonlar ve bu operasyonların gerçekleştirilmesi için gerekli makinalar yer almaktadır. Örneğin, 1 numaralı parçanın üretilmesi için 2 adet operasyondan geçmesi gerekmektedir. Bu operasyonlardan ilki için 1, 2 ve 3 numaralı makinalar, ikincisi için ise yalnızca 2 numaralı makina kullanılabilmektedir. Parçaların makina ihtiyaçları diğer operasyonlar için aynı şekilde açıklanabilir.

Çizelge 4.2. Örnek problem için parçaların operasyonlarının yapılabileceği makinalar

	Operasyon							
	1				2			
Makina	1	2	3	4	1	2	3	4
Parça								
1	1	1	1			1		1
2	1	1					1	
3	1	1						1
4	1						1	1
5	1		1					1

Çizelge 4.3’de parçaların geçireceği operasyonlar için kullanılacak makinalar, bu makinalarda harcayacakları zaman ve bu makinanın kullanılmasından kaynaklanan hazırlık maliyeti yer almaktadır. Buna göre; Çizelge 4.3’te gösterilen üçlü veri setlerinde 1 numaralı parçanın ilk operasyonunun; 1 numaralı makina işlem yapılırsa 5 birim zamanda ve başlangıçta 15 birim hazırlık maliyetiyle yapılacağı, 2 numaralı makina işlem yapılırsa 8 birim zamanda ve başlangıçta 8 birim hazırlık maliyetiyle yapılacağı ve 3 numaralı makina işlem yapılırsa 6 birim zamanda başlangıçta 10 birim hazırlık maliyetiyle yapılacağı anlaşılmaktadır.

Çizelge 4.3. Örnek problem için operasyonların yapılabileceği makinalar işlem zamanları ve hazırlık maliyetleri (makina, zaman, hazırlık maliyeti)

Parça	i parçasının j operasyonu için kullanılacak makina, işlem zamanı ve hazırlık maliyeti	
	j=1	j=2
1	(1, 5, 15)	(2, 6, 16)
	(2, 8, 8)	(4, 7, 15)
	(3, 6, 10)	
2	(1, 6, 8)	(3, 9, 11)
	(2, 5, 10)	
3	(1, 5, 18)	(4, 8, 15)
	(2, 7, 12)	
4	(1, 5, 9)	(3, 18, 18)
		(4, 10, 22)
5	(1, 15, 8)	(4, 8, 9)
	(3, 8, 14)	

Çizelge 4.4’te üretim sisteminin tasarımı sonucunda alımı yapılacak olan makinaların satın alma, operasyon maliyetleri ve makinaların kapasiteleri bulunmaktadır. Bu çizelgeye göre örneğin; 1 numaralı makina tipine ait dönemlik (yıllık, sezonluk, 10 yıllık, vb.) kapasite 600 zaman birimi ve bu makinanın satın alma maliyeti 11850

para birimidir. Yine 1 numaralı makinanın bir zaman birimi çalışması için işletmeye maliyeti 10 para birimidir. Diğer makinalar için gerekli zaman ve maliyetler Çizelge 4.4'te yer almaktadır.

Çizelge 4.4. İşletmedeki makinalara ait bakım maliyeti, makina kapasiteleri ve makina alım maliyetleri

Makina Tipi	Operasyon Maliyeti (O_k)	Makina Kapasitesi (C_k)	Makina Alım Maliyeti (P_k)
1	1	600	11850
2	3	500	10780
3	1	300	10955
4	4	200	11715

Çizelge 4.5'te modellemede kurulacak olan hücrelerin sayısı 2 olarak belirlenmiştir. Ayrıca oluşturulacak her bir hücre için alt ve üst sınırlar makina olarak ifade edilmiştir. Buna göre, bir hücreye en az 2 en çok 5 makine yerleştirilmesine izin verilmektedir. Üretim sistemlerinde kimyasal ve fiziksel nedenlerden dolayı aynı hücreye yerleştirilmesi gereken ya da tam tersine yerleştirilmemesi gereken makina çiftleri yer almaktadır. Bu makinalar örnek problem için 1 ve 2 makinalarının aynı hücreye yerleştirilmesine izin vermezken, 2 ve 3 makinalarının aynı hücreye yerleştirilmesi gerektiğini Çizelge 4.5'te görülmektedir. Hücreler arasındaki iş yükü dengesini sağlayacak iş yükü faktörü de modelde 0,90 olarak belirlenmiştir. Buna göre oluşturulacak hücreler atanan iş yükünün eşit olarak paylaşılmasından %10'luk bir sapmayla %90 dengeli dağıtılması hedeflenmiştir. Parti bölünmesine izin verilen maksimum hücre sayısının ise 2 olarak belirlendiği yine Çizelge 4.5'te görülmektedir.

Çizelge 4.5. Modelde kullanılan hücre sayısı, hücre alt ve üst sınırı, farklı makina çiftleri ve iş yükü faktörü

Hücre Sayısı (L)	2
Hücre Alt Sınırı (LB)	2 makina
Hücre Üst Sınırı (UB)	5 makina
Aynı hücreye yerleştirilemeyen makina çiftleri	{1, 2}
Aynı hücreye yerleştirilmesi gereken makina çiftleri	{2, 3}
İş yükü faktörü	0,90
Parti Bölünmesi için izin verilen hücre sayısı (z)	2 hücre

Matematiksel modelde yer alan ve numaralandırılmış olan beceriler bu çizelgeden seçilmiş herhangi 4 teknik ve 2 kişisel beceri olabilir. Çizelge 4.6'da tanımlanan 6 beceri seviyesi için gerekli veriler gösterilmektedir. Örnek problem için veriler, referans alınan matematiksel modellerin geliştirilen yeni modele uyarlanması şeklinde oluşturulmuştur. Örnekte; 6 beceri için belirlenmiş 4 beceri seviyesi bulunmaktadır. Söz konusu becerilerin 4 tanesi teknik 2 tanesi kişisel becerilerdir. Gerekli beceri seviyeleri kesikli düzgün dağılım ile elde edilmektedir. Bu beceri seviyelerine göre operatör maliyetleri ise düzgün dağılım ile 0-1 aralığında bir sayı üretilmesi ve bu sayının 1000 ile çarpılmasıyla elde edilmektedirler. Operatörlerin beceri seviyeleri arttıkça maliyetlerinin de artacağı düşünülse dahi gerçek bir sistemde bu artış her zaman doğrusal da olmayabilir. Örneğin; daha yüksek beceri seviyelerine sahip bir ustanın bir makinada görevlendirilmesi, daha düşük beceri seviyelerine sahip bir mühendisin aynı makinada görevlendirilmesinden daha az maliyetli olabilir. Bu tez çalışması için oluşturulan örnek problemin veri setleri Norman ve arkadaşlarının (2002) referansı doğrultusunda genelde artış gösterecek şekilde oluşturulmuştur. Aşağıdaki Çizelge 4.6'da operatörlerin işe alım maliyetlerinin nasıl üretildiği gösterilmektedir. Örneğin; teknik bir becerinin beceri seviyesinin 0 olduğu durumda o operatörün maliyeti (0,0.3) sürekli düzgün dağılımla üretilmiştir. Teknik beceri seviyesi bir arttığında maliyet (0.15,0.6) aralığında sürekli düzgün dağılıma uygun olarak üretilmiştir.

Çizelge 4.6. Operatör becerilerine ait veriler

Beceri Sayısı π	6
Teknik Beceriler	4
Kişisel Beceriler	2
Beceri Seviyesi Sayısı π_i	4
Gerekli Beceri Seviyesi $NSL_{\pi i}$	DU(0,3) Kesikli Düzgün Dağılım
Her Beceri için Operatör Maliyeti (*1000)	
Teknik Beceri Seviyesi $\pi_i=0$ $SL_{i\pi\pi i}$	U(0.0, 0.3) Düzgün Dağılım
Teknik Beceri Seviyesi $\pi_i=1$ $SL_{i\pi\pi i}$	U(0.15, 0.6) Düzgün Dağılım
Teknik Beceri Seviyesi $\pi_i=2$ $SL_{i\pi\pi i}$	U(0.45, 0.9) Düzgün Dağılım
Teknik Beceri Seviyesi $\pi_i=3$ $SL_{i\pi\pi i}$	U(0.75, 1.0) Düzgün Dağılım
Kişisel Beceri Seviyesi $\pi_i=0$ $SL_{i\pi\pi i}$	U(0.0, 0.3) Düzgün Dağılım
Kişisel Beceri Seviyesi $\pi_i=1$ $SL_{i\pi\pi i}$	U(0.15, 0.6) Düzgün Dağılım
Kişisel Beceri Seviyesi $\pi_i=2$ $SL_{i\pi\pi i}$	U(0.45, 0.9) Düzgün Dağılım
Kişisel Beceri Seviyesi $\pi_i=3$ $SL_{i\pi\pi i}$	U(0.75, 1.0) Düzgün Dağılım

Çözüm

Geliştirilen matematiksel model, yukarıdaki çizelgelerdeki (Çizelge 4.1-Çizelge 4.7) veriler kullanılarak GAMs (General Algebraic Modelling Systems) paket programı ile kodlanmıştır. Örnek problem için Çizelge 4.6'daki rassal veriler yine GAMs koduna dahil edilmiştir. Geliştirilen matematiksel modelin çözümü Pentium 4, 3.4GHz işlemcili 512 MB RAM hafızalı kişisel bilgisayarda 0,47 saniye sürmüş ve amaç fonksiyonunun değeri 646 204 olarak bulunmuştur. Modelin Gams kodu Ek-1'de verilmiştir. Çözümler Çizelge 4.7 ve 4.8'de özetlenmiş ve çözüm için Gams çıktı dosyası Ek-2'de verilmiştir.

Çizelge 4.7'de matematiksel model sonucunda elde edilen optimal çözümdeki parçaların üretim yerleri (hücre, fason imalat), üretildiği makina tipi ve üretim oranları yer almaktadır. Örneğin; 1 numaralı parçanın birinci operasyonu 1 numaralı hücrede 3 tipi makinada 0,045 oranında, 0,914'lük oranı 2 numaralı hücrede 1 numaralı makina tipinde ve kalan 0,051'lik oranı da fason imalatla üretilmektedir. İkinci operasyonunun 0,959'luk oranı 1 numaralı hücredeki 2 numaralı makina tipinde ve geriye kalan 0,051'lik kısmı ise fason imalatla üretilmektedir.

Çizelge 4.7. Model çıktısı sonucu parçaların X_{ijkl} değerleri (üretildiği hücre; makina tipi; üretim oranı)

Parça	i parçasının j operasyonunun yapıldığı hücre ve üretim oranı	
	j=1	j=2
1	C1; M3; 0,045	C1; M2; 0,959
	C2; M1; 0,914	Fason; 0,051
	Fason; 0,051	
2	C2; M1; 1	C1; M3; 1
3	C2; M1; 1	C2; M4; 1
4	C2; M1; 0,461	C2; M3; 0,461
	Fason; 0,539	Fason; 0,539
5	C1; M3; 1	C1; M4; 0,424
		C2; M4; 0,576

Çizelge 4.8'de matematiksel model sonucunda elde edilen hücreler, bu hücrelere hangi tip makinalardan kaç adet atandığı, bu makinalara atanan operatörlerin 6 beceri için beceri seviyeleri yer almaktadır. 1 numaralı makina tipinden 2 numaralı hücreye

1 adet yerleştirilmiştir. Bu makinaı kullanmak üzere 1 operatör atanmıştır. Bu operatörün 1. teknik beceri için beceri seviyesi 0, 2. teknik beceri için beceri seviyesi 3, 3. teknik beceri için beceri seviyesi 2, 4. teknik beceri için beceri seviyesi 1, 5. kişisel beceri için beceri seviyesi 1 ve son olarak 6. kişisel beceri için beceri seviyesi 0'dır. Bu makinaı kullanacak olan operatörün; 1 numaralı teknik becerisi hiç yokken 2 numaralı teknik becerisi en yüksek seviye olan 3 seviyesindedir.

Bu çözüm optimal maliyetli parça makina operatör hücre yapısını temin etmektedir. Bu yapı içerisinde amaç fonksiyonunda yer alan maliyet kalemleri ve bunların toplam maliyete oranları ise aşağıdaki şekilde açıklanabilir:

Parçaların işlem maliyetleri 418 747 para birimi değerindedir ve toplam maliyet içerisindeki oranı % 64,8'dir. Sistem tasarımı için gerekli makina satın alma maliyetleri 90 640 para birimidir ve toplam maliyet içerisindeki oranı % 14'tür. Makinaların hazırlık maliyetleri 2 719 para birimidir ve toplam maliyet içerisindeki oranı % 0,4'tür. Parçaların hücreler arasında taşıma maliyeti 36 195 para birimidir ve toplam maliyet içerisindeki oranı % 5,6'dır. Fason imalat maliyeti 78 676 para birimi ve toplam maliyet içerisindeki oranı % 12,2'dir. Operatörlerin işe alım maliyetleri 19 227 para birimidir ve toplam maliyet içerisindeki oranı % 3'tür.

Çizelge 4.8. Model çıktısı sonucu hücrelere atanan makinalar ve operatörlere ait beceriler

Makina		Hücre		Makina	Operatör
Tip	Adet		Beceri	Gerekli Beceri Seviyesi	Beceri Seviyesi
M1	1	C2	1	0	0
			2	3	3
			3	2	2
			4	1	1
			5	1	1
			6	0	0
M2	1	C1	1	1	1
			2	3	3
			3	0	1
			4	2	2
			5	3	3
			6	2	2

Çizelge 4.9. (Devam) Model çıktısı sonucu hücrelere atanan makinalar ve operatörlere ait beceriler

Makina		Hücre		Makina	Operatör
Tip	Adet		Beceri	Gerekli Beceri Seviyesi	Beceri Seviyesi
M3	3	C1	1	3	3
			2	3	3
			3	0	0
			4	2	2
			5	0	0
			6	1	1
M4	1	C1	1	2	2
	2	C2	2	1	1
			3	1	1
			4	1	1
			5	0	0
			6	0	0

4.4. Modelin Varyasyonları

Geliştirilen matematiksel model, spesifik bir üretim sistemini temel almadığından genel özelliklere sahiptir. Farklı üretim sistemlerinde olası üç farklı varsayım altında modelde yapılması gereken değişiklikler bu başlık altında incelenmiştir.

4.4.1. Parti bölünmesine izin vermeyen model

Ana modelde 5 numaralı varsayım (bölüm 4, altbaşlık 4.1, sayfa 63), “parti büyüklüklerinin bölünmesine izin verilmez” şeklinde değiştirilsin. Bu değişimin

yapılması için Eş. 4.6’daki her i ve $j \in J_i$ için $\sum_{l=1}^L p_{ijl} \leq z$ ifadesindeki $z=1$ ’e eşitlenir.

Böylece parti bölünmesine izin verilmez ve i parçasının j . operasyonunun hücresel imalat sistemi içerisinde yapılıyorsa en fazla bir hücrede yapılmasına izin verilmiş olur. Örnek problem verileri ile parti bölünmesine izin vermeyen model çözüldüğünde, amaç fonksiyonu değeri 646 204’ten 647 407’ye yükselerek 1 203 para birimi artmaktadır. Bu çözüm içerisinde ana model çözümüne göre işlem maliyetleri 45 747 para birimi, makina satın alma maliyetleri 11 715 para birimi hazırlık maliyetleri 116 para birimi ve operatör işe alım maliyetleri 1 716 para birimi

azalmıştır. Buna karşın fason imalat maliyeti artmış ve 134 008 para birimine yükselerek 55 332 para birimi artmıştır. Artan bir diğer maliyet kalemi ise taşıma maliyetleridir. Taşıma maliyetleri ana modeldeki taşıma maliyetinden 5 166 para birimi fazlalaşmış ve 41 361 para birimi olmuştur. Çözüm zamanı ise değişikliğe uğramamıştır.

Örnek problemin parti bölünmezine izin vermeyen model ile çözümü ile elde edilen X_{ijkl} değerleri, parçaların hangi hücrelerde ve hangi makinalarda üretildiği Çizelge 4.9’da gösterilmiştir.

Çizelge 4.10. Parti bölünmesine izin vermeyen model çıktısı sonucu parçaların X_{ijkl} değerleri (üretildiği hücre; makina tipi; üretim oranı)

Parça	i parçasının j operasyonunun yapıldığı hücre ve üretim oranı	
	j=1	j=2
1	C1; M1; 1	C2; M2; 1
2	C1; M1; 1	C2; M3; 1
3	C1; M1; 0,760	C1; M4; 0,760
	Fason; 0,240	Fason; 0,240
4	C1; M1; 0,579	C2; M3; 0,579
	Fason; 0,421	Fason; 0,421
5	C2; M3; 0,775	C1; M4; 0,775
	Fason; 0,225	Fason; 0,225

Örneğin; 3 numaralı parçanın birinci operasyonu 1. hücrede ve 1. tip makinada 0,760 oranında ve geriye kalan 0,240’lık kısım ise fason imalatla üretilmekte, ikinci operasyonu 1 numaralı hücrede ve 4. tip makinada 0,760 oranında ve geriye kalan 0,240’lık kısım fason imalatla üretilmektedir.

Modelin parti bölünmesine izin vermemesiyle parçaların operasyonlarının gerçekleştiği hücreler ve üretim oranları değişmektedir. Buna göre 1. tip makinadan 1. hücreye 1 adet, 2. tip makinadan 2. hücreye 1 adet, 3. tip makinadan 2. hücreye 4 adet ve 4. tip makinadan 1. hücreye 3 adet alınmamış ve hücrelerin tasarımı Çizelge 4.10’da gösterildiği gibi oluşmuştur.

Çizelge 4.11. Parti bölünmesine izin vermeyen model çıktısı sonucu hücrelere atanan makinalar ve operatörlere ait beceriler

Makina		Hücre		Makina	Operatör
Tip	Adet		Beceri	Gerekli Beceri Seviyesi	Beceri Seviyesi
M1	1	C1	1	0	0
			2	3	3
			3	2	2
			4	1	1
			5	1	1
			6	0	0
M2	1	C2	1	1	1
			2	3	3
			3	0	1
			4	2	2
			5	3	3
			6	2	2
M3	3	C2	1	3	3
			2	3	3
			3	0	0
			4	2	2
			5	0	0
			6	1	1
M4	2	C1	1	2	2
			2	1	1
			3	1	1
			4	1	1
			5	0	0
			6	0	0

Çizelge 4.10’da bu makinaları kullanacak operatörler için gerekli beceri seviyeleri ve operatörlerin beceri seviyeleri yer almaktadır. Çizelgeden de görüleceği gibi hücrelerin yapısı, yerleştirilen makinalar ve parçaların işlenme oranları ana model sonucundan farklıdır. Parti bölünmesine izin verilmemesiyle hazırlık, işlem, makina satın alma ve operatör işe alma maliyetlerinde bir azalış olurken fason imalat ve hücreler arası taşıma maliyetlerinde bir artış gerçekleşmiştir. Maliyetlerdeki artış azalışlardan daha büyük olduğundan toplam maliyette bir artış söz konusudur.

Parti bölünmesine izin verilememesi durumunda, örnek veri seti ile oluşturulan problemin sonucuna göre, toplam maliyette bir artış gözlenmiştir. Her ne kadar bu problem için hazırlık maliyetlerinin toplam maliyet içerisindeki payı küçük olsa da, hücre oluşturma probleminin çözümünün hemen ardından gelen çizelgeleme probleminin çözümü için hazırlık zaman ve maliyetlerinin azalmış olması çok önemlidir.

4.4.2. Dış kaynak kullanımına (fason imalata) izin vermeyen model

Ana modeldeki 4 numaralı varsayım (bölüm 4, altbaşlık 4.1, sayfa 63), “fason imalata izin verilmez” olarak değiştirilsin. Dış kaynak kullanımına yani fason imalata izin veren sistemler için tasarlanmış olan ana matematiksel modelde, bir dışarıda yaptırma maliyeti tanımlanmış ve üretim sistemi tasarlanırken, eğer bir parçanın üretimi dışarıda daha az maliyetle gerçekleştirilebiliyorsa fason olarak imal ettirilmesi kararı verilmesi sağlanmıştır. Bu modele göre, fason imalat yaptırılacak başka üretim sistemleri olduğu ve bunlara ait maliyetlerin belirlenebildiği varsayımı söz konusudur. Varsayımın değiştirilmesi için ana modelde aşağıdaki değişiklikler yapılmalıdır:

Fason imalat için tanımlanan değişken hiç tanımlamayarak ana modeldeki Eş. 4.2’yi aşağıdaki Eş. 4.24 ile değiştirilmeli ve amaç fonksiyonunda yer alan

$\sum_i^n \sum_j^{J_i} \bar{X}_{ij} * d_i * \Phi_i$ terimini amaç fonksiyonundan çıkarılmalıdır.

$$\sum_k^K \sum_l^L d_i * X_{ijkl} = d_{ij} \quad \forall i, j \in J_i \quad (4.24)$$

Yapılan tez çalışmasında ele alınan örnek veriler, fason imalata izin vermeyen model için değişiklikler yapıldıktan sonra çözüldüğünde 653 411 amaç fonksiyonu değeri elde edilmektedir. Bu sonuca 0,56 saniye zamanda, ana model amaç fonksiyonu 7 207 para birimi maliyet artışıyla ulaşılmaktadır. İşlem maliyeti 485 084 para birimine, hazırlık maliyeti 3 242 para birimine yükselerek toplamda 66 860 para birimi artmıştır. Bu maliyet artışlarının yanı sıra makina satın alma maliyeti 10 955 para birimi, taşıma maliyeti 5 166 para birimi ve operatör işe alım maliyeti 2 793 para birimi artış göstermiştir.

Örnek problemin dış kaynak kullanımına izin vermeyen model ile çözümü ile elde edilen X_{ijkl} değerleri, parçaların hangi hücrelerde ve hangi makinalarda üretildiği Çizelge 4.11’de gösterilmiştir. Örneğin; 1 numaralı parçanın birinci operasyonu

0,608 oranında 2. hücrede ve 1. tip makinada geriye kalan 0,392'lik oranı 1. hücrede ve 3. tip makinada, ikinci operasyonun tamamı ise 1 numaralı hücrede ve 2. tip makinada yapılmaktadır. 3 numaralı parçanın birinci operasyonun tamamı 2 numaralı hücrede 1. tip makinada, ikinci operasyonunun tamamı yine 2 numaralı hücrede ve 4. tip makinada üretilmektedir.

Çizelge 4.12. Dış kaynak kullanımına izin vermeyen model çıktısı sonucu parçaların X_{ijkl} değerleri (üretildiği hücre; makina tipi; üretim oranı)

Parça	i parçasının j operasyonunun yapıldığı hücre ve üretim oranı	
	j=1	j=2
1	C2; M1; 0,608	C1; M2; 1
	C1; M3; 0,392	
2	C2; M1; 0,815	C1; M3; 1
	C1; M2; 0,185	
3	C2; M1; 1	C2; M4; 1
4	C1; M1; 1	C1; M3; 0,827
		C2; M4; 0,173
5	C1; M3; 1	C2; M4; 1

Modelin dış kaynak kullanımına izin vermemesiyle parçalar, parçaların operasyonlarının gerçekleştiği hücreler ve bu hücreye atanan tamamen değişmektedir. Buna göre 1. tip makinadan 2. hücreye 1 adet; 2. tip makinadan 1. hücreye 1 adet, 3. tip makinadan 1. hücreye 2 adet ve 4. tip makinadan 1. hücreye 2 adet 2. hücreye 3 adet yerleştirilmiştir. Hücrelerin tasarımı Çizelge 4.12'de gösterildiği gibi oluşmuştur. Ayrıca Çizelge 4.12'de bu makinaları kullanacak operatörler için gerekli beceri seviyeleri ve operatörlerin beceri seviyeleri yer almaktadır. Çizelge 4.12'ye göre, M1 makinasından 1 adet C2 hücresine yerleştirilmiş ve M1 makinasını kullanmak üzere 1. beceri seviyesi 0, 2. beceri seviyesi 3, 3. beceri seviyesi 2, 4. beceri seviyesi 1, 5. beceri seviyesi 1 ve son beceri seviyesi 0 olan bir operatör atanmıştır. Aynı şekilde; M2 makinasından 1 adet C1 hücresine yerleştirilmiş ve M2 makinasını kullanmak üzere 1. beceri seviyesi 1, 2. beceri seviyesi 3, 3. beceri seviyesi 1, 4. beceri seviyesi 2, 5. beceri seviyesi 3 ve son beceri seviyesi 2 olan bir operatör atanmıştır. Aynı yorumlar M3 ve M4 makinaları için de Çizelge 4.12 kullanılarak yapılabilir.

Çizelge 4.13. Dış kaynak kullanımına izin vermeyen model çıktısı sonucu hücrelere atanan makinalar ve operatörlere ait beceriler

Makina		Hücre		Makina	Operatör
Tip	Adet		Beceri	Gerekli Beceri Seviyesi	Beceri Seviyesi
M1	1	C2	1	0	0
			2	3	3
			3	2	2
			4	1	1
			5	1	1
			6	0	0
M2	1	C1	1	1	1
			2	3	3
			3	0	1
			4	2	2
			5	3	3
			6	2	2
M3	4	C1	1	3	3
			2	3	3
			3	0	0
			4	2	2
			5	0	0
			6	1	1
M4	3	C2	1	2	2
			2	1	1
			3	1	1
			4	1	1
			5	0	0
			6	0	0

Önerilen matematiksel modelin kullanılacağı kimi işletmelerde, belirli kalite standardizasyonları mevcuttur. Bu tip işletmelerde, fason imalat ile mevcut kalite standartlarının sağlanamadığı durumlar söz konusu olabilir. Toplam maliyetlerde gözlemlenen artışın, ortaya çıkması mümkün kalitesizlik maliyetlerinden düşük olduğu durumlarda işletmeler fason imalata izin vermeyen bir matematiksel model gereksinimi duyabilirler. İşte böyle bir durumda dış kaynak kullanımına izin vermeyen bu model varyasyonunun oldukça yararlı olması muhtemeldir.

4.4.3. Alternatif rotalara izin vermeyen model

Ana modeldeki 2 numaralı varsayım (bölüm 4, altbaşlık 4.1, sayfa 63), “alternatif rotalara izin verilmez” şeklinde değiştirilsin. Geliştirilen ana matematiksel modelin temel karakteristiklerinden biri alternatif rotaları dikkate almasıdır. Tasarlanacak

olan hücresel imalat sisteminde alternatif rotalara izin verilmiyorsa model de değişiklik gösterecektir.

Bu durumda; X_{2ijk} olarak yeni bir 0-1 değişken tanımlansın. X_{2ijk} değişkeni ile alternatif rotalardan yalnız birinin seçilerek bir tip makinada üretimin gerçekleşmesi sağlanması hedeflenmiştir. Bunun için ana modele aşağıdaki kısıt çiftinin de eklenmesi gerekir.

$$\sum_l X_{ijkl} \leq \text{BigM2} * X_{2ijk} \quad \forall i, j \in J_i, k \quad (4.25)$$

$$\sum_l X_{ijkl} \leq \text{BigM2} * (1 - X_{2ijk}) \quad \forall i, j \in J_i, k \quad (4.26)$$

Böylece alternatif rotalardan birinin seçimi sağlanmış olur.

Yapılan çalışmada ele alınan örnek veriler alternatif rotalara izin vermeyen bu model değişiklikleri yapıldıktan sonra çözüldüğünde 646 304 amaç fonksiyonu değeri elde edilmektedir. Bu sonuca 0,57 saniye zamanda, ana model amaç fonksiyonu 100 para birimi artarak ulaşılmıştır. İşlem maliyetleri 3 777 para birimi, hazırlık maliyetleri 27 para birimi ve taşıma maliyetleri 292 para birimi azalmıştır. Buna karşın makina satın alma ve operatör işe alma maliyetleri ana modelin çözümüne göre değişmezken fason imalat maliyetleri 4 196 para birimi artış göstermiştir.

Çizelge 4.13’de matematiksel modelin rotalara izin vermemesiyle elde edilen optimal çözümdeki parçaların üretim yerleri (hücre, fason imalat), üretildiği makina tipi ve üretim oranları yer almaktadır. Örneğin; 4 numaralı parçanın birinci operasyonu 2 numaralı hücrede 1. tip makinada 0,476 oranında ve kalan 0,524’lük oranı da fason imalatla üretilmektedir. İkinci operasyonunun 0,476’lık oranı 1 numaralı hücredeki 3 numaralı makina tipinde, 0,524’lük oranı ise fason imalatla üretilmektedir. 5 numaralı parçanın ise ilk operasyonunun tamamı 1 numaralı hücrede 3. tip makinada, ikinci operasyonunun 0,444’lük oranı 1. hücredeki 4. tip makinada üretilirken geriye kalan 0,556’lık oranı 2. hücredeki 4. tip makinada üretilmektedir. Görüldüğü gibi aynı operasyonu yapabilen birden çok makina tipi

olmasına karşın, model sonucunda parçaların operasyonlarının yapılması için bir tip makinanın seçimi ile tek bir rota elde edilmiştir.

Modelin alternatif parçalar, parçaların operasyonlarının gerçekleştiği hücreler ve bu hücreye atanan makinalar tamamen değişmektedir. Buna göre 1. tip makinadan 2. hücreye bir adet, 2. tip makinadan 1. hücreye 1 adet, 3. tip makinadan 1. hücreye 3 adet ve 4. tip makinadan 1. hücreye 1 adet 2. hücreye 2 adet yerleştirilmiştir. Hücrelerin tasarımı Çizelge 4.14’te gösterildiği gibi oluşmuştur. Ayrıca Çizelge 4.14’de bu makinaları kullanacak operatörler için gerekli beceri seviyeleri ve operatörlerin beceri seviyeleri yer almaktadır.

Çizelge 4.14. Alternatif rotalara izin vermeyen model çıktısı sonucu parçaların X_{ijkl} değerleri (üretildiği hücre; makina tipi; üretim oranı)

Parça	i parçasının j operasyonunun yapıldığı hücre ve üretim oranı	
	j=1	j=2
1	C2; M1; 0,899	C1; M2; 0,899
	Fason; 0,101	Fason; 0,101
2	C2; M1; 1	C1; M3; 1
3	C2; M1; 1	C2; M4; 1
4	C2; M1; 0,476	C1; M3; 0,476
	Fason; 0,524	Fason; 0,524
5	C1; M3; 1	C1; M4; 0,444
		C2; M4; 0,556

Çizelge 4.15. Alternatif rotalara izin vermeyen model çıktısı sonucu hücrelere atanan makinalar ve operatörlere ait beceriler

Makina		Hücre		Makina	Operatör
Tip	Adet		Beceri	Gerekli Beceri Seviyesi	Beceri Seviyesi
M1	1	C2	1	0	0
			2	3	3
			3	2	2
			4	1	1
			5	1	1
			6	0	0
M2	1	C1	1	1	1
			2	3	3
			3	0	1
			4	2	2
			5	3	3
			6	2	2

Çizelge 4.16. (Devam) Alternatif rotalara izin vermeyen model çıktısı sonucu hücrelere atanan makinalar ve operatörlere ait beceriler

Makina		Hücre		Makina	Operatör
Tip	Adet		Beceri	Gerekli Beceri Seviyesi	Beceri Seviyesi
M3	3	C1	1	3	3
			2	3	3
			3	0	0
			4	2	2
			5	0	0
			6	1	1
M4	1	C1	1	2	2
	2	C2	2	1	1
			3	1	1
			4	1	1
			5	0	0
			6	0	0

Hücre oluşturma probleminin hemen ardından gelmesi beklenen bir diğer önemli problem olan çizelgeleme problemlerinin çözümünde alternatif rotalara izin verilmesi, çizelgeleme problemlerinin daha da karmaşıklaşmasına neden olabilir. Alternatif rotalara izin verilmesi nedeniyle, operasyonların birden farklı makinada üretilmesine sonucu ortaya çıktığından çizelgeleme çabaları artabilir. Çizelgeleme problemlerinin daha kolay çözülebilmesi istenen sistemler için alternatif rotalardan birinin matematiksel model yardımıyla çözülebildiği bu varyasyon etkin bir araç olabilir.

5. MODELİN PERFORMANS ETKİNLİĞİ

Bu bölümde ana modelin performans etkinliğinin problem boyutuna göre araştırılması ve alternatif rotalara izin veren ve fason imalata izin vermeyen model için ARG etkinliğinin hesaplanmasına yer verilmiştir.

5.1. Modelin Rassal Veri Setlerine Sahip Problemlere Uygulanması

Ana modelin rassal veri setlerine sahip problemlere uygulanması sonucu elde edilen çözümlerin, çözüm zamanları, iterasyon sayıları ve düğüm sayıları araştırılmıştır. Modelin rassal veri setlerine uygulanmasının nedeni daha önce literatürde yer almayan bir problemin bu çalışmada ele alınması ve probleme uygun veri kümelerinin diğer çalışmalardan elde edilememesidir. Bu nedenle problemin çözüm performansının değerlendirilmesini amaçlayan veri setleri Visual Basic kullanılarak rassal olarak üretilmiş ve GAMs kodları oluşturulmuştur. Rassal veri setleri için Defersha ve Chen [Defersha ve Chen, 2006] ve Norman ve arkadaşlarının [Norman ve ark., 2002] yaptığı çalışmadaki veriler temel alınmıştır. Üretilen problemlerin parça, operasyon, makina ve hücre sayısı ve bu büyüklükteki problemlerin çözüm zamanları, iterasyon sayıları, düğüm sayıları Çizelge 5.1’de gösterilmektedir. Problemlerin oluşturulması için kullanılan Visual Basic Pseudo kodu Ek-3’de verilmiştir. Verilerin oluşturulması için bu kod kullanılmış ve elde edilen veriler Gams ile çözülmüştür.

Çizelge 5.1’de görüldüğü gibi parça, operasyon, makina ve hücre sayısı arttıkça çözüm zamanı, çözüm için gerekli düğüm ve iterasyon sayısı da artmaktadır.

Matematiksel modelin çözüm etkinliğinin değerlendirilebilmesi için amaç fonksiyonunun değerinin yanı sıra kullanılabilecek tek ölçüt alternatif rota gruplama etkinliğidir. Alternatif rota gruplama etkinliğinin hesaplanabilmesi için ise modelin varyasyonlarından olan alternatif rotaların dikkate alındığı, parti bölünümüne ve dış kaynak kullanımına izin verilmeyen durumda modelde yapılacak değişiklikler beraberce yapılarak bir çözüm elde edilmesi gerekmektedir. Alternatif rotaları

dikkate alan ancak parti bölünmesine ve dış kaynak kullanımına izin vermeyen model sonucunda elde edilen parça makine matrisi model sonuçları için alternatif rota etkinliği hesaplanabilmektedir. Örnek problemdeki veriler kullanılarak modelin çözümü ile Çizelge 5.2 veri matrisi kullanılır. Daha sonra; matematiksel modelde gerekli değişikliklerin yapılması ile elde edilen sonuç matrisi Çizelge 5.3'deki gösterilmiştir. Çizelge 5.2'deki parçaların her biri için alternatif rotalardan biri seçilmiştir. Böylece alternatif rota gruplama etkinliği hesaplamada kullanılacak iki matris de elde edilmiştir.

Çizelge 5.1. Modelin performans etkinliği için üretilen problem boyutları ve çözüm parametreleri

Problem				Çözüm		
Parça	Operasyon	Makina	Hücre	İterasyon Sayısı	Düğüm Sayısı	Çözüm Zamanı (sn)
5	5	6	2	487	6	0,47
8	6	6	2	1335	44	0,59
10	6	7	2	1554	61	0,67
12	8	8	2	2481	84	0,79
15	7	8	2	7120	256	1,30
25	8	8	3	128449	2282	33,95

Çizelge 5.2. Alternatif rota etkinliği η_{ARG} hesaplama için gerekli parça makina matrisi

Parçalar	1					2	3	4	5				
	Rotalar												
Makinalar	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	1	1	1			1		1		1	1	1	
2	1		1	1			1		1				
3				1	1	1	1			1			1
4		1			1			1	1		1	1	1

Çizelge 5.3. Alternatif rota etkinliği η_{ARG} hesaplama için sonuç parça makina matrisi

Makinalar	Rotalar				
	4	7	8	11	12
2	1	1			
3	1	1			
1			1	1	1
4			1	1	1

Elde edilen çözüm verilerine göre η_{ARG} etkinliği aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\eta_{ARG} = \frac{\left(1 - \frac{e_o}{e}\right)}{\left(1 + \frac{e_o}{e}\right)} * \frac{\left(1 - \frac{e_v}{o}\right)}{\left(1 + \frac{e_v}{o}\right)} = \frac{\left(1 - \frac{0}{25}\right)}{\left(1 + \frac{0}{25}\right)} * \frac{\left(1 - \frac{0}{27}\right)}{\left(1 + \frac{0}{27}\right)} = 1 \quad (5.1)$$

Sonuç olarak etkinlik 1 elde edilmiştir ve alternatif rotaların varlığında, parti bölünmesine izin verilmeyen durum için matematiksel modelin η_{ARG} etkinliğine göre örnek problem için çok iyi sonuç verdiği görülmektedir.

6. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Son yıllarda işletmelerin müşteri ihtiyaçlarını daha hızlı saptamaları ve bu ihtiyaçlara en iyi şekilde cevap vermeleri için ürün çeşitliliklerini artırırken aynı zamanda verimliliklerini koruyarak maliyetlerini düşük seviyelerde tutmaları gerekmektedir. İşte böyle bir ortamda, işletmeler; verimlilik ve rekabet hedeflerine ulaşmak için artan ürün çeşitliliğine rağmen hedeflerine ulaşmalarını sağlamakta kullanabilecekleri bir araç olan Hücresel İmalatı tercih etmektedirler.

Başarılı bir hücresel imalat sistemi uygulaması için imalat hücrelerine ait dikkate alınması gereken dört temel unsur; insan, ekipman, malzeme ve operasyon kurallarıdır. Literatürdeki çalışmaların genellikle bu unsurlardan son üçü üzerinde yoğunlaştığı gözlenmiştir. Oysa imalat hücrelerinin oluşturulmasında bu üç unsurun yanı sıra; imalat sistemlerinin vazgeçilmezi olan insan unsuru, ekipman kullanımına yönelik “teknik beceriler” ve takım çalışmasına uyum, problem çözebilme, karar verebilme yeteneği v.b. şekilde detaylandırılacak “kişisel beceriler” ile bu becerilere bağlı maliyetler de dikkate alınmalıdır.

Literatürde hücre oluşturma ve operatör atama konularında yapılmış çalışmalar olmasına rağmen; parça, makina, operatör hücrelerini eşzamanlı olarak oluşturan ve parçaların talepleri, operasyon ihtiyaçları, bu operasyonların gerçekleştirilebildiği farklı makinaların varlığı ile alternatif rotaları dikkate alan, makinaların kullanımı için gerekli teknik ve kişisel becerilerin ve bu becerilerin belirli bir düzeyinde olmasının operatör işe alım maliyetlerini etkilediği bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu çalışmada; literatürdeki bu açığı kapatmaya çalışan, hücresel imalat sistemlerinde hücre oluşturma probleminin çözümü için geliştirilmiş çok amaçlı bir matematiksel model önerilmiştir. Modelin çözülmesiyle birlikte parçaların işlenmesi, hücreler arası taşınması maliyetleri, makinaların satın alma, hazırlık maliyetleri, fason imalat ve operatör işe alım maliyetlerinin toplamı minimize edilmeye çalışılmıştır.

Model örnek bir problem için GAMs programı ile çözülmüştür. Matematiksel model üzerinde yapılacak değişikliklerle modelin; parti bölünümüne izin vermeyen, dış

kaynak kullanımına izin vermeyen ve alternatif rotaların söz konusu olmadığı varyasyonları geliştirilmiştir. Matematiksel model için Visual Basic programlama dili kullanılarak değişik boyutlarda test problemleri üretilmiş ve modelin düşük, orta ve büyük, boyutlu problemlerin çözüm performansının belirlenebilmesi amacıyla farklı parça, operasyon, makina, operatör hücre sayılarında oluşturduğu hücreler, bu hücrelerin oluşturulması için gerekli zaman, iterasyon sayısı ve düğüm sayısı incelenmiştir.

Önerilen model 0-1 karışık tamsayılı bir matematiksel programlama modelidir. Bu nedenle, test problemlerinde de çözümünde de gözlendiği üzere, problem boyutunun artmasıyla birlikte çözüm zamanları, düğüm sayısı ve iterasyon sayılarında artış gözlenmektedir. Fakat test edilen boyutlar göstermiştir ki; önerilen model küçük ve orta ölçekli problemler için etkin bir çözüm aracı olmaya adaydır.

Daha büyük boyutlu problemler için önerilen matematiksel modeli temel alan modern bir sezgisel yaklaşım geliştirilmesi geleceğe yönelik bir çalışma olabilir. Ayrıca insan unsuruna ait özelliklerin bulanık olduğu durum için yapılacak bir çalışma geleceğe yönelik olarak önerilebilir.

KAYNAKLAR

Adenso-Diaz, B., Lozano, S., Racero, J. Ve Guarrero, F., Machine cell formation in generalized group technology” , **Computers and Industrial Engineering**, 41: 227-240 (2001).

Adil, G. K., Rajamani, D. Ve Strong, D., “Cell formation considering alternative routings” , **International Journal of Production Research**, 34: 1361-1380 (1996).

Akturk, M. S. Ve Balköse, H. O., “Part-machine grouping using a multi-objective cluster analysis” , **International Journal of Production Research**, 34: 2299-2315 (1996).

Akturk, M. S. Ve Turkcan, A., “Cellular manufacturing system design using holonistic approach” , **International Journal of Production Research**, 38 (10): 2327-2347 (2000).

Ameli, M. S. J. Ve Arkat, J., “Cell formation with alternative process routings and machine reliability consideration” , **International Journal of Advance Manufacturing Technology**, 35: 761-768 (2008).

Arıkan, F., “Bulanık hedef programlama’nın çok amaçlı proje şebekesi problemine uygulanması” , Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 22-24 (1996).

Arıkan, F., “Hücreli imalat sistemlerinin tasarımı için bulanık çok amaçlı matematiksel programlama modeli ve çözüm yaklaşımı” , Doktora Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 40-43 (2002).

Arkat, J., Saidi, M. Ve Abbasi, B., “Applying simulated annealing to cellular manufacturing system design”, **International Journal of Advance Manufacturing Technology**, 32: 531-536, (2007).

Askin, R.G. Ve Huang, Y., “Employee training and assignment for facility reconfiguration” , **Proceedings of the 6th Industrial Engineering Research Conference**, Miami, FL., 426-431 (1997).

Askin, R. G. Ve Huang, Y., “Forming effective worker teams for cellular manufacturing” , **International Journal of Production Research**, 39 (11): 2431-2451 (2001).

Askin, R. G., Selim, H. M. Ve Vakharia, A. J., “A Methodology for designing flexible cellular manufacturing systems” , **IIE Transactions**, 29: 599-610 (1997).

- Baykasoglu, A. Ve Gindy, N. N. Z., “MOCACEF 1.0: Multiple Objective Capability Based Approach to form part-machine groups for cellular manufacturing applications” , ***International Journal of Production Research***, 38 (5): 1133-1161 (2000).
- Bhide, P., Bhandwale, A. Ve Kesavadas, T., “Cell formation using multiple process plans” , ***Journal of Intelligent Manufacturing***, 16: 53-65 (2005).
- Bidanda, B., Ariyawongrat, P., Needy, K. L., Norman, B. A. Ve Tharmmaphornphilas, W., “Human related issues in manufacturing cell design, implementation, and operation: A review and survey” , ***Computers and Industrial Engineering***, 48: 507-523 (2005).
- Billionet, A., “Integer programming to schedule a hierarchical workforce with variable demands” , ***European Journal of Operations Research***, 114: 105-114 (1999).
- Boctor, F. F., “The minimum cost, machine-part cell formation problem” , ***Ibid***, 34: 1045-1063 (1996).
- Borkhorst, J. Ve Slomp, J., “Long-term allocation of operators to machines in manufacturing cells” , ***Proceeding of the Group Technology/Cellular Manufacturing World Symposium***, San Juan, Puerto Rico, 153-158 (2000).
- Carnahan, B. J., Redfern, M. S. Ve Norman, B. A., “Incorporating physical demand into assembly line balancing”, ***IIE Transactions***, 33 (10): 87-887 (2001).
- Caux, C., Bruniaux, R. Ve Pierreval, H., “Cell formation with alternative process plans and capacity constraints: A new combined approach” , ***International Journal of Production Economics***, 64: 279-284 (2000).
- Chu, C. H., “Cluster analysis in manufacturing cellular formation” , ***International Journal of Management Science***, 17: 289-295 (1989).
- Chung, C. “Human issues in technology implementation-part 1” , ***Industrial Management***, 37 (4): 22-27 (1996).
- Cohon, J. L., “Multiobjective Programming and Planning”, ***Academic Pres Inc.***, New York, 21-29 (1978).
- Crama, Y. Ve Oosten, M., “Models for machine-part grouping in cellular manufacturing” , ***International Journal of Production Research***, 34 (6): 1693-1713 (1996).
- Dahel, N. E., Ve Smith, S. B., “Designing flexibility into cellular manufacturing systems” , ***International Journal of Production Research***, 31: 933-945 (1993).

Das, K., Lashkari, R. S. Ve Sengupta, S., “Reliability consideration in the design and analysis of cellular manufacturing systems” , ***International Journal of Production Economics***, 105: 243-262 (2007).

Defersha F. M. Ve Chen, M., “A Comprehensive mathematical model for the design of cellular manufacturing systems” , ***International Journal of Production Economics***, 103: 767-783 (2006).

Diallo, M., Pierreval, H. Ve Quilliot, A., “Manufacturing cell design with flexible routing capability in presence of unreliable machines” , ***International Journal of Production Economics***, 74: 175-182 (2001).

Eckstein, A. L. H. Ve Rohleder, T. R. “Incorporating human resources in group technology/cellular manufacturing” , ***International Journal of Production Research***, 36 (5): 1199-1222 (1998).

Fitzpatrick, E. L. Ve Askin, R. G., “Forming effective worker teams with multi-functional skill requirements” , ***Computers and Industrial Engineering***, 48: 593-608 (2005).

Gupta, Y, Gupta, M., Kumar, A. Ve Sundaram, C., “A genetic algorithm-based approach to cell composition and layout design problems” , ***International Journal of Production Research***, 34, 447-482 (1996).

Gupta, Y. P., Gupta, M. C., Kumar, A. Ve Sundaram, C., “Minimizing total intercell and intracell moves in cellular manufacturing: a genetic algorithm approach” , ***International Journal of Computer Integrated Manufacturing***, 8: 92-101 (1995).

Heragu, S. S., “Group technology and cellular manufacturing” , ***IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics***, 24 (20): 203-214 (1994).

Ho, Y. C. Ve Moodie, C. L., “Solving cell formation problems in a manufacturing environment with flexible processing and routing capabilities” , ***International Journal of Production Research***, 34: 2901-2923 (1996).

Hopp, W. J. Ve VanOyen, M. P., “Agile workforce evaluation: A framework for crosstraining and coordination” , ***NSF Design and Manufacturing Grantees Conference***, Tampa, FL., 21-53 (2001).

Hu, L. Ve Yasuda, K., “Minimizing material handling cost in cell formation with alternative process routes by grouping genetic algorithm” , ***International Journal of Production Research***, 44 (11): 2133-2167 (2006).

Hyer, N. L. Ve Wemmerlöv, U., “Group technology oriented coding systems: structures, applications and implementation” , ***Production and Inventory Management***, 26: 55-78 (1985).

Jacobs, F. R. Ve Bragg, D. J., “Repetitive lots: flow time reduction through sequencing and dynamic batch sizing” , ***Decision Sciences***, 19: 281-294 (1996).

Jayaswal, S. Ve Adil, G. K., “Efficient algorithm for cell formation with sequence data, machine replications and alternative process routings” , ***International Journal of Production Research***, 42 (12): 2419-2433 (2004).

Jeon, G., Broering, M., Leep, H. R., Parsaei, H. R. Ve Wong, J. P., “Part family formation based on alternative routes during machine failure” , ***Computers and Industrial Engineering***, 35 (1-2): 73-76 (1998).

Jeon, G. Ve Leep, H. R., “Forming part families by using genetic algorithm and designing machine cells under demand changes” , ***Computers and Operations Research***, 33: 263-283 (2006).

Jeon, G., Leep, H. R. Ve Parsaei, H. R., “A Cellular manufacturing system based on new similarity coefficient which considers alternative routes during machine failure” , ***Computers and Industrial Engineering***, 34 (1): 21-36 (1998).

Juran, D. C. Ve Schruben, L. W., “Using worker personality and demographic information to improve system performance prediction” , ***Journal of Operations Management***, 22: 355-367 (2004).

Kim, C. O., Back, J. G. Ve Baek, J. K., “A Two-phase heuristic algorithm for cell formation problems considering alternative part routes and machine sequences” , ***International Journal of Production Research***, 42 (18): 3911-3927 (2004).

Kim, C. O., Back, J. G. Ve Jun, J., “A Machine cell formation algorithm for simultaneously minimising machine workload imbalances and inter-cell part movements” , ***International Journal of Advance Manufacturing Technology***, 26: 268-275 (2005).

King, J. R. Ve Nakornchai, V., “A machine-component group formation in group technology: A review and extension” , ***International Journal of Production Research***, 20 (2): 117-133 (1982).

Kizil, M Ve Özbayrak, M., “A Tradeoff analysis between process plan selection and cell formation in cellular manufacturing” , ***International Journal of Advance Manufacturing Technology***, 23: 501-506 (2004).

Lee, M. K., Luong, H. S. Ve Abhary, K., “A Genetic algorithm based cell design considering alternative routing” , ***Computer Integrated Manufacturing Systems***, 10 (2): 93-107 (1997).

Lei, D. Ve Wu, Z., “Tabu search approach based on a similarity coefficient for cell formation in generalized group technology” , ***International Journal of Production Research***, 43 (19): 4035-4047 (2005).

Li, M. L., "The algorithm for integrating all incidence matrices in multi-dimensional group technology" , *International Journal of Production Economics*, 86: 121-131 (2003).

Liang, M. Ve Taboun, S. M., "Converting functional manufacturing systems into focused machine cells-a bicriterion approach" , *Internatioanl Journal of Production Research*, 33: 2147-2161 (1995).

Logendran, R., "A Binary integer programming approach for simultaneous machine-part grouping in cellular manufacturing systems" , *Computers and Industrial Engineering*, 24: 329-336 (1993).

Lozano, S., Guerrero, F., Eguia, I. Ve Onieva, L., "Cell design and loading in the presence of alternative routing" , *International Journal of Production Research*, 37 (14): 3289-3304 (1997).

Mahdavi, I., Rezaeian, J., Shanker, K., Amiri, Z. R., "A Set partitioning based heuristic procedure for incremental cell formation with routing flexibility" , *International Journal of Production Research*, 44 (24): 5343-5361 (2006).

Malakooti, B., Malakooti, N. R. Ve Yang, Z., "Integrated group technology, cell formation, process planning, and production planning with application to emergency room" , *International Journal of Production Research*, 42 (9): 1769-1786 (2004).

Malakooti, B. Ve Yang, Z., "Multiple criteria approach and generation of efficient alternatives for machine-part family formation in group technology" , *IIE Transactions*, 34: 837-846 (2002).

Mansouri, S. A., Moattar Hussein, S. M. Ve Newman, S. T. "A Review of the modern approaches to multi-criteria cell design" , *International Journal of Production Research*, 38 (5): 1201-1218 (2000).

Min, H. Ve Shin, D., "Simultaneous formation of machine and human cells in group technology: A multiple objective approach" , *International Journal of Production Research*, 31: 2307-2318 (1993).

Moiser, C. Ve Taube, L., "The facets of gorup technology and their impacts on implementation-A state of art survey", *Omega*, 13 (5): 381-391 (1985).

Mukattash, A. M., Adil, M. B. Ve Tahboub, K. K., "Heuristic approaches for part assignment in cell formation" , *Computers and Industrial Engineering*, 42: 329-341 (2002).

Mukattash, A. M. Ve Al-Talat, M. D., "A Developed mathematical computerized approach for designing cellular manufacturing systems", *Journal of Applied Sciences*, 6 (9): 1915-1923 (2006).

- Norman, B. A., Tharmmaphornphilas, W., Needy, K. L., Bidanda, B. Ve Warner, R. C., "Worker assignment in cellular manufacturing considering technical and human skills" , ***International Journal of Production Research***, 40 (6): 1479-1492 (2002).
- Offodile, O. F., Mehrez, A. Ve Grznar, J., "Cellular manufacturing: A taxonomic review framework" , ***Journal of Manufacturing Systems***, 13 (3): 196-220 (1994).
- Rajamani, D., Singh, N. Ve Aneja, Y. P., "Design of cellular manufacturing systems" , ***International Journal of Production Research***, 34: 1917-1928 (1996).
- Ramabhatta V. Ve Nagi, R., "An Integrated formulation of manufacturing cell formation with capacity planning and multiple routings" , ***Annals of Operations Research***, 77: 79-95 (1998).
- Russell, R. S., Huang, P. Y. Ve Leu, Y. Y., "A study of labor allocation strategies in cellular manufacturing" , ***Decision Sciences***, 22 (3): 594-611 (1991).
- Sankaran, S., "Multiple objective decision making approach to cell formation: a goal programming model" , ***Mathematical and Computer Modelling***, 13: 71-81 (1990).
- Sankaran, S. Ve Kasilingam, R. G., "On Cell size and machine requirements planning in group technology" , ***European Journal of Operational Research***, 69: 373-383 (1993).
- Sarker, B. R. Ve Li, Z., "Measuring matrix-based cell formation with alternative routings" , ***Journal of Operational Research Society***, 49 (9): 953-965 (1998).
- Scholl, A., "Balancing and sequencing of assembly lines (2nd ed.)" , ***Physica-Verlag***, Heidelberg, Germany, 31-45 (1999).
- Selim, H. M., Aksin, R. G. Ve Vakharia, A. J., "Cell formation in group technology: Review, evaluation and directions for future research" , ***Computers Industrial Engineering***, 34 (1): 3-20 (1998).
- Shafer, S. M. Ve Charnes, J. M., "A simulation analyses of factors influencing loading practices in cellular manufacturing" , ***International Journal of Production Research***, 33 (1): 279-290 (1995).
- Shafer, S. M., Kern, G. M. Ve Wei, J. C., "A mathematical programming approach for dealing with exceptional elements in cellular manufacturing" , ***International Journal of Production Research***, 30: 1029-1036 (1992).
- Shafer, S. M. Ve Rogers, D. F., , "A goal programming approach to the cell formation problem" , ***Journal of Operations Management***, 10: 28-43 (1991).

Shanker, R. ve Vrat, P., “Post design modelling for cellular manufacturing system with cost uncertainty” , ***International Journal of Production Economic***, 55: 97-109 (1998).

Singh, N., “Design of cellular manufacturing systems: An invited review” ***European Journal of Operational Research***, 69: 284-291 (1993).

Slomp, J., Bokhorst, J. A. C. Ve Molleman, E. “Cross-training in a cellular manufacturing environment” , ***Computers and Industrial Engineering***, 48: 609-624 (2005).

Sofianopoulou, S., “Manufacturing cell design with alternative process plans and/or replicate machines” , ***International Journal of Production Research***, 37 (3): 707-720 (1999).

Solimanpur, M., Vrat, P. Ve Shankar, R., A “Multi-objective genetic algorithm approach to the design of cellular manufacturing systems” , ***International Journal of Production Research***, 42 (7): 1419-1441 (2004).

Sormaz, D. N. Ve Rajaraman, S. N., “Problem space search algorithm for manufacturing cell formation with alternative process plans” , ***International Journal of Production Research***, 46 (2): 345-369 (2008).

Spiliopoulos, K. Ve Sofianopolou, S., “Manufacturing cell design with alternative routing in generalized group technonogy: reducing the complexity of the solution space” , ***International Journal of Production Research***, 45 (6): 1355-1367 (2007).

Suresh, N. C. Ve Slomp, J., “A Multi-objective procedure for labour assignment and grouping in capacitated cell formation problems” , ***International Journal of Production Research***, 39 (18): 4103-4131 (2001).

Suresh, N. C., Slomp, J. Ve Kaparthi, S., “The capacitated cell formation problem: a new hierarchical methodology” , ***International Journal of Production Research***, 33, 1761-1784 (1995).

Süer, G. A., Saiz, M. Ve Gonzalez, W., “Evaluation of manufacturing cell loading rules for independent cells” , ***International Journal of Production Research***, 36: 2185-2207 (1999).

Süer, G. A. Ve Sanchez-Bera, I., “Common cell size determination and cell loading in labor-intensive manufacturing cells” , ***Computers Industrial Engineering***, 33: 221-224 (1997).

Süer, G. A., Sanchez-Bera, I., “Optimal operator assignment and cell loading when lot-splitting is allowed” , ***Computers and Industrial Engineering***, 35: 3-4 (1998).

- Süer, G. A. Ve Tummaluri, R. R., "Multi-period operator assignment considering skills, learning and forgetting in labour-intensive cells" , ***International Journal of Production Research***, 46 (2): 469-493 (2008).
- Tabucanon, M. T., "Multiple Criteria Decision Making in Industry", ***Elsevier***, New York, 12-22 (1988).
- Tilsley, R. Ve Lewis, F. A., "Flexible cell manufacturing systems: A realistic Approach" , ***Annals of CIRP***, 24: 269-271 (1977).
- Udbin, M. K., Ve Shanker, K., "Grouping of parts and machines in the presence of alternative Process routes by genetic algorithm" , ***International Journal of Production Economics***, 76: 219-228 (2002).
- VanOyen, M. P., Gel, E. S. Ve Hopp, W. J., "Performance opportunity for workforce agility in collaborative and noncollaborative work systems" , ***IIE Transactions***, 33: 807-818 (2001).
- Venugopal, V. Ve Narendran, T. T., "A Genetic algorithm approach to the machine-component grouping problem with multiple objectives" , ***Computers and Industrial Engineering***, 22: 469-480 (1992).
- Vin, E., Delit, P. Ve Delchambre, A., "A Multiple-objective grouping genetic algorithm for the cell formation problem with alternative routings" , ***Journal of Intelligent Manufacturing***, 16: 189-205 (2005).
- Von, Y., "New P-Median approach to cell formation with alternative process plans" , ***International Journal of Production Research***, 38 (1): 229-240 (2000).
- Wagner, B. J. Ve Ragatz, G. L., "The impact of lot splitting on due date performance" , ***Journal of Operations Management***, 12: 13-25 (1994).
- Wei J. C., Ve Gaither, N., "A capacity constraint multiobjective cell formation method" , ***Journal of Manufacturing Systems***, 9: 222-232 (1990).
- Wemmerlöv, U. Ve Hyer, N. L., "Procedures for the part family machine group identification problem in cellular manufacturing" , ***Journal of Operations Management***, 6: 125-147 (1986).
- Wilhelm, W. E., Chiou, C. C. Ve Chang, D. B., "Technical Note: Integrating design and planning considerations in cellular manufacturing" , ***Annals of Operations Research***, 77: 97-107 (1998).
- Wu, T. H., Chen, J. F. Ve Yeh, J. Y., "A Decomposition approach to the cell formation problem with alternative process plans" , ***International Journal of Advance Manufacturing Technology***, 24: 834-840, (2004).

Yin, Y. Ve Yasuda, K., “Manufacturing cell’s design in consideration of various production factors” , *International Journal of Production Research*, 40 (4): 885-906 (2002).

Yin, Y., Yasuda, K. Ve Hu, L., “Formation of manufacturing cells based on material flows” , *International Journal of Advance Manufacturing Technology*, 27: 159-165 (2005).

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

Zitzler, E. Ve Thiele, L., “Multiobjective evolutionary algorithms: a comparative case study and the strength pareto approach” , *IEEE Transactions*, 3: 257–271 (1999).

EKLER

EK-1 Ana modele ait örnek problem GAMs kodu

```

sets
i part type /1*5/
j number of operations /1*2/
k machine index /1*4/
l cell index /1*2/
pi number of skills /1*6/
pil number of skill level /0*3/
;
alias(k,k2)
alias(l,l2)
parameter  $\Pi(j,i,k)$ 
/
1.1.1 1
1.1.2 1
1.1.3 1
2.1.4 1
2.1.2 1
1.2.1 1
1.2.2 1
2.2.3 1
1.3.1 1
1.3.2 1
2.3.4 1
1.4.1 1
2.4.3 1
2.4.4 1
1.5.3 1
1.5.1 1
2.5.4 1
/;
parameter tablo(j,i,k)
/
1.1.1 15
1.1.2 8
1.1.3 10
2.1.4 15
2.1.2 16
1.2.1 8
1.2.2 10
2.2.3 11
1.3.1 18
1.3.2 12
2.3.4 15
1.4.1 9
2.4.3 18

```


EK-1 (Devam) Ana modele ait örnek problem GAMs kodu

```

2.4.4 22
1.5.3 14
1.5.1 8
2.5.4 9/;
parameter h(j,i,k)
/
1.1.1 5
1.1.2 8
1.1.3 6
2.1.4 7
2.1.2 6
1.2.1 6
1.2.2 5
2.2.3 9
1.3.1 5
1.3.2 7
2.3.4 8
1.4.1 5
2.4.3 18
2.4.4 10
1.5.3 8
1.5.1 15
2.5.4 8/;
parameter D(i)
/
1 3500
2 3550
3 2950
4 3450
5 3560/;
parameter B(i)
/
1 140
2 160
3 150
4 100
5 170/;
parameter V(i)
/
1 10
2 16
3 15
4 12
5 18/;

```

EK-1 (Devam) Ana modele ait örnek problem GAMs kodu

```

parameter fi(i)
/1 30
2 30
3 45
4 40
5 55/;
parameter O(k)
/1 1
2 3
3 1
4 4/;
parameter C(k)
/1 600
2 500
3 300
4 200/;
parameter PC(k)
/1 11850
2 10780
3 10955
4 11715/;
Parameters
NeSL(k,pi), PQAS(k,pi,pil), skilllevel(pi,pil);
NeSL(k,pi)=floor(uniform(0,3.999));
PQAS(k,pi,'0')=floor(1000*uniform(0,0.3));
PQAS(k,pi,'1')=floor(1000*uniform(0.15,0.6));
PQAS(k,pi,'2')=floor(1000*uniform(0.45,0.9));
PQAS(k,pi,'3')=floor(1000*uniform(0.75,1.0));
Table skilllevel(Pi, pil)
      0      1      2      3
1      1      2      3      4
2      1      2      3      4
3      1      2      3      4
4      1      2      3      4
5      1      2      3      4
6      1      2      3      4;
scalar
LBCS /2/;
UBCS /5/;
BigM1 /21/
BigM2 /2/;
WF /0.9/;
CI /2/;
integer variables
N(k,l), Yarti(k,l), Yeksi(k,l), YNum(pi,pil,k,l), X2(pi,pil,k,l);

```

EK-1 (Devam) Ana modele ait örnek problem GAMs kodu

```

variables
objfun, Qual (k);
positive variables
nbar (i), narti(i,j,l), neksi(i,j,l), nuzun(i,j,k,l);
binary variables
r(k,l), p(i,j,l), cok (k), cok2(i,j,l), Y(pi,pil,k,l);
Equations
Obj, cons1, cons1a, cons2, cons3, cons4, cons5, cons6, cons7, cons8, cons9, cons10,
cons11, cons12, cons13, cons14, cons15, cons16, cons17, cons18, cons19, cons20;
obj..objfun=E= sum((l,k,i,j), d(i)*nuzun(i,j,k,l)*h(j,i,k)*O(k))+
sum((k,l),PC(k)*N(k,l))+
sum((i),fi(i)*990*d(i)*nbar(i))+
sum((k,l),N(k,l)*Hbak(k))+
sum((l,k,i,j),(((d(i)*nuzun(i,j,k,l))/B(i))*tablo(j,i,k)))+
((1/2)*sum((l,i,j),d(i)*V(i)*((narti(i,j,l)+neksi(i,j,l))))) +
sum((pi,pil,k,l),PQAS(k,pi,pil)*5000*YNum(pi,pil,k,l));
cons1(i,j).. d(i)*sum((l,k),nuzun(i,j,k,l))=E=d(i)*(1-nbar(i));
cons1a(i,j).. sum((l,k),nuzun(i,j,k,l))=E=0;
cons2(i,j,k,l).. sum(l,nuzun(i,j,k,l))=L=PI(i,j,k);
cons3(i,j,l).. sum(k,nuzun(i,j,k,l)$h(j,i,k))=L=p(i,j,l);
cons4(i,j).. sum(l,p(i,j,l))=L=2;
cons5(k,l).. C(k)*100*N(k,l)=G=sum((i,j),D(i)*h(j,i,k)*nuzun(i,j,k,l));
cons6(l).. sum((i,j,k),D(i)*nuzun(i,j,k,l)*h(j,i,k))=G=(WF/CI)*(sum((i,j,k,l2),D(i)*
nuzun(i,j,k,l2)*h(j,i,k)));
cons7(l).. sum(k,N(k,l))=G=LBCS;
cons8(l).. sum(k,N(k,l))=L=UBCS;
cons9(k,l).. N(k,l)=L=BigM1*r(k,l);
cons10(k,l).. r(k,l)=L=N(k,l);
cons11(l).. r(1,l)+r(2,l)=L=1;
cons12(l).. r(2,l)-r(3,l)=E=0;
cons13(i,j,l)..sum(k,nuzun(i,j,k,l))=E=sum(k,nuzun(i,j,k,l)+narti(i,j,l)-neksi(i,j,l));
cons14(i,j,l)..narti(i,j,l)=L=BigM2*cok2(i,j,l);
cons15(i,j,l)..neksi(i,j,l)=L=BigM2*(1-cok2(i,j,l));
cons16(pi,k,l).. sum(pil,YNum(pi,pil,k,l))=E=N(k,l);
cons17(pi,pil,k,l).. YNum(pi,pil,k,l)=L=BigM1*Y(pi,pil,k,l);
cons18(pi,pil,k,l).. Y(pi,pil,k,l)=L=YNum(pi,pil,k,l);
cons19(k,pi,l).. r(k,l)*NeSL(k,pi)=L=sum(pil,Y(pi,pil,k,l)*(skilllevel(pi,pil)));
cons20(pi,k,l).. sum(pil, Y(pi,pil,k,l))=L=1;
MODEL Cell /all/;
SOLVE Cell USING MIP MINIMIZING objfun;

```

EK-2 Ana modelin GAMs kodunun örnek problem verileri ile elde edilen sonuç dosyası

General Algebraic Modeling System
Model Statistics SOLVE Cell Using MIP From line 306

MODEL STATISTICS

BLOCKS OF EQUATIONS	22	SINGLE EQUATIONS	743
BLOCKS OF VARIABLES	11	SINGLE VARIABLES	566
NON ZERO ELEMENTS	2,242	DISCRETE VARIABLES	440

MIP Solution: 646204.075564 (977 iterations, 34 nodes)
Final Solve: 646204.075564 (19 iterations)
Best possible: 646204.075564

SOLVE SUMMARY

MODEL Cell	OBJECTIVE objfun
TYPE MIP	DIRECTION MINIMIZE
SOLVER CPLEX	FROM LINE 306

**** SOLVER STATUS 1 NORMAL COMPLETION
**** MODEL STATUS 1 OPTIMAL
**** OBJECTIVE VALUE 646204.0756

RESOURCE USAGE, LIMIT	0.734 1000000000.000
ITERATION COUNT, LIMIT	996 1000000000

VARIABLE nuzun.L

INDEX 1 = 1

1	2
1.1	0.914
1.3	0.045
2.2	0.959

INDEX 1 = 2

1	2
1.1	1.000
2.3	1.000

INDEX 1 = 3

2
1.1 1.000
2.4 1.000

EK-2 (Devam) Ana modelin GAMs kodunun örnek problem verileri ile elde edilen sonuç dosyası

INDEX 1 = 4

	1	2
1.1		0.461
2.3	0.461	

INDEX 1 = 5

	1	2
1.3	1.000	
2.4	0.424	0.576

VARIABLE nbar.L

1 0.041, 4 0.539

VARIABLE N.L

	1	2
1		1.000
2	1.000	
3	3.000	
4	1.000	2.000

VARIABLE Y.L

INDEX 1 = 1

	1	2
1.2	1.000	
2.4	1.000	1.000
3.3	1.000	
0.1		1.000

INDEX 1 = 2

	1	2
1.4	1.000	1.000
3.1		1.000
3.2	1.000	
3.3	1.000	

EK-2 (Devam) Ana modelin GAMs kodunun örnek problem verileri ile elde edilen sonuç dosyası

INDEX 1 = 3

	1	2
1.2	1.000	
1.4	1.000	1.000
2.1		1.000
0.3	1.000	

INDEX 1 = 4

	1	2
1.1		1.000
1.4	1.000	1.000
2.3	1.000	
3.2	1.000	

INDEX 1 = 5

	1	2
1.1		1.000
3.2	1.000	
0.3	1.000	
0.4	1.000	1.000

INDEX 1 = 6

	1	2
1.3	1.000	
2.2	1.000	
0.1		1.000
0.4	1.000	1.000

VARIABLE YNum.L

INDEX 1 = 1

	1	2
1.2	1.000	
2.4	1.000	2.000
3.3	3.000	
0.1		1.000

INDEX 1 = 2

	1	2
1.4	1.000	2.000
3.1		1.000
3.2	1.000	
3.3	3.000	

EK-2 (Devam) Ana modelin GAMs kodunun örnek problem verileri ile elde edilen sonuç dosyası

INDEX 1 = 3

	1	2
1.2	1.000	
1.4	1.000	2.000
2.1		1.000
0.3	3.000	

INDEX 1 = 4

	1	2
1.1		1.000
1.4	1.000	2.000
2.3	3.000	
3.2	1.000	

INDEX 1 = 5

	1	2
1.1		1.000
3.2	1.000	
0.3	3.000	
0.4	1.000	2.000

INDEX 1 = 6

	1	2
1.3	3.000	
2.2	1.000	
0.1		1.000
0.4	1.000	2.000

EK-3 Ana modelin performans etkinliğini değerlendirmek için oluşturulan rassal veri setleri için kullanılan Visual Basic kodu

```

Sub incidence_bul()
For i = 1 To part
For j = 1 To operation
incidence(i, j) = 0
Next j
Next i
Print #1, "sets"
Print #1, "i part type /1*" & part & "/"
Print #1, "j number of operations /1*" & operation & "/"
Print #1, "k machine index /1*" & machine & "/"
Print #1, "l cell index /1*" & cell & "/"
Print #1, "pi number of skills /1*" & skill & "/"
Print #1, "pil number of skill level /0*" & skilllevel & "/"
Print #1, "alias(k,k2)"
Print #1, "alias(l,l2)"
For i = 1 To part
a = Round(1 + Rnd * (operation - 1), 0)
For j = 1 To a
incidence(i, j) = 1
Next j
Next i
Print #1, "Parameter incidence(i, j)"
Print #1, "/"
For i = 1 To part
For j = 1 To operation
If incidence(i, j) = 1 Then
Print #1, i & "." & j & " " & incidence(i, j)
End If
Next j
Next i
Print #1, "/;"
End Sub
Print #1, "parameter tablo(j,i,k)"
Print #1, "/"
For i = 1 To part
For j = 1 To operation
For k1 = 1 To tool
For k2 = 1 To machine
If lamda(i, j, k1) * tool1(k1, k2) > 0 Then
a1 = Round(tablolow + Rnd * (tabloup - tablolow), 0)
tablo(i, j, k2) = a1
Print #1, j & "." & i & "." & k2 & " " & a1
End If

```


EK-3 (Devam) Ana modelin performans etkinliğini değerlendirmek için oluşturulan rassal veri setleri için kullanılan Visual Basic kodu

```

Next k2
Next k1
Next j
Next i
Print #1, "/"
Print #1, "parameter h(j,i,k)"
Print #1, "/"
For i = 1 To part
For j = 1 To operation
say = 0
mak = 0
For k1 = 1 To machine
If tablo(i, j, k1) > 0 Then
say = say + 1
If tablo(i, j, k1) > mak Then
mak = tablo(i, j, k1)
m1 = k1
End If
End If
Next k1
If say = 1 Then
a1 = Round(hlow + Rnd * (hup - hlow), 0)
Print #1, j & "." & i & "." & m1 & " " & a1
End If
If say = 2 Then
a1 = Round(hlow + Rnd * (hup - hlow), 0)
a2 = Round(hlow + Rnd * (hup - hlow), 0)
If a1 > a2 Then
buy = a1
kuc = a2
Else
buy = a2
kuc = a1
End If
For t1 = 1 To machine
If tablo(i, j, t1) > 0 And tablo(i, j, t1) <> mak Then
Print #1, j & "." & i & "." & t1 & " " & buy
End If
If tablo(i, j, t1) > 0 And tablo(i, j, t1) = mak Then
Print #1, j & "." & i & "." & t1 & " " & kuc
End If
Next t1
End If

```

EK-3 (Devam) Ana modelin performans etkinliğini değerlendirmek için oluşturulan rassal veri setleri için kullanılan Visual Basic kodu

```

Next j
Next i
Print #1, "/"
Print #1, "parameter D(i) "
Print #1, "/"
For i = 1 To part
a1 = Round(dlow + Rnd * (dup - dlow), 0)
Print #1, i & " "; a1
Next i
Print #1, "/"
Print #1, "parameter B(i) "
Print #1, "/"
For i = 1 To part
a1 = Round(blow + Rnd * (bup - blow), 0)
Print #1, i & " "; a1
Next i
Print #1, "/"
Print #1, "parameter V(i) "
Print #1, "/"
For i = 1 To part
a1 = Round(vlow + Rnd * (vup - vlow), 0)
Print #1, i & " "; a1
Next i
Print #1, "/"
Print #1, "parameter O(k) "
Print #1, "/"
For i = 1 To machine
a1 = Round(olow + Rnd * (oup - olow), 0)
Print #1, i & " "; a1
Next i
Print #1, "/"
Print #1, "parameter C(k) "
Print #1, "/"
For i = 1 To machine
a1 = Round(clow + Rnd * (cup - clow), 0)
Print #1, i & " "; a1
Next i
Print #1, "/"
Print #1, "parameter Q(k) "
Print #1, "/"
For i = 1 To machine
a1 = Round(qlow + Rnd * (qup - qlow), 0)
Print #1, i & " "; a1

```

EK-3 (Devam) Ana modelin performans etkinliğini değerlendirmek için oluşturulan rassal veri setleri için kullanılan Visual Basic kodu

```

Next i
Print #1, "/"
Print #1, "parameter PC(k) "
Print #1, "/"
For i = 1 To machine
a1 = Round(pclow + Rnd * (pcup - pclow), 0)
Print #1, i & " "; a1
Next i
Print #1, "/"
End Sub
Print #1, "Parameters"
Print #1, "NeSL(k,pi)"
Print #1, "PQAS(k,pi,pil);"
Print #1, "NeSL(k,pi)=floor(1000*uniform(0,0.3999));"
Print #1, "PQAS(k,pi,'0')=uniform(1000*0.015,0.6999);"
Print #1, "PQAS(k,pi,'1')= uniform(1000*0.045,0.9999);"
Print #1, "PQAS(k,pi,'2')= uniform(1000*0.075,1.9999);"

```

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : KILIÇ ÖGER Gökçe
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 07. 01. 1983 Ankara
 Medeni hali : Evli
 Telefon : 0 506 595 62 94
 e-mail : gkilic@gazi.edu.tr

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi /Endüstri Mühendisliği	-
Lisans	Gazi Üniversitesi/ Endüstri Mühendisliği	2005
Lise	Keçiören Yabancı Dil Ağırlıklı Lisesi	2000

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2005-	Gazi Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

1) Kılıç, G., Arıkan, F., “Grup Teknolojisinde Eşzamanlı Makine ve İnsan Hücrelerinin Oluşturulması: Çok Amaçlı Bulanık Bir Yaklaşım”, Yöneylem Araştırması ve Endüstri Mühendisliği Sempozyumu Bildiri Kitabı, 1231-1236, İzmir Dokuz Eylül Üniversitesi-İzmir, 2-4 Temmuz 2007.

2) Kılıç, G., Türkoğlu, A., Doğan, İ., Işık, B.İ., Akbaş, S., “Sıra Bağımlı Hazırlık Zamanlı Tek Makine Çizelgeleme Problemi İçin Çok-Amaçlı Tabu Arama Algoritması ve Bir Uygulama” Yöneylem Araştırması ve Endüstri Mühendisliği Sempozyumu Bildiri Kitabı, 524-529, İzmir Dokuz Eylül Üniversitesi-İzmir, 2-4 Temmuz 2007

3) Kılıç, G. Ve Arıkan, F., “Tek Makine Çizelgeleme Problemi İçin Çok-Amaçlı İnteraktif Bir Tabu Arama Algoritması” 07 Üretim Araştırmaları Sempozyumu, Bildiri Özetleri Kitabı, s.14, 15-17 Kasım, Gazi Üniversitesi, Ankara, 2007.

Bilgisayar Becerisi

İşletim Sistemi	: DOS, Windows
Yazılım	: MS Office Uygulamaları
İstatistik paketi	: SPSS
Matematiksel Programlama Paketleri	: GAMS, LINDO
Programlama Dili	: Visual Basic, C, C#

Projeler

Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Fonu Projesi, 2007-2008, “Grup Teknolojisinde Eşzamanlı Makine ve İnsan Hücrelerinin Oluşturulması: Çok Amaçlı Bulanık Matematiksel Bir Yaklaşım”

Burslar

Tübitak Yurt İçi Yüksek Lisans Bursu, 2005-2007

Hobiler

Alışveriş, sinema, doğa yürüyüşü, müzik.