

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MEVCUT ATÖLYE TİPİ ÜRETİM SİSTEMİNİN
TASARLANACAK BİR HÜCRESEL İMALAT SİSTEMİ İLE
KARŞILAŞTIRILMASI VE ÇOK AMAÇLI BİR MODEL**

DOKTORA TEZİ

İhsan EROZAN

Enstitü Anabilim Dalı : ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Orhan TORKUL

Haziran 2014

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

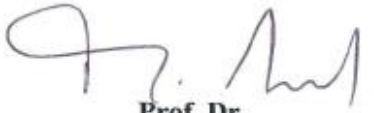
MEVCUT ATÖLYE TİPİ ÜRETİM SİSTEMİNİN
TASARLANACAK BİR HÜCRESEL İMALAT SİSTEMİ İLE
KARŞILAŞTIRILMASI VE ÇOK AMAÇLI BİR MODEL

DOKTORA TEZİ

İhsan EROZAN

Enstitü Anabilim Dalı : ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez 24 / 06 /2014 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.



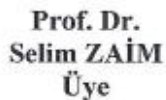
Prof. Dr.
Orhan TORKUL
Jüri Başkanı



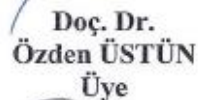
Prof. Dr.
İsmail Hakkı CEDİMOĞLU
Üye



Prof. Dr.
Şakir EŞNAF
Üye



Prof. Dr.
Selim ZAIM
Üye



Doç. Dr.
Özden ÜSTÜN
Üye

ÖNSÖZ

Küreselleşme ile birlikte artan rekabet ve müşterilerin farklı ürün talebi, üreticilerin yeni ve daha esnek üretim felsefelerine yönelmelerine neden olmuştur. Hücresel üretim sistemleri, üreticilerin bu ihtiyaçlarına cevap verebilecek özelliklere sahip olduğu için günümüzde dikkat çeken bir üretim sistemi olmuştur. Sağladığı avantajlar nedeniyle akademisyenlerin ve uygulayıcıların hücresel üretim sistemleri üzerine çeşitli çalışmalar yürüttükleri literatürden bilinmektedir. Gerek teorik gerekse de uygulama olarak sağladığı avantajlar nedeniyle bu tez çalışmasının hücresel üretim sistemleri literatürüne bir katkı sağlayacağını umuyorum.

Bu tez çalışması için engin tecrübelerini paylaşıp beni yönlendiren tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Orhan Torkul'a ve tez çalışmam süresince benden desteklerini esirgemeyen Prof. Dr. Ümit Kocabağak ve Doç. Dr. Özden Üstün'e sonsuz teşekkürler ederim. Teşekkürlerimin en özelini ise; sabırla her türlü özveride bulunarak bugünlere ulaşmamı sağlayan değerli aileme sunuyorum.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	viii
TABLolar LİSTESİ.....	x
RESİMLER LİSTESİ	xi
ÖZET	xii
SUMMARY	xiii
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ.....	5
BÖLÜM 2.	
ÜRETİM SİSTEMLERİNE GENEL BAKIŞ.....	9
2.1. Temel Üretim Sistemleri.....	13
2.1.1. Kesikli üretim sistemleri	13
2.1.2. Sürekli üretim sistemleri	16
2.2. Üretim Sistemlerinde Günümüzdeki Eğilimler	19
BÖLÜM 3.	
HÜCRESEL ÜRETİM SİSTEMLERİ	22
3.1. Hücresel Üretim Sistemlerinin Doğuşu ve Gelişimi	25
3.2. Hücresel Üretim Sistemlerinin Avantajları ve Dezavantajları.....	26
3.3. Hücresel Üretim Kavramı ve Prensipleri	29

BÖLÜM 4.

HÜCRE OLUŞTURMA YAKLAŞIMLARI	34
4.1. Hücre Oluşturmada Kullanılan Temel Amaçlar	34
4.2. Hücre Oluşturma Yaklaşımları	37
4.2.1. Görsel metotlar	38
4.2.2. Parça kodlama analizi metotları	38
4.2.3. Üretim akış analizi	41
4.2.3.1. Matematiksel programlama yaklaşımları	42
4.2.3.2. Matris formülasyonu	43
4.2.3.3. Algoritmalar	48
4.2.3.4. Yapay zeka metotları	56
4.3. Oluşturulan Hücrelerin Performansını Değerlendirme Yöntemleri	61

BÖLÜM 5.

HÜCRESEL ÜRETİM SİSTEMLERİ İÇİN ÇOK AMAÇLI VE DOĞRUSAL OLMAYAN BİR MODEL VE ÇÖZÜM ÖNERİSİ	64
5.1. Optimizasyonda Çok Amaçlı Çözüm Yaklaşımları	69
5.1.1. Konik skalerleştirme	72
5.2. Önerilen Genetik Algoritma Yaklaşımı	76

BÖLÜM 6.

ÜRETİM HÜCRELERİ OLUŞTURMADA KARAR DESTEK SİSTEMLERİ ...	83
6.1. Literatürdeki Karar Destek Sistemleri	83
6.2. Hücresel Üretim Sistemleri için Bir Karar Destek Sistemi Önerisi	85
6.3. Karar Destek Sistemi için Uygulama Yerinin Seçilmesi ve Analizi	85
6.4. Önerilen Karar Destek Sisteminin Yapısı	87
6.5. Önerilen Karar Destek Sisteminin Gerçek Bir Sisteme Uygulanması ...	94
6.6. Karar Destek Sisteminin Literatür Örnekleriyle Karşılaştırılması	102

BÖLÜM 7.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER	104
----------------------------	-----

KAYNAKLAR.....	107
EKLER.....	120
ÖZGEÇMİŞ	123

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

HÜS	: Hücresel Üretim Sistemleri
CIM	: Computer Integrated Manufacturing
FMS	: Flexible Manufacturing Systems
JIT	: Just in Time
CMS	: Cellular Manufacturing Systems
FMC	: Flexible Manufacturing Cells
GT	: Grup Teknolojisi
PCA	: Part Coding and classification Analysis
S_{ij}	: Benzerlik katsayısı
e_d	: Diagonal (köşegen) bloklardaki 1'lerin toplamı
e_o	: Diagonal (köşegen) olmayan bloklardaki 1'lerin toplamını
M_r	: r 'inci hücredeki makine sayısı
N_r	: r 'inci hücredeki parça sayısını
η	: Gruplama verimliliği
e_v	: Diagonal bloklardaki boşlukların sayısı
τ_1	: Hücre içi akış etkinliği
τ_2	: Hücreler arası akış etkinliği
η_g	: Gruplama ölçüsü
p	: Parça indisi
t	: Makine indisi
h	: Hücre indisi
r	: Rota indisi
w_{ptr}	: t makinesi üzerindeki r rotalı p parçasının işyükü
m_{phr}	: h hücresindeki r rotalı p parçasının ortalama iş yükü

L_{ph}	: h hücreğine atanacak minimum parça sayısı
U_{ph}	: h hücreğine atacak maksimum parça sayısı
z_{pt}	: t makinesi üzerinde işlenen p parçasının işlem zamanı
M_p	: Üretim için gerekli p parçasının miktarı
Z_t	: t makinesi üzerindeki bir işlem için mevcut zaman
a_{ptr}	: p parçasının r rotası ile t makinesinde işlenme durumu
x_{phr}	: p parçasının r rotası ile h hücreğine atanma durumu
y_{th}	: t makinesinin h hücreğine atanma durumu
$F_i(x)$: i . amaç fonksiyonu
w_i	: i . amaç fonksiyonunun ağırlığı
B_i	: i . amaç fonksiyonu için referans değeri
N_e	: İstisnai eleman sayısı
N_v	: Hücre içi boşluk sayısı

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Temel üretim sistemlerinin sınıflandırılması.....	12
Şekil 2.2. Siparişe göre üretim yapan bir imalatçının tesis yerleşimi.....	14
Şekil 2.3. Kesikli üretim/imalat sistemlerinin ürün ve hacim esneklikleri bakımından kullanım durumları.....	16
Şekil 2.4. Kitlesel üretim yapan bir döküm firmasının tesis yerleşimi.....	18
Şekil 2.5. Sürekli üretim/imalat sistemlerinin ürün ve hacim esneklikleri bakımından kullanım durumları.....	19
Şekil 3.1. Hücresel üretimi sistemi ile diğer yaklaşımlar arasındaki ilişki.....	23
Şekil 3.2. Hücresel üretim sistemlerinin geleneksel üretim sistemleri içindeki yeri .	24
Şekil 3.3. Hücresel üretime sistemine geçiş için sebepler	27
Şekil 3.4. Grup teknolojisi yaklaşımının uygulanışı	30
Şekil 3.5. Hücresel üretim sistemleri için U yerleşimli bir hücre örneği.....	31
Şekil 3.6. Hücrelere atanmış üç örnek ürün ailesi	32
Şekil 4.1. Günümüzdeki temel hücre oluşturma yaklaşımları	37
Şekil 4.2. Parça kodlama örneği.....	39
Şekil 4.3. Hiyerarşik yapı örneği.....	40
Şekil 4.4. Bir karma yapı örneği.....	41
Şekil 4.5. Örnek bir problem için benzerlik katsayısı hesabı.....	46
Şekil 4.6. Örnek bir kromozom ve popülasyon yapısı.....	51
Şekil 4.7. Genetik operatörler	54
Şekil 4.8. Genetik algoritma çalışma prosedürü	55
Şekil 4.9. Bilgi gösterimi için kural yapısı	57
Şekil 4.10. Uzman sistemlerin çalışma yapısı.....	57
Şekil 4.11. Üyelik fonksiyonu örneği.....	59
Şekil 4.12. Bulanık mantığın çalışma prosedürü.....	60
Şekil 5.1. İki amaçlı örnek bir problem için dışbükey olmayan görüntü kümesi	73
Şekil 5.2. Önerilen genetik algoritmanın kromozom yapısı	77

Şekil 5.3. Önerilen genetik algoritmanın çalışma prensibi	79
Şekil 5.4. Elitizm operatörü	80
Şekil 5.5. Genetik algoritma için önerilen çaprazlama operatörü	81
Şekil 6.1. Sanal imalat hücresinin diğer yerleşimlere göre konumu	99

TABLULAR LİSTESİ

Tablo 2.1. 20. yüzyıldan günümüze kadar üretim sistemlerinin gelişimi	20
Tablo 4.1. Şekil 4.2’de sunulan parça kodlama örneğinin 0 ve 16 numaralı özellikler için yorumu	39
Tablo 4.2. Örnek parça-makine matrisi	42
Tablo 4.3. Derece sırasına göre kümeleme metodu için uygulama örneği	45
Tablo 4.4. Genel amaçlı benzerlik katsayısı metotları	47
Tablo 5.1. Literatürdeki bazı referans çalışmalar için skalerleştirme metotlarının karşılaştırması	72
Tablo 5.2. Referans değeri (B_i) hesabı için örnek	75
Tablo 5.3. Literatürdeki bazı çalışmaların çözüm metodlarının karşılaştırılması	77
Tablo 6.1. Tülomsaş Motor Fabrikası’nda üretilen kritik ürünler.....	86
Tablo 6.2. Motor fabrikasının makine parkı	87
Tablo 6.3. Önerilen karar destek sisteminden beklenen gerçek hayat performansı ...	94
Tablo 6.4. Önerilen karar destek sistemi ile tek rotalı Tülomsaş probleminin 3 metot ile çözülmesi	94
Tablo 6.5. Önerilen karar destek sistemi ile çok rotalı Tülomsaş probleminin 3 metot ile çözülmesi	97
Tablo 6.6. Sanal imalat hücreleri oluşturmak için kullanılan parametre değerleri ve elde edilen sonuçlar	100
Tablo 6.7. Tülomsaş için oluşturulan sanal imalat hücre yapıları.....	101
Tablo 6.8. Literatürden seçilen alternatif rotalı test problemleriyle önerilen modelin performansının karşılaştırılması.....	102
Tablo 6.9. Literatürden seçilen tek rotalı test problemleri ile önerilen modelin performansının karşılaştırılması.....	103

RESİMLER LİSTESİ

Resim 4.1. Yapay sinir ağı uygulama örneği	58
Resim 5.1. Genetik algoritma çalışması için temel girdiler	78
Resim 6.1. Hücresel sistem ayarları üstündeki açıklayıcı bilgilere bir örnek	88
Resim 6.2. Önerilen karar destek sistemi ile başlangıç matrisinin oluşturulması	89
Resim 6.3. Karar destek sisteminde çözüm metodunun seçilmesi	89
Resim 6.4. Önerilen karar destek sistemi ile çözüm sonuçlarının incelenmesine bir örnek	91
Resim 6.5. Önerilen karar destek sistemi ile oluşturulan hücresel üretim sisteminin görüntülenmesine bir örnek	92
Resim 6.6. Önerilen sistem ile iterasyonların grafiksel olarak izlenmesi	92
Resim 6.7. Karar destek sistemi ile örnek problem çözümü	95
Resim 6.8. Önerilen sistemle Tülomsaş'ta sanal imalat hücresi oluşturmak için elde edilen çıktı	101

ÖZET

Anahtar kelimeler: Hücresel Üretim, Karar Destek Sistemi, Genetik Algoritma, Çok Amaçlı Model

Küreselleşme ile birlikte artan rekabet ve müşterilerin farklı ürün talebi, üreticilerin yeni ve daha esnek üretim felsefelerine yönelmelerine neden olmuştur. Hücresel üretim, üreticilerin bu ihtiyaçlarına cevap verebilecek özelliklere sahip olduğu için günümüzde sıkça tercih edilen bir üretim sistemi olmuştur.

Hücresel üretim sistemi, atölye tipi üretimin esnekliği ile seri üretimin verimliliğini kombine eden bir üretim sistemidir. Bu kombinasyon, firmaların dinamik ve rekabetçi koşullara uyum sağlamasına yardımcı olur. Bir hücresel üretim sistemi oluşturmadaki temel yaklaşım, parçaları parça aileleri oluşturmak için, makineleri ise imalat hücreleri oluşturmak için kümelemeye dayanmaktadır. Ancak gerçek hayatta bu kümeleme süreci, birçok çelişen amacın da dikkate alınmasını gerektirdiği için çok ta kolay olmamaktadır. Hücresel üretim sistemlerinin oluşturulabilmesi için literatürde çok çeşitli çalışmalar olmasına rağmen, bu çalışmalar ya çok dar içerikli ya da uygulamaya dönük olarak kullanılması zor olan çalışmalardır. Bu tez çalışmasında, gerek literatürde görülen eksikleri gidermek, gerekse de karar vericilerin daha iyi hücresel sistemler oluşturmasını sağlamak amacı ile konik skalerleştirmeli çok amaçlı matematiksel modeli kullanan bir karar destek sistemi önerilmiştir. Önerilen bu çok amaçlı model ve karar destek sistemi, literatür ile kıyaslanmış ve çoğu karşılaştırmada sonuçların literatürden daha iyi olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca bu tez çalışması için Eskişehir Tülomsaş Motor Fabrikası'nda bir uygulama çalışması yürütülmüştür. Yürütülen bu çalışma, önerilen çok amaçlı modelin ve karar destek sisteminin gerçek dünya problemleri için de makul zaman içinde uygun çözümler üretebildiğini göstermiştir.

A COMPARISON OF A CURRENT JOB-SHOP PRODUCTION SYSTEM WITH A CELLULAR MANUFACTURING SYSTEM AND A MULTI-OBJECTIVE MODEL

SUMMARY

Key Words: Cellular Manufacturing, Decision Support System, Genetic Algorithm, Multi-objective Model

With globalization, the increased competition and various product demand have caused producers to tend new and more flexible production philosophies. Because cellular manufacturing contains the characteristics which will respond these needs, it has been a frequently preferred method.

Cellular manufacturing is a manufacturing system which combines the flexibility of the job shop with the efficiency of the flow shop. This combination helps the companies gain ability to adapt to dynamic conditions and competitive advantages. The basic approach in forming a cellular manufacturing system is based on to cluster parts to form a part family and to cluster machines to form a manufacturing cell. But, in the real world, the clustering process is not easy because of many conflicting objectives. Although there are some studies on forming cellular manufacturing systems in the literature, these are the studies that either contain narrow content or are difficult to use in practice. In this thesis, a decision support system that uses a multi-objective mathematical model with conic scalarization was proposed to both fill gaps in the literature and ensure to be formed better cellular manufacturing systems by decision makers. The multi-objective model and the decision support system proposed in this thesis were compared with some literature examples. The results showed that the model and the decision support system proposed are at least as good as the existing approaches in designing the cellular system, and in many cases better than them. Besides, a field study was conducted in Tülomsaş Engine Facility in Eskişehir. This study showed that the model and the decision support system proposed can also obtain optimum results in reasonable time for the real-world problems.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Günümüzde küreselleşme ile birlikte gerek müşteri davranışlarında gerekse de üretim biçimlerinde değişiklikler meydana gelmiştir. Küreselleşme sayesinde, müşterilere global bir pazardan daha ucuz fiyatlara çok çeşitli ürünler sunulabilir hale gelmiştir. Bu durum, müşterilerin ürün seçeneklerini artırdığı gibi müşterilere özgü ürünlerin üretilmesine de imkan sağlamıştır. Bu süreçte üreticiler açısından bakıldığında, üreticilerin müşterilerini memnun edebilmek için kısa sürede daha çeşitli ürünler üretme eğilimine girdiği görülmektedir. Çünkü güçlü bir rekabetin olduğu küresel pazardan pay almaya çalışan üreticiler, kısa zamanda müşteri beklenti ve isteklerine yönelik ürünler üretmek zorunda kalmışlardır.

Küreselleşme öncesine bakıldığında, üreticilerin ya az çeşide sahip çok ürün veya çok çeşide sahip az ürün ürettiği görülür. Bu dönemde ya müşteri beklentileri dikkate alınmadan büyük miktarlarda ürünler üretilmekte (bu durumda müşterilerin ürün üzerinde seçim hakkı kısıtlıdır) veya sadece belirli müşterilere yönelik az sayıda özel ürünler üretilmekteydi. Bu dönemin en önemli özelliği, pazarın büyük bir bölümünün sadece belirli firmalar tarafından paylaşılmasından dolayı rekabetin az olmasıdır. Rekabetin az olması, müşterilerin fiyatlar üzerindeki etkisini de azaltmıştır.

2000'li yıllardan sonra küreselleşmenin etkisini göstermesi ve özellikle internet ve bilgi teknolojilerinin üretim, pazarlama, satış ve lojistik alanında kullanılması ile birlikte gerek üretici sayısında gerekse de potansiyel müşteri sayısında aşırı bir artış meydana gelmiştir. Üretici sayısının artması, rekabeti artırmış ve böylece ürün fiyatlarında düşüşler meydana gelmiştir. Müşteri sayısındaki artış ise, rekabetin de etkisi ile hem ürün çeşidinin hem de ürün sayısının artmasına neden olmuştur. Bu yeni ekonomik düzende, hem müşteri hem de üreticiler açısından geleneksel üretim sistemlerinin yetersiz kaldığı görülmüştür. Çünkü bu yeni ekonomik sistemde, çok sayıdaki çok çeşitli müşterinin tatmin edilmesi gerekmektedir. Ayrıca bu yeni

ekonomik sistemde, talepler aşırı dalgalı ve müşterinin pazarlık gücü de daha fazladır.

Seri üretim ve atölye tipi üretim olarak adlandırılan temel geleneksel üretim sistemleri, günümüz konjonktüründe işletmelerin hayatta kalabilmeleri için gerekli olan esnekliği sağlayamamaktadır [1]. Bu nedenle işletmeler, gerek yeni ihtiyaçlara yönelik olarak geliştirilmiş üretim sistemlerini (esnek üretim, yalın üretim, çevik üretim sistemleri vb.) gerekse de geleneksel sistemlerinin bir kombinasyonu olarak ortaya çıkan üretim sistemlerini (hücreli üretim sistemleri vb.) göz önüne alarak kendilerine uygun olan üretim sistemine geçiş yapma eğilimindedirler. Kendi ihtiyaçlarına uygun bir üretim sistemine geçiş yapan işletmeler, dünya pazarında daha rekabetçi bir yapıya sahip olacak ve müşteri beklenti ve taleplerine daha iyi cevap vereceklerdir.

Günümüze kadar olan süreçte işletmeler, seri üretim ve atölye tipi üretim sistemi olmak üzere genelde iki tip üretim sistemi üzerine odaklanmışlardır. Bu durumun başlıca nedenleri; tek bir tip üretim sistemi ile çalışmanın teknolojik olarak daha az yatırım gerektirmesi, genelde benzer veya aynı tip müşterilere üretim yapılması ve ürün çeşidinin zaman içinde ya çok az değişmesi veya uzun vadede hiç değişmemesidir. Ancak küreselleşme ile birlikte müşteri istekleri farklılaşmış, ürünlerin yaşam döngüleri kısalmış ve talepler eskisine göre daha büyük hacimli ve özelleşmiş bir yapıya dönüşmüştür. İşletme yöneticileri ve araştırmacılar, bu değişime ayak uydurmak için hem çeşitli ürün üretimine yatkın (ürün esnekliği) hem de dalgalı talepleri karşılayacak (hacim esnekliği) üretim sistemlerinin arayışına girişmişlerdir.

Geleneksel üretim sistemlerinden farklı bir yaklaşımla ortaya çıkan hücreli üretim sistemleri (HÜS), temel olarak kitlesel üretimde kullanılan akış tipi üretim ile elde edilen tasarruflara eşdeğer tasarrufları, kesikli ve atölye tarzı üretimlerde de elde etmek amacıyla ortaya çıkmıştır [2, 3]. Ortaya çıkış amacı incelendiğinde, hücreli üretim sistemlerinin hem ürün hem de hacim esnekliğine odaklandığı görülmektedir. Böylece hücreli üretim sistemlerinin, talep dalgalanmalarının ve hızlı değişen ürün

tip ve çeşitlerinin bulunduğu ortamlar için uygun bir üretim sistemi olduğu söylenebilir.

Bu tez çalışmasında, geleneksel üretim sistemlerine karşı çeşitli avantajlara sahip olan hücreli üretim sistemlerinin, karar vericiler tarafından daha gerçekçi ve kolay bir şekilde çözebilmesi için bir karar destek sistemi önerilmiştir.

Önerilen bu karar destek sistemi, hem konik hem de ağırlıklı toplam skalerleştirmeli çok amaçlı bir matematiksel modeli, genetik algoritma metodunu ve bulanık kümeleme metodunu (klasik Fuzzy C-Means) içermektedir. Önerilen çok amaçlı modelde skalerleştirme işlemi, hem ağırlıklı toplam skalerleştirme metodu ile hem de bu alanda yeni bir metod olan konik skalerleştirme metodu ile yapılabilmektedir. Ayrıca bu karar destek sisteminin, ana çözüm metodu olan genetik algoritma ile kıyaslama yapabilmesi için problemlerin Fuzzy C-Means metodu ile de çözülebilmeye imkân verilmiştir. Önerilen karar destek sistemi, karar vericilere çeşitli aşamalarda bilgi ve öneriler sunmakta ve gerektiğinde uyarılarda da bulunmaktadır. Karar vericilerin oluşturulan hücreli sistemin performansını değerlendirebilmesi için önerilen sistem; grafik arayüzü, veri akış arayüzleri, performans bilgileri ve renklendirmeler ile zenginleştirilmiştir.

Bu çalışmada önerilen karar destek sistemi, birçok yönüyle literatürdeki çalışmalardan farklı veya üstündür. Önerilen sistemin başlıca özellikleri aşağıda sunulmuştur:

- Önerilen sistem, alternatif rotaları dikkate almaktadır. Literatürdeki birçok model veya sistem, çözümü karmaşıktırmamak için alternatif rotaları göz ardı etmiştir.
- Önerilen sistem temel olarak tam sayılı, çok amaçlı ve lineer olmayan bir modelle çözüme gitmektedir. Bu modelle gerçekçi bir çözüm ortaya koyulmaktadır. Literatürde ise genellikle karmaşıklığı artırmamak için lineer olmayan ve çok amaçlı yaklaşımlardan uzak durularak lineer ve tek amaçlı modeller tercih edilmektedir.

- Literatürde, bu kapsamda analiz yapan ve karar vericilere çıktı sunan başka bir karar destek sistemi bulunmamaktadır. Literatürdeki mevcut karar destek sistemleri ya çok dar kapsamlı yada önerilen karar destek sisteminin avantajlarını içermemektedir.
- Çok amaçlı modelin çözümü için iki skalerleştirme metodu kullanılmıştır. İlk olarak, en çok kullanılan skalerleştirme yöntemi olan toplam ağırlıklı skalerleştirme yöntemi kullanılmıştır. İkinci metot ise Gasimov (2001) [4] tarafından önerilen konik skalerleştirme yaklaşımıdır. Bu yaklaşım, hücresel üretim sistemlerine ilk kez uygulanmıştır. Bu yaklaşımın avantajı, modelin diğer skalerleştirme yöntemleri ile tespit edilemeyen çözüm alanlarına girilebilmesini sağlamasıdır. Böylece diğer yöntemlerle tespiti zor veya imkansız olan çözümler yakalanabilmektedir.
- Önerilen karar destek sistemindeki matematiksel model, kombinasyonel yapısından dolayı NP-hard karmaşıklık sınıfında olduğu için [5], büyük boyutlu problemleri klasik yöntemlerle makul bir süre içinde ya çözemez ya uzun sürede çözer yada makul bir süre içinde çözüme ulaşamaz. Bu nedenle, bu tez çalışmasında makul bir zaman içinde karar vericilerin kullanabileceği çözümler üretebilmek için genetik algoritma metodundan faydalanılmıştır. Oluşturulan genetik algoritmanın çeşitli aşamalarında, zor problemleri daha etkili çözebilmek için çeşitli revizyonlar yapılmıştır.

BÖLÜM 2. ÜRETİM SİSTEMLERİNE GENEL BAKIŞ

Hücresele üretim sistemlerine ayrıntılı olarak değinmeden önce, modern üretim sistemlerinin gelişimine ve üretim sistemlerindeki günümüzdeki eğilimlere göz atmak faydalı olacaktır.

Üretim sistemleri belirli girdilerden; malzeme, makine ve insan kaynağı gibi çeşitli kaynakları kullanarak mal veya hizmet üreten sistemlerdir. Çoğunlukla ekonomik bir fayda hedefleyen bu sistemler, kapasite, ürün hacmi ve ürün çeşitliliği gibi birçok faktör hesaba katılarak tasarlanırlar.

Modern üretim sistemlerinin tarihi, Eli Whitney'in 1797'de, kitlesel üretim tekniklerini kullanarak Amerikan ordusu için silah üretmesiyle başladığı söylenebilir. Bu üretimden kısa bir süre sonra Amerikan ordusu, üretilen tüm silahların aynı standartta üretilmesi gerektiğini belirtmiştir. Böylece ordunun da zorlaması ile Amerika'da emeğe dayalı üretimin yerini standart ürün üretimi almaya başlamıştır [10]. Bu standart ürün üretme çabaları, Amerikan sistemi veya Amerikan üretim sistemi olarak isimlendirilmiştir [11]. Bu sistem, ilk olarak sadece askeri malzemelerin üretimi için kullanılsa da daha sonraları tüm Amerikan endüstrisi tarafından kabul görmüştür. Bu dönemde bazı uzmanların, sadece manüel işgücü kullanarak standart ürün üretiminin yapılabilmesi konusunda bazı şüpheleri vardı. Bu nedenle uzmanlar, standart ürünlerin üretimi için özel amaçlı makineler tasarlamışlardır. Bu durum, gerek emeğe dayalı üretim yapan kurumların gerekse de yüksek vasıflı işgücünün, standart ürün üretimi konusunda yetersiz kalacağına işaret etmekteydi. Sonuçta, standart ürün üretilmesi için makinelerin kullanımının kaçınılmaz olduğu anlaşılmıştır. Ancak bu dönemde, ürünlerin standart olup olmadığının tespit edilmesi de bir başka problemdi. Bu problem, ilk olarak Simeon North tarafından ortaya atılan ve daha sonra John Hall tarafından geliştirilen ve bugünkülerin öncüsü sayılan kalite kontrol araçları ile çözülmüştür. 1827'de, ilk

standardizasyona dayalı üretim yapılmıştır [12]. Daha sonraları bu üretime, hareket eden montaj hatları da adapte edilmiştir [13].

Standart ürün üretiminin ilk dönemlerinde en önemli problemlerden biri dokümantasyondur. Daha önceleri ustaların bilgi ve deneyimine bağlı olan üretim, bu dönemde dokümente edilen spesifikasyonlar ile yapılmaya başlanmıştır. Bu spesifikasyonlar, “atölyelerde ustaların yeteneklerine ve deneyimlerine bağlılığı azaltan” Taylor prensiplerine giriş için ilk adım sayılır [12]. Ancak 20. yüzyılın başlarında bile, fabrikalarda yetenekli ustaların rolleri tam olarak bitmemiştir. Çünkü bu dönemde bazı yetenekler dokümente edilemiyordu.

Taylorizm, 19. yüzyılın sonlarında ve 20. yüzyılın başlarında, fabrikalarda daha yüksek ve daha verimli çıktılar elde etmek için Amerikalı mühendis F. W. Taylor tarafından ortaya atılmış bir iş yeri düzenleme yöntemidir. Taylorizm ile, ustalar tarafından yürütülen bazı faaliyetlerin aşamalandırılması ve iş bölümü kavramları ortaya atılmıştır [14]. Ayrıca Taylorizm, standart iş performansı, zaman ve hareket etüdü ve becerilerin dağıtımı gibi alanlarda işlerin standardize edilmesini amaçlamıştır. Bu dönemden itibaren Taylor’un bilimsel yönetim prensipleri, iş ve işçi arasındaki ilişkiyi tanımlamak için bir standart haline gelmiştir.

20. yüzyılın başlarında, Henry Ford’un kurduğu kitlesel üretim sistemi ile modern üretim sistemlerinin kurulduğu varsayılır. Bu dönemde Henry Ford, Taylorizm’in prensiplerini teknolojik gelişmelerle kombine ederek bilimsel yönetimi pratik hayatta başarı ile kullanmıştır [12]. 1913’te Ford, “kitlesel üretim sistemi” olarak adlandırılan ilk resmi üretim sistemini Highland Park tesisinde kurmuştur [11]. Ford tarafından bu üretim sistemine “Fordist üretim prensipleri” adı verilen prensipler aktarılmıştır. Bu prensiplere göre, üretimde kullanılan zincirlerin ve konveyörlerin hepsi standart olmalıdır. Tüm stoklar, standart boyutlarda gelmelidir. Ayrıca, standart hale getirilen detaylı planlar atölyelere asılmalı ve böylece bu planları aramak için zaman kayıpları önlenmelidir. Fordist standardizasyonun temeli, sadece tek bir standart ürünün üretimine dayanmaktaydı [14]. Tek ürün üretimi, standart parçaların kullanımını kolaylaştırmıştır. Böylece otomobillerin kitlesel üretimi imkanı hale

gelmiştir [11]. Henry Ford, kitlesel üretim ile Model-T adıyla, tek şase tipi, tek renk ve diğer tüm özellikleri aynı olmak üzere otomobil üretimine başlamıştır.

Ford tarzı üretimin merkezinde, 1913 yılında tanıtılan ve sürekli bir akışa izin veren hareketli montaj hatları vardı. Ford'un bu hatları kullanmasının nedeni, işçi hareketlerini azaltmak istemesindedir. Böylece modern seri üretim sistemlerinin temelleri de atılmıştır. Henry Ford'un bu dönemde söylediği "isteyen herkes isteği renkte arabaya sahip olabilir, o renk siyah oldukça" sözü bu dönemin üretim özelliklerini vurgulamaktadır. Bu dönemde, müşteri talep veya beklentilerine göre değil, üretici arzına göre üretim yapılmaktaydı. Çünkü üreticiler, rakiplerinin olmamasından dolayı ürettikleri her ürünün satılacağını bilmektedirler. Bu zamana kadar, herhangi bir üretim sistemi için standartlar belirlenip bir sisteme adapte edilmediği için, kitlesel üretim sistemlerinin ilk modern üretim sistemleri olduğu söylenebilir [12]. Ford'un kitlesel üretim sistemi, ilk olarak otomobil endüstrisine entegre edilmiştir. İkinci Dünya Savaşı'ndan sonra havacılık sanayine de başarıyla uygulanmıştır.

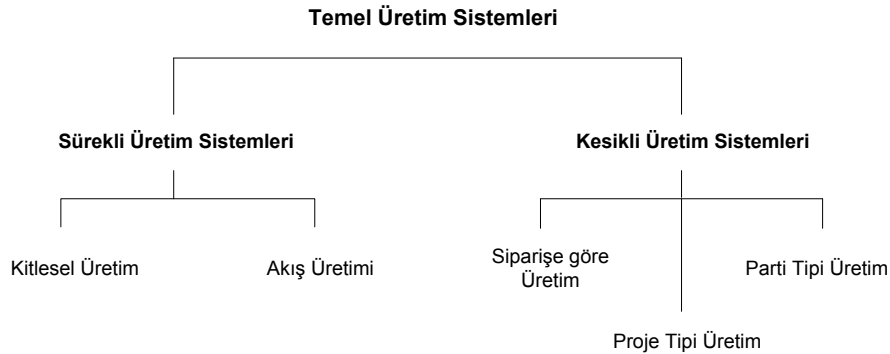
1925 yılından sonra Japonya da modern üretim sistemleriyle otomobil üretimine başlamıştır. Japonya'nın üretim sistemi, Amerikan kitlesel üretimine dayanmakla birlikte birebir aynısı değildi. Japonya'da Ford'un kitlesel üretiminin kısmi etkisi 1940 yılına kadar devam etmiştir [15]. Ford'un kitlesel üretimine karşı emeğe dayalı üretimin esnekliği, 1950 yılından sonra Toyota üretim sisteminin doğuşuna neden olmuştur. Kitlesel üretimin bazı dezavantajları vardı. Özellikle ekonomik durgunluk dönemlerinde stoğa üretim yapılmakta ve bu durum iflaslara neden olmaktaydı. Bu sorun, Toyota üretim sistemine ek olarak tam zamanında üretim ve parti üretimi gibi kesikli üretim sistemleri fikrinin de doğmasına neden olmuştur.

1960'lı yılların ortasında, endüstride rekabet artmıştı. Bu dönemde, maliyet ilk planda iken kalite ikinci planda kalmıştır. Bununla birlikte rekabet iyice arttıkça, müşteriye hızlı teslim de önemli bir kriter haline gelmiştir. Bu kriter, yeni bir üretim sistemi olan esnek üretim sistemlerinin doğmasına neden olmuştur. Esnek üretim sistemleri, üreticilere atık olma özelliği katmıştır. Böylece Ford'un kitlesel üretim sisteminin tek ürün anlayışına karşı müşteriye göre ürün anlayışı üreticiler arasında

yerleşmeye başlamıştır. Kişiyeye özgü ürünlerin üretilmesi, 1980'li yıllardan sonra bilgisayar destekli imalat teknolojilerinin de gelişmesi ile birlikte hız kazanmıştır. Bu teknolojiler sayesinde, kısa süre içinde çok değişik ürünler üretime alınabilir hale gelmiştir. Bu yaklaşım, sipariş göre üretim veya diğer adıyla atölye tipi üretim sisteminin de popüler olmasına neden olmuştur.

Günümüzün üretim sistemleri, her türlü müşteriyi tatmin etmek üzerine kurulmuştur. Bu nedenle, bugünün üretim sistemleri çok çeşitli ürünleri üretme becerisine sahip olmuştur. Çeşitli müşterileri tatmin etme amacına rağmen bazı ürünlere olan aşırı talep, kitlesel üretimi de gerektirebilmektedir. Günümüzde bazı sektörlerde, Ford'un kitlesel üretiminin bir benzeri, seri üretim sistemi adı ile halen kullanılmaktadır.

Modern üretim sistemlerinin gelişimine kısaca değinildikten sonra günümüzde yaygın olarak kullanılan üretim sistemleri incelenebilir. Günümüzde kullanılan temel üretim sistemleri, aşağıdaki Şekil 2.1'deki gibi sınıflandırılabilir.



Şekil 2.1. Temel üretim sistemlerinin sınıflandırılması [16]

Sürekli üretim sistemleri ile, otomatik makinelerin ve akışı sağlayan hatların bulunduğu bir üretim ortamında benzer veya aynı ürünlerin/parçaların büyük hacimli üretimleri yapılır [16]. Kesikli üretim sistemleri ile de, çok amaçlı makineler ve yüksek vasıflı işgücü ile az sayıdaki özel ürün veya parçalar imal edilir. Sürekli ve kesikli üretim sistemlerinin oluşturduğu temel üretim sistemlerine aşağıdaki başlıkta ayrıntılı olarak değinilmiştir.

2.1. Temel Üretim Sistemleri

Günümüzün endüstrisi, müşteri talep ve beklentilerini dikkate alarak üretim yapmaktadır. Bu yaklaşım, kesikli üretim sistemlerinin ve müşteriye özgü ürün kavramının gelişmesine neden olmuştur. Bununla beraber, 20. yüzyılda hızla artmaya başlayan nüfusun ihtiyaçlarını karşılamak için petrol ve gıda gibi bazı ürünlerin uzun dönemli ve büyük hacimli üretimleri gerekmektedir. Bu gereklilik sürekli üretim sistemlerinin gelişmesine neden olmuştur. Ayrıca yaşanan teknolojik gelişmeler, üretim sistemlerine yeni anlayışlar getirmiş böylece üretimde kalite, hassasiyet, hız gibi kavramlar ön plana çıkmıştır. Bu gelişmeler dikkate alındığında, günümüzün temel üretim sistemleri aşağıdaki iki başlıkta incelenebilir.

2.1.1. Kesikli üretim sistemleri

Kesikli üretim sistemleri, siparişe göre üretim, parti tipi üretim ve proje tipi üretim olmak üzere 3'e ayrılır [16]. Bu üretim sistemlerinin en önemli avantajı, ürün esnekliğidir. Bununla beraber, çizelgelemenin zor olması, yüksek hazırlık süreleri ve süreç içi stok bu üretim sistemlerinin dezavantajlarındandır [17].

Kesikli üretim sistemlerinin günümüzde en yaygın görülen türü, siparişe göre üretim sistemleridir. Siparişe göre üretim sistemleri (atölye tipi üretim sistemleri de denir), müşteri isteklerinin dikkate alınarak çok farklı ürünlerin üretilebildiği üretim sistemleridir [6]. Bu üretim sistemlerinde, zaman, miktar ve kalite bakımından müşterinin özel olarak belirlediği bir ürün üretilir. Bu nedenle, her ürüne göre özel rotalama işlemleri yapılır [17]. Çok sayıdaki farklı ürünün üretilebilmesi için, bu üretim sistemlerinin farklı ürünleri işleyebilen universal (çok amaçlı) makinelerle donatılması gerekmektedir.

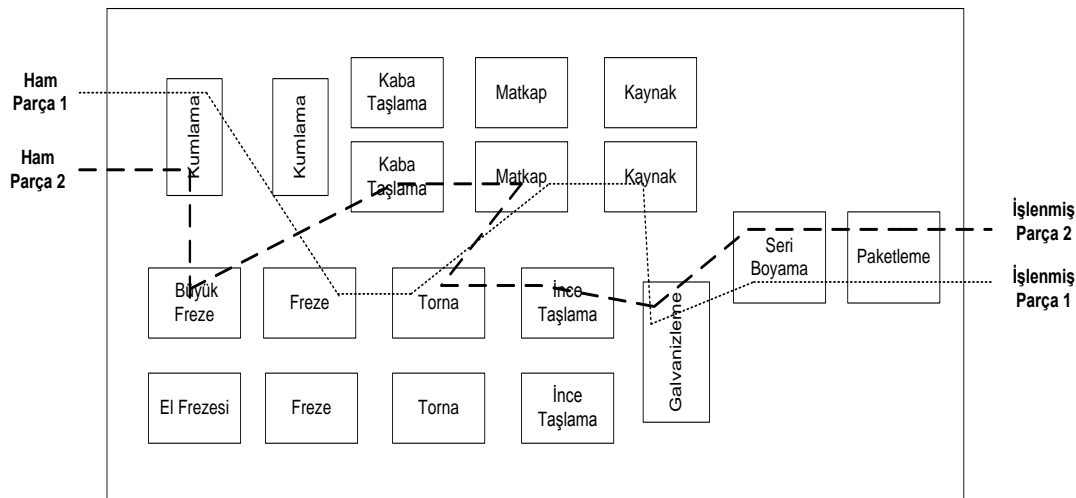
Siparişe göre üretim sisteminin en önemli özellikleri aşağıdaki gibidir:

- Bu üretim sistemi, ürüne özgü bir rotayı takip eden farklı makinelerden oluşmuş iş süreçlerinden oluşur.

- Bu üretim sisteminde, işler makineden makineye taşınır. Bu taşımalarından dolayı zaman kayıpları oluşur.
- Yeni bir ürün çeşidinin üretilmesi için set-up denilen hazırlık süresine ihtiyaç vardır [7]. Üretilen ürün çeşidi sayısının fazla olması, bekleme zaman kayıplarına neden olur.
- Talepler genelde düzensizdir. Talebin düzensiz oluşu, iş-gücü ve makine verimliliğini düşürür.
- Atölyelerde, çeşitli işlemleri yapabilecek çok sayıda universal makineye ihtiyaç vardır. Makine çeşitliliği, üretilen ürün çeşidinde etkilidir.
- Bu üretim sistemi, vasıflı işgücüne ihtiyaç duyar.

Siparişe göre üretim sistemi, gelen bir talebin süreç (ürün) özelliklerinden az etkilenirken, bu talebin miktarından veya hacminden daha fazla etkilenir. Buna göre, az veya orta hacimle sipariş verilen yeni özelliklere sahip bir ürün kolaylıkla üretime alınırken, yeni veya mevcut bir ürün için yüksek hacimde talep gelmesi durumunda üretim sisteminin siparişi yetiştirememesi durumu ortaya çıkabilir.

Siparişe göre üretim sistemlerinin, ürün esnekliği avantajı yanında tesis yerleşiminin bu esnekliğe cevap vermemesinden dolayı parçaların makinelerde aşırı dolaşımı, süreç içi yüksek stok ve yüksek bekleme süresi gibi önemli dezavantajları da vardır. Özellikle seri üretimde olduğu gibi ardıl işlem sıralarının olmaması, siparişe göre üretimde uzun çevrim sürelerine neden olur.

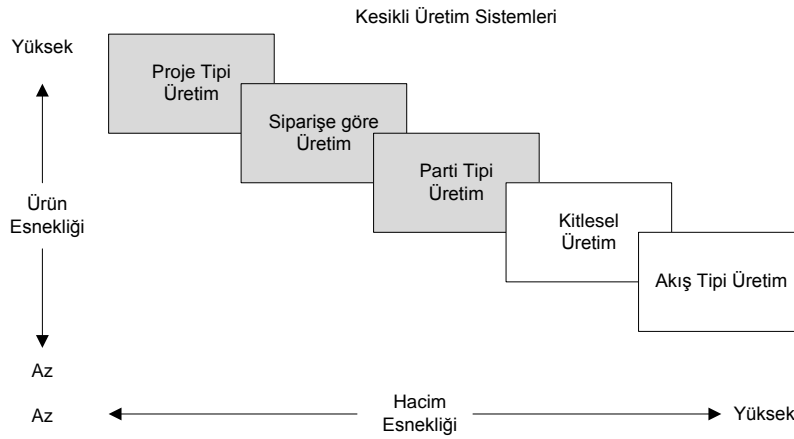


Şekil 2.2. Siparişe göre üretim yapan bir imalatçının tesis yerleşimi

Yukarıda sunulan Şekil 2.2’de, siparişe göre üretim yapan bir yedek parça imalatçısının tesis yerleşim planı ve iki parçanın bu planda izledikleri rotalar görülmektedir. Şekil 2.2’ye göre ham parça 1 ve ham parça 2 sisteme girmekte ve işlenmiş parçalar olarak sistemden çıkmaktadır. Bu şekilden de görüldüğü gibi, iki parçanın izlediği rotalar farklıdır. Ayrıca bu parçaların uğramadıkları (işlenmedikleri) makine tezgahları da vardır. Parçaların, işlem sıralarına göre dizilmemiş makine hücreleri arasında dolaşması, gezilen yolu uzatmaktadır. Bu durum daha önce de belirtildiği gibi siparişe göre üretim sistemlerinin en büyük dezavantajlarından biridir.

Proje tipi üretim ve parti tipi üretim, kesikli üretimin diğer türleridir. Proje tipi üretimde, kompleks ve genelde benzersiz bir ürünün üretimi gerçekleşir [17]. Bu üretim sistemi, üretim süreçleri ürüne özgü olarak tasarlandığı için iyi bir proje yönetimi gerektirir. Proje tipi üretim sisteminde, iyi tanımlanmış iş tanımları ve kaynakların zamana göre planlanması, bu üretim sisteminin başarısında önemli bir rol oynar. Parti tipi üretim sistemi, benzer ya da aynı cinsten ürünlerin orta hacimli ve orta çeşitli üretimi için kullanılan bir üretim sistemidir. Bu üretim sisteminde, talepler partiler halinde üretilir. Parti tipi üretim sisteminde talepler, siparişe göre üretim sistemine göre daha sürekli ancak daha az çeşitlidir. Bu bakımdan parti tipi üretiminin, seri üretimle siparişe göre üretim arasında bir karma üretim sistemi olduğu söylenebilir.

Kesikli üretim sistemlerinin ürün ve hacim esneklikleri bakımından kullanım durumları, aşağıda sunulan Şekil 2.3’te koyu renkle (gri) gösterilmiştir. Şekil 2.3’e göre, proje tipi üretim sistemi, en yüksek ürün esnekliğine sahip olan üretim sistemidir. Bunun anlamı, çok farklı üretim faaliyetlerinin proje tipi üretim ile yapılabilmesidir. Siparişe göre üretimde, ürün esnekliği proje tipi üretime yakınen, proje tipinden farklı üretim hacminin daha büyük olmasıdır. Proje tipi üretimler, genelde tek seferlik ve benzersiz üretimleri içerirken, siparişe göre üretimde hem üretilen hacim büyüktür hem de tekrarlı üretim olabilmektedir. Parti tipi üretim, kesikli üretim ve sürekli üretimin avantajlarını içerdiği için, parti tipi üretime karma bir üretim sistemidir de denilebilir.



Şekil 2.3. Kesikli üretim/imalat sistemlerinin ürün ve hacim esneklikleri bakımından kullanım durumları [18]

2.1.2. Sürekli üretim sistemleri

Sürekli üretim sistemlerinin en önemli avantajları, hacim esnekliği, kısa çevrim süreleri ve düzenli malzeme akışıdır. Bununla beraber, ürün çeşidi arttıkça yüksek maliyetli yerleşim problemleri ortaya çıkmaktadır.

Sürekli üretim sistemleri, 20. yüzyılın başından beri en yaygın olarak kullanılan üretim sistemi olmuştur [8]. Bunun en büyük nedenleri, kısa süre içinde az çeşitteki ve büyük miktarlardaki ürünün üretilmek istenmesi, beklemlerin ve ara stokların azaltılmak istenmesidir. Bu üretim sisteminde parçalar veya hammaddeler seri hatlar üzerinde istasyondan istasyona aktarılarak, son istasyona tamamlanmış ürün olarak gelirler. Eğer bu istasyonlar üzerindeki işlem süreleri kesin veya kesine yakın bir derecede biliniyorsa, istasyonlar boyunca dengelenmiş işlerden oluşan bir hat oluşturulabilir [8]. Dengelenmiş bir üretim hattında istasyonlar, işledikleri parçaları bir sonraki istasyona eşit sürede teslim ederler. Böylece düzenli bir akış meydana gelir. Ancak gerçek hayatta, istasyonlar arası teslim süresi çoğu kez tam olarak eşit değildir veya eşitlenemez. Bu ise, boşta bekleyen istasyonların oluşmasına neden olduğu gibi darboğazlara da neden olabilir. Bu problemlerin etkisini azaltmak için istasyonlar arasında tampon stoklar oluşturulur.

Sürekli üretim sistemlerinin en önemli avantajları, üretimin kontrolünün kolay olması ve ürün çeşitliliğinin az değişmesidir. Ayrıca bu üretim sistemlerinde, ürünlerin bir istasyondan bir sonraki istasyona olabildiğince hızlı aktarılması sağlanarak yüksek üretim oranları elde edilebilir [9]. Bu avantajlara ek olarak sürekli üretim sistemlerinin en önemli özellikleri aşağıdaki gibidir:

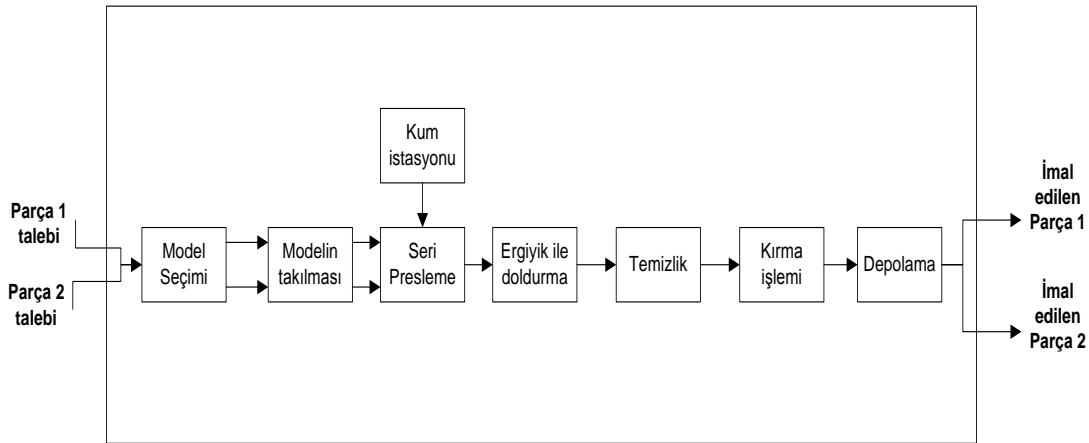
- Bu üretim sistemi, parçaların sabit bir rota ile çeşitli istasyonlara uğradığı iş süreçlerinden oluşur.
- Sabit işlem rotaları, parça dolaşımını minimize eder.
- Bu üretim sisteminde işler, istasyondan istasyona akıcı bir şekilde taşınır. Bu akıcılık, bekleme zamanları dolayısıyla oluşan zaman kayıplarını azaltır.
- Ürün çeşidi az olduğu için hazırlık süreleri için bekleme ya çok kısa yada hiç yoktur.
- Talepler genelde düzenli ve sürekli dir. Talebin sürekli oluşu iş-gücü ve makine verimliliğinin yüksek olmasını sağlar.
- İstasyonlarda ürün için özel olarak tasarlanmış makineler, ürünün akışına göre bir hat oluşturacak şekilde sıralanırlar. Özel olarak tasarlanmış makineler, sadece belirli ürünlerin üretilmesinde kullanılır.
- Bu üretim sisteminde, vasıflı işgücüne ihtiyaç kesikli üretime göre daha azdır.

Sürekli üretim sistemleri, kitlesel üretim ve akış tipi üretim olmak üzere 2'ye ayrılmaktadır [16]. Kitlesel üretim sistemi (seri üretim olarak ta bilinir), kesikli talebi olan parçaların/ürünlerin akıcı bir süreç kullanılarak büyük hacimlerle üretilmesidir. Bu üretim sisteminde makineler, bir hat boyunca sıralanır. Ürün ve süreç standardizasyonu vardır ve tüm parçalar aynı rotayı izler. Kitlesel üretim sisteminin kesikli üretim sistemleri ile en önemli benzerliği, talebin uzun vadede kesikli olmasıdır [19]. Akış tipi üretim sistemi de kitlesel üretim gibi operasyonların sırasına göre bir hat boyunca uzanır. Akış tipi üretim sisteminin kullanılması için iki önemli sebep vardır. Bunlardan ilki, süreç veya teknolojik gerekliliktir. Petrol, çimento, kağıt ve çelik gibi bazı üretim türleri, ürün yapısı ve teknik gerekliliklerden dolayı sürekli bir akışa sahip olmalıdır. İkinci sebep ise, yüksek üretim hacmidir. Petrol gibi talebi yüksek olan ürünlerin sürekli üretilmesi gereklidir [20]. Akış tipi üretim sisteminde ürünün değişkenliği çok azdır ve genelde tek tip ürün üretilir. Bu üretim

tipinde, ürün tipinin değişmesi çok yüksek yatırım maliyetine neden olur. Kitlesel üretim ile akış tipi üretim arasındaki en önemli fark, akışın sürekliliğidir. Ayrıca kitlesel üretim, az da olsa kesikli üretimin özelliklerini barındırırken, akış tipi üretimde kesikli üretimin özelliklerini görmek çok zordur.

Sürekli üretim sistemleri, talep miktarından az etkilenirken, ürün esnekliğine karşı ya çok az tepki verir ya da hiç tepki vermezler. Bu üretim sistemlerinde ürüne gelen talep miktarının değişmesine, hattın hızı ayarlanarak cevap verilir. Ancak yeni özelliklere sahip bir ürünün üretime alınması, hattın yeniden düzenlenmesini gerektirebilir.

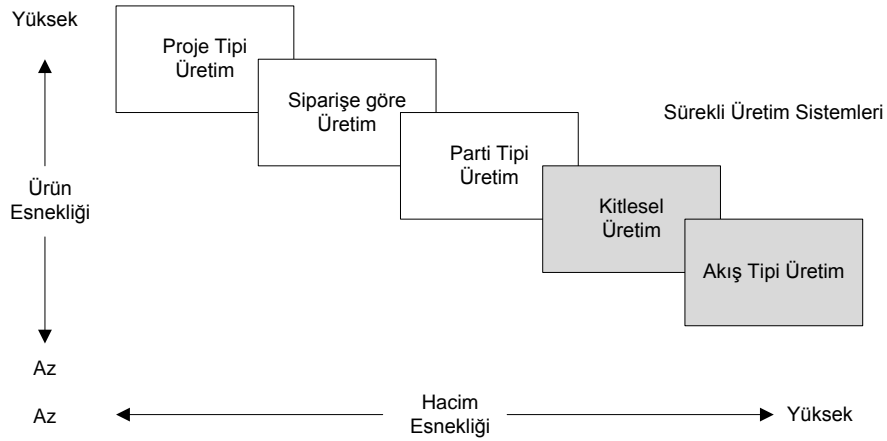
Sürekli üretim sistemlerinin, hacim esnekliği avantajı yanında hatların dengeleme problemleri, tampon stok bulundurma maliyetleri ve yeni ürün üretimi için hat düzenleme gerekliliği gibi dezavantajları da vardır. Kesikli üretim sistemlerinde olduğu gibi universal makinelerin olmayışı, yeniden düzenleme maliyetlerinin veya hazırlık sürelerinin fazla olmasına neden olur.



Şekil 2.4. Kitlesel üretim yapan bir döküm firmasının tesis yerleşimi

Şekil 2.4'te otomobil yan sanayisi için kitlesel üretim yapan bir döküm firmasının tesis yerleşimi görülmektedir. Bu firma, tüm otomobillerde ortak bulunan bir parçanın iki farklı çeşidi için üretim yapmaktadır. Bu firmadaki seri üretim hattı, belli ağırlık ve hacimdeki ürünlerin üretimi için kurulmuş, sınırlı kapasiteye sahip bir hattır. Ürünlerin ağırlıkları ve hacimleri değiştiğinde, bu üretim hattının ilk dört

istasyonunun değişmesi gerekecektir. Ürün esnekliğinin az olması, sürekli üretim sistemlerinin en büyük dezavantajlarındandır.



Şekil 2.5. Sürekli üretim/imalat sistemlerinin ürün ve hacim esneklikleri bakımından kullanım durumları [18]

Şekil 2.5'te, sürekli üretim sistemlerinin diğer üretim sistemleri içindeki yeri, koyu renkle (gri) gösterilmektedir. Bu şekilden görüldüğü gibi kitleysel ve akış tipi üretimin hacim esnekliği yüksek iken ürün esnekliği azdır.

2.2. Üretim Sistemlerinde Günümüzdeki Eğilimler

Ford'un kitleysel üretim sisteminin endüstrideki etkisi, 20. yüzyılın ikinci yarısına kadar yoğun bir şekilde hissedilmiştir. Bununla birlikte İkinci Dünya Savaşı'ndan sonra kurulan ekonomik düzen, bir çok yeni üreticinin piyasaya girmesine neden olmuştur. Sayısı artan üreticiler arasında rekabetin artması, kaliteli, düşük maliyetli ve müşteri odaklı ürünlerin piyasaya sürülmesine neden olmuştur. Bu dönemde müşteriler, Ford'un düşündüğü gibi tek tip ürünleri satın almaya mahkum değildi. Ayrıca bu dönemde müşteri çeşitliliğinin artması, kitleysel üretim sistemlerinin etkisinin ve verimliliğinin azalmasına neden olmuştur.

1960'lı yıllardan sonra pazarın iyice karmaşıklaşması, pazar paylarının küçülmesi ve rekabetin artması; grup teknolojisi, esnek üretim sistemleri ve tam zamanında üretim sistemi gibi yeni üretim stratejilerinin doğmasına neden olmuştur. Bu stratejilerin kullanılmasının temel amaçları, üreticilerin esnek üretim operasyonları ile farklı

pazarları tatmin etmek istemeleri, üretimdeki atıklık ihtiyacı ve üreticilerin gereksiz faaliyetleri elimine ederek maliyet avantajı kazanmak istemeleridir. Bu bakımdan yeni stratejilerin en önemli avantajı rekabette avantaj sağlamak olmuştur [21].

1980'li yılların başında rekabet her zamankinden daha şiddetli olmaya başlamıştır. Üreticiler bu ortamda hayatta kalabilmek için ya yeni ürünler üretmişler veya organizasyonlarının verimliliğini artırmaya çalışmışlardır [22]. Bu dönemde bilgisayarların da gelişimi ile birlikte, verimliliği artırmak, karmaşık üretim operasyonlarını yönetmek ve çeşitli masrafları azaltmak için bilgisayarla bütünleşik imalat sistemleri (CIM) ortaya çıkmıştır. Bilgisayarla bütünleşik imalat sistemleri, bilgisayar desteği sayesinde esnek üretim sistemlerinin ve esnek imalat hücrelerinin kullanım etkinliğini artırmıştır. 1980-2000 yılları arasında üretimde bilgisayar destekli üretim sistemlerinin kullanımı yaygınlaşmıştır.

Günümüzde çok sayıda üretici alternatifi olmasından dolayı, müşteri davranışlarının hızlı bir şekilde değişebileceği bir pazar yapısı oluşmuştur. Bu pazardaki üreticiler, hayatta kalabilmek için hem farklı müşteri talep ve beklentilerine göre hem de rakiplerinin stratejilere göre üretim yapmak zorundadırlar. Aksi halde bu üreticiler müşterilerini kaybedeceklerdir. Üreticiler günümüzün üretim sistemleri ile bu değişken ve güçlü rekabetin olduğu pazarda, internet, bilgi teknolojileri ve zeki sistemleri kullanarak daha esnek ve atık bir yapıya kavuşmayı amaçlamaktadırlar.

Tablo 2.1. 20. yüzyıldan günümüze kadar üretim sistemlerinin gelişimi

Yıl	Üretim Sistemi	Standart Ürün ↓ Özelleşmiş Ürün
1913	Kitlesel Üretim Sistemi	
1960	Grup Teknolojisi, Esnek Üretim Sistemleri, Tam Zamanında Üretim Sistemi	
1980	Bilgisayar Bütünleşik Üretim	
2000-2013	Zeki Üretim Sistemleri	

Yalın üretim, tam zamanında üretim sistemi, esnek üretim sistemleri, hücresel üretim sistemleri, parti tipi üretim sistemi ve bilgisayar bütünleşik üretim sistemleri sağladıkları avantajlar sayesinde günümüzdeki en popüler üretim sistemleri

olmuşlardır. Bilgisayar desteği ve otomasyon sayesinde, bu sistemlerin yönetimi de kolaylaşmıştır. Bu üretim sistemlerinin ortak yönleri, yeniden yapılandırılmalarının kolay olması, orta hacimli üretime yönelik olmaları ve değişikliklere yüksek derecede uyum gösterebilmeleridir. Bu tez çalışmasında, bu üretim sistemlerinden hücresele üretim sistemleri üzerine odaklanılmıştır.

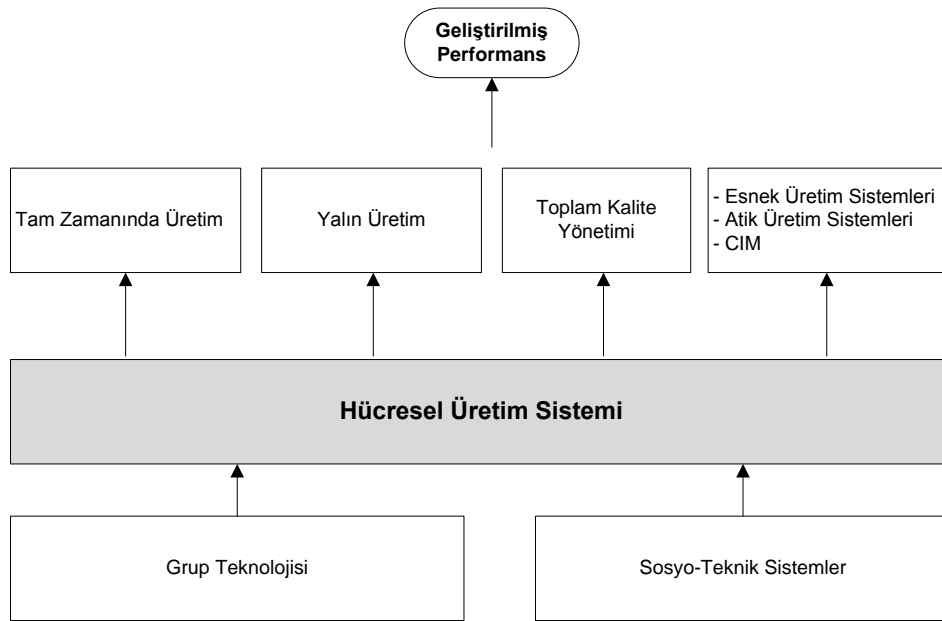
BÖLÜM 3. HÜCRESEL ÜRETİM SİSTEMLERİ

Günümüzün rekabetçi pazarlarındaki müşteriler, ihtiyaç duydukları her ürüne istedikleri zamanda ve istedikleri miktarda sahip olabilmektedirler. Daha önceleri üreticiler tek veya birkaç tip ürün üretmekte, müşteriler ise bu ürünleri tam olarak sevmeseler de almak zorunda kalırlardı. Günümüzün müşterileri ise üreticilerden, daha çok çeşitte ve daha özelleşmiş ürünler beklemektedirler. Bu müşteri davranışı, üreticiler arasındaki küresel rekabeti artırmıştır. Bu rekabet, üreticilerin kısa süre içinde daha rekabetçi ürünleri piyasaya sürmelerine neden olmuştur. Ayrıca rekabette öne çıkmak isteyen üreticiler, müşteri talep ve beklentilerini tatmin etmek için günümüzün kompleks ürünlerini küçük hacimlerde ve daha kısa sürede üretme çabasıdadırlar [23].

Siparişe göre üretim ve kitlesel üretim gibi geleneksel üretim sistemleri, günümüzün üretim ihtiyaçlarını karşılama konusunda bazı dezavantajlara sahiptir. Kitlesel üretim her ne kadar düzgün bir malzeme akış sağlasa da, ürün esnekliğine sahip değildir. Siparişe göre üretim sistemi de, ürün esnekliğine sahip olmasına karşın uzun malzeme akışına ve zayıf hacim esnekliğine sahiptir [23]. Bununla beraber genel olarak bu geleneksel üretim sistemlerindeki sorunlar, kaynakların eksik kullanımı, düşük üretkenlik, teslim sürelerinde gecikme ve pazardaki ürün değişimine hızlı cevap verememedir. Kendi mevcut üretim sistemleri ile bu sorunlara çözüm üretemeyen üreticiler rekabetçi pazarda müşteri kaybetmektedirler. Esnek ve atik üretimin özelliklerini barındıran grup teknolojisi, bu rekabetçi pazar ortamındaki üreticiler için iyi bir çıkış yolu olmuştur.

Geleneksel bir yaklaşım olan grup teknolojisi, tam zamanında üretim (Just in Time-JIT), toplam kalite yönetimi, yalın üretim, bilgisayar bütünleşik üretim sistemi (Computer Integrated Manufacturing-CIM) ve esnek imalat sistemleri (Flexible Manufacturing Systems-FMS) gibi yeni yaklaşımlarla sıkı sıkıya bağlı olduğu gibi

ayrıca bu yaklaşımlar içinde de önemli bir rol oynamaktadır [24]. Grup teknolojisi yaklaşımının bir uygulaması olan hücresel üretim sistemleri (Cellular Manufacturing Systems-CMS), grup teknolojisinin tesis yerleşimine uyarlanmış halidir [25]. Hücresel üretim sistemleri, kitlesel üretim sisteminin avantajlarını içermesinden dolayı, siparişe göre üretim sistemleri için bir alternatif olabileceği düşüncesiyle ortaya çıkmıştır. Grup teknolojisi gibi hücresel üretim sistemleri de yeni üretim yaklaşımları ile sıkı sıkıya bağlıdır.

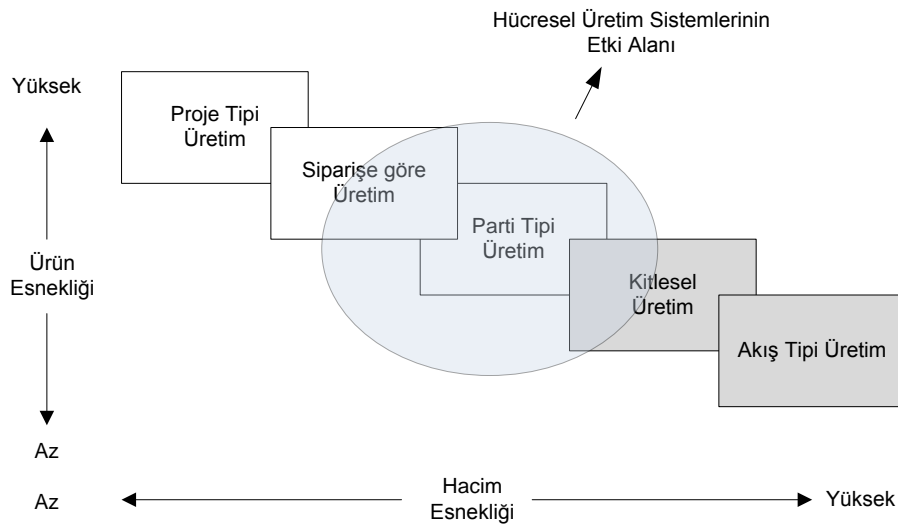


Şekil 3.1. Hücresel üretimi sistemi ile diğer yaklaşımlar arasındaki ilişki [26]

Şekil 3.1’de görüldüğü gibi, grup teknolojisi ve sosyo-tekniik sistemler, hem sosyal hem de teknik prensiplerle hücresel üretim sistemlerini desteklemektedirler. Sosyo-tekniik sistemler, işyerlerinde veya organizasyonlarda insan ve teknoloji arasındaki ilişkiyi tanımlayan yaklaşımlardır [23]. Grup teknolojisi ise hücresel üretimin temel iş yeri düzenleme yaklaşımıdır. Hücresel üretim sistemleri, bazı yeni üretim yaklaşımlarının gerçekleştirilmesi veya performanslarının artırılması için temel yapı durumundadır.

Hücresel üretim sistemleri, üretim hücrelerinin kullanımını gerektiren bir yaklaşımdır. Üretim hücrelerinde, benzer ürünlerin üretimi için gerekli olan işgücü ve makineler birbirine yakın olacak bir şekilde yerleştirilerek geleneksel üretim

sistemlerine göre daha iyi bir performans elde edilmesi amaçlanır [26]. Hücreyel üretim sistemleri, sadece geleneksel parti tipi üretim sisteminin üretkenliğini artırmakla kalmaz; esnek üretim sistemleri, yalın üretim, tam zamanında üretim ve bilgisayar bütünleşik üretim sistemlerinin uygun bir şekilde adaptasyonunu da sağlar [23]. Günümüzde geleneksel üretim sistemlerini hücreyel üretim sistemlerine dönüştürmek için bir çok önemli neden vardır. Bu nedenler; azaltılmış süreç içi stoklar, azaltılmış lot büyüklüğü, azaltılmış üretim süreleri, azaltılmış süreç içi işlem maliyeti, daha iyi operasyon kontrolü, artırılmış kalite, etkinlik ve esnekliktir [27].



Şekil 3.2. Hücreyel üretim sistemlerinin geleneksel üretim sistemleri içindeki yeri

Hücreyel üretim sistemlerindeki temel yaklaşım, grup teknolojisini kullanarak benzer parçaları parça aileleri olarak, ilgili makineleri de makine hücreleri olarak gruplamaktır. Bu gruplama ile, bir parça ailesinin oluşturulan üretim hücrelerinin birinde üretilmesi sağlanır. Üretim hücrelerinin oluşturulması, büyük boyutlu siparişe göre üretim sistemlerinin daha küçük boyutlu ve yönetilebilir parçalara bölünmesine imkan verir [28].

Hücreyel üretim sistemleri ile ilgili temel bilgiler sunulduktan sonra, bu üretim sistemlerinin doğuşu ve yapısını oluşturan temel parçalar hakkında ayrıntılı bilgiler verilebilir. Hücreyel üretim sistemleri, aşağıdaki başlıklarda ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir.

3.1. Hücresel Üretim Sistemlerinin Doğuşu ve Gelişimi

20. yüzyılın ilk yarısının sonlarına doğru araştırmacılar, pazar ihtiyaçlarına cevap veremeyen Ford'un kitlesel üretim sistemi yerine, yeni bir üretim sistemi arayışına girişmişlerdir. Araştırmacılar 1950'li yıllarda, benzer üretim özelliklerine sahip parçaların gruplanıp kitlesel üretime benzer bir tarzda işlenebileceği görüşü üzerine odaklanmışlardır [23]. Bununla birlikte, bu görüşün atası 1925 yılında Flanders tarafından ortaya atılmıştır. Flanders, bazı standart ürünlerin üretiminin özel olarak oluşturulmuş departmanlarda daha az taşıma ile üretilebileceğini ifade etmiştir [29, 30]. 1952'de Profesör Mitrofanov, ilk kez grup teknolojisi terimini kullanmış, 1959 yılında da "The Scientific Principle of Group Technology" isimli kitabını yayınlamıştır [31]. Ancak bazı çalışmalarda, grup teknolojisi fikrinin ilk kez 1938 yılında Sokolowski ile, bazı çalışmalara göre de Adam Smith'in (1776) işlerin ve hatların daha küçük parçalara bölünmesi yaklaşımı ile ortaya çıktığı belirtilmektedir [23].

1960'lı yıllara gelindiğinde, grup teknolojisi yaklaşımının dünya çapında kabul gören bir yaklaşım olduğu görülmektedir. 1960'lı yılların başında, parti tipi üretim sistemlerinin kompleks ve uzun olan üretim süreçleri ile ilgili problemleri çözmek için hücresel üretim sistemleri yaklaşımı önerilmiştir [32]. 1975 yılında eğitmen ve danışman John Burbidge, düşük maliyetli bir üretim sistemi tasarımı için grup teknolojisi yaklaşımını önermiştir [29]. Ayrıca Burbidge, ürün akış analizine (product flow analysis-PFA) dayalı bir fonksiyonel makine yerleşimi ile daha etkili makine grupları oluşturulabileceğini göstermiştir.

Yukarıda bahsedildiği gibi hücresel üretim sistemlerinin ortaya çıkışı, mevcut çalışmalarda bir çok araştırmacı ile ilişkilendirilmesine rağmen, literatürde kurucu olarak Mitrofanov (1959) ve Burbidge (1975) sıkça kullanılmaktadır [33].

1970'li yıllardan sonra bilgisayar destekli teknolojilerin ve esnek üretim sistemlerinin endüstriye girişi ile, hücresel üretim sistemleri dünya çapında kullanılmaya başlanmıştır. Ancak hücresel üretim sistemlerinde asıl gelişmeler 1990'lı yıllardan sonra olmuştur [26]. Bilgisayar teknolojilerinin, üretimin

vazgeçilmezlerinden olmaya başlaması ile hücresele üretim sistemlerine bu teknolojiler entegre edilmeye başlanmıştır. Böylece esnek üretim hücreleri kavramı (Flexible Manufacturing Cells-FMC) ortaya çıkmıştır. Günümüzde esnek üretim hücreleri, esnek üretim sistemlerinin bazı dezavantajlarını ortadan kaldırdıkları için sıkça tercih edilen bir yaklaşım olmuştur. Bugün esnek üretim hücreleri, esnek montaj hücreleri (Flexible Assembly Cells) ve esnek üretim hatları (Flexible Manufacturing Lines) gibi değişik adlarla farklı üretim sistemlerine adapte edilmektedir [34]. Günümüzün değişken pazar ortamına iyi uyum sağlayan hücresele üretim sistemlerinin adaptasyon yeteneği sayesinde, gelecekte de popülerliğini sürdürmesi beklenmektedir.

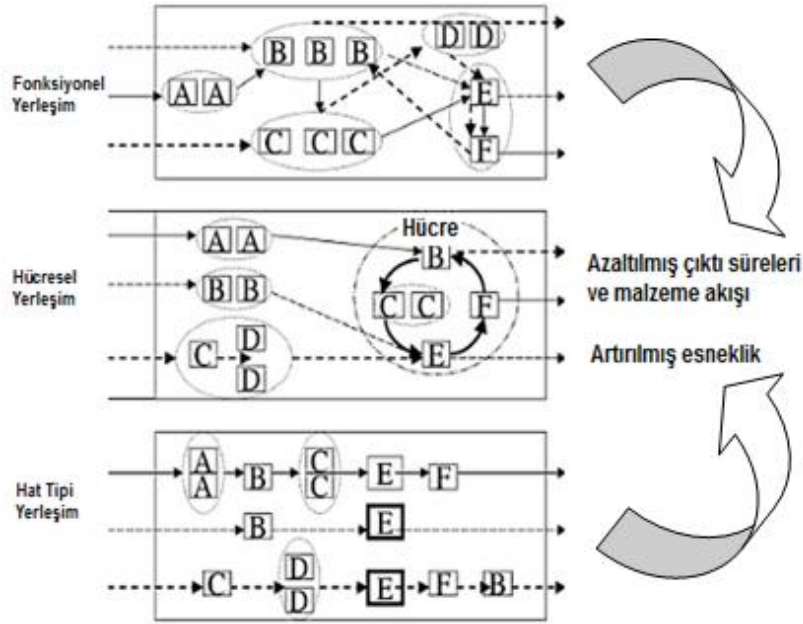
3.2. Hücresele Üretim Sistemlerinin Avantajları ve Dezavantajları

Her ne kadar hücresele üretim sistemlerinin bazı avantaj ve dezavantajlarından önceki başlıklarda bahsedilse de, bu başlık altında ayrıntılı bir inceleme yapılacaktır. Öncelikle “hücresele üretim sistemleri, hangi tip üretim ihtiyaçları için avantajlıdır?” sorusu yanıtlanmalıdır.

Literatürde, hücresele üretim sistemlerinin bir çok avantajı vurgulanmasına rağmen, bu üretim sistemi bu avantajları ancak bazı ihtiyaçların çıkması durumunda etkili biçimde gösterebilmektedir. Aşağıda verilen bazı durumlarda ise bu üretim sisteminin kullanılması dezavantaj oluşturabilmektedir.

- Üretilebilecek ürün veya parça tipinin çok, üretim miktarının tek veya çok az olduğu durumlarda,
- Üretilebilecek ürün tipinin tek veya çok az, üretim miktarının çok fazla olduğu durumlarda,
- Ürünlere gelen taleplerin sık sık aşırı dalgalı olduğu durumlarda,
- Proje tipi üretim yapılan iş ortamlarında,
- Gelen taleplerin, uzun süreli sadece kitlesel veya siparişe göre üretim özelliği gösterdiği durumlarda.

Yukarıda bahsedilen durumlarda hücreyel üretim sistemlerinin kullanılması halinde, makine ve iş gücü kullanımında dengesizlikler, aşırı yeniden yapılandırma maliyetleri, hücre yerleşiminde birden fazla aynı makineye ihtiyaç duyulmasından dolayı ortaya çıkan maliyetler, boş bekleyen hücreler ve aşırı kullanılan hücreler gibi olumsuz durumlar ortaya çıkabilmektedir [25, 35].



Şekil 3.3. Hücreyel üretime sistemine geçiş için sebepler [36]

Hücreyel üretim sistemleri, kesikli üretim sistemlerindedir. Üçüncü bölümün başında sunulan Şekil 3.2'den ve yukarıda sunulan Şekil 3.3'den de görülebileceği gibi hücreyel üretim sistemleri, siparişe göre üretim, parti tipi üretim ve kitlesel üretimin bazı özelliklerini içermektedir. Bu nedenle hücreyel üretim sistemleri, bir hibrit (karma) üretim sistemidir. Bu bakımdan ele alındığında, hücreyel üretim sistemini tercih etmek için gerekli nedenler aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Siparişe göre üretim sistemi artan talebe cevap veremiyorsa,
- Siparişe göre üretim sisteminde malzeme akış süreleri uzun ise,
- Bir kitlesel üretim sistemi, değişik ürün talebine cevap veremiyorsa,
- Bir parti tipi üretim sisteminin verimliliği düşükse, malzeme akış süreleri uzun, hacim ve ürün esnekliği kısıtlı veya yoksa,

- Ürünlere gelen talep hacimleri, belirli aralıkta aşırı olmamak kaydıyla değişkenlik gösteriyorsa,
- Ürünlere gelen talepler, bazen siparişe göre üretim bazen de kitlesel üretim özelliği içeriyorsa,
- Yönetim stratejisi olarak, uzun vadede sadece proje tipi üretim, siparişe göre üretim veya kitlesel üretim yapılmayacaksa.

Hücresele üretim sisteminin kullanılmasına karar verilmeden önce bazı avantaj ve dezavantajların göz önünde bulundurulması gereklidir. Hücresele üretim sistemlerinin bazı önemli avantaj ve dezavantajları aşağıda sunulmuştur:

Avantajlar:

- Fonksiyonel yerleşimdeki gibi uzun parça/ürün gezinti süreleri yoktur [25],
- Sürekli üretim sistemlerindeki gibi ürün esnekliği az değildir,
- Siparişe göre üretim ve parti üretimindeki gibi işlenecek parçalar belirli lotlarla bir istasyondan diğerine taşınmaz. Sürekli üretim sistemlerine benzer akıcı bir akış, üretim sisteminin etkinliğini artırır,
- Orta düzeydeki hacim ve ürün değişimine hızlı cevap verir,
- Grup teknolojisi ile üretim çizelgeleme basitleştirilir [35],
- İş gücü, bir hücre içinde üretimin tüm safhalarındaki katkısını direk olarak görebildiği için daha iyi motive olur,
- Bu üretim sistemindeki kalifiye ve motive olmuş işgücü, daha kaliteli ürünler üretir,
- Hücreler, büyük sistemleri yönetilebilir küçük sistemlere ayırır,
- Hücrelerde benzer ürün ailelerinin işlenmesi, hazırlık sürelerini (set-up) azaltır,
- Hücresele üretim sistemleri birçok yeni üretim yaklaşımının (yalın üretim, esnek üretim vb.) temelini oluşturur,
- Kriz ortamlarında talebin hacminin ve çeşidinin ayarlamasına imkan vererek, üreticilerin korunmasını sağlar.

Dezavantajlar:

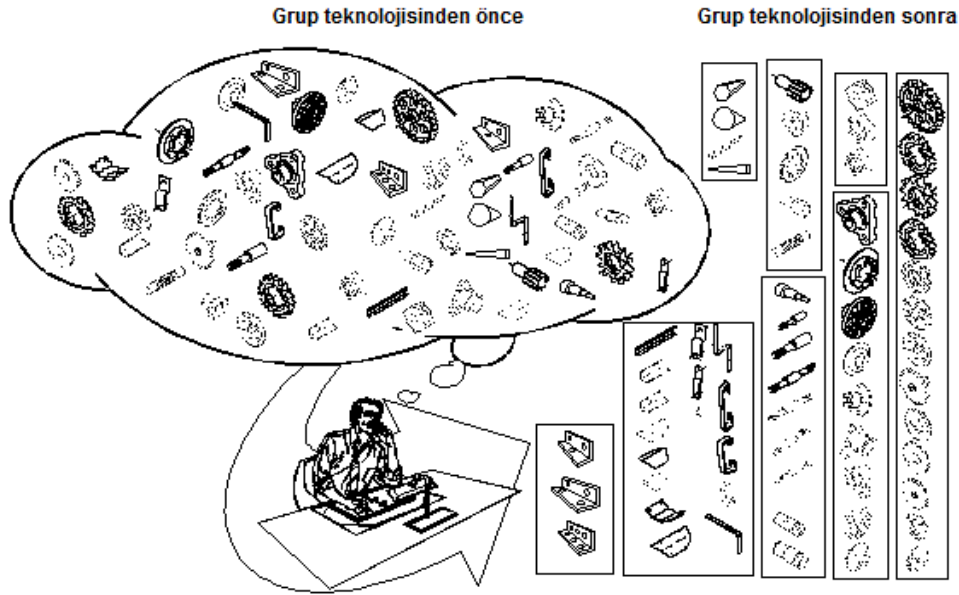
- Üretim kontrolün kolaylığı, her bir hücre içindeki hatların dengelenmesine bağlıdır,
- Hücre içindeki akış dengeli değilse, tampon stoğuna veya süreç içi stoğa ihtiyaç duyulur. Bu durum hücresele üretim sisteminin etkinliğini ve verimliliğini azaltır,
- Mevcut üretim sistemlerinin, hücresele üretim sistemine dönüştürülmesi maliyetli olabilir. Benzer makinelerin birden fazla hücrede kullanılması yatırım maliyetini artırır [37],
- Ürün esnekliği, siparişe göre üretim sistemlerine göre daha azdır,
- Hücresele üretim sistemleri, daha çok düşük-orta hacimli üretimler için uygundur. Üretim hacminin aşırı artışı veya üretimin proje tipi üretime dönüşmesi, yeni yatırım maliyetlerine neden olabilir [38],
- Hücresele üretim sistemleri, fonksiyonel ve hat tipi yerleşime göre daha düşük makine ve işgücü kullanımına neden olur,
- Hücresele üretim sistemi kurmak için kapsamlı ve uzun süreli veri toplama çalışması gereklidir [25],
- Büyük sistemlerde hücreler oluşturmak için, basit ve standart metotlar yoktur, oluşturulacak sisteme göre metotlar değişkenlik gösterir,
- Ürün benzerliklerinin az olduğu durumlarda verimli değildir.

3.3. Hücresele Üretim Kavramı ve Prensipleri

Hücresele üretim sistemleri temel olarak, “benzer ürünlerin benzer biçimde üretilmesi” prensibine dayanır. Buradaki benzerlik, tasarım ve imalat özellikleri açısından benzerliği ifade etmektedir. Benzerliklere göre gruplanmış ürünler, üretim aşamasında yöneticilere büyük kolaylık sağlar. Örneğin, yöneticinin 1000 adet farklı parça ile uğraşmaktansa, 100 adet parçadan oluşan 10 farklı gruba ile uğraşması daha kolaydır [23]. Bu yaklaşım grup teknolojisinin de temelini oluşturur.

Grup teknolojisi (GT) temelde çeşitli özellikleri kullanarak benzer verileri gruplamayı amaçlar. Çok sayıdaki veriyi benzer az sayıdaki gruba dönüştürmek,

kullanıcılara daha az sayıda sınıflandırılmış veri ile işlem yapma kolaylığı sağlar. GT, üretimde parçaları parça aileleri olarak makineleri ise makine hücreleri olarak gruplayarak bu benzerlik avantajından yararlanmayı amaçlar [41]. Aşağıdaki Şekil 3.4'te grup teknolojisi yaklaşımı ile bir gruplama örneği görülmektedir.

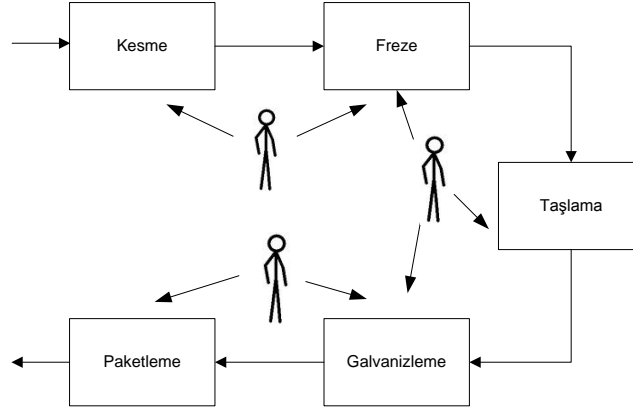


Şekil 3.4. Grup teknolojisi yaklaşımının uygulanışı [40]

Hücreyel üretim sistemleri, grup teknolojisinin üretime yönelik en önemli uygulamalarından biridir. Böylece grup teknolojisinin faydaları üretim sistemlerine aktarılmış olur [39]. Grup teknolojisi, hücreyel üretim sistemine “hücreler” oluşturularak uygulanır. Bir hücre, benzerliklerden yararlanmak için üretim ortamında oluşturulmuş bir küçük organizasyonel birimdir. Hücreler, bir ürün ailesinin bir istasyondan bir diğerine bekleme olmaksızın üretilebilmesi için düzenlenmiş makine, alet ve iş istasyonlarından oluşurlar. Oluşturulan hücreler, hem benzer parçaların beraber üretilmesini sağlarlar hem de işgücü ve makinelerin birbirine yakın yerleştirilmesini sağlayarak üretkenliği artırırılar [26]. Hücreyel üretimde kullanılan bir hücre, aşağıdaki özelliklere sahiptir [23]:

- Her hücre, özel bir ürün ailesine sahiptir,
- Her hücre, kendine ait olan ürün ailesini üretmek için gerekli olan makine ve diğer ihtiyaçlarla donatılmıştır,

- Her hücre, kendine ait bir işgücü grubu tarafından kontrol edilir,
- Her hücre, kendi çizelgeleme ve kontrolünü yapar.



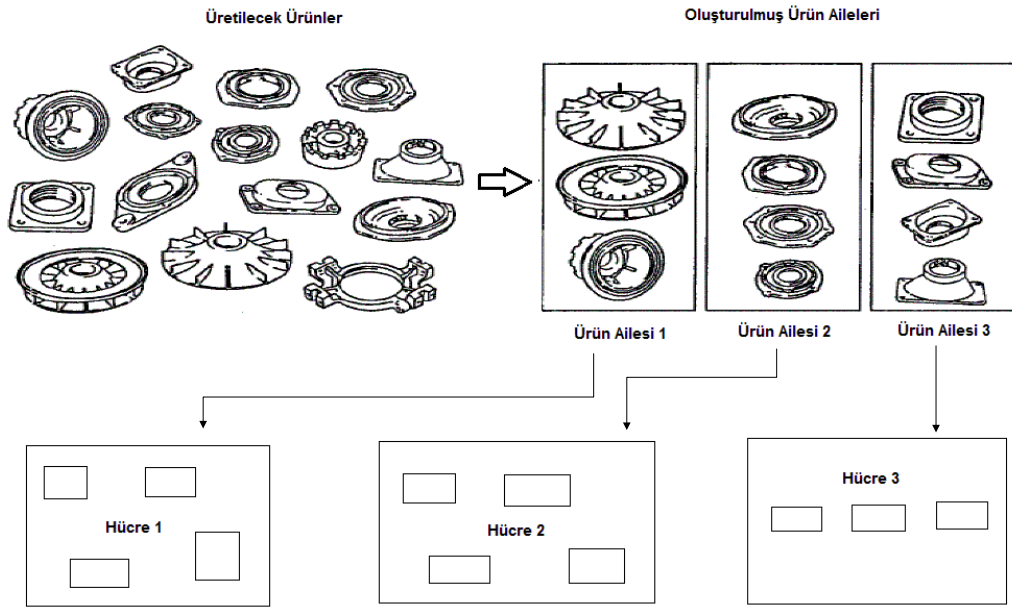
Şekil 3.5. Hücresel üretim sistemleri için U yerleşimli bir hücre örneği

Uygulamada benzer amaçlarla kullanılan çeşitli hücre tipleri mevcuttur. Bunlardan bazıları, üretim/imalat hücreleri (production/manufacturing cells), dinamik imalat hücreleri (dynamic manufacturing cells), sanal imalat hücreleri (virtual manufacturing cells), esnek imalat hücreleri (flexible manufacturing cells), montaj hücreleri (assembly cells) ve ürün odaklı hücrelerdir (product focused cells) [25].

Üretim/imalat hücreleri, ana amacı materyalleri fiziksel olarak işleyip son ürüne dönüştürmek olan klasik hücrelerdir [26]. Dinamik imalat hücreleri, klasik üretim hücrelerini dinamik pazar ortamına adapte etmeyi amaçlayan mobil makinelere sahip ve bir üretim bitince yeniden oluşturulabilecek hücrelerdir. Sanal imalat hücreleri, fonksiyonel yerleşim aynen kalmak şartıyla hücresel imalatın faydalarını gerçekleştirmek için kurulan mantıksal (sanal) hücrelerdir [42]. Sanal imalat hücrelerinde makineler fiziksel olarak yerleştirilmez. Böylece fonksiyonel yerleşimi kullanan üreticiler, hücresel üretimin avantajlarından çizelgeleme bakımından yararlanmaya çalışır. Esnek imalat hücreleri, bir merkezi bilgisayar sistemi tarafından kontrol edilen ve farklı işlemler yapabilen esnek makine (CNC vb.) ve robotlardan oluşmuş ve çoğunlukla otomatik taşıma ve işleme birimlerine sahip hücrelerdir. Esnek imalat hücreleri, grup teknolojisi tarafından oluşturulan parça aileleri içinde bulunan parçalar üzerinde farklı işlemler yapabilme yeteneğine sahip

hücrelerdir [34]. Montaj hücreleri, montaj sırasına göre bir hat üzerine yerleştirilmiş birkaç iş istasyonundan oluşur [25]. Ürün odaklı hücreler, odaklanmış teknoloji (focused technology) temeline dayanmaktadır. Buna göre ürün odaklı hücrelerde bir ürünü oluşturan parçalar, parça ailesi olarak gruplanır ve makineler bu ürünün tüm parçalarını üretmek için atanırlar [43].

Hücresel üretimin temelini oluşturan hücrelerde, bu hücelere atanmış belirli ürün ailesini işleyecek makineler bulunur. Belirli ürün ailelerini üretmek amacı ile bir hücreye çeşitli makinelerin atanması, hücresel yerleşimi (cellular layout) ortaya çıkarır. Hücresel yerleşimin fonksiyonel yerleşimden en büyük farkı ise, makinelerin sadece hücreye atanmış benzer özelliklere sahip bir parça ailesini işlemesidir [23].



Şekil 3.6. Hücelere atanmış üç örnek ürün ailesi [44]

Hücresel üretimde parça/ürün ailesi (part/product family) deyimini ile, bir makine grubu tarafından işlenecek benzer imalat ve tasarım özelliklerine sahip bir parça grubu ifade edilir. Üretim/imalat hücreleri, bu parça ailelerini işlemek için oluşturulur.

Parça ailelerinin oluşturulması ve bu parça ailelerinin üretim hücrelerine atanarak performanslarının ölçülmesi, literatürde hücre oluşturma problemleri (cell formation

problems) olarak adlandırılmaktadır [45]. Hücre oluşturma problemleri, bir hücresele üretim sistemi tasarlama çalışmasının en önemli bölümünü oluşturmaktadır. Bir hücresele üretim sistemi tasarımında temel olarak aşağıdaki aşamalar yer alır [46]:

- Süreç gereklerine göre parça ailelerinin oluşturulması,
- Makinelerin üretim hücreleri olarak gruplanması,
- Parça ailelerinin hücrelere atanması.

Hücre oluşturma problemlerini çözmek için literatürde bir çok yaklaşım önerilmiştir [47]. Farklı üretim sistemleri için farklı hücre oluşturma yaklaşımları kullanılabileceği veya kullanılması gerektiği için, her sisteme çözüm üretecek standart bir yaklaşım bulunmamaktadır. Ayrıca zamanla daha gerçekçi hücreler oluşturmak isteyen araştırmacılar, hücre oluşturma problemlerine yeni kavramlar, amaçlar ve yaklaşımlar ekleyerek mevcut modellerin gelişmesini sağlamışlardır. Öneminden dolayı hücre oluşturma yaklaşımları ana başlık olarak bir sonraki bölümde incelenmiştir.

BÖLÜM 4. HÜCRE OLUŞTURMA YAKLAŞIMLARI

Hücreyel üretim sistemlerinin tasarlanmasında en önemli aşama, üretimin yapılacağı hücrelerin oluşturulmasıdır [46]. Hücreler, belirli hücrelerde hangi parçaların hangi makineler tarafından işleneceğinin belirlenmesi ile oluşturulur. Hücre oluşturma faaliyeti sonunda, üretilecek parçalar/ürünler ve kullanılacak makineler belirli hücrelere atanmış olur. Böylece belirli ürün ailesini işlemek ile görevli çeşitli makinelerden oluşan bir hücreyel sistem yapısı elde edilmiş olur.

Hücreyel üretim sistemlerinde hücrelerin oluşturulması için günümüze kadar bir çok metot geliştirilmiş ve kullanılmıştır. Çok sayıda metot geliştirilmesinin en önemli nedenleri; üretim sistemlerinin karmaşıklaşması sonucunda daha kompleks metotlara ihtiyaç duyulması, hücre oluşturma için daha etkili metotların geliştirilmesi ve üreticiler açısından hücre oluşturmada farklı amaçların göz önüne alınmasıdır.

Aşağıdaki başlıklarda hücreyel üretimde hücre oluşturma ile ilgili temel amaçlar ve kavramlarla birlikte günümüze kadar kullanılan bazı çözüm ve değerlendirme yaklaşımları incelenmiştir.

4.1. Hücre Oluşturmada Kullanılan Temel Amaçlar

Üreticilerin ve uygulayıcıların, hücreyel üretim sistemlerinin temel avantajlarından yararlanabilmesi için (çeşitli maliyetleri, makineler arası uzaklıkları ve süreç içi stokları azaltma; kaliteyi, üretim esnekliğini ve üretim planlama ve kontrol faaliyetlerinin etkisini artırma vb.) [53] hedeflerine uygun hücreler oluşturmaları gerekmektedir. Hücreyel üretim sistemlerinin belirtilen tüm bu avantajlarından aynı anda yararlanmak, teknik olarak zor ve maliyetli olacağı gibi bazı amaçların da birbiri ile çelişecek olmasından dolayı istenmeyen çıktılarla sonuçlanacaktır.

Hücresel üretim sistemlerinin kullanıcıları, kendi ihtiyaçlarına göre tek bir amaca bağlı bir hücresel sistem oluşturabilecekleri gibi (sadece parça benzerliklerinin en büyüklenmesi gibi) birden fazla amaç kullanarak ta gerçekçi hücresel sistemler oluşturabilirler [54]. Literatüre bakıldığında hücresel üretim sistemlerinin avantajlarından yararlanmak isteyen üreticilerin ve model kurucuların, aşağıda sunulan amaçları veya bu amaçların bir kombinasyonunu sıkça kullandıkları görülmektedir:

- İstisnai elemanların (exceptional elements) sayısını minimize etmek,
- Hücre içi boşlukların (voids) sayısını minimize etmek,
- Hücrelerde üretilecek parça benzerliklerini maksimize etmek,
- Hücre içi iş yükü varyasyonunu (cell-load variation) minimize etmek,
- Hücrelerarası taşıma maliyetlerini (movement costs) minimize etmek,
- Malzeme dolaşım yolunu veya süresini minimize etmek,
- Malzeme işlem maliyetlerini (handling costs) minimize etmek,
- Optimum rotaların seçimini yapmak,
- Makine kullanımını maksimize etmek.

Bu hedeflerden istisnai elemanların ve hücre içi boşlukların minimizasyonu, birçok modelde ana hedef olarak kullanılmış ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir. İstisnai elemanlar, bir parçanın birden fazla hücre tarafından işlenmesi sonucunda ortaya çıkmaktadır. Hücresel üretim sistemlerinin faydalarını azaltan bu elemanlar, hücreler arası taşıma maliyetlerine ve işlem sürelerinin artmasına neden olurlar [55]. Hücre içi boşlukların olması, hücreye atanan bir parçanın hücrede bulunan bir veya daha fazla makine tarafından işlenmediği anlamına gelir. Hücre içi boşlukların olması, hücre ve makine kullanım oranını azalttığı için istenen bir durum değildir [54]. Hücre içi boşlukların sayısının sıfır (0) olması, o hücredeki makinelerin o hücreye atanmış parçaları üretmek için tam olarak kullanıldığını ifade eder.

Bir hücreye atanan parçaların benzerliklerinin maksimize edilmesi veya farklılıkların minimize edilmesi, bir hücrede benzer parçaların üretilmesini sağlar. Benzer parçaların aynı hücrelerde üretilmesi ise hücresel üretimin ana amacıdır. Benzerliğe

dayalı yaklaşımlar, hücre oluşturma problemlerinin çözümü için benzerlik katsayısı metotlarını kullanmaktadırlar [56].

Hücre içi iş yükü varyasyonu, bir hücrede işlem gören bir parçanın belirli makine üzerindeki iş yükü ile bu makineler üstündeki ortalama iş yükü arasındaki farktır. Bu farkın minimize edilmesi, hücre içinde akıcı bir malzeme akışının oluşmasını sağlar [57]. Böylece hücre içindeki işlenecek/işlenmiş malzeme akışı, seri üretimde olduğu gibi akıcı ve hızlı olur.

Literatürde birçok model, maliyetlerin minimize edilmesini amaçlayarak hücre oluşturma yoluna gitmiştir. Bu maliyetler çoğunlukla hücrelerarası-hücre içi taşıma maliyetleri, malzeme işleme maliyeti ve hazırlık maliyetleridir. Maliyetlerin amaç olarak kullanılması gerçekçi olması ile birlikte anlık, tutarlı ve doğru veri elde edilememesi durumunda farazi veya kalitesiz hücresel sistemlerinin meydana gelmesi gibi risklere de sahiptir.

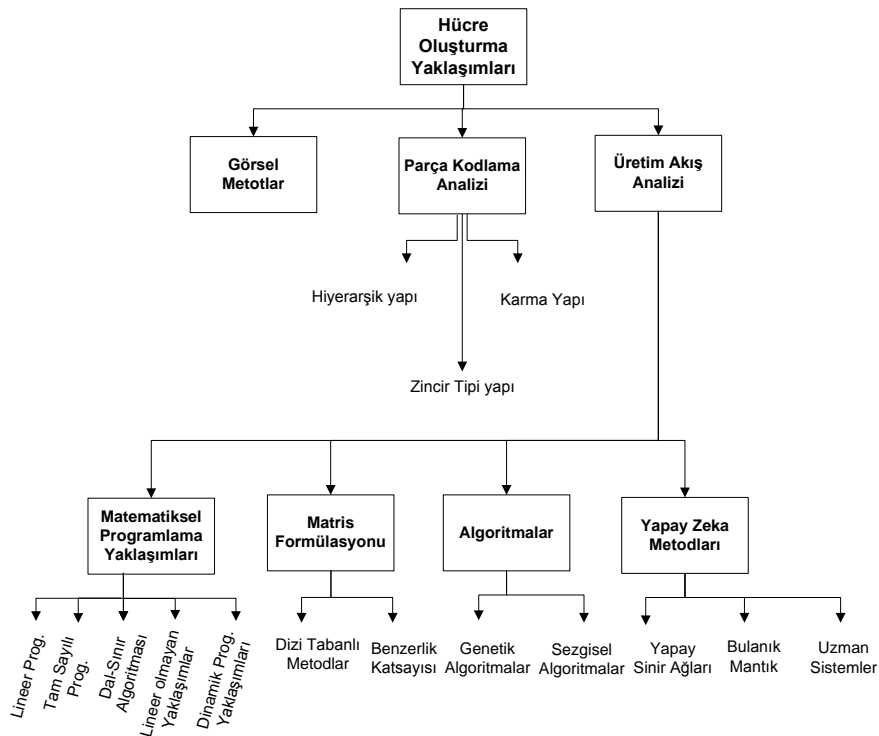
Malzeme dolaşım yolunu ve süresini minimize eden hücre oluşturma modelleri için amaç, üretim süresini kısaltmaktır. Bu modellerde en büyük problem, hücre oluşturmak için sadece ürün ailesini ve makine hücrelerini oluşturmanın yeterli olmamasıdır. Bu modellerde ayrıca hücre içindeki makine yerleşim ve işlem sırası da (layout/operation sequence) dikkate alınmalıdır. İşlem ve yerleşim sırası, parçaların art arda işlendiği makinelerin sıralanışını temsil etmektedir [58]. Hücre içindeki makinelerin yerleşim sırasının malzeme akışı üzerinde önemli bir etkisi vardır [59]. Bununla beraber makine yerleşim sırasının dikkate alınması, problem karmaşıklığını artırdığı gibi yeni parçaların üretim sistemine girmesi ile makine yerleşiminin yeniden gözden geçirilmesi ihtiyacını da doğurmaktadır. Tesis yerleşiminin makine yerleşimi için sık sık değiştirilmesi, teoride uygun olmakla birlikte, pratikte hiçbir yöneticinin onaylayacağı bir faaliyet değildir.

Optimum rota seçimini amaçlayarak çözüm yapan modellerde, bazı parçalar alternatif rotalara (alternative process routes) sahiptir. Bu modeller çözülürken parçalar için uygun rota seçilerek çözüme gidilir. Bu modellerde uygun rota seçimi, verilen amaçları sağlayan en iyi rotanın seçimi ve diğer rotaların ise elenmesine

dayanmaktadır. Tek rotaya sahip parçalar için herhangi bir rota seçim işlemi yapılmamaktadır. Alternatif rotalı modeller gerçekçi bir yapıya sahip olmakla birlikte problem karmaşıklığını artırmaktadır [60]. Literatüre bakıldığında, gerek çözüm süresini gerekse de modelin karmaşıklığını artırdığı için alternatif rotayı dikkate alan modellerden kaçınıldığı görülmektedir. Bununla birlikte alternatif rotalar kaliteli hücrelerin oluşturulmasında önemli bir kriter olarak düşünülmelidir.

4.2. Hücre Oluşturma Yaklaşımları

Hücre oluşturma problemleri (cell formation problems), NP-hard karmaşıklık sınıfındadır [61]. NP-hard (non-deterministic polynomial-time) karmaşıklık sınıfındaki bu problemlerin çözümü için polinom zamanlı bir algoritma yoktur. Ayrıca bu problemler, geleneksel yollarla çözülemeyecek kadar zordur. Hücre oluşturma problemlerinin kombinasyonel yapısından dolayı, problem boyutu büyüdükçe incelenecek çözüm sayısı ve buna bağlı olarak ta çalışma süresi aşırı bir şekilde artmaktadır. Bu nedenle hücre oluşturma problemlerinin makul sürelerde uygun sonuçlar üretebilmesi için sezgisel, meta-sezgisel ve yapay zeka tekniklerinden yararlanılmaktadır [62].



Şekil 4.1. Günümüzdeki temel hücre oluşturma yaklaşımları [23, 67]

Şekil 4.1’de görüldüğü gibi hücre oluşturma problemlerinin çözümü için günümüze kadar çok sayıda yaklaşım geliştirilmiş ve halen de geliştirilmeye devam etmektedir. Hücre oluşturma metotları için literatüre bakıldığında, uygun çözümlere kısa veya makul sürede yaklaştığı için günümüzde meta-sezgisel algoritmaların ve yapay zeka metotlarının sıkça kullanıldığı görülmektedir. Ancak Şekil 4.1’deki yaklaşımların hibrit olarak kullanıldığı yaklaşımlar da model kurucular tarafından sıkça tercih edilmektedir. Aşağıdaki başlıklarda hücre oluşturma problemlerinin çözümü için geliştirilmiş olan yaklaşımlardan ayrıntılı bir şekilde bahsedilmiştir.

4.2.1. Görsel metotlar

Görsel metotlar (visual methods) veya diğer adıyla informal metotlar, parça aileleri ve makine hücrelerinin görsel olarak belirlenmesi temeline dayanmaktadır. Sınıflandırma işlemi genellikle ya parçaların fiziksel olarak incelenmesi veya parçaların fotoğraflarına bakılması suretiyle yapılır [35]. Bu yaklaşım, parça ve makine sayılarının çok az olması durumunda etkin kümelemeye imkan verir. Diğer metotlar içinde bu yaklaşım, en basit ve en ucuz olanıdır. Parça ve makine sayısı arttıkça görsel olarak atama işlemi çok zor veya imkansız hale gelir [46].

4.2.2. Parça kodlama analizi metotları

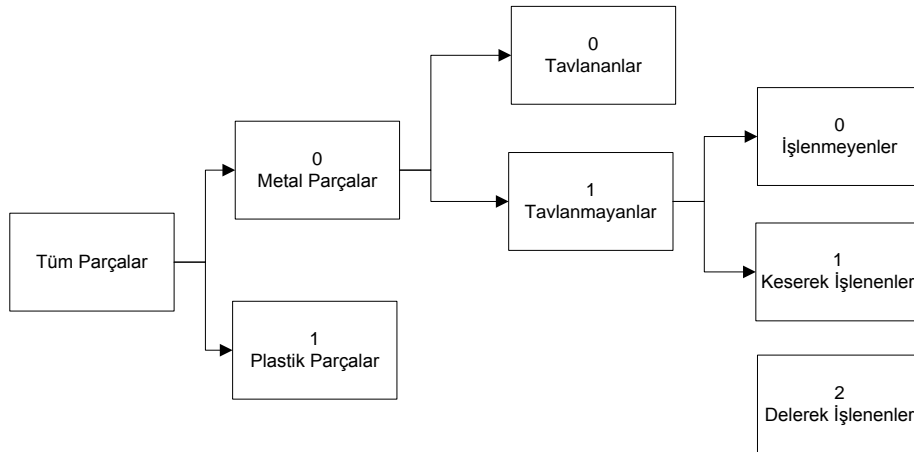
İlk kez Opitz (1970) tarafından geliştirilen parça kodlama sistemleri (part coding and classification analysis-PCA), rakam ve harf gibi semboller aracılığı ile parçaların önemli tasarım (boyut, malzeme vb.) ve üretim (işlem sırası vb.) özelliklerini belirleyen şemalardır. Kodlama ve sınıflandırma birbiri ile yakından ilişkili iki kavram olduğu için bu şemalar hazırlanırken bu iki kavram göz önünde bulundurulur. Hazırlanan bu şemalar aracılığı ile sınıflandırma (kümeleme, hücrelendirme vb.) yapılabilmektedir. Bu şemalar sayesinde bir parça, her basamağı belirli bir özelliği temsil eden bir kod tarafından tanımlanmaktadır [47, 48]. Bu koddaki her basamak, bazı ürün özelliklerini temsil etmektedir. Aşağıda sunulan Şekil 4.2’de, örnek bir parça için kodlama uygulaması görülmektedir. 0-21 arası basamaktan oluşan bu örnek kodlamanın her basamağına, daha önce hazırlanan

Bir kodun yapısı, kodun uzunluğu, kodun erişebilirliği ve kodun genişleyebilirliği gibi faktörlerden etkilenmektedir. Bu faktörlerin farklı olması, farklı kod yapılarının oluşmasına neden olmaktadır [52].

Parça kodlama analizinde, koddaki sembollerin atanması ve yorumu bakımından aşağıda sunulan üç yapı kullanılmaktadır [49]:

- Hiyerarşik yapı (monocode),
- Zincir tipi yapı (polycode),
- Karma yapı.

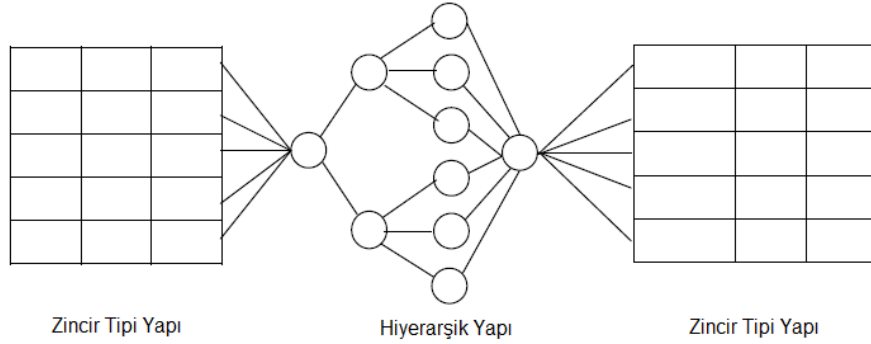
Hiyerarşik yapıda her sembolün yorumu karar ağacındaki düğümler gibi önceki sembollerin değerine bağlıdır. Bu yapıda üstteki özellikler (düğümler), hiyerarşik olarak parçaları alt özelliklere ayırır. Hiyerarşik yapının, birkaç kod pozisyonu ile büyük veriyi depolayabilmesi ve özelliklere hızlı erişim gibi avantajlarının yanında karmaşık kod yapısı ve üretimde kısıtlı kullanım gibi dezavantajları da vardır [52].



Şekil 4.3. Hiyerarşik yapı örneği

Zincir tipi yapıda, kod dizisindeki her basamak aynı özelliği ifade eder. Bu yapıda önceki sembollere bağlılık yoktur. Bu yapı, grup teknolojisine daha uygundur [49, 51]. Bu yapı, hiyerarşik yapıya göre daha kolay bir şekilde oluşturulur ancak aynı kod basamağı sayısına sahip hiyerarşik yapı kadar detaylandırılmayabilir [52]. Şekil 4.2, tipik bir zincir yapıya örnektir.

Karma yapı, hiyerarşik yapı ve zincir tipi yapının beraber kullanıldığı hibrit bir yapıdır [49]. Karma yapı, hem hiyerarşik hem de zincir tipi yapının avantajlarını içerdiği için uygulamada sıkça kullanılmaktadır. Aşağıdaki şekil, karma yapıyı örneklemektedir.



Şekil 4.4. Bir karma yapı örneği [50]

Parça kodlama analizinde parçaları değerlendirmek için, her parçanın grup teknolojisi kodu ile bu kodun diğer parça kodları ile benzerliğini değerlendiren bir benzerlik ölçütü kullanılmaktadır. İkili benzerlik ölçütleri büyük olan parçalar beraber gruplanmaktadır.

Parça kodlama analizinin tutarlılık ve imalat-tasarım özelliklerini eş zamanlı olarak kullanma avantajları yanında [47] bazen parça kodlarının süreç planlarına uymaması ve aşırı zaman-maliyet gereksinimi gibi dezavantajları da olabilmektedir. Parça kodlama analizi, her parçanın üretim ve tasarım özelliklerinin analiz edilmesini gerektirdiği için hem zaman alıcı hem de pahalı bir süreçtir. Literatürde PNC, CODE, MICLASS, DCLASS, FORCOD, OPITZ ve TELKA gibi kodlama sistemleri olmasına rağmen [63] standart olarak kullanılan tek bir sistem bulunmamaktadır.

4.2.3. Üretim akış analizi

Üretim akış analizi (production flow analysis), Burbidge tarafından 1971'de ortaya atılan bir parça ailesi tanımlama ve makine hücresi oluşturma yaklaşımıdır [64]. Üretim akış analizinin temelinde, üretim rota bilgisini kullanarak parça aileleri ve ilgili makineleri gruplamak yatmaktadır. Bu metot ile benzer veya aynı rotaya sahip

parçalar, parça ailesi olarak sınıflandırılır. Bu parça aileleri, mantıksal makine hücrelerinin oluşturulması için kullanılır.

Üretim akış analizi parça kodlama analizlerinden farklı olarak tasarım verisi yerine üretim verilerini kullanır. Üretim verilerinin tasarım verilerine göre en önemli avantajı, tasarım özelliklerinden dolayı meydana gelen bazı problemlerin (tasarımı aynı olan parçaların farklı makinelerde işlenmesi gibi) önüne geçmesidir [65].

Tablo 4.2. Örnek parça-makine matrisi

	Makine 1	Makine 2	Makine 3	Makine 4	Makine 5	Makine 6
Parça 1	1	1	1	0	0	0
Parça 2	1	0	1	1	0	0
Parça 3	1	1	1	0	0	0
Parça 4	0	0	0	1	0	1
Parça 5	0	0	0	1	1	1
Parça 6	0	0	0	1	1	1

Üretim akış analizinde verilerin gösterimi "parça-makine matrisi" ile yapılmaktadır [66]. Literatürde bu matrise "başlangıç parça makine matrisi" veya "başlangıç matrisi" (initial matrix) de denilmektedir. Bu matriste girdiler, $x_{ij} = 0$ ve $x_{ij} = 1$ şeklindedir. Burada $x_{ij} = 1$ olması, i parçasının j makinesinde işlem gördüğü anlamına gelmekte, aksi takdirde ise $x_{ij} = 0$ ataması yapılmaktadır. Bu matrisin çözümü ile parça aileleri ve makine hücreleri oluşturulmaktadır. Literatürde bu matrisin çözümü için çok sayıda yaklaşım geliştirilmiştir.

4.2.3.1. Matematiksel programlama yaklaşımları

Matematiksel programlama yaklaşımları, parça-makine matrisinin çözülmesi için ilk önerilen ve çok yaygın bir şekilde kullanılan yaklaşımlardandır. Matematiksel programlama yaklaşımlarında genellikle benzerliklerin maksimize edilmesi veya çeşitli maliyetlerin minimizasyonu amaçlanmaktadır [68]. Aşağıda matematiksel programlama yaklaşımları ile grup teknolojisine katkıda bulunan bazı temel

çalışmalar sunulmuştur. Bu çalışmalar dışında da literatürde grup teknoloji ile ilgili çok sayıda çalışma bulunmaktadır.

Purcheck (1974) [69] grup teknolojisine lineer programlama modelini uygulamıştır. Kusiak (1987) [70] alternatif rotaların varlığında hücreli sistemlerin oluşturulması için geliştirilmiş p-medyan modelini önermiştir. Shtub (1989) [71] geliştirilmiş atama problemi ile hücreli sistemlere çözüm üretmeye çalışmıştır. Wei ve Gaither (1990) [72] darboğaz maliyetlerini ve hücre içi-hücreler arası iş yükünü minimize etmek ve ortalama hücre kullanımını maksimize etmek için bir 0-1 tam sayılı programlama modeli önermiştir. Rajamani ve arkadaşları (1990) [73] bütçe, makine ve alternatif rota kısıtlarını dikkate alan bir tam sayılı programlama modeli önermişlerdir. Askin ve Chiu (1990) [74], hücre oluşturma için maliyet tabanlı bir matematiksel formülasyon ve bir sezgisel graf (çizge) bölme yöntemi önermişlerdir. Shafer ve Rogers (1991) [75] hücreli üretim sistemlerini farklı konfigürasyonlarla çözmek için bir hedef programlama metodu önermişlerdir.

Literatürdeki matematiksel programlama yaklaşımları incelendiğinde, basit oldukları için daha çok tek amaçlı ve lineer modellerin kullanıldığı görülmektedir. Bununla birlikte, daha gerçekçi yaklaşımlar olduğu için çok amaçlı ve/veya lineer olmayan (doğrusal olmayan) modellerin kullanıldığı da görülebilir.

Matematiksel modeller, hücre oluşturma problemleri için yaygın olarak kullanılmalarına rağmen, problem boyutu büyüdükçe GAMS ve LINDO gibi paket programlar bu problemleri makul süre içinde uygun çözümle çözmek konusunda yetersiz kalmaktadırlar. Burada bahsedilen “problem boyutu”, parça, makine, rota ve kısıt sayısı gibi temel hücre oluşturma parametrelerini temsil etmektedir.

4.2.3.2. Matris formülasyonu

Matris formülasyonuna dayalı metotlar, dizi tabanlı metotlar ve benzerlik katsayısına dayalı metotlar olmak üzere iki alt başlıkta incelenebilir. Bu metotlar, diğer üretim akışına dayalı metotlarla karşılaştırıldığında en basit metotlardandır.

Dizi tabanlı metotlar (array based methods), satır ve sütunların bir diagonal blok oluşuncaya kadar düzenlenmesi esasına dayanmaktadırlar [83]. Dizi tabanlı metotlar, parça ve makineleri gruplarken herhangi bir benzerlik ölçütü kullanmazlar. Bunun yerine makine-parça matrisinin satır ve kolonları sıralayarak gruplama yaparlar. Bu metotların en büyük dezavantajı, hücre oluştururken ilave olarak başka bir üretim verisini kullanmamalarıdır. Bu durum, basit hesaplanabilirlik sağlamasına rağmen gerçekçi çözümlerden uzaklaşmaya neden olur.

Literatürde dizi tabanlı birçok kümeleme tekniği olmakla birlikte en çok bilinenleri ve kullanılanları aşağıdaki gibidir:

- Bond Enerji Analizi (Bond Energy Analysis)
- Derece Sırasına göre Kümeleme (Rank Order Clustering)
- Modifiye edilmiş Derece Sırasına göre Kümeleme (Modified Rank Order Clustering)

McCormick ve arkadaşları (1972) tarafından geliştirilen bond enerji analizi yaklaşımı, hücre oluşturma için bond enerji değerlerinin hesaplanmasına dayanmaktadır [84]. Bu yaklaşımda, makine-parça başlangıç matrisinde blok diyagonaller oluşturmak için bond enerjisi değerleri hesaplanarak parça aileleri ve makine grupları oluşturulmasına çalışılır [156].

Bond enerjisi, aşağıdaki eşitlik (1.1) ile hesaplanmaktadır. Bu formülasyonda M makine sayısını, P ise parça sayısını temsil etmektedir. Bu formülasyon sonucunda matristeki 1 değerleri ne kadar birbirine yakınsa bond enerji değeri o kadar büyük olur [85].

$$\eta_{BE} = \frac{\sum_{i=1}^{M-1} \sum_{k=1}^{P-1} a_{ik} a_{i(k+1)} + \sum_{i=1}^{M-1} \sum_{k=1}^{P-1} a_{ik} a_{(i+1)k}}{\sum_{i=1}^M \sum_{k=1}^P a_{ik}} \quad (1.1)$$

Belirli bir satır ve kolon için toplam bond enerjisi (TBE) ise aşağıdaki eşitlik (1.2) ile hesaplanır [86]. Bu formülasyonda, m makine sayısını, n ise parça sayısını temsil etmektedir.

$$TBE(x, y) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n a_{ij} * [a_{i,j-1} + a_{i,j+1} + a_{i-1,j} + a_{i+1,j}] \quad (1.2)$$

King (1980) [157] tarafından geliştirilen derece sırasına göre kümeleme metodu, makine-parça başlangıç matrisinin satır ve sütunlarının sıralanmasına dayanan, hiyerarşik olmayan ve iterasyon temelli bir kümeleme metodudur. Bu metotta hiyerarşik yöntemlerin tersine, benzerlik katsayıları kullanılmadan makine-parça matrisi üzerindeki satır ve kolonların ikilik sayı sistemindeki değerleri ile işlem yapılır. Bu değerler onluk sisteme dönüştürüldükten sonra yeniden sıralama yapılarak makine-parça matrisi düzenlenir [158]. Aşağıda sunulan Tablo 4.3'te bu metodun işleyişi için bir örnek sunulmuştur.

Tablo 4.3. Derece sırasına göre kümeleme metodu için uygulama örneği

	2^3	2^2	2^1	2^0		
	Makine 1	Makine 2	Makine 3	Makine 4	Onluk Toplam Değer	Derece
Parça 1	1		1	→	10	1
Parça 2		1		1	5	4
Parça 3	1				8	3
Parça 4		1		1	5	5
Parça 5	1		1		10	2
Parça 6		1		1	5	6
Parça 7		1			4	7


Derece sırasına göre kümeleme metodunda ikilik sayı sistemi kullanılırken, parça ve makineler için büyükten küçüğe bir sıralama yapılır. Daha sonra hem parça hem de makine için ayrı ayrı iterasyon işlemleri uygulanır. Her iterasyonda hem parça (satır) hem de makineler (sütun) için ikilik sayı değerleri, satır ve sütundaki 0 ve 1 değerleri ile çarpılarak toplanır. Daha sonra yine hem satır hem de sütun için, büyük olan toplam değerine göre sıralama yapılır.

Derece sırasına göre kümeleme metodunda Chandrasekharan ve Rajagopalan [125], bazı eksikler tespit etmişlerdir. Bu nedenle bu yazarlar bu metod üzerinde değişiklikler yaparak “modifiye edilmiş derece sırasına göre kümeleme” metodunu literatüre sunmuşlardır. Üç aşamalı bu metotta, ilk aşamada başlangıç makine parça matrisine iki iterasyon derece sıra kümelendirme algoritması uygulanır. İkinci aşamada, sol üst köşede oluşan kare veya dikdörtgen matrisin sınırları belirlenir. Son aşamada ise oluşan bloklar arasındaki benzerlik katsayıları matrisi hesaplanır. En yüksek benzerlik katsayısına sahip hücreler ve parça aileleri birleştirilir [159].

Matris formülasyonuna dayalı metotların bir diğer alt başlığı da benzerlik katsayısına dayalı metotlardır. İlk kez McAuley (1972) tarafından önerilen benzerlik katsayısına (similarity coefficient) dayalı metotlar [78], hücre oluşturmada literatürdeki matematiksel programlama ve sezgisellere dayalı algoritmalar gibi birçok metottan daha esnek bir yapıya sahiptir. Burada esneklikten kasıt, basit çözüm prosedürü ve model genişlemelerine açık olmasıdır (yeni parametre girişlerine kolay entegrasyondur) [76].

Benzerlik katsayısına dayalı hücre oluşturma problemlerinde çözüme, makine-parça matrisinin oluşturulması ile başlanır. Daha sonra bu matris kullanılarak parçalar veya makineler arasındaki benzerlik katsayıları hesaplanır. Eğer iki parça veya makine arasındaki benzerlik maksimum ise S_{ij} benzerlik katsayısı 1'e, minimum ise S_{ij} benzerlik katsayısı 0'a eşit olur. Şekil 4.5'te Jaccard benzerlik katsayısı metodu kullanılarak bir örnek makine-parça matrisindeki makineler için benzerlik değerleri hesaplanmıştır. Bu hesaplamadan sonra aralarındaki benzerlik değerleri büyük olan makineler beraber gruplanıp bir üretim hücresi oluşturmuş olur.

M A K İ N E L E R	PARÇALAR							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1		1		1			1	
2	1	1	1		1	1	1	1
3			1			1		1
4				1			1	
5	1		1		1	1		1
6				1			1	



$$\begin{pmatrix} 1.00 & 0.25 & 0.00 & 0.67 & 0.00 & 0.67 \\ 0.25 & 1.00 & 0.43 & 0.13 & 0.71 & 0.13 \\ 0.00 & 0.43 & 1.00 & 0.00 & 0.60 & 0.00 \\ 0.67 & 0.13 & 0.00 & 1.00 & 0.00 & 1.00 \\ 0.00 & 0.71 & 0.60 & 0.00 & 1.00 & 0.00 \\ 0.67 & 0.13 & 0.00 & 1.00 & 0.00 & 1.00 \end{pmatrix}$$

Şekil 4.5. Örnek bir problem için benzerlik katsayısı hesabı [77]

Literatürde, Jaccard benzerlik katsayısına ilave olarak çok sayıda benzerlik katsayısı metodu bulunmaktadır. Ancak literatürde Jaccard benzerlik katsayısının hücre oluşturmada sık sık kullanıldığı görülmektedir. Bu kullanımın temel nedeni, benzer parçaların kümelenmesinin hücresele imalatın temel mantığına uygun olmasındandır. Literatürde diğer benzerlik katsayısı metotlarından bazıları aşağıdaki Tablo 4.4'te sunulmuştur.

Tablo 4.4. Genel amaçlı benzerlik katsayısı metotları [76]

	Benzerlik Katsayısı	Tanım	Aralık
1.	Jaccard	$a/(a+b+c)$	0-1
2.	Hamann	$[(a+d)-(b+c)]/[(a+d)+(b+c)]$	-1 to 1
3.	Yule	$(ad-bc)/(ad+bc)$	-1 to 1
4.	Simple matching	$(a+d)/(a+b+c+d)$	0-1
5.	Sorenson	$2a/(2a+b+c)$	0-1
6.	Rogers and Tanimoto	$(a+d)/[a+2(b+c)+d]$	0-1
7.	Sokal and Sneath	$2(a+d)/[2(a+d)+b+c]$	0-1
8.	Rusell and Rao	$a/(a+b+c+d)$	0-1
9.	Baroni-Urbani and Buser	$[a+(ad)^{1/2}]/[a+b+c+(ad)^{1/2}]$	0-1
10.	Phi	$(ad-bc)/[(a+b)(a+c)(b+d)(c+d)]^{1/2}$	-1 to 1
11.	Ochiai	$a/[(a+b)(a+c)]^{1/2}$	0-1
12.	PSC	$a^2/[(b+a)*(c+a)]$	0-1
13.	Dot-product	$a/(b+c+2a)$	0-1
14.	Kulczynski	$1/2[a/(a+b)+a/(a+c)]$	0-1
15.	Sokal and Sneath 2	$a/[a+2(b+c)]$	0-1
16.	Sokal and Sneath 4	$1/4[a/(a+b)+a/(a+c)+d/(b+d)+d/(c+d)]$	0-1
17.	Relative matching	$[a+(ad)^{1/2}]/[a+b+c+d+(ad)^{1/2}]$	0-1

a: her iki makinede işlenen parça sayısı, b: i makinesinde işlenen fakat j'de işlenmeyen parça sayısı, c: j makinesinde işlenen fakat i'de işlenmeyen parça sayısı, d: hiçbir makinede işlenmeyen parça sayısı

Benzerlik katsayısı yöntemi ile ilgili temel çalışmaların 1970-1990 yılları arasında ortaya çıktığı görülmektedir. Bununla beraber literatürde günümüze kadar Tablo 4.4'te de görüldüğü gibi bir çok benzerlik katsayısı yöntemi geliştirilmiş ve bunların bir kısmı hücresele imalatta hücre oluşturmada sıkça kullanılmıştır [76]. Benzerlik katsayısı yöntemi için bazı referans çalışmalar aşağıda sunulmuştur:

McAuley (1972) [78] ilgili çalışmasında ilk kez iki makine arasındaki benzerliği tanımlayan araştırmacı olmuştur. Carrie (1973) [79] çalışmasında, McAuley'in benzerlik katsayısını parçaların benzerliği için genelleştirmiştir. Kusiak (1987) [70] ilgili çalışmasında, benzerlik katsayısına parça açısından yeni bir tanım getirmiştir. Wei ve Kern (1989) [81] ilgili çalışmalarında, Kusiak'ın benzerlik katsayısını geliştirerek yeni bir benzerlik katsayısı önermişlerdir.

Hüresel üretimin temel amacı olan benzer özelliklere sahip parçaların benzer hücrelerde üretilmesi yaklaşımı, benzerlik katsayısı metotları ile basit ve esnek bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir. Benzerlik katsayısı metotlarının sayılan avantajları yanında, problem boyutu büyüdükçe hesaplanacak benzerlik ölçümü sayısının aşırı artışı ve hücre oluşturmada benzerlik dışındaki faktörleri dikkate almaması gibi dezavantajları da bulunmaktadır.

4.2.3.3. Algoritmalar

Literatürde hücre oluşturma yaklaşımlarının en popülerlerinden olan matris formülasyonu, çok sık kullanılan bir yaklaşım olmakla birlikte uygulamadaki çok önemli kriterleri (makine sırası, hücre boyutu vb.) ihmal etme gibi bir dezavantaja da sahiptir. Matematiksel programlama yaklaşımları bu ihmalleri dikkate almalarına rağmen büyük boyutlu problemler için başa çıkılamaz hesaplamalara yol açabilmektedirler [82]. Hücre oluşturma problemlerinin NP-hard yapısından dolayı, klasik algoritmalarla büyük boyutlu problemler için uygun ve optimum bir çözüme kolay bir şekilde ulaşılamayabilir.

Sezgisel ve meta-sezgisel algoritmalar, klasik algoritmaların ve matematiksel programlama yaklaşımlarının belirtilen eksiklerinden ve dezavantajlarından kaçınmak için geliştirilmişlerdir. Her ne kadar belirtilen eksikleri giderebilirler bile bu algoritmaların hiç biri optimum veya optimuma çok yakın çözüm üretmeyi garanti etmezler. Ancak makul bir sürede optimuma yakın çözümler üretebilirler. Bu algoritmalarla hücre oluşturmada en çok kullanılanları aşağıda verilmiştir:

- Genetik algoritma,
- Tabu arama algoritması,
- Parçacık sürü algoritması,
- Tavlama benzetimi algoritması,
- Diferansiyel evrim algoritması,
- Harmoni arama algoritması,
- Karınca kolonisi algoritması.

Hücre oluşturmada yukarıda belirtilen algoritmalar dışında da kullanılan meta-sezgisel algoritmalar olduğu gibi araştırmacılar tarafından test edilen ve literatüre sunulan yeni algoritmalar da bulunmaktadır.

Meta-sezgisel algoritmaların en büyük avantajları, pratik olmaları, uygulama problemleri için daha az karmaşık olmaları, problem boyutunun problem karmaşıklığı ile direk olarak ilişkili olmaması ve hızlı bir şekilde kabul edilebilir sonuçlar elde edebilmeleridir [86]. Bu algoritmaların birçoğunda rastsallık etkisi görülür. Rastsallık etkisi sayesinde, arama yapılırken bir lokal noktadan başka bir noktaya ani bir geçiş yapılabilir. Bu ani geçiş, büyük bir arama bölgesindeki global arama için önemli bir avantajdır.

Meta-sezgisel algoritmalar, daha çok kombinasyonel optimizasyon problemleri için geliştirilmiştir. Böylece kombinasyonel bir yapıya sahip olan büyük boyutlu hücre oluşturma problemleri de bu algoritmalar aracılığı ile makul süre içinde çözülebilmektedir [87]. Bu algoritmaların çoğu, bir başlangıç çözümü veya çözüm kümesi ile çalışmaya başlar. Daha sonra bir durdurma kriterine kadar bu başlangıç çözümü iteratif olarak iyileştirilerek sonuca ulaşırlar. Ulaşılan sonuçlar, mutlak bir kesinlik veya doğruluk içermez ve her zaman karar vericinin yorumuna açıktır.

Son zamanlarda meta-sezgisel algoritmaların kendilerine özgü dezavantajlarından kaçınmak için bu algoritmaların bir kombinasyonu olan hibrit meta-sezgisel algoritmaların kullanımı tercih edilmeye başlanmıştır [88]. Hibrit meta-sezgisel algoritmalar, mevcut meta-sezgisel algoritmalara göre daha etkili ve esnek bir davranış sergilemektedirler.

Meta-sezgisel algoritmalarından genetik algoritmalar, gerek hücre oluşturma problemlerindeki kullanım sıklığı ve popülerliğinden gerekse de bu tez çalışmasındaki ana metot olmasından dolayı aşağıda ayrıntılı bir şekilde incelenecektir.

İlk kez Holland (1975) tarafından önerilen genetik algoritmalar, evrim teorisine dayalı, güçlü ve yaygın bir kullanıma sahip sezgisel algoritmalarındandır. Temeli doğal

seleksiyon ve doğal genetik bilimine dayanan genetik algoritmalar [89], zor problemlerin çözümü için etkili bir yaklaşım sunarlar.

Genel amaçlı bir arama metodu olarak genetik algoritmalar, stokastik ve araştırma yönünün denenmeyen alanlara yönlendirilmesini amaçlayan yönlendirilmiş aramayı iyi bir şekilde kombine ederler. Diğer stokastik arama algoritmalarının tersine genetik algoritmalar, popülasyon temellidir ve türev bilgisine bağlı değildir. Bu özellikler genetik algoritmayı diğer sezgisellere göre daha tercih edilir yapmaktadır [90]. Bu özellikler dışında genetik algoritmaların başka önemli özellikleri de vardır. Bu özelliklerden önemlileri aşağıda sunulmuştur [96]:

- Genetik algoritmalar, aramaya tek bir noktadan değil, bir noktalar kümesinden başlar,
- Genetik algoritmalar, çeşitli ek bilgileri değil doğrudan amaç fonksiyonunun kendisini kullanırlar,
- Genetik algoritmalar, parametrelerin kendisi ile değil kodlanmış haliyle ilgilenirler.

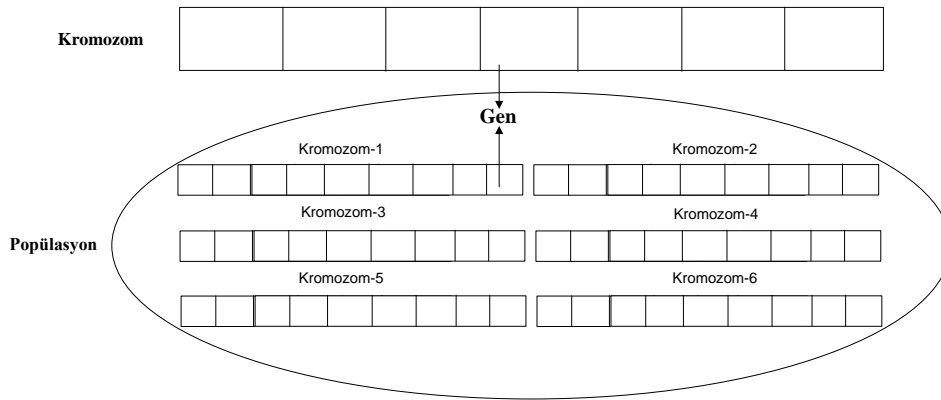
Genetik algoritmalar etkili sonuçlar ürettikleri için hücre oluşturma problemleri için de yaygın bir şekilde kullanılmışlardır. Genetik algoritmaların hücre oluşturmada kullanıldığı bazı referans çalışmaları aşağıda sunulmuştur:

Venugopal ve Narendran (1992) [91], genetik algoritmaları kullanarak hücre yükü varyasyonunun minimizasyonuna dayalı bir problemi modellemişlerdir. Joines, Culbreth ve King (1996) [92], formüle edilmiş bir hücre oluşturma modelini çözmek için bir tam sayılı bir model geliştirip bu modeli genetik algoritma ile çözmüşlerdir. Zhao ve Wu (2000) [93], çok rotalı ve çok amaçlı bir hücre oluşturma problemine genetik algoritma yaklaşımını uygulamışlardır. Onwubolu ve Mutingi (2001) [82], hücre yükü varyasyonunu dikkate alan bir genetik algoritma yaklaşımı geliştirmişlerdir. Uddin ve Shanker (2002) [94], birden fazla rotaya sahip bir gruplama problemi için genetik algoritmaya dayanan bir tam sayılı programlama modeli sunmuşlardır. Shankar ve arkadaşları (2004) [98], hücresel üretim sistemleri için çok amaçlı ve tam sayılı bir model önermişlerdir. Bu çok amaçlı modeli çözmek

için yazarlar, genetik algoritma metodunu kullanmışlardır. Mahdavi ve arkadaşları (2009) [90], hücre oluşturma problemleri için lineer olmayan ve tamsayı bir model önermişlerdir. Önerilen modelin daha etkili çözümü için yazarlar genetik algoritma metodunu kullanmışlardır.

Yukarıda bahsedilen genetik algoritma çalışmalarına ilave olarak günümüzde onlarca genetik algoritmaya dayalı hücre oluşturma çalışması literatüre sunulmuş ve yeni çalışmalar da sunulmaya devam etmektedir. Bununla beraber, sunulan son çalışmaların daha karmaşık, gerçek hayatı daha iyi yansıtan, çok amaçlı, çok rotalı ve hibrit metotlara sahip çalışmalar olduğu görülmektedir. Bu eğilimden genetik algoritmaların hücre oluşturma problemlerine gerçekçilik ve pratik hayata uygulanabilirlik kattığı söylenebilir.

Bir genetik algoritma yaklaşımı kullanılmadan önce, gen, kromozom ve popülasyon gibi kavramların çok iyi bilinmesi gereklidir. Çünkü bir genetik algoritma yaklaşımı bu temel kavramlar üzerinde kuruludur. Gen, model hakkında bilgi taşıyan ve kromozomu oluşturan en küçük yapıdır. Kromozom (birey), birden fazla genin bir araya gelerek oluşturduğu gen dizisidir. Ayrıca bir kromozom, problem için bir alternatif aday çözümü ifade eder. Popülasyon, bir kromozom kümesidir [97]. Bir kromozom bir alternatif aday çözümü ifade ettiğine göre popülasyon da bir alternatif çözüm kümesini ifade eder. Aşağıda sunulan Şekil 4.6'da bu kavramlar örneklenmiştir.



Şekil 4.6. Örnek bir kromozom ve popülasyon yapısı

Bir genetik algoritma yaklaşımı için başlangıç noktası, mevcut problem için bir kromozom yapısının oluşturulmasıdır. Bu kromozom yapısı, oluşturulan modeli temsil eden kodların (genlerin) bir dizisidir. Bu yapının hatalı tasarımı, kötü veya beklenmeyen çözümlere neden olur. Bu nedenle kromozom yapısı iyi düşünülmeli ve mevcut modeli iyi temsil edecek şekilde tasarlanmalıdır. Genetik algoritma yaklaşımı, kromozom yapısının oluşturulmasından sonra bu oluşturulan kromozom yapısının kullanılarak bir başlangıç popülasyonu oluşturulması ile devam eder. Daha sonra ise, popülasyonun üyeleri bir uygunluk (fitness) fonksiyonuna dayalı olarak seleksiyona (selection) uğrarlar. Popülasyon üyelerinin uygunluk fonksiyonları ne kadar büyükse seleksiyona uğrama oranları o kadar yüksek olur. Seleksiyon ile kötü üyeler elenir ve onların yerine daha iyileri eklenir. Seleksiyondan sonra, yeni bir popülasyon üretmek için seçilmiş popülasyona çeşitli genetik operatörler uygulanır [90]. Bu süreç, bir durdurma kriterine kadar devam eder. Son durumda elde edilen popülasyona göre uygun bir kromozom yapısı, sonuç kromozomu olur. Genetik algoritmanın bir problemi çözüme götürdüğü bu adımlar, 6'ya ayrılabilir. Bu adımlar aşağıdaki gibi özetlenebilir [90]:

1. Kromozom yapısının oluşturulması
2. Başlangıç popülasyonunun oluşturulması
3. Popülasyondaki her bireyin uygunluk değerinin belirlenmesi
4. Seçim işleminin yapılması
5. Yeni birey oluşturulması için genetik operatörlerin uygulanması
6. İterasyonun sonlandırılması için sonlandırma kriterinin kontrolü

Bir genetik algoritma yaklaşımının ilk aşamasında, kromozom yapısı oluşturulmalıdır. Kromozom yapısı oluşturulurken genlerin sayısı, diziliş sırası ve gösterimi önem arz etmektedir. Bu aşamada yapılacak hatalar, diğer tüm adımlarda etkisini gösterir.

Kromozom yapısı oluşturulduktan sonra ikinci aşamada, her bir çözümün kromozomlarla temsil edildiği bir başlangıç popülasyonu genellikle rastgele olarak oluşturulur [99]. Bu aşamada, oluşturulacak popülasyonun birey sayısı çok önemlidir. Az sayıda bireye sahip bir popülasyon ile sonuca ulaşmak için daha fazla

iterasyon gerekeceği gibi algoritmanın yerel optimuma takılma olasılığı da artacaktır. Aşırı bireye sahip bir popülasyon ile kaliteli çözümler elde edilebilse dahi bu sefer de iterasyon başına çalışma süresi artacaktır.

Üçüncü aşamada, oluşturulan kromozomların uygunluk değerleri değerlendirilir. Bu değerlendirme için problem çözümlerinin aranan çözüme yakınlığının ölçüsü olan bir “uygunluk fonksiyonu” kullanılır. Optimizasyon problemlerinde bu fonksiyon, çoğunlukla optimumu aranan bir amaç fonksiyonudur [100].

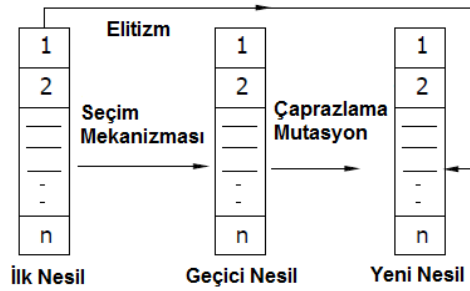
Dördüncü aşamada, yeni bir popülasyon oluşturmak için “birey seçimi” yani seleksiyon işlemi yapılır. Bu işlemde, elitizm operatörü kullanılarak bazı iyi bireyler bir sonraki popülasyona direk olarak atılabilir. Böylece bazı iyi çözümlerin genetik operatörlerle kaybolması önlenmiş olur. Elitizm sonrası kalan bireyler belirli bir seçim stratejisine göre (rulet tekeri, turnuva seçim vb.) seçilerek genetik operatörlere tabii tutulurlar [101]. Elitizm operatörü zorunlu bir operatör olmamakla birlikte kaliteli kromozomları koruduğu için çoğu zaman kullanılması önerilen bir operatördür.

Beşinci aşamada, çaprazlama ve mutasyon operatörleri seçilen bireylere uygulanır. Çaprazlama (cross-over), genetik algoritma uygulamalarında en önemli operatördür. Çünkü çaprazlama ile yeni bireyler oluşturularak bir popülasyondaki genetik çeşitlilik artırılır. Bu operatör ile yeni bireyi ortaya çıkaracak kromozomların (ebeveynlerin) bazı genleri, belirli bir çaprazlama oranı ile yeni bireyler üzerine kopyalanır [101]. Bu kopyalama işlemi; tek noktadan, çift noktadan, çok noktadan veya uniform çaprazlama şeklinde yapılabilir [100]. Çaprazlama sonucunda yeni bireyler (yavru bireyler) elde edilir. Eğer çaprazlama yapılmazsa yeni birey, anne veya babanın birebir kopyası olur. Bu durumda popülasyondaki genetik çeşitlilik (potansiyel yeni çözümlerin sayısı) artmaz.

Beşinci aşamada, bir diğer operatör işlemi olan mutasyon operatörü uygulanır. Çaprazlama sonucunda oluşan ve eski nesillerin gen özelliklerini taşıyan bireylere, yeni özellikler aktarmak için mutasyon operatörü uygulanır. Mutasyon, arama uzayını genişletmek ve çeşitliliği artırmak için rastgele bir şekilde bireylerin

genlerinde küçük değişiklikler yapmak için kullanılan bir operatördür [100]. Optimizasyon problemlerinde, çözümün yerel optimumda sıkışmaması mutasyon operatörü ile sağlanır. Çaprazlamada olduğu gibi mutasyonda da belirli bir orana göre mutasyon operatörü uygulanır. Bu orana "mutasyon oranı" denir. Mutasyon oranı genler üzerinde rastgele değişiklikler yaptığı için mutasyon oranının aşırı yüksek olması, aramayı rastgele aramaya çevirir. Bu nedenle mutasyon oranının yeterince düşük tutulması tavsiye edilir.

Son adımda, çaprazlama ve mutasyona uğrayarak oluşturulan yeni popülasyon için sonlandırma kriteri değerlendirilir. Çalışan bir genetik algoritma çoğu kez iterasyon sayısı, geçen süre veya bir iyileşme seviyesi olarak kabul edilen durdurma kriterine ulaşılmca durur. Son popülasyondaki en iyi kromozom, çözüm olarak kabul edilir.

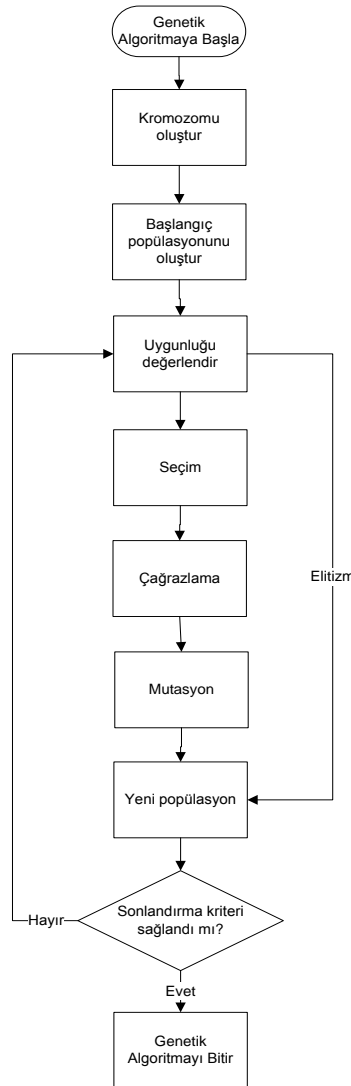


Şekil 4.7. Genetik operatörler [100]

Bir genetik algoritma yaklaşımında, belirlenmesi gereken dört önemli parametre bulunmaktadır. Bu parametreler; popülasyon boyutu, çaprazlama oranı, mutasyon oranı ve sonlandırma kriteridir [95]. Bu parametrelerin değişimi, çözüme ulaşma süresini ve çözüm kalitesini etkilemektedir. Popülasyon boyutu, bir popülasyonda bulunacak kromozom sayısını ifade eder. Popülasyon boyutu için sabit ve mutlak değerler bulunmamakla birlikte, genetik algoritmalarda birçok araştırmacının popülasyon boyutunu 30-200 aralığında seçtiği belirtilmiştir [102]. Çaprazlama ve mutasyon oranı, 0 ile 1 arasında değerler almaktadır. Literatürde çaprazlama oranı için 0.5-1.0 arasında değerler önerilirken mutasyon oranı için 0.001-0.05 arasında değerler önerilmektedir. Sonlandırma kriteri, genetik algoritmanın durmasını sağlayan şarttır. Daha önce de belirtildiği gibi iterasyon sayısı, geçen süre veya bir iyileşme seviyesi bir sonlandırma kriteri olarak kabul edilebilir.

Genetik algoritma çözüm adımları, aşağıda sunulan Şekil 4.8’de ayrıntılı bir şekilde özetlenmiştir. Şekil 4.8’e göre algoritma, kromozomların oluşturulması ile başlamaktadır. Başlangıç popülasyonu oluşturulduktan sonra, oluşturulan popülasyonun uygunlukları değerlendirilmektedir. Uygunluklar değerlendirildikten sonra popülasyona genetik operatörler uygulanmakta ve bu aşamalara bir sonlandırma kriterine gelene kadar iteratif olarak devam edilmektedir.

Genetik algoritmalar genel olarak aşağıdaki çalışma prosedürünü kullanmakla beraber bazı küçük farklılıklar da içerebilir. Bu farklılıklar genelde sonlandırma kriteri seçeneği ve operatörlerin çalışma özellikleri ile ilgilidir. Bu iki özellik, kullanılan modellere ve problemlerin yapısına göre revize edilebilmektedir.



Şekil 4.8. Genetik algoritma çalışma prosedürü [95]

4.2.3.4. Yapay zeka metotları

Yapay zeka metotları, gerçek hayattaki karmaşık problemleri makul bir süre içinde ve kaliteli sonuçlarla çözmek için geliştirilmiş optimizasyon metotlarıdır. Yapay zeka metotları, problem zorluğu ve karmaşıklığı dikkate alındığında hücre oluşturma problemleri için verimli metotlardır [103]. Yapay zeka metotları, aşağıdaki gibi üç ana başlıkta sınıflandırılabilir.

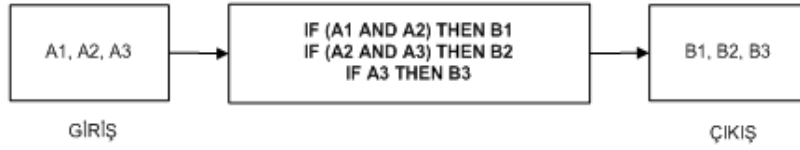
- Uzman sistemler
- Yapay sinir ağları
- Bulanık mantık

Literatürdeki bazı çalışmalarda, bazı meta-sezgisel algoritmalar da yapay zeka metotları içinde yer almasına rağmen bu çalışmada meta-sezgisel algoritmalar, algoritmalar başlığı altında sunulmuştur. Bu başlık altında, üç önemli yapay zeka tekniği kısaca açıklanacaktır.

İlk kez 1960'ların ortasında Stanford Üniversitesi'nden Edward Feigenbaum tarafından önerilen uzman sistemler (expert systems), bir uzmanın düşünce yapısını taklit eden bir yapay zeka programıdır. Bir uzman sistem yapısında, planlanmış/tasarlanmış bir algoritma yapısı yoktur. Uzman sistemlerde, klasik sistemlerde olduğu gibi veriye göre değil bilgiye dayalı işlemler yapılır.

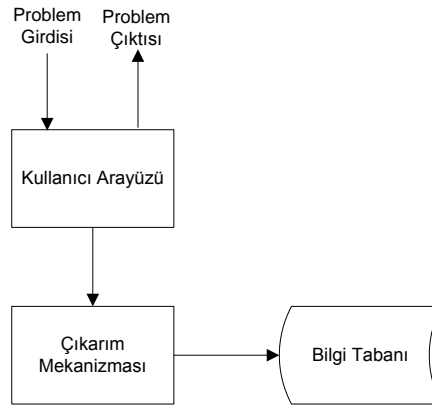
Bilgi tabanı ve çıkarım mekanizması, uzman sistemlerin en önemli iki yapı taşıdır. Bu iki yapı kullanılarak sonuca gidilir. Bir bilgi tabanı (Knowledge-Base), doğruluğu önceden bilinen bir uzman yapının (konu ile ilgili bir uzman vb.) gerçeklerini içerir. Çıkarım mekanizması (Inference Engine) ise, bilgi tabanında yer alan bilgiyi kullanarak kullanıcının sorduğu sorulara uygun sonuçlar/cevaplar üreten bir yapıdır.

Uzman sistemler interaktif olarak çalışan sistemler oldukları için karar vericiden bazı giriş değerlerini almaları gereklidir. Bu giriş değerleri, IF-THEN kuralları ile analiz edilip çıkış değerlerine dönüştürülürler [105]. Şekil 4.9'da IF-THEN kural yapısına bir örnek verilmiştir.



Şekil 4.9. Bilgi gösterimi için kural yapısı

Uzman sistemlerde kuralların uygulanması, daha önceden bilgi ve kuralların yüklendiği uygun bir mekanizma tarafından sağlanır. Uzman sistemin bu kısmı, çıkarım mekanizması olarak adlandırılır. Bu mekanizma, kullanıcı sorularını cevaplamak için bilgi tabanı içindeki belirli kural durumlarını araştırır [105]. Bir uzman sistemde kullanıcı arayüzü, sistemler ile kullanıcının iletişimini sağlayan yapıdır. Bu bağlamda, veri girişi ve uzman sistemin çıkış değerinin kullanıcıya gösterimi bu arayüz aracılığı yapılmaktadır.



Şekil 4.10. Uzman sistemlerin çalışma yapısı [104]

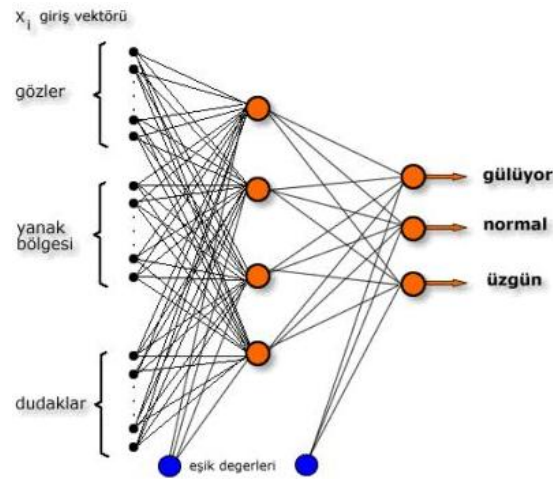
Literatüre bakıldığında, hücre oluşturmada uzman sistemlerin karar destek sistemleri içinde veya karar destek sistemleri ile beraber kullanıldığı görülmektedir. Bununla beraber, uzman sistemler hücre oluşturmada diğer hücre oluşturma metotlarına göre daha az kullanılmaktadır.

Yapay sinir ağları (Artificial Neural Network), insan beyninin sinir hücresi (nöron) yapısından esinlenerek geliştirilmiş, modellenen ve öğrenen algoritmaya sahip sistemlerdir [108]. Yapay sinir ağları, modelleme ve kontrol gibi birçok alandaki problem çözümü için başarıyla kullanılmış bir yapay zekâ metodudur. Yapay sinir ağları, problemlere hızlı ve zeki çözüm sağlamaları, az veriyle genelleme

yapabilmeleri, öğrenebilmeleri ve çeşitli tipteki problemlere kolaylıkla uyarlanabilmelerinden dolayı bir çok problemin çözümünde kullanılmışlardır [106].

Yapay sinir ağları, bir sistem ile ilgili çeşitli parametrelere bağlı olarak tanımlanan girişler ve çıkışlar arasında ilişki kurabilme yeteneğine sahiptir. Bu ilişkinin doğrusal bir formda olması zorunlu değildir. Böylece yapay sinir ağları, doğrusal olmayan gerçek hayat problemlerini çözebilme yeteneğine sahiptir denilebilir. Ayrıca yapay sinir ağları, çıkış değerleri bilinmeyen tanımlanmış sistem girişlerine de uygun çıkışlar üretebilmekte, böylece çok karmaşık problemlere dahi iyi çözümler üretebilmektedirler [107]. Yapay sinir ağlarının çözüm getirdiği temel problemler aşağıdaki gibi belirtilebilir [112]:

- Öngörü veya tahminleme problemleri: Satış tahminleri, hava durumu tahminleri, at yarışları, ekonomik risk tahminleri
- Sınıflandırma ve kümeleme problemleri: Hücresel üretim sistemleri için parça ve makine kümeleme, müşteri profilleri, ses ve şekil tanıma vb.
- Kontrol: Pilot otomasyonu, trafik akış kontrolü vb.

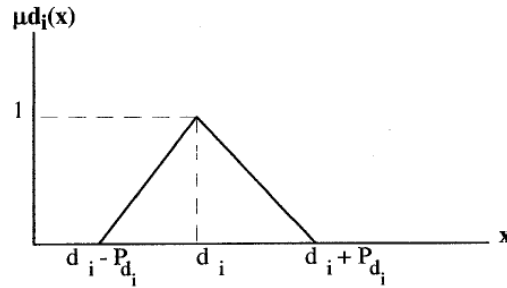


Resim 4.1. Yapay sinir ağı uygulama örneği [160]

Literatürdeki yapay sinir ağları ile ilgili hücre oluşturma çalışmaları, uzman sistemlere göre daha fazladır. Chung ve Kusiak çalışmalarında [109], parçaların gruplanması için sinir ağı yaklaşımını kullanmışlardır. Burke ve Kamal

çalışmalarında [110], hücreyel imalatta hücre oluşturma problemleri için bir adaptif rezonans teorisi yapay ağı (adaptive resonance theory-ART-neural network) uygulaması sunmuşlardır. Kuo ve arkadaşları [111], parçaları gruplamak için bulanık mantık ve ART2 sinir ağını adapte eden bir yaklaşım sunmuşlardır.

Yapay zeka metotlarından belki de en geniş çaplı ve en çok kullanılanı bulanık mantıktır. Zadeh (1965) tarafından geliştirilen bulanık mantık (fuzzy logic), belirsizliği karar modellerine adapte edebilen bir yaklaşımdır [113]. Bu adaptasyonda dilsel ifadelerdeki bulanıklık, Şekil 4.11'deki gibi bir üyelik fonksiyonu ile ifade edilmektedir.

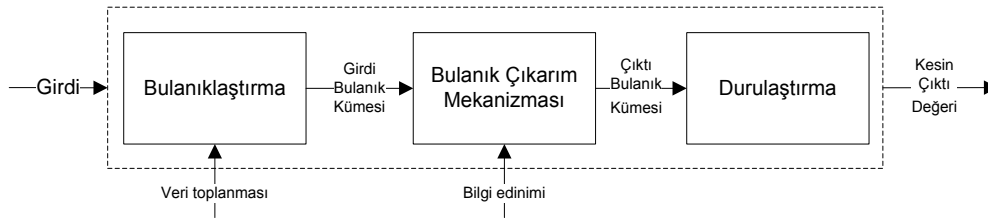


Şekil 4.11. Üyelik fonksiyonu örneği [113]

Bulanık mantığın temelinde bulanık küme ve alt kümeler kavramı bulunmaktadır. Aristo'nun klasik küme teorisinde bir varlık, bir kümenin ya elemanıdır ya da değildir. Bu durum matematiksel olarak 0 ve 1 değerleri ile ifade edilmektedir. Bulanık mantık, Aristo'nun klasik kümeler teorisinin genişletilmiş halidir. Buna göre bir bulanık kümede bulunan her varlığın bir üyelik derecesi vardır. Varlıkların üyelik derecesi $[0, 1]$ aralığında herhangi bir değer olabilir [115].

Bir bulanık mantık sistemi, Şekil 4.12'de görüldüğü gibi 3 önemli kısımdan oluşur. Bu kısımlar, bulanıklaştırma, bulanık çıkarım mekanizması ve durulaştırma [116]. Bulanıklaştırıcı, bulanık sistemin ilk birimi olarak devreye girmektedir. Kesin biçimde bu birime giren bilgiler, burada bir ölçek değişikliğine uğrayarak bulanıklaştırılmaktadır. Bulanıklaştırma ile ilgili giriş bilgilerinin her birine bir üyelik değeri atanır. Üyelik değerleri ile dilsel bir yapıya dönüştürülen bilgiler bulanıklaştırılmış olmaktadır. Bulanıklaştırılan giriş değerleri, bulanıklaştırma

mekanizmasından sonra bulanık çıkarım mekanizmasına gönderilir [117]. Bulanık çıkarım mekanizmasına gelen bilgiler, kural işleme biriminde depolanmış bir şekilde bulunan bilgi tabanına dayalı “if ... and ... then ... else” gibi kural işleme bilgileri ile birleştirilir ve problemin yapısına uygun mantıksal karar önermeleri kullanılarak elde edilen sonuçlar durulaştırıcı birime gönderilir. Durulaştırıcı birime gönderilen sonuçlar, bir ölçek değişikliği daha geçirerek gerçel sayılara dönüştürülür [117, 118].



Şekil 4.12. Bulanık mantığın çalışma prosedürü

Bulanık mantık sistemleri, çok çeşitli konularda uygulama alanı bulabilmektedir. Bulanık mantık sistemlerinin uygulama alanlarından bazıları aşağıdaki gibidir [114]:

- Otomatik Kontrol Sistemleri: Robotik, otomasyon, akıllı denetim, izleme sistemleri, ticari elektronik ürünler vb.
- Bilgi Sistemleri: Bilgi depolama ve yeniden çağırma, uzman sistemler, bilgi tabanlı sistemler vb.
- Görüntü Tanımlama: Görüntü işleme, makine görüntülemesi.
- Optimizasyon: Fonksiyon optimizasyonu, süzgeçleme, eğri uydurma vb.

Kesin sınırların bulunmadığı parça veya makine gruplandırma problemleri için bulanık mantık iyi bir araçtır [113]. Bulanık mantığa göre, bir parça birden fazla parça ailesine ve bir makine birden fazla makine hücresine belli bir üyelik derecesi ile ait olabilir. Bu düşünceye dayanan bulanık kümeleme yöntemleri (Fuzzy C-Means vb.) hücresel üretim sistemleri için sıkça kullanılmaktadır. Naadimuth ve arkadaşları çalışmalarında (2010) [119], çok kriterli bir hücre oluşturma problemi için bulanık kümelemeye dayalı bir yaklaşım geliştirmişlerdir. Pai ve Lee çalışmalarında (2001) [120], bir makine-parça gruplama problemi için bir adaptif bulanık sistem kullanmışlardır. Güngör ve Arıkan çalışmalarında (2000) [121], hücre oluşturma problemlerinin çözümü için bulanık mantığa dayalı yeni bir algoritma

önermişlerdir. Arıkan ve Güngör bir diğer çalışmalarında (2009) [122], hücresele imalat sistemleri için çok amaçlı bulanık bir matematiksel model sunmuşlardır.

4.3. Oluşturulan Hücrelerin Performansını Değerlendirme Yöntemleri

Uygun bir metotla bir hücresele sistem oluşturulduktan sonra, bu hücresele sistemin bazı yönlerden değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu değerlendirme ile hem hücresele sistemlerin hücre oluşturmadaki başarısı ölçülmüş olmakta hem de mevcut veya yeni metotlarla karşılaştırma imkanı sağlanmaktadır. Hücresele sistemleri değerlendirmek için literatürde çok sayıda kriter bulunmaktadır. Bu değerlendirme kriterleri çoğunlukla gruplama ve performans ölçümlerini içermektedir [123].

Farklı algoritmalar kullanılarak elde edilmiş hücre oluşturma çözümlerini değerlendirmek için en iyi yol, iyi bir sayısal ölçek seçmektir. Eğer böyle bir ölçek seçilirse, hücre oluşturma problemlerinin sonuçlarını karşılaştırmak daha kolay olacaktır [123]. Literatürde bu amaçla geliştirilmiş, gruplama etkinliğine, kümeleme ölçütüne ve kalite indeksine dayalı hücre değerlendirme metotları bulunmakla beraber, hücre oluşturmada en çok kullanılan değerlendirme yöntemleri aşağıda sunulmuştur:

- Gruplama verimliliği
- Gruplama etkinliği
- Hücre içi akış etkinliği
- Hücreler arası akış etkinliği
- Gruplama ölçüsü

Gruplama verimliliği (grouping efficiency), Chandrasekharan ve Rajagopalan (1986) tarafından geliştirilmiş ilk sayısal değerlendirme yöntemidir [124, 125]. Gruplama verimliliği η , η_1 ve η_2 'nin ağırlıklı bir ortalaması olarak aşağıda verilen eşitlik (1.3) ile hesaplanmaktadır.

$$\text{Gruplama verimliliği} = \eta = q.\eta_1 + (1-q).\eta_2, \quad 0 \leq q \leq 1 \quad (1.3)$$

Grup verimliliği formülündeki η_1 ve η_2 değerleri, aşağıda (1.4)'de verilen eşitlikler ile hesaplanır. Bu formülasyonda e_d diagonal (köşegen) bloklardaki 1'lerin toplamını, e_o diagonal (köşegen) olmayan bloklardaki 1'lerin toplamını, k hücre veya grup sayısını, m makine sayısını, n parça sayısını, M_r r 'inci hücredeki makine sayısını, N_r r 'inci hücredeki parça sayısını temsil etmektedir.

$$\eta_1 = \frac{e_d}{\sum_{r=1}^k M_r N_r} \quad , \quad \eta_2 = 1 - \left[\frac{e_o}{mn - \sum_{r=1}^k M_r N_r} \right] \quad (1.4)$$

Gruplama verimliliğinin ayırma/bölme konusundaki zayıflığının üstesinden gelebilmek için Kumar ve Chandrasekharan (1990) gruplama etkinliği (grouping efficacy) adında bir başka hücre değerlendirme yöntemi önermişlerdir [123]. Bu yöntem, istisnai elemanlara ve hücre içindeki boşluklara eş ağırlık vererek hesaplama yapmaktadır. Gruplama etkinliği aşağıdaki eşitlik (1.5) ile hesaplanmaktadır. Bu formülasyonda e matristeki toplam 1'lerin sayısını, e_o istisnai elemanların sayısını ve e_v 'de diagonal bloklardaki boşlukların veya 0 değerli elemanların sayısını temsil etmektedir.

$$\tau = \frac{e - e_o}{e + e_v} \quad (1.5)$$

Hücre içi akış etkinliği (τ_1) ve hücreler arası akış etkinliği (τ_2), gruplama etkinliğine bağlı olarak sıra ile (1.6)'daki eşitliklerle hesaplanmaktadır.

$$\tau_1 = 1 - \frac{e_o}{e} \quad , \quad \tau_2 = \frac{e_b}{e} \quad (1.6)$$

Miltenburg ve Zhang (1991) tarafından önerilen gruplama ölçüsü (grouping measure), birçok algoritmanın performanslarını karşılaştırmak için kullanılan birincil bir değerlendirme yöntemidir. Bu yöntem, gruplanmış veya kümelenmiş bir matris

elde etmek için bir algoritmanın verimliliğini direk ölçen bir yöntemdir. Gruplama ölçüsü η_g aşağıda verilen eşitlik (1.7)'deki gibi hesaplanmaktadır. Bu formülasyonda η_u , (1.4)'teki η_l 'e eşittir. η_m ise istisnai elemanların sayısının matristeki 1'lerin toplam sayısına oranlanması ile elde edilir.

$$\eta_g = \eta_u - \eta_m \quad (1.7)$$

BÖLÜM 5. HÜCRESEL ÜRETİM SİSTEMLERİ İÇİN ÇOK AMAÇLI VE DOĞRUSAL OLMAYAN BİR MODEL VE ÇÖZÜM ÖNERİSİ

Yeni metot ve yaklaşımların ortaya çıkması ve bilgisayarların hız ve kapasitelerinin artması, gerçek hayat problemlerinin (real-world problems) daha realistik olarak modellenmesine imkan vermiştir. Bu bağlamda geliştirilen yeni metot ve araçların kullanılması, gerçek hayat problemlerinin makul süre içinde ve arzu edilebilir sonuçlarla çözülmesini sağlamıştır.

Günümüzdeki gerçek hayat problemlerinin temel özellikleri incelendiğinde, çoğunlukla büyük boyutlu, karmaşık, doğrusal olmayan (non-linear) ve çok amaçlı (multi-objective) bir yapıya sahip oldukları görülür. Klasik modelleme anlayışı ve çözüm teknikleri ile bu yapıdaki problemleri çözmek, çoğu zaman ya çok zor yada imkansızdır. Bununla birlikte günümüzün rekabetçi ve hızlı işleyen piyasa ortamında zaman faktörü çok önemli olduğu için, hızlı bir şekilde kaliteli sonuçlara ulaşan modeller, metotlar ve yaklaşımlar her zaman ön planda olmaktadır.

Büyük boyutlu ve karmaşık problemleri makul bir sürede arzu edilebilir sonuçlarla çözen yaklaşımların ortaya çıkması, modelleme yapılırken bir çok amacın da dikkate alınmasına imkan vermiştir. Böylece tek amaçlı basit modellerin yerini çok amaçlı karmaşık modeller almaya başlamıştır. Çok amaçlı modellerin ortaya çıkması, çelişen bazı amaçların modellere uygulanması ile daha karmaşık bir hal almıştır. Bu tip modellerin çözümünde genellikle tek bir optimum çözüm yoktur. Bunun yerine pareto optimum çözüm kümesi vardır [127].

Gerçek hayat problemleri çoğu zaman doğrusallık şartlarını sağlamamaktadır. Böylece bu problemlerin çözümü daha karmaşık bir hal almaktadır. Her ne kadar gerçek hayatta bazen çözümünün tamsayı olması gereken ve çoğu kez üstel

hesaplama zamanı gerektiren zor doğrusal programlama modelleri ile karşılaşılsa da [126], bu problemlerin kullanım alanları çok kısıtlıdır. Doğrusallık şartını sağlamayan problemlerin çözümü için literatürde ilk olarak türev yaklaşımlarını kullanan çeşitli metotlar önerilmişse de [128, 129] bu metotlar bugünkü mevcut metotlarla kıyaslandığında çözüme ulaşma hızı bakımından oldukça yavaş kalmaktadır. Ancak yine de türeve dayalı metotlar, bugün birçok mühendislik probleminde kullanılmaktadır [130].

Günümüzde büyük boyutlu doğrusal olmayan problemlerin çözümü için meta-sezgisel yaklaşımların kullanımı oldukça yaygındır. Mevcut hücreli üretim sistemleri ile ilgili literatür çalışmaları incelendiğinde oluşturulan modellerin dinamik [131], pratik hayatta uygulanabilecek ve gerçekçi modeller olduğu görülmektedir. Bu türdeki problemlerin klasik metotlarla çözümü oldukça uzun süre gerektireceğinden genellikle meta-sezgisel yaklaşımlarla çözüme gidildiği görülmüştür.

Bu tez çalışmasında, gerçek üretim ihtiyaçları doğrultusunda 0-1 tam sayılı, çok amaçlı ve doğrusal olmayan bir matematiksel model önerilmiştir. Önerilen modelin amaçları, literatür ve pratik hayat ihtiyaçları doğrultusunda belirlenmiştir. Önerilen modelin amaçları aşağıda sunulmuştur:

1. İstisnai elemanların sayısını minimize etmek
2. Hücre içi boşlukların sayısını minimize etmek
3. Hücre yükü varyasyonunu minimize etmek

Gerçek hayat problemleri düşünüldüğünde, bir çok üretim ortamında alternatif rotalar dikkate alınarak çizelgeleme yapılmaktadır. Her ne kadar alternatif rotaların kullanımı, problem karmaşıklığını artırsa da kaliteli ve gerçekçi çözümler üretilebilmesi için karar vericilere avantaj sağlar. Bu tez çalışmasında önerilen modelde, sağlayacağı avantajlardan dolayı alternatif rotalar ihmal edilmemiştir. Bununla beraber literatürdeki birçok çalışmada problem karmaşıklığını artırdığı için alternatif rotalar ihmal edilmiştir [132]. Benzer şekilde literatürdeki bazı çalışmalar, hücre oluşturmada operasyonların sırasını (sequence of operations) ihmal etmişlerdir.

Operasyon sırası, makinelerin diziliş sırasını etkilediği için önemli bir faktördür. Ancak gerçek hayatta çoğu kez pratik olmaması nedeniyle ihmal edilen bu özellik, bu çalışmada da ihmal edilmiştir. Bununla beraber, hücresele üretim sistemlerinin daha iyi analizi için operasyonların sırasının dikkate alınması gerektiğini belirten çalışmalar da bulunmaktadır [133].

Bu tez çalışmasında önerilen 0-1 tamsayılı doğrusal olmayan çok amaçlı matematiksel model aşağıda sunulmuştur. Bu modelin amaçları, gerçek hayat gereksinimleri düşünülerek belirlenmiştir.

Önerilen modelde kullanılan notasyonlar aşağıda sunulmuştur:

İndisler

p : parça indisi, $p = 1, 2, \dots, P$.

t : makine indisi, $t = 1, 2, \dots, T$.

h : hücre indisi, $h = 1, 2, \dots, H$.

r : rota indisi, $r = 1, 2, \dots, R$.

Parametreler

w_{ptr} : t makinesi üzerindeki r rotalı p parçasının işyükü ($[w_{ptr}]$: işyükü matrisi)

m_{phr} : h hücresindeki r rotalı p parçasının ortalama iş yükü

L_{ph} : h hücresine atanacak minimum parça sayısı

U_{ph} : h hücresine atacak maksimum parça sayısı

z_{pt} : t makinesi üzerinde işlenen p parçasının işlem zamanı

M_p : üretim için gerekli p parçasının miktarı

Z_t : t makinesi üzerindeki bir işlem için mevcut zaman

Karar Değişkenleri (0–1)

$$a_{ptr} = \begin{cases} 1, & \text{eğer } p \text{ parçası, } r \text{ rotası ile } t \text{ makinesinde işlenirse,} \\ 0, & \text{diğer hallerde;} \end{cases}$$

$$x_{phr} = \begin{cases} 1, & \text{eğer } p \text{ parçası, } r \text{ rotası ile } h \text{ hücresine atanırsa,} \\ 0, & \text{diğer hallerde;} \end{cases}$$

$$y_{th} = \begin{cases} 1, & \text{eğer } t \text{ makinesi } h \text{ hücresine atanırsa,} \\ 0, & \text{diğer hallerde;} \end{cases}$$

Önerilen çok amaçlı modelin amaç fonksiyonları aşağıda sunulmuştur (eşitlik 1.8-1.10):

1. İstisnai elemanların minimizasyonu:

$$\min f_1(x, y) = \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T \sum_{h=1}^H \sum_{r=1}^R a_{ptr} x_{phr} (1 - y_{th}) \quad (1.8)$$

2. Hücre içindeki boşlukların toplamının minimizasyonu:

$$\min f_2(x, y) = \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T \sum_{h=1}^H \sum_{r=1}^R y_{th} x_{phr} (1 - a_{ptr}) \quad (1.9)$$

3. Hücre yükü varyasyonunun minimizasyonu:

$$\min f_3(x, y) = \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T \sum_{h=1}^H \sum_{r=1}^R y_{th} x_{phr} a_{ptr} (w_{ptr} - m_{phr})^2 \quad (1.10)$$

$$m_{phr} = \frac{\sum_{t=1}^T y_{th} x_{phr} w_{ptr}}{\sum_{t=1}^T y_{th}}, \quad w_{ptr} = \frac{z_{pt} M_p}{Z_t} \quad (1.10a)$$

Eşitlik (1.8)'de hücrelerarası taşıma sayısını azaltmak için istisnai elemanlar minimize edilmektedir. Bir istisnai eleman, bir parçanın farklı bir hücrede bulunan makinede işlemesi sunucunda ortaya çıkar. İstisnai elemanlardan dolayı parçalar,

atandığı hücreden çıkarak farklı hücrede/hücrelerde işlenmek zorunda kalır. Bunun sonucunda hem para hem de zaman kaybı oluşur.

Eşitlik (1.9)'da makine hücrelerindeki boşlukların sayısı minimize edilmektedir. Hücre içindeki bir boşluk, hücreye bir makinenin atandığını ancak bu hücredeki bir parçanın işlenmesi için bu makinenin kullanılmadığını ifade eder. Bu boşluklar, hücre verimliliği için önemli göstergelerden biridir [134]. İstisnai elemanlar ve hücre içi boşlukların sayısı, yüksek hücre kullanım oranı elde edebilmek için çok önemli parametrelerdir.

Eşitlik (1.10)'da hücre içlerinde düzgün malzeme akışını sağlamak için hücre yükü varyasyonu minimize edilmektedir. Eşitlik (1.10a)'da hücre yükü varyasyonunu hesaplamak için iki farklı eşitlik sunulmuştur. Bu eşitlikler, ortalama hücre yükü matrisini (m_{phr}) ve r rotalı p parçası tarafından t makinesi üzerinde oluşturulan işyükünü (w_{ptr}) elde etmek için kullanılmaktadır.

Önerilen matematiksel modelin kısıtları aşağıda sunulmuştur:

$$\sum_{r=1}^R \sum_{h=1}^H x_{phr} = 1 \quad \forall p \quad (1.11)$$

Yukarıdaki kısıt (1.11), her parçanın sadece bir hücreye atanmasını ve alternatif rotalardan sadece birinin seçilmesi garanti etmektedir.

$$\sum_{t=1}^T y_{th} \geq 1 \quad \forall h \quad (1.12)$$

Kısıt (1.12), her hücrenin en az bir makineye sahip olmasını garanti etmektedir.

$$\sum_{p=1}^P x_{phr} \geq L_{ph} \quad \forall h \quad (1.13)$$

Kısıt (1.13), her hücrenin en az L_{ph} kadar parçaya sahip olmasını garanti etmektedir.

$$L_{ph} \leq \sum_{p=1}^P x_{phr} \leq U_{ph} \quad \forall h \quad (1.14)$$

Kısıt (1.14) her hücrenin belirli sayıda parçaya sahip olmasını garanti etmektedir. Böylece, hücre boyutları belirli sınırlarla sınırlandırılabilir. Bu modelin kullanımında ya kısıt (1.13) yada kısıt (1.14) kullanılmalıdır. Kısıt (1.14), kısıt (1.13)'ün daha daraltılmış halidir. Bununla beraber bu tez çalışmasında kısıt (1.13) kullanılmış ve L_{ph} değeri 1 olarak belirlenmiştir. Bunun anlamı her hücrenin en az 1 parçaya sahip olması gerektiğidir.

$$a_{ptr}, x_{phr}, y_{th} \in \mathbf{Z} \{0, 1\} \quad (1.15)$$

Kısıt (1.15), x_{phr}, y_{th} karar değişkenlerinin ve a_{ptr} parametresinin tamsayı ve (0-1) değerli olmasını garanti eder.

$$N_t, L_{ph}, U_{ph}, M_p \in \mathbf{Z} \quad (1.16)$$

$$w_{ptr}, m_{phr}, z_{pt}, Z_t \in \mathbf{R} \quad (1.17)$$

Kısıt (1.16) ve kısıt (1.17) ise bazı parametreler hakkında bilgi vermektedir.

5.1. Optimizasyonda Çok Amaçlı Çözüm Yaklaşımları

Gerçek hayat problemleri; birden fazla faktörün veya amacın bir arada değerlendirilmek zorunda olması, amaçların çoğunlukla birbirleri ile çelişmeleri, karar durumlarının içerdiği belirsizlikler ve karar süreçlerine ve sonuçlarına birden fazla karar vericinin dahil olması gibi nedenlerle karmaşık bir yapıdadırlar [135]. Bu türdeki karar verme problemlerinin çözümü için günümüzde çok sayıda “çok amaçlı karar verme yaklaşımı” önerilmiştir. Bu çok amaçlı karar verme yaklaşımlarında

amaç, birbiri ile çatışan veya çelişen birden fazla amacı tatmin eden optimum çözüm veya çözüm kümesini tespit etmektedir [137].

Çok amaçlı karar problemlerinde karşılaşılan iki önemli problem bulunmaktadır. İlk karşılaşılan problem, literatürdeki çoğu çözüm yönteminin ya basit yada çözümü kolaylaştırmak için tek amaçlı problemlerin çözümü için geliştirilmiş olmasıdır. İkinci problem ise çok amaçlı modellerin skalerleştirilmesi sonucunda çözümde karşılaşılan problemlerdir [136].

Genel olarak çok amaçlı optimizasyon problemleri aşağıda (1.18) ile gösterilen şekilde ifade edilmektedir. Bu gösterimde, k amaç fonksiyonu sayısını, m eşitsizlik şeklindeki kısıtların sayısını, e eşitlik şeklindeki kısıtların sayısını, $F_i(x)$ ise amaç fonksiyonunu temsil etmektedir.

$$\begin{aligned} \text{Min } F(x) &= [F_1(x), F_2(x), \dots, F_k(x)]^T \\ g_j(x) &\leq 0, \quad j=1, 2, \dots, m, \\ h_l(x) &= 0, \quad l=1, 2, \dots, e, \end{aligned} \tag{1.18}$$

Tek amaçlı optimizasyondan farklı olarak, çok amaçlı optimizasyonda genellikle tek bir global çözüm yoktur. Bu nedenle çok amaçlı optimizasyonda sık sık tüm amaçları tatmin eden bir çözüm kümesinin belirlenmesi gerekmektedir [137]. Bu noktada “pareto optimum çözüm” kavramı ortaya çıkmaktadır. Pareto optimum çözüm, arama uzayında hiçbir diğer çözüm tarafından domine edilemeyen çözüm olarak tanımlanabilir. Çok amaçlı gerçek hayat problemlerinde amaçlar çoğu zaman birbiriyle çakışır ve aynı anda optimize edilemezler. Bunun yerine tatmin edici bir tercih çözümü bulunmalıdır. Bu nedenle, uygun tercih seçimi için bir karar verme süreci gerekir [138].

Skalerleştirme, birçok çok amaçlı optimizasyon probleminin çözümü için kullanılan bir yaklaşımdır. Skalerleştirmede amaç, uygun dönüşümlerle çok amaçlı problemi tek amaçlı optimizasyon problemine dönüştürmektir. Skalerleştirme sayesinde, tek amaçlı problemlerin optimizasyonu için geliştirilmiş metotlar çok amaçlı modeller

için de kullanılabilir hale gelir. Çok amaçlı modellerin skalerleştirilmesi için geliştirilmiş bazı metotlar aşağıdaki gibidir:

- Amaçların direk toplanması
- Ağırlıklı toplam skalerleştirme
- ϵ kısıt skalerleştirme
- Benson skalerleştirme
- Hedef programlama

Hücrel üretim sistemleri ile ilgili çok amaçlı modellerin çözümü incelendiğinde skalerleştirme işleminin daha ziyade amaçların direk toplanması, ağırlıklı toplam (weighted-sum) skalerleştirme ve ϵ kısıt skalerleştirme ile yapıldığı görülmektedir.

Ağırlıklı toplam skalerleştirme ve amaçların direk toplanması metodu, dışbükeylik ve pareto optimal kümesi ile ilgili bazı eksiklere rağmen günümüzde halen en yaygın kullanılan skalerleştirme metotlarıdır. Bu metotlarla hem amaçların ağırlık değerleri değiştirilerek çoklu çözüm noktaları elde edilebilir hem de seçilen bir ağırlık setinin birleştirilmesi ile tek bir çözüm noktası elde edilebilir [144]. ϵ kısıt skalerleştirme yönteminin ağırlıklı toplam skalerleştirme metoduna göre en önemli avantajı, dışbükeylik şartına ihtiyaç duymaması ve genel problemler için kullanılabilir olmasıdır [136]. Ağırlıklı toplam skalerleştirme metodundan farklı olarak ϵ kısıt yöntemi, amaçlardan birini en küçüklerken diğerlerini eşitsizlik halinde kısıtlara eklemektedir [136, 145]. Diğer yöntemlerle karşılaştırıldığında, amaçların direk toplamının en basit skalerleştirme yöntemi olduğu söylenebilir. Bu yöntemin en önemli avantajı, problemi karmaşıklarıktan tek amaçlı hale dönüştürmesidir. Bununla beraber, karar vericilerin amaçlar üzerinde hiçbir etkisi yoktur.

Literatürde, hücre oluşturmada kullanılan bazı skalerleştirme yaklaşımları ile ilgili çalışmalar aşağıda sunulmuştur:

Arkat ve arkadaşları (2011) çalışmalarında [139], hücre oluşturma için iki amaçlı bir model önerisinde bulunmuşlardır. Yazarlar bu iki amacı ϵ -kısıt yöntemi ile skalerleştirmişlerdir. Moghaddam ve arkadaşları (2010) çalışmalarında [140], çeşitli

maliyetleri ve hücreler arasındaki kullanım farklarını minimize eden ve makine kullanımını maksimize eden dört amaçlı bir hücre oluşturma modeli sunmuşlardır. Yazarlar sundukları dört amacı ağırlıklı toplam skalerleştirme yöntemi ile skalerleştirmişlerdir. Mahdavi ve arkadaşları (2009) çalışmalarında [141], istisnai elemanları ve hücre içindeki boşlukları minimize eden iki amaçlı bir model önermişlerdir. Yazarlar bu iki amaçlı modeli, amaçların direk toplamı yoluyla tek amaçlı model haline getirmişlerdir. Literatürdeki karşılaştırmalarda sıklıkla kullanılan önemli referans çalışmaların çok amaçlı hücre oluşturma modelleri ve kullanılan skalerleştirme yöntemlerinin karşılaştırması Tablo 5.1’de sunulmuştur.

Tablo 5.1. Literatürdeki bazı referans çalışmalar için skalerleştirme metotlarının karşılaştırması

İlgili Çalışmalar	Skalerizasyon Metodu	Problem Tipi
<i>Bu çalışmada önerilen model</i>	<i>Konik Skalerizasyon</i>	<i>0-1 tam sayılı lineer olmayan çok amaçlı problem</i>
Arkat ve arkadaşları (2011)	ε Kısıt	Lineer olmayan çok amaçlı problem
Moghaddam ve arkadaşları (210)	Ağırlıklı toplam	0-1 tam sayılı çok amaçlı problem
Mahdavi ve arkadaşları (2009)	Amaçların direk toplamı	0-1 tam sayılı lineer olmayan çok amaçlı problem
Kor ve arkadaşları (2009)	Amaçların direk toplamı	Çok amaçlı problem
Wang ve arkadaşları (2008)	Ağırlıklı toplam	Lineer olmayan çok amaçlı problem
Chan ve arkadaşları (2008)	Ağırlıklı toplam	Lineer olmayan çok amaçlı problem
Javadian ve arkadaşları (2007)	Ağırlıklı toplam	Lineer olmayan çok amaçlı problem
Yasuda ve arkadaşları (2005)	Ağırlıklı toplam	Lineer olmayan çok amaçlı problem
Solimanpur ve arkadaşları (2004)	Ağırlıklı toplam	Lineer olmayan çok amaçlı problem
Malakooti ve Yang (2002)	Ağırlıklı toplam	Kesikli çok amaçlı problem
Zhao ve Wu (2000)	Ağırlıklı toplam	Kesikli çok amaçlı problem
Hsu ve Su (1998)	Ağırlıklı toplam	Lineer olmayan çok amaçlı problem

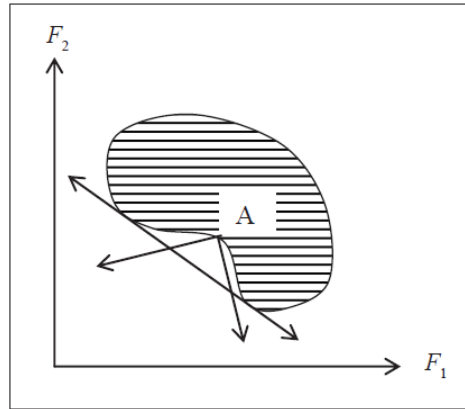
Bu tez çalışmasında önerilen model, literatürdeki diğer modellerden farklı olarak konik skalerizasyon yaklaşımı ile tek amaçlı bir model haline getirilmiştir. Konik skalerizasyon yaklaşımı ve avantajları aşağıda ayrı bir başlık altında incelenmiştir.

5.1.1. Konik skalerleştirme

Literatürde sıkça tercih edilen amaçların direk toplanması ve ağırlıklı toplam skalerleştirme yöntemlerinin kullanılması, amaç fonksiyonlarının ve uygun çözüm alanının dışbükey (doğrusal) olması durumunda uygundur. Bu şart, özellikle doğrusal olmayan (içbükey) çok amaçlı modellerin çözümü için yetersiz kalmaktadır. Bundan

dolayı, amaçların direk toplanması ve ağırlıklı toplam skalerleştirme yöntemleri doğrusal olmayan problemler için uygun yöntemler olarak görülmektedir. Bununla beraber, kolay olmasından dolayı literatürde sıkça kullanılmaktadır. Ayrıca ε kısıt yöntemi doğrusal olmayan modeller için çözüme ulaşma yeteneğine sahip olsa da interaktif bir metot olmama, uygun bir epsilon değerinin belirlenmesinin gerekli olması ve ikiden fazla amacın çözüm süresini artırması gibi dezavantajları vardır. Bu yöntemle ilgili olarak Ehrgott (2005), ε kısıt yöntemi için literatürde uygun etkin çözümlerin mevcut olmadığını da ifade etmiştir [80] .

Bu tez çalışmasında literatürden farklı olarak çoklu amaçların skalerleştirilmesi için Gasimov (2001) [4] tarafından önerilen “konik skalerleştirme yaklaşımı” kullanılacaktır. Konik skalerleştirme yaklaşımında noktalar, hiper düzlemlerle değil konilerle desteklendiğinden klasik ağırlıklandırma ile bulunması mümkün olmayan pareto etkin çözümlerin elde edilmesi mümkün olabilmektedir [143].



Şekil 5.1. İki amaçlı örnek bir problem için dışbükey olmayan görüntü kümesi [143]

Konik skalerleştirme yaklaşımının avantajları, doğrusal olmayan modeller için diğer modellere göre daha etkin sonuçlar üretebilmesi, karar vericinin tercihlerini matematiksel modele yansıtabilmesi, NP-hard karmaşıklık sınıfındaki bir problemin bir kez çözülmesiyle karar vericiyi tatmin edecek bir sonuca ulaşması ve çok geniş bir problem sınıfına hitap etmesidir [143].

Konik skalerleştirmenin genel formülasyonu aşağıdaki gibidir [4]:

$$\text{enk}_{x \in X} \left[a \sum_{i=1}^k |F_i(x) - B_i| + \sum_{i=1}^k w_i (F_i(x) - B_i) \right], (0 \leq \alpha \leq \text{enk} \{w_1, w_2, \dots, w_n\}, w_i > 0) \quad (1.19)$$

Bu formülasyonda, k modeldeki amaç fonksiyonu sayısı, $F_i(x)$ i . amaç fonksiyonu, α konikliği belirleyen bir parametre, w_i i . amaç fonksiyonunun karar verici tarafından belirlenen ağırlığı, B_i ise i . amaç fonksiyonu için referans değeridir. Çözümler bu B_i referans değerinin civarında aranır.

Bu tez çalışmasında önerilen üç amaçlı model, aşağıdaki eşitlikte sunulan konik skalerizasyon ile skalerleştirilmiş amaç fonksiyonunu kullanacaktır.

$$\text{enk } f(x) = a \left[|F_1(x) - B_1| + |F_2(x) - B_2| + |F_3(x) - B_3| \right] + \left[w_1 (F_1(x) - B_1) + w_2 (F_2(x) - B_2) + w_3 (F_3(x) - B_3) \right] \quad (1.20)$$

Bu tez çalışmasında oluşturulacak karar destek sistemi, konik skalerizasyonun koniklik şartını ($0 \leq \alpha \leq \text{enk} \{w_1, w_2, \dots, w_n\}$) sağlamak için, en küçük amaç ağırlık değerini bulur ve bu değerden 0.01 değerini otomatik olarak çıkarır. Böylece koniklik parametresi otomatik olarak oluşturulur. Bu yolla, kullanıcının veya karar vericinin model parametreleriyle uğraşması ve hata yapması önlenmiş olur.

Konik skalerleştirme yaklaşımında her amaç için B_i referans değerleri, ilk çözümde önerilen program tarafından otomatik olarak oluşturulur. Öncelikle ilk amaç değeri için tek amaçlı problem olarak çözülür, 2. ve 3. amaç değerleri bu çözüme göre bulunur. Daha sonra 2. amaç değeri için problem, tek amaçlı olarak çözülür ve 1. ve 3. amaç değerleri bu çözüme göre bulunur. En son olarak ise, 3. amaç değeri için problem, tek amaçlı olarak çözülür ve 1. ve 2. amaç değerleri bu çözüme göre bulunur. Geliştirilecek karar destek sisteminde kullanılan fonksiyonlar aracılığı ile bu hesaplamalar kısa sürede yapılacaktır. Her amaç için bir referans değerlerinin

bulunması için son olarak, her amacın ortalama değeri alınır. Bahsedilen referans değeri hesabı için bir örnek, Tablo 5.2’de sunulmuştur.

Tablo 5.2. Referans değeri (B_i) hesabı için örnek

	Amaç-1	Amaç-2	Amaç-3
1. amaç için çözüm	4*	0	3
2. amaç için çözüm	0	2*	0
3. amaç için çözüm	2	4	0*
Ort. Referans Değerleri	2	2	1

Konik skalerizasyonda w_i ağırlık değerlerinin tespitinde inisiyatif karar vericidedir. Bu değerlerin belirlenmesinde karar vericinin istek ve deneyimleri ön plandadır. Bununla beraber literatürde ağırlık değerlerinin belirlenmesi için AHP gibi çeşitli yöntemler mevcut olmasına rağmen bu tez çalışmasında ağırlık değerlerinin tespiti tamamen karar vericiye bırakılmıştır.

Önerilen karar destek sistemi ile problem bir kez konik skalerizasyon parametreleri ile çözüldükten sonra karar vericiden optimumluğu (yani çözümün kalitesini) değerlendirmesi istenir. Eğer karar verici çözümün kalitesinden memnun değilse, konik skalerizasyonun α değeri (koniklik açısı), referans değeri (B_i) ve amaç ağırlıklarını değiştirerek hedeflediği çözüme yaklaştırmaya çalışabilir. α değeri konik skalerizasyonda konik kollar arasındaki açının ayarlanmasını sağlar. Eğer α değeri "0" olursa bir koni oluşmaz ve konik skalerizasyon ağırlıklı toplam skalerizasyona dönüşür. α değeri büyüdükçe konik skalerizasyonun kolları birbirine yaklaştırmaya başlar. Önerilen sistemde α değerinin belirlenmesi, istenirse karar vericiye istenirse de karar destek sistemine bırakılabilir. Karar verici tarafından belirlenen α değerleri çözüm süresini azaltırken, karar destek sistemi en uygun α değerini aramak için tüm seçenekleri değerlendirdiği için karar destek sistemi tarafından en uygun α değerinin belirlenmesi çözüm süresini artırmaktadır.

5.2. Önerilen Genetik Algoritma Yaklaşımı

Günümüzde tasarlanan hücresel üretim sistemlerinin karmaşık ve çok amaçlı bir yapıya sahip olması, bu sistemler için tasarlanan modellerin klasik yöntemlerle makul sürelerde kaliteli çözümlere ulaşmasını zorlaştırmıştır. Ayrıca büyük boyutlu üretim sistemlerinin çok sayıda parça ve makineye sahip olması ve de kaliteli çözümlere ulaşmak için alternatif rotaların da problemlere dahil edilmesi hücre oluşturma problemlerinin çözümünü zorlaştırmaktadır.

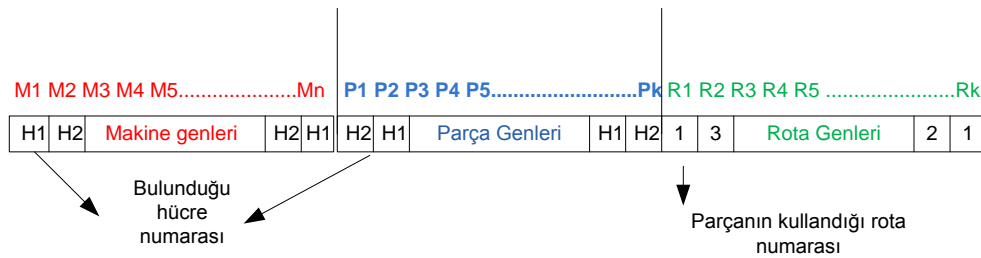
Literatür incelendiğinde, araştırmacıların son zamanlarda büyük boyutlu hücre oluşturma problemlerine odaklandığı ve bu problemlerin çözümü için daha etkili çözüm yöntemlerini araştırdıkları görülmektedir. Bununla beraber son çalışmalarda büyük boyutlu problemlerin çözümü için meta-sezgisel algoritmaların sıkça kullanıldığı gözlenmiştir.

Bu tez çalışmasında önerilen çok amaçlı model, büyük boyutlu hücre oluşturma problemleri için geliştirildiğinden ve önerilen modelin bir karar destek sisteminde kullanılacak olmasından dolayı, hızlı bir şekilde kaliteli sonuçlara ulaşan yaklaşımların kullanılması gereklidir. Ayrıca önerilen modelin kombinasyonel yapısından dolayı, çözüm uzayı veya problem boyutu büyüdükçe modelin makul bir zamanda optimum veya optimuma yakın sonuçlar üretmesi zor olduğu için meta-sezgisel algoritmaların kullanılması gerektiği ve genetik algoritmanın bu tip problemler için uygun olduğu tespit edilmiştir. Literatür incelendiğinde özellikle 2005 yılından itibaren genetik algoritmanın hücresel üretim sistemlerinde kullanımının arttığı görülür. Gerek literatürdeki popülerliği gerekse de çözüme ulaşmadaki yeteneğinden dolayı bu tez çalışmasında genetik algoritma ana çözüm metodu olarak belirlenmiştir. Aşağıdaki Tablo 5.3'te literatürdeki bazı çok amaçlı hücre oluşturma modelleri için çözüm metotlarının karşılaştırılması sunulmuştur.

Tablo 5.3. Literatürdeki bazı çalışmaların çözüm metodlarının karşılaştırılması

İlgili Çalışmalar	Çözüm Metodu
Önerilen Model	Genetik Algoritma
Arkat ve arkadaşları (2011)	Genetik Algoritma
Moghaddam ve arkadaşları (2010)	Scatter search algorithm
Mahdavi ve arkadaşları (2009)	Genetik Algoritma
Kor ve arkadaşları (2009)	Genetik Algoritma -SPEA II
Wang ve arkadaşları (2008)	CPLEX
Chan ve arkadaşları (2008)	Genetik Algoritma
Wu ve arkadaşları (2007)	Genetik Algoritma
Javadian ve arkadaşları (2007)	Genetik Algoritma
Yasuda ve arkadaşları (2005)	Genetik Algoritma
Solimanpur ve arkadaşları (2004)	Genetik Algoritma
Malakooti ve Yang (2002)	Yapay Sinir Ağı
Zhao ve Wu (2000)	Genetik Algoritma
Hsu ve Su (1998)	Genetik Algoritma

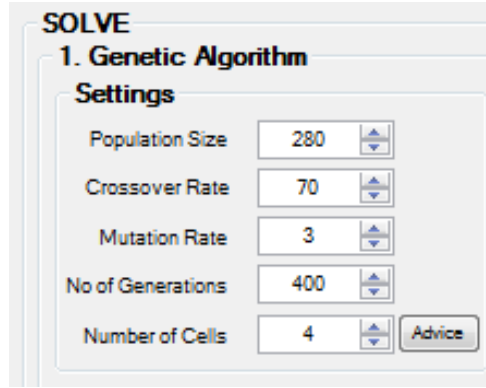
Bu çalışmada önerilen modelin çözümü için önerilen genetik algoritma yaklaşımı için, literatür incelemeleri de dikkate alındığında, aşağıdaki Şekil 5.2’deki gibi bir kromozom yapısı oluşturulmuştur. Şekil 5.2 incelendiğinde, parça sayısı kadar rota atanması gerektiği dikkati çekmektedir. Makine sayısı, parça ve rota sayısından bağımsızdır. Rota bilgisi, önceden her parça için sisteme girilmeli ve her parça en az “1” rotaya sahip olmalıdır.



Şekil 5.2. Önerilen genetik algoritmanın kromozom yapısı

Önerilen genetik algoritmanın çalışabilmesi için kullanıcıdan bazı girdiler alması gerekmektedir. Genetik algoritmanın çalışması için gerekli bu girdiler, Resim 5.1’de gösterilmiştir. Bu girdilerden hücre sayısı hariç diğer girdilerin girişi tamamen kullanıcının inisiyatifine bırakılmıştır. Bununla beraber, önerilen karar destek sistemi bilgilendirici ipuçları ile karar vericiye yardımcı olabilmektedir. Bu girdilerden hücre

sayısının tespiti için, kullanıcı yeterli deneyime sahip değilse, bu kullanıcı “Advice” butonunu kullanarak karar destek sisteminden yardım alabilir.

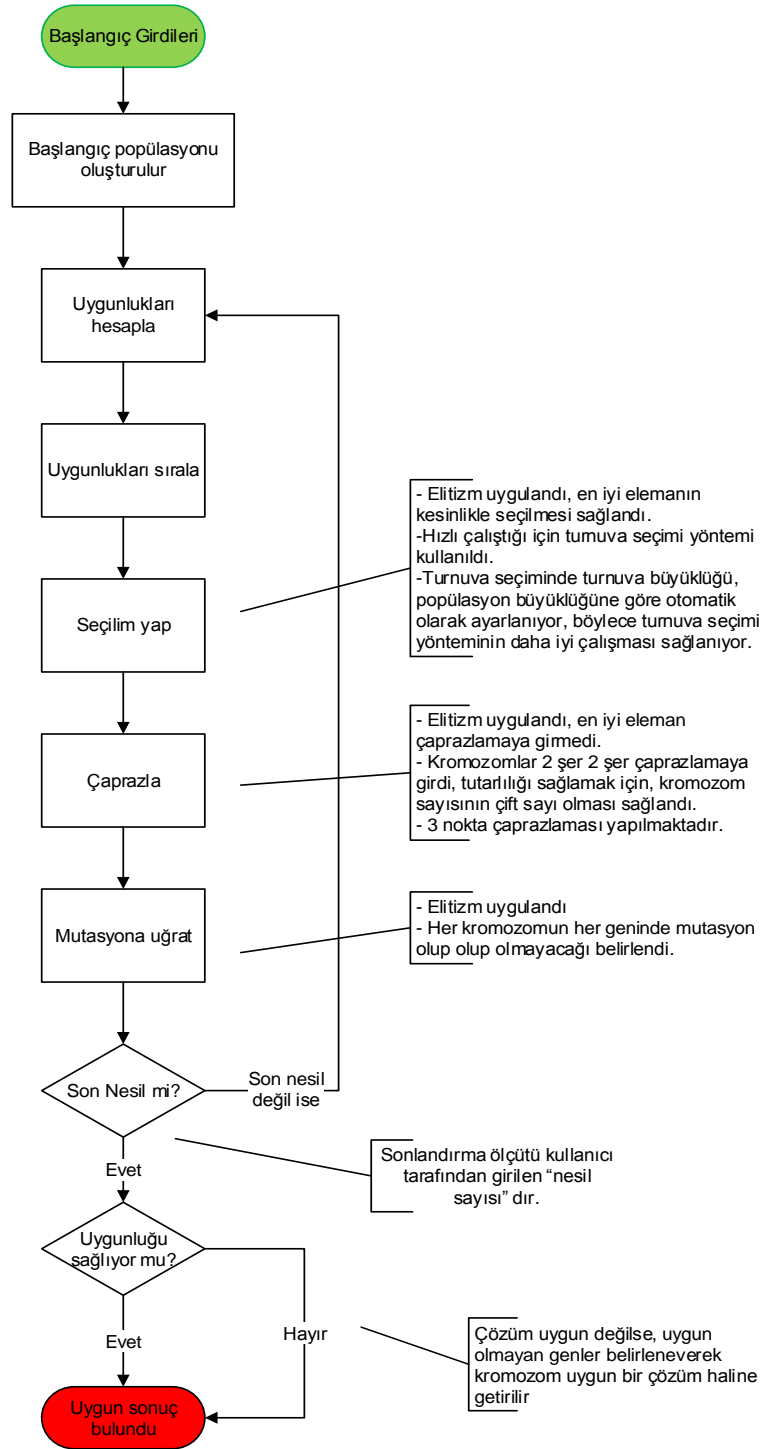


Resim 5.1. Genetik algoritma çalışması için temel girdiler

Önerilen genetik algoritmanın çalışma prosedürü Şekil 5.3'te sunulmuştur. Bu prosedürün içeriği aşağıda ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

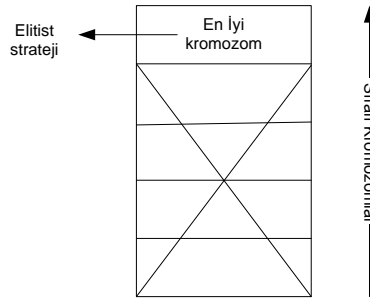
Başlangıç popülasyonu: Kullanıcının istediği sayıda kromozom, önerilen program ile otomatik olarak oluşturulur. Çaprazlamanın tutarlı olması için, kodlama ile başlangıç popülasyonun çift sayıda seçilmesi garanti altına alınmıştır. Çaprazlama, popülasyondaki birey sayısının çift olduğu varsayılarak yapılmaktadır. Bu tez çalışmasında geliştirilen programda, popülasyon büyüklüğü varsayılan olarak 20'dir.

Uygunlukların hesaplanması ve sıralanması: Geliştirilen programda uygunlukların (amaç değerlerinin) hesaplanması, programda kullanılan fonksiyonlar aracılığı ile yapılmaktadır. Uygunluk değerlerinin sıralanması ise, uygunluk değerlerinin program içindeki (.sort) metodu aracılığı ile yapılmaktadır.



Şekil 5.3. Önerilen genetik algoritmanın çalışma prensibi

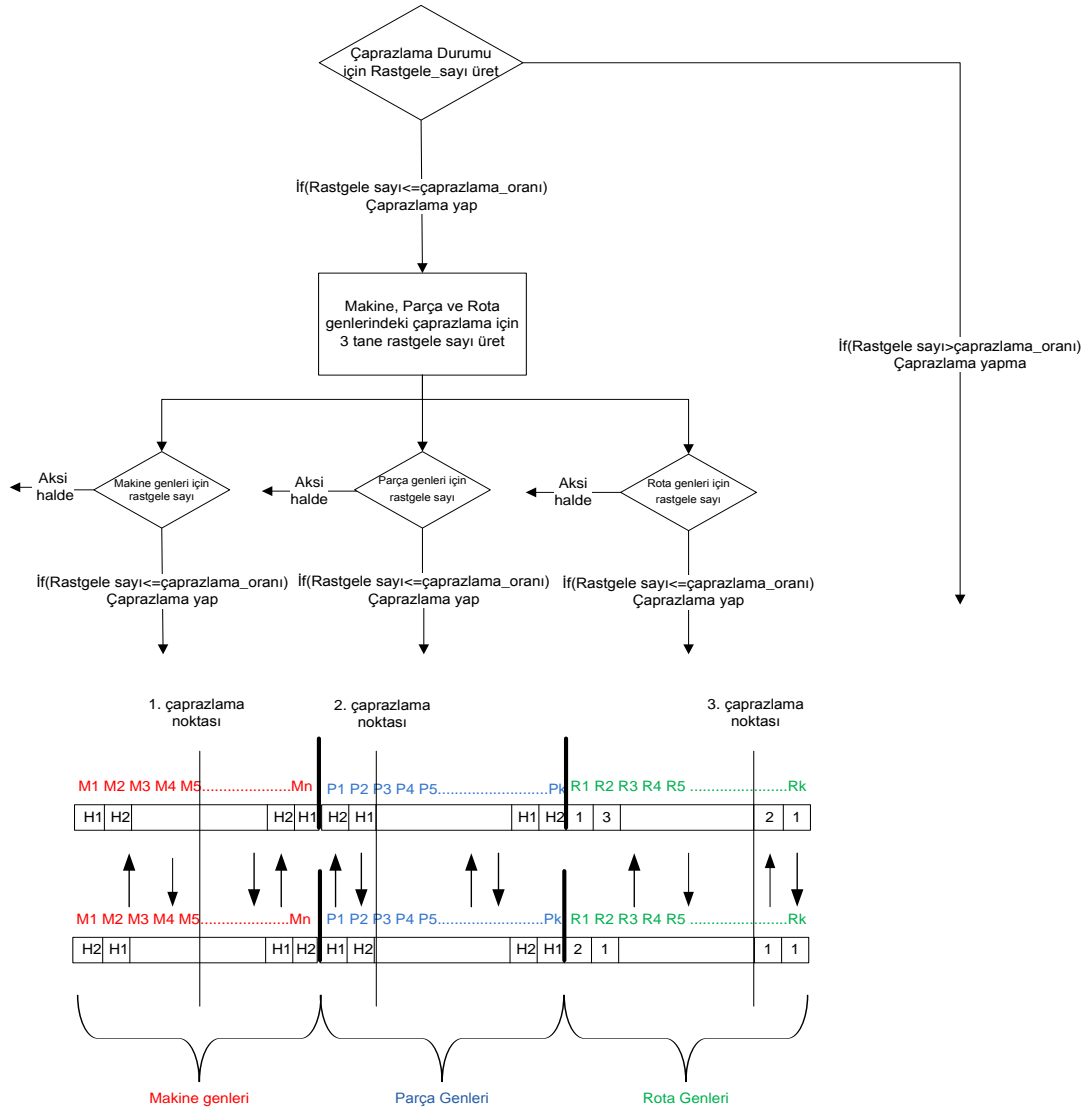
Elitizm operatörü: Elitizm ile, en iyi çözüm veya en iyi birkaç çözüm bir sonraki nesile direkt olarak gönderilir [17]. Böylece en iyi veya en iyi birkaç bireyin genetik operasyonlar sonucu kaybolması önlenmiş olur. Önerilen modelde, sadece en iyi olan bir çözümün korunması garanti altına alınmıştır.



Şekil 5.4. Elitizm operatörü

Seçim operatörü: Seçim operatörü, uygunluk değeri yüksek yapı taşlarının bir sonraki nesle aktarılmasını sağlamaktadır. Seçim operatörü ile kötü kromozomlar yok olur. Literatürde en çok kullanılan seçim operatörleri, rulet tekeri ve turnuva seçim operatörüdür. Bu tez çalışmasında, özellikle seçim baskısını kontrol edebilmek için turnuva seçim operatörü kullanılmıştır. Programda kullanılan seçim operatörü için turnuva büyüklüğü (t), popülasyon büyüklüğüne göre değişmektedir. Böylece seçim baskısı ve çeşitlilik kontrol edilebilmektedir. Bu amaçla program içinde, belli bir popülasyon aralığı için özel turnuva büyüklüğü atayan özel bir yapı oluşturulmuştur. Bu yapıda popülasyon boyutu 31'den küçükse turnuva büyüklüğü 4, popülasyon boyutu 31 ile 60 arasında ise turnuva büyüklüğü 5, popülasyon boyutu 60 ile 101 arasında ise turnuva büyüklüğü 7, popülasyon boyutu 101 ile 160 arasında ise turnuva büyüklüğü 9, popülasyon boyutu 160 ile 220 arasında ise turnuva büyüklüğü 12, popülasyon boyutu 220 ile 400 arasında ise turnuva büyüklüğü 15, popülasyon boyutu 400 ile 600 arasında ise turnuva büyüklüğü 22, popülasyon boyutu 600 ile 800 arasında ise turnuva büyüklüğü 27 ve popülasyon boyutu 800'den büyükse ise turnuva büyüklüğü 30 olarak kabul edilmektedir. Bu değerler, çözülen küçük, orta ve büyük boyutlu problemlerin performanslarından elde edilmiştir.

Çaprazlama operatörü: Çaprazlama operatörünün altında yatan düşünce, iyi uygunluk değerine sahip iki bireyin özelliklerini birleştirerek daha iyi çözümler elde etmektir. Bununla beraber, hangi özelliklerin iyi performans sağladığı bilinmediği için özelliklerin değiş tokuşu rastsal şekilde olmaktadır. Bu rastsal birleşmeler sonucu daha iyi bireylerin oluşması beklenir.



Şekil 5.5. Genetik algoritma için önerilen çaprazlama operatörü

Bu çalışmada önerilen çaprazlama operatörünün yapısı, yukarıda sunulan Şekil 5.5'te görülmektedir. Bu operatörde, 3 nokta çaprazlaması uygulanmaktadır. Bu çaprazlama yönteminin uygulanmasının temel nedeni, hem makine hem parça hem de rota bilgisinde çeşitliliğin sağlanması ve tüm çözümlerin incelenmesidir. Bununla birlikte geliştirilen çaprazlama operatörü son derece esnektir. Bu esneklik sayesinde geliştirilen çaprazlama operatörü, bir çok değişim olasılığını gözden geçirmektedir.

Mutasyon operatörü: Mutasyon operatörü, kromozom üzerindeki bir geni rastgele olarak değiştirerek genetik çeşitliliği sağlar ve çözümün belli noktalarda takılması önler. Ancak mutasyon oranı çok küçük düzeylerde tutulmalıdır. Aksi takdirde arama

işlemi, rassal aramaya dönüşür. Bu tez çalışmasında geliştirilen sistemde mutasyon oranı varsayılan olarak % 0.5'te tutulmuştur. Kullanıcının isteğine göre bu oran değiştirilebilir.

Sonlandırma kriteri: Sonlandırma kriteri için literatürde, genellikle belirli bir nesil sayısı veya belli bir çalışma zamanı kullanılmaktadır. Bu tez çalışmada sonlandırma kriteri olarak “nesil sayısı” seçilmiştir. Bu seçimin nedeni ise kullanıcıların her nesildeki değişiklikleri izleyebilmesini sağlamaktır.

Uygunluk kontrolü: Gerek programın daha hızlı çalışmasını sağlamak gerekse de daha iyi çözümlere neden olacak kromozomları kaybetmemek için her nesilde uygunluk kontrolü yapılmamıştır. Bu durum optimuma yaklaşmayı geciktirebilir. Ayrıca uygun olmayan bazı çözümler, ileride operatörler yardımıyla uygun duruma geçip daha iyi çözümlere neden olabilir. Bu nedenle, sonlandırma kriterine gelindikten sonra mevcut çözümün uygunluğu kontrol edilmektedir. Uygunluk kontrolünde amaç, üretilen son çözümün modelin kısıtlarını sağlayıp sağlamadığının kontrolüdür. Özellikle çaprazlama ve mutasyon sonucu uygunluktan uzaklaşma ihtimali vardır. Uygunluk, bu operatörler sonrasında da kontrol edilebilir. Ancak bu, çözüme ulaşmayı geciktirebilir. Uygunluk kontrolü sonucunda eğer son çözüm (veya son kromozom) önerilen modelin kısıtlarını sağlamıyorsa, uygunluğu bozan genler belirlenir ve bu genler rastgele olarak uygun genler haline getirilerek uygunluğu sağlayacak yeterli miktarda uygun çözüm kromozomu oluşturulur. Uygun olmayan genleri uygun hale getirme, uygunluğu sağlayacak genlerin rastgele olarak uygun olmayan genlerle değiştirmesi ile gerçekleştirilir. Yeterli miktarda oluşturulan çözümlerden en iyi amaç değerine sahip olan çözüm, yeni ve uygun bir çözüm olarak seçilir ve çözüm tamamlanır. Çözüm süreci tamamlandıktan sonra, karar vericinin çözümü değerlendirme sürecine geçilir.

BÖLÜM 6. ÜRETİM HÜCRELERİ OLUŞTURMADA KARAR DESTEK SİSTEMLERİ

Bu bölümde, bu tez çalışmasında önerilen çok amaçlı matematiksel model ve genetik algoritma için bir karar destek sistemi tasarlanmıştır. Bu karar destek sisteminin tasarlanmasının ana amacı, bir yandan kullanıcıların hızlı ve etkili hücresel sistemler oluşturmasını sağlarken diğer yandan da oluşturulan hücresel sistemlerin performans ve grafiksel analizlerinin kolayca yapılabilmesinin sağlanmasıdır.

6.1. Literatürdeki Karar Destek Sistemleri

Hücresel üretim sistemleri için bir karar destek sistemi tasarlanmadan önce literatürdeki çalışmalara göz atılması, tasarlanacak karar destek sisteminin sınırlarının belirlenmesi açısından faydalı olacaktır. Aşağıda, hücresel imalat sistemleri için literatürde bulunan karar destek sistemleri ile ilgili bazı çalışmalar sunulmuştur:

Chin-Chih Chang çalışmasında (2010) [148], alternatif rotaların varlığı durumunda hücre oluşturmak için web tabanlı sistem tasarımı sunmuştur. Bu sistemde, tabu araştırması tekniği ve web tabanlı teknolojilerin avantajlarından yararlanılmıştır. Bu sistemle birlikte kullanıcılar, algoritmaları detaylı olarak bilmeden sistemle iletişime geçebilir ve de en iyi makine hücrelerini ve parça ailelerini elde edebilir. Sistemin etkinliğini test etmek için literatürden örnekler alınmış ve sisteme entegre edilmiştir. Literatürdeki diğer sistemlerle karşılaştırıldığında daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.

Tjahjono ve arkadaşları çalışmalarında (2007) [146], pratik hayattaki hücresel üretim problemlerini çözmek için bir karar destek aracı sunmuşlardır. Bu karar destek aracı, optimal çözüme ulaşmak için hem rota bilgisini hem de diğer önemli üretim

bilgilerini içeren bir sezgisel algoritmayı kullanmaktadır. Bu algoritma, Heuristic Rules-BAsed Logic (HERBAL) algoritmasına dayanmaktadır. HERBAL, hücre oluşturma problemlerinin optimale yakın çözümlerini elde etmek için sıralanmış makine-parça matrisine dayalı sezgisel kurallar setini kullanmaktadır. Bu karar destek sistemi, Visual Basic ve MS Access veritabanı kullanılarak geliştirilmiş ve sistem pratik uygulamalarla test edilmiştir. Bu karar destek sistemi, genel hücrel üretim problemlerine başarıyla uygulanmıştır.

Mahadevan ve Srinivasan çalışmalarında (2003) [149], hücre oluşturma için Windows tabanlı bir yazılım olan MASCOT'u geliştirmişlerdir. Bu program halen gerçek dünya verileri ile test edilmektedir. Bu çalışma, özellikle bu yazılımın çeşitli safhalarındaki deneyimleri ve geliştirilen programın özelliklerini sunmaktadır. Bu çalışma, profesyonel olarak yazılım geliştiriciler ve hücrel imalatla ilgili yazılım geliştirmek isteyenler için iyi bir referans çalışma niteliğindedir.

Luong ve arkadaşları çalışmalarında (2002) [147], hücrel üretim sistemlerinin fizibilitesi ve kavramsal tasarımı için bir karar destek sisteminin tasarımını ve uygulamasını sunmuşlardır. Bu karar destek sistemi, bilgiye dayalı sistem yaklaşımına dayanmaktadır. Bu sistem, tasarımcılara özellikle hücrel üretim sistemlerinin tasarımının ilk aşamalarında (fizibilite ve tasarım) yardımcı olabilmektedir.

David S. Ang çalışmasında (2002) [150], hücrel üretim sistemleri için karar destek sistemlerinin kullanımına değinmiştir. Bu çalışmada, Seifoddini'nin makine hücresi oluşturma metodu (makinelere arasındaki benzerlik yaklaşımı metodu) ile Ang'ın parça ailesi oluşturma metodu adapte edilerek kodlama yapılmıştır. Çalışma, C++ ile kodlanmış ve literatür örnekleri ile test edilmiştir.

6.2. Hücresel Üretim Sistemleri için Bir Karar Destek Sistemi Önerisi

Literatürdeki hücresel üretim sistemleri ile ilgili modeller incelendiğinde, bu modellerin karar vericiler ve uygulayıcılar tarafından (üretim yöneticileri, tesis tasarımcıları vb.) saha kullanımlarının çok yaygın olmadığı görülmektedir. Bu modellerden bazıları her ne kadar etkili sonuçlar üretse bile bu modellerin uygulamada etkin bir şekilde kullanılmaları için bir uzman desteğine ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu çalışmada, önerilen çok amaçlı matematiksel model ve genetik algoritmanın karar vericiler tarafından gerçek hayat uygulamalarında kolayca kullanılabilmesi için bir karar destek sistemi geliştirilmiştir. Bu karar destek sistemi, MS Visual C# 2010 Express ile kodlanmıştır. Kodlama için “genetik.cs” isminde bir sınıf oluşturulmuştur. Bu sınıfta; turnuva_secimi, kromozom_olustur, caprazla, mutasyona_ugrat ve karşılaştır gibi metotlar yer almaktadır. Böylece oluşturulan karar destek sisteminin daha tutarlı ve hızlı çalışması sağlanmıştır. Oluşturulan bu “genetik.cs” sınıfı, ileriki uygulamalar için de bir kaynak sınıf olarak kullanılacaktır.

6.3. Karar Destek Sistemi için Uygulama Yerinin Seçilmesi ve Analizi

Bu tez çalışmasında önerilen matematiksel modelin ve karar destek sisteminin test edilebilmesi için Eskişehir Tülomsaş Motor Fabrikası uygulama alanı olarak seçilmiştir. Bu fabrikanın temel üretim özellikleri aşağıda sunulmuştur:

- Fabrikada, fonksiyonel tesis yerleşimi uygulanmaktadır.
- Fabrikada üretim, talebe göre yapılmaktadır.
- Tüm ürün gruplarına olan talep aynı özelliklere sahip değildir. Özellikle vagon ve çeşitli yedek parçaların üretimi seri üretime yatkındır.
- Fabrikada yedek parça üretimi tesisin önemli bir aktivitesini oluşturmaktadır. Bu üretimler, siparişe göre, orta çeşitlilikte ve orta hacimdedir.

Yukarıdaki özellikler incelendiğinde, Tülomsaş'ın hücresel üretime uygun bir üretim yapısına sahip olduğu görülmektedir. Fabrikadaki uzmanlarla yapılan görüşmelerde,

bir motorun yaklaşık 10.000 parçadan oluştuğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte bu fabrikada üretilen, üretim zorluğu yüksek olan, fabrika içinde dolaşma mesafesi uzun ve üretim süresi yüksek olan kritik ürünler/parçalar tespit edilmiş ve rota bilgileri ile ilgili dokümanlar elde edilmiştir. Belirlenen bu kritik ürünler/parçalar, motor fabrikasının en önemli üretim kalemlerini oluşturmaktadır. Belirlenen bu ürünler (parçalar) ve alt parçaları Tablo 6.1’de sunulmuştur.

Tablo 6.1. Tülomsaş Motor Fabrikası’nda üretilen kritik ürünler

No	Parça İsmi	Parça Kodu	No	Parça İsmi	Parça Kodu
Silindir başlığı			31	Oturma yuvası	A31
1	Külbütör suportu	A1	32	Conta	A32
2	Külbütör itici parçası	A2	33	Emniyet segmanı	A33
3	Silindir başlığı kapağı	A3	34	İlk kovan tespit somunu	A34
4	Silindir başlığı tapası	A4	35	Rondela	A35
5	Uzun saplama	A5	36	İtici uc parçası	A36
6	Kısa saplama	A6	37	Boru	A37
7	Saplama	A7	38	Tapa-2	A38
8	Özel somun	A8	39	Küresel baskı civatası	A39
9	Dekompresyon gövdesi	A9	40	İtici çubuk ucu	A40
10	Pim	A10	41	Meme	A41
11	Yarıklı pim	A11	42	Silindir başlık contası	A42
12	Çentikli pim	A12	43	Dekompresyon civatası	A43
13	Baga	A13	44	İtici	A44
14	Somun	A14	45	Delikli civata	A45
15	Tapa	A15	Yakıt pompa kaplini		
16	Kör tapa	A16	34	Erkek dişli	B1
17	Emme sübabı itici	A17	35	İç dişli	B2
18	İtici gövdesi	A18	36	Ay flanş	B3
19	İtici muhafazası	A19	37	Kaplin rodelası	B4
20	Sübab itici ayağı	A20	38	Civata	B5
21	Sübab çekirdek kovanı	A21	Vantilatör ana tahrik gömleği		
22	Sübab çekirdeği	A22	39	Ara tahrik gömleği	C1
23	Sübab kılavuzu	A23	40	Kilitleme flanşı	C2
24	Emniyet tapası	A24	41	Büyük flanş	C3
25	Küresel altlık	A25	42	Küçük flanş	C4
26	İtici civata ve yastığı	A26	43	Eğri çubuk	C5
27	Enjektör bağlama flanşı	A27	Fleksin kaplin		
28	Makara	A28	44	Sızdırmazlık bagası	D1
29	Egsozt külbütörü	A29	45	Yatak bagası	D2
30	Emme külbütörü	A30	46	Primer parça	D3

Motor fabrikasında yapılan çalışma sonucunda fabrikanın makine parkının oldukça geniş olduğu tespit edilmiştir. Tablo 6.2’de, belirlenen kritik ürünlerin üretilebilmesi için gerekli makine türleri sunulmuştur.

Tablo 6.2. Motor fabrikasının makine parkı

No	Tezgâh Adı	Tezgâh Kodu	No	Tezgâh Adı	Tezgâh Kodu
1	Kumlama	X1	11	CNC-torna	X11
2	Dik freze	X2	12	Role	X12
3	D. Taşlama	X3	13	Torna	X13
4	S. Taşlama	X4	14	Pres	X14
5	K. Taşlama	X5	15	Koruma	X15
6	Yatık freze	X6	16	Rovolver	X16
7	Matkap	X7	17	Giyotin	X17
8	Tesviye Tez.	X8	18	Polisaj	X18
9	Testere	X9	19	Tavlama	X19
10	Isıl işlem	X10			

6.4. Önerilen Karar Destek Sisteminin Yapısı

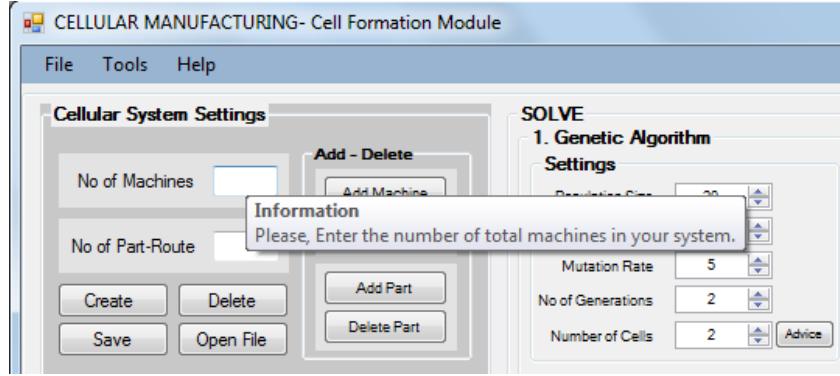
Bu tez çalışmasında önerilen karar destek sistemi, temel olarak yine bu çalışmada önerilen çok amaçlı matematiksel modeli kullanmaktadır. Ayrıca karar vericilerin karşılaştırma yapılabilmesi için problemlerin Fuzzy C-Means (FCM) metodu ile de çözülebilmesi sağlanmıştır. Bu karar destek sisteminde, önerilen çok amaçlı matematiksel modelin hem ağırlıklı toplam skalerleştirmeli genetik algoritma metodu ile hem de bu alanda yeni bir metot olan konik skalerleştirmeli genetik algoritma metodu ile çözülebilmesine imkan verilmiştir. Böylece bir uygulayıcı, sunulan karar destek sistemi ile aşağıda verilen üç şekilde bir problemi çözebilmektedir:

- Ağırlıklı toplam skalerleştirme metodu ile çok amaçlı matematiksel modelin çözülmesi,
- Konik skalerleştirme metodu ile çok amaçlı matematiksel modelin çözülmesi,
- Fuzzy C-Means metodu ile problemin çözülmesi.

Karar vericiler, bu üç yöntemle hücre oluşturma problemlerini çözebilir ve karşılaştırma yapabilirler. Önerilen karar destek sistemi, kullanıcılarının hatalı ve uygun olmayan işlemler yapmasını önlemek için çeşitli renklendirme, yönlendirme ve uyarı mesajları ile donatılmıştır.

Karar destek sisteminin çalışabilmesi için öncelikle hücresel sistem ayarlarının (cellular system settings) girilmesi gerekmektedir. Burada kullanıcıdan, hücresel sistemin oluşturulması için gerekli olan makine ve parça-rota (part-route) sayısının girilmesi istenmektedir. Parça-rota terimi, farklı bir rotaya sahip parçaları temsil etmektedir. Hücresel sistem ayarlarının doğru bir şekilde girilmesi, problem çözümü

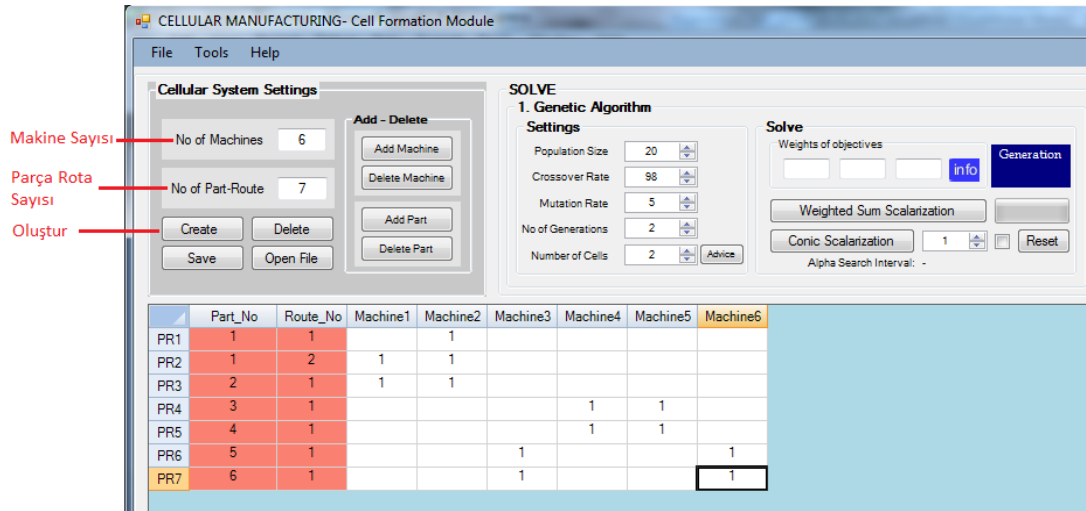
için hayati bir eylem olduğu için bu bölümde her kontrol üzerinde açıklayıcı bilgiler sunulmuştur. Böylece kullanıcıların aklında terimlerin, butonların ve kontrollerin ne anlama geldiği ile ilgili bir soru kalmayacak ve parametre girişleri daha tutarlı şekilde yapılacaktır.



Resim 6.1. Hücresel sistem ayarları üstündeki açıklayıcı bilgilere bir örnek

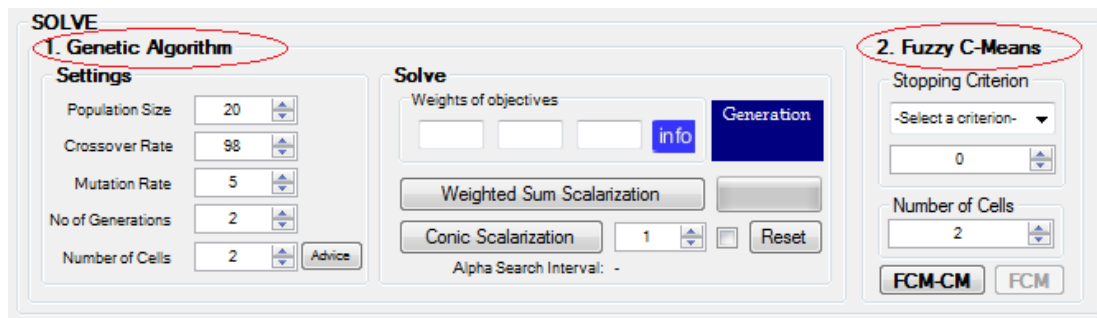
Makine ve parça-rota sayısı girildikten sonra oluştur (create) butonu ile hücresel sistemin oluşturulması için gerekli olan başlangıç makine-parça matrisi (initial matrice) boş olarak oluşturulur. Bu aşamada kullanıcı, elindeki rota verilerine göre bu başlangıç matrisine ilgili verileri girmelidir. Karar destek sistemi, karar vericilerin veri girişi sırasında hata yapmaması ve büyük boyutlu problemlerin kolay bir şekilde çözülmesi için özel bir rota sayacına sahiptir. Bu rota sayıcı sayesinde, karar verici sadece parça numarasını girer ve sistem otomatik olarak girilen parçanın rotasını oluşturur. Önerilen karar destek sistemi, hızlı ve kolay veri girişi için Excel'den kopyala-yapıştır yapılmasına imkan vermektedir.

Önerilen karar destek sistemi, karar verici tarafından başlangıç matrisi doldurulurken otomatik olarak iş yükü matrisini (work load matrice) oluşturur ve başlangıç matrisinde girilen değerlere göre bu iş yükü matrisini 0-1 değerleri ile doldurur. Böylece karar verici, iş yükü matrisini doldururken hangi hücrelere iş yükü değerlerini gireceğini kolayca görmüş olur. Eğer iş yükü ile ilgili bir veri yoksa veya karar verici iş yükü varyasyonunun minimizasyonu ile ilgili amacı dikkate almak istemiyorsa bile otomatik girilen bu 0-1 değerleri çözümde oluşacak tutarsızlıkları önlemiş olacaktır.



Resim 6.2. Önerilen karar destek sistemi ile başlangıç matrisinin oluşturulması

Hüresel sistem ayarları ve başlangıç matris değerleri girildikten sonra çözüm metodu seçilir. Çözüm, ya genetik algoritma ile ya da bulanık kümeleme metodu ile yapılır.



Resim 6.3. Karar destek sisteminde çözüm metodunun seçilmesi

Çözüm metodu seçildikten sonra, bu çözüm metodu ile ilgili parametrelerin girilmesi gereklidir. Eğer çözüm metodu olarak genetik algoritma metodu seçildiyse, bu metodla ilgili beş parametrenin (popülasyon boyutu, çaprazlama oranı, mutasyon oranı, nesil sayısı ve hücre sayısı) girilmesi gereklidir. Bu parametrelerden hücre sayısının belirlenmesi konusunda eğer karar verici bir fikre sahip değilse, tavsiye et (advice) butonuna basarak karar destek sisteminin belirlediği uygun hücre sayılarından birini kullanabilir. Karar destek sistemi, bir veya daha fazla sayıda hücre sayısı önerisi yapabilir. Bununla beraber diğer genetik algoritma parametreleri için karar verici, kendi amaç ve deneyimine göre uygun bir değer girmelidir. Bu

parametrelerin belirlenmesinin karar vericiye bırakılmasının en büyük nedeni, bu parametrelerin problem tipine, problem büyüklüğüne ve karar vericinin amaçlarına göre değişiklik gösterebilmesidir. Böylece karar vericiye problem çözümünde parametrelerde değişiklik yapma fırsatı sunularak, karar vericinin değişik çözüm alternatiflerini görebilmesi sağlanmıştır. Hücre sayısı önerisi için uygun değerlerin belirlenmesinde, bu tez çalışmasında ikinci bir çözüm metodu olarak kullanılan bulanık kümeleme yaklaşımından yararlanılmıştır. Çünkü bulanık kümeleme, genetik algoritma ve birçok metoda göre çok hızlı bir şekilde kümeleme yapabilmektedir. Ancak klasik bulanık kümeleme yaklaşımı büyük boyutlu problemler için tatmin edici sonuçlar üretmede yetersizdir [142]. Bu nedenle bu çalışmadaki sistem tarafından önerilen hücre sayısı değerlerinin çok kaliteli öneriler olduğu düşünülmemelidir ve sadece bir başlangıç noktası olarak ele alınmalıdır.

Genetik algoritma parametreleri girildikten sonra bu tez çalışmasında önerilen üç amaçlı matematiksel modeldeki amaç ağırlıkları karar verici tarafından girilmelidir. Dikkat edilmesi gereken bir nokta, amaç ağırlıklarının toplamının 100 olmasıdır. Eğer kullanıcı, amaçların ağırlıklarının girilmesi sırasında bir hata yaparsa sistem kullanıcıyı uyaracaktır. Amaç ağırlıkları 0 ile 100 arasında değerler olmalıdır. Sistem, otomatik olarak bu değerleri ağırlıklara dönüştürecektir. Amaç ağırlıkları da girildikten sonra karar verici, ağırlıklı toplam skalerleştirme metodu veya konik skalerleştirme metodu ile problemi çözebilir.

Eğer çözüm metodu olarak Fuzzy C-Means seçilirse, üç parametrenin girilmesi gereklidir. İlk parametre, durdurma kriteridir (stopping criterion). Bu parametre ile hangi durdurma kriterine göre algoritmanın çalışacağı belirlenir. Karar destek sistemi şu an mevcut sistem için sadece epsilon (ardıl iki iterasyon arasındaki fark) değerine göre işlem yapmaktadır. Ancak karar vericiler, epsilon değeri yerine belli bir döngü sayısını da tercih etmek isteyebilecekleri için ileride bu seçenek de ilave edilecektir. İkinci parametre, seçilen durdurma kriterine göre uygun bir durdurma değerinin belirlenmesidir. Fuzzy C-Means metodunun çözülmesi için son parametre ise hücre sayısının girilmesidir. Genetik algoritma metodunda olduğu gibi, hücre sayısının belirlenmesi konusunda eğer karar verici bir fikre sahip değilse, genetik algoritma metodundaki tavsiye et (advice) butonuna basarak karar destek sisteminin belirlediği

çözüm yapılırken, bu referans noktaları için veri giriş bölümleri aktif değildir. Eğer kullanıcı, konik skalerizasyon ile elde edilen sonuçtan memnun değilse, referans noktalarının bu veri giriş bölümleri aktif hale gelmektedir. Böylece kullanıcıların referans noktalarını değiştirerek yeni çözümleri izlemelerine imkan sağlanmaktadır. Ayrıca Resim 5 incelendiğinde, konik skalerizasyon ile çözümde alfa arama aralığını ayarlama seçenekleri görülmektedir. Bu ayarlamalarda, karar verici konik skalerizasyon butonunun sağındaki numeridown değerini artırarak (varsayılan olarak 1 dir) kendi alfa değerini (veya konik kollar arasındaki açıklık değerini) belirleyebileceği gibi konik skalerizasyon butonunun sağındaki tickbox'ı işaretli hale getirerek tüm alfa değerleri ile de çözüme gidebilir. Ancak bu yaklaşım tüm alfa değerleri için konik skalerizasyonu çözeceği için çalışma süresini artıracaktır. Bu nedenle alfa değeri için karar, kullanıcıya bırakılmıştır. Alfa'nın "0" değerini alması sistem üzerinde engellenmiştir.

Karar destek sistemi, tüm metotlarla elde edilen her çözüm sonrasında kullanıcıya sonuçtan memnun olup olmadığını sormaktadır. Karar destek sistemi, bir kullanıcı elde edilen çözümden memnun değilse bu kullanıcının hangi parametreleri değiştirebileceği konusunda ona kırmızı renkli uyarılarla bilgilendirme yapmaktadır. Böylece karar verici, bu kırmızı renkli parametreleri değiştirerek yeni çözümleri test edebilmektedir.

Karar verici, çözülen problemle ilgili iki önemli performans bilgisini bu karar destek sisteminden elde edebilir. Bunlardan birinci daha önce de bahsedildiği gibi hazırlık ve çalışma süresidir. Diğerisi ise karar destek sistemi tarafından sunulan beş önemli performans kriteridir. Bunlar, istisnai elemanların sayısı, hücre içi boşlukların sayısı, gruplama etkinliği, hücreiçi gruplama etkinliği ve hücrelerarası gruplama etkinliğidir. Önerilen sistemde bu performans kriterlerinin yorumlanması karar vericiye bırakılmıştır.

6.5. Önerilen Karar Destek Sisteminin Gerçek Bir Sisteme Uygulanması

Bu tez çalışmasında önerilen üç amaçlı matematiksel modelin bir karar destek sistemi aracılığı ile çözülmesi, kullanıcılarına birçok avantaj sağlamaktadır. Bu avantajlardan biri de çözüm hızıdır. Özellikle orta seviyede kararlar alan karar vericiler, kısa sürede sonuçlara ve raporlara ulaşmak isteyeceklerdir. Bu nedenle, bu karar destek sisteminin makul sürede kullanıcılarına uygun çözümler üretmesi beklenmektedir. Bu bağlamda tasarlanan bu karar destek sisteminin çözüm süresi olarak aşağıdaki gerçek hayat performansını sağlaması beklenmektedir:

Tablo 6.3. Önerilen karar destek sisteminden beklenen gerçek hayat performansı

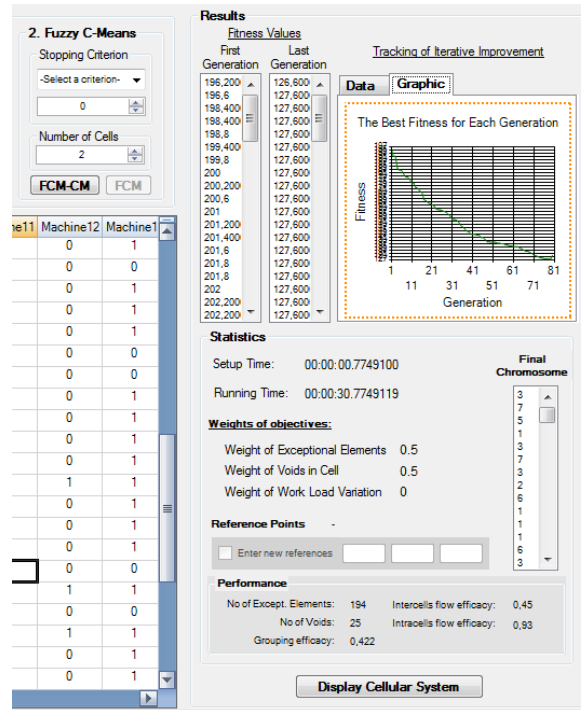
No	Başlangıç Matrisi Boyutu (Makine x Parça-rota)	Beklenen Çözüm Hızı (sn.)	No	Başlangıç Matrisi Boyutu (Makine x Parça-rota)	Beklenen Çözüm Hızı (sn.)
1	10 x 10	< 5	6	10 x 15	< 5
2	20 x 20	< 20	7	20 x 30	< 25
3	30 x 30	< 30	8	30 x 40	< 40
4	40 x 40	50 < hız < 70	9	40 x 50	60 < hız < 80
5	50 x 50	80 < hız < 100	10	50 x 60	100 < hız < 130

Tablo 6.4. Önerilen karar destek sistemi ile tek rotalı Tülomsaş probleminin 3 metot ile çözülmesi

Ağırlıklı Toplam Skalerizasyon Metodu						
Popülasyon Boyutu	Çaprazlama Oranı	Mutasyon Oranı	Nesil Sayısı	Hücre Sayısı	Hesap Süresi (Sn.)	Performans (Gruplama Etkinliği)
300	% 95	% 0.3	400	4	448	0.525
300	% 95	% 0.3	400	7	352	0.543
300	% 90	% 0.3	300	7	201	0.543
200	% 90	% 0.3	220	7	140	0.515
170	% 90	% 0.3	180	7	110	0.528
100	% 90	% 0.3	100	3	53	0.522
80	% 90	% 0.3	100	4	51	0.531
80	% 85	% 0.3	80	7	31	0.422
Konik Skalerizasyon Metodu						
Popülasyon Boyutu	Çaprazlama Oranı	Mutasyon Oranı	Nesil Sayısı	Hücre Sayısı	Hesap Süresi (Sn.)	Performans (Gruplama Etkinliği)
300	% 95	% 0.3	400	4	472	0.569
300	% 95	% 0.3	400	7	392	0.547
300	% 90	% 0.3	300	7	310	0.533
200	% 90	% 0.3	220	7	182	0.553
170	% 90	% 0.3	180	7	172	0.545
100	% 90	% 0.3	100	3	51	0.522
80	% 90	% 0.3	100	4	50	0.531
80	% 85	% 0.3	80	7	31	0.433
Fuzzy C-Means Metodu						
Durdurma Kriteri	Durdurma Kriteri Değeri	Hücre Sayısı		Hesap Süresi (Sn.)		Performans (Gruplama Etkinliği)
Epsilon	0.0001	7		< 1		0.278
Epsilon	0.0009	7		< 1		0.279
Epsilon	0.01	5		< 1		0.295
Epsilon	0.09	4		< 1		0.263
Epsilon	0.09	3		< 1		0.308
Epsilon	0.0001	2		< 1		0.317

Yukarıda sunulan Tablo 6.3'deki beklenen performans değerleri, kullanılan parametrelere ve problemin özelliklerine göre değişiklik gösterebilir. Bununla beraber Tablo 6.3'de verilen bu değerler, literatürdeki modeller ve örnekler dikkate alındığı zamanki beklenen değerlerdir. Gerçek hayattaki çok büyük boyutlu problemler için uygun ve tatmin edici değerler, daha uzun sürelerde elde edilebilir. Ancak tasarlanan sistemin yeni bir sistem olması ve ileride yapılacak revizyonlarla bu sistemin performansının daha da artacak olmasından dolayı, bu tez çalışması için sistemin uygun veya optimum çözüm bulma süresinin büyük boyutlu problemler için en fazla 5 dakika olması uygun görülmüştür.

Önerilen karar destek sistemi, Tülomsaş Motor Fabrikası'ndan ve literatürden elde edilen gerçekçi verilerle test edilmiştir. Tülomsaş Motor Fabrikası'ndan elde edilen verilerle EK-1'deki 19x58 boyutlu (makine x parça-rot) başlangıç matrisi oluşturulmuştur. Bu başlangıç matrisi, yukarıda sunulan Tablo 6.4'te belirtilen parametrelerle ve metotlarla, bu çalışmada önerilen karar destek sistemi aracılığı ile çözülmüştür. Çözümde, ilk iki amacın katsayısı 0.5, son amacın katsayısı da 0 olarak kabul edilmiştir.



Resim 6.7. Karar destek sistemi ile örnek problem çözümü

Karar destek sistemi, problem çözümünden önce hücre sayısı için 2, 3, 4 ve 7 değerlerini önermiştir. Karar destek sistemi bu öneriyi yapabilmek için modeli hızlı bir şekilde bulanık kümeleme algoritması (Fuzzy C-Means) ile çözmekte ve bu çözüm sonucunda uygun değerler üreten hücre sayılarını kullanıcıya sunmaktadır. Karar destek sistemi bu önerilen hücre sayıları için uygun çözüm üretmeyi garanti ederken, diğer hücre sayıları için de uygun durum olmamasını garanti etmez. Kullanıcı isterse, farklı hücre sayıları ile de sistemi çözebilir. Yukarıda sunulan Resim 6.7’de hücre sayısı 7 için ağırlıklı toplam skalerizasyonla örnek bir çözümün arayüz görüntüsü verilmiştir.

EK-1’deki tek rotalı Tülomsaş verileri ile elde edilen genetik algoritma çözümleri incelendiğinde gruplama etkinliklerinin yukarıda sunulan Tablo 6.4’teki gibi 0.515 ile 0.569 arasında olduğu ve bu değerlerin oldukça düşük olduğu görülmüştür. Yine Tablo 6.4’ten konik skalerizasyonun, gruplama etkinliği açısından bir çok durumda ağırlıklı toplam skalerizasyona göre daha iyi sonuçlar ürettiği görülmüştür. Fuzzy C-Means metodu ile elde edilen sonuçlar incelendiğinde, her ne kadar bu metodun çözüm süresi olarak büyük bir avantaj sağladığı görülsede elde edilen çözüm kalitesi olarak (0.263 ile 0.317 arasında) genetik algoritmadan oldukça düşük sonuçlar elde etmiştir.

EK-2’de sunulan 19x80 boyutlu (makine x parça-rota) çok rotalı Tülomsaş verilerinin çözülmesi ile elde edilen genetik algoritma sonuçları, aşağıda verilen Tablo 6.5’te sunulmuştur. Bu çözümler incelendiğinde, tek rotalı çözüme göre en önemli farklılıkların hesap süresindeki ve gruplama etkinliğindeki artış olduğu görülür. Bu durumun en önemli sonuçlarından birisi, alternatif rotaların çözüm kalitesini artırıcı bir etkide bulunmasıdır. Ayrıca hesap süresindeki artış, yine alternatif rotaların seçim sürecinden dolayıdır.

Tablo 6.5 ayrıntılı olarak incelendiğinde, çok rotalı Tülomsaş verileri ile problemin çözülmesi sonucunda, bir çok durumda konik skalerizasyonun toplam ağırlıklı skalerizasyona göre daha kaliteli çözümler ürettiği görülmektedir. Bununla beraber konik skalerizasyon, bazı ilave parametrelerin hesaplanmasını gerektirdiği için hesap

süresinin artmasına neden olmaktadır. Tek rotalı çözüme benzer olarak çok rotalı çözümde de bulanık kümeleme metodu kaliteli sonuçlar üretememiştir.

Tablo 6.5. Önerilen karar destek sistemi ile çok rotalı Tülomsaş probleminin 3 metot ile çözülmesi

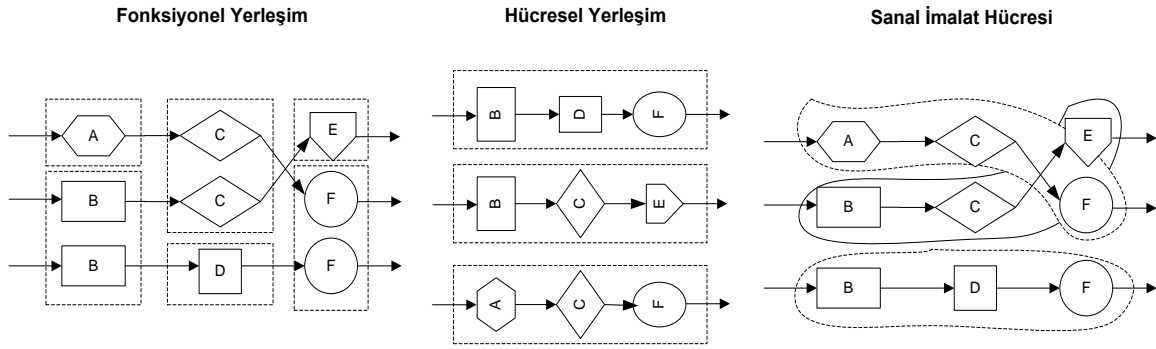
Ağırlıklı Toplam Skalerizasyon Metodu						
Popülasyon Boyutu	Çaprazlama Oranı	Mutasyon Oranı	Nesil Sayısı	Hücre Sayısı	Hesap Süresi (Sn.)	Performans (Gruplama Etkinliği)
80	% 90	% 0.3	120	7	64	0.580
80	% 90	% 0.3	200	7	82	0.627
100	% 90	% 0.3	200	7	97	0.643
250	% 90	% 0.3	350	4	531	0.659
200	% 95	% 0.5	500	4	720	0.663
300	% 90	% 0.5	500	4	1147	0.661
300	% 95	% 0.5	500	4	865	0.662
300	% 95	% 0.5	600	4	1025	0.665
400	% 95	% 0.5	600	4	1287	0.661
400	% 95	% 0.5	600	3	1537	0.656
Konik Skalerizasyon Metodu						
Popülasyon Boyutu	Çaprazlama Oranı	Mutasyon Oranı	Nesil Sayısı	Hücre Sayısı	Hesap Süresi (Sn.)	Performans (Gruplama Etkinliği)
80	% 90	% 0.3	120	7	69	0.622
80	% 90	% 0.3	200	7	103	0.642
100	% 90	% 0.3	200	7	129	0.655
250	% 90	% 0.3	350	4	628	0.659
200	% 95	% 0.5	500	4	837	0.661
300	% 90	% 0.5	500	4	995	0.666
300	% 95	% 0.5	500	4	1024	0.664
300	% 95	% 0.5	600	4	1195	0.663
400	% 95	% 0.5	600	4	1584	0.663
400	% 95	% 0.5	600	3	1782	0.658
Fuzzy C-Means Metodu						
Durdurma Kriteri	Durdurma Kriteri Değeri	Hücre Sayısı		Hesap Süresi (Sn.)		Performans (Gruplama Etkinliği)
Epsilon	0.0001	4		< 1		0.261
Epsilon	0.0009	4		< 1		0.262
Epsilon	0.01	3		< 1		0.293
Epsilon	0.09	3		< 1		0.329
Epsilon	0.04	3		< 1		0.320
Epsilon	0.009	3		< 1		0.324
Epsilon	0.0001	3		< 1		0.356
Epsilon	0.00001	2		< 1		0.362

Tülomsaş Motor Fabrikası'ndaki parça ve makine sayısının çok olması, kusursuz veya gruplama etkinliği yüksek bir hücresel sistem oluşmasını engellemiştir. Gerçek hayat problemlerinde bu tip sorunlarla karşılaşılması çok normaldir. Bununla beraber literatürdeki modellerin bir çoğu, ya kusursuz sistemler oluşturularak veya zaten iyi tasarlanmış mevcut hücresel sistemlerin verileri kullanılarak test edildiği için genellikle yüksek gruplama etkinliğine sahip çözümler elde edilmektedir. Ancak ülkemizdeki ve dünyadaki çoğu üretim sistemi, fonksiyonel yerleşime sahiptir ve bu sistemlerde hücresel üretim sistemine geçiş süreci çok sancılı olmaktadır. Tülomsaş

örneğinde olduğu gibi fonksiyonel yerleşime sahip büyük bir tesisi tamamen hücrenel sisteme dönüştürmek, hem çok maliyetli hem de üst yönetim tarafından soğuk karşılanacak bir yöntemdir. Bu nedenle literatürde, fonksiyonel yerleşime sahip işletmelerin hücrenel üretim sistemlerinin avantajlarından kolayca ve daha az yerleşim maliyeti ile yararlanabilmesi için “hibrit hücrenel yerleşim” ve “sanal imalat hücreleri” yaklaşımları geliştirilmiştir.

Hibrit hücrenel yerleşim (hybrid cellular layout), hücrenel yerleşim ile fonksiyonel yerleşimin beraber kullanıldığı bir yerleşim türüdür [151]. Bu yerleşim türünde bazı makineler, özel parça/ürün ailelerini üretmek için hücreler oluştururken bazı makineler de düşük ve kararsız bir sipariş özelliğine sahip parçaların üretimi için fonksiyonel olarak dizilirler. Hibrit hücrenel yerleşim, sağladığı esneklikten ve kolay uygulanabilirlikten dolayı saf hücrenel yerleşime göre endüstride daha çok uygulama alanı bulmuştur [152].

Sanal imalat hücreleri (virtual manufacturing cells), özellikle fonksiyonel olarak organize edilmiş tesis yerleşimi ile grup teknolojisi prensiplerinin bir ortak uygulaması olarak bilinmektedir. Bir sanal imalat hücresi tanım olarak; işlerin, parça tiplerinin, makinelerin ve/veya işçilerin bir üretim kontrol sistemi içinde mantıksal gruplanmasıdır [163]. Sanal imalat hücreleri ile, fonksiyonel yerleşimin rotalama esnekliği korunarak grup teknolojisinin faydalarından yararlanmaya çalışılmıştır. Sanal imalat hücrelerinde tesis yerleşimi, fonksiyonel yerleşime benzerdir. Bununla beraber sanal imalat hücrelerinde, fonksiyonel yerleşimdeki makinelerin fiziksel yerleşimi yerine mantıksal bir hücre yapısı oluşturulur [153]. Bu mantıksal (sanal) hücreler, talepteki ve/veya ürün karmasındaki değişimlere bağlı olarak belirli aralıklarla (örneğin her hafta, her ay gibi) yeniden oluşturulur [162]. Sahip olduğu avantajlar nedeniyle sanal imalat hücreleri, fonksiyonel yerleşime sahip tesis yöneticilerinin grup teknolojisine daha ılımlı bakmasını sağlamıştır.



Şekil 6.1. Sanal imalat hücrelerinin diğer yerleşimlere göre konumu

Büyük boyutlu tesis yerleşim problemlerinin uygulama aşamasında üst yönetimlerin de görüş ve desteklerinin alınması gereklidir. Bu bağlamda, fonksiyonel yerleşim yerine saf bir hücresel üretim sisteminin tesis yöneticilerine diletilmesi, yöneticilerin desteklerinin kaybedilmesine ve böylece hücresel yerleşimden vazgeçilmesine neden olabilir.

Bir yerleşim düzeni olarak hücresel üretim sisteminin bir tesise saf olarak, yani diğer yerleşim yaklaşımlarının dikkate alınmadan uygulanması, bazı problemleri de beraberinde getirebilmektedir. Bunlardan biri tüm parça ve makinelerin, bağımsız hücrelere dağıtmanın nerdeyse imkansız oluşudur. Bu problem, özellikle makine ve parça sayısının çok fazla olduğu büyük üretim sistemlerinde ortaya çıkmaktadır. Bir başka problem, fonksiyonel yerleşimden saf hücresel yerleşime geçişin çok maliyetli oluşudur. Bir diğer problem de bazı özel makine tiplerinin özel çalışma alanları gerektirmesidir [161].

Tülomsaş verileri incelendiğinde, üretim sisteminin birçok parça ve makineden oluştuğu görülmektedir. Birçok parçanın çok çeşitli makinelerde işlenmesi, amaçları optimum yapacak kaliteli bir çözümün bulunması zorlaştırmakta hatta çoğu zaman imkansız hale getirebilmektedir. Bu durum, aslında gerçek hayat problemlerinin hücresel üretim sistemlerine uygulanmasında karşılaşılan zorluklardan biridir. Uygulamada, hücresel üretim sistemlerinin yararlarını bu tip sistemlere aktarabilmek için bu çalışmada daha önce bahsedilen hibrit hücresel yerleşim ve sanal imalat hücreleri yaklaşımları kullanılmaktadır.

Tülomsaş verileri ile çözüm sonucunda elde edilen Tablo 6.4 ve Tablo 6.5 incelendiğinde, gruplama etkinliğinin 0.666 değerinin üzerine çıkmadığı görülür. Bu değer, “bir üretim sisteminin fiziksel olarak tamamen (saf olarak) hücresele üretim sistemine dönüştürülmesi” fikrinin desteklenmesi açısından oldukça düşüktür. Her ne kadar elde edilen gruplama etkinliği değerinin (0.666) yorumlanması için literatürde mutlak kurallar bulunmamakla beraber, bu değer 0.90'nın üzerinde olması çok iyi bir gruplama olduğuna işarettir. Elde edilen düşük bu gruplama etkinliğine ilave olarak, Tülomsaş'ta kullanılan tezgahların büyük boyutlu ve ağır tezgahlar olması ve ayrıca özel yerleşim yerine ihtiyaç duyan tezgahların olması, yetiştirilmesi gereken sürekli siparişlerin olması, ürün hacmi ve tipinin talebe göre dalgalı olabilmesi ve yeni ürün üretimine açık bir tesis olması, Tülomsaş'ta hücresele üretim sistemlerinin avantajlarından faydalanmak için saf bir hücresele üretim sistemi kullanmak yerine sanal imalat hücrelerinin kullanılmasını daha uygun hale getirmektedir.

Önerilen karar destek sistemi kullanılarak, çok rotalı Tülomsaş problemi Tablo 6.6'daki değerler ile çözülmüş ve sonuç değerleri yine aynı tabloda sunulmuştur. Önerilen sistem kullanılarak benzer veya aynı çözümler, daha küçük parametrelerle 5 dakikanın altındaki sürelerde de elde edilebilmesine rağmen, sonuçların yüksek değerli parametrelere tepkisini değerlendirmek için Tablo 6.6'da çok farklı parametre değerleri kullanılmıştır. Bu bağlamda özellikle popülasyon boyutunun ve nesil sayısının çok büyük alınması, çözüm süresinin aşırı artmasına neden olmuştur. Önerilen karar destek sistemi, hücre sayısı için 2, 3, 4 ve 6 değerlerini önermekle beraber daha iyi bir gruplama ile sonuçlandığı için hücre sayısı 4 olarak kabul edilmiştir.

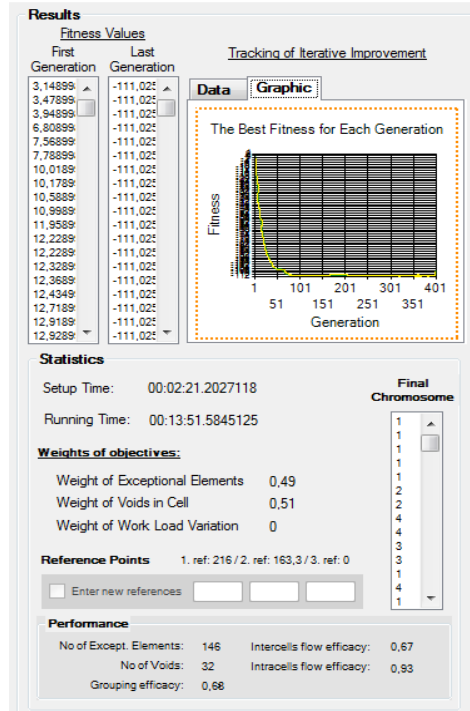
Tablo 6.6. Sanal imalat hücreleri oluşturmak için kullanılan parametre değerleri ve elde edilen sonuçlar

Konik Skalerizasyon Metodu ile Çözüm									
Popülasyon Boyutu	Çaprazlama Oranı	Mutasyon Oranı	Nesil Sayısı	Hücre Sayısı	1. Amaç Ağırlığı	2. Amaç Ağırlığı	3. Amaç Ağırlığı	Çalışma Süresi (dk.)	Gruplama Etkinliği
280	80	3	400	4	58	42	0	12.07 dk.	0.636
280	75	3	400	4	49	51	0	13.51 dk	0.680
300	80	3	500	4	60	40	0	14.31 dk.	0.644
300	75	4	600	4	60	40	0	17.12 dk.	0.655
280	90	3	400	4	45	55	0	08.52 dk.	0.576
280	90	3	400	4	59	41	0	11.02 dk.	0.591

Tülomsaş örneğinin çözümü ile elde edilen hücresel sistemin gösterimi EK-3'te sunulmuştur. Bu çözüme göre elde edilen hücresel elemanları (hücrelere atanan parça ve makineler) Tablo 6.7'de gösterilmiştir.

Tablo 6.7. Tülomsaş için oluşturulan sanal imalat hücre yapıları

	Hücre 1	Hücre 2	Hücre 3	Hücre 4
Atanan Makineler	Machine1, Machine2 Machine3, Machine4 Machine5, Machine12 Machine14, Machine16 Machine17, Machine18 Machine19	Machine6 Machine7	Machine10 Machine11	Machine8 Machine9 Machine13 Machine15
Atanan Parçalar	Part 1	Part3, Part29 Part30, Part47 Part48, Part49 Part51, Part52	Part5, Part6 Part7, Part13 Part23, Part24 Part28, Part32 Part33, Part35 Part42, Part44 Part50	Part2, Part4, Part8, Part9, Part10, Part11, Part12, Part14, Part15, Part16, Part17, Part18, Part19, Part20, Part21, Part22, Part25, Part26, Part27, Part31, Part34, Part36, Part37, Part39, Part40, Part41, Part43, Part45, Part46, Part53, Part54



Resim 6.8. Önerilen sistemle Tülomsaş'ta sanal imalat hücresi oluşturmak için elde edilen çıktı

Bu çözümle oluşturulan hücreler, sanal imalat hücreleridir. Böylece sabit bir hücresel yerleşimdeki rota esnekliği zaafı, belirli aralıklarla periyodik olarak oluşturulan bu sanal hücrelerle bertaraf edilmiş olmaktadır. Bu oluşturulan sanal imalat hücreleri, sadece ilgili tesisin üretim planlama ve kontrol sistemleri içinde ve bu tesiste çalışan işçilerin akıllarında oluşmaktadır. Sanal imalat hücreleri yaklaşımında fiziksel olarak oluşturulmuş hücreler bulunmamaktadır.

6.6. Karar Destek Sisteminin Literatür Örnekleriyle Karşılaştırılması

Büyük boyutlu Tülemsaş uygulama örneğine ek olarak, önerilen model ve karar destek sisteminin literatürdeki mevcut sistemlerle kıyaslanması ve performansının değerlendirilmesi, çalışmanın etkinliğinin ölçülmesi açısından yararlı olacaktır. Bu nedenle, literatürden tek ve alternatif rotaya sahip olan bazı problemler seçilmiş ve bu problemler bu tez çalışmasında önerilen model ve karar destek sistemi ile çözümlenip sonuçlar tablo olarak sunulmuştur.

Literatür incelendiğinde, alternatif rotaya sahip çok sayıda çalışma olmadığı görülmektedir. Bu durumun en büyük nedeni, alternatif rotanın problem karmaşıklığını ve çalışma süresini aşırı artırmasıdır. Bu nedenle yazarlar ve araştırmacılar, alternatif rota kullanımından kaçınılmaktadır. Mevcut çalışmalarda kıyaslamalar ise, literatürdeki belli başlı çalışmalar kullanılarak yapılmaktadır (Won ve Kim (1997) [154], Kusiak (1987) [155] vb.).

Tablo 6.8. Literatürden seçilen alternatif rotalı test problemleriyle önerilen modelin performansının karşılaştırılması

Yazar(lar)	Boyut (MxPxR)	Kaynak Model			Konik Skalerizasyonlu Genetik Algoritma Yaklaşımı			
		Hücre Sayısı	N_e	Ort. CPU zamanı (s)	Hücre Sayısı	N_e	N_v	Ort. CPU zamanı (s)
Wu ve ark. (2007) (a)	4x4x8	2	0	0,006	2	0	0	<0,001
Wu ve ark. (2009) (b)	4x5x11	2	0	0,013	2	0	1	0,008
Wu ve ark. (2007) (c)	6x10x20	2	2	0,050	2	2	8	0,028
Wu ve ark. (2009) (d)	7x10x23	3	3	0,039	3	3	5	0,035
S. Sofianopoulou (1999)	12x20x26	3	29	2,500	3	29	31	0,198
Wu ve ark. (2009) (e)	12x20x26	3	29	0,216	3	29	31	0,198

Not: N_e : İstisnai eleman sayısı, N_v : Hücre içi boşluk sayısı, Ort. CPU zamanı: Saniye olarak CPU zamanı

- (a) Won ve Kim (1997)'in 4 makine, 4 parça ve 8 rotalı problemlerinin çözümü.
- (b) Kusiak (1987)'in 4 makineli, 5 parçalı ve 11 rotalı problemlerinin çözümü
- (c) Sankaran ve Kasilingam (1991)'in 6 makineli, 10 parçalı ve 20 rotalı problemlerinin çözümü
- (d) Won ve Kim (1997)'in 7 makineli, 10 parçalı ve 23 rotalı problemlerinin çözümü
- (e) Sofianopoulou (1999)'nun 12 makineli, 20 parçalı ve 26 rotalı problemlerinin çözümü

Tablo 6.8 incelendiğinde, önerilen konik skalerizasyonlu genetik algoritmanın aynı hücre sayısı ile aynı istisnai eleman sayılarını elde etmek için kaynak modellerden

daha hızlı çözüm yaptığı görülmektedir. Önerilen model, bütün test problemlerini 1 saniyenin altında sürede ve kaynak modellerden daha hızlı bir şekilde çözerek etkili bir çözüm yöntemi olduğunu göstermiştir.

Tablo 6.9. Literatürden seçilen tek rotalı test problemleri ile önerilen modelin performansının karşılaştırılması

Yazar(lar)	Boyut (MxP)	Kaynak Model				Konik Skalarizasyonlu Genetik Algoritma Yaklaşımı			
		Hücre Sayısı	N_e	N_v	Ort. CPU zamanı (s)	Hücre Sayısı	N_e	N_v	Ort. CPU zamanı (s)
Yasuda ve ark. (2005)	5x8	2	0	0	0,851	2	0	0	0,003
Wu ve ark. (2004) [30]	7x10	3	2	13	2,472	3	5	4	0,010
J. Arkat ve ark. (2011)	10x17	3	35	8	62,00	3	35	8	1,010
J. F. Goncalves ve M. G.C. Resende (2004) (d)a	14x24	5	7	14	6,050	5	7	14	4,120
Yasuda ve ark. (2005) (b)	15x30	3	6	8	187,32	3	6	6	4,121
K. Spiliopoulos ve S. Sofianopoulou (2007) (c)	20x20	5	1	16	82,00	5	1	16	3,750
J. F. Goncalves ve M. G.C. Resende (2004) (d)	20x35	4	1	39	15,61	4	1	41	9,892
Wu ve ark. (2004)	26x28	5	14	52	32,534	5	16	49	20,010
Wu ve ark. (2004)	26x28	6	14	42	32,480	6	19	29	21,34

Not: N_e : İstisnai eleman sayısı, N_v : Hücre içi boşluk sayısı, Ort. CPU zamanı: Saniye olarak CPU zamanı

- (a) Askin ve Subramanian (1987)'nin 24 makineli ve 14 parçalı problemlerinin çözümü
- (b) Venugopal ve Narendran (1992)'in 30 makineli ve 15 parçalı problemlerinin çözümü
- (c) Nagi ve arkadaşlarının (1990) 20 makineli ve 20 parçalı problemlerinin çözümü
- (d) Carrie (1973)'nin 20 makineli ve 35 parçalı probleminin çözümü

Tablo 6.9 incelendiğinde, önerilen konik skalarizasyonlu genetik algoritmanın tek rotalı test problemlerini, aynı hücre sayısı ile aynı istisnai eleman ve hücre içi boşluk sayılarını elde etmek için kaynak modellerden daha hızlı çözdüğü görülmektedir. Önerilen karar destek sistemi, küçük boyutlu test problemlerini kaynak modellerden çok daha hızlı çözerken çözüm hızı için bu performans farkı, model boyutları büyüdükçe küçülmektedir.

Sonuç olarak gerek önerilen matematiksel model ve gerekse de bu modeli kullanan karar destek sistemi, hem literatür örnekleri hem de uygulamaya örneği için iyi sonuçlar üretmiştir. Bununla birlikte gelecekte yapılacak katkı ve iyileştirmelerle beraber, önerilen sistem daha iyi sonuçlar verecektir. Özellikle yeni çözüm yaklaşımlarının sisteme eklenmesi, çeşitli çözüm yöntemlerinin kıyaslanması açısından yararlı olacaktır.

BÖLÜM 7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, mevcut veya yeni kurulacak atölye yerleşimlerine hücresele üretim sistemlerinin uygulanması için 0-1 tam sayılı, çok amaçlı ve lineer olmayan bir matematiksel model önerisi yapılmıştır. Ayrıca bu çalışmada önerilen bu matematiksel modelin, karar vericiler tarafından uygulamada daha pratik olarak kullanılabilmesi için bir karar destek sistemi önerilmiştir. Bu önerilen karar destek sistemi, bir hücresele üretim sistemi oluşturmak için üç çözüm yaklaşımı kullanmaktadır. Bu yaklaşımlardan konik skalerleştirmeyi kullanan genetik algoritma, literatürde daha önce hücresele üretim sistemlerine uygulanmamış yeni bir yaklaşımdır. Diğer çözüm yaklaşımları ise, ağırlıklı toplam skalerleştirme yaklaşımını kullanan genetik algoritma ve bulanık kümeleme yaklaşımını kullanan Fuzzy C-Means metodudur.

Bu çalışmada önerilen karar destek sistemi ve çok amaçlı matematiksel model, alternatif rotaları dikkate alarak çözüm yapmaktadır. Alternatif rotalar, pratik hayatta sıkça kullanılmalarından ve matematiksel modellerin çözümünde daha kaliteli sonuçların elde edilmesine yardımcı olmalarından dolayı hücre oluştururken dikkate alınması gereken bir kriterdir. Literatür incelendiğinde, problem karmaşıklığını artırdığı için alternatif rotaların matematiksel modellere entegrasyonundan genellikle kaçınıldığı görülmektedir.

Önerilen çok amaçlı matematiksel modelin skalerleştirilmesinde kullanılan konik skalerizasyon yaklaşımı, lineer olmayan modellerin çözümünde mevcut lineer yaklaşımlarla keşfedilmesi çok zor veya imkansız olan çözümlerin bulunmasında önemli bir rol oynar. Bu çalışmada yapılan analizler sonucunda, konik skalerizasyon yaklaşımının literatürde sıkça kullanılan ağırlıklı toplam skalerleştirme ve amaçların direk toplanması yaklaşımına göre daha iyi/kaliteli sonuçlar ürettiği görülmüştür. Bu tez çalışmasında önerilen çok amaçlı matematiksel model, konik skalerizasyon

yaklaşımı sayesinde literatüre göre daha kaliteli hücresel üretim sistemleri oluşturmaktadır.

Karar vericiler, gerçek hayatta hücre oluştururken birçok amacı aynı anda dikkate alabilmektedirler. Tek bir amaca göre bir hücresel sistem oluşturmak, her ne kadar basit ve kaliteli sonuçlar üretse de, bazı önemli amaçların dikkate alınmamasından dolayı uygulanabilirlikte bazı problemler oluşabilmektedir. Bu nedenle bu çalışmada önerilen çok amaçlı matematiksel model, pratik hayatta en çok dikkate alınan üç amacı göz önüne alarak çözüme gitmektedir. Literatürde, problem karmaşıklığını artırdığı için hücresel üretim sistemleri oluşturmada çok amaçlı yaklaşımlardan uzak durulduğu görülse de son zamanlarda çok amaçlı yaklaşımlar üzerinde özel bir ilgi olduğu da gerçektir.

Son zamanlarda yapılan çalışmalar incelendiğinde, hücresel üretim sistemlerinin oluşturulması için karar destek sistemi tasarımından daha ziyade matematiksel model oluşturmaya odaklanıldığı görülmektedir. Her ne kadar literatürde hücresel üretim sistemleri için MASCOT [149] gibi karar destek sistemleri tasarlanmışsa da bu çalışmalar yeterince kapsamlı çalışmalar değildir. Bu tez çalışmasında önerilen çok amaçlı matematiksel modelin daha tutarlı bir şekilde çözülebilmesi ve sonuçlarının daha ayrıntılı olarak izlenebilmesi için Microsoft Visual C# 2010 yazılımı ile bir karar destek sistemi programlanmıştır. Oluşturulan bu karar destek sistemi, problem çözümü öncesinde ve sonrasında parametreler, istatistikler, veriler ve sonuçlar hakkında bilgi ve öneriler sunarak karar vericiye yardımcı olmaktadır.

Bu tez çalışmasında elde edilen sonuçlara göre; önerilen matematiksel model, önerilen karar destek sistemi ve çözüm yöntemleri akademik literatürdeki ve gerçek hayattaki hücre oluşturma problemleri için iyi sonuçlar üretmektedir. Önerilen karar destek sistemi sayesinde problemler, üç çözüm yaklaşımı ile çözümlenip sonuçlar hem veri hem de grafik olarak takip edilebilmektedir. Ayrıca her çözüm sonucunda oluşan hücresel sistem, bir arayüz aracılığı ile görüntülenebilmektedir. Önerilen karar destek sistemi, konik skalerizasyon yaklaşımı ve genetik algoritma ile 19 makine ve 80 parça-rota (çok rotalı 58 parça) için yaklaşık ortalama 2.5 dakikada uygun bir çözüm

üretebilmektedir. Bu sonuç, büyük boyutlu problemler için makul bir süre olarak görülürken, bu sürenin kısaltılması için ilave çalışmalar yürütülecektir.

Bu çalışma sonucunda oluşturulan altyapı sayesinde, önerilen matematiksel modele ve önerilen karar destek sistemine yeni amaçlar, kısıtlar, parametreler ve çözüm yöntemleri eklenebilir. Böylece önerilen sistem, sürekli gelişen bir yapı halini alacaktır. Önerilen sistemin geliştirilmesi için gelecekte yapılması düşünülen çalışmalar aşağıda sunulmuştur:

- Karar vericilerin ve pratik hayat uygulayıcılarının isteklerine göre yeni amaçların sisteme eklenmesinin değerlendirilmesi,
- Daha etkili meta-sezgisel metodların, çözüm yaklaşımı olarak karar destek sistemine entegre edilmesi,
- Hücre oluşturmada yeni kısıtların modele eklenmesinin değerlendirilmesi,
- Parametrelerin tahmininde kullanıcıya daha etkili karar destek araçlarının sunulması,
- Problemlerin aynı anda birden fazla metotla çözümlenerek karşılaştırmalar yapılması için çözüm yaklaşımının yeniden değerlendirilmesi,
- Yeni raporlama ve değerlendirme kriterlerinin eklenmesi,
- Daha hızlı çözüm için yeni kodlama alternatiflerinin değerlendirilmesi,
- Paralel makinelerin modele eklenmesi,
- Daha kullanıcı dostu arayüzlerin oluşturulması.

Sonuç olarak, küreselleşme ile birlikte artan rekabette avantaj sağlamak isteyen yöneticilerin, atölyeleri için yeni çözüm yaklaşımları aradıkları bir gerçektir. Geleneksel üretim sistemlerine göre daha esnek bir yapıya sahip olan hücreli üretim sistemleri, yöneticiler için iyi bir çözüm olabilir. Bu nedenle hücreli üretim sistemleri, gelecekte de gerek akademisyenlere gerekse araştırmacılara yeni araştırma alanları sunacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] GÖKŞEN, Y., Geleneksel Üretimden Esnek Üretime: Karşılaştırmalı bir inceleme, Dokuz Eylül Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, 5, 4, 2003.
- [2] AYDOĞAN, E., SEMİ, S., İşletmelerde Teknoloji Yönetimi Bağlamında İleri Üretim Teknolojileri ve Otomotiv Sektöründe Bir Uygulama, Selçuk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, 11, 115-133, 2004.
- [3] ATALAY, N., BİRBİL, D., DEMİR, N., YILDIRIM, Ş., KOBİ'lerin Esnek Üretim Sistemleri Yönünden İrdelenmesi ve Bir Uygulama, MPM Yayınları, No: 632, Ankara, 67, 1998.
- [4] GASIMOV, R.N., Characterization of the Benson Proper Efficiency and Scalarization in Nonconvex Vector Optimization, Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, 507, 189-198, 2001.
- [5] DIMOPOULOS, C., ZALZALA, A., Recent developments in evolutionary computations for manufacturing optimization: problems, solutions, and comparisons. IEEE Transactions on Evolutionary Computations, 4, 93-113, 2000.
- [6] SOEPENBERG, G.D., LAND, M.J., GAALMAN, G.J.C., Adapting workload control for job shops with high routing complexity, Int. J. Production Economics 140, 681-690, 2012.
- [7] SUN, X., NOBLE, J.S., Approach to Job Shop Scheduling with Sequence Dependent Setups, Journal of Manufacturing Systems, 18, 6, 416-430, 1999.
- [8] KALIR, A.A., SARIN, S.C., A method for reducing inter-departure time variability in serial production lines, Int. J. Production Economics, 120, 340-347, 2009.
- [9] BUZACOTT, J.R., SHANTIKUMAR, J.R., Stochastic Models of Manufac. Systems, Prentice-Hall, New Jersey, 1993.
- [10] WOODBURY, R.S., The Legend of Eli Whitney and Interchangeable Parts, Technology and Culture, 1, 3, 235-253, 1960.

- [11] HOUNSHELL, D.A., From the American System to Mass Production, 1800 1932, The John Hopkins University Press, 15, 1984.
- [12] CLARKE, C., Automotive Production Systems and Standardisation: From Ford to the Case of Mercedes-Benz, 73-75, 2005.
- [13] BIGGS, L., The Rational Factory: Architecture, Technology, and Work in America's Age of Mass Production, Baltimore, Johns Hopkins University Pres, 1996.
- [14] GARTMAN, D., Auto slavery: The labor process in the American automobile industry (1897-1950), New Brunswick: Rutgers University Pres, 1986.
- [15] FUJIMOTO, T., The Evolution of a Manufacturing System at Toyota, Oxford University Press, 1999.
- [16] MURTHY, P.R., Production and Operations Management, Second Edition, 9-11, 2005.
- [17] PANNEERSELVAM, R., Production and Operations Management, Second Edition, 7-9, 2006.
- [18] SOEPENBERG, G.D., LAND, M.J., GAALMAN, G.J.C., Adapting workload control for job shops with high routing complexity, Int. J. Production Economics, 140 , 681-690, 2012.
- [19] KUMAR, S.A., Production and Operations Management, First Edition, 6-8, 2006.
- [20] MAHADEVAN, B., Operation Management: Theory and Practice, First Edition, 57-61, 2007.
- [21] SHIVANANG, H.K., BENAL, M.M., KOTI, V., Flexible Manufacturing Systems, 1-5, 2006.
- [22] ASAI, K., TAKASHIMA, S., Manufacturing, Automation Systems and CIM Factories, 4-6, 1994.
- [23] PARASHAR, N., Cellular Manufacturing Systems: An Integrated Approach, 1-3, 2009.
- [24] GUNASEKARAN, A., GOYAL, S.K., VIRTANEN, I., YLI-OLLI, P., An investigation into the application of group technology in advanced manufacturing systems, International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 7, 4, 215-228, 1994.
- [25] IRANI, S.A., Handbook of Cellular Manufacturing Systems, Wiley-IEEE, 2-4, 1999.

- [26] HYER, N., WEMMERLOV, U., Reorganizing the Factory: Competing Through Cellular Manufacturing, Productivity Pres, 43, 2001.
- [27] GARBIE, I.H., Designing Cellular Manufacturing Systems Incorporating Production and Flexibility Issues, PhD Dissertation, The University of Houston, Houston, 2003.
- [28] GARBIE, I.H., Converting Traditional Production Systems to Focused Cells as a Requirement of Global Manufacturing, Journal of Service Science and Management, 4, 268-279, 2011.
- [29] SHAHIN, A., JANATYAN, N., Group Technology and Lean Production: A Conceptual Model for Enhancing Productivity, International Business Research, 3, 4, 105-118, 2010.
- [30] FLANDERS, R., Design manufacture and production control of standard machine, New York, NY: ASME transactions, 1925.
- [31] RAO, P.N., Cad/Cam: Prin & Appl 3E, Third Edition, 525, 2010.
- [32] GONCALVES, J.F., RESENDE, M., An evolutionary algorithm for manufacturing cell formation, Computers & Industrial Engineering, 47, 247-273, 2004.
- [33] KRUSHYNSKYI, D., Optimality, flexibility and efficiency for cell formation in group technology, PhD Thesis, 5-6, 2012.
- [34] SAVSAR, M., "Modeling and Analysis of a Flexible Manuf. Module", International Conference on Engineering and ICT (ICEI 2007), 27-28 November 2007, Malaysia, 431-437, 2007.
- [35] RAJPUT, R.K., A Textbook of Manufacturing Technology: Manufacturing Processes, Laxmi Publications, 2007.
- [36] RIEZEBOS, J., Design of a period batch control planning system for cellular manufacturing, PhD Thesis, 2001.
- [37] TOMPKINS, A.J., Facilities Planning, Hemilton Printing Co., Fourth Edition, 2010.
- [38] TANCHOCO, J., Material Flow Systems in Manufacturing, Chapman & Hall, First Edition, 1994.
- [39] YASUDA, K., YIN, Y., A dissimilarity measure for solving the cell formation problem in cellular manufacturing, Computers and Industrial Engineering, 39, 1, 1-17, 2001.
- [40] www.nwlean.net/article1103.htm, Erişim Tarihi: 04.02.2013.

- [41] LI, M., The algorithm for integrating all incidence matrices in multi-dimensional group technology, *Int. J. Production Economics*, 86, 121-131, 2003.
- [42] SLOMP, J., CHOWDARY, B.V., SURESH, N.C., Design of virtual manufacturing cells: a mathematical programming approach, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 21, 273-288, 2005.
- [43] CANEL, C., AL-MUBARAK, F., KHUMAWALA, B.M., A comparison of focused cellular manufacturing to cellular manufacturing and job shop, *International Journal of Production Research*, 43, 11, 2169-2194, 2005.
- [44] www.mdcegypt.com, Erişim Tarihi: 03.03.2013.
- [45] LEI, D., WU, Z., Tabu search approach based on a similarity coefficient for cell formation in generalized group technology, *International Journal of Production Research*, 19, 4035-4047, 2005.
- [46] PAPAIOANNOU, G., WILSON, J.M., The evolution of cell form. problem methodologies based on recent studies (1997–2008): Review and directions for future research, *European Journal of Operational Research*, 206, 509-521, 2010.
- [47] MODAK, M., GHOSH, T., DAN, P.K., Solving Component Family Identification Problems on Manufacturing Shop Floor, *International Journal of Advancements in Technology*, 2, 1, 39-56, 2011.
- [48] HERRMANN, J.W., SINGH, G., Design Similarity Measures for Process Planning and Design Evaluation, Technical Research Report 1999-38, Institute for Systems Research, University of Maryland, College Park, 1999.
- [49] CHARLES, O.E., Analysis of The Parts-Machines Grouping Problem in Group Technology Manufacturing Systems, PhD Thesis, 1981.
- [50] Cellular Manuf., www.ignou.ac.in/upload/UNIT7-55.pdf, Erişim Tarihi: 12.05.2013.
- [51] BERGEN, J.H., Parts Classification as a Basis for Programmed Process Planning, Hertec Corp, 1975.
- [52] KUSIAK, A., The part families problem in FMSs, *Annals of operation research*, 3, 279-300, 1985.
- [53] WEMMERLOV, U., JOHNSON, D.J., Cellular Manufacturing at 46 User Plants: Implementation Experiences and Performance Improvements, *International Journal of Production Research*, 35, 29-49, 1997.

- [54] MALAKOOTI, B., YANG, Z., Multiple criteria approach and generation of efficient alternatives for machine-part family formation in group technology, *IIE Transactions*, 34, 837-846, 2002.
- [55] BERARDI, V.L., ZHANG, G., OFFODILE, O.F., A math. programming approach to evaluating alternative machine clusters in cellular manufacturing, *Int. J. Production Economics*, 58, 253-264, 1999.
- [56] WANG, J., Formation of machine cells and part families in cellular manufacturing systems using a linear assignment algorithm, *Automatica*, 39, 1607- 1615, 2003.
- [57] DIMOPOULOS, C., A novel approach for the solution of the multiobjective cell-formation problem, In: *Proceedings of the International Conference of Production Research (ICPR 05)*, 2005.
- [58] DIXIT, A.R., IAENG, P.K.M., Heuristic Based Approach of Cell Formation Considering Operation Sequence, *Proceedings of the World Congress on Engineering, Vol II, WCE 2007, July 2-4, 2007*.
- [59] MAHDAVI, I., MAHADEVAN, B., CLASS: An algorithm for cellular manufacturing system and layout design using sequence data, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 24, 488-497, 2008.
- [60] JAYASWAL, S., ADIL, G.K., Efficient algorithm for cell formation with sequence data, machine replications and alternative process routings, *Int. J. Prod. Res.*, 42, 12, 2419-2433, 2004.
- [61] BALLAKUR A., STEUDEL H.J., A within-in cell utilization based heuristic for designing cellular manufacturing systems. *International Journal of Production Research*, 25, 5, 639-655, 1987.
- [62] GHOSH, T., DAN, P.K., SENGUPTA, S., CHATTOPADHYAY, M., Genetic rule based techniques in cellular manufacturing (1992-2010): A systematic survey, *International Journal of Engineering, Science and Technology*, 2, 5, 198-215, 2010.
- [63] OFFODILE, O.F., Design and Analysis of A Coding and Classification Sys. for A Systematic Interactive Computer-Aided Robot Selection Procedure (Carsp), PhD. Thesis, 1984.
- [64] BURBIDGE, J.L., A Manual Method of Prod. Flow Analysis, *Production Engineer*, 56, 34, 1977.
- [65] BURBIDGE, J.L., Production Flow Analysis, *International Centre For Advanced Technical And Vocational Training*, 139-152, 1969.
- [66] MOODIE, C., UZSOY, R., YIH, Y., *Manufacturing Cells: A systems engineering view*, Taylor&Francis Ltd., London, UK, 1995.

- [67] LOW, W.K., OSMAN, M.R., YUSUF, R.M., A Comparative Study of Some Cellular Manufacturing Techniques, *Pertanika J. Sci. & Technol. Supplement*, 9, 2, 187-198, 2001.
- [68] DEFERSHA, F.M., CHEN, M., A comprehensive mathematical model for the design of cellular manufacturing systems, *Int. J. Production Economics*, 103, 767-783, 2006.
- [69] PURCHECK, G.F.K., A mathematical classification as a basis for the design of group technology production cells, *Production Engineer*, 54, 35-48, 1974.
- [70] KUSIAK, A., The generalized group tech. concept. *International Journal of Production Research* 25, 561-569, 1987.
- [71] SHTUB, A., Modeling group technology cell formation as a generalized assignment problem, *International Journal of Production Research*, 27, 775-782, 1989.
- [72] WEI, J.C., GAITHER, N., A capacity constrained multiobj. cell formation method. *Journal of Manufacturing Systems*, 9, 222-232, 1990.
- [73] RAJAMANI, D., SINGH, N., ANEJA, Y., Integrated design of cellular manufacturing systems in the presence of alternative process plans, *International Journal of Production Research*, 30, 1541-1554, 1990.
- [74] ASKIN, R.G., CHIU, K.S., A graph partitioning procedure for machine assignment and cell formation in group technology, *International Journal of Production Economics*, 28, 1555-1572, 1990.
- [75] SHAFER, S.M., ROGERS, D.F., A goal programming approach to the cell formation problem, *Journal of Operations Management*, 10, 28-43, 1991.
- [76] YIN, Y., YASUDA, K., Similarity coefficient methods applied to the cell formation problem: A taxonomy and review, *Int. J. Production Economics*, 101, 329-352, 2006.
- [77] DOULABI, S., HOJABRI, H., ALAGHEBAND, S., JAAFARI, A., DAVOUDPOUR, H., Two-Phase Approach for Solving Cell-formation Problem in Cell Manufacturing, *Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science 2009, Vol II WCECS 2009, October 20-22, 2009*.
- [78] MCAULEY, J., Machine grouping for efficient production, *Production Engineer*, 51, 53-57, 1972.

- [79] CARRIE, A.S., Numerical taxonomy applied to group technology and plant layout. *International Journal of Production Research*, 24, 399-416, 1973.
- [80] EHRGOTT, M., *Multicriteria opt.*, Springer, Berlin, Heidelberg, 2005.
- [81] WEI, J.C., KERN, G.M., Commonality analysis: A linear cell clustering algorithm for group technology, *International Journal of Production Research*, 27, 2053-2062, 1989.
- [82] ONWUBOLU, G.C., MUTINGI, M., A genetic algorithm approach to cellular manufacturing systems, *Computer and Industrial Engineering*, 39, 125-144, 2001.
- [83] MALAKOOTI, B., NIMA, R.M., YANG, Z., Integrated group technology, cell formation, process planning, and production planning with application to the emergency room, *Int. J. Prod. Res.*, 42, 9, 1769-1786, 2004.
- [84] MCCORMICK, W.T., SCHWEITZER, P.J., Problem decomposition and data reorganization by a cluster technique, *European Journal of Operations Research*, 20, 993-1009, 1972.
- [85] MAK, K.L., WONG, Y.S., WANG, X., An Adaptive Genetic Algorithm for Manufacturing Cell Formation, *Int J Adv Manuf Technol*, 16, 491-497, 2000.
- [86] YANG, X.S., *Metaheuristic Optimization: Algorithm Analysis and Open Problems*, Proceedings of the 10th Symposium on Experimental Algorithms (SEA 2011) (Eds. P. Pardalos and S. Rebenneck), Greece, Springer, 21-32, 2011.
- [87] ÓLAFSSON, S., "Metaheuristics", in Nelson and Henderson (eds.). *Handbook on Simulation, Handbooks in Operations Research and Management Science VII*, Elsevier, 633-654, 2006.
- [88] BLUM, C., ROLI, A., SAMPELS, M., An emerging approach to optimization, *Studies in computational intelligence*, 114, 2008.
- [89] JAVADIAN, N., REZAEIAN, J., MALI, Y., Multi-Objective Cellular Manufacturing System under Machines with Different Life-Cycle using Genetic Algorithm, *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 30, 2007.
- [90] MAHDAVI, I., PAYDAR, M.M., SOLIMANPUR, M., HEIDARZADE, A., Genetic algorithm approach for solving a cell formation problem in cellular manufacturing, *Expert Systems with Applications*, 36, 6598-6604, 2009.

- [91] VENUGOPAL, V., NARENDRAN, T.T., A genetic algorithm approach to the machining grouping problem with multiple objectives, *Computers and Industrial Engineering*, 22, 4, 469-480, 1992.
- [92] JOINES, J. A., CULBRETH, C. T., KING, R. E., Manufacturing cell design: An integer programming model employing genetic algorithms, *IIE Transactions*, 28, 69-85, 1996.
- [93] ZHAO, C., WU, Z., A genetic algorithm for manuf. cell formation with multiple routes and multiple objectives, *International Journal of Production Research*, 38, 2, 385-395, 2000.
- [94] UDDIN, M. K., SHANKER, K., Grouping of parts and machines in presence of alternative process routes by genetic algorithm, *International Journal of Production Economics*, 76, 3, 219-228, 2002.
- [95] GÜLSÜN, B., TUZKAYA, G., DUMAN, C., Genetik algoritmalar ile tesis yerleşimi tasarımı ve bir uygulama, *Doğuş Üniversitesi Dergisi*, 10, 1, 73-87, 2009.
- [96] İŞÇİ, Ö., KONUKOĞLU, S., Genetik algoritma yaklaşımı ve yöneylem araştırmasında bir uygulama, *Yönetim ve Ekonomi*, 10, 2, 191-208, 2003.
- [97] ISHIBUCHI, H., MURATA, T., TÜRKŞEN, I.B., Single-objective and two-objective genetic algorithms for selecting linguistic rules for pattern classification problems, *Fuzzy Sets and Systems*, 89, 135-150, 1997.
- [98] SHANKAR, R., SOLIMANPUR, M., VRAT, P., A multi-objective genetic algorithm approach to design of cellular manufacturing system, *Int. J. Prod. Res.* 42, 7, 1419-1441, 2004.
- [99] YİĞİT, V., Genetik Algoritma ile Türkiye Net Elektrik Enerjisi Tüketiminin 2020 Yılına Kadar Tahmini, *International Journal of Engineering Research and Development*, 3, 2, 37-41, 2011.
- [100] YAMAN, M., SARUHAN, H., MENDİ, F., Genetik Algoritma Yardımıyla Kardan Mil Çapı Minimizasyonu, *TİMAK-Tasarım İmalat Analiz Kongresi 26-28 Nisan 2006, Balıkesir*, 2006.
- [101] BOLAT, B., EROL, K.O., IMRAK, C.E., Genetic Algorithms in Engineering Applications and The Function of Operators, *Journal of Engineering and Natural Sciences*, 4, 264-271, 2004.
- [102] SARMA, J.A. An analysis of Decentralized and spatially distributed genetic algorithm, PhD Thesis, George Mason University, 1998.

- [103] XING, B., NELWAMONDO, F.V., BATTLE, K., GAO, W., MARWALA, T., Application of Artificial Intelligence (AI) Methods for Designing and Analysis of Reconfigurable Cellular Manufacturing System, 2009 2nd International Conference on Adaptive Science & Technology, 402-409, 2009.
- [104] RUIZ-MEZCUA, B., GARCIA-CRESPO, A., LOPEZ-CUADRADO, J., GONZALEZ-CARRASCO, I., An expert system development tool for non AI experts, Expert Systems with Applications, 38, 1, 597-609, 2011.
- [105] UYSAL, Ö. KURBAN, M., Enerji Yönetim Sistemlerinin Uzman Sistemler Kullanılarak İşletilmesi, I. Ege Enerji Sempozyumu ve Sergisi, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Denizli, Mayıs 2003.
- [106] HAYKIN, S., Neural networks: A comprehensive foundation, New York: Macmillan College, 1994.
- [107] SAĞIROĞLU, Ş., BEŞDOK, E., ERLER, M., Mühendislikte yapay zekâ uygulamaları I: Yapay sinir ağları, Kayseri, Ufuk Kitabevi, 2003.
- [108] ATİK, K., DENİZ, E., YILDIZ, E., Meteorolojik Verilerin YSA ile Modellenmesi, KSÜ Fen ve Mühendislik Dergisi, 10, 1, KSU Journal of Science and Engineering, 148, 10, 1, 2007.
- [109] CHUNG, Y., KUSIAK, A., Grouping parts with a neural network, Journal of Manufacturing Systems, 13, 4, 262-275, 1994.
- [110] BURKE, L., KAMAL, S., Neural networks and the part family/machine group formation problem in cellular manufacturing: A framework using fuzzy ART, Journal of Manufacturing Systems, 14, 3, 148-159, 1995.
- [111] KUO, R.J., SU, Y.T., CHIU, C.Y., CHEN, K., TIEN, F.C., Part family formation through fuzzy ART2 Neural network, Decision Support Systems, 42, 1, 89-103, 2006.
- [112] UĞUR, A., KINACI A., Yapay Zeka Teknikleri ve Yapay Sinir Ağları Kullanılarak Web Sayfalarının Sınıflandırılması, XI. Türkiye'de İnternet Konferansı (inet-tr'06), Ankara, 1-4, 2006.
- [113] NARAYANASWAMY, P., BECTOR, C.R., RAJAMANI, D., Fuzzy logic concepts applied to machine-component matrix formation in cellular manufacturing, European Journal of Operational Research, 93, 88-97, 1996.
- [114] ALTAŞ, İ.H., Bulanık Mantık: Bulanıklılık Kavramı, Enerji, Elektrik, Elektromekanik-3e, 62, 80-85, 1999.
- [115] DEMİRHAN, A., KILIÇ, Y.A., GÜLER, İ., Tıpta Yapay Zeka Uygulamaları, 5. Cerrahi Araştırma Kongresi, Ankara, 2009.

- [116] LAU, H.C.W., CHENG, E.N.M., LEE, C.K.M., HO, G., A fuzzy logic approach to forecast energy consumption change in a manufacturing system, *Expert Systems with Applications*, 34, 1813-1824, 2008.
- [117] KIYAK, E., KAHVECİOĞLU, A., Bulanık Mantık ve Uçuş Kontrol Problemine Uygulanması, *Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi*, 1, 2, 63-72, 2003.
- [118] YEN, J., LANGARI, R., ZADEH, L., *Industrial Applications of Fuzzy Logic and Intelligent Systems*, IEEE Press, New York, 1995.
- [119] NAADIMUTHU, G., GULTOM, P., LEE, E.S., Fuzzy clustering in cell formation with multiple attributes, *Computers and Mathematics with Applications*, 59, 3137-3147, 2010.
- [120] PAL, F., LEE, E.S., Adaptive Fuzzy Systems in Group Technology, *Computers and Mathematics with Applications*, 42, 1393-1400, 2001.
- [121] GÜNGÖR, Z., ARIKAN, F., Application of fuzzy decision making in part-machine grouping, *International Journal of Production Economics*, 63, 2, 15, 181-193, 2000.
- [122] ARIKAN, F., GÜNGÖR, Z., Modeling of a manufac. cell design problem with fuzzy multi-objective parametric programming, *Mathematical and Computer Modelling*, 50, 3-4, 407-420, 2009.
- [123] SARKER, B.R., Measures of grouping efficiency in cellular manufacturing systems, *European Journal of Operation Research*, 130, 588-611, 2001.
- [124] CHANDRASEKHARAN, M.P., RAJAGOPALAN, R., An ideal seed non-hierarchical clustering algorithm for cellular manufacturing, *International Journal of Production Research*, 24, 451-464, 1986a.
- [125] CHANDRASEKHARAN, M.P., RAJAGOPALAN, R., MODROC: an extension of rankorder clustering for group technology, *International Journal of Production Research*, 24, 1221-1233, 1986b.
- [126] BAKIR, M.A., ALTINKAYNAK, B., *Tamsayılı Prog. Teori Modeller ve Algoritmalar*, Nobel Yayınları, Ankara, 2003.
- [127] SUGA, K., KATO, S., HIYAMA, K., Structural analysis of Pareto-optimal solution sets for multi-objective optimization: An application to outer window design problems using Multiple Objective Genetic Algorithms, *Building and Environment* 45, 1144–1152, 2010.
- [128] NOCEDAL, J., Conjugate gradient methods and nonlinear opt., in: L. Adams, J.L. Nazareth (Eds.), *Linear and Nonlinear Conjugate Gradient Related Methods*, SIAM, Philadelphia, 9-23, 1995.

- [129] POLAK, E., Optimization: Algorithms and Consistent Approximations, Springer-Verlag, New York, 1997.
- [130] WEI, Z., LI, G., QI, L., New nonlinear conjugate gradient formulas for large-scale unconstrained optimization problems, Applied Mathematics and Computation, 179, 407-430, 2006.
- [131] TAVAKKOLI-MOGHADDAM, R., ARYANEZHAD, M.B., SAFAEI, N., AZARON, A., Solving a dynamic cell formation problem using metaheuristics, Applied Mathematics and Computation, 170, 2, 761-780, 2005.
- [132] SARAÇ, T., ÖZÇELİK, F., Alternatif Rotaların Varlığında Üretim Hücrelerinin Genetik Algoritma Kullanılarak Oluşturulması, Endüstri Mühendisliği Dergisi, 17, 4, 22-36, 2006.
- [133] LOGENDRAN, R., Impact of sequence of operations and layout of cells in cellular manufacturing, INT. J. PROD. RES., 29, 2, 375-390, 1991.
- [134] KOR, H., IRANMANESH, H., HALEH, H., HATEFI, S.M., A Multi-objective Genetic Algorithm for optimization of Cellular manufacturing system, 2009 International Conference on Computer Engineering and Technology, 252-256, 2009.
- [135] ÇINAR, Y., Çok Nitelikli Karar Verme ve Bankaların Mali Performanslarının Değerlendirilmesi Örneği, Ankara Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, 2004.
- [136] ÜSTÜN, Ö., Çok amaçlı Pörföy Optimizasyon Problemi ve Çözüm Yaklaşımları, Osmangazi Üniversitesi, Doktora Tezi, 2007.
- [137] MARLER, R.T., ARORA J.S., Survey of multi-objective optimization methods for engineering, Struct Multidisc Optim, 26, 369-395, 2004.
- [138] KAYA, M., GÜNGÖR, S., Çok Amaçlı Genetik Algoritma Kullanan Bulanık Sınıflandırıcı Etmenlerle Hastalık Teşhisi, Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği 12. Ulusal Kongresi ve Fuarı Bildirileri, 2007.
- [139] ARKAT, J., HOSSEINI, L., FARAHANI, M.H., Minimization of exceptional elements and voids in the cell formation problem using a multi-objective genetic algorithm, Expert Systems with Applications, 38, 9597-9602, 2011.
- [140] MOGHADDAM, R.T., BOURANI, M.R., AMIN, G.R., SIADAT, A., A cell formation problem considering machine utilization and alternative process routes by scatter search, Journal of Intelligent Manufacturing, 1-13, 2010.

- [141] MAHDAVI, I., PAYDAR, M.M., SOLİMANPUR, M., HEIDARZADE, A., Genetic algorithm approach for solving a cell formation problem in cellular manufacturing, *Expert Systems with Applications*, 36, 6598-6604, 2009.
- [142] SEETHA, M., DEVI, G.M., SUNITHA, K.V.N., An Efficient Hybrid Particle Swarm Optimization for Data Clustering, *International Journal of Data Mining & Knowledge Management Process (IJDMP)*, 2, 6, 2012.
- [143] SİPAHİOĞLU, A., SARAÇ, T., Çok Amaçlı Sırt Çantası Probleminin Çözümüne Yeni Bir Yaklaşım: Konik Skalerleştirme, *Endüstri Mühendisliği Dergisi*, 21, 4, 2-12, 2010.
- [144] MARLER, R.T., ARORA, J.S., The weighted sum method for multi-objective optimization: new insights, *Struct Multidisc Optim*, 41, 853-862, 2010.
- [145] www2.mae.ufl.edu/nkim/eas6939/multiobjMATLAB.pdf, Approximation and Optimization in Engineering, Reading materials, Erişim Tarihi: 01.02.2013.
- [146] VITANOV, V., TIAHJONO, B., MARGHALANY, I., A decision support tool to facilitate the design of cellular manufacturing layouts, *Computers & Industrial Engineering*, 52, 380-403, 2007.
- [147] LUONG, L., HE, J., ABHARY, K., OIU, L, A decision support system for cellular manufacturing system design, *Computers & Industrial Engineering*, 42, 457-470, 2002.
- [148] CHANG, C.C., Development of a Web-Based Decision Support System for Cell Formation Problems Considering Alternative Process Routings and Machine Sequences, *J. Software Engineering & Applications*, 3, 160-166, 2010.
- [149] MAHADEVAN, B., SRINIVASAN, G., Software for manufacturing cell formation: issues and experiences. In *Proceedings of the Group Technology/Cellular Manufacturing World Symposium*, 49-54, 2003.
- [150] DAVID, S.A., *Decision Support Systems In Cell Manufacturing*, Asia-Pacific Decision Sciences Institute, 2002.
- [151] SHAMBU, G., Suresh, N.C., Performance of hybrid cellular manufacturing systems: A computer simulation investigation, *European Journal of Operational Research*, 120, 436-458, 2000.
- [152] HASAN, M.A., SARKIS, J., SHANKAR, R., Agility and production flow layouts: An analytical decision analysis, *Computers and Industrial Engineering*, 62, 898-907, 2012.

- [153] KANNAN, V.R., Ghosh, S., A virtual cellular manufacturing approach to batch production, *Dec. Sci.*, 27, 519-539, 1996a.
- [154] WON, Y.K., KIM, S.H., Multiple criteria clustering algorithm for solving the group technology problem with multiple process routings, *Computers and Industrial Engineering* 32, 207-220, 1997.
- [155] KUSIAK, A., The generalized group tech. concept. *International Journal of Production Research* 25, 561-569, 1987.
- [156] ÖZYÖRÜK, B., GÜRÜ, G., Uçak Gövdesi Montaj Alanı için Hücre Tasarımı ve Hücre Etkinliğinin Belirlenmesi, *Tübav Bilim Dergisi*, 3, 4, 306-314, 2010.
- [157] KING, J.R., Machine component grouping in production flow analysis: an approach using a rank order clustering algorithm, *International Journal of Production Research*, 18, 2, 2136-232, 1980.
- [158] KUSIAK, A., CHOW, W.S., Decomposition of manufacturing systems, *IEEE Journal of Robotics and Automotion*, 4, 5, 457-471, 1988.
- [159] ATAMTÜRK, A., Hücresel İmalat Sisteminde Hücre ve Yerleşim Düzeni Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 2009.
- [160] NABİYEYEV, V., Yapay sinir ağları yardımıyla gülme olgusunun tanınması, *Bilişim Kültürü Dergisi*, 35, 96, 44-47, 2007.
- [161] CHEN, M., MURATA, T., A Method for the Config. of Hybrid Cellular Manufacturing System, *International Association of Engineers, IMECS 2010*, 1514-1520, 2010.
- [162] SLOMP, J., CHOWDARY, B.V., SURESH, N.C., Design of virtual manufacturing cells: a mathematical programming approach, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 21, 273-288, 2005.
- [163] NOMDEN, G., SLOMP, J., The Operation of Virtual Manufacturing Cells in Various Physical Layout Situations, *Proceedings of the Group Technology/Cellular Manufacturing World Symposium*, 2003.

EKLER

EK-1

Tek Rotalı Tülemsaş Verileri

Parça No	Makine No Parça/ Makine Kodu	MAKİNELER																		
		Mak-1	Mak-2	Mak-3	Mak-4	Mak-5	Mak-6	Mak-7	Mak-8	Mak-9	Mak-10	Mak-11	Mak-12	Mak-13	Mak-14	Mak-15	Mak-16	Mak-17	Mak-18	Mak-19
		X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12	X13	X14	X15	X16	X17	X18	X19
Parça1	A1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	
Parça2	A2	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	0	1	0	0	1	
Parça3	A3	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	
Parça4	A4	0	1	0	0	0	1	0	1	1	0	1	1	0	0	1	0	0	0	
Parça5	A5	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0	
Parça6	A6	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0	
Parça7	A7	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0	
Parça8	A8	0	1	0	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	
Parça9	A9	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0	1	0	0	0	
Parça10	A10	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	1	0	1	0	0	0	
Parça11	A11	0	1	0	0	0	1	0	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	
Parça12	A12	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	
Parça13	A13	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	
Parça14	A14	0	1	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	1	0	1	0	0	0	
Parça15	A15	0	1	0	0	0	1	0	1	1	0	0	1	1	0	1	0	0	0	
Parça16	A16	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	1	1	0	1	0	0	0	
Parça17	A17	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	
Parça18	A18	0	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	
Parça19	A19	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	
Parça20	A20	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	0	1	0	0	1	
Parça21	A21	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	
Parça22	A22	0	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	
Parça23	A23	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	
Parça24	A24	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	
Parça25	A25	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	0	0	1	0	1	0	0	1	
Parça26	A26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	
Parça27	A27	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	
Parça28	A28	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	
Parça29	A29	1	0	1	0	0	1	1	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	
Parça30	A30	1	0	0	0	1	1	1	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	
Parça31	A31	0	0	1	1	1	0	0	1	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0	
Parça32	A32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	
Parça33	A33	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	
Parça34	A34	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0	1	
Parça35	A35	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	
Parça36	A36	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	0	0	1	0	1	0	0	1	
Parça37	A37	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	
Parça38	A38	0	1	0	0	0	1	0	1	1	0	0	1	1	0	1	0	0	1	
Parça39	A39	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	1	0	1	0	0	1	
Parça40	A40	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1	0	0	1	0	1	0	0	0	
Parça41	A41	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	
Parça42	A42	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	
Parça43	A43	0	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0	1	1	0	1	0	0	0	
Parça44	A44	0	1	0	0	0	1	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	
Parça45	A45	0	1	0	0	0	1	0	1	1	0	0	1	1	0	1	0	0	0	
Parça46	B1	0	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	0	1	0	0	1	
Parça47	B2	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	1	
Parça48	B3	0	0	0	1	0	1	1	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	
Parça49	B4	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	
Parça50	B5	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0	
Parça51	C1	0	0	1	0	0	1	1	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	
Parça52	C2	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Parça53	C3	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	
Parça54	C4	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	
Parça55	C5	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	
Parça56	D1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	
Parça57	D2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	
Parça58	D3	0	1	1	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	

EK-2

Çok rotalı Tülemsaş Verileri

		MAKİNELER																			
		Makine No	Mak-1	Mak-2	Mak-3	Mak-4	Mak-5	Mak-6	Mak-7	Mak-8	Mak-9	Mak-10	Mak-11	Mak-12	Mak-13	Mak-14	Mak-15	Mak-16	Mak-17	Mak-18	Mak-19
PARÇALAR	Parça No	Parça/Makine Kodu	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12	X13	X14	X15	X16	X17	X18	X19
	Parça1	A1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
	Parça2	A2	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0
	Parça3	A3	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
	Parça4	A4	0	1	0	0	0	1	0	1	1	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0
	Parça5	A5	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0
	Parça6	A6-1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0
		A6-2	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0
	Parça7	A7	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0
	Parça8	A8-1	0	1	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
		A8-2	0	1	0	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	Parça9	A9	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0
	Parça10	A10-1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0
		A10-2	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0
	Parça11	A11-1	0	1	0	0	0	1	0	1	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0
		A11-2	0	1	0	0	0	1	0	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0
	Parça12	A12-1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0
		A12-2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0
	Parça13	A13-1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
		A13-2	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
		A13-3	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	Parça14	A14	0	1	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0
	Parça15	A15	0	1	0	0	0	1	0	1	1	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0
	Parça16	A16	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0
	Parça17	A17	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
	Parça18	A18	0	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0
	Parça19	A19	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0
	Parça20	A20	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0
	Parça21	A21-1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0
		A21-2	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	Parça22	A22-1	0	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0
		A22-2	0	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	Parça23	A23-1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0
		A23-2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0
	Parça24	A24-1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
		A24-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Parça25	A25-1	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0
		A25-2	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0
		A25-3	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	1	0	1	1	0
	Parça26	A26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0
	Parça27	A27	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0
	Parça28	A28-1	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
		A28-2	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	Parça29	A29	1	0	1	0	0	1	1	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0
	Parça30	A30	1	0	0	0	1	1	1	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0
	Parça31	A31	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0	0	1	0	1	1	0	0
	Parça32	A32-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0
		A32-2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Parça33	A33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0
	Parça34	A34	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1
	Parça35	A35-1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0
		A35-2	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0
	Parça36	A36	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	0	0	1	0	1	0	0	0	1
	Parça37	A37	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0
	Parça38	A38-1	0	1	0	0	0	1	0	1	1	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1
		A38-2	0	1	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	0	0	1	0	1	0	1
	Parça39	A39	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0
	Parça40	A40	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0
	Parça41	A41	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0
	Parça42	A42-1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0
		A42-2	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Parça43	A43	0	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0
	Parça44	A44	0	1	0	0	0	1	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	Parça45	A45	0	1	0	0	0	1	0	1	1	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0
	Parça46	B1	0	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	0	1	0	0	0	1
	Parça47	B2-1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1
		B2-2	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	0	0	1	0	0	1	0	1
	Parça48	B3	0	0	0	1	0	1	1	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0
	Parça49	B4-1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0
		B4-2	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0
	Parça50	B5	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0
	Parça51	C1	0	0	1	0	0	1	1	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1
	Parça52	C2	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Parça53	C3	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0
	Parça54	C4-1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0
		C4-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0
	Parça55	C5	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
	Parça56	D1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	Parça57	D2-1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0
		D2-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0
	Parça58	D3	0	1	1	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0

EK-3

Tülomsaş örneğinin çözümü ile elde edilen hücresel sistem

Part_No	Route_No	Machine 1	Machine 2	Machine 3	Machine 4	Machine 5	Machine 12	Machine 14	Machine 16	Machine 17	Machine 18	Machine 19	Machine 6	Machine 7	Machine 10	Machine 11	Machine 8	Machine 9	Machine 13	Machine 15
1	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	0	0	1
3	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	1
29	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	0	1	1
30	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	0	1	1
47	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	1	1	1	0
48	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	0	1	1
49	2	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1
51	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	0	1	1
52	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0
5	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1
6	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	1
7	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	1
13	2	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
23	2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
24	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0
32	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0
33	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
35	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1
42	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0
44	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1	0	0
50	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	1
2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1	1
4	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	0	1
8	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1	0
9	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1
10	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1
11	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	1
12	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
14	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	1
15	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1
16	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1
17	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1
18	1	0	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1
19	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
20	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	1	1	1
21	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0
22	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	1	0	0
25	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1	1
26	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
27	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	1	1
31	1	0	0	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1
34	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	1	1
36	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	1	1
37	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
38	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	1	1
39	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1
40	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1
41	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1
43	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1
45	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1
46	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	1	1	1	1
53	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
54	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
55	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1
56	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	1	0
57	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
58	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	1	0

ÖZGEÇMİŞ

İhsan EROZAN 08.05.1981 tarihinde Mersin’de doğdu. İlk eğitimini İstanbul Şair Nedim İlkokulu, orta eğitimini İstanbul Sabri Taşkın Ortaokulu’nda, lise eğitimini İstanbul Habire Yahşi Süper Lisesinde tamamladı. 2000 yılında Dumlupınar Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği bölümüne girdi. 2004 yılında Dumlupınar Üniversitesinden mezun oldu. 2005 yılında Dumlupınar Üniversitesi’nde yüksek lisansa başlayıp, 2007 yılında mezun oldu. 2008 yılı Eylül ayında Sakarya Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Bölümünde doktora programına başladı. Bugüne kadar çeşitli yazılım projelerinde yer alan yazar, halen yazılımla ilgilenmekte ve çeşitli projelere destek vermektedir.