Kübik Hücre Oluşturma Problemi için Bir Arı Algoritması

Hakan Gökdaş

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Nisan 2018

A Bee Algorithm for Cubic Cell Formation Problem

Hakan Gökdaş

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Industrial Engineering

April 2018

Kübik Hücre Oluşturma Problemi için Bir Arı Algoritması

Hakan Gökdaş

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca
Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı
Yöneylem Araştırması Bilim Dalında
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Feriştah Özçelik

Nisan 2018

ONAY

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi Hakan Gökdaş'ın YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı "Kübik Hücre Oluşturma Problemi için Bir Arı Algoritması" başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek oybirliği ile kabul edilmiştir.

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Feriştah Özçelik

İkinci Danışman : -

Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Feriştah Özçelik

Üye: Doç. Dr. Gürkan Öztürk

Üye: Doç. Dr. Berna Ulutaş

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun ..... tarih ve ..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Hürriyet ERŞAHAN
Enstitü Müdürü

ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Dr. Öğr. Üyesi Feriştah Özçelik danışmanlığında hazırlamış olduğum "Kübik Hücre Oluşturma Problemi için Bir Arı Algoritması" başlıklı YÜKSEK LİSANS tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel etik ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim. 16/04/2018

Hakan Gökdaş

İmza

ÖZET

Rekabet ortamının son yıllarda giderek artması ile ürünlerin ömürleri kısalırken, ürün çeşitliliği hızla artmaktadır. Böylesi bir rekabet ortamında işletmelerin ayakta kalabilmeleri kısa sürede yüksek çeşitlilik gösteren kaliteli ürünler üreterek bu ürünleri rekabetçi fiyatlarla satabilmeleri ile mümkündür. Hücresel üretim sistemleri, çeşitli ürünleri kısa sürede ve en düşük maliyetle üretmeye çalışırken, verimlilik artışını da hedefleyen bir yaklaşımdır. Hücresel imalat sistemlerinin tasarımının ilk ve en önemli problemi hücre oluşturma problemidir.

Bu alanda yapılan çalışmaların büyük çoğunluğu hücre oluşturma probleminin iki temel boyutu olan parça ve makinaya odaklanmaktadır. Diğer taraftan son yıllarda, makinelerde iş yapma konusundaki önemli rolleri nedeniyle işçiler üçüncü boyut olarak vurgulanmaya başlanmıştır. Gerçek bir fabrika ortamında, daha yüksek verimlilik için yalnızca makineleri ve parçaları gruplamak yeterli değildir, işçilerin de atanması üretim kaynaklarının kullanımında önemli bir role sahiptir. Üretkenliğin artırılmasının bir yolu uygun işçiye uygun makinelerle uygun parçaları yaptırmaktır. İşçiler, makinelerde iş yapmakta önemli rol oynamakta olduğundan, çalışanların hücrelere atanması hücresel üretimin tam olarak kullanılması için çok önemli bir faktör haline gelmektedir.

Bu çalışmada, üç boyutlu parça-makina-işçi temas matrisini dikkate alan kübik hücre oluşturma probleminin çözümünde arı algoritması ilk kez kullanılmıştır. Algoritma en iyi hücre sayısını da belirleyebilmektedir. Geliştirilen algoritmanın performansı, literatürden alınan problemler kullanılarak test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, algoritmanın başarısını göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Grup Teknolojisi, Hücresel Üretim, Hücre Oluşturma Problemi, Kübik Hücre Oluşturma problemi, Arı Algoritması

SUMMARY

With increasing competition in recent years, lifespan of the products is shortened, the product variety is increased at the same time. The ability of businesses to survive in such a competitive environment is only possible if they can produce high quality products in a short time and sell them at competitive prices. While cellular production systems try to produce products with diversity in the shortest time and with the least cost, it is also an approach that targets productivity increase. The first and the most important problem in cellular manufacturing systems design is cell formation.

The vast majority of work done in this area is focused on the part and machine, which are the two basic dimensions of the cell formation problem. On the other hand, in recent years, workers have been emphasized as a third dimension because of their important role in their work on machines. In a real factory environment, the grouping of machines and parts for better efficiency is not sufficient and the assignment of workers has an important role in the use of production resources. The way to increase the productivity is to attain suitable parts and machines for the appropriate workmanship. Since workers play an important role in doing work on machines, the assignment of workers to cells is a very important factor to make use of cellular production.

In this study, bees algorithm is firstly used to solve the cubic cell formation problem based on a three dimensional machine-part-worker incidence matrix. The algorithm is also capable of determining the number of cells. The performance of the developed algorithm is tested by using problems from literature. The results showed the success of the algorithm.

Keywords: Group Technology, Cellular Manufacturing, Cell Formation Problem, Cubic Cell Formation Problem, Bee Algorithm

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren Sayın Hocam Dr. Öğr. Üyesi Feriştah Özçelik'e teşekkürlerimi sunarım. Teşekkürlerimin en özelini ise; sabırla her türlü özveride bulunarak bugünlere ulaşmamı sağlayan değerli aileme sunuyorum.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET ..... **vi**

SUMMARY ..... **vii**

TEŞEKKÜR ..... **viii**

İÇİNDEKİLER ..... **ix**

ŞEKİLLER DİZİNİ ..... **xi**

ÇİZELGELER DİZİNİ ..... **xii**

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ ..... **xiii**

1. GİRİŞ VE AMAÇ **1**

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI **4**

2.1. Grup Teknolojisi ve Hücresel Üretim 4

2.1.1. Grup teknolojisinin tarihsel gelişimi 8

2.1.2. Hücresel üretimin üstünlük ve yetersizlikleri 10

2.1.3 Hücre oluşturma problemi ve çözüm yöntemleri 12

2.1.4 Kübik hücre oluşturma problemi 20

2.2. Sürü Zekâsına Dayalı Optimizasyon Algoritmaları 23

2.2.1. Sürü zekâsı 24

2.2.2. Arılarda sürü yapısı 25

2.2.3. Arılarda görev paylaşımı 26

2.2.4. Arıların yem bulma davranışları 27

2.2.5 Arı dansı 28

2.2.6 Arı Algoritması 30

3. YÖNTEM **33**

3.1. Hücre Oluşturma Problemin Modellenmesi 33

3.2. Kübik Hücre Oluşturma Problemin Modellenmesi 34

3.3 Arı Algoritması 36

3.4. Kübik hücre oluşturma problemi için arı algoritması 38

3.4.1. Çözümlerin gösterimi 38

3.4.2. Komşuluk Yapısı 41
3.4.3. Çözümlerin değerlendirilmesi 42
3.3.4. Önerilen arı algoritması 42
4. BULGULAR VE TARTIŞMA 45
4.1. Geliştirilen algoritmanın sınanması 47
4.2. Geliştirilen algoritmanın genişletilmesi 48
4.3. İki boyutlu hücre oluşturma probleminin çözülmesi 50
5. SONUÇ VE ÖNERİLER 54
KAYNAKLAR DİZİNİ 55
EK AÇIKLAMALAR 62
Ek Açıklamalar-A Veri Seti A 62
Ek Açıklamalar-B Veri Seti B 64

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil **Sayfa**

2.1. Atölye tipi 5
2.2. Akış tipi bir üretim sistemi ve parçaların izlediği yollar 6
2.3. Hücresel üretimde yerleşim ve akışlar 7
2.4. Üretim miktarı ve ürün çeşitliliği açısından üretim sistemleri 7
2.5. İki boyutlu hücre oluşturma problemi: (a) 0-1 temas matrisi (b) Köşegenleştirilmiş matris 21
2.6. Üç boyutlu hücre oluşturma problemi 22
2.7. Arılarda görev dağılımı 27
2.8. Bal arılarının sallanma dansı (Waggle Dance) 29
3.1. Arı Algoritması Akış Diyagramı 38
3.2. Çözüm dizisinin ilk bölümünün gösterimi 39
3.3. Çözüm dizisinin ilk kısmının örnek gösterimi 39
3.4. Çözüm dizisinin ikinci bölümünün örnek gösterimi 41
3.5. Çözüm dizisinin tümünün örnek gösterimi 41
3.6. Seçilen çözüm dizisi elemanlarına ait olurlu çözümler 41
3.7. Şekil 3.6'daki çözümün komşuları 42
4.1. Hazırlanan programın ekran görüntüsü 45
4.2. P8 problemi için yakınsama grafiği 47
4.3. İki boyutlu hücre oluşturma problemi için çözüm dizisi 51

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge **Sayfa**

3.1. Parça-makine matrisi 40
3.2. Makine-işçi matrisi 40
3.3. Parça-işçi matrisi 40
3.4. Aday matrisi 40
4.1. Veri seti A için problem özellikleri 46
4.2. Veri seti B için problem özellikleri 46
4.3. Algoritma için belirlenen parametreler 47
4.4. Veri seti A için elde edilen sonuçlar 48
4.5. Veri seti B için elde edilen sonuçlar 48
4.6. Hücre sayısının bilindiği ve bilinmediği durumlar için elde edilen sonuçlar 49
4.7. Hücre sayısının bilindiği durum için gruplama etkinliği değerleri 50
4.8. Hücre sayısının bilinmediği durum için gruplama etkinliği değerleri 50
4.9. İki boyutlu hücre oluşturma problemi için test problemleri 51
4.10. İki boyutlu hücre oluşturma problemi için elde edilen sonuçlar 52

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	**Açıklama**
σ^{p}	p. görevli arının çözümü
σ^{ls}	Yerel arama ile bulunan komşu çözüm
σ^{eniyi}	En iyi çözüm

Kısaltmalar	**Açıklama**
AA	Arı Algoritması
GA	Genetik algoritma
GE	Gruplama Etkinliği
HÜS	Hücresel Üretim Sistemi
ROC	Derece Sırası Kümeleme
MODROC	Düzenlenmiş Derece Sırası Kümeleme
DCA	Doğrudan Kümeleme Analizi
PSO	Parçacık Sürü Eniyileme

1. GİRİŞ VE AMAÇ

Günümüzde küreselleşmenin giderek artması ile birlikte müşteri davranışlarında ve üretim biçimlerinde değişiklikler olmaktadır. Küreselleşmeyle, müşteriler global bir pazardan daha ucuz fiyatlara çok çeşitli ürünler elde edebilir hale gelmiştir. Bu gelişmeler, müşterilerin ürün seçeneklerini çoğalttığı gibi müşterilere özgü ürünlerin üretilebilmesini de sağlamıştır. Üreticiler açısından incelendiğinde, üreticilerin müşteri memnuniyeti sağlamak için kısa sürede çok çeşitli ürünler üretmeye çalıştığı görülmektedir. Çünkü rekabetin yoğun olduğu küresel pazardan pay almaya çalışan üreticiler, kısa zamanda müşteri beklenti ve isteklerine yönelik ürünler üretmek zorundadırlar.

Küreselleşme öncesinde, üreticilerin ya az çeşitte çok ürün veya çok çeşitte az ürün ürettiği görülmektedir. Bu dönemde ya müşteri beklentileri dikkate alınmadan büyük miktarlarda ürünler üretilmekte veya sadece belirli müşterilere yönelik az sayıda özel ürünler üretilmekteydi. Bu dönemde, pazarın büyük çoğunluğu sadece belirli firmalar tarafından paylaşılmasından dolayı rekabetin az olduğu görülmekteydi. Rekabetin az olması, müşterilerin fiyatlar üzerindeki etkisini de azaltmaktadır.

2000'li yıllardan sonra küreselleşmenin hızlanmasıyla ve özellikle internet ve bilgi teknolojilerinin üretim, satış, pazarlama ve dağıtım alanlarında kullanılmasıyla birlikte üretici ve müşteri sayılarında aşırı bir artış olmuştur. 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 düzende hem müşteri hem de üreticiler için geleneksel üretim sistemlerinin ihtiyacı karşılamadığı görülmüştür. Çünkü çok sayıdaki çok çeşitli müşterinin ihtiyaçlarının karşılanması gerekmektedir. Ayrıca bu yeni ekonomik sistemde, talepler aşırı değişken ve müşterinin pazarlık gücü de oldukça fazladır.

Seri üretim ve atölye tipi üretim olarak adlandırılan geleneksel üretim sistemleri, günümüz şartlarında işletmelerin üretime devam edebilmeleri için gerekli olan esnekliği sağlayamamaktadır. Bu nedenle işletmeler, hem yeni ihtiyaçları karşılamak için geliştirilmiş üretim sistemleri (esnek üretim, yalın üretim vb.) hem de geleneksel sistemlerinin bir

bileşimi olan üretim sistemlerini (hücresel üretim sistemleri vb.) tercih ederek kendilerine uygun olan üretim sistemine geçiş yapma eğilimindedirler. Bu üretim sistemlerini tercih eden işletmeler, hem dünya pazarında daha rekabetçi bir yapıya sahip olacak hem de müşteri beklenti ve taleplerine daha iyi cevap vereceklerdir.

Geleneksel üretim sistemlerinden farklı bir yapıya sahip hücresel üretim sistemleri, temel olarak kitlesel üretim için kullanılan akış tipi üretimde elde edilen avantajlara eşdeğer avantajları, kesikli ve atölye tipi üretimlerde de elde etmek amacı oluşturulmuştur. Hücresel üretim sistemlerinin, talep değişimlerine ve hızlı değişen ürün çeşitlerinin bulunduğu ortamlara uygun olduğu söylenebilir.

Hücresel üretim, benzer parçaların tanımlanıp "parça grupları" ve bunların işleneceği makinelerin tanımlanarak "makine grupları" oluşturulmasına dayanan bir üretim yönetim felsefesidir. Bu gruplandırma, parçaların üretim ve tasarım açısından benzerliklerinden yararlanmak için yapılır. Bu amacı elde edebilmek için imalat hücrelerinin belirlenmesi gerekmektedir. Üretim hücrelerinin belirlenmesi; literatürde hücre oluşturma problemi olarak isimlendirilmektedir. Hücresel üretim sistemlerinin tasarımının ilk ve en önemli problemlerinden biri hücre oluşturma problemidir. Başarılı bir hücresel üretim sistemi uygulaması için üretim hücrelerine ait dikkate alınması gereken dört temel unsur; insan, donanım, malzeme ve işlemdir (Bidanda vd., 2005). Literatürdeki çalışmalar genellikle son üç unsuru göz önüne alarak, parçaların işlemleri, bu işlemlerin gerçekleştirildiği makinalar ve işlem sıraları, üretilen parçaların talep miktarları, üretim parti büyüklükleri, hazırlık ve işlem süreleri, rota seçenekleri gibi birçok özellik üzerinde durmaktadır. Oysa hücresel imalat sistemlerinin tasarımında; insan unsuru, donanım kullanımı için "teknik beceriler" ve takım çalışmasına uyum sağlama, problem çözebilme, karar verebilme yeteneği gibi detaylandırılabilecek "kişisel beceriler" ile bunlara bağlı maliyetler, diğer üç unsura ait özelliklerle birlikte dikkate alınmalıdır.

İşçilerin makinaya atanması durumlarında, yani makina kullanımı için gerekli, işçiye ait kişisel ve teknik becerilerin önemli olduğu üretim sistemlerinde, işçi atamasının hücre oluşturma probleminde eş zamanlı olarak dikkate alınması önemlidir. Verilecek stratejik kararlardan olan makinaların satın alınması, parçaların fason imalata gönderilmesi, bu makinaları kullanacak olan işçilerin beceri ve beceri seviyelerine bağlı maliyetlere göre şekil

alacaktır. Dolayısıyla bunlar, tasarım aşamasında belirlenecek olan hücre yapısını doğrudan doğruya etkileyecektir.

Hücre oluşturma problemleri NP-zor problemler sınıfında yer almaktadır. Literatürde hücresel üretim problemlerinin çözümü için sezgisel yaklaşımlardan matematiksel programlama yaklaşımlarına kadar birçok algoritma önerilmiştir. Bu çalışmada kübik hücre oluşturma probleminin çözümü için bir arı algoritması geliştirilmiştir. Popülasyon tabanlı bir algoritma olan arı algoritması, doğadaki sürülerin davranışlarından esinlenilerek geliştirilmiştir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1. Grup Teknolojisi ve Hücresel Üretim

Grup Teknolojisi (GT), işletmelerin verimliliğinin arttırılmasını için işletmelerdeki ürünlerin benzerliklerinden yararlanarak bu ürünleri gruplandırmayı amaçlayan bir üretim tekniğidir.İşletmelerin GT'yi uygulamasındaki temel amaç verimliliği arttırmak ve üretimin talebi karşılayabilecek adet ve kaliteye ulaşmasını sağlamaktır. İşletmeler, diğer işletmelerle girdiği rekabet ortamında, kendisini ürünleri, tesisleri, kullanılan hammadde, makine, teçhizat vb. açısından öne geçirmeyi hedeflemektedir. Bu çaba maddi kazancının yanında işletmenin sürekliliği için de gereklidir. Gelişen teknolojiden de yararlanılarak birçok yeni teknik geliştirilmiştir. GT de bunlar arasındadır. GT'nin çalışma mantığı, üretilen benzer ürünlerin bir araya getirilerek gruplandırılmasıdır. Böyle bir gruplandırma yapılmasının nedeni de günümüzde işletmelerin çok fazla sayıda ürün üretmesi ve ürüne göre düzenlenmenin oldukça zorlaşmasıdır. Tek tek her ürüne göre düzenleme yapılamayacağından gruplandırma ve bu gruplandırmaya göre yapılacak olan düzenlemeler büyük önem kazanmıştır. Bir atölyenin çok farklı alanlarda üretim yapamayacağı göz önünde alınırsa ürettiği ürünler çok çeşitli olsa dahi benzer özellikler taşıması kaçınılmazdır. Bu benzerlikler tasarım benzerlikleri ya da üretim benzerlikleri olabilir. Tasarım özelliklerinden kastedilen ürünün dış özellikleri, geometrik şekli vb. üretim özellikleri ise üretilmesi esnasında kullanılan malzeme türleri, miktarları, yapılan işlemler, işlemlerin sırası vb.dir. Bu benzer özelliklere sahip gruplar gözle muayene veya kodlama sistemleri ile belirlenebilir.

GT kullanılarak yapılan üretim, ürünleri gruplandırarak, tasarım, planlama ve üretim faaliyetlerini ürünler arasında var olan bu benzerliklere göre gerçekleştirir. Bu sayede de zaman, emek ve maliyet açısından tasarruf sağlar. Ayrıca sistemlerin karmaşıklığını azaltarak, sistemin anlaşılır hale gelmesini sağlar.

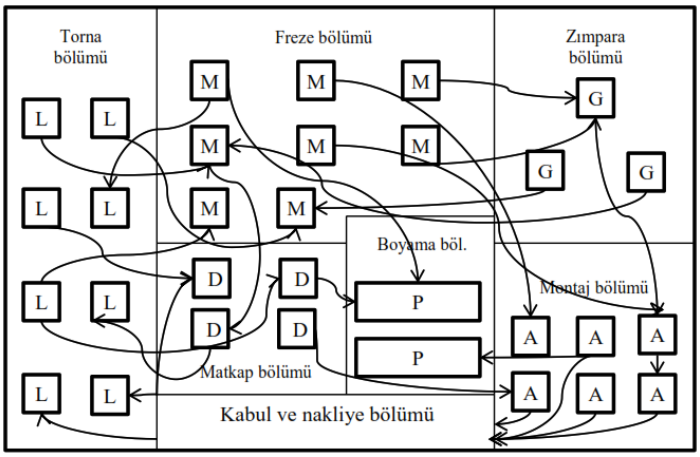
İşletmeler en genel anlamda bir sistem olarak düşünüldüğünde üretim sistemi kısmı, bu ana sistemin bir alt sistemi olarak ifade edilebilir. Temelde beş tür üretim sistemi mevcuttur. Bunlar:

• Atölye tipi üretim
• Akış tipi üretim
• Proje tipi üretim
• Sürekli üretim
• Hücresel üretim sistemi (HÜS)'dir.

Tüm üretim sistemlerinde temel amaç, etkinliğin ve verimliliğin arttırılmasıdır.

Günümüz şartlarında işletmelerin ürettikleri ürünlerin, verdikleri hizmetlerin, olası müşterilerin talep ve ihtiyaçlarının farklılaşması, atölye tipi üretim sisteminin tercih edilmesinde artışa neden olmuştur. Bu nedenle HÜS, önemli bir üretim tekniği olarak öne çıkmaktadır. Çünkü HÜS, Grup Teknolojisinin atölye ortamına uygulanması olarak belirtilebilir. HÜS'ün tasarlanmasına yönelik literatürde birçok teknik yer almaktadır.

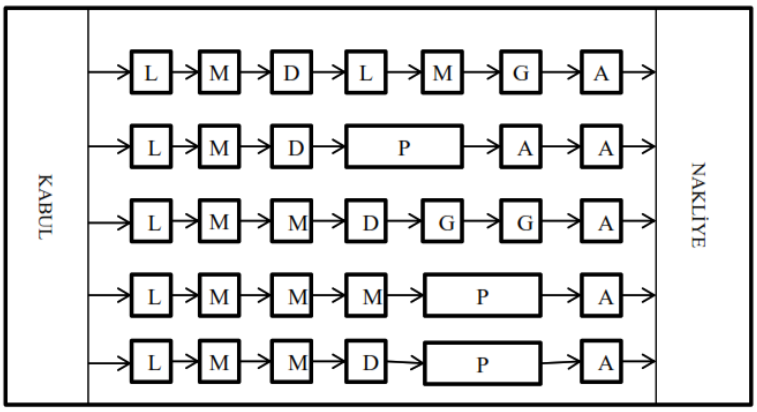
Atölye tipi üretim sisteminde ürün çeşitliliği fazla iken üretim miktarları düşüktür. Genellikle üretilen ürünlerin fiziksel büyüklüğü fazla olmaktadır. Atölye yerleşimi, buradaki esnek üretime göre tasarlanmış olmalıdır. Bu yöntemin yetersizliği ise, bölümler arasında taşımanın fazla olmasıdır. Bu da ara stok düzeyinin fazla olmasına neden olmaktadır. Şekil 2.1 atölye tipi bir yerleşimde parçaların izlediği yolları göstermektedir.



Şekil 2.1. Atölye tipi bir yerleşim ve parçaların izlediği yollar (Sönmez, 2011)

Seri üretim sistemi ürüne olan talebin fazla olduğu durumlarda tercih edilir. Seri üretim sistemi, miktar ve akış tipi üretim olarak ikiye ayrılmaktadır. Miktar tipi üretim sistemi, tek tip üründen fazla sayıda üretilmesi durumuyken, akış tipi üretim ise uzun bir hat

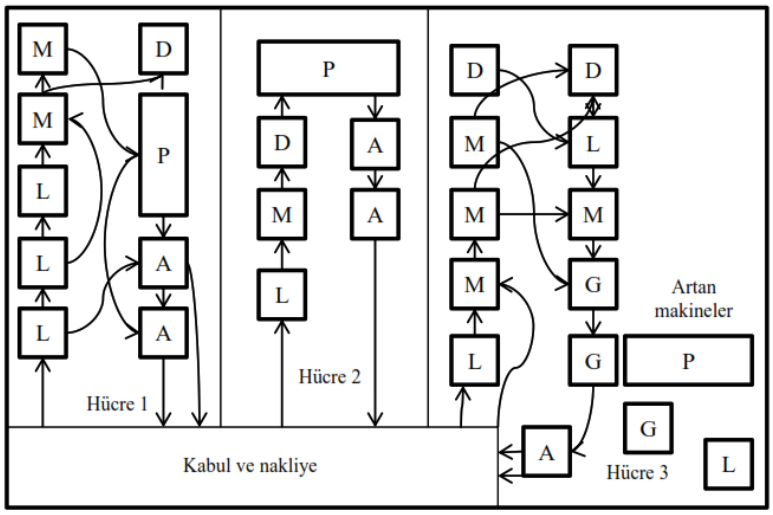
boyunca parçaların işlendiği iş istasyonlarının sıralanması halidir. Şekil 2.2'de akış tipi üretim sisteminde parçaların izlediği yollar gösterilmektedir.



Şekil 2.2. Akış tipi bir üretim sistemi ve parçaların izlediği yollar (Sönmez, 2011)

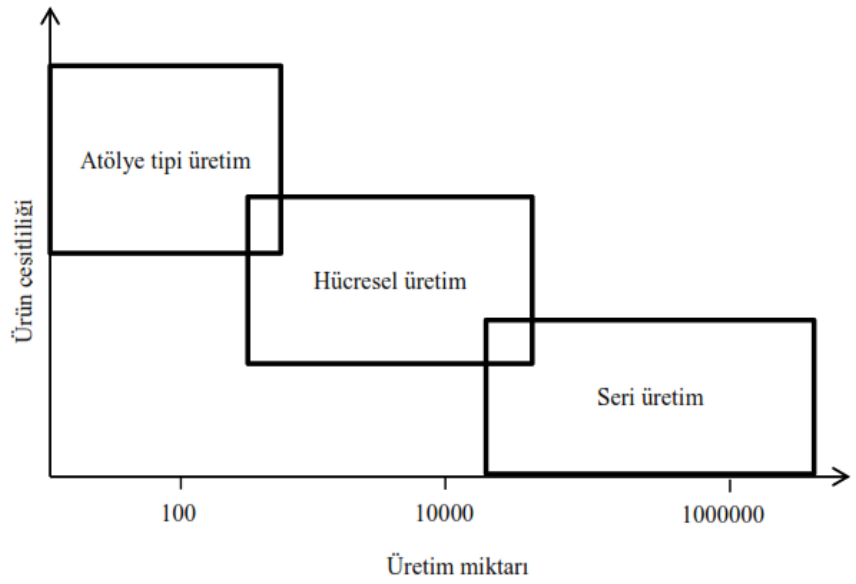
GT'de, birbirine benzer parçalar bir araya getirilmesinin ardından birbirinden bağımsız makine ailelerinde bu parçaların işlem görmesi sağlanır. Buradaki önemli nokta, her parça grubunun ait olduğu makine ailesinde işlenerek süreci tamamlamasıdır. Parçaların işlendiği bağımsız alt makine ailelerine hücre adı verilir. Bağımsız hücreler arası taşımanın azalması ve parçalara ait işlemlerin sadece o hücrede yapılması sayesinde işletme içi ara stoklarda azalma olur, sistemde sıra bekleyen parçaların azalması ile de ürün tedarik süresinde azalmalar olur. Bunun sonucunda işletmenin verimliliği artarak maliyetlerde düşüş sağlanmış olur.

Hücresel üretim, GT'nin üretimdeki uygulamasıdır. Hücresel üretim, benzer parçalardan oluşan parça ailelerinin, hücrelere atanan makinelerde işlenmesidir. Hücre oluşturma problemi ise üretim sisteminin hangi ölçütlere göre alt gruplara ayrılacağının belirlenmesidir. Parça ailelerinin göreceği tüm işlemler makine grupları ile karşılanır. Hazırlık sürelerinde azalma, daha az makine ihtiyacı, verimlilikte artış, işlemlerin kontrolünün kolaylaşması vb. gibi GT üstünlükleri, hücresel üretim için de geçerlidir. Bu üretim şeklinin başlıca yetersizliği; kapasite kullanım oranındaki azalma ve her zaman nitelikli bir eleman gücü gerektirmesidir. Ayrıca hücrelerin bağımsız olması için üretimde kullanılan mevcut makine ve donanımdan daha fazlası da gerekebilir, bu ise yatırımların artması anlamına gelmektedir. Hücresel üretim sistemini örnekleyen bir yerleşim planı Şekil 2.3 gösterilmektedir.



Şekil 2.3. Hücresel üretimde yerleşim ve akışlar (Sönmez, 2011)

Atölye tipi üretim sistemi ile karşılaştırıldığında parça hareketleri daha basit yapıdadır. Hücreler arası taşımalar azdır veya hiç yoktur. Parçalar tüm işlemlerini hücre içinde tamamlayabilir. Üretimin kontrol altında tutulması çok daha kolaydır. Hücre oluşturulmasında, parça ve makine gruplarını etkileyen birçok ölçüt söz konusudur. İşletmeler hangi hücre oluşturma ölçütlerine göre üretim yapacağına dikkatli karar vermelilerdir. Çünkü bu ölçütler başarıyı doğrudan etkileyecektir. Şekil 2.4'de HÜS'nin diğer üretim sistemlerine göre konumu, ürün çeşitliliği ve üretim miktarı göz önüne alınarak gösterilmektedir.



Şekil 2.4. Üretim miktarı ve ürün çeşitliliği açısından üretim sistemleri (Sönmez, 2011)

2.1.1. Grup teknolojisinin tarihsel gelişimi

Hücresel üretim sistemlerine ayrıntılı olarak değinmeden önce, modern üretim sistemlerinin gelişimine göz atmak faydalı olacaktır. Modern üretim sistemlerinin tarihinin, Eli Whitney'in 1797'de, kitlesel üretim tekniklerini kullanarak Amerikan ordusu için silah üretmesiyle başladığı söylenebilir. Amerikan ordusunun, üretilen tüm silahların aynı standartta üretilmesi gerektiğini dikte etmesi ile Amerika'da emeğe dayalı üretimin yerini standart ürün üretimi almaya başlamıştır (Woodbury, 1960). Bu standart ürün üretme çabaları, Amerikan sistemi veya Amerikan üretim sistemi olarak isimlendirilmiştir (Hounshell, 1985). Bu sistem, ilk olarak sadece askeri malzemelerin üretimi için kullanılsa da , sonraları tüm Amerikan sanayi tarafından kabul görmüştür.

19. yüzyılın sonlarında ve 20. yüzyılın başlarında, fabrikalarda daha yüksek ve daha verimli çıktılar elde etmek için Amerikalı mühendis F. W. Taylor tarafından bir üretim yönetimi yaklaşımı oluşturulmuştur. Bu yaklaşımda, ustalar tarafından yürütülen bazı faaliyetlerin kademelendirilmesi ve iş bölümü kavramları ortaya atılmıştır. Ayıca standart iş performansı, zaman ve hareket etüdü ve becerilerin dağıtımı gibi alanlarda işlerin standartlaştırılmasını amaçlamıştır. Bu dönemden itibaren Taylor'un bilimsel yönetim ilkeleri, iş ve işçi arasındaki ilişkiyi tanımlamak için bir standart haline gelmiştir.

20. yüzyılın başlarında, Henry Ford'un geliştirdiği kitlesel üretim sistemi ile modern üretim sistemlerinin kurulduğu varsayılır. Bu dönemde Henry Ford, Taylor tarafından geliştirilen ilkelerini teknolojik gelişmelerle birleştirerek bilimsel yönetimi pratik hayatta başarı ile kullanmıştır. 1913'te Ford, "kitlesel üretim sistemi" olarak adlandırılan ilk resmi üretim sistemini Highland Park tesislerinde kurmuştur. Tek ürün üretimi, standart parçaların kullanımını kolaylaştırmıştır. Böylece otomobillerde kitlesel üretim imkânı doğmuştur (Hounshell, 1985). Henry Ford, kitlesel üretim ile Model-T adıyla, tek şase tipi, tek renk ve diğer tüm özellikleri aynı olmak üzere otomobil üretimine başlamıştır.

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 (Fujimoto, 1999). Ford'un kitlesel üretimine karşı emeğe dayalı üretimin

esnekliği, 1950 yılından sonra Toyota üretim sisteminin doğuşuna neden olmuştur. Kitlesel üretimin bazı yetersizlikleri 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.

Grup Teknolojisi kavramına benzer bir üretim kavramı ilk olarak Flanders (1925) tarafından kullanılmıştır. Flanders, bazı standart ürünlerin üretiminin özel olarak oluşturulmuş bölümlerde daha az taşıma ile üretilebileceğini ifade etmiştir. Daha sonra 1933 yılında Almanya'da Brady, 1938 yılında Sovyetler Birliği'nde A.P. Sokolovski ve 1949 yılında İsveç'te A. Karolin yapmış oldukları çalışmalarda parçaların gruplanabileceğini ve benzer özelliklere sahip olan bu parça gruplarının birlikte standart bir süreçle üretilebileceğinden bahsetmişlerdir. Mitrofanov (1959) grup teknolojisi alanında yaptığı çalışmalar sonrasında "The Scientific Principle of Group Technology" isimli kitabını yayınlamıştır.

1960'lı yıllara gelindiğinde, grup teknolojisi yaklaşımının dünya çapında kabul gören bir yaklaşım olduğu görülmektedir. 1960'lı yılların başında, parti tipi üretim sistemlerinin karmaşık ve uzun üretim süreçleri ile ilgili problemlerini çözmek için hücresel üretim sistemleri yaklaşımı önerilmiştir. 1970'li yılların başında Opitz (1970) tarafından parça kodlama ve sınıflandırma sistemleri (part coding and classification analysis-PCA) geliştirilmiştir. Burbidge (1971) ise ürün akış analizine dayalı bir fonksiyonel makine yerleşimi ile daha etkili makine grupları oluşturulabileceğini göstermiştir. McAuley (1972) ilgili çalışmasında GT probleminin modellenmesi ve çözümüne gerçek anlamda analitik yaklaşımda bulunmuştur. Makine ve parçaları temsil etmek için bir 0-1 matrisi kullanmış ve iki makine arasındaki benzerliği tanımlayan ilk araştırmacı olmuştur. McAuley'in çalışmasından sonra parça ve makine gruplandırma çalışmaları hız kazanmış ve günümüze kadar gelinmiştir.

Günümüzde çok sayıda üretici seçeneği olması sonucunda, 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 atik bir yapıya kavuşmayı amaçlamaktadırlar.

Yalın üretim, tam zamanında üretim sistemi, esnek üretim sistemleri, hücresel üretim sistemleri, parti tipi üretim sistemi ve bilgisayar bütünleşik üretim sistemleri sağladıkları üstünlükler sayesinde günümüzdeki tanınmış 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.

2.1.2. Hücresel üretimin üstünlük ve yetersizlikleri

Hücresel üretimin üstünlükleri şunlardır:

- **Hazırlık süresinde azalma olur**: Parçalar benzerliklerine göre gruplandırıldığından, benzer makine ve donanım kullanılır. Süreçte benzer biçimlendirmeler yapılacağından hazırlık süresi azalır. Böylelikle süreç sadece her bir parça için hazırlanmamakta, parça ailesi için hazırlanmaktadır. Makinelerde gerekli değişiklikler parça ailesi için olacağından, hazırlık zamanından kazanç sağlanır. Azalan hazırlık maliyetleri, ekonomik parti büyüklüklerinde daha düşük üretim hacimlerinin seçilmesine olanak sağlayabilir. Zira ekonomik üretim miktarı, hazırlık maliyetleri ile doğru orantılıdır
- **Ara stok miktarı azalır**: Hücresel üretimin basitleştirdiği üretim sistemi ve iş akışı sayesinde makineler önünde işlenmek için bekleyeceği süre azalır. Ürünün bekleme kuyruğunda geçireceği süre az olacağından ara stoklar da azalacaktır. Üretim içerisindeki ara stokların azalması, üretim yapan işletmenin stok için ayıracağı sermaye maliyetinin de azalması anlamına gelir. Parti büyüklüğünde azalma ve üretim süresindeki azalmadan dolayı toplam stok büyüklüğünde de azalma meydana gelir.
- **Taşımalar azalır**: Hücresel üretim sayesinde bir noktadan diğer noktaya taşınan ürün miktarı azalacak ve ürünlerin taşındığı mesafe de kısalacaktır. Bunun dolaylı olarak etkisi taşınan ürünün ve taşıma mesafesinin azalması sonucunda taşıma için yapılan masrafın ve zamanın da azalmasıdır.

- **Toplam üretim süresi kısalır**: Makine hazırlık süresinin, üretim içi stok miktarının, kuyrukta bekleme süresinin ve taşıma süresinin azalması, toplam üretim zamanında kayda değer bir azalma sağlayacaktır. Bu da üretim yapan işletmenin daha fazla üretim yapmasına olanak sağlayacak ve dolayısıyla işletmenin üretim verimliliğinin artmasına vesile olacaktır.
- **Üretim çizelgelemede kolaylık sağlar**: Parça ailelerindeki benzerlikten dolayı üretim çizelgelemedeki karmaşıklık azalır. Atölye tipi üretim sisteminde üretim çizelgeleme, tüm süreci kapsayacak şekilde yapılırken HÜS çizelgeleme sadece hücre içi süreci kapsayacak şekilde yapılmaktadır. Sorumluluk alanının azalması üretimin, planlamanın ve kontrolün daha kolay bir şekilde yapılmasını sağlayacaktır.
- **Parti büyüklükleri azalır**: Hazırlık zamanının azalması sonucunda küçük parti büyüklükleri ile çalışma sağlanabilir böylece üretim akışı da daha düzgün bir hale gelmektedir.
- **Alan gereksinimi azalır**: Üretimdeki yarı mamul, bitmiş ürün stoklarında ve parti büyüklüğündeki azalmadan dolayı işletme içi yerleşimde alan tasarrufu sağlanmış olur. Böylece önemli ölçüde kullanılabilir alan kazanılır.
- **Ürün kalitesi artar**: Ürünlerin dar bir alanda dolaşmasından dolayı bir hata veya aksaklık durumunda geri bildirimin çok çabuk yapılması ve çalışanların tüm sürece hâkim olmaları sayesinde hataların anında giderilmesiyle, zamandan büyük kazanç sağlanırken kalite de artmış olur.
- **İşçilik maliyetleri azalır**: Hücrelere atanan elemanlar, birden fazla işi, hücre içinde yapabildiğinden işçilik maliyeti azalır.
- **Süreç kontrolü artar**: HÜS, ürünleri gruplandırdığı için sistemler karmaşıklıktan uzaklaştırır, üretim sırasında kolay kontrol ve planlama yapılmasını sağlar.

Hücresel üretimin yetersizlikleri şunlardır:

- **Uygulama maliyeti yüksektir**: Mevcut yerleşim planının tekrar düzenlenme maliyeti yanında, fiziksel düzenleme, işçilerin eğitim ve özel vasıf kazandırma maliyeti de ortaya çıkmaktadır.
- **Makine arızalarını ve kullanım oranlarını yönetmek zordur**: Hücre içindeki her bir makine üretim faaliyetlerini yerine getirmek için kritik düzeyde öneme sahiptir. Bir makinede meydana gelen arıza diğer makinelerin de durmasına neden olur. Üretimin durmaması için bu faaliyet başka bir hücredeki makineye kaydırılabilir;

fakat bu durumda da hücreler arası taşıma artmaktadır. Ayrıca aynı işi yapan bir başka makinenin seçim işlemi hücre oluşturmayı daha zor bir hale getirmektedir.

- **Kalifiye elemana olan ihtiyaç artar**: İşçilerin hücrede yer alan tüm makineleri kullanabilecek şekilde eğitilmesi gerekmektedir; bu da işgücü maliyetini arttırır.
- **Parçalar montaj aşamasına eş zamanlı gelmeyebilir**: Parçalar farklı hücrelerde üretiliyor olabilir. Böylece montaj işlemine alınacak parçalar aynı anda işleme alınamayabilir.
- **Hücre dışı faaliyetlerin kontrolü zordur**: Çoğu durumda parçaların sadece bir tek hücrede işlemini tamamlaması zor olduğundan, başka bir hücrede de işlem görmesi gerekebilir. Bu durumda ise çeşitli malzeme aktarma problemleri çıkabilir.
- **Makine kullanım oranı azalır**: Üretilen ürünlerin taşınmaması için bazı üretim araçlarından birden fazla sayıda bulundurulması gerekebilir. Bu durum daha fazla yatırım gerektirir ve makine kapasite kullanım oranının düşmesine neden olur.
- **Parça değişikliklerini yerleşim planına yansıtmak zordur**: Parçalarda meydana gelen değişiklikler sonrasında üretim hücrelerinin yerleşim planlarını düzenlemek kolay değildir. Böyle bir durumda bazı hücrelerde darboğazlar oluşacak, bazıları ise kullanım oranlarının çok altında kalacaktır.
- **İşçi itirazları oluşabilir**: HÜS, yönteminin uygulanması, çalışanların o ana kadar çalıştıkları sistemin değişmesi anlamına gelir ki alıştığı şekli değiştirmek istemeyen çalışanlar tarafından bu konuda itiraz gelebilir.

Tüm bu yetersizlikler hücresel üretimin uygulanmasını zorlaştırsa da HÜ'in üstünlükleri üretim verimliliğine önemli derecede olumlu yönde etki etmektedir.

2.1.3 Hücre oluşturma problemi ve çözüm yöntemleri

Hücresel üretime geçişin önemli aşamalarından birisi, üretim hücrelerinin oluşturulmasıdır. Üretim hücrelerinin oluşturulması, tezgah gruplarının ve parça ailelerinin belirlenmesi ve bu grupların hücrelere atanması anlamına gelir (Adil vd. 1996). Bu aşamada hücreler arası taşımayı en küçükleyebilmek için mümkün olduğunca hücre dışı eleman olmamasına ve kapasite kullanımının düşmemesi açısından da hücre içinde kullanılmayan eleman kalmamasına çalışılmalıdır.

Hücre oluşturma problemi, NP-hard karmaşıklık sınıfındadır (Ballakur ve Steudel, 1987). Bu problemlerin, kesin çözüm yöntemleri çözülmesi zordur. Hücre oluşturma problemlerinin karmaşık yapısından dolayı, problem boyutu büyüdükçe incelenecek çözüm sayısı ve buna bağlı olarak da çözüm süresi aşırı bir şekilde artmaktadır. Bu nedenle hücre oluşturma problemlerinin makul sürelerde uygun sonuçlar üretebilmesi için sezgisel, meta-sezgisel ve yapay zekâ tekniklerinden yararlanılmaktadır.

Hücre oluşturma problemlerinin çözümü için günümüze kadar çok sayıda yaklaşım geliştirilmiş ve halen de geliştirilmeye devam etmektedir. Yapılan çalışmalarda hücre oluşturma problemleri için etkili yaklaşımlar önerilmiştir. Bu yaklaşımları 3 kategoride toplamak mümkündür (Offodile vd., 1994):

- Görsel inceleme yöntemleri
- Parça kodlama yöntemleri
- Üretim akış yöntemleri

Görsel inceleme yöntemleri: Bunlar, parça aileleri ve makine hücrelerinin görsel olarak belirlenmesi temeline dayanmaktadır. Sınıflandırma işlemi genellikle ya parçaların fiziksel olarak incelenmesi veya parçaların fotoğraflarına bakılması suretiyle yapılır. Bu yaklaşım, parça ve makine sayılarının çok az olması durumunda etkin kümelemeye imkân verir. Diğer yöntemler içinde bu yaklaşım, en basit ve en ucuz olanıdır. Parça ve makine sayısı arttıkça görsel olarak atama işlemi çok zor veya imkânsız hale gelir.

Parça kodlama analizi yöntemleri: İlk kez Opitz (1970) tarafından geliştirilen parça kodlama sistemleri (part coding and classification analysis-PCA), rakam ve harf gibi simgelerle parçaların önemli tasarım ve üretim özelliklerini belirleyen şemalardır. Kodlama ve sınıflandırma birbiri ile yakından ilişkili iki kavram olduğu için bu şemalar hazırlanırken bu iki kavram birlikte göz önünde bulundurulur. Hazırlanan bu şemalar aracılığı ile sınıflandırma yapılabilmektedir. Bu şemalar sayesinde bir parça, her basamağı belirli bir özelliği temsil eden bir kod tarafından tanımlanmaktadır. Bu koddaki her basamak, bazı ürün özelliklerini temsil etmektedir.

Parça kodlama analizinin tutarlılık ve imalat-tasarım özelliklerini eş zamanlı olarak kullanma avantajları yanında bazen parça kodlarının süreç planlarına uymaması ve aşırı

zaman-maliyet gereksinimi gibi kusurları da olabilmektedir. Parça kodlama analizi, her bir parçanın üretim ve tasarım özelliklerinin çözümlenmesini gerektirdiği için hem zaman alıcı hem de pahalı bir süreçtir.

Üretim akış analizi: Üretim akış analizi (production flow analysis), Burbidge (1971) tarafından ortaya atılan bir parça ailesi tanımlama ve makine hücresi oluşturma yaklaşımıdır. Üretim akış analizinin temelinde, rota bilgisini kullanarak parça aileleri ve ilgili makineleri gruplamak yatmaktadır. Bu yöntem ile benzer veya aynı rotaya sahip parçalar, parça ailesi olarak sınıflandırılır. Bu parça aileleri, mantıksal makine hücrelerinin oluşturulması için kullanılır.

Üretim akış yöntemlerini üç grupta toplamak mümkündür:

- Matematik programlama
- Matris tabanlı yöntemler
- Yapay zekâ yöntemleri

Matematik programlama: Bu yaklaşımlar, parça-makine matrisinin çözülmesi için ilk önerilen ve çok yaygın bir şekilde kullanılan yaklaşımlardandır. Farklı kısıt ve amaçları ele alabildiğinden hücre oluşturma problemlerinin çözümünde iyi bir yoldur. Matematik programlama yaklaşımlarında genellikle benzerliklerin en büyüklenmesi veya çeşitli maliyetlerin en küçüklenmesi amaçlanmaktadır. Matematiksel modeller, hücre oluşturma problemleri için yaygın olarak kullanılmalarına rağmen; problem boyutu büyüdükçe GAMS ve LINDO gibi paket programlar ile bu problemlerin çözümüne makul süre içinde ulaşılamamaktadır.

Matris tabanlı yöntemler: Matris tabanlı yöntemler, dizi tabanlı yöntemler ve benzerlik katsayısına dayalı yöntemler olmak üzere iki alt başlıkta incelenebilir. Bu yöntemler, diğer üretim akışına dayalı yöntemlerle karşılaştırıldığında en basit yöntemlerdendir.

Dizi Tabanlı (array based) yöntemlerde, parçaların işlem görecekleri makineleri gösteren temas matrisi temel alınır. Matris üzerinde yer alan a_{ij} elemanı, 1'e eşit olduğunda i. parça j makinesinde işlem görecektir; eğer bu eleman 0 değerini aldıysa da i. parça j. makinede işlem görmemektedir. Yöntemin amacı temas matrisinde yer alan 1'leri satır ve

sütun işlemleri yaparak bir köşegen matris biçimine dönüştürmektir. Literatürde yer alan sıralama temelli yöntemlerden bazıları, Bağ Enerji Analizi, Derece Sırası Kümeleme (ROC), Düzenlenmiş Derece Sırası Kümeleme (MODROC), Doğrudan Kümeleme Analizi (DCA) ve Küme Belirleme Yöntemi (CIA)'dir.

McCormick vd. (1972) tarafından geliştirilen **Bağ Enerji Analizi** yaklaşımı, hücre oluşturma için bağ enerji değerlerinin hesaplanmasına dayanmaktadır. Bu yaklaşımda, makine-parça başlangıç matrisinde köşegen bloklar oluşturmak için bağ enerjisi değerleri hesaplanarak parça aileleri ve makine grupları oluşturulmasına çalışılır.

King (1980) tarafından geliştirilen **Derece Sırasına Göre Kümeleme** (ROC) yöntemi, makine-parça başlangıç matrisinin satır ve sütunlarının sıralanmasına dayanan, hiyerarşik olmayan ve tekrar temelli bir yapıdadır ve hiyerarşik yöntemlerin tersine, benzerlik katsayıları kullanılmadan makine-parça matrisi üzerindeki satır ve sütunların ikilik sayı sistemindeki değerleri ile yapılan işlemlere dayanır. Bu değerler onluk sisteme dönüştürüldükten sonra yeniden sıralama yapılarak makine-parça matrisi düzenlenir (Kusiak ve Chow, 1988). Derece Sırasına Göre Kümelemede ikilik sayı sistemi kullanılırken, parça ve makineler için büyükten küçüğe bir sıralama yapılır. Daha sonra hem parça hem de makine için ayrı ayrı tekrar işlemleri uygulanır. Her tekrarda 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 sütün için, büyük olan toplam değerine göre sıralama yapılır.

Chandrasekharan ve Rajagopalan (1986), Derece Sırasına Göre Kümeleme yönteminde bazı eksikler tespit etmiştir. Bu nedenle bu yöntem üzerinde değişiklikler yaparak "**Geliştirilmiş Derece Sırasına Göre Kümeleme**" yöntemini ortaya atmışlardır. Üç aşamalı olan bu yöntemin, ilk aşamasında başlangıç makine parça matrisine iki 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.

Matris yapısına dayalı yöntemlerin bir diğer kümesi de **Benzerlik Katsayısına Dayalı** yöntemlerdir. İlk kez McAuley (1972) tarafından önerilen benzerlik katsayısına dayalı yöntemler, hücre oluşturmada matematik programlama ve sezgisellere dayalı algoritmalar gibi birçok yöntemden daha esnek bir yapıya sahiptir. Burada esneklikten kasıt, basit çözüm adımları ve model genişlemelerine açık olmaktır (Yin ve Yasuda, 2006). Benzer parçaların kümelenmesinin hücresel imalatın temel mantığına uygunluğu sonucunda, hücre oluşturmada, Jaccard benzerlik katsayısı yanında çok sayıda farklı benzerlik katsayısı tanımı da bulunmaktadır.

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

Hücresel üretimin temel amacı olan benzer özelliklere sahip parçaların benzer hücrelerde üretilmesi yaklaşımı, benzerlik katsayısı yöntemleri ile basit ve esnek bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir. Benzerlik katsayısı yöntemlerinin sayılan üstünlükleri yanında, problem boyutu büyüdükçe hesaplanacak benzerlik ölçümü sayısının aşırı artışı ve hücre oluşturmada benzerlik dışındaki faktörlerin dikkate almaması gibi yetersizlikleri de bulunmaktadır.

Yapay Zekâ: NP-Zor sınıfta yer alan hücre oluşturma problemlerinin çözümü matematik programlama ile yapılabiliyor olsa dahi, büyük bir örnekle karşılaşıldığında bunu makul bir zamanda çözmek kolay olmamaktadır. Ayrıca problem karmaşıklaştıkça modelin kurulumu da zorlaşmaktadır. Hücre oluşturma problemlerinin NP-hard yapısından dolayı, klasik algoritmalarla büyük boyutlu problemler için en iyi çözüme kolay bir şekilde ulaşılmayabilmektedir.

Yapay zekâ yöntemleri, klasik algoritmaların ve matematik programlama yaklaşımlarının belirtilen eksiklerinden kaçınmak için geliştirilmişlerdir. Her ne kadar belirtilen eksikleri giderseler bile bu algoritmaların hiçbiri en iyi çözümü üretmeyi garanti

etmezler. Ancak makul bir sürede en iyiye yakın çözümler üretebilirler. Bu algoritmalardan hücre oluşturmada en çok kullanılanları aşağıda verilmiştir:

- Genetik algoritma,
- Tavlama benzetimi algoritması,
- Tabu arama algoritması,
- Karınca kolonisi algoritması.
- Yapay sinir ağı,
- Bulanık mantık
- Parçacık sürü algoritması,

Meta-sezgisel algoritmaların en büyük üstünlüğü, pratik olmaları, uygulama problemleri için daha az karmaşık olmaları, problem boyutunun problem karmaşıklığı ile doğrudan ilişkili olmaması ve hızlı bir şekilde kabul edilebilir sonuçlar vermeleridir. Bu algoritmaların birçoğunda rassallık etkisi görülür. Rassallık etkisi sayesinde, arama yapılırken bir yerel noktadan başka bir noktaya ani bir geçiş yapılabilir. Bu ani geçiş, büyük bir arama bölgesindeki bütünsel arama için önemli bir üstünlüktür.

Bu algoritmaların çoğu, bir başlangıç çözümü veya çözüm kümesi ile çalışmaya başlar. Daha sonra bir durdurma ölçütüne kadar bu başlangıç çözümü tekrarlı olarak iyileştirilerek sonuca ulaşır.

Genetik algoritmalar: İlk kez Holland (1975) tarafından önerilen genetik algoritmalar, evrim teorisine dayalı, güçlü ve yaygın bir kullanıma sahip sezgisel algoritmalardandır. Temeli doğal genetik bilimine dayanan ve zor problemlerin çözümü için sıklıkla tercih edilen bu yöntem etkili bir yaklaşım sunar.

Bir genetik algoritma yaklaşımı kullanılmadan önce, gen, kromozom ve popülasyon gibi kavramların çok iyi bilinmesi gereklidir. Çünkü 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.

Tavlama benzetimi: Tavlama benzetimini eniyileme problemlerine ilk uygulayan 1983 yılında Kirkpatrick, Gelatt ve Vecchi olmuştur (Kirkpatrick vd., 1983). Bazı

yaklaşımların zayıf yönü arama sırasında bir yerel en iyiye takılmalarıdır. Tavlama Benzetimi ise yerel en iyilerden kurtulabilecek mekanizmalara sahiptir. Yavaş bir soğutma işlemi ve yeterli rassallık sağlandığında, Tavlama Benzetimi ile aramalar bütünsel en iyi noktaya yaklaşmaktadır (Yang, 2008). Rassal arama ile en iyi değere yaklaşmayı sağlayan tavlama benzetimi, NP-Zor problemlerin çözümünde sıklıkla kullanılmaktadır.

Tabu Arama: Tabu Arama 1970'de Glover tarafından geliştirilen bir yöntemdir. Hafıza ve arama geçmişi, yöntemin bileşenleri arasında yer alır. Arama temeline dayanan birçok başarılı algoritma, hafıza yöntemini kullanmamaktadır, bunun nedeni, öncelikle hafızanın arama etkinliği üzerindeki başarısının nasıl olacağının bilinmemesidir. Bu yüzden hafıza kullanılmış olsa dahi çözümde gelişim görülemeyebilir; çünkü hafızanın ortaya koyduğu serbestlik derecesi çok fazla olmaktadır. Özellikle uyarlamalı hafıza kullanımında kararlı ve etkili çözümler bulan algoritmaların geliştirilmesi ise, neredeyse imkânsızdır.

Tabu arama, yoğun olarak yerel arama yapan bir algoritmadır ve döngüden kurtulmak için de hafıza yöntemini kullanır. Eldeki sonuçlar ve önceki aramalardan elde edilen sonuçlar yasak listesinde tutulur, yapılacak olan yeni arama bu listedekiler dışından olmalıdır. Tabu Aramada yer alan liste, yöntemin en önemli bileşenidir, geçmiş ve şimdiki arama hareketleri bu listede tutulduğundan yeni arama hareketi listeden olmamalıdır, böylece algoritma aynı işlemleri yapmaktan kaçınır. Algoritma çok sayıda tekrar yaparsa, liste sayesinde arama yapmak için geçen hesaplama süresinden önemli ölçüde kar edilecektir (Yang, 2008).

Karınca Kolonisi: Adından da anlaşılacağı üzere bu yöntem birlikte yaşayan karınca kolonilerinden esinlenilerek 1992 yılında Dorigo tarafından ortaya atılmıştır (Colorni vd., 1992). Karıncalar yiyecek arama sırasında birbirleri ile etkileşim içindedir. İletişim, her karıncanın bıraktığı bir koku veya feromon adı verilen kimyasal maddeye göre yapılmaktadır. Kendi bölgesinde arama yapan karınca etrafa feromon yaydığında, ondan sonra gelen karıncalar bu feromonu dikkate alarak bir öncekinin izlediği rotayı izler. Yiyecek arama sıklaştıkça etraftaki feromon miktarı da yoğunlaşır ve karıncalar yoğun olan feromon miktarına göre aramalarını sürdürür. Karınca sayısında artış olduğunda aynı yoldaki feromon miktarı aratacağından, bu yol en etkili ve kısa yol olacaktır. Bu yöntem geriye bilgi akışı sayesinde avantajlı bir strateji haline gelmektedir. Karınca özelliklerine bazı eklemeler

yapılarak yöntem çok daha etkili hale getirilebilir. Bu yöntemdeki en önemli konu, rotanın seçilme olasılığı ve feromon miktarındaki buharlaşma oranıdır (Yang, 2008). Islier (2005) ve Solimanpur vd. (2010), hücresel üretim problemlerinin çözümü için Karınca Kolonilerini kullanmıştır.

Yapay Sinir Ağları: Yapay sinir ağları, modelleme ve kontrol gibi birçok alandaki problem çözümü için başarıyla kullanılmış bir yapay zekâ yöntemidir. Yapay sinir ağları, biyolojik sinir ağlarından esinlenilerek geliştirilmiş modellenebilen ve öğrenebilen algoritmaya sahip sistemlerdir ve sinir hücrelerinin birbirleri ile bağlanma şekillerini temel alan bir yapıya sahiptirler. Katmanlar şeklinde olan bu yapay sinir hücrelerinin en belirgin özellikleri, birbirine bağlı nöronlar, bağlantılar arasındaki ağırlıklar ve aktivasyon fonksiyonudur. Yapay sinir ağları, problemlere hızlı ve zeki çözüm sağlamaları, az veriyle genelleme yapabilmeleri, öğrenebilmeleri ve çeşitli tipteki problemlere kolaylıkla uyarlanabilmelerinden dolayı birçok problemin çözümünde kullanılmışlardır.

Yöntemin geçmişi 1942 yılına kadar gitmektedir. Yapay sinir ağlarını oluşturan her nöronun bir iç hali vardır. Bu iç hale aktivasyon veya aktivasyon seviyesi denilir. Bu seviye, gelen girdileri tanımlayan bir fonksiyondur. Ağ içerisinde bir nöron aynı doğal nöronların yaptığı gibi diğer nöronlara bir işaret (sinyal gönderir). Nöronlar bir seferde tek bir işaret gönderebilirler. Gönderilen sinyaller gönderilen nöronlar için giriş fonksiyonlarını oluşturur. Nöronlar aynı anda birden fazla nörona sinyal gönderebilmektedir.

Chung ve Kusiak (1994) çalışmalarında, parçaların gruplanması için sinir ağı yaklaşımını kullanmışlardır. Burke ve Kamal (1995) çalışmalarında, hücresel imalatta hücre oluşturma problemleri için bir adaptif rezonans teorisi yapay ağı (adaptive resonance theory-ART-neural network) uygulaması sunmuşlardır. Kuo vd. (2006), parçaları gruplamak için bulanık mantık ve ART2 sinir ağını uyarlayan bir yaklaşım sunmuşlardır.

Bulanık Mantık: Yapay zekâ yöntemlerinden belki de en geniş çaplı ve en çok kullanılanı bulanık mantıktır. Zadeh (1965) tarafından geliştirilen bulanık mantık (fuzzy logic), belirsizliği karar modellerine uyarlayabilen bir yaklaşımdır (Narayanaswamy vd., 1996). Kesin sınırların bulunmadığı parça veya makine gruplandırma problemleri için bulanık mantık iyi bir araçtır (Narayanaswamy vd., 1996). 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 hücresel üretim sistemleri için sıkça kullanılmaktadır.

Parçacık sürü algoritması: Bu yaklaşım (PSO) Eberhart ve Kennedy (1995) tarafından geliştirilen, balık ve kuş sürülerinin doğadaki davranışlarını temel alan bir yöntemdir. PSO'nun genetik algoritmalar ve karınca kolonileri ile birçok ortak yönü olmasına rağmen mutasyon, çaprazlama, feromon gibi işçileri içinde barındırmadığından uygulaması çok daha kolay olmaktadır. Reel sayıları kullanabilme yeteneği ve sürüdeki parçacıkların bütünsel en iyi ile etkileşim içinde olmalarından dolayı herhangi bir kodlama yöntemine başvurulmamaktadır. Bu algoritma arama uzayındaki hareketini amaç fonksiyonuna ve parçacık adı verilen sürü içindeki bireylerin yörüngelerine bağlı olarak yapar. Algoritmada parçacıkların hareketleri yarı rassal bir davranış sergileyen vektörler doğrultusunda olmaktadır. Parçacık hareketi iki önemli bileşene sahiptir: Rassal ve deterministik bileşen. Parçacık hareketini o andaki bütünsel en iyi konumuna doğru rassal olarak yapar. Eğer parçacık daha önce bulduğu bir değer bulursa, konumunu o andaki yere göre günceller. Bütünsel en iyi değere ulaşmak için parçacıkların kendi en iyi konumu ve tüm parçacıklar içindeki en iyi konum birlikte kullanılır. Bu işlemler, algoritmada tanımlanan sonlandırma adımına kadar tekrar eder (Yang, 2008).

2.1.4 Kübik hücre oluşturma problemi

Başarılı bir hücresel üretim sistemi uygulaması için üretim hücrelerine ait dikkate alınması gereken dört temel unsur; insan, donanım, malzeme ve işlemdir (Bidanda vd., 2005). Literatürdeki çalışmalar genellikle son üç unsuru göz önüne alarak, parçaların üretimi için gerekli olan işlemler, bu işlemlerin gerçekleştirildiği makinalar ve işlem sıraları, üretilen parçaların talep miktarları, üretim parti büyüklükleri, hazırlık ve işlem süreleri, alternatif rota gibi birçok özellik üzerinde durmaktadır. Oysa hücresel imalat sistemlerinin tasarımında; insan unsuru, donanım kullanımı için "teknik beceriler" ve takım çalışmasına uyum sağlama, problem çözebilme, karar verebilme yeteneği gibi detaylandırılabilecek "kişisel beceriler" ile bunlara bağlı maliyetler, diğer üç unsura ait özelliklerle birlikte dikkate alınmalıdır. Bu unsurların tamamını dikkate alan hücre oluşturma problemi, kübik hücre oluşturma problemi olarak isimlendirilmektedir.

Klasik (insan unsurunu dikkate almayan) hücre oluşturma probleminin girdisi genellikle 0-1 parça-makine temas matrisidir (iki boyutlu). Parça-makine temas matrisi $A = [a_{ij}]$, P parça sayısı ve M makine sayısı iken elemanları 0 veya 1 olan PxM boyutlu bir matristir. Bu matrisin sıfır olan elemanları $a_{ij} = 0$, i. parçanın j. makinede işlemi olmadığını; bir olan elemanları da $a_{ij} = 1$, i. parçanın j. makinede işlemi bulunduğunu gösterir. Şekil 2.5. iki boyutlu hücre oluşturma problemi için örnek bir temas matrisi ve çözümünü göstermektedir. Verilen üç hücreli çözümde hücre dışında kalan 1'ler hücre dışı eleman ve hücre içindeki 0'lar boşluk olarak isimlendirilmektedir. Amaç, hücre dışı eleman ve boşluklarının toplamın en küçüklenmesidir.

	M1	**M2**	**M3**	**M4**
P1	0	0	1	0
P2	1	0	0	0
P3	0	1	0	1
P4	0	0	1	0
P5	0	1	1	1
P6	1	0	0	0

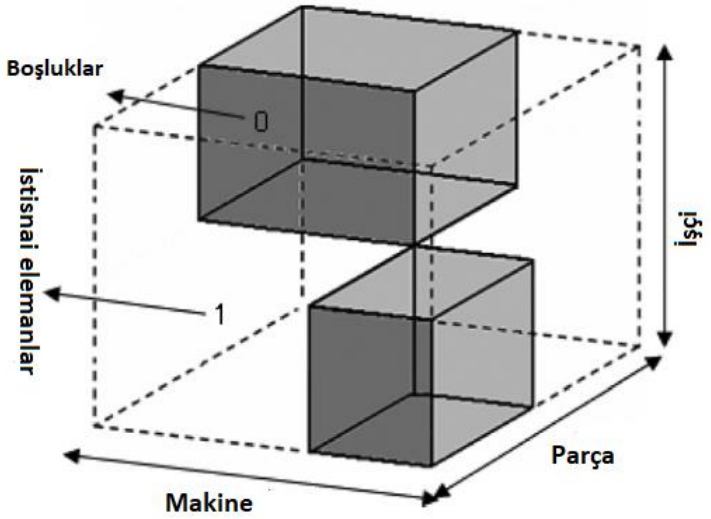
(a)

	M4	**M2**	**M3**	**M1**
P3	1	1	0	0
P5	1	1	1	0
P1	0	0	1	0
P4	0	0	1	0
P2	0	0	0	1
P6	0	0	0	1

(b)

Şekil 2.5. İki boyutlu hücre oluşturma problemi: (a) 0-1 temas matrisi (b) Köşegenleştirilmiş matris

Kübik hücre oluşturma probleminde, üç boyutlu parça-makina-işçi temas matrisi $R = [r_{imw}]$ dikkate alınmaktadır. R matrisi, P parça sayısı, M makine sayısı ve W işçi sayısı iken elemanları 0 veya 1 olan PxMxW boyutlu bir matristir. Matrisin elemanı r_{imw}, eğer parça i, makine j'de işçi w ile işlenebiliyorsa 1, diğer durumda 0 değerini almaktadır.



Şekil 2.6. Üç boyutlu hücre oluşturma problemi (Mahdavi vd., 2012)

Şekil 2.6'da görülebileceği gibi üç boyutlu uzayda 0'lar boşluk, 1'ler hücre dışı eleman olarak adlandırılmaktadır. Çözümde çok fazla boşluğun olması, hücrenin kullanım oranının düşük olmasına sebep olur. Çözümdeki hücre dışı elemanlar ise parçanın işlem göreceği makinanın ya da parçayı işleyecek işçinin başka bir hücrede olması durumlarında ortaya çıkacaktır.

Mahdavi vd. (2012) parçaları makinelerde şekillendirme konusundaki önemli rolleri nedeniyle işçileri üçüncü boyut olarak ele almıştır. Gerçek bir fabrika ortamında, daha yüksek verimlilik için sadece makineleri ve parçaları gruplamak yetmez; işçilerin de atanması üretim kaynaklarının verimli kullanımı açısından önemli bir yere sahiptir. Üretkenliğin artırılmasının bir yolu uygun işçiye uygun makinelerle uygun parçaları yaptırmaktır. İşçileri de dikkate alan üç boyutlu hücre oluşturma problemi ilk olarak Min ve Shin (1993) tarafından ortaya atılmış ve işçi, üçüncü faktör olarak parça ve makine temas matrisine yerleştirilmiştir. Li (2003), tüm temas matrislerini aynı anda dikkate alan bir yöntem önermiştir. Mahdavi vd. (2010), işçi atama esnekliğini göz önüne alan dinamik bir ortamda hücresel imalat sistemlerinin tasarımı için bir tam sayılı matematiksel programlama modeli sunmuştur. Bu modelin amaçları, elde tutma ve bekleyen sipariş maliyetlerini, hücrelerarası taşıma maliyetlerini, makine ve yeniden düzenleme maliyetleri ve işe alma, atma ve maaş giderlerini en aza indirmektir. Mahdavi vd. (2012) hücre oluşturma problemini çözmüş ve küçük boyutlu örnekler için üç boyutlu (kübik) makine-parça-işçi temas

matrisindeki boşluk ve hücre dışı eleman sayısını en aza indirgemiştir. Nikoofarid ve Aalaei (2012), makine kapasitesini, talebi ve ürün karması ile çok dönemli planlama ufkunu göz önüne alan, dinamik bir sanal ortamda üretim planlaması için bir matematik model önermiştir. Bu modelin başlıca kısıtları, tüm dönemlerdeki talep tatmini, makine uygunluğu, makine zamanı kapasitesi ve işçilerin uygunluğudur. Bu modelin amacı, planlama ufku boyunca elde tutma ve bekleyen sipariş maliyetlerini en aza indirmektir. Aalaei (2013), en verimli seçeneği belirlemek için veri zarflama analizini kullanarak yeni bir matematiksel model önermiştir. Amaç, bekleyen sipariş ve hücrelerarası taşıma maliyetlerini en aza indirmektir. Bootaki vd. (2014), hücreler arası hareketleri enküçükleyip parça kalite indekslerinin toplamını enbüyüklerken işçi yeteneğinin ürün kalitesi üzerine olan etkisini de araştırmıştır. Buruk Şahin ve Alpay (2016) kübik (parça-makine-işçi) hücre oluşturma probleminin çözümü için bir genetik algoritma önermiştir.

Min ve Shin (1993)bu konuda şöyle demektedir:

> "Hücresel üretim, insan ve makine hücreleri aynı anda oluşturulmadıkça başarılı olmayacaktır. Parça benzerliklerinin enbüyüklenmesi, toplam üretkenliğin enbüyüklenmesi, toplam darboğaz maliyetinin enküçüklenmesi, hücrelerarası taşıma maliyetinin enküçüklenmesi gibi tek amaçlı yaklaşımlar yerine çok amaçlı yaklaşımlara ihtiyaç vardır."

Bidanda vd. (2005) bu konuda söyle demektedir:

> "Hücresel üretim popüler bir araştırma alanı iken, hücresel imalata yönelik makalelerin tek eksiği insan unsurudur. Bunun çeşitli nedenleri vardır, bunlardan en önemlisi insan faktörünün sayısal olarak ifade edilmesinin güçlüğüdür. Hem teknik hem de insani yeteneklerine bağlı olarak işçi atama alanında araştırma yapılmadığı görülmektedir"

Bu nedenle bu çalışmada kübik hücre oluşturma problemi ele alınmıştır.

2.2. Sürü Zekâsına Dayalı Optimizasyon Algoritmaları

Kuş sürülerinin havadaki süzülmeleri ve uçma şekilleri, karıncaların yiyecek arama davranışları, balık sürülerinin grup halinde yüzmeleri ve kaçmaları, bal arılarının danslarla haberleşmesi gibi sürü olarak gerçekleştirilen davranışların keşfedilmesi ile biyologlar ve yazılım uzmanları bu sürülerin davranışları ve davranışlarının modellenmesi üzerine araştırmalar yapmaya başlamışlardır. Bu çalışmalar, sürülerin davranışlarının sistem ve

modellere uyarlandığı yaklaşımların geliştirilmesine yol açmıştır. Sürü zekâsı yaklaşımları adı verilen bu yaklaşımlar en iyileme problemlerinde gösterdikleri başarılar ile oldukça ilgi çekmekte ve bu konu üzerine yapılan çalışmaların sayısı gün geçtikçe artmaktadır. Sürü zekâsı, kısaca özerk yapıdaki basit bireyler grubunun üst düzeyde bir ortak zekâ geliştirmesi şeklinde tanımlanabilir (Akay ve Karaboga, 2012).

2.2.1. Sürü zekâsı

Sürü zekâsı; arılar, karıncalar, kuşlar, termitler, balık sürüleri, gibi aralarında etkileşim bulunmakta olan hayvanların topluluklar şeklindeki hareketlerini inceleyen ve bunun sonucunda problemlere çözüm üretmeyi amaçlayan bir yapay zekâ tekniğidir. Karıncaların geçmiş oldukları yollara kimyasal madde bırakarak diğer karıncalara bilgi iletmeleri, kuş ve balık sürülerinin hareket ederken konum ve hızlarını birbirlerine göre ayarlayarak ilerlemeleri, arı kolonilerinin kovan etrafında yaptığı salınım hareketi ile birbirlerine bilgi paylaşmaları sürü zekâsının ortaya çıkmasında temel alınan zeki davranışlardır (Karaboga ve Akay, 2007).

Sürü içindeki bireylerin kendi kendine örgütlenebilmesi sistemin temel özelliğidir. Kendi kendine örgütlenme, sistemdeki bireylerin diğer bireylerden aldığı bilgileri kullanarak kendi başına görevlerini yerine getirmesi ve bu görev ile sistemi etkilemesi şeklinde tanımlanabilir. Bonabeau vd. (1999) kendi kendine örgütlenmenin ayırıcı niteliğini şu dört özellikle ortaya koymaktadır:

1. **Pozitif geri bildirim**: Elverişli durumların oluşmasını destekleyen davranışsal kurallar sayesinde oluşur. Pozitif geri bildirime, arıların dans etmeleri ile birlikte diğer arıların bir işe yönlendirilmeleri örnek verilebilir.
2. **Negatif geri bildirim**: Sürünün birlikte uyumlu şekilde hareketlerini sağlamak için pozitif geri bildirimi dengeler nitelikte çalışan kurallar ile ortaya çıkmaktadır. Herhangi bir yiyecek tüketiminde, iş konusunda ve benzeri durumlarda doyuma gitmeyi önlemek için bu mekanizma gerekmektedir.
3. **Dalgalanmalar**: Bireylerin yanlışları, yapılan işi değiştirmeleri yeni çözümlerin bulunmasını sağladığından yaratıcılık ve yenilik açısından önem taşımaktadır.
4. **Çoklu etkileşimler**: Herhangi bir sürüdeki bazı bireyler arasında bilgi alışverişi sürü içerisinde bilgi alışverişi de sağlar.

Arı algoritması, bal arısı sürülerinin zeki davranışları, özellikle de yiyecek ararken kullandıkları yöntemler örnek alınarak oluşturulmuş bir en iyileme algoritmasıdır. Sürü zekâsına dayanan bu algoritma, sürü halinde hareket eden arıların besin bulmak için yaptıkları davranışları temel alarak en iyileme problemlerini çözmek için kullanılmaktadır.

2.2.2. Arılarda sürü yapısı

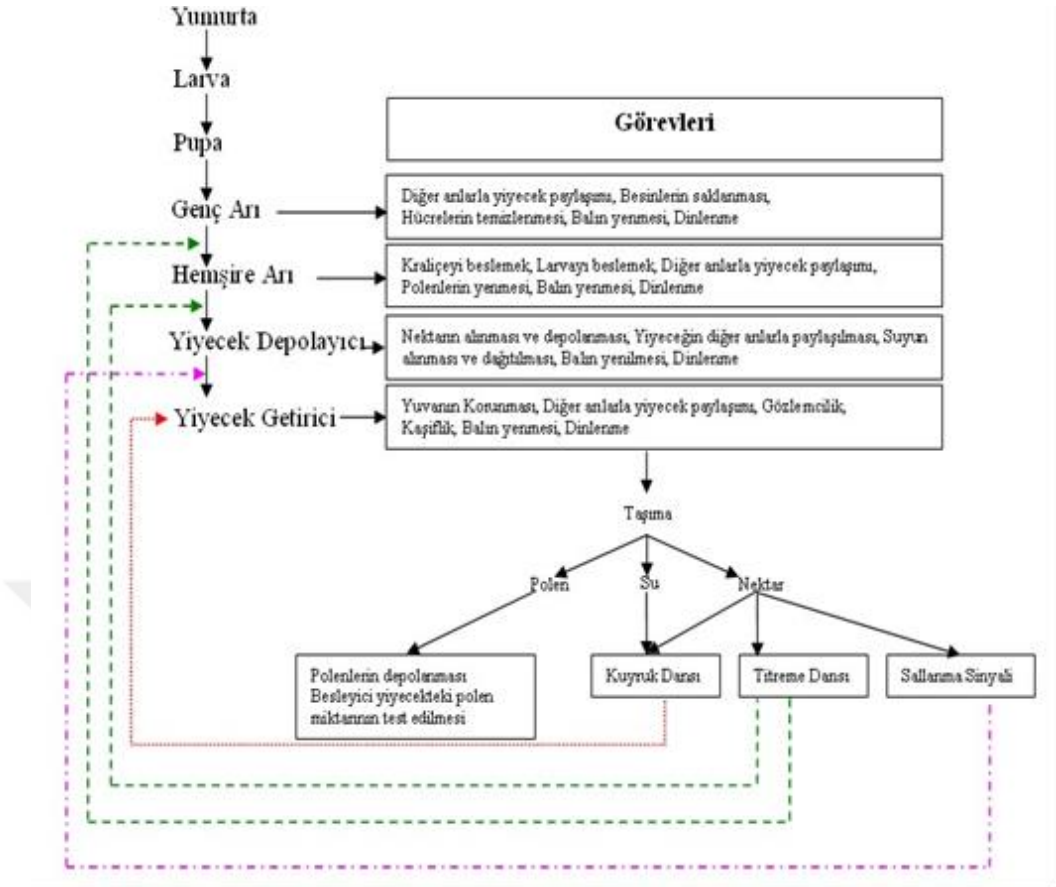
Doğadaki arı türlerine bakılacak olunursa, bal arılarının içgüdüleri yardımı ile bir sosyal düzenin içinde yaşadıkları görülür ve yaşamlarını bu sosyal düzendeki kurallara uyarak sürdürürler. Kovanda bulunan her bir arının yerine getirmesi gereken görevler bellidir. Arılar kendilerine verilmiş olan bu görevlerin ve sorumlulukların dışına asla çıkmazlar. Yiyecek arama, nektar getirme, yiyeceklerin depolanması ve iletişim gibi görevler, arıların sosyal düzen içerisindeki sorumluluklardandır. Bu müthiş düzen ve denge, araştırmacıların ilgisini çekerek arıların bu davranışlarını modellemeye sevk etmiştir. Kolonilerde yaşamakta olan arılar üç farklı sınıfa ayrılabilir. Bunlar:

- **Kraliçe Arı** (Queen Bee): Her kovanda yalnızca bir adet kraliçe arı bulunmaktadır. Kraliçe arı diğer dişilere göre daha büyüktür. Kraliçe arının ana görevi yumurtlamaktır. Üremenin asıl kaynağı kraliçe arıdır, kraliçe arı dışında hiçbir dişi arı erkek arılar ile çiftleşme gerçekleştiremez. Kraliçe arı çiftleşme dönemi sonrasında depolamış olduğu spermleri iki yıl boyunca yumurtlamak için kullanabilir. Yumurtlama görevi dışında, kovandaki sistemin devamlılığını ve koloninin bütünlüğünü sağlayan önemli hormonlar da salgılar. Salgılanan bu hormonu diğer bütün arılar bilmektedir. Kraliçe arının salgıladığı bu hormon kovandaki bütün arılara ulaşmaktadır. Sürü içerisindeki yabancı bir arı bu salgılanan maddeler sayesinde kolayca fark edilir. Bu şekilde kraliçe arı kolonisinin bütünlüğünü sağlar.
- **Erkek Arılar** (Drones): Bu arıların görevi kolonide kraliçe arının döllenmesinin sağlanmasıdır. Fiziksel boyutları dişi arılardan fazladır. Fakat erkek arıların iğneleri ve yiyecek toplayabilecek organları bulunmamaktadır.
- **İşçi Arılar** (Workers): İşçi arılar bir arı kolonisinin sayısal çoğunluğunu oluştururlar. İşçi arılar döllenmiş yumurtalardan çıkan ve üreme yetenekleri bulunmayan dişi arılardır. İşçi arılar koloninin sürekliliğinin sağlanması için gerekli olan her türlü yeteneklere sahiptirler. İşçi arılar iş bölümü gerçekleştirerek çeşitli işleri düzenli bir

şekilde yerine getirirler. Yine işçi arılar yiyecek toplamak ve bunları depolamak, kovanın temizliğini sağlamak, larvalar ve diğer arıların beslenmesi gibi birçok görevi yürütürler.

2.2.3. Arılarda görev paylaşımı

Görev Paylaşımı (Task Selection): Bal arılarının kolonisinde çok sayıdaki iş için uygun sayıda bireyin işlere dağıtılması gerekmektedir. Bir arının gelişmesi, kraliçe arının yumurtlaması ile başlar. Yumurta bir süre sonra larva ve pupaya dönüşür. Yumurta ve larva sürecinde arıların beslenme yöntemleri besin alanından çıktıktan sonraki görevlerinin belirlenmesinde önemlidir. Larva beslenirken hemşire arılar tarafından larvalara verilen arı sütünün zamanına göre ya kraliçe arı ya da dişi bir arı olunacaktır. Bu sürecin ardından yumurtadan çıkan arı kendisi için belirlenen görevleri yapmak üzere hayatına başlayacaktır. Yetişkin arılar yuva çıkışında yer alırken, genç arılar ve hemşire arılar beslenme alanında görevlerini yerine getirirler. Yumurtadan çıkıp yetişkin birey oluncaya kadar geçen sürede her arının besleme, depolama, bal ve polenleri toplama ve dağıtma, iletişim ve besin arama gibi görevleri vardır. Belli bir zamanda arının hangi görevi yerine getireceği o anki davranışsal rolüne, çevreden topladığı verilere ve bu verilerin işaret ettiği tepki eşiğine bağlıdır. Şekil 2.7.'de arıların görev paylaşımı verilmiştir (Akay, 2009)



Şekil 2.7. Arılarda görev dağılımı (Akay, 2009)

2.2.4. Arıların yem bulma davranışları

Arı kolonisinin yaşamının sürdürülebilmesi için en önemli işlerden birisi yiyecek aramadır. Kovan içinde biriktirilen kaynaklar ve ortamdaki yiyecek kaynakları ve arıların etkileşimleri bu süreçteki önemli etkenlerdir.

Arının kovandan ayrılmasının ardından, arama süreci ilk olarak rastgele yapılan yiyecek araştırmaları ile başlar. Bulunan kaynaktaki yiyecek miktarının azalması sonrasında arılar yeni yiyecekler aramaya ya da diğer arılardan aldığı bilgiler doğrultusunda başka kaynaklara yönelmeye başlarlar. Bulunan kaynakların bilgilerinin arılarca birbirine iletilmesi ve bulunan polen, su vb. kaynakların kovana getirilmesi bu sürecin parçalarıdır.

Tereshko'nun öngördüğü yiyecek arama modelinde yer alan üç temel öğe vardır. Bunlar: yiyecek kaynakları (Food Sources), görevli arayıcılar (Employed Foragers:), görevi belli olmayan arayıcılar (Unemployed Foragers) dır (Tereshko ve Loengarov, 2005). Akay çalışmasında bu öğeleri aşağıdaki gibi açıklamıştır (Akay, 2009).

Yiyecek Kaynakları: Arıların yiyecek aradığı kaynaklardır. Bir yiyecek kaynağının değeri, kaynağın türü, kovana olan mesafesi, yiyecek miktarı veya nektara ulaşma zorluğu gibi birçok faktöre bağlı olmasına rağmen basitlik açısından sadece kaynağın zenginliği tek bir ölçüt olarak alınabilir.

Görevi Belirli İşçi Arılar: Bu işçi arılar daha önceden belli olan kaynaklardan toplanan yemin yuvaya getirilmesi ile görevlendirilmişlerdir. Bir diğer görevleri ise gittikleri kaynağın konum ve kalite bilgilerini kovandaki diğer arılarla aktarmaktır.

Görevi Belirli Olmayan İşçi Arılar: Bu arılar yem toplanabilecek kaynakları aramaya çalışmaktadırlar. Görevi belli olmayan iki çeşit işçi arı vardır. Bunlar rastgele kaynak arayan **kâşif** arılar, kovanda bekleyen ve görevli arılardan gelen bilgilere göre yeni kaynaklara yönelen **gözcü** arılardır.

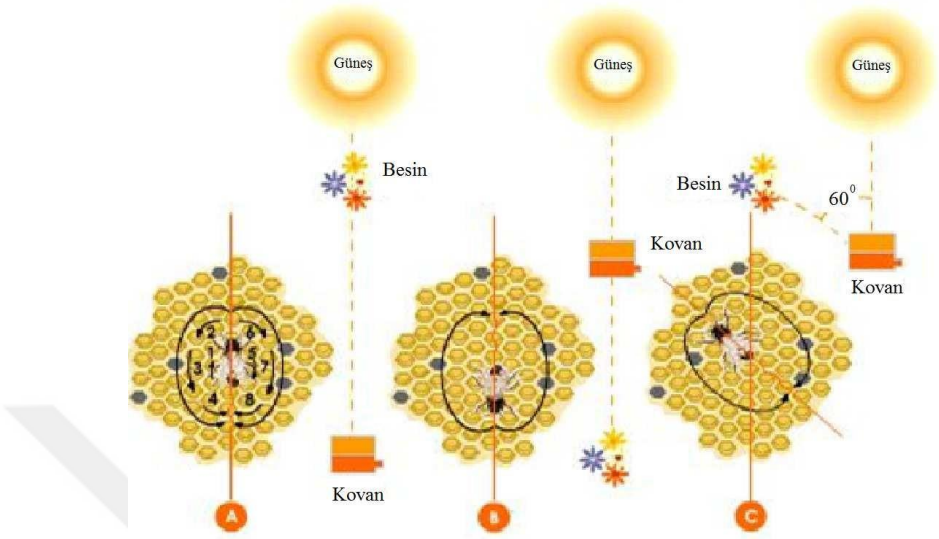
Arılar arasındaki bilginin iletilmesi, sürü yapısının ve ortak bilginin oluşmasındaki en önemli şarttır. Arıların yaşam alanı olan kovan bazı bölümlere ayrılabilir. Bu alanlardan biri de bilgi paylaşımının gerçekleştiği dans alanı (dancing area) olarak adlandırılan alandır. Arılar arasında bilgi paylaşımı arıların yapmış olduğu dansla (waggle dance) olur. Paylaşılan bilgi ile yeni ve kaliteli yiyecek kaynakları keşfedilir (Grüter ve Farina, 2009).

Kaynaklardan yiyecek getiren arıların, diğer arıları bu kaynaklara göndermek için kaynağın konum bilgisini onlarla ile paylaşması gerekir. Konumla ilgili bilgiyi alan arı bu hedefi bulmak için güneş ışığından yararlanır. Yörüngeleri ile güneş arasındaki açıyı ölçebilirler. Enerji tüketimine göre uzaklık belirleyen arılar, yüklerine göre farklı yükseklikte uçarak enerjilerini ayarlamaktadırlar (Akay, 2009).

2.2.5 Arı dansı

Bir bal arısı kovandan 12 kilometre uzağa kadar nektar aramak için gidebilir fakat bu mesafe genellikle 3 km'yi geçmez. Eğer bir kâşif arı çiçeklerde nektar keşfederse, bu nektarı alır, kovana götürür ve gerekli yere depo ettikten sonra "sallanma dansı" (Waggle Dance) ile nektarın bulduğu yeri izleyici arılara iletir (Karaboga, 2005; Karaboga ve Basturk, 2008).

Şekil 2.8.'de bir kovan, üç gıda kaynağı ve bu gıda kaynağını keşfeden arılar tarafından gerçekleştirilen sallanma dansı şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.8. Bal arılarının sallanma dansı (Waggle Dance)(Sevim, 2013)

Sekiz rakamına benzeyen sallanma dansı, kovandaki arılara üç önemli bilginin iletilmesini sağlar. Bunlar;

1. Sekize benzeyen şeklin ortasındaki düz çizgi besin kaynağının yönünü,
2. Sekize benzeyen şeklin ortasındaki düz çizginin uzunluğu besin kaynağının kovandan ne kadar uzakta olduğunu,
3. Sekize benzeyen şeklin ortasındaki düz çizginin alındığı süre ise nektar kalitesi hakkında bilgi verir.

Dans eden arıları izleyen diğer arılara izleyiciler (onlookers) denir. Bu izleyici arıların bazıları dans ederek bilgi veren arıları takip ederken, bazıları da bunları izlemeden kendi bildikleri yöne doğru giderler. Diğer arıları takip etmeden kendi istedikleri yönde giden arılara izci arı (scout bee) denir. Kovanda nektar arayan bir arı aşağıdaki yolların birini izlemektedir.

1. En son keşfettiği besin kaynağını terk ederek yeni bir besin kaynağı arar,
2. En son keşfettiği bir besin kaynağına tekrar gider,
3. En son keşfettiği besin kaynağına dönmeden önce kovandaki diğer arıları bilgilendirmek için sallanma dansı yapar.

Her arı nektarın kaynağındaki miktarına bağlı olarak yukarıdaki seçeneklerden birini takip eder. Bir arı belirli bir miktarından fazla nektar kaynağı bulursa, o arı üçüncü seçeneği uygular. Eğer besin kaynağındaki nektar orta seviyede ise, arı kovandaki arılara besin kaynağının yerini haber vermeden tekrar aynı besin kaynağına kendisi geri döner. Eğer arı üçüncü ve ikinci yolu uygulamayacaksa bu durumda ilk yolu izleyerek yeni nektar kaynaklarını aramaya devam eder (Karaboga ve Basturk, 2008).

2.2.6 Arı Algoritması

Arı Algoritması(AA) popülasyon tabanlı bir arama algoritması olup sürü zekâsına dayalı meta sezgisel yöntemlerden birisidir. Arı Algoritması arıların yiyecek arama davranışlarını modellenmesine dayanmakta olup literatürde genellikle sürekli optimizasyon problemlerinin çözümünde kullanılmıştır. AA'nın çalışma ilkesi ve temel yapısı ilk kez Pham vd. (2006b) tarafından önerilmiş olup çok boyutlu sayısal test fonksiyonları üzerinde algoritmanın etkinliği ve sağlamlığı incelenmiştir. Çalışmalardan elde edilen sonuçlar simpleks yöntemi, tavlama benzetimi algoritması, genetik algoritma ve karınca koloni optimizasyonu algoritmaları ile karşılaştırılmıştır. AA genel olarak çözüm hızı ve sonuçlar açısından diğer tekniklerden daha üstün performans göstermiştir.

AA geliştiricileri tarafından birçok alana uygulanmıştır. İlk olarak Pham ve arkadaşları ahşap kaplama levhalarındaki kusurların belirlenmesinde AA ile yapay sinir ağlarını optimize etmişlerdir (Pham vd., 2006e). Bu çalışmada arılar nöronlar arasındaki bağlantılara yerleştirilmiş olup ağırlıkların optimum değerini aramaktadır. Yapay sinir ağındaki ağırlıkların optimizasyonu için geri yayılım algoritması yerine kullanılan AA'nın amacı en küçük hata fonksiyonu değerine sahip arıyı bulmaktır. Elde edilen deneysel çalışma sonuçları geri yayılım ve en küçük uzaklık sınıflandırıcı algoritmaları ile karşılaştırılmış ve AA'nın doğru sonuçlara daha hızlı ulaştığı belirtilmiştir (Packianather ve Drake, 2005). Benzer şekilde Pham çok katmanlı algılayıcı ağlarının eğitiminde (Pham vd., 2006c), istatistiksel süreç kontrolünde kullanılan kontrol grafiklerinde örüntü tanıma için radyal temel fonksiyon ağının eğitiminde (Pham vd., 2006a) ve kontrol grafiklerinde örüntü tanıma için öğrenen vektör nicelendirme ağının eğitiminde (Pham vd., 2006d) AA algoritmasını kullanmış ve geri yayılım algoritmasına göre daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.

AA'nın diğer uygulama alanlarından bazıları ise hücre oluşturma problemi (Pham vd., 2007a), tek makinede çizelgeleme problemi (Pham vd., 2007c), bulanık mantık kontrolörlerinin ayarlanması (Pham vd., 2007b), veri sınıflandırma (Pham vd., 2007d), montaj planlama problemi (Pham vd., 2007e), bulanık kümeleme (Pham vd., 2008a) olarak karşımıza çıkmaktadır.

AA'nın farklı uyarlamalarına bakacak olursak Pham ve Darwish (2008) orijinal AA'ndaki kontrol parametresi sayısını indirgemeye yönelik olarak bulanık açgözlü seçim mekanizmasını kullanmışlardır. Geliştirilen algoritma ile Arı parametrelerinin kullanıcı tarafından belirlenmesi yerine, önerilen mekanizma ile bu parametre değerleri otomatik olarak seçilmektedir. Pham vd. (2008c) kimya mühendisliği alanında dinamik optimizasyon problemlerinin çözümü için orijinal AA'ndaki rastgele aramayı tamamlayacak şekilde mutasyon, sünme, çaprazlama, ara değerleme ve dış değerleme operatörlerini algoritmaya dâhil etmişlerdir. Önerilen algoritma karınca koloni optimizasyonu algoritması ile karşılaştırılmış ve önerilen algoritmanın daha üstün performans gösterdiği belirtilmiştir. Pham ve Sholedolu (2008) parçacık sürü optimizasyonu algoritmasının erken yakınsama problemini çözebilmek için ilgili algoritmaya AA'nı da dâhil ederek melez bir yapı geliştirmişler ve önerilen algoritmayı çok katmanlı yapay sinir ağlarının eğitiminde kullanmışlardır. Deterministik problemlerin AA ile çözümde tek değerlendirme ve sabit uygunluk değeri yeterli iken, stokastik optimizasyon problemlerinde aynı noktada çok sayıda deneme ve ortalama bir uygunluk değeri hesaplaması gerekmektedir. Bu bilgiden hareketle Pham vd. (2008b) stokastik optimizasyon problemlerinin çözümü için AA'na yeni bir uygunluk değerlendirme mekanizması eklemişlerdir. Bu mekanizma ile her arı için tek bir denemedeki uygunluk değeri yerine birçok deneme sonucunda elde edilen uygunluk değerlerinin ortalaması kullanılmıştır. Pham ve Castellani (2009) AA'na araştırma hızını ve doğruluğu artıracak iki prosedür eklemişlerdir. Bunlardan ilki komşuluk arama boyutunun uyarlanır hâle getirilmesidir. Bu mekanizma, yerel arama ile daha iyi uygunluk değerleri elde edildiğinde komşuluk boyutunun sabit tutulmasına, uygunluk değerlerinde bir gelişme olmadığında ise komşuluk boyutunun azaltılmasına dayanmaktadır. AA'nda ikinci iyileştirme ise bir çözüm belirli bir tekrar boyunca geliştirilemediğinde rastgele oluşturulan yeni bir çözümle değiştirilmesini içermektedir. Önerilen algoritmanın etkinliği farklı karmaşıklık derecelerine sahip fonksiyon optimizasyon problemleri üzerinde evrimsel

algoritma, parçacık sürü optimizasyonu ve yapay arı kolonisi algoritması ile karşılaştırılmıştır. AA neredeyse bütün test problemlerinde optimum ya da optimuma yakın sonuçlar elde etmiş ve deneysel sonuçlar AA'nın doğruluk, öğrenme hızı ve sağlamlıktaki gücünü ispatlamıştır.

3. YÖNTEM

Bu çalışmada kübik hücre oluşturma modelinin çözümünde arı algoritmasının kullanılması önerilmektedir.

3.1. Hücre Oluşturma Problemin Modellenmesi

Bu çalışmada ele alınan hücre oluşturma probleminin matematiksel modeli aşağıda verilmiştir.

İndisler:

i: Parça tipi indisi (i = 1, 2, . . ., P);

m: Makine tipi indisi (m = 1, 2, . . ., M);

k: Hücre indisi (k = 1, 2, . . ., C) iken,

Parametreler:

a_{im} = *1* eğer parça tipi *i*'nin makine tipi *m*'ye ihtiyacı varsa; diğer durumda *0*;

LM_k = *k* hücresindeki makine sayısı alt sınırı;

LP_k = *k* hücresindeki parça tipi sayısı alt sınırı

Karar değişkenleri:

x_{mk} = *1* Eğer makine tipi *m*, hücre *k*'ya atanmışsa; diğer durumda *0*;

y_{ik} = *1* Eğer parça *i*, hücre *k*'ya atanmışsa; diğer durumda *0*;

Model:

$$\sum_{k=1}^{c} x_{mk} = 1 \; \forall \, m \qquad (1)$$

$$\sum_{k=1}^{C} y_{ik} = 1 \; \forall \, i \qquad (2)$$

$$\sum_{m=1}^{M} X_{mk} \geq LM_k \; \forall \, k \qquad (3)$$

$$\sum_{m=1}^{M} y_{ik} \geq LP_k \; \forall \; k \qquad (4)$$

$$x_{mk}, y_{ik} \in \{0,1\} \; \forall \; i, m, k \qquad (5)$$

Kısıtları altında

$$Enk = \sum_{k=1}^{C}\left[\sum_{i=1}^{p}\sum_{m=1}^{M}\sum_{w=1}^{W} y_{ik}x_{mk} - \sum_{i=1}^{P}\sum_{m=1}^{M} y_{ik}x_{mk}a_{im}\right] + \sum_{i=1}^{P}\left[\sum_{m=1}^{M} a_{im} - \sum_{i=1}^{P}\sum_{m=1}^{M} y_{ik}x_{mk}a_{im}\right] \qquad (6)$$

Kısıt (1) her bir makinenin yalnızca bir hücreye atanmasını sağlar. Kısıt (2), her parça türünün yalnızca bir hücreye atanmasını ifade eder. Kısıt (3), *k* hücresine LM_k'ya eşit veya daha fazla makine atanmasını sağlar. Kısıt (4), her hücreye parça sayısı alt sınırına eşit ya da daha fazla sayıda parça atanmasını sağlar. Kısıt (5) karar değişkenlerine ait işaret kısıtlarıdır

Amaç fonksiyonunun (6) ilk kısmı boşluk sayısını hesaplarken; ikinci kısım hücre dışı elemanların sayısını hesaplar. Amaç, boşluk ve hücre dışı eleman sayılarının toplamının en küçüklenmesidir.

3.2. Kübik Hücre Oluşturma Problemin Modellenmesi

Bu çalışmada ele alınan kübik hücre oluşturma probleminin matematiksel modeli, Mahdavi vd. (2012) tarafından önerilmiştir.

İndisler:

i: Parça tipi indisi (i = 1, 2, . . ., P);

w: İşçi indisi (w = 1, 2, . . ., W);

m: Makine tipi indisi (m = 1, 2, . . ., M);

k: Hücre indisi (k = 1, 2, . . ., C) iken,

Parametreler:

r_{imw} = *1* eğer parça tipi *i* işçi *w* ile makine tipi *m* üzerinde işleniyorsa; diğer durumda *0,*

a_{im} = *1* eğer parça tipi *i*'nin makine tipi *m*'ye ihtiyacı varsa; diğer durumda *0*;

N_m = Aynı tip makine sayısı

LM_k = *k* hücresindeki makine sayısı alt sınırı;

LP_k = *k* hücresindeki parça tipi sayısı alt sınırı

LW_k = *k* hücresindeki işçi sayısı alt sınırı ve

Karar değişkenleri:

x_{mk} = *1* Eğer makine tipi *m*, hücre *k*'ya atanmışsa; diğer durumda *0*;

y_{ik} = *1* Eğer parça *i*, hücre *k*'ya atanmışsa; diğer durumda *0*;

z_{wk} = *1* İşçi *w*, hücre *k*'ya atanmışsa; diğer durumda *0*;

d_{imwk} = *1* Eğer parça *i*, makine tipi *m* ile işçi *w* tarafından hücre *k*'da işlenirse; diğer durumda *0*

Model:

$$\sum_{k=1}^{C} Z_{wk} = 1 \; \forall \, w \qquad (1)$$

$$\sum_{k=1}^{C} y_{ik} = 1 \; \forall \, i \qquad (2)$$

$$\sum_{k=1}^{c} x_{mk} \leq N_m \; \forall \, m \qquad (3)$$

$$\sum_{m=1}^{M} X_{mk} \geq LM_k \; \forall \, k \qquad (4)$$

$$d_{imwk} \leq r_{imw} x_{mk} \; \forall \, i, m, w, k \qquad (5)$$

$$\sum_{k=1}^{C} \sum_{w=1}^{W} d_{imwk} = a_{im} \; \forall \, i, m \qquad (6)$$

$$\sum_{i=1}^{P} y_{ik} \geq LP_k \; \forall \, k \qquad (7)$$

$$\sum_{w=1}^{W} Z_{wk} \geq \; LW_k \; \forall \, k \qquad (8)$$

$$x_{mk}, y_{ik}, z_{wk}, d_{imwk} \; \in \; \{0,1\} \; \forall \, i, m, w, k \qquad (9)$$

Kısıtları altında

$$Enk = \sum_{k=1}^{C}\left[\sum_{i=1}^{p}\sum_{m=1}^{M}\sum_{w=1}^{W} y_{ik}x_{mk}z_{wk} - \sum_{i=1}^{P}\sum_{m=1}^{M}\sum_{w=1}^{W} y_{ik}x_{mk}z_{wk}d_{imwk}\right] + \sum_{i=1}^{P}\sum_{k=1}^{C}\sum_{m=1}^{M}\sum_{w=1}^{W} x_{mk}(2 - y_{ik} - z_{wk})d_{imwk} \qquad (10)$$

Kısıt (1) her bir işçinin yalnızca bir hücreye atanmasını sağlar. Kısıt (2), her parça türünün yalnızca bir hücreye atanmasını ifade eder. Kısıt (3), hücrelere atanan her türdeki makinelerin toplam sayısının, aynı türde mevcut makinelerin sayısından az veya ona eşit olmasını garanti eder. Kısıt (4), *k* hücresine LM_k'ya eşit veya daha fazla makine atanmasını sağlar. Kısıt (5), *k* hücresindeki *m* tipi makinanın uygunluğunu kontrol eder. Kısıt (6), bir hücredeki her makine türünde her bir parça tipinin işlenmesi için yalnızca bir işçinin görevlendirileceğini belirtir. Bu model, farklı işçilerle aynı işi yapmak için esnektir. Eğer bir parça tipi bir makine tipi tarafından işlenmek zorundaysa, birden fazla işçi bu makine türüne hizmet verebilecektir. Kısıt (7), her hücreye parça sayısı alt sınırına eşit ya da daha fazla sayıda parça atanmasını sağlar. Kısıt (8), *k* hücresine işçi sayısı alt sınırına eşit ya da daha fazla sayıda işçi atanmasını sağlar. Kısıt (9) karar değişkenlerine ait işaret kısıtlarıdır

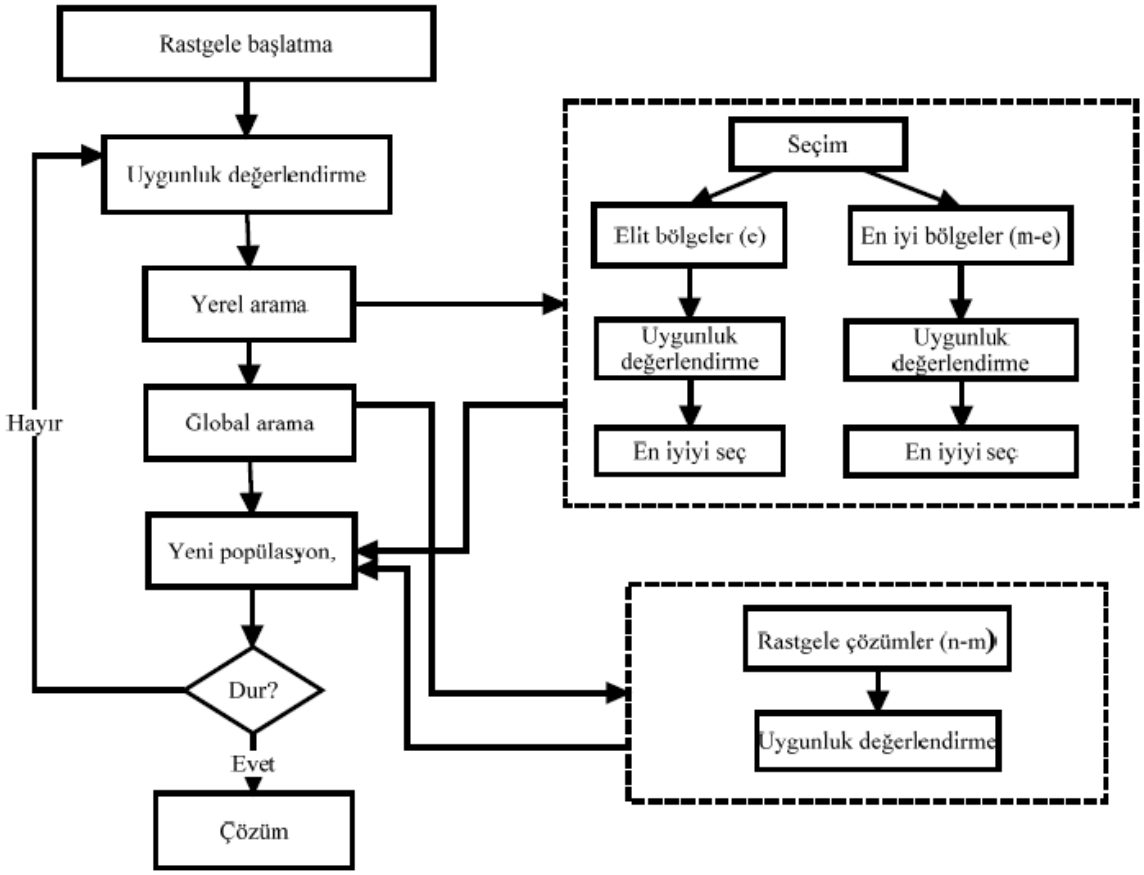
Amaç fonksiyonunun (10) ilk kısmı boşluk sayısını hesaplarken; ikinci kısım hücre dışı elemanların sayısını hesaplar. Amaç, boşluk ve hücre dışı eleman sayılarının toplamının en küçüklenmesidir.

3.3 Arı Algoritması

Bu çalışmada kübik hücre oluşturma probleminin çözümü için bir arı algoritması geliştirilmiştir. Arı algoritmasının genel adımları aşağıda verilmiştir.

1. Rastgele çözümlerle başlangıç arı popülasyonunu oluştur
2. Popülasyonun uygunluğunu değerlendir
3. Tekrarla (durdurma ölçütü sağlanana kadar)
4. Komşuluk araması için bölgeleri seç
5. Arıları seçilen bölgelere gönder ve uyumlarını değerlendir
6. Her bir bölgedeki en iyi uyum değerine sahip arıyı seç
7. Kalan arıları rastgele arama için ata ve uyumlarını değerlendir
8. Durdurma kriteri ölçütü sağlanmadıysa 2'ye dön. Sağlandıysa 9'a git
9. Sonuçları yaz ve DUR

Doğadaki arılarda yiyecek arama işlemini önce kâşif arılar başlatır ve rastgele yiyecek kaynakları seçerler. Ayrıca yiyecek toplama süreci boyunca popülasyonun belli bir yüzdesi kâşif arılar olarak kalır. Benzer olarak AA'da m adet kâşif arının araştırma uzayına rastgele yerleştirilmesi ile başlar. Kâşif arılarca ziyaret edilen noktaların uygunlukları 2. adımda değerlendirilir. Doğadaki arılar incelendiğinde, bir arı kolonisi yeterli yiyecek kaynağını sağlayabilmek için oldukça geniş alanı aramaları gerekebilmektedir. Prensipte nektar miktarı fazla olan ve kolayca tüketilebilen yiyecek kaynakları daha fazla arı tarafından, az miktarda nektara sahip yiyecek kaynakları ise daha az arı tarafından ziyaret edilecektir. Bu nedenle 4. adımda en iyi uygunluk değerine sahip arılar (p) komşuluk araması için seçilir. 5. adımda seçilen arıların komşuluğunda araştırma yapılır ve daha umut verici çözümleri temsil eden en iyi e bölgeye, seçilen diğer bölgelere (p-e) göre daha fazla arı gönderilerek daha detaylı arama yapılır. Yeni popülasyonun oluşturulması için her bölgedeki en iyi uygunluk değerine sahip arı 6. adımda seçilir. 7. adımda popülasyondaki diğer arılar (m-p) yeni potansiyel çözümler elde etmek için rastgele olarak araştırma uzayına atanırlar. Böylece her tekrarın sonunda yeni popülasyon, seçilen her bölgenin temsilcileri ve rastgele arama yapan kâşif arılar olmak üzere iki parçadan oluşacaktır. Diğer taraftan AA kâşif arı sayısı ile temsil edilen popülasyon boyutu (m), ziyaret edilen m bölge içinden seçilen bölge sayısı (p), seçilen p bölge içindeki en iyi bölge sayısı (e), en iyi e bölgeye gönderilen izci arı sayısı (nep), seçilen diğer bölgelere (p-e) gönderilen izci arı sayısı (nsp) ve durdurma ölçütü olmak üzere birçok parametre içermektedir. AA'na ait akış diyagramı Şekil 3.1.'de sunulmaktadır.



Şekil 3.1. Arı Algoritması Akış Diyagramı (Pham ve Castellani, 2009)

3.4. Kübik hücre oluşturma problemi için arı algoritması

Bu bölümde, kübik hücre oluşturma probleminin çözümü için geliştirilen arı algoritmasında çözümlerin nasıl gösterileceği, nasıl değerlendirileceği ve yeni çözümleri üretmek için nasıl bir komşuluk yapı kullanılacağı anlatılmakta ve geliştirilen algoritma biçimsel yapısıyla verilmektedir.

3.4.1. Çözümlerin gösterimi

Çözüm dizisi iki bölümlü olarak tasarlanmıştır. İlk bölüm (Şekil 3.2) makine, işçi ve parçaların atandığı hücreleri gösterirken ikinci bölüm, işçilerin atandığı makineleri ve parçaları göstermektedir. İlk bölümün uzunluğu sabit iken ikinci bölümün uzunluğu değişkendir. Çözüm dizisinin elemanları tamsayı değer almaktadır.

Makine				İşçi				Parça			
M1	M2	M3	M4	W1	W2	W3	W4	P1	P2	P3	P4

Şekil 3.2. Çözüm dizisinin ilk bölümünün gösterimi

İlk bölüm, makine, işçi ve parçayı temsil eden üç alt bölümden oluşur. Bu bölümün uzunluğu makine, parça ve işçi sayısının toplamı kadardır. Birinci bölümde [1-C] aralığında tamsayı değerler yer almakta ve makine, parça ve işçinin hangi hücreye atandığı bilgisini içermektedir. Örneğin Şekil 3.3'da verilen iki hücreli (C=2) çözümde makine {2 ,3}, işçi {3, 4} ve parça {1, 4} hücre 1'e, makine{1, 4}, işçi {1, 2} ve parça {2, 3} hücre 2'ye atanmıştır.

Makine				İşçi				Parça			
2	1	1	2	2	2	1	1	1	2	2	1

Şekil 3.3. Çözüm dizisinin ilk kısmının örnek gösterimi

Çözüm dizisinin ikinci bölümü, makineleri kullanma becerilerini dikkate alarak işçilerin makine ve parçalara atanmasını simgeler. Çözüm dizisinin ikinci kısmı, öncelikle parça sayısına bölünmüştür. Her bir parçaya karşı gelen bu bölümler de bu parçalar için gerekli makine sayısına bölünmüştür. Örneğin, 1 numaralı parça 3 farklı makinede işlenebiliyorsa; kromozomun ikinci bölümündeki bu kısmı kendi içinde tekrar 3'e bölünür. Her parçanın işlem göreceği makine sayısı farklı olduğu için bu bölümün uzunluğu sabit değildir. İkinci bölümdeki tamsayı değerler, işçiyi temsil etmektedir. Böylece hangi işçinin hangi makinada hangi parçayı işleyeceği bilgisi elde edilmektedir. Önerilen algoritmada çözüm dizisinin gelişmiş yapısı, literatürdeki çalışmalardan farklı olarak, ilgili makinedeki parçayı işleyebilecek uygun bir işçi grubundan seçim yapmayı mümkün kılar.

Çizelge 3.1, 3.2 ve 3.3'de verilen parça-makine, makine-işçi ve parça-işçi matrisleri esas alınarak, uygun parça-makine-işçi atamalarını gösteren Çizelge 3.4'teki aday matrisi oluşturulmuştur. Çizelge 3.4'teki aday matrisi için bir çözüm dizisinin ikinci bölümüne örnek Şekil 3.4'de verilmiştir. Ele alınan örnekte 4 parça olduğu için ikinci bölüm herbiri bir parçayı gösterecek şekilde dörde bölünmüştür. Her bir parça için alt bölümler değişken olmaktadır. Örneğin Parça 2, Makine 1 ve Makine 3'de işlem göreceğinden Parça 2'nin temsil edildiği bölüm iki alt bölüme bölünmüştür. Böylece çözüm dizisinin ikinci

bölümündeki dördüncü değer olan 2, İşçi 2'nin Parça 2'yi Makine 1'de işleyeceğini ifade etmektedir. İlgili çözüm dizisi örneğinin tamamı Şekil 3.5'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Parça-makine matrisi

Parça	Makine			
	1	2	3	4
1	0	1	1	1
2	1	0	1	0
3	1	1	1	1
4	1	0	1	0

Çizelge 3.2. Makine-işçi matrisi

Makine	İşçi			
	1	2	3	4
1	1	1	0	1
2	1	1	1	1
3	1	1	1	1
4	0	1	0	0

Çizelge 3.3. Parça-işçi matrisi

Parça	İşçi			
	1	2	3	4
1	1	1	1	1
2	1	1	1	1
3	0	1	1	1
4	1	0	1	1

Çizelge 3.4. Aday matrisi

Parça	Makine	İşçi			
P1	M2	1	2	3	4
	M3	1	2	3	4
	M4	2	0	0	0
P2	M1	1	2	4	0
	M3	1	2	3	4
P3	M1	2	4	0	0
	M2	2	3	4	0
	M3	2	3	4	0
	M4	2	0	0	0
P4	M1	1	4	0	0
	M3	1	3	4	0

Parça 1			Parça 2		Parça 3				Parça 4	
2	2	2	2	3	2	2	3	2	4	1
M2	M3	M4	M1	M3	M1	M2	M3	M4	M1	M3

Şekil 3.4. Çözüm dizisinin ikinci bölümünün örnek gösterimi

İlk kısım: Hücre Atama												İkinci kısım: İşçi Atama											
Makine				İşçi				Parça				Parça 1			Parça 2		Parça 3				Parça 4		
2	1	1	2	2	2	1	1	1	2	2	1	2	2	2	2	3	2	2	3	2	4	1	

Şekil 3.5. Çözüm dizisinin tümünün örnek gösterimi

3.4.2. Komşuluk Yapısı

Algoritma, her iki bölümden de değiştirilecek eleman sayısının farklı olmasına izin verecek şekilde esnek olarak tasarlanmıştır. Değiştirilecek elemanların seçimi rassal olarak yapılmaktadır. Seçilen eleman için olurlu tüm atamalar türetilip amaç fonksiyonu değeri en iyi olan komşu çözüm olarak benimsenmektedir. Şekil 3.6.'da örnek çözüm dizisinin ilk ve ikinci kısımdan rasgele seçilen elemanlar için Çizelge 3.1., Çizelge 3.2. ve Çizelge 3.3'te verilen matris değerlerine uygun olurlu atamalar gösterilmiştir. İlk bölümden 1, ikinci bölümden de 1 adet elemanın değişmesine izin verilen örnekte rassal olarak ilk bölümden 6. eleman, ikinci bölümden 7. eleman seçilmiştir. Çözüm iki hücreli olduğu için işçi 2 ya hücre 1'e ya da hücre 2'ye atanabilir. İşçi 2, eldeki çözümde hücre 2'ye atandığı için komşu çözümde hücre 1'e atanacaktır. İkinci bölümdeki seçilen eleman ise parça 3'ün makine 2'de hangi işçi ile üretileceği bilgisini içermektedir. Bunun için olurlu olan işçi 2, işçi3 ve işçi 4'tür. Eldeki çözümde işçi 2 atandığına göre işçi 3 ve işçi 4 bu çözümün komşularıdır. Bu durumda komşu çözümler, Şekil 3.7 de verildiği gibi olacaktır.



Şekil 3.6. Seçilen çözüm dizisi elemanlarına ait olurlu çözümler

Makine				İşçi				Parça				Parça 1			Parça 2		Parça 3				Parça 4	
2	1	1	2	2	1	1	1	1	2	2	1	2	2	2	2	3	2	3	3	2	4	1

Makine				İşçi				Parça				Parça 1			Parça 2		Parça 3				Parça 4	
2	1	1	2	2	1	1	1	1	2	2	1	2	2	2	2	3	2	4	3	2	4	1

Şekil 3.7. Şekil 3.6'daki çözümün komşuları

3.4.3. Çözümlerin değerlendirilmesi

Bölüm 3.1'de verilen matematiksel modelin amaç fonksiyonu, arı algoritmasıyla elde edilen çözümlerin başarısını ölçmekte kullanılmıştır. Modelin kısıtlarından hücreye atanabilecek parça, makine ve işçi sayının alt sınırını ifade edenler (4,7 ve 8 nolu kısıtlar) dışındaki kısıtlar, çözümlerin gösteriliş şekli ve komşuluk yapıları tasarlanırken dikkate alınmış ve böylece uygun çözümler türetmek mümkün olmuştur. Çözümlerin gösterimi ve komşuluk yapıları ile sağlanamayan 4,7 ve 8 nolu kısıtlar ise belirli bir ceza katsayısı ile amaç fonksiyonu değerine eklenmiştir. Çözümlerin değeri, aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır:

Çözüm değeri = toplam hücre dışı eleman sayısı + toplam boşluk sayısı + toplam ceza değeri

Toplam ceza değeri = E1 * (makine alt sınırından sapma) + E2 * (işçi alt sınırından sapma) + E3 * (parça alt sınırından sapma)

E1, E2 ve E3 ceza katsayılarını ifade etmektedir ve problem boyutuna göre farklı olarak belirlenebilir.

3.3.4. Önerilen arı algoritması

Algoritmada kullanılan terimler aşağıdaki gibidir:

m : Kâşif arılar (m=1…M)

p : Görevli arılar (p=1…P)

e : Görevli en iyi arı sayısı

n_{ep} : Her bir e adet görevli arı için kullanılan izci arı sayısı

$n_ı$: Her bir p-e adet görevli ari için kullanılan izci arı sayısı ($n_{sp}<n_{ep}$)

$Maks_{lter}$: Maksimum döngü sayısı, durdurma ölçütü

$Maks_{limit}$: Gelişme olmaksızın izin verilen en fazla döngü sayısı

Limitsayacı(σ^p) : op için gelişme olmaksızın döngü sayısı

σ^p : p. görevli arının çözümü

Fit(σ^p) : p. görevli arının uyum fonksiyonu değeri

σ^{ls} : Yerel arama ile bulunan komsu çözüm (ls=komşu çözüm, en iyi izci)

σ^{eniyi} : En iyi çözüm

Arı Algoritmasının detaylı adımları aşağıda verilmiştir.

1. Gerekli verileri topla, parametreleri belirle
2. m adet kâşif arı için çözümleri rassal olarak oluştur.
3. Kâşif arı çözümlerini değerlendir
4. I=0
5. **Tekrarla**

Çözümleri aldıkları değerlere göre artan şekilde sırala ve en iyi p çözümü görevli arı olarak belirle.

En iyi e adet görevli arıyı seç.

En iyi e adet görevli arının her birine n_{ep} adet izci arı ata.

Kalan p-e adet görevli arının her birine n_{sp} adet izci arı ata.

t=0

Tekrarla

k=0

Tekrarla

e adet görevli arıya atanmış her izci arı için komşuluk yapısını uygula.

Eğer fit($\sigma^{komsucozum}$) < fit(σ^{p}) ise $\sigma^{p} = \sigma^{komsucozum}$ **ve**

limitsayaci(σ^{p})=0, aksi takdirde limitsayaci(σ^{p})=limitsayaci(σ^{p})+1

k=*k*+1

Sağlandıgı sürece (*k*<*nep*)

k=0

Tekrarla

p-e adet görevli arıya atanmış her izci arı için komşuluk yapısını uygula.

Eğer fit($\sigma^{komsucozum}$) < fit(σ p) ise σ p = $\sigma^{komsucozum}$ **ve**

limitsayaci(σ p)=0, aksi takdirde limitsayaci(σ p)=limitsayaci(σ p)+1

k=*k*+1

Sağlandıgı sürece (*k*<*nsp*)

Eger (limitsayaci(σ p)>makslimit) **ise** yeni bir kâşif arı çözümü oluştur.

t=*t*+1

Sağlandıgı sürece (*t*<*p*)

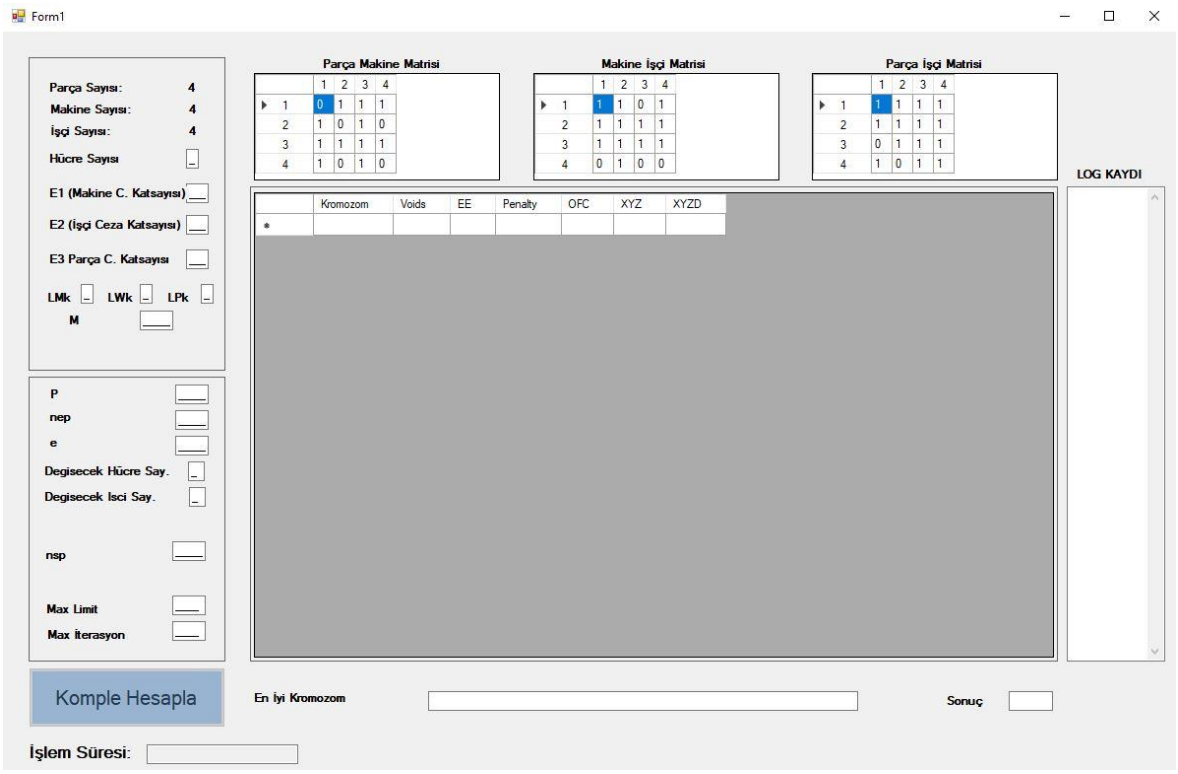
En iyi çözümü güncelle

Rassal olarak *m-p* adet yeni kâşif arı çözümleri oluştur.

Sağlandıgı sürece (I<maksIter)

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada kübik hücre oluşturma problemi modelinin çözümünde arı algoritmasının kullanılması önerilmiştir. Geliştirilen algoritma C# dilinde kodlanarak 2.20 GHz CPU, 8.00 GB RAM özelliklere sahip Intel Core i7 işlemciye sahip PC kullanılarak literatürden alınan test problemlerine uygulanmıştır. Hazırlanan programın ekran görüntüsü Şekil 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.1. Hazırlanan programın ekran görüntüsü

Algoritmanın performansı Mahdavi vd.'den (2012) alınan veri seti A (Ek Açıklamalar-A) ve Buruk Şahin ve Alpay'dan (2016) alınan veri seti B (Ek Açıklamalar-B) kullanılarak test edilmiştir. Veri seti A'daki problemlerin özellikleri Çizelge 4.1'de, veri seti B'ninkiler ise Çizelge 4.2'de verilmiştir. LM_k, LW_k ve LP_k, değerleri diğer çalışmalarda olduğu gibi 1 olarak kabul edilmiştir. Makine, işçi ve parça ceza katsayıları da (E1, E2, E3) tüm problemlerde 100 olarak alınmıştır.

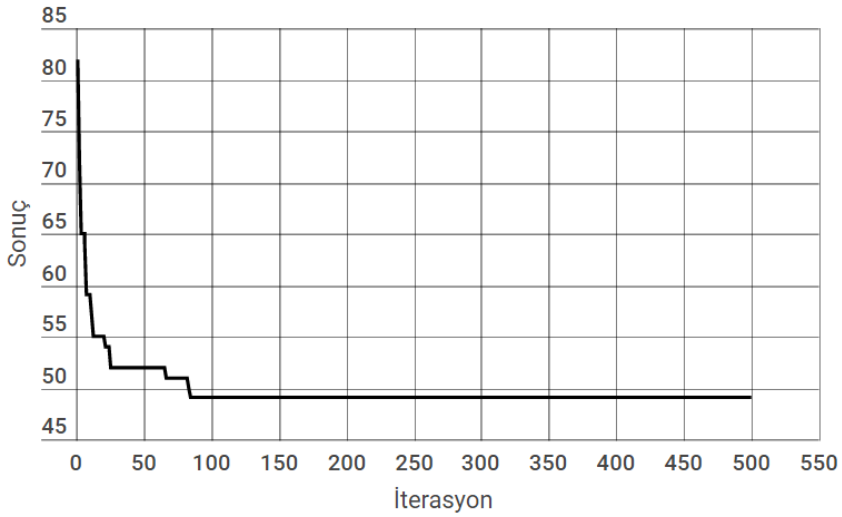
Çizelge 4.1. Veri seti A için problem özellikleri

Problem	Parça sayısı	Makine sayısı	İşçi sayısı	Hücre sayısı
P1	4	4	4	2
P2	5	4	5	2
P3	6	5	5	2
P4	10	7	4	2
P5	10	7	6	3

Çizelge 4.2. Veri seti B için problem özellikleri

Problem	Parça sayısı	Makine sayısı	İşçi sayısı	Hücre sayısı
P6	12	8	6	3
P7	12	8	7	3
P8	15	10	6	3
P9	15	10	6	4
P10	20	10	6	3
P11	20	10	6	4

Örnek olarak seçilen P8 probleminin önerilen algoritma ile çözümünde amaç fonksiyonu değerinin iterasyonlar boyunca değişimi, Şekil 4.2.'deki yakınsama grafiğinden görülebilir. Grafikte yatay eksen iterasyon sayısını, düşey eksende amaç fonksiyonu değerini göstermektedir. Amaç fonksiyonu değerinin iterasyonlar boyunca kararlı bir şekilde iyileştiği dikkati çekmektedir. Grafikte dikkati çeken nokta ise, algoritmanın 500 iterasyon yapmasına izin verilmesine rağmen aslında 86. iterasyondan itibaren en iyi çözümde herhangi bir iyileşme görülmeyişidir. Bir çözüm yolunun algoritma niteliği kazanabilmesi için mutlaka sonlu sayıda adım ile sonuca ulaşması beklenmektedir. Bu grafikte de, en büyük değer eğrisinin, yatay eksene paralel bir konum alması ve bu konumu makul bir süre devam ettirmesi, artık daha fazla iyileşme beklenmeyeceği kanısını uyandırıp, algoritmanın durdurulacağı noktayı belirlemektedir.



Şekil 4.2. P8 problemi için yakınsama grafiği

4.1. Geliştirilen algoritmanın sınanması

Geliştirilen algoritma öncelikle literatürde ele alındığı şekilde hücre sayısının önceden bilindiği ve amaç fonksiyonunun toplam hücre dışı eleman ve boşluk sayılarının enküçüklenmesi olduğu durum için sınanmıştır. Algoritma parametreleri genel öneriler ve deneyimlere göre belirlenmiş olup Çizelge 4.3'te verildiği gibidir.

Çizelge 4.3. Algoritma için belirlenen parametreler

Parametre	Veri Seti A	Veri Seti B
m	100	200
p	30	50
e	10	20
nep	30	50
nsp	20	30
Makslimit	100	250
Maksiter	500	1000
Değ. Hücre Sayısı.	2	2
Değ. İşçi Sayısı	1	1

Her bir test problemi, önerilen AA ile 10 kez çözülmüştür. Hücre sayıları karşılaştırma yapılan yöntemlerle aynı alınmıştır. Elde edilen sonuçlar Mahdavi vd. (2012) ve Buruk Şahin ve Alpay (2016) tarafından elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır (Çizelge 4.4 ve Çizelge 4.5). Çizelgelerden görüldüğü üzere, çözülen 11 test probleminden 9

tanesinde bilinen eniyi çözümlere ulaşılmış, 2 tanesinde ise literatürdeki çözümler iyileştirilmiştir. Önerilen AA'nın çözüm süresi açısından avantajlı olduğu da görülmektedir.

Çizelge 4.4. Veri seti A için elde edilen sonuçlar

Problem	Mahdavi vd. (2012)			Buruk Şahin ve Alpay (2016)		AA				
	B	HDE	Toplam	Toplam	Süre(s)	B	HDE	Toplam	Ort.	Süre(s)
P1	4	3	**7**	**7**	1	4	3	**7**	7	1
P2	10	1	**11**	**11**	2	10	1	**11**	11.0	1
P3	14	4	**18**	**18**	3	14	4	**18**	18.0	1
P4	20	14	**34**	**34**	9	20	14	**34**	34.0	1
P5	19	6	**25**	**25**	143	19	6	**25**	25.20	6

Çizelge 4.5. Veri seti B için elde edilen sonuçlar

Problem	Buruk Şahin ve Alpay (2016)			AA				
	Toplam	Ort.	Süre(s)	B	HDE	En İyi	Ort.	Süre(s)
P6	**29**	29.66	33	11	18	**29**	29	6
P7	**33**	34.33	39	14	19	**33**	33.40	8
P8	**49**	49.33	40	25	24	**49**	49.10	12
P9	37	38.66	42	13	22	**35**	36.20	14
P10	**60**	62.00	49	28	32	**60**	60.90	20
P11	47	49.66	54	19	26	**45**	45.90	26

4.2. Geliştirilen algoritmanın genişletilmesi

Geliştirilen algoritmanın literatürden alınan test problemleri kullanılarak başarılı olduğu görüldükten sonra algoritma, farklı amaç fonksiyonu ve durumları dikkate alacak şekilde genişletilmiştir. İki boyutlu hücre oluşturma problemini ele alan çalışmalar incelendiğinde çalışmaların çoğunda hücre sayısının bilinmediği ve algoritma tarafından belirlendiği durumun ele alındığı dikkati çekmiştir. Bu nedenle bu çalışmada ilk kez hücre sayısının bilinmediği durumda kübik hücre oluşturma problemi ele alınmıştır. Hücre sayısının bilindiği ve bilinmediği durumda test problemlerinin önerilen arı algoritması ile çözümüyle elde edilen sonuçlar Çizelge 4.6.'da verilmiştir. Çizelgeden görülebileceği gibi hücre sayısının belirli olmadığı ve algoritmanın belirlediği durumda daha iyi amaç fonksiyonu değerine sahip çözümler elde edilmiştir.

Çizelge 4.6. Hücre sayısının bilindiği ve bilinmediği durumlar için elde edilen sonuçlar

P.	Hücre Sayısı Biliniyor						Hücre Sayısı Bilinmiyor					
	Hücre S.	B	HDE	Toplam	Ort.	Süre(s)	Hücre S.	B	HDE	Toplam	Ort.	Süre(s)
P1	2	4	3	7	7	1	3	1	5	**6**	6	1
P2	2	10	1	11	11	1	3	3	1	**4**	4	1
P3	2	14	4	18	18	1	4	1	4	**5**	5	1
P4	2	20	14	34	34	1	4	2	17	**19**	19.50	5
P5	3	19	6	25	25.20	6	5	3	5	**8**	10.20	7
P6	3	11	18	29	29	6	6	3	14	**17**	18	14
P7	3	14	19	33	33.40	8	6	5	6	**11**	13.30	17
P8	3	25	24	49	49.10	12	6	8	17	**25**	27.30	23
P9	4	13	22	35	36.20	14						
P10	3	28	32	60	60.90	20	6	10	23	**33**	34.80	28
P11	4	19	26	45	45.90	26						

İki boyutlu hücre oluşturma probleminde performans ölçütü olarak genellikle Gruplama Etkinliği (Grouping Efficacy) (GE) ölçütünü kullanılmaktadır. GE aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır.

$$GE = \frac{e - e_0}{e + e_v} \qquad (1)$$

Burada e değeri matristeki 1'lerin toplam sayısı, e_0 değeri çözümdeki hücre dışı eleman sayısı ve e_v değeri çözümdeki boşluk sayısıdır. Kübik hücre oluşturma probleminde matristeki 1'lerin toplam sayısı e, uygun parça-makine-işçi atamalarını gösteren aday matrisinden yararlanılarak bulunmaktadır. P1 için e değeri Çizelge 3.4.'teki uygun atamaların sayısına eşit olup 30 değerine sahiptir ve yapılan çözümler sonrası en iyi GE değerine sahip çözümde boşluk sayısı 4, hücre dışı eleman sayısı 3 bulunmuştur. Bu çözüm için GE değeri (30-3)/(30+4)=79.41 olarak bulunmuştur. Test problemleri önerilen arı algoritması ile hücre sayısının bilindiği ve bilinmediği durumlar için amaç fonksiyonu gruplama etkinliği olarak çözülmüştür. Sonuçlar Çizelge 4.7 ve Çizelge 4.8'de verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde amaç fonksiyonu olarak hücre dışı eleman ve boşluk sayılarının toplamının enküçüklenmesini kullarak daha iyi toplam değerler elde edilirken, gruplama etkinliği amaç fonksiyonu ile daha düşük hücre dışı eleman sayılarına sahip çözümlerin elde edildiği görülmektedir. Bu durum GE ölçütünün hücre dışı eleman sayısının düşük olmasına daha fazla önem vermesinden kaynaklanmaktadır. Hücre dışı taşımaların hücre içi taşımalara oranla daha önemli olduğu durumlarda bu ölçütün kullanımının daha iyi olacağı açıktır.

Çizelge 4.7. Hücre sayısının bilindiği durum için gruplama etkinliği değerleri

P.	B+HDE						GE					
	Hücre S.	B	HDE	Toplam	Ort.	Süre(s)	B	HDE	Toplam	G.E	Ort.	Süre(s)
P1	2	4	**3**	7	7	1	4	**3**	7	79.41	79.41	1
P2	2	10	**1**	11	11	1	10	**1**	11	50	50	1
P3	2	14	**4**	18	18	1	14	**4**	18	43.75	43.75	1
P4	2	20	14	34	34	1	26	**11**	37	45.59	45.59	1
P5	3	19	6	25	25.20	6	30	**1**	31	39.22	39.22	2
P6	3	11	18	29	29	6	23	**10**	33	37.74	37.74	7
P7	3	14	19	33	33.40	8	28	**6**	34	46.03	46.03	8
P8	3	25	24	49	49.10	12	38	**15**	53	33.75	33.75	8
P9	4	13	22	35	36.20	14	22	**15**	37	42.19	42.19	9
P10	3	28	32	60	60.90	20	42	**20**	62	35.42	35.42	9
P11	4	19	26	45	45.90	26	27	**19**	46	43.21	42.84	11

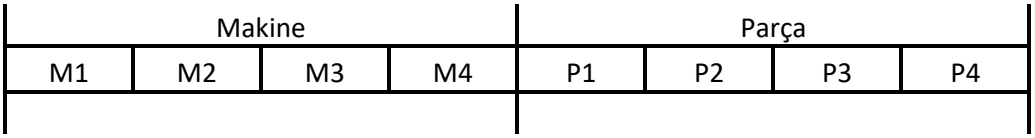
Çizelge 4.8. Hücre sayısının bilinmediği durum için gruplama etkinliği değerleri

P.	B+HDE						G.E						
	Hücre S.	B	HDE	Toplam	Ort.	Süre(s)	Hücre S.	B	HDE	Toplam	G.E	Ort.	Süre(s)
P1	3	1	**5**	6	6	1	3	1	**5**	6	80.65	80.65	1
P2	3	3	**1**	4	4	1	3	3	**1**	4	73.33	73.33	1
P3	4	1	**4**	5	5	1	4	1	**4**	5	73.68	70,93	3
P4	4	2	17	19	19.50	5	3	7	**13**	20	59.18	59.18	4
P5	5	3	**5**	8	10.20	7	4	8	**5**	13	55.17	45.15	10
P6	6	3	14	17	18	14	5	7	**12**	19	48.65	46.54	29
P7	6	5	6	11	13.30	17	6	4	**8**	12	69.23	66.04	35
P8	6	8	17	25	27.30	23	4	22	**15**	37	42.19	39.25	31
P10	6	10	23	33	34.80	28	5	19	**20**	39	46.58	42.87	38

4.3. İki boyutlu hücre oluşturma probleminin çözülmesi

Önerilen AA'nın kübik hücre oluşturma probleminin çözümündeki başarısı, algoritmanın iki boyutlu klasik hücre oluşturma problemindeki performansı konusunda merak uyandırmıştır. Bu nedenle algoritma, iki boyutlu problemin çözümü için uyarlanmıştır. Çözüm dizisindeki ilk bölümden işçi alt bölümü çıkartılmış ve çözüm dizisinin ikinci kısmı iptal edilmiştir. Böylece iki boyutlu hücre oluşturma probleminde çözümler, sadece makine ve parça atamalarını gösterecek şekilde basitleştirilmiştir. 4 makine ve 4 parçaya sahip bir problemin çözümlerinin gösterimi Şekil 4.3'teki şekilde olacaktır. Komşuların türetilmesi aşaması da basitleşmiştir. Çözüm dizisindeki rassal olarak seçilen herhangi bir değer, [1-hücre sayısı] aralığında rassal olarak belirlenen başka bir

değerle değiştirilmektedir. Algoritmanın diğer kısımları kübik hücre oluşturma problemi ile aynı şekildedir.



Şekil 4.3. İki boyutlu hücre oluşturma problemi için çözüm dizisi

Çizelge 4.9. İki boyutlu hücre oluşturma problemi için test problemleri

Problem	**Problem adı**	**makine sayısı**	**parça sayısı**
P01	King1982	5	7
P02	Waghodekar1984	5	7
P03	Seiffodini1989	5	18
P04	Kusiak1992	6	8
P05	Kusiak1987	7	11
P06	Boctor1991	7	11
P07	Seiffodini1986	8	12
P08	Chandrasekaran1986a	8	20
P09	Chandrasekaran1986b	8	20
P10	Mosier1985a	10	10
P11	Chan1982	10	15
P12	Askin1987	14	23
P13	Stanfel1985	14	24
P14	McCornick1972a	16	24
P15	Srinivasan1990	16	30
P16	King1980	16	43
P17	Carrie1973a	18	24
P18	Mosier1985b	20	20
P19	Kumar1986	20	23
P20	Carrie1973b	20	35
P21	Boe1991	20	35
P22	Chandrasekharan1989_1	24	40
P23	Chandrasekharan1989_2	24	40
P24	Chandrasekharan1989_3-4	24	40
P25	Chandrasekharan1989_5	24	40
P26	Chandrasekharan1989_6	24	40
P27	Chandrasekharan1989_7	24	40
P28	McCormick1972b	27	27
P29	Carrie1973c	28	46
P30	Kumar1987	30	41
P31	Stanfel1985_1	30	50
P32	Stanfel1985_2	30	50
P33	King1982	30	90
P34	McCormick1972c	37	53
P35	Chandrasekharan1987	40	100

Geliştirilen arı algoritmasının iki boyutlu hücre oluşturma probleminin çözümündeki performansını test etmek amacıyla literatürde yaygın olarak kullanılan 35 test problemi kullanılmıştır. Kullanılan problemlerin özellikleri Çizelge 4.9.'da verilmiştir

Çizelge 4.10. İki boyutlu hücre oluşturma problemi için elde edilen sonuçlar

Problem		**GRASP**		**GRASP-SP**		**AA**		
	optimal	**eniyi**	**süre(s)**	**eniyi**	**süre (s)**	**eniyi**	**ort**	**süre(s)**
P01	**75**	**75**	0.01	**75**	0.01	**75**	75	0.5
P02	**69.57**	**69.57**	0.01	**69.57**	0.01	**69.57**	69.57	0.5
P03	**80.85**	**80.85**	0.02	**80.85**	0.02	**80.85**	80.85	0.5
P04	**79.17**	**79.17**	0.01	**79.17**	0.01	**79.17**	79.17	0.5
P05	**60.87**	**60.87**	0.01	**60.87**	0.01	**60.87**	60.87	0.5
P06	**70.83**	**70.83**	0.01	**70.83**	0.01	**70.83**	70.83	0.5
P07	**69.44**	**69.44**	0.02	**69.44**	0.02	**69.44**	69.44	0.5
P08	**85.25**	**85.25**	0.03	**85.25**	0.04	86.25	86.25	0.5
P09	**58.72**	**58.72**	0.29	**58.72**	0.32	**58.72**	58.72	0.5
P10	**75**	**75**	0.03	**75**	0.03	**75**	75	0.5
P11	**92**	**92**	0.03	**92**	0.03	**92**	92	0.5
P12	**74.24**	**74.24**	0.30	**74.24**	0.33	**74.24**	74.24	0.5
P13	**72.86**	**72.86**	0.33	**72.86**	0.37	**72.86**	72.86	0.5
P14	**53.33**	**53.33**	0.71	**53.33**	0.78	**53.33**	53.33	2
P15	**69.92**	**69.92**	0.81	**69.92**	0.89	**69.92**	69.92	2
P16	**58.04**	**58.04**	1.94	**58.04**	2.14	57.96	57.94	7
P17	**57.73**	**57.73**	1.22	**57.73**	1.34	**57.73**	57.61	5
P18		**43.97**	2.54	**43.97**	2.79	**43.97**	43.78	5
P19	**50.81**	**50.81**	2.25	**50.81**	2.48	**50.81**	50.81	5
P20	**79.38**	**79.38**	4.01	**79.38**	4.41	**79.38**	79.38	5
P21	**58.79**	**58.79**	2.53	**58.79**	2.78	**58.79**	58.79	5
P22	**100**	**100**	4.81	**100**	5.29	**100**	100	5
P23	**85.11**	**85.11**	6.43	**85.11**	7.07	**85.11**	85.11	5
P24	**73.51**	**73.51**	7.01	**73.51**	7.71	**73.51**	73.51	5
P25	**53.29**	**53.29**	9.37	**53.29**	10.31	**53.29**	53.16	5
P26		**48.95**	9.97	**48.95**	10.97	48.57	48.36	10
P27		46.26	10.55	**46.58**	11.61	45.89	45.78	10
P28		**54.82**	19.11	**54.82**	21.02	**54.82**	54.82	17
P29		47.83	27.57	**47.84**	30.33	47.72	47.47	17
P30	**63.04**	**63.04**	27.17	**63.04**	29.89	62.94	62.80	18
P31	**59.77**	**59.77**	35.37	**59.77**	38.91	59.66	59.59	22
P32		**50.83**	38.53	**50.83**	42.38	**50.83**	50.28	25
P33		48.15	73.27	**48.29**	80.60	47.50	47.4	62
P34		**61.16**	83.55	**61.16**	91.91	**61.16**	61.16	23
P35	**84.03**	**84.03**	248.09	**84.03**	272.90	**84.03**	84.03	44

AA ile elde edilen sonuçlar aynı veri setini kullanan Pinheiro vd.'nin (2018) sonuçları ile karşılaştırılmıştır (Çizelge 4.10.). Pinheiro vd. (2018) iki boyutlu hücre oluşturma probleminin çözümü için GRASP algoritması ile küme bölüntüleme yöntemini birleştiren bir çözüm yaklaşımı (GRASP-SP) önermiştir. Çizelgeden görülebileceği gibi arı algoritması ile 35 problemin 8'inde literatürdeki sonuçlara erişilememiştir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Hücre oluşturma alanında yapılan çalışmaların büyük çoğunluğu problemin iki boyutu olan parça ve makinaya odaklanmaktadır. Diğer taraftan son yıllarda, makinelerde iş yapma konusundaki önemli rolleri nedeniyle işçiler üçüncü boyut olarak vurgulanmaya başlanmıştır. Üretkenliğin artırılmasının bir yolu uygun işçiye uygun makinelerle uygun parçaları yaptırmaktır. İşçiler, makinelerde iş yapmakta önemli rol oynamakta olduğundan, çalışanların hücrelere atanması hücresel üretimin tam olarak kullanılması için çok önemli bir faktör haline gelmektedir. Bu çalışmada, üç boyutlu parça-makina-işçi temas matrisini dikkate alan kübik hücre oluşturma probleminin çözümünde arı algoritması ilk kez kullanılmıştır. Geliştirilen algoritmanın performansı, literatürden alınan problemler kullanılarak test edilmiştir. Daha sonra hücre sayısının bilinmediği kübik hücre oluşturma problemi dikkate alınmış ve önerilen arı algoritmasının eniyi hücre sayısını da belirlemesine olanak sağlanmıştır. Böylece hücre sayısının belirli olduğu duruma göre daha iyi çözümler elde edilmiştir. Önerilen algoritma, gruplama etkinliği amaç fonksiyonu ile de çalıştırılmış ve bu durumda da hücre dışı eleman sayısı açısından daha iyi çözümlere ulaşılabildiği görülmüştür.

Bu çalışma arı algoritmasının kübik hücre oluşturma problemi çözümündeki ilk kez kullanılması nedeniyle algoritmanın performansının değerlendirilmesi açısından önemlidir. Bu çalışmanın kapsamı dışında kalan ancak ileride yapılacak çalışmalarda ele alınabilecek çalışma konulardan ilki, hücre oluşumu sırasında kapasite kısıtını da ele almanın daha gerçekçi sonuçlar elde edilmesine olanak sağlamasıdır. Bu nedenle algoritmanın bu kısıtı da göz önünde bulunduracak şekilde geliştirilmesi faydalı olacaktır. Ayrıca problemin çok amaçlı yapısı nedeniyle kübik hücre oluşturma probleminin çözümünde çok amaçlı yöntemlerin kullanılmasının da faydalı olacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Aalaei, A., Shavazipour, B., 2013, The tchebycheff norm for ranking DMUs in cellular manufacturing systems with assignment worker, International Journal of Applied Operational Research, 3,3, 41-57.

Akay, B., 2009, Nümerik optimizasyon problemlerinde yapay arı kolonisi (artifical bee colony) algoritmasının performans analizi, Doktora Tezi, Erciyes Ünivesitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 301 s.

Akay, B. ve Karaboga, D., 2012, A modified artificial bee colony algorithm for real-parameter optimization, Information Sciences, 192, 120-142.

Ballakur, A. ve Steudel, H. J., 1987, A within-cell utilization based heuristic for designing cellular manufacturing systems, International Journal of Production Research, 25,5, 639-665.

Bidanda, B., Ariyawongrat, P., Needy, K. L., Norman, B. A. ve Tharmmaphornphilas, W., 2005, Human related issues in manufacturing cell design, implementation, and operation: a review and survey, Computers & Industrial Engineering, 48,3, 507-523.

Bonabeau, E., Dorigo, M. ve Theraulaz, G., 1999, Swarm intelligence: from natural to artificial systems, Oxford university press.

Bootaki, B., Mahdavi, I. ve Paydar, M. M., 2014, A hybrid GA-AUGMECON method to solve a cubic cell formation problem considering different worker skills, Computers & Industrial Engineering, 75, 31-40.

Burbidge, J. L., 1971, Production flow analysis, Production Engineer, 50,4.5, 139-152.

Burke, L. ve Kamal, S., 1995, 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.

Buruk Şahin, Y. ve Alpay, Ş., 2016, A metaheuristic approach for a cubic cell formation problem, Expert Systems with Applications, 65, 40-51.

Carrie, A., 1973, Numerical taxonomy applied to group technology and plant layout, The Internatıonal Journal Of Productıon Research, 11,4, 399-416.

Chandrasekharan, M. ve Rajagopalan, R., 1986, MODROC: an extension of rank order clustering for group technology, International Journal of Production Research, 24,5, 1221-1233.

Chung, Y. ve Kusiak, A., 1994, Grouping parts with a neural network, Journal of Manufacturing Systems, 13,4, 262-275.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Colorni, A., Dorigo, M. ve Maniezzo, V., PPSN 1992, An Investigation of some Properties of an" Ant Algorithm", 92: 509-520.

Eberhart, R. ve Kennedy, J., Micro Machine and Human Science, 1995. MHS'95., Proceedings of the Sixth International Symposium on 1995, A new optimizer using particle swarm theory: 39-43.

Flanders, R. E., 1925, Design manufacture and production control of a standard machine, Transactions of ASME, 46, 691-738.

Fujimoto, T., 1999, The evolution of a manufacturing system at Toyota, Oxford university press.

Holland, J. H., 1975, Adaptation in natural and artificial systems. An introductory analysis with application to biology, control, and artificial intelligence, Ann Arbor, MI: University of Michigan Press.

Hounshell, D., 1985, From the American system to mass production, 1800-1932: The development of manufacturing technology in the United States, JHU Press.

Islier, A., 2005, Group technology by an ant system algorithm, International journal of production research, 43,5, 913-932.

Karaboga, D. 2005, An idea based on honey bee swarm for numerical optimization, Technical Report-TR06, Erciyes university, Engineering faculty, Kayseri, s 10.

Karaboga, D. ve Akay, B., Signal Processing and Communications Applications 2007, Artificial bee colony (ABC) algorithm on training artificial neural networks: 1-4.

Karaboga, D. ve Basturk, B., 2008, On the performance of artificial bee colony (ABC) algorithm, Applied soft computing, 8,1, 687-697.

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

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

Kuo, R., Su, Y., Chiu, C., Chen, K.-Y. ve Tien, F.-C., 2006, Part family formation through fuzzy ART2 neural network, Decision Support Systems, 42,1, 89-103.

Kusiak, A., 1987, The generalized group technology concept, International journal of production research, 25,4, 561-569.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

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

Li, M.-L., 2003, The algorithm for integrating all incidence matrices in multi-dimensional group technology, International Journal of Production Economics, 86,2, 121-131.

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

Mahdavi, I., Aalaei, A., Paydar, M. M. ve Solimanpur, M., 2012, A new mathematical model for integrating all incidence matrices in multi-dimensional cellular manufacturing system, Journal of Manufacturing Systems, 31,2, 214-223.

McAuley, J., 1972, Machine grouping for efficient production, Production Engineer, 51,2, 53-57.

McCormick, W. T., Schweitzer, P. J. ve White, T. W., 1972, Problem decomposition and data reorganization by a clustering technique, Operations Research, 20,5, 993-1009.

Min, H. ve Shin, D., 1993, Simultaneous formation of machine and human cells in group technology: A multiple objective approach, International Journal of Production Research, 31,10, 2307-2318.

Mitrofanov, S. P., 1959, The Scientific Principles of Group Technology, Leningrad.

Narayanaswamy, P., Bector, C. ve Rajamani, D., 1996, Fuzzy logic concepts applied to machine—component matrix formation in cellular manufacturing, European Journal of Operational Research, 93,1, 88-97.

Nikoofarid, E. ve Aalaei, A., 2012, Production planning and worker assignment in a dynamic virtual cellular manufacturing system, International Journal of Management Science and Engineering Management, 7,2, 89-95.

Offodile, O. F., Mehrez, A. ve Grznar, J., 1994, Cellular manufacturing: a taxonomic review framework, Journal of Manufacturing Systems, 13,3, 196-220.

Opitz, H., 1970, A classification system to describe workpieces, Pergamon Press.

Packianather, M. ve Drake, P., Proc. 1st PROMS Virtual Conf., Intell. Prod. Mach. Syst., Elsevier 2005, Identifying defects on plywood using a minimum distance classifier and a neural network: 543-548.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Pham, D. T., Afify, A. ve Koc, E., Innovative Production Machines and Systems Virtual Conference, Cardiff, UK 2007a, Manufacturing cell formation using the Bees Algorithm.

Pham, D. T., Al-Jabbouli, H., Mahmuddin, M., Otri, S. ve Darwish, A. H., 4th International Virtual Conference on Intelligent Production Machines and Systems, Whittles, Dunbeath, Scotland 2008a, Application of the Bees algorithm to fuzzy clustering.

Pham, D. T. ve Castellani, M., 2009, The bees algorithm: modelling foraging behaviour to solve continuous optimization problems, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 223,12, 2919-2938.

Pham, D. T. ve Darwish, A. H., Proceedings of the 4th Virtual International Conference on Intelligent Production Machines and Systems 2008, Fuzzy selection of local search sites in the Bees Algorithm.

Pham, D. T., Darwish, A. H., Eldukhri, E. E. ve Otri, S., Proceedings of IPROMS 2007 conference, Cardiff, UK 2007b, Using the bees algorithm to tune a fuzzy logic controller for a robot gymnast.

Pham, D. T., Ghanbarzadeh, A., Koc, E. ve Otri, S., Proceedings of 5th CIRP international seminar on intelligent computation in manufacturing engineering (CIRP ICME'06), Ischia, Italy 2006a, Application of the bees algorithm to the training of radial basis function networks for control chart pattern recognition: 711-716.

Pham, D. T., Ghanbarzadeh, A., Koc, E., Otri, S., Rahim, S. vd., Intelligent Production Machines and Systems Conference 2006b, The bees algorithm-A novel tool for complex optimisation.

Pham, D. T., Koç, E. ve Ghanbarzadeh, A., 2006c, Optimization of the weights of multi-layered perceptions using the Bees Algorithm.

Pham, D. T., Koç, E., Lee, J. Y. ve Phrueksanant, J., 8th International Conference on Laser Metrology, CMM and Machine Tool Performance 2007c, Cardiff,UK, Using the Bees Algorithm to Schedule Jobs for a Machine: 430-439.

Pham, D. T., Negm, M. ve Otri, S., 2008b, Using the Bees Algorithm to solve a stochastic optimisation problem.

Pham, D. T., Otri, S., Afify, A., Mahmuddin, M. ve Al-Jabbouli, H., 40th CIRP International Manufacturing Systems Seminar 2007d, Data clustering using the bees algorithm.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Pham, D. T., Otri, S. ve Darwish, A. H., Proceedings 3rd International Virtual Conference on Intelligent Production Machines and Systems (IPROMS 2007) 2007e, Application of the Bees Algorithm to PCB assembly optimisation: 511-516.

Pham, D. T., Otri, S., Ghanbarzadeh, A. ve Koc, E., Information and Communication Technologies, 2006. ICTTA'06. 2nd 2006d, Application of the bees algorithm to the training of learning vector quantisation networks for control chart pattern recognition, 1: 1624-1629.

Pham, D. T., Pham, Q., Ghanbarzadeh, A. ve Castellani, M., 2008c, Dynamic optimisation of chemical engineering processes using the bees algorithm, IFAC Proceedings Volumes, 41,2, 6100-6105.

Pham, D. T. ve Sholedolu, M., 4th International Virtual Conference on Intelligent Production Machines and Systems, IPROMS 2008, Using a hybrid PSO-bees algorithm to train neural networks for wood defect classification.

Pham, D. T., Soroka, A., Ghanbarzadeh, A., Koc, E., Otri, S. vd., IEEE International Conference on Industrial Informatics 2006e, Optimising neural networks for identification of wood defects using the bees algorithm: 1346-1351.

Pinheiro, R. G. S., Martins, I. C., Protti, F. ve Ochi, L. S., 2018, A matheuristic for the cell formation problem, Optimization Letters, 12,2, 335-346.

Sevim, Ö., 2013, Yapay arı koloni algoritması kullanılarak 3 boyutlu çelik yapıların optimum tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Aksaray Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 67 s.

Solimanpur, M., Saeedi, S. ve Mahdavi, I., 2010, Solving cell formation problem in cellular manufacturing using ant-colony-based optimization, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 50,9, 1135-1144.

Sönmez, M., 2011, Alternatif Rotalı Hücre Oluşturma Problemlerinin Çözümü için Yeni bir Melez Yaklaşım, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversites Fen Bilimleri Enstitüsü, 102 s.

Wei, J. C. ve Kern, G. M., 1989, Commonality analysis: A linear cell clustering algorithm for group technology, The Internatıonal Journal Of Productıon Research, 27,12, 2053-2062.

Woodbury, R. S., 1960, The legend of Eli Whitney and interchangeable parts, Technology and Culture, 1,3, 235-253.

Yang, X., 2008, Introduction to mathematical optimization, From Linear Programming to Metaheuristics.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Yin, Y. ve Yasuda, K., 2006, Similarity coefficient methods applied to the cell formation problem: A taxonomy and review, International Journal of Production Economics, 101,2, 329-352.

Zadeh, L. A., 1965, Fuzzy logic and its applications, New York, NY, USA.

EK AÇIKLAMALAR DİZİNİ

Sayfa

Ek Açıklamalar-A Veri Seti A……...62
Ek Açıklamalar-B Veri Seti B…….…...64

EK AÇIKLAMALAR

Ek Açıklamalar-A Veri Seti A

P1

Parça	Makine			
	1	2	3	4
1	0	1	1	1
2	1	0	1	0
3	1	1	1	1
4	1	0	1	0

Makine	İşçi			
	1	2	3	4
1	1	1	0	1
2	1	1	1	1
3	1	1	1	1
4	0	1	0	0

Parça	İşçi			
	1	2	3	4
1	1	1	1	1
2	1	1	1	1
3	0	1	1	1
4	1	0	1	1

P2

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

Makine	İşçi				
	1	2	3	4	5
1	1	0	1	0	1
2	0	1	0	1	0
3	1	0	1	0	0
4	0	0	1	0	1

Parça	İşçi				
	1	2	3	4	5
1	1	0	1	0	1
2	1	0	0	0	1
3	0	1	1	1	0
4	0	0	1	1	1
5	0	0	1	0	1

P3

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

Makine	İşçi				
	1	2	3	4	5
1	0	1	0	1	0
2	1	0	0	0	1
3	0	0	0	1	0
4	0	1	0	0	0
5	1	0	1	0	1

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

P4

Parça	Makine						
	1	2	3	4	5	6	7
1	1	0	1	0	1	1	1
2	0	1	0	1	0	0	1
3	0	0	1	1	0	1	0
4	0	1	1	1	0	0	0
5	1	0	0	1	0	0	1
6	1	0	0	1	0	1	1
7	1	1	1	0	0	0	0
8	0	0	0	0	1	1	1
9	0	1	0	0	1	0	1
10	1	0	0	0	1	0	1

Makine	İşçi			
	1	2	3	4
1	1	0	0	1
2	0	0	1	0
3	0	1	0	0
4	1	1	1	0
5	0	0	1	1
6	1	1	0	0
7	0	0	0	1

Parça	İşçi			
	1	2	3	4
1	1	1	0	1
2	0	1	1	1
3	0	1	0	0
4	1	1	1	0
5	0	1	0	1
6	1	0	0	1
7	0	1	1	1
8	1	1	1	1
9	0	1	1	1
10	0	0	0	1

P5

Parça	Makine						
	1	2	3	4	5	6	7
1	0	1	0	0	1	0	0
2	1	0	0	0	0	1	0
3	0	0	1	1	0	0	0
4	0	0	0	1	0	0	0
5	0	0	0	0	1	0	1
6	0	0	0	0	0	1	0
7	1	0	0	0	0	0	1
8	1	0	0	0	0	0	0
9	0	0	1	0	0	0	0
10	0	1	0	0	1	0	1

Makine	İşçi					
	1	2	3	4	5	6
1	0	1	0	0	1	0
2	1	0	0	0	0	1
3	0	0	1	1	0	0
4	0	0	1	0	0	0
5	0	0	0	0	0	1
6	0	1	0	0	0	0
7	1	0	0	0	0	0

Parça	İşçi					
	1	2	3	4	5	6
1	1	0	0	0	0	1
2	0	1	0	0	1	0
3	0	0	1	1	0	0
4	0	0	1	0	0	0
5	1	0	0	0	0	1
6	0	1	0	0	0	0
7	1	0	0	0	1	0
8	0	1	0	0	0	0
9	0	0	0	1	0	0
10	1	0	0	0	0	1

Ek Açıklamalar-B Veri Seti B

P6

Parça	Makine							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	1	0	0	1	1	0	0	0
2	0	1	1	0	0	0	0	0
3	1	0	0	1	0	0	0	0
4	0	0	1	0	1	0	0	1
5	0	0	0	0	0	1	1	0
6	0	1	0	1	0	0	0	0
7	1	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	1	1	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	1
10	0	0	0	0	1	0	0	0
11	1	0	1	0	0	0	0	0
12	0	0	0	1	0	0	0	0

Makine	İşçi					
	1	2	3	4	5	6
1	0	1	0	1	0	0
2	1	0	0	0	1	1
3	0	0	1	1	1	0
4	0	1	0	0	0	0
5	0	0	1	1	0	0
6	1	0	0	0	0	0
7	0	0	0	1	1	0
8	0	0	1	1	1	0

Parça	İşçi					
	1	2	3	4	5	6
1	0	1	0	1	0	0
2	1	0	0	0	1	0
3	0	1	0	1	0	0
4	0	0	1	1	0	0
5	1	0	0	0	1	0
6	1	1	0	0	0	0
7	0	0	0	1	0	0
8	0	1	1	0	0	0
9	0	0	0	1	1	0
10	0	0	1	0	0	0
11	0	0	0	1	1	0
12	0	1	0	0	0	1

P7

Parça	Makine							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	1	0	0	0	1	0	1	0
2	0	1	0	0	0	0	0	1
3	0	0	0	1	1	0	0	0
4	0	0	1	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	1	1	0
6	0	1	0	1	0	0	0	0
7	1	0	0	0	0	0	0	0
8	0	1	0	0	1	0	0	0
9	1	0	0	0	0	1	0	0
10	0	0	0	1	0	0	0	0
11	1	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	1	0

Makine	İşçi						
	1	2	3	4	5	6	7
1	0	1	1	0	1	0	0
2	0	1	0	0	1	1	0
3	1	0	0	1	0	0	0
4	0	0	0	0	0	1	1
5	1	0	0	0	0	0	1
6	0	0	1	0	1	0	1
7	0	1	1	0	0	0	1
8	0	0	0	1	1	1	0

Parça	İşçi						
	1	2	3	4	5	6	7
1	0	1	0	0	1	0	1
2	0	1	0	1	0	1	0
3	0	0	0	0	0	1	1
4	1	0	0	1	1	0	0
5	0	0	1	0	1	0	0
6	0	1	0	0	0	1	0
7	0	0	1	0	1	0	0
8	0	1	0	0	0	1	1
9	0	1	1	0	1	0	0
10	0	0	0	0	0	1	0
11	0	0	1	0	1	0	0
12	0	1	0	0	0	0	1

P8 ve P9

Parça	Makine									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0
2	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0
3	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0
4	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0
5	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0
6	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0
7	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0
8	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0
9	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0
10	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1
11	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
13	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0
14	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0

Makine	İşçi					
	1	2	3	4	5	6
1	0	1	0	1	0	0
2	1	0	0	0	1	1
3	0	0	1	1	1	0
4	0	1	0	0	0	0
5	0	0	1	1	0	0
6	1	0	0	0	0	0
7	0	0	0	1	1	0
8	0	0	1	1	1	0
9	0	1	0	0	1	0
10	1	0	1	0	0	1

Parça	İşçi					
	1	2	3	4	5	6
1	0	1	0	1	0	0
2	1	0	0	0	1	0
3	0	1	0	1	0	0
4	0	0	1	1	0	0
5	1	0	0	0	1	0
6	1	1	0	0	0	0
7	0	1	0	1	0	0
8	0	1	1	0	0	0
9	1	0	0	1	1	0
10	0	0	1	0	0	0
11	0	0	0	1	1	0
12	0	1	0	0	0	1
13	1	0	0	0	1	0
14	0	1	0	0	0	0
15	0	0	1	1	0	0

P10 ve P11

Parça	Makine									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0
2	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0
3	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0
4	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0
5	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0
6	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0
7	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0
8	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0
9	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0
10	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1
11	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
13	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0
14	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
17	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
20	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0

Makine	İşçi					
	1	2	3	4	5	6
1	0	1	0	1	0	0
2	1	0	0	0	1	1
3	0	0	1	1	1	0
4	0	1	0	0	0	0
5	0	0	1	1	0	0
6	1	0	0	0	0	0
7	0	0	0	1	1	0
8	0	0	1	1	1	0
9	0	1	0	0	1	0
10	1	0	1	0	0	1

Parça	İşçi					
	1	2	3	4	5	6
1	0	1	0	1	0	0
2	1	0	0	0	1	0
3	0	1	0	1	0	0
4	0	0	1	1	0	0
5	1	0	0	0	1	0
6	1	1	0	0	0	0
7	0	1	0	1	0	0
8	0	1	1	0	0	0
9	0	0	0	1	1	0
10	0	0	1	0	0	0
11	0	0	0	1	1	0
12	0	1	0	0	0	1
13	1	0	0	0	1	0
14	0	1	0	0	0	0
15	0	0	1	1	0	0
16	1	0	1	1	0	0
17	0	1	0	1	0	0
18	0	1	1	0	0	0
19	0	0	1	0	0	1
20	1	0	0	0	1	0