

**T.C.**  
**BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**



**ÜRETİM SİSTEMLERİNDE ÇİZELGELEME VE YAPAY ARI  
KOLONİSİ ALGORİTMASI İLE SEKTÖREL UYGULAMA**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**EZGİ ÇETİN**

**BALIKESİR, HAZİRAN - 2019**

**T.C.**  
**BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**



**ÜRETİM SİSTEMLERİNDE ÇİZELGELEME VE YAPAY ARI  
KOLONİSİ ALGORİTMASI İLE SEKTÖREL UYGULAMA**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**EZGİ ÇETİN**

**Jüri Üyeleri : Doç. Dr. Aslan Deniz KARAOĞLAN (Tez Danışmanı)**

**Prof. Dr. Ramazan YAMAN**

**Dr. Öğr. Üyesi İbrahim KÜÇÜKKOÇ**

**BALIKESİR, HAZİRAN - 2019**

## KABUL VE ONAY SAYFASI

**EZGİ ÇETİN** tarafından hazırlanan “**ÜRETİM SİSTEMLERİNDE ÇİZELGELEME VE YAPAY ARI KOLONİSİ ALGORİTMASI İLE SEKTÖREL UYGULAMA**” adlı tez çalışmasının savunma sınavı 24.06.2019 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği ile Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Danışman

Doç. Dr. Aslan Deniz KARAOĞLAN

Üye

Prof. Dr. Ramazan YAMAN

Üye

Dr. Öğr. Üyesi İbrahim KÜÇÜKKOÇ



Jüri üyeleri tarafından kabul edilmiş olan bu tez Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca onanmıştır.

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Prof. Dr. Necati ÖZDEMİR

## ÖZET

### ÜRETİM SİSTEMLERİNDE ÇİZELGELEME VE YAPAY ARI KOLONİSİ ALGORİTMASI İLE SEKTÖREL UYGULAMA

YÜKSEK LİSANS TEZİ

EZGİ ÇETİN

BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

(TEZ DANIŞMANI: DOÇ. DR. ASLAN DENİZ KARAOĞLAN)

BALIKESİR, HAZİRAN - 2019

Proje bazlı emek yoğun çalışan üretim sistemlerinde, siparişlerin müşteri isteklerine göre farklılaşan teknik özellikleri ve bunun yanında atölyenin dinamik üretim koşulları, üretime girmeyi bekleyen siparişlere ait toplam tamamlanma zamanını üretime başlamadan önce tahmin etmeyi oldukça zorlaştırmaktadır. Toplam tamamlanma zamanını minimize etmek üzere pek çok yöntem geliştirilmiştir. Bu tezde, transformatör kazanı imalatı gerçekleştiren bir atölyede yapay arı kolonisi algoritması kullanılarak gerçekleştirilen esnek atölye tipi çizelgeleme uygulaması sunulmaktadır. Üretilen ürün setinin toplam tamamlanma zamanı minimize edilerek, siparişlerin istasyonlara dengeli biçimde paylaşılması amaçlanmaktadır. Farklı sipariş tarihleri, termin ve işlem sürelerine sahip siparişler; kaynak, sızdırmazlık test ve boya öncesi yüzey hazırlama istasyonlarında işlem görmektedirler. Siparişler, müşteri isteklerine göre değişen teknik özellikler (sipariş edilen transformatör kazanlarına ait genişlikler ve ağırlıklar), istasyonların uzunlukları ve işlem süreleri dikkate alınarak mevcut işgücü kısıtları altında gerçekleştirilmektedir. MATLAB programı yardımıyla kodlanan yapay arı kolonisi algoritması kullanılarak, üretime girmeyi bekleyen bir grup sipariş için toplam tamamlanma zamanını minimize edecek bir sipariş çizelgesi elde edilmiştir.

**ANAHTAR KELİMELELER:** Çizelgeleme, optimizasyon, yapay arı kolonisi algoritması, proje bazlı emek yoğun esnek atölye tipi üretim

## **ABSTRACT**

### **SCHEDULING IN MANUFACTURING ENTERPRISES AND SECTORAL APPLICATION WITH ARTIFICIAL BEE COLONY ALGORITHM**

**MSc THESIS**

**EZGİ ÇETİN**

**BALIKESİR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE**

**INDUSTRIAL ENGINEERING**

**(SUPERVISOR: ASSOC. PROF. DR. ASLAN DENİZ KARAOĞLAN)**

**BALIKESİR, JUNE - 2019**

In labor-intensive project type production systems, the technical characteristics of the orders changing according to customer requirements, as well as the dynamic production conditions of the workshop, it becomes quite difficult to predict what will be total completion time of the orders waiting to enter into production before the production begins. Several methods have been developed to minimize the makespan. In this thesis, a flexible job-shop scheduling application realized by using artificial bee colony algorithm is presented in a workshop which produces transformer vessel. The total completion time of the product set will be minimized and the orders will be allocated to the stations in a balanced manner. Orders with different order dates, deadlines and operating times are processed at the welding, sealing test and pre-paint surface preparation stations. This orders are carried out according to the technical specifications of the orders (widths and weights of the transformer vessels ordered), lengths of stations and the operation times determined by the existing labor force constraints. By using the artificial bee colony algorithm coded with the help of MATLAB program, a order schedule has been obtained to minimize the total completion time for a group of orders waiting to enter production.

**KEYWORDS:** Scheduling, optimization, artificial bee colony algorithm, labor-intensive project type flexible job-shop manufacturing

# İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
<b>ÖZET</b> .....	<b>i</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>ii</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>iii</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....	<b>iv</b>
<b>TABLO LİSTESİ</b> .....	<b>v</b>
<b>ÖNSÖZ</b> .....	<b>vi</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
1.1 Problemin Tanımı .....	1
1.2 Çalışmanın Amaçları .....	3
<b>2. LİTERATÜR TARAMASI</b> .....	<b>6</b>
<b>3. MATERYAL VE METOT</b> .....	<b>12</b>
3.1 Üretim Sistemi Tipleri .....	12
3.2 Çizelgeleme.....	23
3.2.1 Çizelgelemenin Tanımı ve Çizelgeleme Yöntemleri.....	23
3.2.2 Çizelgelemede Kullanılan Yapay Zeka Optimizasyon Yöntemleri .....	30
3.3 Yapay Zeka Optimizasyonu ile Klasik Optimizasyonun Karşılaştırılması.....	32
3.4 Yapay Arı Kolonisi Algoritması .....	34
3.5 Açık Atölye Tipi Çizelgeleme .....	43
3.6 Esnek Atölye Tipi Çizelgeleme .....	43
<b>4. SİSTEMİN TANIMI</b> .....	<b>45</b>
4.1 Transformatör Tanımı ve Kazan İmalat Süreci.....	45
4.2 Probleme İlişkin Veriler .....	46
4.3 Yapay Arı Kolonisi Algoritmasıyla Sipariş Çizelgeleme .....	49
<b>5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER</b> .....	<b>54</b>
5.1 Çalışmanın Özeti.....	54
5.2 Sonuçların Değerlendirilmesi .....	54
5.3 Gelecek Çalışmalar İçin Araştırma Önerileri .....	55
<b>6. KAYNAKLAR</b> .....	<b>56</b>
<b>7. EKLER</b> .....	<b>63</b>

## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

<b>Şekil 3.1:</b> Arıların yiyecek kaynağı arama döngüsü (Karaboğa, 2014).....	35
<b>Şekil 3.2:</b> Yapay arı kolonisi algoritmasıyla yapılan çizelgeme çalışmasına ait akış şemaları (Karaboğa, 2014).....	41
<b>Şekil 4.1:</b> Atölye yerleşim düzeni .....	45
<b>Şekil 4.2:</b> Mevcut durumdaki sipariş çizelgesi .....	49
<b>Şekil 4.3:</b> Yapay arı kolonisi algoritması ile bulunan sipariş çizelgesi .....	51

## TABLO LİSTESİ

	<b><u>Sayfa</u></b>
<b>Tablo 4.1:</b> Mevcut sipariş çizelgesi .....	46
<b>Tablo 4.2:</b> İstasyon bazlı işlem süreleri .....	47
<b>Tablo A.1:</b> Literatür taraması özet tablo .....	63



## ÖNSÖZ

Bu tezde, transformatör kazanı imalatı gerçekleştiren bir atölyede yapay zeka optimizasyon algoritmalarından biri olan yapay arı kolonisi algoritması kullanılarak sipariş çizelgeleme yapılmıştır. Yapılan çalışmada, siparişlerin toplam tamamlanma zamanlarının en aza indirilmesi ve istasyonlara dengeli şekilde dağıtılması hedeflenmiştir. Bu süreçte; bilgi, tecrübe, fikir ve desteklerini benden esirgemeyen, yaptığım çalışmaların her aşamasında yanımda olan sayın danışman hocam Doç. Dr. Aslan Deniz KARAOĞLAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Transformatörler hakkında edindiği bilgi ve tecrübeyi aktararak teze katkı sağlayan Elektrik & Elektronik Mühendisi Mustafa Atahan USLU'ya teşekkür ederim.

Hayatım boyunca attığım tüm adımlar ve yaptığım tüm çalışmalarda yanımda olan ve desteklerini esirgemeyen annem Sevgi ÇETİN'e ve babam Mümin ÇETİN'e teşekkür ederim.

Ezgi ÇETİN

# 1. GİRİŞ

## 1.1 Problemin Tanımı

Siparişe göre proje bazlı üretim yapan işletmelerde, ürün standardizasyonunun sağlanması çok zordur. Çünkü sipariş edilen ürünlerin teknik özellikleri müşteri taleplerine göre sürekli değişmektedir. Bu sebeple üretilen ürünlerin işlem süreleri çeşitlilik göstermektedir. Mevcut durumda uygulama yapılan işletmede siparişlerin üretim süreleri ve termin süreleri, müşterilerce talep edilen teknik özelliklere, üretim kısıtlarına (hammadde, işçilik, makine vb.) ve değişkenlik gösteren atölye koşullarına göre tahmini olarak belirlenmektedir. Çünkü belli başlı sınırlı sayıdaki standart ürünün dışındaki pek çok ürüne ait üretim, proje bazlı çalışılması nedeniyle aslında işletmede ilk defa üretilecek bir ürün niteliği taşımaktadır. Belirlenen bu tahmini sürelere uygun olarak sipariş edilen ürünlerin her biri, birer iş emri ile uygun istasyonlara atanmaktadır. İstasyonlar ile bunlara servis veren taşıma araçları; farklı kapasite ve işlem kabiliyetlerine sahip olduğundan dolayı; çizelgeleme yaparken siparişlerin teknik özelliklerini de dikkate almak gerekmektedir ki bu da çizelgeleme kısıtlarını oluşturmaktadır. Aksi takdirde, atölyede dengesiz iş yükü dağılımına bağlı verimsiz çalışma ve bunun yanında kuyrukta bekleyen iş emirlerinin beklenen ile gözlenen tamamlanma zamanları arasında büyük sapmalar gözlenebilmektedir. Birbirinden farklı teknik özelliklere sahip ürünlerin, istasyonlara atanması bu tip üretim yapan işletmelerde karşılaşılan önemli problemlerden biridir. Bulunabilen en uygun sipariş çizelgesinin belirlenmesi, katma değersiz işçilik zamanlarının ve maliyetlerin düşmesinin yanı sıra verimliliğin artmasını sağlayacaktır.

Bu tezde, MATLAB yazılımı ile kodlanmış yapay arı kolonisi algoritması kullanılarak üretime verilmek üzere kuyrukta bekleyen sipariş listesi için bulunabilen en uygun sipariş çizelgesi belirlenmiştir. Amaç, siparişlerin istasyonlara dengeli bir biçimde atanmasını sağlayarak, kuyrukta bekleyen tüm siparişlerin toplam tamamlanma zamanını minimize etmektir.

Literatürde; çizelgeme konusunda daha önce yapılmış çalışmalar incelendiğinde, çeşitli çözüm yöntemlerinin kullanıldığı görülmüştür. Bu yöntemler; kural tabanlı çizelgeleme yöntemleri, kesin çözüm veren algoritmalar ve yaklaşık çözüm veren algoritmalar olmak üzere üç temel sınıfa ayrılmakla birlikte, kendi içinde çok sayıda alt alana ayrılmaktadır. Kural tabanlı çizelgeleme yöntemleri; EDD (Earliest due date- En erken teslim tarihi), SPT (Shortest processing time- En kısa işlem süresi), LPT (Longest processing time- En uzun işlem süresi), FCFS (First come first served- İlk sırada işlem gören işin ilk sırada servis edilmesi), LCFS (Last come first served - Son sırada işlem gören işin ilk sırada servis edilmesi), WSPT (Weighted shortest processing time - Ağırlıklandırılmış en kısa işlem süresi), CR (Critical ratio - Kritik oran) olarak sınıflandırılır (Alharkan, 2005).

Kesin çözümlü çizelgeleme algoritmaları; doğrusal programlama, doğrusal olmayan programlama ve dinamik programlama gibi çözüm yöntemleridir. Yaklaşık çözüm veren algoritmalar ise sezgisel algoritmalar olarak ifade edilirler. Sezgisel algoritmalar en yaygın kullanılanlar; genetik algoritma, yapay arı kolonisi algoritması, tavlama benzetimi, karınca kolonisi algoritması, tabu arama algoritması, parçacık sürü optimizasyonu, ısıl işlem algoritması ve diferansiyel gelişim algoritması gibi algoritmalar (Erdoğan, 2016).

Söz konusu olan probleme ait uygulama, transformator kazanı üretimi yapan bir kaynak atölyesinde gerçekleştirilmiştir. Atölyeye gelen siparişler, geliş sırası ve işletmeye özgü kısıtlamalar dikkate alınarak istasyonlara paylaştırılmaktadır. İzlenen bu yöntem, siparişlerin dengeli şekilde atanmamasına ve zaman zaman teslim tarihinden sapmalara sebebiyet vermektedir. Bu yüzden kaynak atölyesinde siparişlerin toplam tamamlanma zamanını minimize edecek uygun bir sipariş çizelgesine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu tezde, bulunabilen en uygun sipariş çizelgesinin belirlenmesinde sezgisel yöntemlerden yapay arı kolonisi algoritması kullanılmıştır.

## **1.2 Çalışmanın Amaçları**

Bu tezde; siparişe göre proje tipi transformatör kazanı imalatı gerçekleştiren bir atölyede, dinamik atölye koşulları altında toplam tamamlanma zamanını minimize edecek şekilde mevcut siparişlere ait bulunabilen en uygun sipariş çizelgesinin yapay arı kolonisi algoritması kullanılarak oluşturulması ve siparişlerin istasyonlara atanması amaçlanmıştır. Yapay arı kolonisi algoritması kullanılarak elde edilen sipariş çizelgesinin, işletmenin mevcut karar verme süreçlerini hızlandırması beklenmektedir. Sipariş çizelgesi elde edilirken, kaynak kullanım oranları ve dengeleri de optimize edilerek istasyonlardaki sorunlar azaltılması ve siparişlerin termin tarihlerinin de kısalması sağlanacaktır. Ürünlerin üretim sürelerinde gerçekleşecek iyileşme sonrasında istasyonların verimliliği artacak ve aynı sürede daha fazla ürünün üretimi gerçekleştirilebilecektir.

## **1.3 Çalışmanın Kapsamı, Kısıtlar ve Varsayımlar**

Proje bazlı siparişe göre emek yoğun üretim yapan işletmelerde - seri üretimden farklı olarak - siparişin teknik özelliğine göre değişkenlik gösteren işlem süreleri gözlenmektedir. Dolayısıyla işlerin gerçek işlem süreleri emek yoğun çalışma nedeniyle olasılık dağılımı ile açıklanabilmektedir. Ancak yapay arı kolonisi algoritmasının probleme uygun şekilde adapte edilebilmesi için işlem süreleri olasılık dağılımı olarak değil, deterministik süreler olarak alınmıştır. Gelecek çalışmalarda stokastik işlem süreleri ile benzer problem çözümleri üzerine bu alanda çalışan araştırmacılarca çalışmalar yapılabilir.

Bu tezde, çeşitli özellikte üretilmiş olan transformatör kazanlarının işlem süreleri ve teknik özellikleri gibi istatistiksel çalışmalar sonucunda elde edilmiş olan veriler doğrultusunda yapay zekâ tekniklerinden yapay arı kolonisi algoritması kullanılarak yapılan bir sipariş çizelgeleme çalışması sunulmaktadır.

### **Kısıtlar;**

- Çeşitli kapasite kısıtlarına sahip 14 adet istasyonunun bulunması,
- Çeşitli teknik özelliklere sahip 12 adet siparişin bulunması,
- Sipariş edilen transformatör kazanlarından; ağırlığı 8 tonun altında olanlar K1, K2, K3 kodlu kaynak istasyonlarında işlem görebiliyorken, ağırlığı 8 ton ve üzerinde olan transformatör kazanlarının K4, K5 ve K6 kodlu kaynak istasyonlarında işlem görebilmesi, (İstasyon kodları ve yerleşimi Bölüm 4 - Şekil 4.1'de verildiği gibidir.)
- K1, K2 ve K3 kodlu kaynak istasyonlarının uzunluğu 5 metre iken; K4, K5 ve K6 kodlu kaynak istasyonlarının uzunluğunun 10 metre olması,
- T1 ve T2 kodlu yağ sızdırmazlık test noktaları 8 tonun altındaki ağırlıkları kaldırabilecek kapasitedeki vinçlerin bulunduğu hatta bulunurken, T3 ve T4 kodlu yağ sızdırmazlık test noktalarının 8 ton ve üzerindeki ağırlıkları kaldırabilecek kapasitedeki vincin bulunduğu hatta yer alması,
- Y1 ve Y2 kodlu boya öncesi yüzey hazırlama (kumlama) istasyonları 8 tonun altındaki ağırlıkları kaldırabilecek kapasitedeki vinçlerin bulunduğu hatta bulunurken, Y3 ve Y4 kodlu boya öncesi yüzey hazırlama (kumlama) istasyonlarının 8 ton ve üzerindeki ağırlıkları kaldırabilecek kapasitedeki vincin bulunduğu hatta yer alması.

### **Varsayımlar;**

- İşlem sürelerinin önceden belirli olduğu,
- Aynı istasyonda, işlem gören mevcut iş tamamlanmadan sıradaki işin başlayamaması (kesikli iş yapılamaması);
- Malzeme tedarik sürecinin üretimi aksatmayacak şekilde sorunsuz yürütüldüğü varsayılmaktadır.

## **1.4 Çalışmanın Özgün Katkısı**

Literatürde daha önceden yapılmış olan esnek atölye tipi çizelgeme çalışmalarında; işlerin üretim hatlarında işlenme süreleri, gecikme ve makinelerin

boşta bekleme süreleri, işletmelerin sahip olduğu çeşitli kaynak kısıtları göz önüne alınarak işlerin üretim hatlarına dengeli ve verimli şekilde yerleşimi ve toplam tamamlanma zamanlarının tespiti üzerine yoğunlaşmıştır. Yapılan akademik çalışmalarda problem çözme teknikleri olarak; sezgisel ve meta sezgisel algoritmalar, bulanık çizelgeme modelleri, yapay sinir ağları ve yapay zekâ sistemleri, dinamik esnek atölye tipi çizelgeme teknikleri, genetik tabanlı algoritmalar ve simülasyon tekniklerinden yararlanılmıştır.

Literatüre bakıldığında; sezgisel ve meta - sezgisel yöntemlerin çizelgelemede en çok kullanılan problem çözme tekniklerinden olduğu görülmektedir. Yapay zekâ optimizasyon yöntemleri; klasik problem çözme yöntemlerinin yetersiz kaldığı büyük boyutlu, karmaşık yapılı, çok değişkenli dinamik üretim sistemlerinde yaygın problem çözümleri olarak kullanılmaktadırlar. Yapay arı kolonisi algoritması ise; 2000'li yılların başında geliştirilmiş olup, başarılı ve verimli sonuçlar elde edilebilen yapay zeka optimizasyon yöntemlerinden biridir.

Bu tezde, transformatör kazanı imalatı gerçekleştiren bir atölyeye ait çizelgeleme problemini çözmek amacıyla yapay zeka optimizasyon yöntemlerinden yapay arı kolonisi algoritması kullanılmıştır. Bu algoritmanın temel çalışma mantığı, rastgele yapılan seçimlere dayanmaktadır. Yapay arı kolonisi algoritmasına göre; en iyi çözümü bulmak için, rastgele yapılan atamalar sonucunda oluşturulan başlangıç popülasyonundan yine rastgele olarak farklı olasılık değerlerine sahip kombinasyonlar elde edilmeye çalışılmaktadır. Yapılan bu çalışmada ise; literatüre yapılan özgün katkı olarak başlangıç popülasyonunun ve bu popülasyondan bulunabilen en iyi çözüm kümelerinin tamamen rassal olarak değil, belirli kısıtlar altında yapılan atamalar sonucunda oluşturulmasından bahsedilmektedir.

## 2. LİTERATÜR TARAMASI

Allahverdi vd., (1999) tek makine, paralel makine, akış tipi ve atölye tipi çizelgeleme problemlerinde kurulum (hazırlık) sürelerinin ve maliyetlerinin dikkate alınarak yapılan çalışmalarla ilgili kapsamlı bir literatür araştırması sunmuşlardır. Chen vd., (1999) bir esnek atölye tipi çizelgeleme problemini, işlerin toplam tamamlanma zamanı kriterine göre çözmek için yeni bir genetik algoritma geliştirmişlerdir. Problem için çözümlerin kromozomlarla gösterilişi rotalama ve sıralama bölümlerinden oluşmaktadır. Genetik operatörler aracılığıyla yüksek kaliteli çizelgeler türetilmiştir. Xia ve Wu (2005); çok amaçlı bir esnek atölye tipi çizelgeleme problemini çözerek işlerin toplam tamamlanma zamanını minimize etmek için, parçacık sürü optimizasyonu ile tavlama benzetimi algoritmalarını birleştirerek alternatif melez bir algoritma geliştirmişlerdir. Hesaplamalar sonucunda, geliştirilen algoritmanın büyük ölçekli esnek atölye tipi çizelgeleme problemlerinde etkin şekilde uygulanabildiği görülmüştür. Gharbi ve Haouari (2005); özdeş paralel makinelerde çizelgeleme probleminde, işlerin tamamlanma zamanını minimize etmek için bir dal-sınır algoritması önermişlerdir. Her bir makine ve iş için kabul edilen kısıtlar; boşta kalma süreleri ve teslim süreleridir. Zribi vd., (2006) bir esnek atölye tipi çizelgeleme probleminde, üretim ve tedarik süreçlerinde meydana gelen toplam gecikmeyi minimize etmek amacıyla iki ayrı yaklaşım önermişlerdir. Atama ve sıralama işlemleri için geliştirilen bu yaklaşımlar, sezgisel ve genetik algoritma temellidir. Biskup (2008), öğrenme etkilerinin ele alındığı tüm çizelgeleme problemlerini dikkate almıştır. Öğrenme etkisi kavramında, bir işçinin kendisine verilen görevi tekrarlaması halinde daha kısa sürelerde tamamlayabileceği tartışılmaktadır. Xing vd., (2008) bir esnek atölye tipi çizelgeleme problemi için iki katmanlı karınca kolonisi algoritması geliştirmişlerdir. Üst katmandaki karınca kolonisi algoritması, işlerin makinelere ideal biçimde atanmasını amaçlamaktadır. Alt katmandaki karınca kolonisi algoritması ise, en uygun sıralamanın elde edilmesini amaçlamaktadır. Zribi vd., (2008) esnek imalat sistemlerinde çok amaçlı

paralel makinelerle atölye tipi çizelgeleme problemi üzerine çalışmışlardır. Makinelerin kullanılabilirlik kısıtları dikkate alınmıştır. Problem, atama ve sıralama olmak üzere iki bölüme ayrılmıştır. İlk kısımda, öncelik kuralları ve yerel arama algoritması temelli bir sezgisel kullanılmıştır. İkinci bölümde ise çözüm için genetik algoritma kullanılmıştır. Hmida vd., (2010) her bir işlemin aday makinelerin sınırlı alt kümelerinden seçilen makinelerde işlendiğini varsayan bir esnek atölye tipi çizelgeleme problemi üzerinde çalışmışlardır. Problemin amacı, işlerin toplam tamamlanma zamanını minimize ederek sırasıyla atama ve sıralama işlemlerini gerçekleştirmektir ve bunun için de tırmanma tutarsızlığı arama yaklaşımı ile çeşitli komşuluk yapılarını önermişlerdir. Sun ve Li (2010), çoklu bakım faaliyetleri gerçekleştirilen iki özdeş paralel makine çizelgeleme problemi için bir sezgisel algoritma önermişlerdir. Bakım faaliyetlerinin toplam tamamlanma zamanının en aza indirilmesi iki ayrı senaryoya göre gerçekleştirilmiştir. İlk senaryoya göre işler, bakım faaliyetlerinin periyodik olarak yapıldığı varsayımı altında özdeş ve paralel makinelere atanmıştır. İkinci senaryoya göre ise, işler ve bakım faaliyetlerinin beraber yürütüldüğü varsayımı altında makinelere atamalar yapılmıştır. Xing vd., (2011) esnek atölye tipi çizelgeleme problemleri için çoklu popülasyon etkileşimli evrimsel bir algoritma önermişlerdir. Bu algoritmada; her bir popülasyonu bağımsız olarak geliştirmek için, karınca kolonisi algoritması ile farklı konfigürasyonlarda genetik algoritma kullanılmıştır. Hsu vd., (2011) her bir makine için tam olarak bir bakım faaliyeti düzenlenen paralel makine çizelgeleme problemini incelemişlerdir. Bu çalışmaya göre; bakım faaliyetlerinin işlem süresi, başlangıç zamanına göre doğrusal olarak artmıştır. Başka bir deyişle, bakım faaliyetleri giderek kötüleşmiştir. Toplam makine iş yükünün polinom zamanında ve işlerin toplam tamamlanma zamanını minimize edecek şekilde optimal olarak çözülebileceği belirtilmiştir. Sterna (2011), çizelgeleme problemlerini, işlerin toplam tamamlanma zamanı ile teslim zamanı arasındaki farkları en aza indirme amacı ile değerlendirmiştir. Wang ve Wei (2011), özdeş paralel makinelerde yapılan bakım faaliyetlerinin kötüleşmesini incelemişlerdir. Bakım faaliyetlerinin tamamlanma süreleri ve bekleme sürelerindeki mutlak farklılıkları en aza indirme amacını gütmüşlerdir. Her iki problemin de, polinom zamanında çözülebilir olduğunu ortaya koymuşlardır. Wang vd., (2012) bir esnek atölye tipi çizelgeleme probleminde, işlerin toplam tamamlanma zamanını ve



toplam iş yükünü minimize etmek amacıyla pareto tabanlı bir yapay arı kolonisi algoritması önerilmiştir. Dalfard ve Mohammadi (2012), çok amaçlı paralel makinelerde yapılan bakım faaliyetlerini çizelgelemek için genetik ve tavlama benzetimi algoritmalarını önermişlerdir. Lingo programı kullanılarak geliştirilen yazılımdan elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Karimi vd., (2012) esnek atölye tipi çizelgeleme problemlerinde yerel optimumdan kurtulmak için komşuluk yapısındaki sistematik bir değişikliği kullanan değişken komşuluk arama algoritmasını önermişlerdir. Bu algoritmanın yaptığı tüm yerel ve global aramalar rastgele olduğundan, söz konusu çalışmada değişken komşuluk arama algoritmasına bilgi modülü eklenmiştir. Önerilen bilgiye dayalı değişken arama algoritmasında, bulunan iyi çözümlerin bilgisi bilgi modülü tarafından çıkarılıp algoritmaya geri beslenmektedir. Bu durum, algoritmayı daha verimli hale getirmiştir. Wang vd., (2012) bir esnek atölye tipi çizelgeleme probleminde, işlerin toplam tamamlanma zamanını minimize etmek amacıyla etkili bir yapay arı kolonisi algoritması önermişlerdir. Neto ve Filho (2013), karınca kolonisi algoritması kullanılarak çözülen çizelgeleme problemlerini incelemişlerdir. Wang vd., (2013) bulanık esnek atölye tipi çizelgeleme problemini çözmek için hibrit bir yapay arı kolonisi algoritması önermişlerdir. Bu algoritmayla bulunan en iyi çözüm ile, değişken komşuluk arama algoritması temelli bir yerel arama gerçekleştirmişlerdir. Taguchi deney tasarımı yöntemine dayanarak, parametre ayarının etkisi araştırılmış ve uygun parametre değerleri önerilmiştir. Sayısal test sonuçları ve mevcut bazı algoritmalarla yapılan karşılaştırmalar önerilen yaklaşımın etkinliğini göstermektedir. Ayrıca, yerel arama ve arama olmadan hibrit yapay arı kolonisi algoritması arasında yapılan karşılaştırma, hibrit yapay arı kolonisi algoritması tabanlı arama ve değişken komşuluk arama algoritması tabanlı kullanımın etkinliğini göstermektedir. Yang (2013), paralel makinede kötüleşen bakım faaliyetlerini çizelgeleme probleminde tamamlanma zamanının en aza indirilmesi için polinom zamanında bir çözüm yapılabileceğini belirtmiştir. Mousakhani (2013); kurulum/hazırlık sürelerinin sıra bağımlı olduğu esnek atölyelerde yapılan çizelgeleme faaliyetlerinde toplam gecikmeyi minimize etmeyi amaçlamıştır. Bunun için de karışık tamsayı doğrusal programlama ile bir matematiksel model önermiş ve literatürdeki mevcut modellerle karşılaştırmıştır. Önerilen matematiksel model mevcut modelden, hem boyut

karmaşıklığı hem de hesaplama karmaşıklığı açısından daha iyi performans göstermiştir. Sonrasında, yinelenen yerel aramaya dayanan etkili bir meta-sezgisel algoritma önerilmiş ve aynı problem için daha önce önerilen tabu arama ve değişken komşuluk arama algoritmaları ile karşılaştırılmıştır. Tüm sonuçlar önerilen algoritmanın mevcut olanlara karşı üstünlüğünü göstermiştir. Thammano ve Phu-ang (2013), yerel arama ve yapay arı kolonisi algoritmalarını birleştirerek yeni bir öneride bulunmuşlardır. Mevcut işlerin makinelere optimum şekilde atanmalarını sağlamak için hiyerarşik çözüm yaklaşımı geliştirmişlerdir. Harmonik arama algoritmasını, başlangıç popülasyonunda çeşitlilik elde etmek için kullanmışlardır. Sonrasında komşuluk araması yapılırken, değişik kombinasyonlar elde etmek adına yerel arama algoritmalarını uyarlamışlardır. Yapılan aramalar sırasında yerel optimum noktalarına denk gelmemek için tavlama benzetimi algoritması kullanmışlar ve geliştirilen algoritmanın performansını iyileştirmek için çaprazlama operatörleri önermişlerdir. Abdullah ve Nezhad (2014), bulanık işlem süreleri kullanarak yapılan atölye tipi çizelgeleme çalışmalarını bir araya getirmişlerdir. Abdullah ve Nezhad (2014); bir atölye tipi çizelgeleme probleminde, işlerin toplam tamamlanma zamanını minimize etmek amacıyla optimum çözüme en yakın çözüm üreten sağlam bir akıllı problem çözme tekniği önermişlerdir. Önerilen tekniğin temel avantajı; başlangıç popülasyonunda en uygun çözümü gözlemleme kabiliyetinin olmasıdır. Deneysel sonuçlar; Kuczapski, Yahyaoui, Moghaddam, Giffler ve Thompson'ın en yeni dört başlatma tekniği ile karşılaştırıldığında, geliştirilen algoritmanın hızlı ve akıllı bir sezgisel algoritma olduğu görülmüştür. Li vd., (2014) çok nesneli esnek atölye tipi çizelgeme probleminde, bakım faaliyetlerinin tamamlanma zamanını, toplam iş yükünü ve en fazla iş ile görevlendirilmiş makinenin iş yükünü en aza indirmek amacıyla tabu arama ve yapay arı kolonisi algoritmalarını entegre etmişlerdir. Önerilen algoritma, temsili kıyaslama örnekleri üzerinde test edilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Udaiyakumar ve Chandrasekaran (2014), işlerin toplam tamamlanma zamanını (Cmax) en aza indirmek amacıyla bir atölye tipi çizelgeleme problemi üzerinde çalışmışlardır. Ateş böceklerinden ilham alınarak geliştirilen ateş böceği algoritması kullanılmıştır. Önerilen algoritma, 25 kıyaslama örneği üzerinde test edilmiş ve sonuçlar, literatürdeki çalışmalarla neredeyse aynı etkinlik derecesinde bulunmuştur.

Jia ve Hu (2014), çok amaçlı bir uygunluk fonksiyonu ile esnek atölye tipi çizelgeleme problemiyle ilgili çalışmalar yapmışlardır. İki farklı sezgisel yaklaşım önerilmiştir. İlk olarak, tabu arama algoritmasıyla birlikte bir yol tanımlama (bağlantı yolu) algoritması geliştirilmiştir. Sonrasında, algoritmanın verimliliğini arttırmak için bir yoğunlaştırılmış arama yapılmıştır. Önerilen yöntemlerin ikisi de literatürdeki kıyaslama örneklerine uygulanmıştır. Sonuçlar, ilk algoritmanın rekabetçi olduğunu ve ikinci algoritmanın rakiplerine karşı çok daha iyi bir performans gösterdiğini ortaya koymuştur. Gao vd., (2015) bir esnek atölye tipi çizelgeleme probleminde, işlerin toplam tamamlanma zamanını minimize etmek amacıyla iki aşamalı bir yapay arı kolonisi algoritması önermişlerdir. Geliştirilen karma sezgisel algoritma; daha önceden iki önerilmiş olan 6 basit sezgisel algoritmayla karşılaştırıldığında, algoritmanın çizelgeleme ve yeniden çizelgeleme faaliyetlerinde etkili olduğu görülmüştür. Kaya ve Fıglalı (2016); esnek atölye tipi çizelgeleme problemlerinin meta-sezgisel yöntemlerle çözümüne dair bir literatür araştırması yapmışlardır. Gao vd., (2016) bulanık işlem süreleri ile esnek atölye tipi çizelgeleme problemini ele almışlardır. İşlerin toplam bulanık tamamlanma zamanının ve toplam bulanık makine iş yükünün minimize etmek amacıyla geliştirilmiş yapay arı kolonisi algoritmasını önermişlerdir. Meng ve Pan (2018); bir esnek atölye tipi çizelgeleme probleminde, örtüşen işlemlerin toplam tamamlanma zamanını minimize etmek amacıyla hibrit yapay arı kolonisi algoritması önermişlerdir. Önerilen algoritma ile değiştirilmiş bir göçmen kuş optimizasyon algoritması birleştirilerek global ve yerel arama performansı iyileştirilmiş olup etkin sonuçlar elde edilmiştir. Karaoğlan ve Çetin (2019); bir atölye tipi çizelgeleme probleminde, siparişlerin toplam tamamlanma zamanını minimize etmek amacıyla yapay arı kolonisi algoritmasını kullanarak bulunabilen en uygun sipariş çizelgesini oluşturmuşlardır.

Literatürde yapay arı kolonisi algoritması kullanılarak yapılan esnek atölye tipi çizelgeleme çalışmaları incelendiğinde; problem girdileri olarak işlem süreleri, makinelerin kurulum/hazırlık ve bakım süreleri, bulanık işlem süreleri kullanılmıştır. Problem çıktıları olarak ise; işlerin toplam tamamlanma zamanı ve bulanık toplam tamamlanma zamanı, toplam makine iş yükü, toplam akış zamanı ve toplam gecikme süresi elde edilmiştir.

Bu tezde, transformatör kazanı imalatı gerçekleştiren bir atölyedeki süreçler incelenerek, siparişlerin mevcut istasyonlara dengeli bir şekilde paylaşılması amaçlanmıştır. Bunun için yapılan esnek atölye tipi çizelgeleme çalışmasında, yapay arı kolonisi algoritması kullanılmıştır. Probleme özgü kısıtlamalar ve varsayımlar doğrultusunda girdi olarak işlem süreleri kullanılmış olup çıktı olarak ise, istasyon bazlı işlem süreleri ve siparişlerin toplam tamamlanma zamanı elde edilmiştir. Yapay arı kolonisi algoritması kullanılarak geliştirilen yazılım aracılığıyla kısa sürelerde verimli sonuçlara ulaşılmıştır. Literatür taramasına ait özet kıyaslama tablosu EK-1’de verilmiştir.

### **3. MATERYAL VE METOT**

Bu tezde; transformatör kazanı imalatı gerçekleştiren bir kaynak atölyesinde, sahip olunan mevcut kaynaklar ile belirli kısıtlar altında, sipariş edilen işlerin dengeli biçimde istasyonlara paylaştırılması ve siparişlerin toplam tamamlanma zamanının minimize edilmesi amaçlanmaktadır. Sipariş edilen ürünlerin üretiminin tam zamanında gerçekleştirilmesi için istasyonlara en uygun atamaların yapılması çizelgeleme problemlerinin konusudur. İzleyen bölümde; öncelikle üretim sistemleriyle ilgili bilgi verilmiş, sonrasında bu sistemlerde kullanılan çizelgeleme yöntemlerinden bahsedilmiştir.

#### **3.1 Üretim Sistemi Tipleri**

Genel tanımıyla üretim sistemi; işletmeye özgü kaynaklar ve kısıtlar çerçevesinde belirli bir amaç doğrultusunda gerçekleştirilen faaliyetler sonucunda elde edilen somut çıktılardır. Üretim sistemleri, hiyerarşik bir yapı göstermektedirler. Bu yapı; belirli talepler ve kısıtlar altında, üretim kapasitesi ve kabiliyeti sınırlı olan koşullarda kabul edilebilir çözümler üretmektedir. Gelişmiş teknolojilere sahip dinamik üretim ortamlarında ise hiyerarşik yapı yetersiz kalmaktadır. Bu ortamlarda; efektif çözümler elde edilebilmesi için, aşamaların azaltılması ve etkileşimin artırılması gerekmektedir. Tüm aşamaların ortadan kaldırıldığı ve birbiriyle ilişkili birimlerin olduğu yapılar, heterarşik olarak adlandırılırlar (Gökşen, 2003). Üretim sistemleri; sürekli üretim ve kesikli üretim sistemleri, proje tipi üretim, atölye tipi üretim ve hücresele üretim olarak sınıflandırılmaktadırlar (Gökşen, 2003).

### *Sürekli üretim sistemleri*

Ürün çeşidinin az, miktarının yüksek ve talebin sürekli olduğu üretim ortamlarında görülen üretim sistemleridir. Akış tipi üretim ve kitle üretimi olmak üzere iki grup altında incelenmektedirler (Tanrıtanır, 1990). Bu tip üretim sistemleri aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

#### *Akış tipi üretim*

Üretilen standart ürünlere olan talebin çok fazla olduğu durumlarda kullanılan bir sürekli üretim sistemidir. Bu üretim sistemi; ürünlerde ve taleplerde önemli değişiklikler olmadığında ekonomiktir. Aksi halde değişkenlik gösteren durumlara karşı esneklik gösterememektedir. Talep miktarlarının uzun vadeli ve dengeli olması gerekmektedir. Kullanılan makine ve ekipmanların hızları ve kapasite kullanım oranları yüksektir. Bu üretim tipinde; operasyon sırası ardışık olarak ilerlemektedir. İşler, ilgili istasyonlara öncelik sırasına göre gelip işlem görmektedirler. İş istasyonları belirli bir sıraya göre yerleştirildiğinden istasyonlar arası taşıma miktarları ve süreleri, kuyrukta bekleme süreleri ve stok miktarları azdır. Bu duruma paralel olarak işlerin toplam tamamlanma zamanı azalır üretim miktarı artacağından, akış tipi yerleşim düzeninde verimlilik oranı yüksek çıkmaktadır. Yeni bir ürün tasarımı gerektiğinde ise, seri tip üretim yapan işletmeler çeşitli zorluklar yaşamaktadır. Üretilen ürünlerde meydana gelen herhangi bir değişiklik, tüm üretim hattının yeni düzenlenmesini gerektirmektedir. Bakım-onarım ve arıza durumlarında üretim hattı durma aşamasına gelmektedir. Söz konusu durum, hat dengeleme sorunlarını da beraberinde getirmektedir (Tanrıtanır, 1990).

#### *Kütle (Kitle) üretimi*

Yoğun talep altında yüksek miktarlarda standart ürün üretimi yapan bir sürekli üretim sistemidir. Akış tipi üretim sistemi ile aynı özellikleri göstermesinin yanı sıra kütle üretiminde gerekli durumlarda; yerleşim düzeni, makine-ekipman ve üretilen ürün değişikliği yapılabilmektedir. Akış tipi üretim sisteminde ise farklı özelliklerde ürün üretmek çok zor ve masraflıdır (Tanrıtanır, 1990).

### ***Kesikli üretim sistemleri***

Ürün çeşidinin fazla, miktarının az ve talebin çoğunlukla kesikli olduğu üretim ortamlarında görülen üretim sistemleridir. Siparişe göre üretim ve parti üretimi olmak üzere iki grup altında incelenmektedirler (Tanrıtanır, 1990). Bu tip üretim sistemleri aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

#### *Siparişe göre üretim*

Siparişe göre üretim sisteminde, ürün çeşitliliği yüksek olduğundan üretim miktarı düşüktür. Üretimde tekrar sayısı yok denecek kadar azdır. Birbirinden farklı özelliklerde ürünler üretildiği için değişik fonksiyonlara sahip makine ve tezgahlar kullanılmaktadır ve nitelikli işgücü gereksinimi fazladır. Bu üretim sisteminin dezavantajları; düşük makine ve işgücü kullanımı, farklı talep cinsi ve miktarı, denetleme sıkıntısı ve fazla stoktur. Siparişe göre üretim sisteminde; bir kere üretilen ürünün bir daha üretilmemesi, talebe bağlı üretim yapılması ve ürünlerin belirli periyotlarda üretilmesi durumları görülmektedir. Sadece bir kere yapılan üretim dışındaki diğer üretim türleri, atölye tipi üretim sistemine girmektedir. Aynı üründen birçok kez üretilen sistemlerde; iş etüdü, üretim kontrol ve planlama çalışmalarının gerçekleştirilmesi ve faydalı bilginin güvenli şekilde arşivlenmesi gerekmektedir (Tanrıtanır, 1990).

#### *Parti üretimi*

Parti tipi üretim sisteminde; ürünler parti biçiminde üretilmektedir. Talebe bağlı üretim ve sürekli talep durumları mevcuttur. Talepler siparişe göre üretimden farklı olarak fazla değişiklik göstermemektedir. Bu üretim sisteminin en belirgin özelliği, stoklu çalışmasıdır. Bir partideki ürünler tamamen tükenmeden yeni parti üretimine başlanmaktadır. Bu sistemin dezavantajları; parti boyutlarının ve miktarlarının belirlenmesindeki zorluk ve üretim çizelgeleme sorunlarıdır. Parti üretiminde de siparişe göre üretimde olduğu gibi üç farklı durumla karşılaşmaktadır. Parti boyutlarının büyümesi, miktarlarının artması ve sipariş

periyotlarının düzenli hale gelmesi; iş etüdü, üretim kontrol, çizelgeleme ve planlama çalışmalarından istenilen sonuçların elde edilmesini sağlamaktadır (Tanrıtanır, 1990).

#### *Atölye tipi üretim*

Ürün çeşitliliğinin fazla olduğu siparişe göre üretim yapan işletmeler için uygun yerleşim tipidir. Bu üretim sistemi, kesikli üretim sisteminin alt bileşenidir. Birbirinden farklı siparişlere ait iş emirleri, kısıtlar ve varsayımlar dahilinde istasyonlara atanmaktadırlar. Tüm istasyonların dolu olması halinde, işler kuyrukta beklemektedirler. Kuyrukta bekleme ve taşıma sürelerinden dolayı işletmenin stok miktarı fazladır. Bu süreler, işlerin toplam tamamlanma zamanının da artmasına neden olmaktadır. Üretim miktarı az ve çeşitlilik fazla olduğundan, karmaşık bir üretim sistemi söz konusudur. Sistemin karmaşıklığı, üretim planlama ve kontrol faaliyetlerinin etkinliğini düşürmektedir (Tanrıtanır, 1990, Gökşen, 2003).

#### *Proje tipi üretim*

Büyük boyutlu ve sınırlı hareket yeteneği bulunan son ürünlerin üretimini yapan işletmelerde kullanılan yerleşim tipidir. Proje tipi üretimde; makine, ekipman ve malzemeler çok fazla ve çeşitli olmakla beraber ana ürün haricindeki tüm bileşenler hareketli yapıya sahiptir. Bu üretim tipinde; takım çalışmasının önemi büyüktür. İşletmenin ilgili bölümleri senkronize olarak çalıştıklarında işlerin toplam tamamlanma zamanının kısalması sağlanmaktadır. Projeye özel değişen üretim koşulları çok sayıda kalifiye çalışan gerektirmektedir. Bu durum, makine-ekipman ve malzeme maliyetlerinin yanı sıra personel maliyetlerini de arttırmaktadır. Maliyetler ciddi boyutlara ulaşabildiğinden, yüksek kapasiteli ve hacimli ürünler üreten işletmelere özgü bir üretim sistemidir. Bu özelliğinden dolayı sanayide, seri ve atölye tipi üretim yapan işletmeler gibi geniş uygulama alanlarına sahip değildir (Tanrıtanır, 1990).

Buraya kadar bahsedilen üretim sistemi tipleri gelenekseldir ve gelişen sanayi ve üretim koşullarında yetersiz kaldıkları durumlar ortaya çıkmaktadır. İzleyen



bölümde, geleneksel sistemlere alternatif olarak geliştirilen yalın üretim sistemi teknikleri hakkında bilgi verilmiştir.

### *Yalın üretim sistemi*

Yalın üretim sistemi; israflardan kaçınarak verimliliği arttırmayı hedefleyen bir sistemdir. İrafları; makine kullanım oranının düşük olması, fazla taşıma ve bekleme zamanları, değer katmayan hareketler ve işlemler, gereğinden fazla miktarda yapılan üretim olarak ifade etmek mümkündür. İrafların sebepleri olarak; üretim planlama ve kontrol süreçlerinin iyi yönetilememesi, kurulum ve devreye alma sürelerinin uzun olması, yeterli sayıda kalifiye personel çalıştırılmaması, bakım faaliyetlerinin düzenli olarak gerçekleştirilmemesi ve yerleşim düzeninden kaynaklanan sorunlar gösterilmektedir (Gökşen, 2003).

Yalın üretim sistemini etkin şekilde uygulanabilir hale getirmek için birçok yöntem geliştirilmiştir. Bu teknikler; grup teknolojisi ve hücreli üretim sistemi, 5S, otonomasyon (jidoka), itme-çekme (kanban) sistemi, poka-yoke, toplam üretken bakım (total productive maintenance), tam zamanında üretim (just-in-time), kalite çemberleri, iş döngüsü (shojinka), üretim dengeleme (heijunka), deney tasarımı (design of experiment), sürekli iyileştirme (kaizen), tekli dakikalarda kalıp değişimi (single minute exchange of die), 3M (muda-muri-mura), değer akış haritalama, tek parça akışı, toplam iş denetlemesi, görselleştirme (oobeya) ve u tipi yerleşim düzeni şeklinde sınıflandırılmaktadır (Turan, 2016).

### *Grup teknolojisi ve hücreli üretim sistemi*

Üretilen ürünlerin tasarım ve imalat süreçlerindeki benzerliklerden yola çıkarak gruplara ayrılması grup teknolojisi olarak adlandırılmaktadır. Bu kavram ilk Grup teknolojisinin üretim atölyelerine uyarlanmış hali ise hücreli üretim sistemidir. Grup teknolojisinin temel amacı; birbirine benzeyen parçaları ayırarak gruplar oluşturmak ve bu benzerlikten yararlanarak üretilecek ürünlerle ilgili süreçlerin etkinliğini arttırmaktır. Grup teknolojisi uygulamaları bazı aşamalardan geçerek

hayata geçirilmektedir. İlk olarak, tasarım ve imalat süreçlerinde kullanılmak üzere parçalar kendi aralarında gruplara ayrılmaktadırlar. Bu oluşturulan gruplardan benzer özelliklere sahip parçalar aynı alanda toplanmaktadırlar. İkinci aşamada, benzer parçalar içinden kullanılmayacak olanlar ayrıştırılmaktadır. Son aşamada ise, tüm süreçler için en uygun dokümanlar ve malzeme-ekipmanlar seçilmektedir (Gökşen ve Erdem, 2003).

Grup teknolojisinin; atölye kullanım alanında artış, kurulum/hazırlık (set-up) sürelerinde azalış, işlerin toplam tamamlanma zamanında azalış, taşıma ve bekleme sürelerinde azalış, stok miktarlarında azalış, yüksek kaliteli üretim, üretim planlama ve kontrol faaliyetlerinde etkinlik gibi çeşitli avantajları bulunmaktadır. Grup teknolojisinin avantajları olduğu gibi bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Bunlar; çalışanların gösterdiği direnç, süreçler için gereken yatırım ihtiyacı ve kapasite kullanım oranında görülen düşüştür (Gökşen ve Erdem, 2003).

Hücreyel üretim sisteminde; makineler hücrelere ayrılarak, parçalardan ise benzer olanlar gruplandırılarak üretime başlanmaktadır. Hücreyel üretim sisteminin atölye tipi üretime göre birçok avantajı bulunmaktadır. Bu avantajlar; planlama ve kontrol faaliyetlerinde gerçekleşen iyileşme, kurulum/hazırlık (set-up) sürelerinin kısalması, çalışanlar arası iletişimin güçlenmesi, motivasyonun artması, üretim süreçlerinde en üst kademedan en alt kademeye kadar bütün birimleri kapsayan kontrol mekanizması sayesinde hatalı ürün oranlarında görülen düşüştür. Hücreyel üretim sisteminin bazı dezavantajları da vardır. Üretim süreçlerinde esnekliğin atölye tipi üretime göre daha az olması, gereksiz parçaları ayrıştıran ve bu parçaların işlenmesini engelleyen yaklaşımı sayesinde makine kullanım oranının düşmesi ve makine sayısının artması, Makine sayısının artmasından dolayı daha sık yapılması gereken bakım faaliyetlerinin düzensiz ve seyrek yapılması hücreyel üretim sisteminin dezavantajlarıdır (Gökşen ve Erdem, 2003).

Genel olarak; grup teknolojisi ve hücreyel üretim sistemi, uygulandıkları işletmelere önemli ölçüde rekabet avantajı sağlamaktadırlar. Zamandan, kullanılan malzemelerden (stoklardan) ve yerden tasarruf ederek yüksek kalite standartlarında

üretim gerçekleştirilmektedir. Yalın üretimin yaygın uygulamalarından biri olan hücresel üretim, israfı en aza indirerek verimliliği arttırmayı amaçlamaktadır.

5s

5s, işletmelerde verimliliği arttırmak için kullanılan bir tam zamanında üretim tekniğidir. Japonca'da her biri farklı bir süreci ifade eden 'seiri', 'seiton', 'seiso', 'seiketsu', 'shitsuke' kelimelerinin baş harflerinin biraraya getirilmesiyle oluşturulmuştur. Seiri (sınıflandırma) aşamasında; gerekli ve gereksiz malzemeler birbirinden ayrılarak, gereksiz malzemeler çalışılan alandan uzaklaştırılmaktadır. Seiton (düzenleme) aşamasında; kullanılacak olan malzemeler, kullanım durumuna göre işaretlenir ve yerleştirilmektedir. Seiso (temizlik) aşamasında; verimli şekilde çalışabilmek için çalışılan alan temiz ve düzenli tutulmaktadır. Seiketsu (standartlaştırma) aşamasında; sınıflandırma, düzenleme ve temizlik aşamalarında yapılan faaliyetler standartlaştırılmaktadır. Shitsuke (süreklilik) aşamasında ise; standartlaştırılan faaliyetlerin sürekliliğini sağlamak için bir kontrol mekanizması kurulmaktadır (Turan, 2016).

*Jidoka (Otonomasyon)*

Hatalı üretimi engellemek amacıyla geliştirilmiş bir tam zamanında üretim tekniğidir. Üretim süreçlerindeki hatalı parçaları tespit edip, üretimi aksatmasına izin vermemektedir. Ürün kontrolü, arıza durumunda otomatik durma ve sinyalizasyon özelliklerine sahip makine sistemlerinin kurulmasını hedeflemektedir (Turan, 2016).

*Kanban*

İşletmelerde ilgili bölümlerin, üretilecek ürünlerin bütün süreçleri hakkında sürekli bilgi alışverişinde bulunmalarını sağlamak amacıyla itme-çekme (kanban) sistemi geliştirilmiştir. Kanban; Japonca'da kart anlamına gelmektedir. Bu kartlar; akışta geriye doğru bilgi aktararak süreçleri bütünleştirmektedirler. Bu sayede; talep edilen ürün, talep edilen miktarda ve talep edilen zamanda ara stok bulundurmaksızın

üretilmektedir. Kanban sisteminin tedarikçilere entegre edilmesi durumunda hammadde stoklu çalışmaya da gerek kalmayacaktır (Güner ve Kanat, 2006, Turan, 2016).

#### *Poka-Yoke*

Japonca'da poka; insan hatası, yoke ise önlemek anlamına gelmektedir. Poka-Yoke; insan hatalarını önlemek için uygulanan bir tam zamanında üretim tekniğidir. Poka-Yoke sisteminin temel amacı; hatalı ürün üretiminin önüne geçmektir. Bu sistem; hatanın tespit edilmesi ve önlenmesi olmak üzere iki aşamadan oluşur (Turan, 2016).

#### *Tpm (Total productivity maintenance/Toplam üretken bakım)*

Toplam üretken bakım; düzenli olarak yapılan bakım faaliyetleriyle malzemelerin ve ekipmanların ömrünü uzatarak, onları daima kullanıma hazır şekilde tutmayı amaçlamaktadır. Toplam üretken bakım faaliyetleri sayesinde; arıza durumları, beklemler ve hatalı ürün üretimi önemli ölçüde azalacağından, işletmelerin verimliliği artacak, maliyetlerinde düşüş sağlanacak ve kar oranı yükselecektir (Turan, 2016).

#### *Tam zamanında üretim (Just-in-time)*

Tam zamanında üretim sistemi; talep edilen ürünlerin, talep edilen zamanda ve miktarda müşteriye ulaştırılmasını sağlayan bir yalın üretim tekniğidir. Stoksuz çalışma prensibini benimseyerek gereğinden fazla yapılan tüm faaliyetleri yok etmeyi amaçlamaktadır (Turan, 2016).

### *Kalite çemberleri*

Kalite çemberleri; gönüllülük esasıyla belirlenen gruplar tarafından yapılan toplantılar ile işletmelerin kendilerini bir adım öteye taşımalarını sağlamak amacıyla uygulanan bir yalın üretim tekniğidir (Turan, 2016).

### *İş döngüsü (Shojinka)*

İş döngüsü, işletmelerin değişen müşteri taleplerine cevap verebilmek ve çalışanlarını geliştirmek amacıyla dönüşümlü olarak makine-ekipmanların kullanımında görevlendirdikleri esnek bir yalın üretim tekniğidir (Turan, 2016).

### *Deney tasarımı (Design of experiment)*

Deney tasarımı, bir probleme etki eden tüm faktörleri göz önünde bulundurarak yapılan istatistiksel çalışmalara verilen genel addir. Deney tasarımının genel amacı maliyeti ve kaliteyi iyileştirmektir (Turan, 2016). En yaygın kullanılan deney tasarımı yöntemleri yanıt yüzey yöntemi (response surface methodology – RSM), Taguchi ve faktöriyel tasarım (factorial design) olmak üzere 3 tanedir.

### *Üretim dengeleme (Heijunka)*

Üretim miktarlarındaki dengesizliklerden kurtulmak amacıyla geliştirilmiş bir yalın üretim tekniğidir. Ürün çeşitliliği fazla, üretim miktarları az olan işletmelerde uygulanmaktadır (Turan, 2016).

### *Kaizen*

Kaizen; Japonca'da 'kai' değişim, 'zen' iyileştirme anlamlarına gelen iki sözcüğün birleşiminden oluşan ve sürekli iyileştirme olarak ifade edilen bir tam zamanında üretim tekniğidir. Kaizen sisteminde ; küçük adımlarla başlayıp zamanla daha büyük adımlara dönüşen sürekli iyileştirme çalışmaları yapılmaktadır. Bu yüzden yapılan çalışmalarda takım çalışmasının önemi büyüktür. Güçlü bir

organizasyon yapısı ve kurum kültürü bilinci gerektirmektedir. İşletmelerde sürekli iyileştirme çalışmalarının başarıya ulaşabilmesi için; toplam kalite yönetimi kapsamında, en üst kademedен en alt kademeye kadar tüm çalışanlar kaizen faaliyetlerine katılmalıdır (Turan, 2016).

### *Smed (Single minute exchange of dies/ Tekli dakikalarda kalıp değişimi)*

Smed; temel amacı zaman israfını engellemek olan bir yalın üretim tekniğidir. Çalışma prensipleri; kalıplar arasındaki değişim esnasında; makinelerin durduğu ve çalıştığı zamanlarda yapılan işlerin analiz edilip işlerin çoğunun makineler çalıştığında yapılmasının sağlanması, kalıbın çıkarılıp değiştirildiği anda bir sonraki kalıbın da taşıyıcı araçlarla yerine konulması, kalıplar bağlanırken makinelerin ayar yapmalarına gerek kalmaması ve zaman israfından kaçınılması, iş ekipmanlarının cıvata ve vida kullanımını gerektirmeyecek şekilde yapılması, kalıpların takıldığı anda doğru konumuna ulaşması sağlanarak ayar yapmak için harcanan sürelerin ortadan kaldırılması, kalıpların kullanıldıkları makinelere yakın olacak şekilde depolanması şeklinde sıralanmaktadır (Tanık, 2010).

### *3M (Muda-muri-mura)*

Muda, fayda sağlamayan faaliyetlerden doğan savurganlıktır. Muri, makine-ekipmanlara ve çalışanlara gereğinden fazla iş verilmesi durumudur. Mura ise, mevcut iş yükünün dengeli biçimde paylaştırılmamasından kaynaklanan sorunları ifade etmektedir (Turan, 2016).

### *Değer akış haritalama*

Değer akış haritalama, değer katan tüm faaliyetlerin akışını görsel olarak ifade eden bir yalın üretim tekniğidir. Oluşturulan değer akışı gözden geçirilerek, israfların yok edilmesini amaçlanmaktadır (Turan, 2016).

### *Tek parça akışı*

Tek parça akışı, ardışık yapılan işleri sıralayarak bekleme sürelerini ortadan kaldırmayı amaçlayan bir yalın üretim tekniğidir. Böylelikle verimliliğin artması sağlanacaktır (Turan, 2016).

### *Toplam iş denetlemesi*

Toplam iş denetlemesi, makine kullanım oranlarının ayarlanarak verimliliğin artırılmasını amaçlayan bir yalın üretim tekniğidir. Bu teknikte, yüksek kapasiteli makineler düşük kapasiteli makinelere göre ayarlanarak stok bulundurmanın önüne geçilmesi hedeflenmektedir. Toplam iş denetlemesi, tek parça akışının yanı sıra atölyeler arasındaki dengenin sağlanması için de kullanılmaktadır (Turan, 2016).

### *Görselleştirme (Oobeya)*

Oobeya, işletmelerin elde ettikleri bilgiyi görselleştirerek katma değerli ve değersiz faaliyetlerini görmelerini sağlayan bir yalın üretim tekniğidir. Böylelikle, gereksiz faaliyetlerin ortadan kaldırılması ve israfların önlenmesi amaçlanmaktadır. (Turan, 2016).

### *U tipi yerleşim düzeni*

U tipi yerleşim düzeni, makineler arası bekleme sürelerinin ve gereksiz hareketlerin ortadan kaldırılmasını amaçlamaktadır. Özellikle otomatik üretim hatlarında kullanımı oldukça elverişlidir (Turan, 2016).

İzleyen bölümde, çizelgelemeye giriş yapılarak üretim sistemlerinde kullanılan çizelgeleme yöntemlerinden bahsedilmiştir.

## 3.2 Çizelgeleme

Bu bölümde, çizelgelemenin tanımından ve çeşitli çizelgeleme yöntemlerinden bahsedilmiştir.

### 3.2.1 Tanımlar

Bu bölümde, çizelgeleme problemlerinde kullanılan performans ölçütlerinin tanımlamaları yapılmıştır (Alharkan, 2005, Pinedo, 2005):

*Siparişlerin toplam tamamlanma zamanı:* Tüm işleri tam olarak gerçekleştirmek için gereken toplam süredir. Bu kavram, İngilizce literatürde makespan (Cmax) olarak ifade edilmektedir.

*İşlem süresi:* Bir işin tamamlanması için gereken süredir.

*Gecikme süresi:* Tamamlanma süresi ile işin bitiş tarihi arasındaki fark olarak tanımlanmaktadır.

*En büyük gecikme süresi:* Bir işin gecikme sürelerinin maksimum değeridir.

*Ortalama akış süresi:* Bir işin atölyede geçirdiği ortalama süredir. İşlem süresi, bekleme süresi ve taşıma süresini kapsamaktadır.

*Kuyrukta bekleme süresi:* Bir siparişin, işlem göreceği makinedeki işlerin tamamlanıp işleme alınmasına kadar geçirdiği bekleme süresidir.

*Boşta kalma süresi:* Bir makinedeki tüm işler tamamlandıktan sonra, yeni bir iş makinede işlem görene kadar geçen süredir.

### 3.2.1 Çizelgelemenin Tanımı ve Çizelgeleme Yöntemleri

Çizelgeleme; belirli kısıtlar ve varsayımlar altında, hangi işin, hangi istasyonda, ne zaman ve ne kadar sürede yapılması gerektiğini belirlemek amacıyla kullanılan problem çözme tekniklerinin genel sınıflandırılmış adıdır. Çizelgeleme yöntemlerinin; üretim kapasitesinin verimli şekilde kullanılması, müşteri isteklerinin



karşılanması hatta aşılması, işlem ve tedarik sürelerinde iyileştirmelerin sağlanması konularında işletmelere önemli katkıları bulunmaktadır.

Kesikli üretim sistemlerinde çizelgeleme yapmak sürekli üretim sistemlerine göre daha zordur. Çünkü kesikli üretimde her zaman üretilen ürünün ve üretim yönteminin değişme olasılığı söz konusudur. Seri üretimde ise çizelgeleme faaliyetlerinin doğru şekilde yapılabilmesi için stok takip sisteminin ve üretim akışının sorunsuz işlemesi gerekmektedir (Pinedo, 2005).

Çizelgeleme faaliyetleri; ileriye ve geriye doğru olmak üzere iki farklı şekilde yapılabilmektedir. İşin en yakın zaman diliminde yapılmasını öngören çizelgeleme tipi, ileriye doğru çizelgeleme olarak adlandırılmaktadır. Bu çizelgeleme tipi, en kısa sürede teslim edilecek işler için kullanılmaktadır fakat işin, son teslim tarihinde teslim edilememeye ihtimali bulunmaktadır. Son teslim tarihinden itibaren geriye doğru yapılan iş çizelgesiyle işlerin başlangıç zamanlarının elde edildiği çizelgeleme tipi, geriye doğru çizelgeleme olarak adlandırılmaktadır. İleriye doğru çizelgelemeye göre daha yaygın olarak kullanılan geriye doğru çizelgelemede, sipariş çizelgesinde yer alan işler için her zaman yeterli miktarda kaynak bulunamamaktadır. Bahsedilen çizelgeleme tiplerinden her ikisinin de kullanıldığı imalat ortamları bulunmaktadır (Pinedo, 2005).

İş çizelgelerinde; işlerin başlangıç/bitiş süreleri ve tarihleri ya da son teslim tarihleri gösterilmektedir. 1900'lerde Henry Gantt tarafından geliştirilen Gantt şeması, iş çizelgelerini görselleştirmek amacıyla kullanılmaktadır. Gantt şemaları ilerlemeli ve istasyon bazlı olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. İlerlemeli Gantt şemasında, işlerin tamamlanma zamanlarına göre durumları grafiksel olarak ifade edilmektedir. İstasyon bazlı Gantt şemasında ise, iş çizelgesinde yer alan işlerin tamamlanma zamanları ve kuyrukta bekleme süreleri grafiksel olarak gösterilerek istasyonlara atanacak iş yüklerinin dengeli olmasına dikkat edilmelidir (Pinedo, 2005). İzleyen bölümde, öncelik kurallarına dayanarak geliştirilmiş olan çizelgeleme yöntemlerinden bahsedilmiştir (Alharkan, 2005, Pinedo, 2005):

- *EDD (Earliest due date)*: En erken teslim tarihine sahip iş, ilk sırada işlem görmektedir
- *FCFS (First come first served)*: İlk sırada işlem gören iş, ilk sırada servis edilmektedir.
- *SPT (Shortest processing time)*: İşlem süresi en kısa olan iş, ilk sırada işlem görmektedir.
- *LPT (Longest processing time)*: İşlem süresi en uzun olan iş, ilk sırada işlem görmektedir.
- *LCFS (Last come first served)*: Son sırada işlem gören, ilk sırada servis edilmektedir.
- *WSPT (Weighted shortest processing time)*: Operasyonel işlem süresinin ağırlığa (iş miktarına) bölünmesiyle elde edilen oranlardan en küçüğüne sahip olan iş ilk sırada işlem görmektedir.
- *CR (Critical ratio)*: Teslim zamanı ile işin yapıldığı zaman arasında kalan zamanın kalan iş miktarına bölünmesiyle elde edilen oranlardan en küçüğüne sahip olan iş ilk sırada işlem görmektedir.

### ***Kesin çözümlü analitik yöntemler***

Kesin çözümlü analitik yöntemler arasında; doğrusal programlama, doğrusal olmayan programlama, dinamik programlama, tamsayı ve karışık tamsayı programlama modelleri olmak üzere çeşitli matematiksel modeller gösterilmektedir. Bu bölümde doğrusal ve dinamik programlama modellerinden bahsedilmiştir.

#### ***Doğrusal programlama***

Doğrusallık gösteren değişkenlerin, kaynak kısıtları göz önünde bulundurularak belirli bir amaç doğrultusunda optimum çözümünü bulma yöntemidir. Doğrusal programlamanın unsurları; kaynak kısıtları, amaç fonksiyonu ve karar değişkenleridir Doğrusal programlama, pek çok gerçek hayat probleminin çözümünde kullanılarak etkin çözümler elde edilmesini sağlamıştır. (Taha, 2000).

### *Dinamik programlama*

Birbirleriyle etkileşen kararların alınması gereken problemler için kurulan karar modellerinin çözüm yöntemidir. Dinamik programlamada, birbiriyle ilişkili alt kısımlar yapılabilmesi ya da karar modellerinin birbiriyle bağlı olacak şekilde dönüştürülebilmesi gerekmektedir (Taha, 2000).

### ***Doğadan ilham alınarak geliştirilen sezgisel algoritmalar***

Doğadan ilham alınarak geliştirilen algoritmalar; fizik yasalarından ve fiziksel olaylardan, doğadan ve doğa olaylarından ve canlılardan ilham alınanlar olarak sınıflandırılmaktadır (Erdoğan, 2016).

Fizik yasalarından ve fiziksel olaylardan ilham alınarak geliştirilen sezgisel algoritmalar; Gaz Brownian algoritması, elektromanyetik alan optimizasyon algoritması, ısı transferi arama algoritması, yerçekimi arama algoritması, tavlama benzetimi algoritması, ağırlıklı süperpozisyon çekimi algoritması ve optik esintili optimizasyon algoritmasıdır (Erdoğan, 2016). İzleyen bölümde, bu algoritmalarından başlıklar halinde bahsedilmiştir.

### *Tavlama benzetimi algoritması*

Tavlama benzetimi, yukarı tırmanma hareketleriyle yerel optimum noktadan uzaklaşarak global optimum çözüme ulaşmayı amaç edinmiştir. Katıların fiziksel tavlama işlemi ile olan benzerlik referans alınarak geliştirilmiştir. Katıların önce ısıtılıp sonra soğutulması prensibine dayanmaktadır. Sıcaklık artışlarında; bulunan çözümlerin büyük çoğunluğu kabul edilmektedir. Sıcaklık düşüşleri çözümlerin kabul edilme ihtimalinin azalmasına neden olmaktadır. Bu yüzden ancak yüksek bir sıcaklık değeri seçildiğinde, çözüm uzayı tam anlamıyla incelenebilmektedir. Seçilen sıcaklık değerlerinin her birinde; sınırlı sayıda arama yapılarak, sıcaklık yavaş yavaş azaltılmaktadır (Şahin, 2008, Erdoğan, 2016, Kutucu ve Durgut, 2018).

### *Gaz Brownian algoritması*

Gaz Brownian algoritması; rotalı gaz hareketlerine, İdeal Gaz Yasası'na ( $PV=nRT$ ) ve Gaz Brownian Hareketi'ne dayanmaktadır. Her bir gaz parçacığı, bir çözümü ifade etmektedir. Gaz parçacıkları, rastgele yörüngelerde hareket eden yarıçaplar ile önceden belirlenmiş sıcaklık değerlerinde rastgele şekilde konumlandırılmaktadırlar. Bu algoritmanın sıcaklık parametresi, tavlama benzetimi algoritmasındaki sıcaklık parametresiyle aynı görevi görmektedir. Sıcaklığın yüksek olması; global optimum çözüm noktasına ulaşmayı kolaylaştırırken, düşük olması ise yerel optimum çözüm noktasına yaklaştırmaktadır (Erdoğan, 2016).

### *Yerçekimi arama algoritması*

Yerçekimi arama algoritması, Newton'un yerçekimi kanunu referans alınarak ortaya çıkarılmıştır. Yapay kütleler şeklinde çözümler bulunmaktadır. Bu yapay kütleler birbirlerine kuvvet uygulayarak birbirlerini çekerler. Yapay kütleler, yerçekimi kuvvetinin etkisiyle arama uzayı içerisinde global optimuma ulaşmayı amaçlamaktadırlar. Bu algoritmanın temelleri; değişim katsayısı, yerçekimi sabiti ve çevrim sayısıdır. Yerçekimi sabitinin giderek azaltılması, tavlama benzetiminin sıcaklık değerine göre değişen olasılıksal prensibiyle benzerlik göstermektedir (Erdoğan, 2016).

### *Elektromanyetik alan optimizasyon algoritması*

Elektromanyetik alan optimizasyon algoritması; temelinde elektromıknatis kuvveti bulunan popülasyona dayalı bir algoritmadır. Elektromanyetik alan, telden akım geçirilerek oluşturulmaktadır. Elektromıknatisler arasındaki itme ve çekme kuvveti, altın oran kullanılarak dengelenmektedir. Algoritmadan elde edilen uygun çözüm aralığındaki çözümler pozitif, uygun çözüm aralığı dışındaki değerler negatif olarak kabul edilmektedir (Erdoğan, 2016).

### *Isı transferi arama algoritması*

Isı transferi arama algoritması; çevresiyle uyum içerisinde bir denge kuran sistemlerin optimum çözümlerini araştıran bir sezgisel algoritmadır. Algoritmada optimum çözümün bulunması dengenin kurulduğunu göstermektedir (Erdoğan, 2016).

### *Ağırlıklı süperpozisyon çekimi algoritması*

Ağırlıklı süperpozisyon algoritması; sınırlamalı ve sınırlamasız optimizasyonda kullanılan ve ağırlıklı süperpozisyon prensibiyle çalışan bir sezgisel algoritmadır. Algoritmadan, iki tip optimizasyon için de olurlu çözümler elde edilmiştir (Erdoğan, 2016).

### *Optik esintili optimizasyon algoritması*

Optik esintili optimizasyon algoritması, aynaların iç bükey ve dış bükey özelliklerini optimizasyon problemlerine adapte etmektedir. Algoritmada, başlangıç popülasyonunu oluşturmak için yapay ışık kullanılarak yapılacak optimizasyonun iç bükey ya da dış bükey olacağı kararı verilmektedir. Çıkan sonuca göre yeni çözüm kümeleri aranmaktadır (Erdoğan, 2016).

Doğadan ve doğa olaylarından ilham alınarak geliştirilen sezgisel algoritmalar; kara delik optimizasyon algoritması, kasırga temelli optimizasyon algoritması, orman optimizasyon algoritması ve su döngüsü optimizasyon algoritmasıdır (Erdoğan, 2016). Bu algoritmalarından, aşağıda başlıklar halinde bahsedilecektir.

### *Kara delik optimizasyon algoritması*

Kara delik optimizasyon algoritması, başlangıç popülasyonu oluşturularak ilerlemektedir. Her bir başlangıç çözümü, bir yıldızı ifade etmektedir. Yıldızlar, algoritmanın çevrim sayısı kadar kara deliğe gitmektedirler. Kara deliklerin yerleri

sabittir ve her bir kara delik, bir çözüm noktasına karşılık gelmektedir. Arama uzayında daha iyi çözüm noktalarıyla karşılaşıldığında, yıldızlar başka bir kara deliğe geçmektedirler (Erdoğan, 2016).

#### *Kasırga temelli optimizasyon algoritması*

Kasırga temelli optimizasyon algoritmasında, kasırga olayı modellenerek optimum çözüme ulaşmak hedeflenmiştir. Su damlaları, büyük gruplar halinde hareket ederek toprak taşımaktadırlar. Gidilen noktalarda bulunan çözüm değerlerine göre yeniden harekete geçerek ilerlenmektedir. Bu durum optimum çözüm değeri bulunana kadar devam etmektedir (Erdoğan, 2016).

#### *Orman optimizasyonu algoritması*

Orman optimizasyonu algoritması, ormanlardaki ağaçların doğal seçim prensibine dayanan bir sezgisel algoritmadır. Doğrusal olmayan sürekli optimizasyon problemlerinin çözümünde kullanılmaktadır. Bu algorithmada yapay ağaçlar üretilerek ve bu ağaçların tohumları arama uzayına gönderilerek optimum çözüm noktası aranmaktadır (Erdoğan, 2016).

#### *Su döngüsü optimizasyon algoritması*

Su döngüsü algoritması, akarsuların denizlere doğru harekete geçmesinden esinlenilerek geliştirilmiş bir sezgisel algoritmadır. Algorithmada her bir su damlası bir başlangıç çözümünü ifade eder ve bu başlangıç çözümleri başlangıç popülasyonunu oluşturur. En iyi yağmur damlası, deniz olarak kabul edilmektedir. İyi olan diğer çözümlerin bir kısmı akarsu, bir kısmı da denize ve akarsuya akan dere olarak kabul edilmektedir. Optimum sonuç bulunana kadar, daha iyi çözüm bulan deniz, nehir veya derenin konumu değiştirilmektedir. Deniz sularının, akarsuların ve derelerin buharlaşma özelliği, algorithmada yerel optimuma takılmayı önlemek amacıyla kullanılmaktadır (Erdoğan, 2016, Özbay ve Alataş, 2016).

Canlılardan ilham alınarak geliştirilen sezgisel algoritmalar; sürü zekasıyla hareket ederek, öğrendikleri bilgi ve tecrübelerle sürüye katkı sağlayan sosyal canlıların davranışlarını optimize eden algoritmalarlardır. Bu algoritmalara örnek olarak; meyve sineği optimizasyon algoritması, aslan algoritması, karınca kolonisi optimizasyon algoritması, yapay arı kolonisi algoritması, ateş böceği algoritması, gri kurt optimizasyon algoritması, parçacık sürü optimizasyon algoritması, köpek balığı koku alma optimizasyon algoritması, yapay alg algoritması, virüs koloni arama algoritması ve çalı kolonisi algoritması verilebilir. Her bir canlı; sahip olduğu yeteneğe göre sınıflandırılmış olup bu yeteneklere göre birçok optimizasyon algoritması türetilmiştir. Sürü zekası tabanlı optimizasyon algoritmaları sayesinde, klasik yöntemlerle çözülemeyen pek çok problemin çözümünde başarıya ulaşılmıştır (Erdoğan, 2016). İzleyen bölümde, çizelgeleme problemlerinde kullanılan yapay zeka optimizasyon yöntemleri hakkında bilgi verilmiştir.

### **3.2.2 Çizelgelemede Kullanılan Yapay Zeka Optimizasyon Yöntemleri**

Farklı alanlarda çeşitli optimizasyon problemlerinin çözümü için zaman içinde pek çok yöntem geliştirilmiştir. Yapay zeka optimizasyon yaklaşımları, bu yöntemler arasından en çok tercih edilenlerdendir. Geçmişten günümüze kadar gerçekleştirilen faaliyetler incelendiğinde, bütün disiplinlerde yapay zeka uygulamalarına rastlanmaktadır. Bu algoritmalar; tabu araştırma algoritması, genetik algoritma, yapay ısıtma işlem algoritması, yapay arı kolonisi algoritması, karınca kolonisi algoritması, diferansiyel gelişim algoritması ve parçacık sürü optimizasyonu algoritmasıdır (Karaboğa, 2014).

#### *Tabu araştırma algoritması*

Tabu araştırma algoritması, aşamalı olarak optimizasyon problemlerinin çözümünde kullanılan bir yapay zeka optimizasyon algoritmasıdır. Bu algoritma, yerel aramalarla bulunan çözümlerden daha iyi çözümler elde etmek amacıyla kullanılmaktadır. Yerel optimumun aşılması için her çevrimde en iyi performansa sahip hareket seçilerek çözümler oluşturulmaktadır (Karaboğa, 2014).

### *Genetik algoritma*

Genetik algoritma, doğal seçim ile canlıların genetik yapısının simülasyonunu yapan bir yapay zeka optimizasyon algoritmasıdır. Algoritmanın ilk aşamasında, arama uzayından seçilen çözümlerden başlangıç popülasyonu oluşturulmaktadır. Sonrasında, doğal seçim ve çoğalma yoluyla başlangıç popülasyonundan yeni çözümler türetilmektedir. Genetik algoritmada, her bir çevrim jenerasyon olarak adlandırılmaktadır. Son jenerasyonda bulunan en iyi çözüm, optimum çözüm olarak kabul edilmektedir (Karaboğa, 2014).

### *Yapay ısı işlem algoritması*

Yapay ısı işlem algoritması, doğal ısı işleminden ilham alınarak ortaya çıkarılan bir yapay zeka optimizasyon algoritmasıdır. Bu algoritma; optimizasyon problemlerinin çözüm süreci ile metallerin ısı işlemleri arasındaki benzerlikten yola çıkılarak geliştirilmiştir (Karaboğa, 2014). Tavlama benzetimi olarak da adlandırılan algoritma, Bölüm 3.2’de ayrıntılı biçimde anlatılmıştır.

### *Karınca kolonisi algoritması*

Karınca kolonisi algoritması; karıncaların koloni halinde yaptığı davranışların, matematiksel model haline getirilmesiyle elde edilmiş bir yapay zeka optimizasyon algoritmasıdır. Bu algoritma, gerçek karıncaların davranışlarından daha farklı bir yapıda işlemektedir. Yapay karıncalarda hafıza ve görebilme yetisi mevcuttur; zamanın ayrık olduğu kabul edilmektedir. Algoritmada, yapay karıncalar birbirleriyle iletişim halindedir. Zor ayrık optimizasyon problemlerinin çözümünde kullanılan karınca kolonisi algoritmasında, optimum çözüm değeri başarıyla bulunabilmektedir (Karaboğa, 2014).

### *Diferansiyel gelişim algoritması*

Diferansiyel gelişim algoritması, genel yapısı itibariyle genetik algoritmayı temel almaktadır. Sürekli optimizasyon problemlerinde daha verimli sonuçlar elde



edilebilmektedir. Populasyon temelli sezgisel bir algoritma olan diferansiyel gelişim algoritması; optimum sonuca ulaşabilmek için operatörler aracılığıyla çevrim sayısı kadar arama yapmaktadır. Bu algoritmada; efektif sonuçlar elde edebilmek için, genetik algoritmadan farklı olarak karar değişkenleri gerçek değerler ile gösterilmektedir. Genetik algoritmayla yapılan çözümlerde de gerçek değerlerin kullanıldığı problemler mevcuttur (Keskintürk, 2006).

#### *Parçacık sürü optimizasyonu algoritması*

Parçacık sürü optimizasyonu algoritmasında, her biri bir çözümü ifade eden parçacıklar, popülasyonu meydana getirirler. Parçacıklar birbirleriyle etkileşerek elde ettikleri bilgilere göre arama uzayında optimum çözüme ulaşmaya çalışırlar (Karaboğa, 2014).

#### *Yapay arı kolonisi algoritması*

Yapay arı kolonisi algoritması arıların sürü davranışlarından yola çıkılarak geliştirilen bir yapay zeka optimizasyon algoritması olup, Bölüm 3.4’de ayrıntılı biçimde anlatılmıştır.

Yapay zeka optimizasyon uygulamalarından hızlı şekilde verimli sonuçlar elde edilebildiği için hemen her optimizasyon problemini, yapay zeka ile çözüme eğilimi gün geçtikçe yaygınlaşmaktadır. Literatürde karşımıza uygulama alanları; üretim, çizelgeleme, tasarım, grafiksel optimizasyon, ekonomi, teknoloji, mantık, dağıtım ve rotalama olarak sınıflandırılmaktadır (Coşkun, 2007). İzleyen bölümde, yapay zeka optimizasyonu ile klasik optimizasyon arasındaki farklardan bahsedilerek karşılaştırma yapılmıştır.

### **3.3 Yapay Zeka Optimizasyonu ile Klasik Optimizasyonun Karşılaştırılması**

Klasik optimizasyon yöntemleri, karmaşık yapıdaki problemlerin çözümünde yetersiz kalmakta ve istenilen sonucun elde edilmesini güçleştirmektedir. Bu durum,

yeni çözüm yöntemlerine olan ihtiyacı ortaya çıkarmıştır. Yapılan araştırmalar sonucunda, daha verimli sonuçların elde edilebildiği görölmüş ve yapay zeka optimizasyon yöntemleri geliştirilmiştir. Yapay zeka optimizasyonu; insan, makine, çevre ve doğada bulunan diğer canlıların davranışlarını modeller haline getirerek, zor problemlerin çözümlenmesini sağlamakta ve karar verme süreçlerine katkıda bulunmaktadır (Coşkun, 2007, Atalay ve Çelik, 2017).

Bu teze konu olan yapay arı kolonisi algoritması, arıların sürü davranışlarını örnek olarak geliştirilmiş bir yapay zeka optimizasyon algoritmasıdır. Örnekleri çoğaltacak olursak; genetik algoritma, doğal gen çaprazlama olayından esinlenerek yapılan modelleme sonucu ortaya çıkmıştır. Yapay sinir ağları, beyinde bulunan sinir hücrelerini inceleyerek referans almıştır. Yapay ısıtım işlem algoritması ise, metallere ısı verildiğinde meydana gelen yapısal değişikliği modellemiştir (Coşkun, 2007).

Klasik optimizasyon çözüm metotlarında; amaç fonksiyonu, kısıtlar ve parametreler matematiksel modellerle gösterilmektedirler. Yapay zeka optimizasyon algoritmalarında ise, matematiksel modellere gerek duyulmadan esnek çözüm yöntemleriyle hızlı şekilde optimum çözüm noktası bulunabilmektedir. Buna karşın yapay zeka tekniklerini uygulayabilmek için nitelikli işgücüne ve ekipmana ihtiyaç duyulmaktadır (Coşkun, 2007).

Sonraki yıllarda ilerleyen teknolojiyle birlikte, yüksek kapasiteli ve hızlı işlemcili bilgisayarlar kolay ulaşılabilir hale gelmiştir. Her ne kadar günümüzde yapay zekayı geliştirmek için gereken donanım altyapısı ileri seviyelerde olsa da; yapay zeka programlama dillerinin yazılımı, mevcut zorluğunu korumaktadır. Uzman sistemler ve geliştirici araçlar, yazılım oluşturma süreçlerini hızlandırmış ve basite indirgemmiştir. Bu araçları doğru ve etkin şekilde kullanmak için ise birtakım maliyetlere katlanması ve alanında uzman kişilerle çalışılması gerekmektedir (İçen ve Günay, 2014). İzleyen bölümde, bu teze konu olan çalışmada kullanılan yapay arı kolonisi algoritması hakkında bilgi verilmiştir.

### 3.4 Yapay Arı Kolonisi Algoritması

Yapay arı kolonisi algoritması; 2005 yılında Prof. Dr. Derviş Karaboğa tarafından geliştirilmiş sürü zekası tabanlı bir optimizasyon algoritmasıdır. Doğada sürüler halinde hareket ederek yiyecek arayan arılardan esinlenerek geliştirilen bu algoritma, son yıllarda sık kullanılan yapay zeka optimizasyon yöntemlerinden biridir (Akay ve Karaboğa, 2009, Küçüksille ve Tokmak, 2011, Karaboğa, 2014).

Arı kolonilerinin hayatta kalabilmek için yaptıkları en temel davranış, yiyecek arama davranışdır. Arılar, yuvalarından yeni besinler bulmak için ayrılmaktadırlar. Başlangıç aramalarını rastgele olarak gerçekleştirmektedirler ve buldukları yiyecek kaynaklarında yiyecek miktarı azalmaya başladığında yeni kaynak arayışına girmektedirler. Kaynaklar arasında yapılan yiyecek arama davranışları boyunca, arı kolonileri arasında bilgi aktarımı sürmektedir. Tereshko'nun önerdiği kaynak arama yaklaşımı; yiyecek kaynakları, görevi tanımlı arayıcılar ve görevi tanımsız aracılar olmak üzere başlıca üç unsura dayanmaktadır. (Akay ve Karaboğa, 2009, Küçüksille ve Tokmak, 2011, Karaboğa, 2014).

#### *Besin kaynakları*

Arıların besin aradığı kaynaklardır. Sürülerin bu davranışında; kaynakla yuva arasındaki mesafe, kaynağa ve besine ait genel özellikler (tür, miktar vb.) gibi bileşenlerin etkisi görülmektedir. Ancak kolaylık açısından kaynağın genel niteliği tek unsur olarak düşünülebilmektedir (Akay ve Karaboğa, 2009, Küçüksille ve Tokmak, 2011, Karaboğa, 2014).

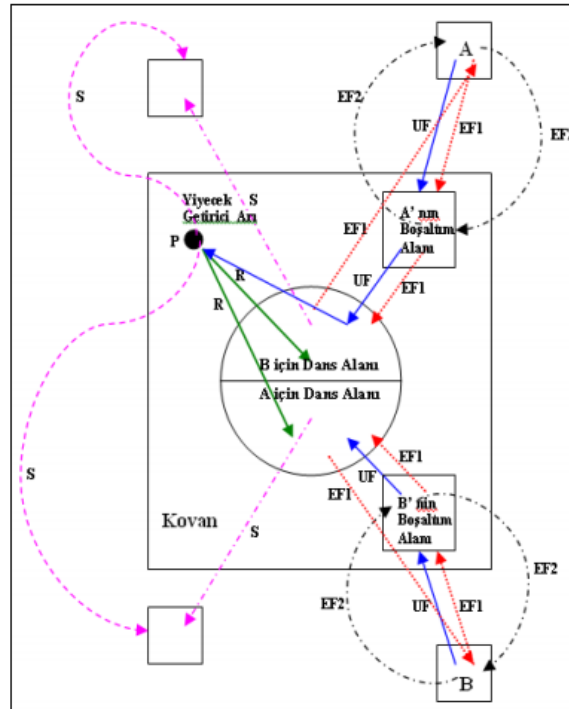
#### *Görevi tanımlı arayıcılar*

Sürüdeki bu arayıcılar, işçi arılar olarak adlandırılmaktadırlar. İşçi arıların temel görevleri; elde edilen besinlerin yuvalara ulaştırılması ve kaynaklarla ilgili elde edilen bilgilerin kovadaki diğer üyelere aktararak bilgi aktarımının sağlanmasıdır (Akay ve Karaboğa, 2009, Küçüksille ve Tokmak, 2011, Karaboğa, 2014).

### Görevi tanımsız arayıcılar

Sürüdeki bu arayıcılar, kâşif ve gözcü arılar olarak ikiye ayrılmaktadırlar ve yeni yiyecek kaynakları aramaktadırlar. Kâşif arılar rastgele olarak yiyecek kaynağı ararlarken, gözcü arılar ise yuvalarında gözlem yaparak işçi arılardan elde ettikleri bilgiler doğrultusunda yeni yiyecek kaynaklarına gitmektedirler (Akay ve Karaboğa, 2009, Küçüksille ve Tokmak, 2011, Karaboğa, 2014).

Yuvalar; arıların yaşadıkları yerler olmakla beraber, bilgi aktarımı ve görev dağılımının da yapıldığı ortak birimlerdir ve çeşitli bölümlerden oluşmaktadırlar. Arılar arasında bilgi aktarımı, ortak dans bölgesi olarak adlandırılan alanda arıların yaptıkları danslar aracılığıyla olmaktadır. İşçi arılar, besin kaynaklarından yuvalarına yiyecek taşırlarken aynı zamanda kaynak bilgisini de diğer arılarla paylaşmaktadırlar. Yuvadaki arılar ise, kaynaklara güneş ışığı vasıtasıyla ulaşmaktadırlar. Bal arıları; harçayacakları enerjiyi de göz önünde bulundurarak, güneş ile kendi yörüngeleri arasındaki açığı ölçmektedirler. Yapılan ölçümler sonucunda, çeşitli yük ve yüksekliklerde hareket etmektedirler (Akay ve Karaboğa, 2009, Küçüksille ve Tokmak, 2011, Karaboğa, 2014).



Şekil 3.1: Arıların yiyecek kaynağı arama döngüsü (Karaboğa, 2014).

Arıların kaynak arama davranışları Şekil 3.1’de gösterilmiştir. A ve B ile belirtilen alanlar, keşfedilen yeni yiyecek kaynakları olarak gösterilmiştir. Başlangıç popülasyonunu oluşturmak adına görevi tanımsız arayıcılar yiyecek aramaya başlamaktadırlar. S ile temsil edilen bölgedeki arıların, rastgele yiyecek kaynağı arayan kaşif arılardan, R ile temsil edilen bölgedeki arıların ise gözcü arılardan oluştuğu ve diğer arıların dansını takip ederek kaynaklara gittiği varsayılmıştır. Yiyecek kaynaklarından yuvalarına yiyecek taşıyan bu arılar, artık görevi tanımlı arayıcılar olmuşlardır. Görevi tanımlı arayıcılar, kovana besin getirdikten sonra çeşitli davranışlar sergileyebilmektedirler. Şekilde EF1 ile ifade edilen arı, yiyecek kaynağı hakkında diğer arılara bilgi vermektedir. Şekilde EF2 ile ifade edilen arı, bilgi alışverişinde bulunmadan yuvaya yiyecek taşımaktadır. Şekilde UF ile ifade edilen arı, Bulunduğu yiyecek kaynağından ayrılarak ortak dans bölgesinde gözcü arı olmaktadır (Akay ve Karaboğa, 2009, Küçüksille ve Tokmak, 2011, Karaboğa, 2014).

Yapay arı kolonisi algoritmasına göre kaşif arılar başlangıçta rastgele olarak yiyecek kaynağı aramaya başlamaktadırlar. Akabinde bulunan kaynaklardan yuvalarına yiyecek getiren arılar, işçi arı olmuşlardır. İşçi arılar ve gözcü arılar eşit sayıdadır. Elde edilen her bir besinden tek bir görevli sorumludur; dolayısıyla besin sayısı ile görevli arı sayısı birbirine eşittir. Kaynaktaki besin bitene kadar işçi arılar görevlerini devam ettirmekte ve yiyecek kaynaklarından elde ettikleri bilgileri gözcü arılarla paylaşmaktadırlar. Kaynaklar tükenene kadar işçi arılar, ortak dans bölgesinde dans ederek bilgi aktarmakta, kaynaklar tükendiğinde ise gözcü arı olarak görev yapmaya başlamaktadırlar. Gözcü arılar, diğer kaynaklarda bulunan yiyeceklerin özelliklerine göre seçimde bulunmaktadırlar. Yiyecek kaynakları arasından, en kaliteli besinin elde edildiği kaynak bulunmaya çalışılmaktadır. Yapay arı kolonisi algoritmasında ise söz konusu problemin çözümü için optimum (minimum ya da maksimum en uygun) nokta (kaynak) bulunana kadar arama yapılmaktadır (Akay ve Karaboğa, 2009, Küçüksille ve Tokmak, 2011, Karaboğa, 2014). Yapay arı kolonisi algoritmasının adımları aşağıdaki gibidir:

1. Yiyecek kaynaklarının rastgele oluşturulmasından yola çıkılarak yaratılan algoritmada, başlangıç çözümlerinin rastgele şekilde oluşturulması,
2. İşçi arıların başlangıç çözümlerine (yiycek kaynakları) gönderilmesi ve oluşturulan başlangıç popülasyonunda bulunan çözümlerin uygunluk değerlerinin (besinlerin kalitesi) hesaplanması,
3. Elde edilen uygunluk değerlerine göre her bir çözümün olasılık değerinin belirlenmesi,
4. Gözcü arıların olasılıksal seçim yoluyla besin kaynaklarına (çözüm noktaları) yönelmesi,
5. Her bir kaynakta ne kadar arama yapılacağıının tanımlanan limit değeriyle belirlenmesi ve kâşif arıların üretilmesi,
6. Algoritma sonlandırma ölçütü olan çevrim sayısının belirlenmesi (Akay ve Karaboğa, 2009, Küçüksille ve Tokmak, 2011, Karaboğa, 2014).

### *Yapay arı kolonisi algoritmasına ait formüller*

Bu bölümde, yapay arı kolonisi algoritmasında kullanılan formülasyon hakkında bilgi verilmiştir.

#### *Başlangıç çözümlerinin (yiycek kaynaklarının) belirlenmesi*

Algoritmanın temel yapıtaşı olan başlangıç çözüm kümesi (yiycek kaynakları) rastgele olarak üretilmektedir. Yapay arı kolonisi algoritmasının ilk aşaması olan başlangıç popülasyonunun belirlenmesi, aşağıda yer alan formülasyon kullanılarak gerçekleştirilmektedir (Karaboğa, 2014):

$$x_{ij} = x_j^{min} + \text{rand}(0,1)(x_j^{max} - x_j^{min}) \quad (3.1)$$

Yiycek kaynağı sayısı  $i$ , değişken sayısı  $j$  ile gösterilmiştir.  $x_j^{min}$ ,  $j$ . değişkenin alt limitini ve  $x_j^{max}$ ,  $j$ . değişkenin üst limitini belirtmektedir. Başlangıç

popülasyonundaki kaynakların iyileştirilememe sayısı, limit değeri ile belirlenmektedir (Karaboğa, 2014).

### *İşçi arıların gidecekleri yiyecek kaynaklarının belirlenmesi*

Her bir yiyecek kaynağına çözüm değerinin kalitesini belirlemek amacıyla işçi arılar gönderilmektedir. Yiyecek kaynaklarından sağlanan bilgiler hafızaya alınmaya başlanmaktadır. Hafızada bulunan kaynaktan daha iyi (kaliteli) bir yiyecek kaynağıyla karşılaşıldığında, eski kaynak silinerek yeni kaynağa ait bilgiler kaydedilmektedir. Yiyecek kaynaklarının karşılaştırılma kriterleri, optimizasyon hedefine göre değişiklik göstermektedirler. Algoritmadaki yiyecek kaynaklarının kalitesi, gerçek hayat problemlerinde çözüm değeri olarak ifade edilmektedir. Söz konusu işlemleri yerine getiren formülasyon aşağıda verilmiştir (Karaboğa, 2014):

$$v_{ij} = x_{ij} + \emptyset(x_{ij} - x_{kj}) \quad (3.2)$$

$\emptyset$  ile gösterilen değişken; -1 ile 1 arasında yer alan düzgün reel rastgele bir sayıdır.  $x_k$ , komşuluk araması sonucunda bulunan kaynağın çözüm değerini ifade etmektedir. Komşu yiyecek kaynağının çözüm değeri ile var olan yiyecek kaynağının çözüm değerinin j. değişkenleri arasındaki fark,  $\emptyset$  değişkeni ile çarpılarak var olan yiyecek kaynağının j. parametresiyle toplanmaktadır. Halihazırda bulunan ve komşu yiyecek kaynaklarının değişkenlerinin farkı ne kadar az olursa, optimum çözüme o kadar yakın olunacaktır.  $v_{ij}$ 'nin belirlenen sınır değerlerinden farklılaşması sonucunda aşağıdaki eşitlikte gösterilen formülasyon uygulanmaktadır (Karaboğa, 2014):

$$v_{ij} = \begin{cases} x_{ij}, & v_{ij} < x_j^{min} \\ v_{ij}, & x_j^{min} \leq v_{ij} \leq x_j^{max} \\ x_j^{max}, & v_{ij} > x_j^{max} \end{cases} \quad (3.3)$$

Denklemlerden elde edilen bilgiler doğrultusunda yiyecek kaynağının kalitesi (uygunluk değeri) aşağıdaki formülasyona göre hesaplanmaktadır (Karaboğa, 2014):

$$u_i = \begin{cases} \frac{1}{1+u_i}, & u_i \geq 0 \\ 1 + \text{mutlakdeğer}(u_i), & u_i < 0 \end{cases} \quad (3.4)$$

Denklemden ifade edilen  $u_i$ ; yiyecek kaynağının kalitesidir (uygunluk değeri) . Belirlenen yiyecek kaynağının uygunluğu hesaplanarak, optimizasyon probleminin türüne göre bulunan çözüm değerleri karşılaştırılmaktadır. Bir önceki çözüm değerinden düşük kaliteli çözümler bulunduğu durumda, iyileştirilememeye sayısı bir artırılarak limit değeriyle kıyaslanmaktadır. Eğer yeni çözüm değeri önceki çözüm değerinden daha kaliteli bulunursa iyileştirilememeye sayısı sıfırlanmaktadır. Limit değeriyle bu sayının kontrol edilmesinin amacı, iyileşme gerçekleşmeyen yiyecek kaynaklarını etkisiz hale getirerek algoritmanın sonsuz çevrimde takılıp kalmamasını sağlamaktır (Karaboğa, 2014).

#### *Gözcü arıların olasılık değerlerine göre seçim yapması*

Arıların sürü davranışları esas alındığında; gözcü arılar ortak dans bölgesinde yapılan dans ile aktarılan bilgi doğrultusunda yiyecek kaynağı seçimi yapmaktadırlar. Bu seçim; yiyecek kaynaklarının kalitesinden yola çıkılarak, rulet tekerleği prensibine göre aşağıdaki formülasyon ile yapılmaktadır (Karaboğa, 2014):

$$p_i = \text{uygunluk}_i / \sum_{j=1}^{SN} \text{uygunluk}_j \quad (3.5)$$

Denklemden;  $u_i = i$ . yiyecek kaynağının kalitesini (uygunluk değeri), SN= işçi arı sayısını temsil etmektedir. Her bir yiyecek kaynağının uygunluk değerinin tüm yiyecek kaynaklarının toplam uygunluk değerine bölünmesiyle olasılık değerleri belirlenmiş olacaktır (Karaboğa, 2014).

#### *Gözcü arıların gidecekleri yiyecek kaynaklarının belirlenmesi*

Olasılıksal hesaplamalar yapıldıktan sonra her yiyecek kaynağına, rulet tekerleği prensibi kullanılarak 0 ile 1 arasında rastgele bir sayı atanmaktadır. Elde edilen olasılık değeri, rastgele sayıdan büyükse denklem 3.2'deki işlemler tekrarlanarak



ilgili yiyecek kaynağında yeni çözüm değeri bulunmaktadır. Yeni çözüm değeri eski çözüm değerinden daha kaliteliyse, eski çözüm değerinin yerine kabul edilerek iyileştirilememe sayısı bir sıfırlanmaktadır. Aksi halde, eski çözüm değerinin geçerliliği korunarak iyileştirilememe sayısı bir arttırılmaktadır. Gözcü arıların tamamı yiyecek kaynaklarında konuşlanana kadar bu döngü sürmektedir (Karaboğa, 2014).

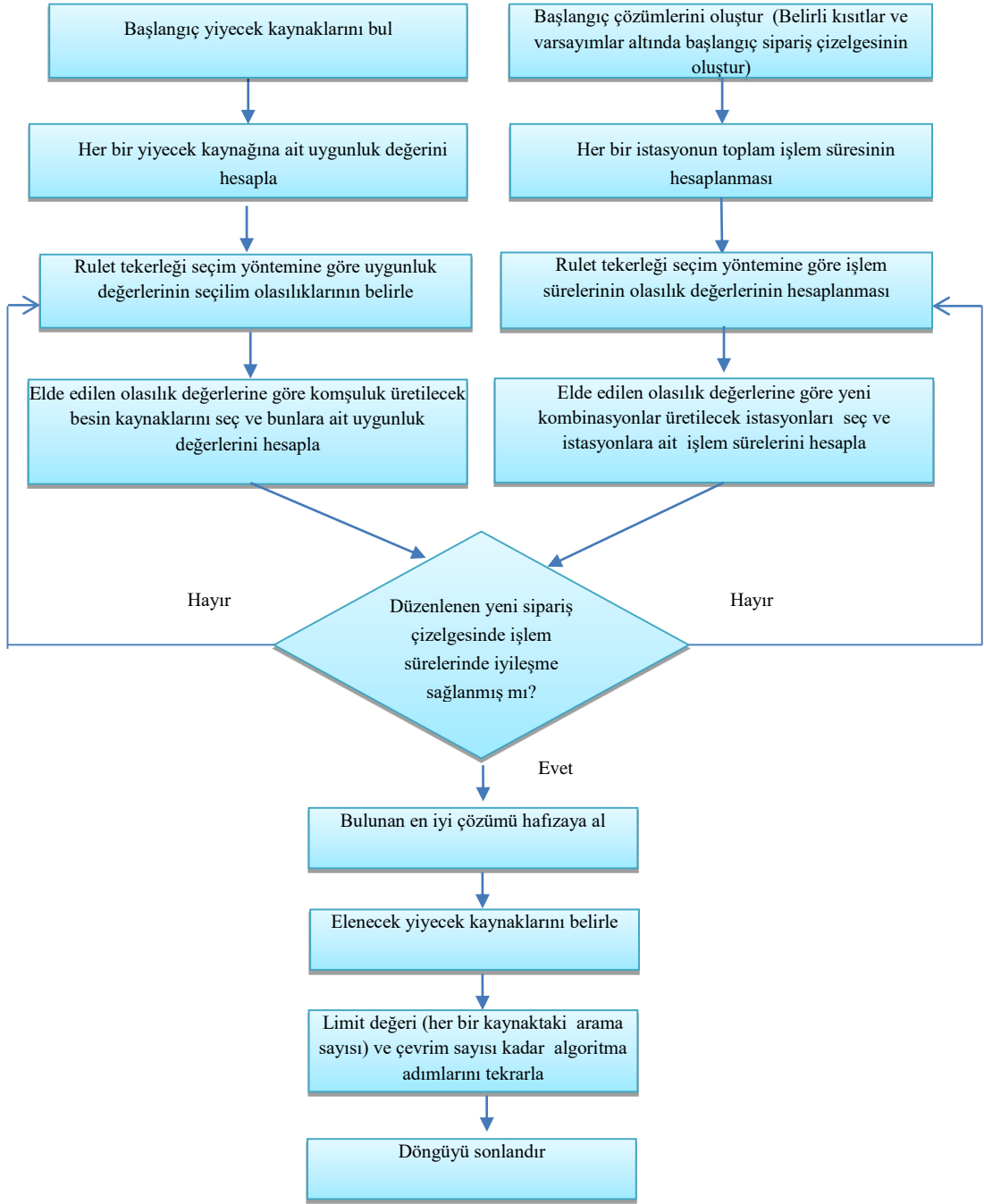
#### *Yiyecek kaynaklarından ayrılınması ve kâşif arı tanımlanması*

Arıların sürü zekasına dayalı davranışları incelendiğinde; besin miktarı tükendiğinde yiyecek kaynağındaki işçi arı, yeni yiyecek kaynakları bulmak amacıyla kâşif arı olmaktadır. Yapay arı kolonisi algoritmasında ise, iyileştirilememe sayısı algoritmanın limitinin üzerine çıkmışsa ve elde edilen çözüm değerlerinde iyileşme sağlanamıyorsa yeni yiyecek kaynakları bulmak amacıyla kâşif arılar faaliyete geçmektedirler. Kâşif arılar aracılığıyla elde edilen yeni yiyecek kaynaklarının çözüm değerleri, algoritma adımlarına göre değerlendirilmektedir. Yapay arı kolonisi algoritmasına göre, döngü başına bir adet kâşif arı bulunmaktadır. Belirlenen döngü sayısı kadar karşılaştırma sağlandığında algoritma sonuçlanmaktadır (Karaboğa, 2014).

#### ***Yapay arı kolonisi algoritmasıyla çizelgeleme adımları***

Yapay arı kolonisi algoritması; arıların sürü ve dans davranışlarından esinlenilerek gerçek hayat problemlerinde optimizasyon yapmayı amaçlayan bir algoritmadır. Bunu da bal arılarının her bir davranışını bir matematiksel formülle ifade ederek yapar. Elde edilen matematiksel formüller; herhangi bir optimize edici araç kullanılmadığı takdirde en uygun çözümü bulma konusunda yetersiz kalmaktadırlar. Çünkü manuel problem çözüme teknikleri, ancak sınırlı sayıda çözüm üretebilmektedir. Bu yüzden, yapay zeka optimizasyon algoritmaları kullanılarak yüksek performanslı ve etkin çözümler elde edilmesi isteniyorsa mutlaka güçlü bir araç (program, yazılım vb.) kullanılmalıdır.

Bu çizelgeleme çalışmasında; yapay arı kolonisi algoritması kullanılarak Matlab aracılığıyla geliştirilmiş bir yazılımdan yararlanılarak bulunabilen en uygun sipariş çizelgesini oluşturulmuştur. Siparişlerin toplam tamamlanma zamanı minimize edilmiştir. Aşağıdaki akış şemalarında yapay arı kolonisi algoritmasının uygulama adımlarının çizelgeleme çalışmasına uyarlanması açıklanmıştır.



**Şekil 3.2:** Yapay arı kolonisi algoritmasıyla yapılan çizelgeme çalışmasına ait akış şemaları (Karaboğa, 2014).

### **3.5 Açık Atölye Tipi Çizelgeleme**

Açık atölye tipi çizelgelemede; atölye tipi çizelgeleme modelinin aksine işlerin sırası belirsizdir ve serbestlik vardır. Açık atölye çizelgeleme problemlerinin amacı; toplam tamamlanma zamanının minimize edilmesidir. Bunu da işlerin optimum düzende makinelere atanmasını sağlayarak yapmaktadır. Açık atölye tipi çizelgelemenin bazı karakteristik özellikleri vardır. Aynı makinede aynı anda birden fazla işlem gerçekleştirilememektedir. Bütün makineler sürekli çalışır durumdadır. Makinelerin depolama hacmi sınırsızdır. Bütün işler makinelere atanmaya hazırdır. Herhangi bir makinede, halihazırda işlem görmekte olan bir iş bırakılıp başka bir işe başlanılamamaktadır. İşler birbirine bağımlı olmayacak şekilde gerçekleşmektedir. İşlere ait işlem süreleri belirli olup, makinelerde işlemler başlatılmadan önce bilinmektedir. Makineler arası bekleme ve taşıma zamanları göz ardı edilmiştir (Baysal, Durmaz, Sarucan ve Engin, 2012).

### **3.6 Esnek Atölye Tipi Çizelgeleme**

Açık atölye tipi çizelgelemede, bir işe ait olan herhangi bir operasyonel süreç tek bir istasyonda işlenebilmektedir. Esnek atölye tipi çizelgelemede ise işlere ait operasyonel süreçlerin istasyonlarda yapılabilme durumları esnetilmiştir ve en az bir istasyonda işlem görmeleri söz konusudur. Esnek atölye tipi çizelgelemenin bazı karakteristik özellikleri vardır. Yapılacak olan işlerin ilgili operasyonları, makinelerin tamamında işlem görebiliyorsa tam esneklik; bir kısmında işlem görebiliyorsa kısmi esneklik durumu mevcuttur. İşlerin operasyonel süreçleri, birbirinden farklı işlemlere tabi tutulabilmektedir. İşlem süreleri, işlem görülen makineye göre değişmektedir ve operasyonlardan önce belirlenmiştir. Operasyonlar için farklı makine seçimleri söz konusu olabilmektedir, her operasyon için en az bir seçim söz konusudur. Herhangi bir işe ait operasyonun tek bir makinede işlem göremeyeceği durumlar söz konusu olduğunda, işlem sürelerinin çok uzun olduğu varsayılmaktadır (Kaya ve Fırlalı, 2016).

Çalışmamızda, uygulama yaptığımız kaynak atölyesine uygun olacak şekilde esnek atölye tipi çizelgeleme yapılmıştır. Proje bazlı esnek atölye tipi üretim yapan işletmeye ait çizelgeleme probleminde girdi olarak belirli bir katsayı ile çarpılan işlem süreleri kullanılmış olup, çıktı olarak bulunabilen en uygun sipariş çizelgeleme planı sunulmuştur.

## 4. SİSTEMİN TANIMI

Bu çalışmada; transformatör kazanı üretimi yapan bir atölyeye gelen siparişlerin sırasıyla; kaynak, sızdırmazlık test ve boya öncesi yüzey hazırlama istasyonlarına dengeli biçimde paylaştırılarak bulunabilen en uygun sipariş çizelgesinin elde edilmesi amaçlanmıştır. İşlem süreleri ve kısıtlar dikkate alınarak yapılan çizelgeleme çalışmasından elde edilen sonuçlar değerlendirilerek, söz konusu üretim çizelgesinin verimliliği ölçülmüştür.

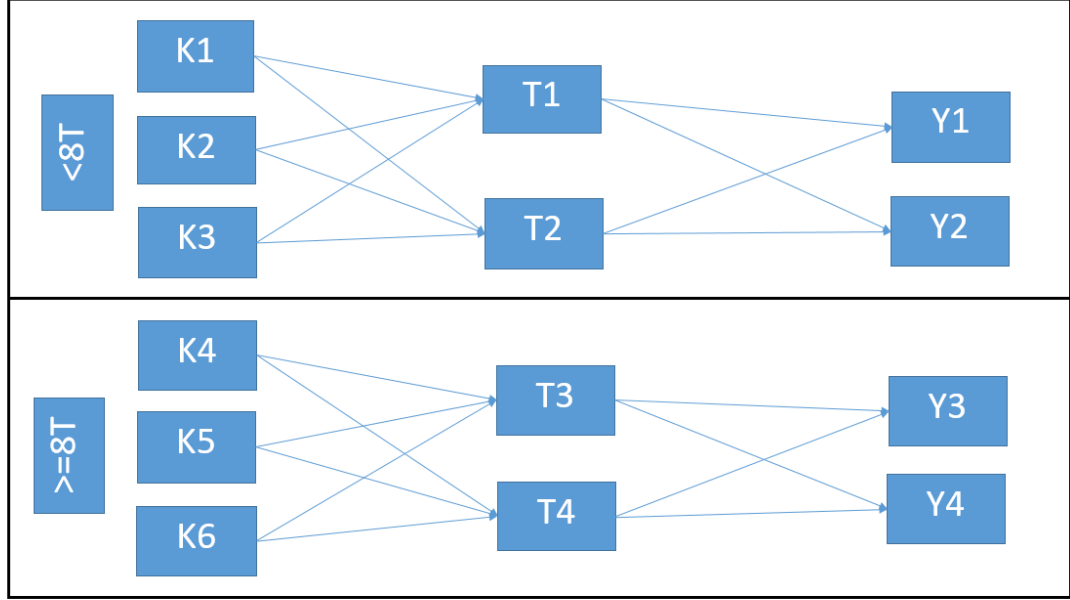
### 4.1 Transformatör Tanımı ve Kazan İmalat Süreci

Tranformatör; alternatif akımlı sistemlerde iki ya da daha fazla elektrik devresini elektromanyetik indüksiyonla birbirine bağlayan elektrik makinelerinin genel adıdır. Elektrik enerjisi iletilirken transformatörler yardımıyla gerilim yükseltilmektedir; dağıtılırken ise yüksek gerilim tehlike arz ettiği için, gerilimin daha güvenli seviyelere indirilmesi gerekmektedir. Gerilimi veya akımı dönüştürdükleri için transformatörlere dönüştürücüler de denilmektedir.

Transformatörler farklı amaçlar için farklı çeşitlerde (faz sayısı, nüve yapısı, soğutma malzemesi, kullanım amacı, çalışma ortamı vb.) üretilmektedirler. Transformatörler genel olarak; elektrik hatlarından geçen ve ölçüm cihazları ile ölçülemeyen akımları ölçmek için, trafo merkezlerini aşırı akımlardan korumak için ve enerji verimliliğini arttırmak için kullanılmaktadırlar.

Transformatörler, kazan ve aktif kısım (bobin ve silisli sac birleşimi) olmak üzere iki bölümden oluşmaktadırlar. Transformatör kazanları genellikle dıştan içe doğru boğumlu katmanlar şeklinde ve transformatörün aşırı ısınmasını engelleyecek şekilde tasarlanmaktadır. Bu kazanlar, sac malzemenin işlenmesi ve kaynaklanarak perçinlenmesiyle elde edilmektedirler. Transformatörün tasarımına

göre kazan üzerinde ek özellikler, çıkışlar veya kanallar olabilmektedir. Uygulamanın yapıldığı kaynak atölyesine ait yerleşim düzeni aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 4.1: Atölye yerleşim düzeni.

Transformatör kazanı imalatı yapan kaynak atölyesinde, Şekil 4.1’de gösterilen yerleşim düzeni mevcuttur. Atölye vinçlerin kapasitelerine göre iki bölüme ayrılmış durumdadır. 8 tondan hafif transformatör kazanları; K1, K2 ve K3 kodlu kaynak istasyonlarında işlem gördükten sonra T1 ve T2 kodlu sızdırmazlık test istasyonlarında test edilmektedirler. Son olarak, Y1 ve Y2 kodlu boya öncesi yüzey hazırlama istasyonlarında boyaya hazır hale getirilmektedirler. 8 ton ve daha fazla ağırlığa sahip olan transformatör kazanları ise; K4, K5 ve K6 kodlu kaynak istasyonlarında işlem gördükten sonra T3 ve T4 kodlu sızdırmazlık test istasyonlarında testlere tabi tutularak Y3 ve Y4 kodlu boya öncesi yüzey hazırlama istasyonlarında boyaya hazır hale getirilmektedirler.

## 4.2 Probleme İlişkin Veriler

Transformatör kazanı imalatı gerçekleştiren bir kaynak atölyesindeki uygulamada, yağlı tip transformatör kazanı üretilirken yapılan kaynak, sızdırmazlık

test ve boya öncesi yüzey hazırlama işlemleri ele alınmıştır. İstasyonlarda gerçekleştirilen operasyonlar gözlemlenerek; işlem süreleri ve transformatörlere özgü kısıtlamalar dikkate alınarak esnek atölye tipi çizelgeleme çalışması yapılmıştır. Kaynaklı imalat yapan atölyeden alınan mevcut sipariş çizelgesi aşağıda belirtilmiştir. Ticari gizlilik esasına dayanarak müşteri bilgileri gizli tutulmaktadır.

**Tablo 4.1:** Mevcut sipariş çizelgesi.

Sipariş No	Transformatör kazanı ağırlığı (Ton)	Transformatör kazanı genişliği (Metre)
1	6	4
2	9	5
3	11	8
4	4	2
5	8	5
6	4	2
7	5	4
8	12	9
9	7	5
10	10	7
11	5	4
12	9	6

Tablo 4.1’de belirtilen, atölyeye ait sipariş çizelgesinde, talep edilen transformatör kazanları ile ilgili ağırlık ve genişlik bilgileri yer almaktadır. Sonraki bölümde, sipariş edilen işlere ait operasyon süreleri hakkında bilgi verilmiştir.

Tablo 4.2’de, her bir siparişin her bir istasyondaki işlem süreleri verilmiştir. 0 ile gösterilen süreler, belirtilen siparişlerin işlem görmediği istasyonları ifade etmektedir. Firmanın ticari gizlilik esasına dikkate alınarak, mevcut işlem süreleri bir katsayı ile çarpılarak yeniden hesaplanmıştır. Tüm istasyon atamaları, kısıtlamalara ve varsayımlara uygun şekilde yapılmıştır.



**Tablo 4.2:** İstasyon bazlı işlem süreleri.

TEZGAH NO	1. İŞ	2. İŞ	3. İŞ	4. İŞ	5. İŞ	6. İŞ	7. İŞ	8. İŞ	9. İŞ	10. İŞ	11. İŞ	12. İŞ
Kaynak İstasyonu 1	23,12	0,00	0,00	16,99	0,00	17,92	18,96	0,00	23,60	0,00	18,60	0,00
Kaynak İstasyonu 2	23,12	0,00	0,00	16,99	0,00	17,92	18,96	0,00	23,60	0,00	18,60	0,00
Kaynak İstasyonu 3	23,12	0,00	0,00	16,99	0,00	17,92	18,96	0,00	23,60	0,00	18,60	0,00
Kaynak İstasyonu 4	0,00	26,20	30,51	0,00	25,89	0,00	0,00	30,87	0,00	27,68	0,00	26,94
Kaynak İstasyonu 5	0,00	26,20	30,51	0,00	25,89	0,00	0,00	30,87	0,00	27,68	0,00	26,94
Kaynak İstasyonu 6	0,00	26,20	30,51	0,00	25,89	0,00	0,00	30,87	0,00	27,68	0,00	26,94
Sızdırmazlık Test İstasyonu 1	13,97	0,00	0,00	11,53	0,00	11,78	13,22	0,00	14,02	0,00	13,02	0,00
Sızdırmazlık Test İstasyonu 2	13,97	0,00	0,00	11,53	0,00	11,78	13,22	0,00	14,02	0,00	13,02	0,00
Sızdırmazlık Test İstasyonu 3	0,00	14,48	24,85	0,00	14,04	0,00	0,00	24,95	0,00	16,26	0,00	15,85
Sızdırmazlık Test İstasyonu 4	0,00	14,48	24,85	0,00	14,04	0,00	0,00	24,95	0,00	16,26	0,00	15,85
Yüzey Hazırlama İstasyonu 1	25,92	0,00	0,00	23,55	0,00	23,91	25,04	0,00	26,18	0,00	24,60	0,00
Yüzey Hazırlama İstasyonu 2	25,92	0,00	0,00	23,55	0,00	23,91	25,04	0,00	26,18	0,00	24,60	0,00
Yüzey Hazırlama İstasyonu 3	0,00	27,21	33,25	0,00	26,40	0,00	0,00	33,47	0,00	28,07	0,00	27,62
Yüzey Hazırlama İstasyonu 4	0,00	27,21	33,25	0,00	26,40	0,00	0,00	33,47	0,00	28,07	0,00	27,62

1, 2 ve 3 no'lu kaynak istasyonlarından uzunlukları 5 metre; 4, 5 ve 6 no'lu kaynak istasyonlarının uzunlukları ise 10 metredir. Transformör kazanlarının genişlik ve ağırlık kısıtlarına göre istasyonlara yapılan atamaları Tablo 4.2'de düzenlenmiştir. 8 tondan daha az ağırlığa sahip transformör kazanlarının kaynak işlemi ise 1, 2 ve 3 no'lu kaynak istasyonlarında yapılmaktadır. 8 ton ve daha fazla ağırlığa sahip transformör kazanlarının kaynak işlemleri 4, 5 ve 6 no'lu kaynak istasyonlarında yapılmaktadır. Sızdırmazlık test ve boya öncesi yüzey hazırlama işlemleri ise; 8 tondan daha az ağırlığa sahip transformör kazanları için 1 ve 2 no'lu istasyonlarda, 8 ton ve daha fazla ağırlığa sahip transformörler kazanları için ise 3 ve 4 no'lu istasyonlarda gerçekleştirilmektedir. İzleyen bölümde, yapay arı kolonisi algoritması kullanılarak yapılan çizelgeleme çalışmasından bahsedilmiştir.

### 4.3 Yapay Arı Kolonisi Algoritmasıyla Sipariş Çizelgeleme

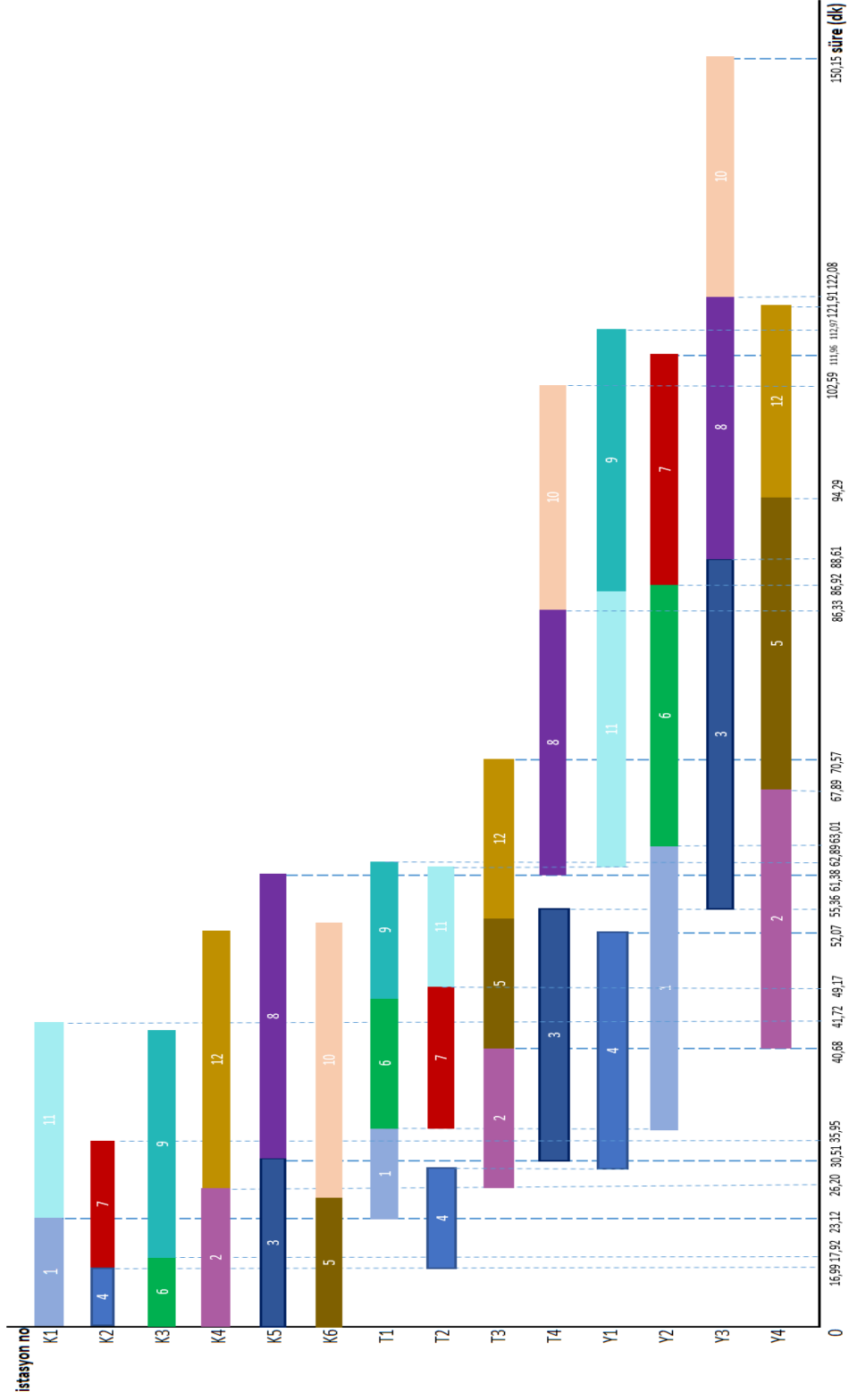
Esnek atölye tipi çizelgeleme probleminde; belirli kısıtlar altında istasyonlara en uygun yerleşimin yapılması gerekmektedir. Siparişlerin toplam tamamlanma zamanının en aza indirilmesi amaçlanmıştır. Bunun için de yapay zeka optimizasyon yöntemlerinden yapay arı kolonisi algoritması kullanılmıştır.

Yapılan sipariş çizelgeleme çalışmasında, kıyaslama kriteri olarak teorik minimum tamamlanma zamanı kullanılmıştır. İş ve makine bazlı olarak ayrı ayrı hesaplanan bu süreler birbirine eşit ve 89,3 dakika olarak bulunmuştur. Sonuçlar kısmında, yapay arı kolonisi algoritmasıyla elde edilen çözümün teorik minimum tamamlanma zamanına ne kadar yakın olduğu değerlendirilmiştir.

Algoritmada, işçi arı ve gözcü arı sayısının eşit olduğu varsayılmaktadır. Yapılan kodlamada, işçi arı ve gözcü arı sayısı 25 olarak alınmıştır. Algoritmanın sonsuz döngüye girmesine engel olmak amacıyla, gidilen kaynaklarda (istasyonlarda) ne kadar arama yapılacağını belirten limit değeri denilen bir durma kriteri konulmuştur. Bu çalışmada, limit değeri 150 olarak belirlenmiştir.

Yapay arı kolonisi algoritması, Matlab aracılığıyla geliştirilen yazılım sayesinde uygulamaya geçirilmiştir. Yazılım; Intel Core i5-3230M 2.6 Ghz işlemciye sahip kişisel bir bilgisayarda 500000 çevrim çalıştırılmıştır. Mevcut sipariş çizelgesi ile algoritma kullanılarak elde edilen sipariş çizelgesi karşılaştırılarak sonuçlar analiz edilmiştir.

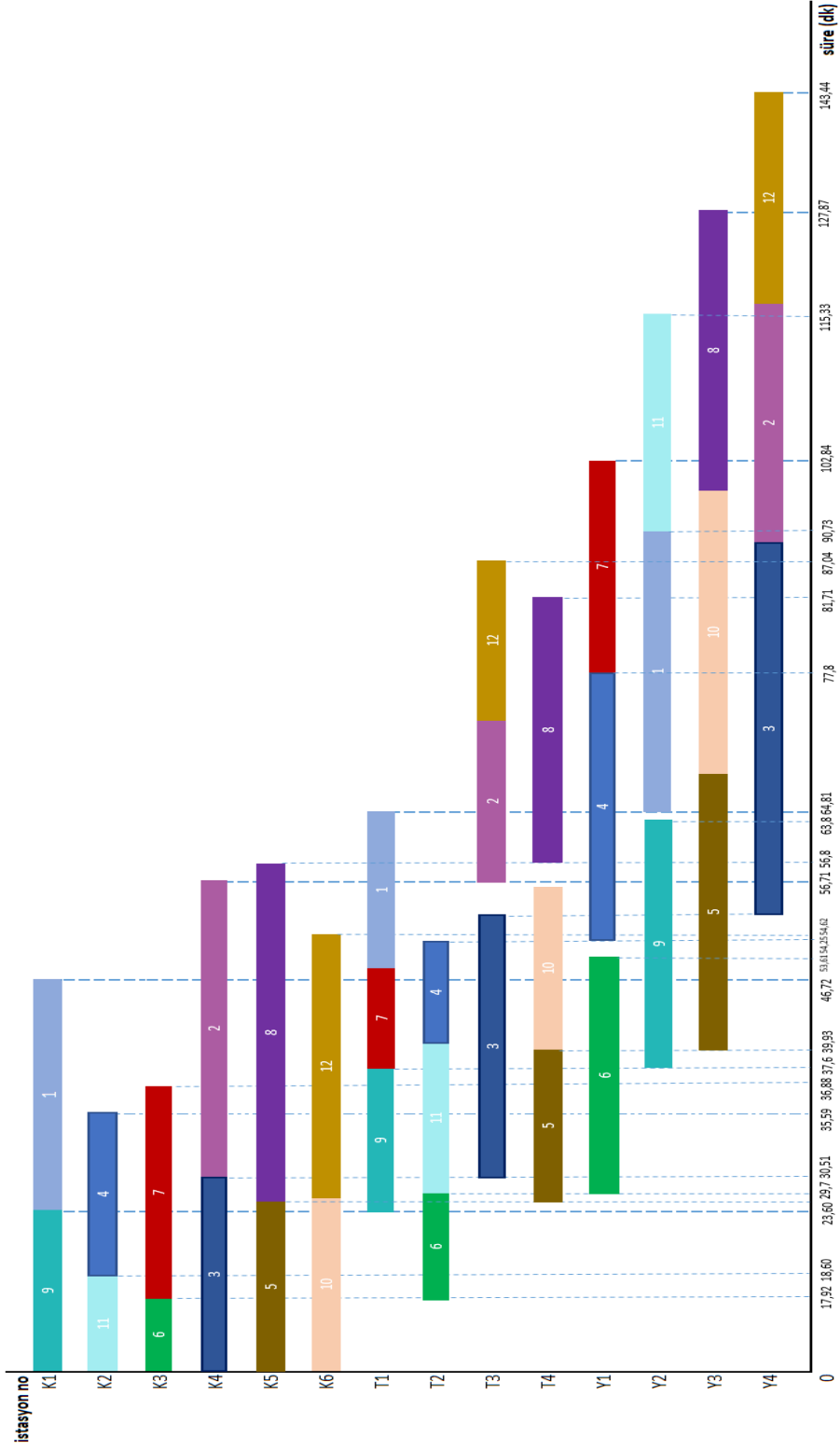
*Mevcut sipariş çizelgesi*



**Şekil 4.2:** Mevcut durumdaki sipariş çizelgesi.

Şekil 4.2’de belirtilen sipariş çizelgesinde, kısıtlar ve varsayımlar dikkate alınarak manuel olarak yapılan atamalar gösterilmiştir. Buna göre, siparişlerin toplam tamamlanma zamanı 150,15 dakika olarak bulunmuştur.

*Algoritma kullanılarak oluşturulan sipariş çizelgesi*



**Şekil 4.3:** Yapay arı kolonisi algoritması ile bulunan sipariş çizelgesi.

Şekil 4.3’de sipariş çizelgesinde, kısıtlar ve varsayımlar dikkate alınarak yapay arı kolonisi algoritması kullanılarak yapılan atamalar gösterilmiştir. Buna göre, siparişlerin toplam tamamlanma zamanı 143,44 dakika olarak bulunmuştur.

Mevcut durumda manuel olarak yapılan atamalar sonucunda oluşturulan sipariş çizelgesi ile yapay arı kolonisi algoritması kullanılarak oluşturulan sipariş çizelgesi karşılaştırıldığında; algoritmayla oluşturulan çizelgede, siparişlerin toplam tamamlanma zamanınının 6,71 dk azaldığı görülmüştür. Sonuç olarak; yapay arı kolonisi algoritması kullanılarak geliştirilen yazılım aracılığıyla oluşturulan sipariş çizelgesine göre, işlerin toplam tamamlanma zamanında %4,47 oranında iyileşme sağlanmıştır. Yapay arı kolonisi algoritması kullanılarak oluşturulan sipariş çizelgesine göre bulunan çözüm ile teorik minimum tamamlanma zamanını karşılaştırdığımızda, teorik minimumdan sapma miktarı %11,02 oranında azalmıştır.

## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

### 5.1 Çalışmanın Özeti

Literatürde çizelgeleme ile ilgili yapılmış olan çalışmalar; kural tabanlı, kesin çözümlü ve doğadan ilham alınarak geliştirilen sezgisel algoritmalar olmak üzere üç ana grup ve bunların karmalarından oluşmaktadır. Bu tezde, canlılardan ilham alınarak geliştirilen sezgisel algoritmalarından olan yapay arı kolonisi algoritması kullanılarak proje bazlı emek yoğun esnek atölye tipi çizelgeleme çalışması gerçekleştirilmiştir.

Mevcut durumda, çalışmanın gerçekleştirildiği transformatör kazan imalatçısının kaynak atölyesinde, çizelgeleme faaliyetleri için herhangi bilimsel bir yöntem kullanılmamaktadır. Gelen siparişlere ait işler, istasyonlara sipariş alınma sırasına göre dağıtılmaktadır. Bu durum; işletme içinde bazı istasyonlarda kuyruk oluştururken, bazı istasyonların ise boşta beklemesine sebep olarak eldeki siparişlerin toplam tamamlanma zamanını arttırmaktadır. Bu da hedef termin tarihlerinden sapmalara ve dolayısıyla müşteri memnuniyetinin azalmasına yol açmaktadır.

Bu tezde, üretime alınmak üzere kuyrukta bekleyen siparişlerin istasyonlara dağıtımını yapay arı kolonisi algoritması kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tüm atamalar; transformatör kazanlarının ağırlık, genişlik kısıtları ile istasyonların uzunluk kısıtları ve varsayımlar dikkate alınarak yapılmıştır.

### 5.2 Sonuçların Değerlendirilmesi

Siparişlerin toplam tamamlanma zamanını minimize ederek bulunabilen en uygun sipariş çizelgesini elde etmeyi amaçlayan bu çalışma ile siparişlerin toplam tamamlanma zamanı toplamda 150,15 dakikadan 143,44 dakikaya kadar azaltılarak %4,47 lik bir iyileşme sağlanmıştır. Bulunabilen en iyi çözüm ile teorik minimum

tamamlanma zamanını karşılaştırdığımızda, teorik minimumdan sapma miktarı %11,02 oranında azalmıştır.

Siparişlerin toplam tamamlanma zamanında sağlanan iyileştirmelerle, siparişlerin termin tarihlerine uygun olarak teslim edilebilmesi mümkün olacaktır. Böylelikle müşteri memnuniyetinde artış beklenmektedir.

### **5.3 Gelecek Çalışmalar İçin Araştırma Önerileri**

Bu tezde, yapay arı kolonisi algoritması kullanılarak emek yoğun proje bazlı çalışan bir işletmede esnek atölye tipi çizelgeleme çalışması yapılmıştır. Gelecek çalışmalarda; karınca kolonisi, genetik algoritma gibi yaygın kullanılan yapay zeka optimizasyon algoritmalarının yanında, gri kurt optimizasyon algoritması v.b. yeni ileri sürülen algoritmaların da performansları test edilerek performans kıyaslama çalışmaları yapılabilir.

Bu tezde, yapay arı kolonisi algoritmasının probleme uygun şekilde adapte edilebilmesi için işlem süreleri olasılık dağılımı olarak değil, deterministik süreler olarak alınmıştır. Bu varsayım problemi basitleştirmekle birlikte dinamik atölye şartlarının çözüme yansıtılmasını güçleştirmektedir. Gelecek çalışmalarda stokastik işlem süreleri kullanılarak bu alanda çalışan araştırmacılarca benzer çalışmalar yapılabilir.



## 6. KAYNAKLAR

Abdullah, S. and Nezhad M. A., “Fuzzy job-shop scheduling problems: A review”, *Information Sciences*, doi: 10.1016/j.ins.2014.03.060, 278, 380-407, (2014).

Abdullah, S. and Nezhad M. A., “A robust intelligent construction procedure for job-shop scheduling”, *Information Technology and Control*, doi: 10.5755/j01.itc.43.3.3536, (2014).

Alharkan, İ. M. (2005). *Algorithms for sequencing and scheduling*, King Saud University. [http://ikucukkoc.baun.edu.tr/lectures/EMM4129/Algorithms\\_for\\_Sequencing\\_and\\_Scheduling.pdf](http://ikucukkoc.baun.edu.tr/lectures/EMM4129/Algorithms_for_Sequencing_and_Scheduling.pdf)

Allahverdi, A., Gupta, J. N. D. and Aldowaisan, T., “A review of scheduling research involving setup considerations”, *Omega The International Journal of Management Science*, doi: 10.1016/S0305-0483(98)00042-5, 27, 219-239, (1999).

Akay, B. ve Karaboğa, D., “A comparative study of Artificial Bee Colony algorithm”, *Applied Mathematics and Computation*, 214, 108-132, (2009).

Atalay, M. ve Çelik, E., “Büyük veri analizinde yapay zeka ve makine öğrenmesi uygulamaları”, *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 9 (22), 155-172, (2017).

Baysal, M. E., Durmaz, T., Sarucan, A. ve Engin, A., “Açık atölye tipi çizelgeleme problemlerinin paralel kanguru algoritması ile çözümü”, *Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 27 (4), 855-864, (2012).

Biskup, D., “A state-of-the-art review on scheduling with learning effects”, *European Journal of Operational Research*, doi: 10.1016/j.ejor.2007.05.040, 188, 315-329, (2008).

Chen, H., Ihlow and J., Lehmann, C., “A genetic algorithm for flexible job-shop scheduling”, *Proceedings 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, doi: 10.1109/ROBOT.1999.772512, 2, Detroit, MI, USA, IEEE Xplore, 1120-1125, (1999).

Coşkun, A., “Yapay zeka optimizasyon teknikleri: Literatür değerlendirmesi”, *Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları*, (2007).

Dalfard, V. M. and Mohammadi, G., “Two meta-heuristic algorithms for solving multi-objective flexible job-shop scheduling with parallel machine and maintenance constraints”, *Computers & Mathematics with Applications*, doi: 10.1016/j.camwa.2012.04.007, 64 (6), 2111-2117, (2012).

Erdoğan, P., “Doğadan esinlenen optimizasyon algoritmaları ve optimizasyon algoritmalarının optimizasyonu”, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 4, 293-304, (2016).

Gao, Z. K., Suganthan, P. N., Pan, Q. K., Chua, T. J., Chong, C. S. and Cai, T. X., “A two-stage artificial bee colony algorithm scheduling flexible job-shop scheduling problem with new insertion”, *Expert Systems with Applications*, doi: 10.1016/j.eswa.2015.06.004, 42 (21), 7652-7663, (2015).

Gao, Z. K., Suganthan, P. N., Pan, Q. K., Chua, T. J., Chong, C. S. and Cai, T. X., “An improved artificial bee colony algorithm for flexible job shop scheduling with fuzzy processing time”, *Expert Systems with Applications*, doi: 10.1016/j.eswa.2016.07.046, 65, 52-67, (2016).

Gharbi, A. and Haouari, M., “Optimal parallel machines scheduling with availability constraints”, *Discrete Applied Mathematics*, doi: 10.1016/j.dam.2004.12.003, 148 (1), 63-87, (2005).

Gökşen, Y., “Geleneksel üretimden esnek üretime: Karşılaştırmalı bir inceleme”, *Dokuz Eylül Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi* 5(4), 32-48, (2003).

Gökşen, Y. ve Erdem, S., “Hücreyel üretim sisteminde makine-parça ailelerinin oluşturulmasında dengeli talep-kapasite ve dengesiz talep-kapasite durumunun analizi”, *D.E.Ü. İ.İ.B.F. Dergisi*, 18 (2), 99-111, (2003).

Güner, M. ve Kanat, S., “Tam zamanında üretim sisteminin tekstil ve konfeksiyon sanayine uygulanabilirliği”, *Tekstil ve Konfeksiyon*, 4, 274-278, (2006).

Hmida, A. B., Haouari, M., Huguet, M. J. and Lopez, P., “Discrepancy search for the flexible job shop scheduling problem”, *Computers & Operations Research*, doi: 10.1016/j.cor.2010.03.009, 37 (12), 2192-2201, (2010).

Hsu, C. H., Cheng, T. C. E. and Yang, D. L., “Unrelated parallel-machine scheduling with rate-modifying activities to minimize the total completion time”, *Information Sciences*, doi: 10.1016/j.ins.2011.06.010, 181 (20), 4799-4803, (2011).

İçen, D. ve Günay, S., “Uzman sistemler ve istatistik”, *İstatistikçiler Dergisi: İstatistik & Aktüerya*, 7, 37-45, (2014).

Jia, S. and Hu, Z. H., “Path-relinking Tabu search for the multi-objective flexible job shop scheduling problem”, *Computers & Operations Research*, doi: 10.1016/j.cor.2014.01.010, 47, 11-26, (2014).

Karaboğa, D. (2014). *Yapay zeka optimizasyon algoritmaları*. vol 3, Ankara: Nobel.

Kaya, S. ve Fırlalı, N., “Esnek atölye tipi çizelgeleme problemlerinin meta sezgisel yöntemlerle çözümüne yönelik bir inceleme”, *SAÜ Fen Bil. Der.*, 20 (2), 223-244, (2016).

Karaoglan, A. D. and Cetin, E. (2019). Artificial bee colony algorithm for labor-intensive project type job shop scheduling: A case study. (eds: F. Calisir, E. Cevikcan and H. Camgöz Akdag), *Industrial Engineering in the Big Data Era*, doi: 10.1007/978-3-030-03317-0\_7, Berlin: Springer, 79-88.

Karimi, H., Rahmati, S. H. A. and Zandieh, M., “An efficient knowledge-based algorithm for the flexible job shop scheduling problem”, *Knowledge-Based Systems*, doi: 10.1016/j.knosys.2012.04.001, 36, 236-244, (2012).

Keskintürk, T., “Diferansiyel gelişim algoritması”, *İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 5 (9), 85-99, (2006).

Küçüksille, E. U. ve Tokmak, M., “Yapay arı kolonisi algoritması kullanarak otomatik ders çizelgeleme”, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 15 (3), 203-210, (2011).

Kutucu, H. ve Durgut, R., “Silah hedef atama problemi için tavlama benzetimli bir hibrit yapay arı kolonisi algoritması”, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 22, 263-269, (2018).

Li, J. Q., Pan, Q. K. and Tasgetiren, M. F., “A discrete artificial bee colony algorithm for the multi-objective flexible job-shop scheduling problem with maintenance activities”, *Applied Mathematical Modelling*, doi: 10.1016/j.apm.2013.07.038, 38 (3), 1111-1132, (2014).

Meng, T., Pan, Q. K. and Sang, H. Y., “A hybrid artificial bee colony algorithm for a flexible job shop scheduling problem with overlapping in operations”, *International Journal of Production Research*, doi: 10.1080/00207543.2018.1467575, 56 (16), 5278-5292, (2018).

Mousakhani, M., “Sequence-dependent setup time flexible job shop scheduling problem to minimise total tardiness”, *International Journal of Production Research*, doi: 10.1080/00207543.2012.746480, 51 (12), 3476-3487, (2013).

Neto, R. F. T. and Filho, M. G., “Literature review regarding Ant Colony Optimization applied to scheduling problems: Guidelines for implementation and directions for future research”, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, doi: 10.1016/j.engappai.2012.03.011, 26 (1), 150-161, (2013).

Özbyay, F. ve Alataş, B., “Suyun hareketinden esinlenilerek geliştirilen hesapsal zeka yöntemlerinin incelenmesi”, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 137-147, (2016).

Özdemir, M. (2015). Yapay Arı Kolonisi Algoritması [online]. (01 Kasım 2018), <https://www.youtube.com/watch?v=0Mwh5DXFmEE&list=PLlwMAMkGIGrFhtJLm87i0O1x9CBaD3Kd3>

Pinedo, M. L. (2005). *Planning and scheduling in manufacturing and services*. New York: Springer.

Sun, K. and Li, H., “Scheduling problems with multiple maintenance activities and non-preemptive jobs on two identical parallel machines”, *International Journal of Production Economics*, doi: 10.1016/j.ijpe.2009.10.018, 124 (1), 151-158, (2010).

Sterna, M., “A survey of scheduling problems with late work criteria”, *Omega The International Journal of Management Science*, doi: 10.1016/j.omega.2010.06.006, 39 (2), 120-129, (2011).

Şahin, R., “Dinamik tesis düzenleme problemi için bir tavlama benzetimi sezgiseli”, *Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 23 (4), 863-870, (2008).

Taha, H. A. (2000). *Yöneylem araştırması*. İstanbul: Literatür Yayıncılık.

Tanık, M., “Kalıp ayar sürelerinin SMED metodolojisi ile iyileştirilmesi: Bir yalın altı sigma uygulaması”, *Muğla Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 25, 118-140, (2010).

Tanrıtanır, E., “Üretim sistemleri ve imalat sistemleri”, *İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, 40 (1), 128-137, (1990).

Thammano, A. and Phu-ang, A., “A hybrid artificial bee colony algorithm with local search for flexible job-shop scheduling problem”, *Procedia Computer Science*, doi: 10.1016/j.procs.2013.09.245, 20, 96-101, (2013).

Turan, H., “Çevik üretim ile yalın üretimin karşılaştırılması”, *Journal Of Life Economics*, 62-76, (2016).

Udaiyakumar, K. C. and Chandrasekaran, M., “Application of firefly algorithm in job shop scheduling problem for minimization of makespan”, *Procedia Engineering*, doi: 10.1016/j.proeng.2014.12.333, 97, 1798-1807, (2014).

Xia, W. and Wu, Z., “An effective hybrid optimization approach for multi-objective flexible job-shop scheduling problems”, *Computers & Industrial Engineering*, doi: 10.1016/j.cie.2005.01.018, 48 (2), 409-425, (2005).

Xing, L. N., Chen, Y. W. and Yang, K. W., “Double layer ACO algorithm for the multi-objective FJSSP”, *New Generation Computing*, 26 (4), 313-327, (2008).

Xing, L. N., Chen, Y. W. and Yang, K. W., “Multi-population interactive coevolutionary algorithm for flexible job shop scheduling problems”, *Computational Optimization and Applications*, doi: 10.1007/s10589-009-9244-7, 48 (1), 139-155, (2011).

Wang, J. B. and Wei, C. M., “Parallel machine scheduling with a deteriorating maintenance activity and total absolute difference penalties”, (ed: Theodore Simos), *Applied Mathematics and Computation*, doi: 10.1016/j.amc.2011.03.010, 217 (20), 8093-8099, (2011).

Wang, L., Zhou, G., Xu, Y. and Liu, M., “An enhanced Pareto-based artificial bee colony algorithm for the multi-objective flexible job-shop scheduling”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, doi: 10.1007/s00170-011-3665-z, 60 (9-12), 1111- 1123, (2012).

Wang, L., Zhou, G., Xu, Y., Wang, S. and Liu, M., “An effective artificial bee colony algorithm for the flexible job-shop scheduling problem”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, doi: 10.1007/s00170-011-3610-1, 60 (1-4), 303-315, (2012).

Wang, L., Zhou G., Xu, Y. and Liu, M., “A hybrid artificial bee colony algorithm for the fuzzy flexible job-shop scheduling problem”, *International*

*Journal of Production Research*, doi: 10.1080/00207543.2012.754549, 51 (12), 3593-3608, (2013).

Yang, S. J., “Unrelated parallel-machine scheduling with deterioration effects and deteriorating multi-maintenance activities for minimizing the total completion time”, *Applied Mathematical Modelling*, doi: 10.1016/j.apm.2012.07.029, 37 (5), 2995-3005, (2013).

Zribi, N., El Kamel, A. and Borne, P., “Total tardiness in a flexible job-shop”, *The Proceedings of the Multiconference on Computational Engineering in Systems Applications*, doi: 10.1109/CESA.2006.4281882, Beijing, China, IEEE Xplore, 1543-1549, (2006).

Zribi, N., El Kamel, A. and Borne, P., “Minimizing the makespan for the MPM job-shop with availability constraints”, *International Journal of Production Economics*, doi: 10.1016/j.ijpe.2007.01.014, 112 (1), 151-160, (2008).

## **7. EKLER**



## EKLER

### EK A: Literatür Taraması

**Tablo A.1:** Literatür taraması özet tablo.

Yazar(lar) Yıl	Problem	Kullanılan Yöntem	Problemin Girdileri	Problemin Çıktıları/Performans Ölçütleri
Allahverdi, Gupta ve Aldowaisan (1999)	Tek makine, paralel makine, akış tipi ve atölye tipi çizelgeleme	Dinamik programlama, dal-sınır algoritması, tabu arama algoritması, karışık tamsayılı doğrusal programlama, genetik algoritma, çoklu başlangıç iniş, tavlama benzetimi, eşik kabul ve tabu arama algoritmaları, doğrusal olmayan programlama, tamsayılı doğrusal programlama, polinom zamanı algoritması, karışık tamsayılı programlama	Yapılan işlere ait çeşitli özellikler (Kapsam, kısıtlar ve varsayımlar vb.)	Set-up (kurulum/hazırlık) süreleri ve maliyetleri
Chen, Ihlow ve Lehman (1999)	Esnek atölye tipi çizelgeleme	Genetik algoritma	Yapılan işlere ait çeşitli özellikler (Kapsam, kısıtlar ve varsayımlar, işlem süreleri vb.)	İşlerin toplam tamamlanma zamanı (Cmax)
Xia ve Wu (2005)	Esnek atölye tipi çizelgeleme	Parçacık sürü optimizasyonu, tavlama benzetimi	Yapılan işlere ait çeşitli özellikler (Kapsam, kısıtlar ve varsayımlar, işlem süreleri vb.)	İşlerin toplam tamamlanma zamanı (Cmax)
Gharbi ve Haouari (2005)	Paralel makine çizelgeleme	Dal-sınır algoritması	Özdeş paralel makinelerin ve yapılacak işlerin özellikleri (boşta kalma, işlem ve teslim süreleri vb.)	İşlerin toplam tamamlanma zamanı (Cmax)

**Tablo A.1** (devam)

Zribi, El Kamel ve Borne (2006)	Esnek atölye tipi çizelgeleme	Genetik algoritma	Yapılan işlere ait çeşitli özellikler (Kapsam, kısıtlar ve varsayımlar, işlem süreleri vb.)	İşlerin toplam gecikme süresi
Biskup (2008)	Tek makine, paralel makine, akış tipi ve atölye tipi çizelgeleme	Öğrenme etkisi	Öğrenme etkilerinin ele alındığı çizelgeleme modellerindeki işlere ve makinelere ait özellikler	Öğrenme etkilerinin çizelgeleme modelleriyle ilişkisine dair literatürden elde edilen veriler
Xing, Chang ve Yang (2008)	Esnek atölye tipi çizelgeleme	Karınca kolonisi algoritması	Yapılan işlere ait çeşitli özellikler (Kapsam, kısıtlar ve varsayımlar, işlem süreleri vb.)	İşlerin toplam tamamlanma zamanı (Cmax)
Zribi, El Kamel ve Borne (2008)	Esnek imalat sistemlerinde çok amaçlı paralel makinelerle atölye tipi çizelgeleme	Yerel arama temelli sezgisel algoritma ve genetik algoritma	Makinelerin kullanılabilirlikleriyle ve makinelere atanan işlere ait özellikler (işlem süreleri, boşa kalma süreleri vb.)	İşlerin toplam tamamlanma zamanı (Cmax)
Hmida, Haouari, Huguet ve Lopez (2010)	Esnek atölye tipi çizelgeleme	Tırmanma tutarsızlığı arama ve komşuluk arama algoritmaları	Yapılan işlere ait çeşitli özellikler (Kapsam, kısıtlar ve varsayımlar, işlem süreleri vb.)	İşlerin toplam tamamlanma zamanı (Cmax)
Sun ve Li (2010)	Paralel makine çizelgeleme	Sezgisel algoritma	Paralel makinelerde ve bu makinelerde gerçekleştirilen bakım faaliyetlerine dair kısıtlar ve varsayımlar	Bakım faaliyetlerinin toplam tamamlanma zamanı (Cmax)
Xing, Chang ve Yang (2011)	Esnek atölye tipi çizelgeleme	Karınca kolonisi algoritması ve genetik algoritma	Yapılan işlere ait çeşitli özellikler (Kapsam, kısıtlar ve varsayımlar, işlem süreleri vb.)	İşlerin toplam tamamlanma zamanı (Cmax)
Hsu, Cheng ve Yang (2011)	Paralel makine çizelgeleme	Polinom zamanı algoritması	Makinelere ve bakım faaliyetlerine ait özellikler (işlem süreleri vb.)	Bakım faaliyetlerinin toplam tamamlanma zamanı (Cmax)

**Tablo A.1 (devam)**

Sterna (2011)	Tek makine, paralel makine ve atölye tipi çizelgeleme	EDD, dinamik programlama, dal-sınır algoritması, polinom zamanı algoritması, tavlama benzetimi, tabu arama algoritması, komşuluk arama algoritması	Probleme özgü kısıtlar ve varsayımlar (teslim süreleri, işlem süreleri vb.)	İşlerin toplam tamamlanma zamanı (Cmax)
Wang ve Wei (2011)	Paralel makine çizelgeleme	Polinom zamanı algoritması	Yapılan işlere ait özellikler (kapsam, kısıtlar ve varsayımlar, bakım faaliyetlerinin işlem süreleri, bekleme süreleri vb.)	Bakım faaliyetlerinin toplam tamamlanma zamanı (Cmax)
Wang, Zhou, Xu ve Liu (2012)	Esnek atölye tipi çizelgeleme	Pareto tabanlı yapay arı kolonisi algoritması	Yapılan işlere ait özellikler (kapsam, kısıtlar ve varsayımlar, işlem süreleri vb.)	İşlerin toplam tamamlanma zamanı (Cmax)
Dalfard ve Mohammadi (2012)	Esnek atölye tipi paralel makine çizelgeleme	Hibrit genetik algoritma ve tavlama benzetimi	Yapılan işlere ait özellikler (kapsam, kısıtlar ve varsayımlar, bakım faaliyetlerinin işlem süreleri vb.)	İşlerin toplam tamamlanma zamanı (Cmax)
Karimi, Rahmati ve Zandieh (2012)	Esnek atölye tipi çizelgeleme	Değişken komşuluk arama algoritması	Yapılan işlere ait özellikler (kapsam, kısıtlar ve varsayımlar, işlem süreleri vb.)	İşlerin toplam tamamlanma zamanı (Cmax)
Wang, Zhou, Xu ve Liu (2012)	Esnek atölye tipi çizelgeleme	Yapay arı kolonisi algoritması	Yapılan işlere ait özellikler (kapsam, kısıtlar ve varsayımlar, işlem süreleri vb.)	İşlerin toplam tamamlanma zamanı (Cmax)
Neto ve Filho (2013)	Tek makine, paralel makine, atölye tipi ve akış tipi çizelgeleme	Karınca kolonisi optimizasyon algoritması	Problemlere ait özellikler (kapsam, kısıtlar, varsayımlar vb.)	ACO'nun çizelgeleme problemlerine uyarlanması sonucu literatürden elde edilen veriler
Wang, Zhou, Xu ve Liu (2013)	Bulanık esnek atölye tipi çizelgeleme	Hibrit yapay arı kolonisi algoritması, değişken komşuluk arama algoritması	Yapılan işlere ait özellikler (kapsam, kısıtlar ve varsayımlar, işlem süreleri vb.)	İşlerin toplam tamamlanma zamanı (Cmax)
Yang (2013)	Paralel makine çizelgeleme	Polinom zamanı algoritması	Yapılan bakım faaliyetlerine ait özellikler (kaynak ve üretim kısıtları, işlem süreleri vb.)	İşlerin toplam tamamlanma zamanı (Cmax)

**Tablo A.1** (devam)

Mousakhani (2013)	Esnek atölye tipi çizelgeleme	Karışık tamsayılı doğrusal programlama, yerel arama temelli sezgisel algoritma	Yapılan işlere ait özellikler (kapsam, kısıtlar ve varsayımlar, kurulum, hazırlık süreleri vb.)	İşlerin toplam gecikme süresi
Thammano ve Phuang (2013)	Esnek atölye tipi çizelgeleme	Yerel arama, tavlama benzetimi ve hibrid yapay arı kolonisi algoritmaları	Makinelere ve işlere ait özellikler (işlem süresi, boşa bekleme süresi, kısıtlar vb.)	İşlerin toplam tamamlanma zamanı (Cmax)
Abdullah ve Nezhad (2014)	Bulanık atölye tipi çizelgeleme	LDD, EDD, tamsayılı programlama, dal-sınır algoritması, Johnson algoritması, tabu arama algoritması, parçacık sürü optimizasyonu, sinir ağları, genetik algoritma, tavlama benzetimi, karınca kolonisi algoritması, arı kolonisi optimizasyonu, yapay bağışıklık sistemi	Bulanık işlem süreleri	İşlerin toplam bulanık tamamlanma zamanı (Cmax)
Abdullah ve Nezhad (2014)	Atölye tipi çizelgeleme	Hızlı ve akıllı bir sezgisel algoritma	Yapılan işlere ait özellikler (kapsam, kısıtlar ve varsayımlar, işlem süreleri vb.)	İşlerin toplam tamamlanma zamanı (Cmax)
Li, Pan ve Taşgetiren (2014)	Esnek atölye tipi çizelgeleme	Tabu arama ve yapay arı kolonisi algoritmaları	Yapılan işlere ait özellikler (kapsam, kısıtlar ve varsayımlar, işlem ve bakım süreleri vb.)	Bakım faaliyetlerinin toplam tamamlanma zamanı (Cmax)
Udaiyakumar ve Chandrasekaran (2014)	Atölye tipi çizelgeleme	Ateş böceği algoritması	Yapılan işlere ait özellikler (kapsam, kısıtlar ve varsayımlar, işlem süreleri vb.)	İşlerin toplam tamamlanma zamanı (Cmax)
Jia ve Hu (2014)	Esnek atölye tipi çizelgeleme	Tabu arama ve yol arama (bağlantı yolu) algoritmaları	Yapılan işlere ait özellikler (kapsam, kısıtlar ve varsayımlar vb.)	Kıyaslama örneklerinin amaç fonksiyonu değerleri

**Tablo A.1** (devam)

Gao, Suganthan, Pan, Chua, Chong ve Cai (2015)	Esnek atölye tipi çizelgeleme	Yapay arı kolonisi algoritması	Yapılan işlere ait özellikler (kapsam, kısıtlar ve varsayımlar, işlem süreleri vb.)	İşlerin toplam tamamlanma zamanı (Cmax)
Kaya ve Fıçlalı (2016)	Esnek atölye tipi çizelgeleme	Meta-sezgisel algoritmalar	Yapılan işlere ait özellikler (kapsam, kısıtlar ve varsayımlar vb.)	İşlerin toplam tamamlanma zamanı, gecikme zamanı, akış zamanı, ağırlıklı gecikme zamanı, ortalama gecikme zamanı, teslim zamanı
Gao, Suganthan, Pan, Chua, Chong ve Cai (2016)	Esnek atölye tipi çizelgeleme	Geliştirilmiş yapay arı kolonisi algoritması	Yapılan işlere ait özellikler (kapsam, kısıtlar ve varsayımlar, bulanık işlem süreleri vb.)	İşlerin toplam bulanık tamamlanma zamanı (Cmax) ve bulanık iş yükü
Meng, Pan ve Sang (2018)	Esnek atölye tipi çizelgeleme	Hibrit yapay arı kolonisi algoritması, göçmen kuş optimizasyon algoritması	Yapılan işlere ait özellikler (kapsam, kısıtlar ve varsayımlar vb.)	İşlerin toplam tamamlanma zamanı (Cmax)
Karaoğlan ve Çetin (2019)	Atölye tipi çizelgeleme	Yapay arı kolonisi algoritması	Yapılan işe ait özellikler (kapsam, kısıtlar ve varsayımlar vb.)	İşlerin toplam tamamlanma zamanı (Cmax)