

Paralel Makineli Sıra Bağımlı Hazırlık Süreli Çok Kademeli
Makine Çizelgeleme Problemlerinin Çözümü İçin
Kümeleme Tabanlı ve Sınırlı Sayımlama Temelli Bir Çözüm Yaklaşımı

Hacer Defne Okul

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Mayıs 2015

A Clustering and Restricted Enumeration Based Solution Approach
for Scheduling Multi-Stage Parallel Machines
with Sequence Dependent Setup Times

Hacer Defne Okul

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Industrial Engineering

May 2015

Paralel Makineli Sıra Bağımlı Hazırlık Süreli Çok Kademeli
Makine Çizelgeleme Problemlerinin Çözümü İçin
Kümeleme Tabanlı ve Sınırlı Sayımlama Temelli Bir Çözüm Yaklaşımı

Hacer Defne Okul

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

Danışman: Prof. Dr. Müjgan Sağır

Mayıs 2015

ONAY

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi Hacer Defne Okul'un YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı "Paralel Makineli Sıra Bağımlı Hazırlık Süreli Çok Kademeli Makine Çizelgeleme Problemlerinin Çözümü İçin Kümeleme Tabanlı ve Sınırlı Sayımlama Temelli Bir Çözüm Yaklaşımı" başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Müjgan Sağır

İkinci Danışman : -

Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:

Üye : Prof. Dr. Müjgan Sağır (Danışman)

Üye : Prof. Dr. Attila İşlier

Üye : Prof. Dr. Muzaffer Kapanoğlu

Üye : Yrd. Doç. Dr. Zehra Kamışlı Öztürk

Üye : Yrd. Doç. Dr. Gürkan Öztürk

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

Prof. Dr. Hürriyet ERŞAHAN
Enstitü Müdürü

ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Prof. Dr. Müjgan Sağır danışmanlığında hazırlamış olduğum “Paralel Makineli Sıra Bağımlı Hazırlık Süreli Çok Kademeli Makine Çizelgeleme Problemlerinin Çözümü İçin Kümeleme Tabanlı ve Sınırlı Sayımlama Temelli Bir Çözüm Yaklaşımı” başlıklı YÜKSEK LİSANS tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel etik ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim. 16/06/2015

Hacer Defne Okul

İmza

ÖZET

Genellikle paralel makineli akış atölyesi olarak adlandırılan, kademe başına birden fazla makinenin yer aldığı akış atölyeleri çizelgeleme problemleri, gerçek hayat uygulamalarında rastlanan bir karmaşık kombinatoriyal problemidir. Paralel makineli akış atölyesi problemlerinin NP-zor sınıfında yer aldığı, Gupta (1988) tarafından gösterilmiştir. Bu çalışma, toplam tamamlanma zamanının en küçüklenmeye çalışıldığı bir k kademeli bir paralel makineli akış atölyesini ele almaktadır. Her bir iş sırasıyla, en az bir kademede birden fazla paralel makinenin bulunduğu k üretim kademesinden geçerek işlem görür. Söz konusu yapıda ele alınan bir problem, her bir kademede işlerin makinelere atanmasını ve aynı makineye atanan işlerin sıralanmasını içerir. Bu çalışmada, ele alınan problemin çözümünü bulmaya yönelik olarak yeni bir 0-1 karma tamsayılı matematiksel model geliştirilmiştir. Ayrıca, büyük boyutlu veri setleri için çözüm makul zamanlarda çözüm elde edebilmek amacıyla bir sezgisel yaklaşım önerilmiştir. Geliştirilen sezgisel algoritma, C# programlama dili kullanılarak kodlanmıştır. Kullanıcı etkileşimli arayüzler, sistemin kullanımını kolaylaştırmakta ve dinamik ortamlarda esnekliği sağlamaktadır. Gerçek veri setleri kullanılarak, matematiksel model ve sezgisel algoritmanın çözüm sonuçları karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Paralel makineli akış atölyesi, sezgisel yaklaşım

SUMMARY

The scheduling of flow shops with multiple parallel machines per stage, usually referred to as the hybrid flow shop (HFS), is a complex combinatorial problem encountered in many real world applications. HFS problem has been proven to be NP-hard by Gupta (1988). This paper considers a k -stage hybrid flow shop scheduling problem for the objective of minimizing the makespan. Each job is processed through the k production stages in series, where at least one production stage has identical parallel machines. The problem is to determine the allocation of jobs to the parallel machines as well as the sequence of the jobs assigned to each machine. To solve the problem, a new 0-1 mixed integer mathematical model is formulated in order to find out the best solution of the problem. In addition, a heuristic algorithm is suggested to obtain good solutions for large-size problems within a reasonable amount of computation time. The algorithm is coded by C# programming language. User interfaces provide a flexible environment in dynamic production system under consideration. To show the performances of the optimal and heuristic algorithm suggested in this paper, computational experiments are done on real world test problems.

Keywords: Hybrid flow shop, heuristic approach

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım süresince beni yönlendiren ve her türlü olanağı sağlayan danışman hocam Sayın Prof. Dr. Müjgan Sağır başta olmak üzere; lisans ve yüksek lisans öğrenimim sürecince değerli bilgilerini esirgemeyen tüm hocalarıma ve başta eşim Özkan Okul olmak üzere, her zaman bana güvenerek yanımda olan aileme ve arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	vi
SUMMARY	vii
TEŞEKKÜR.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. PARALEL MAKİNELİ AKIŞ ATÖLYESİ (HYBRID FLOW SHOP)	
ÇİZELGELEME PROBLEMLERİ VE LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	5
2.1. Paralel Makineli Akış Atölyesi Çizelgeleme Problemlerinin Yapısı	9
2.2. Literatür Çalışması.....	11
2.2.1. Yıllara göre çalışmalar.....	22
2.2.2. Çözüm yöntemlerine göre çalışmalar	23
2.2.3. Performans ölçütlerine göre çalışmalar	24
2.2.4. Kademe sayıları ve sıra bağımlılık gözetme durumuna göre çalışmalar	25
3. PARALEL MAKİNELİ AKIŞ ATÖLYESİ ÇİZELGELEME PROBLEMİ İÇİN	
YENİ BİR MATEMATİKSEL MODEL	29
3.1. Problemin Yapısı	29
3.2. Matematiksel Model ve Boyut Analizi	30
3.3. Sezgisel Algoritma Geliştirme Gerekçeleri	37
4. SEZGİSEL ALGORİTMA TEMELLİ BİR ÇÖZÜM YAKLAŞIMI	
GELİŞTİRİLMESİ	40
4.1. Geliştirilen Algoritma	40
4.1.1. Parametre ve karar değişkenleri	43
4.1.2. Algoritma adımları	44
4.2. Algoritmanın Kodlanması.....	48
4.3. Kullanıcı Arayüzleri ve Etkinlik.....	49
4.4. Program Değişikliklerinin Çizelgeye Yansıtılması	50

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

5. UYGULAMA.....	51
5.1. İşletmenin Tanıtımı.....	51
5.2. İşletmedeki Üretim Süreci	55
5.3. Ele Alınan Problem ve Yaşanan Sorunlar	57
5.4. Problemin Geliştirilen Yaklaşım Kullanılarak Çözümü	60
5.5. Çözüm Sonuçlarının Karşılaştırılması	69
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	73
KAYNAKLAR DİZİNİ.....	76
EK AÇIKLAMALAR	80
Ek Açıklamalar-A: Analizlerde yararlanılan makaleler	81
Ek Açıklamalar-B: Geliştirilen sezgisel yaklaşıma ait akış diyagramı.....	101
Ek Açıklamalar-C: Ürün-kapı sacı eşleşme tablosu örneği	102
Ek Açıklamalar-D: Makine bazında işlem süreleri tablosu örneği.....	103
Ek Açıklamalar-E: Punch pres için sıra bağımlı hazırlık süreleri tablosu örneği.....	104
Ek Açıklamalar-F: Makine sınıfına ait kodlar	105

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Yıllara göre P.A.Ç.P. yayın sayıları dağılımı	23
2.2. P.A.Ç.P.'nin çözüm yaklaşımlarının dağılımı	24
2.3. P.A.Ç.P.'de kullanılan performans ölçütlerine göre yayın sayılarının dağılımı	25
2.4. P.A.Ç.P.'nin kademe sayılarına göre dağılımı	26
2.5. Yıllara göre kademe sayılarının dağılımı	27
3.1. Ele alınan atölye yapısı	29
3.2. Örnek bir atölye yapısı	30
4.1. Makine gruplama yapısı gösterimi	42
5.1. Fabrika içi süreçler arası ilişkinin gösterimi	55
5.2. Marka örnekleri	59
5.3. Inox Atölyesi için kademe ve makine gösterimi	61
5.4. Problem kapsamındaki makine ortamları	62
5.5. Program arayüzünün görüntüsü	65
5.6. Örnek problem üzerinden çıktı ekranının görüntüsü	66
5.7. İş bazında süre bilgileri görüntüsü	68
5.8. Matematiksel model ve sezgisel algoritma sonuçlarının dağılımı	70
5.9. Mevcut ve önerilen yaklaşım sonuçlarının dağılımı	72

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Cizelge</u>	<u>Sayfa</u>
3.1.(a) Matematiksel modele ilişkin boyut analizi (10 iş, 2 kademe ve 4 makine için örnek).....	34
3.1.(b) Matematiksel modele ilişkin boyut analizi (10 iş, 5 kademe ve 8 makine için örnek).....	35
3.1.(c) Matematiksel modele ilişkin boyut analizi (1000 iş, 2 kademe ve 4 makine için örnek)	36
3.1.(d) Matematiksel modele ilişkin boyut analizi (1000 iş, 5 kademe ve 8 makine için örnek)	36
3.2. Matematiksel model çözüm performansı	38
5.1. Üretim hatları ve hatlarda üretilen ürünler	53
5.2. Matematiksel model ve sezgisel algoritma sonuçlarının karşılaştırılması	69
5.3. Mevcut ve önerilen çözüm yaklaşımlarının karşılaştırılması	71

1. GİRİŞ

Son yıllarda gelişen teknoloji, artan rekabet ve üretim ortamlarında yaşanan değişimler, işletmeleri bu koşullara uyum sağlamaya zorlamaktadır. İşletmeler, üretim süreçlerinde etkinlikle beraber, müşteri taleplerini hızlı bir şekilde karşılayarak rakiplerine karşı üstünlük sağlayabilmek için iyi bir planlama yapmak durumundadırlar.

Günümüz piyasalarında artan ihtiyaçlara cevap verebilmek için büyüyen işletmelerde üretim, kolaylıkla kontrol edilemez hale geldiğinden, üretim planlamanın önemi artmıştır. Gerek üretim öncesi, gerekse üretime başladıktan sonra, kıt kaynakların daha etkin ve verimli kullanılmasında üretim planlama sürecinin bir parçası olan çizelgelemenin önemli bir yeri vardır. Çizelgeleme, üretim planının karşılanabilmesi, siparişlerin söz verilen teslim tarihlerine yetişebilmesi için işlerin hangi kaynaklar tarafından hangi sırayla yapılması gerektiğinin belirlenmesidir.

Çizelgeleme, kaynakları, birbiri ile yarışan faaliyetler arasında etkin bir şekilde dağıtarak üretimin zamanında ve düşük maliyetle gerçekleştirilmesine yardımcı olur. İşletmeler, hem mevcut kaynakların verimli kullanımını sağlamak, hem de günümüzün rekabet ortamında varlıklarını sürdürebilmek için etkin iş çizelgelemeye ihtiyaç duymaktadır.

Çizelgeleme, işleri ve projeleri istenen sürede tamamlamanın yanı sıra, çıktıları enbüyükleme ve işlem maliyetlerini enküçükleme için zamanında ve kaliteli bir biçimde eylem ve kaynakları eşleştirme konusunda dinamik olarak karar vermeyi sağlar (Morton ve Pentico, 1993).

Bir başka tanıma göre ise çizelgeleme, üretim ya da hizmet sektöründe bir veya daha fazla amacı eniyileyebilmek adına, işlerin kaynaklara atanması için karar verme sürecidir (Pinedo, 2008).

Bir işletmenin neyi, ne zaman, nerede ve ne kadar üreteceği çizelgelerde ayrıntılı hale getirilir. Gerçek hayatta karşılaşılan çizelgeleme problemleri oldukça karmaşık ve

çözümleri zordur. Parametrelerdeki herhangi bir artış (iş, makine vb.), alternatif sıralama sayısını üstel olarak artırmaktadır.

Çizelgeleme probleminin türü belirlenirken temel alınan kriterlerden en önemlisi üretim ortamının türüdür. Üretim sistemlerinde, oldukça farklı yapı ve özellikte üretim ortamlarına rastlanmaktadır. Çizelgeleme ortamları, tek makineli küçük atölyelerden, çok makineli karmaşık atölyelere kadar farklı yapıda olabilir.

Tek makineli çizelgeleme ortamı, sistemde sadece bir makinenin bulunduğu durumu gösterir. Diğer tüm karmaşık makine ortamlarının özel bir durumudur ve diğerlerine göre çözülmesi en kolay olan problem sınıfını tanımlar (Pinedo, 2008).

Aynı işi yapabilen birden fazla makine, paralel makineler olarak adlandırılmaktadır. Paralel makine çizelgeleme problemleri, gerçek hayatta oldukça sık karşılaşılmaması ve çok aşamalı daha karmaşık problemlerin de alt problemi olması sebebiyle oldukça önemlidir. Pinedo (2002)'nin belirttiği gibi, bu problemlerdeki makineleri; parçaların makinelerde işlenme süreleri dikkate alınarak; özdeş, benzer ve ilişkisiz paralel makine olmak üzere üç gruba ayırmak mümkündür.

Çizelgeleme problemleri, üretim tipine göre de farklı biçimlerde olabilir. French (1982), kademe sayısına göre çizelgeleme problemlerini, tek kademe-tek makine, tek kademe-paralel makine ve çok kademe olmak üzere sınıflandırmıştır. Bu doğrultuda, tek kademeli problemlerde işler, tek bir işlem kademesinden, çok kademeli problemlerde ise, birden fazla işlem kademesinden geçerek işlemlerini tamamlarlar. Çok kademeli problemler, akış tipi ve atölye tipi olmak üzere iki grupta incelenebilir. Akış tipi problemlerde, bütün işler aynı işlem sırasıyla, aynı makine grubunda işlenir. Atölye tipi üretimde ise; her bir iş, farklı makinelerde işlenmek üzere kendine özgü bir işlem sırasına sahiptir.

Çalışma kapsamında, üretim sektöründe faaliyet gösteren bir işletmenin, kapı sacı üreten bir atölyesinde yer alan makinelerin çizelgelenmesi problemi ele alınmıştır. Bu kapsamda çizelgelenecek işler, işlem sırası önceden belirlenmiş işlemlerden oluşmaktadır. Süreç, birden fazla kademedan oluşmakta ve kademelerde özdeş paralel makineler yer

almaktadır. Tüm işler aynı üretim akışına göre işlem görürler. Ancak bir iş herhangi bir kademeyi atlayıp bir sonraki kademede işlem görebilir. İşler, işlem gördüğü bir kademede bir makineye atanır ve bir makinede aynı anda yalnızca bir iş işlem görebilir. İşler arasındaki geçişler esnasında meydana gelen sıra bağımlı hazırlık süreleri her kademede değişkenlik göstermektedir. Söz konusu yapıda ele alınan problem, her bir kademede işlerin makinelere atanmasını ve makinelere atanan işlerin sıralanmasını içermektedir. Problem literatürde, paralel makineli akış atölyesi sınıfına girmektedir. İki aşamalı paralel makineli akış atölyesi probleminin NP-zor (NP-hard) sınıfında olduğu Gupta (1988) tarafından gösterilmiştir. NP-zor problemlerin karmaşıklığı üstel olarak arttığından polinom zamanda çözülemedikleri söylenebilir. Bu doğrultuda, verilen bu bilgiler dikkate alınarak, toplam tamamlanma zamanının enküçüklenmesinin amaçlandığı bir çözüm yaklaşımı geliştirilmiştir.

İkinci bölümde, öncelikle çizelgeleme ile ilgili tanım ve notasyona yer verilmiştir. Bu doğrultuda, çizelgeleme açısından üretim ortamlarının sınıflandırılması ile işlem kısıtları ve performans ölçütleri de ele alınmıştır. Yanısıra, paralel makineli akış atölyelerinin yapısından bahsedilmiş, literatürde paralel makineli akış atölyesi çizelgeleme problemlerini ele alan yayınlar incelenmiş ve çalışmaların yayınlanma yılları, çözüm yöntemleri, performans ölçütleri ve kademe sayıları doğrultusunda dağılımları değerlendirilmiştir.

Üçüncü bölümde, ele alınan problemin eniyi çözümünü bulmaya yönelik olarak bu çalışma kapsamında geliştirilen 0-1 karma tamsayılı matematiksel modele yönelik detaylar ele alınmıştır. Bu kapsamda, matematiksel modelde kullanılan notasyon açıklandıktan sonra, geliştirilen matematiksel model gösterilmiş ve modelde yer alan kısıtlara ilişkin açıklamalar belirtilmiştir. Sonrasında, geliştirilen matematiksel modelin, farklı parametre setleri için ulaşacağı boyut analiz edilmiştir. İzleyen kısımda, matematiksel modelin küçük boyutlu veri setleri için çözümüne yer verilmiştir. Problem boyutu büyüdükçe çözüm süresinin üstel olarak artması; hızlı çözüme ulaşan, değişikliklere duyarlı bir yaklaşım ihtiyacı doğurmuştur. Buradan hareketle, probleme özel bir sezgisel yaklaşım geliştirilmiş ve dördüncü bölümde, algoritmaya ilişkin detaylara yer verilmiştir.

Beşinci bölümde, problemin, üretim sektöründe faaliyet gösteren bir işletmedeki uygulamasına değinilmiştir. Bu doğrultuda, işletmedeki üretim süreci hakkında bilgi verilmesinin ardından, uygulamanın yapıldığı üretim atölyesi tanıtılmıştır. İzleyen kısımda, C# programlama dili kullanılarak kodlanan sezgisel algoritmanın sonuçlarına ve arayüz ekran görüntülerine yer verilmiştir. Sonrasında, geliştirilen sezgisel yaklaşımın performansı, matematiksel model ve işletmede uygulanan yaklaşım üzerinden, gerçek veri setleri kullanılarak karşılaştırılmıştır. Sonuç ve öneriler bölümünde ise; önerilen yaklaşımın genel bir değerlendirmesi yapılarak, ileride ele alınabilir çalışmalarla ilgili öneriler belirtilmiştir.

2. PARALEL MAKİNELİ AKIŞ ATÖLYESİ (HYBRID FLOW SHOP) ÇİZELGELEME PROBLEMLERİ VE LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Çizelgeleme, çeşitli matematiksel ve sezgisel yöntemler kullanarak, kısıt kaynakların, belirlenen zaman periyodunda ve belirlenen amaç fonksiyonuna uygun olarak, ilgili görevlere tahsisi şeklinde tanımlanır. Kaynakların uygun olarak atanması, firmanın amaçlarına en iyi şekilde ulaşmasını mümkün kılar. Çizelgeleme, üretim ve servis endüstrisinde önemli rol oynayan bir karar verme süreci olup, tedarik, üretim, taşıma ve dağıtım süreçlerinde kullanılır (Pinedo, 2008).

Üretim çizelgeleme, üretim planlama ile beraber, bir imalat sisteminin etkinlik ve verimliliğini belirleyen önemli bir karar verme sürecidir (Pinedo, 2008). Üretim tesisleri karmaşık, dinamik ve rassal sistemlerdir. Planlı bir üretim faaliyetinin başından itibaren, faaliyetleri kontrol altında tutabilmek için yöntemler geliştirilir. Birçok üretim organizasyonu, kontrol edilebilen belirli aktivitelerin yerine getirilebilmesi için, üretim çizelgeleri hazırlar ve bunları sürekli günceller. Üretim çizelgeleri, faaliyetleri koordine ederken, üretkenliği artırır ve işletme maliyetlerini düşürür (Herrmann, 2007).

Genel anlamda üretim çizelgeleme, bir üretim sisteminde gerçekleşen tüm faaliyetlerin başlangıç ve bitiş zamanlarının belirlenmesi olarak tanımlanır. Çizelgeleme sayesinde, mevcut durum analiz edilerek işgücü, makine kapasite, teçhizat gibi faktörlerde yapılacak değişiklikler göz önüne serilir. Üretim çizelgeleme problemleri, üretim tipine göre çok farklı biçimlerde olabilir.

Çizelgeleme problemlerinde, çizelgelenecek işlerin ve makinelerin önceden bilindiği varsayımı altında, çizelgelenecek işlerin sayısı n , makinelerin sayısı m ile ifade edildiğinde Pinedo (2002), çizelgelemeye ilişkin temel kavramları aşağıda verildiği şekilde tanımlamıştır:

- İşlem zamanı (processing time - p_{ij}): j işinin i makinesindeki işlem zamanını göstermektedir. Eğer j işinin işlem zamanı makineden bağımsız veya j işi sadece tek makinede işlem görüyor ise i indisi kullanılmayabilir.

- Serbest bırakma zamanı (release date – r_j): j işinin sistemde işlem görmeye başlayabileceği zamanı (hazırolma zamanını) ifade eder.
- Teslim tarihi (due date – d_j): j işinin tamamlanmış olarak müşteriye teslim edileceği tarihi gösterir.
- Ağırlık (weight – w_j): j işinin ağırlığı, temelde bir öncelik faktörünü ifade etmekte olup, j işinin sistemdeki diğer işlere göre önemini gösterir. Örneğin, söz konusu ağırlık faktörü işlerin sistemde kalmasının bir maliyeti olabilir. Stoklama veya elde tutma maliyeti olarak düşünülebileceği gibi verilen bir katma değer olarak da kabul edilebilir.

Bir çizelgeleme problemi $\alpha / \beta / \gamma$ üçlüsü ile karakterize edilir. α alanı, makine ortam bilgisini tanımlar. β alanı, işlem özellikleri ve kısıtları hakkında bilgi verir. Bu alan çoklu giriş kapsayabilmekle birlikte, söz konusu alana bilgi girişi yapılmayadabilir. γ alanı ise eniyilemek istenen amacı belirtir ve genellikle tekli giriş içerir.

α alanında belirtilen olası makine ortam bilgileri aşağıda verildiği gibidir:

- o Tek makine (single machine – 1): Tek makine ortamı, olası makine ortamlarının en basiti olup diğer tüm karmaşık sistemlerin özel bir durumudur.
- o Özdeş paralel makineler (identical machines in parallel – P_m): Birbirleriyle aynı özelliklere sahip m adet paralel makineyi ifade eder. İşler paralel bağlı makinelerin herhangi birinde işlem görebilir.
- o Farklı hızlı paralel makineler (machines in parallel with different speeds – Q_m): Birbirinden farklı hızlara sahip m adet paralel makineyi ifade eder. i makinesinin hızı v_i iken j işinin i makinesindeki işlem süresi $p_{ij} = p_j / v_i$ olarak belirlenir.
- o İlişkisiz paralel makineler (unrelated machines in parallel – R_m): j işinin farklı makinelerdeki işlem süreleri düzensiz bir şekilde farklılık göstermektedir.
- o Akış Tipi (Flow Shop – F_m): Birbirine seri olarak bağlı m adet makineyi ifade etmektedir. Tüm işler aynı rotayı izleyerek işlem görürler. Bir makinede işlem gören iş, sonraki makinede işlem görmek üzere kuyruğa girer. İşler genellikle ilk giren ilk çıkar (FIFO) kuralına göre işlem görürler. Eğer FIFO disiplini söz konusu ise, söz konusu akış tipi yerleşimler permutasyon akışı olarak nitelendirilir ve β alanı prmu girişini içerir.

- o Esnek Akış Tipi (Flexible Flow Shop – FF_c): Esnek akış tipi yerleşimi ifade eder. Akış tipi yerleşim ve paralel makine ortamlarının genelleştirilmiş halidir. Birbirine seri bağlı c adet aşamanın yanısıra her bir aşamada yer alan paralel makine durumunu ifade eder.
- o Atölye Tipi (Job Shop – J_m): Atölye tipi yerleşim düzeninde, her bir işin kendisine ait, önceden belirlenmiş farklı bir rotası vardır. Bu makine ortamında, işler makineleri bir veya daha fazla sayıda ziyaret ederek rotalarını tamamlayabilirler.
- o Esnek Atölye Tipi (Flexible Job Shop – FJ_c): Esnek atölye ortamı, atölye tipi yerleşimin ve paralel makine ortamının genelleştirilmiş halidir. Her bir iş merkezinde belirli sayıda paralel makinenin bulunduğu c adet iş merkezini ifade eder.
- o Açık Atölye Tipi (Open Shop - O_m): Açık atölye yerleşiminde her bir iş m adet makinenin her birinde yeniden işlem görebilir. Bununla birlikte, bu işlem sürelerinden bazıları sıfır olabilir. İşlerin makinelerdeki işlem rotalarına ait bir kısıtlama yoktur. Her iş için bir rota hazırlanır ve farklı işler farklı rotalara sahip olabilir.

β alanında tanımlanan kısıtlar çoklu giriş içerebilir. Olası girişler aşağıda verildiği gibidir:

- o Serbest bırakma zamanı (release date – r_j): Eğer bu sembol β alanında yer alıyor ise, j işi serbest bırakma zamanından önce işlem görmeye başlayamaz. β alanında r_j değeri bulunmuyorsa, bu durumda j işi işlem görmeye herhangi bir zamanda başlayabilir demektir.
- o Sıra bağımlı hazırlık süresi (sequence dependent setup time – s_{jk}): j işinden k işine geçildiğinde oluşan hazırlık süresini ifade eder.
- o İşlerin bölünebilirliği (preemptions – $prmp$): Bir makinede işlem görmeye başlayan bir işin tamamlanmadan önce durdurulup başka yeni bir işe başlayabilmesi olarak tanımlanır. Eğer sistemde işlerin bölünebilirliğine izin veriliyorsa β alanında $prmp$ ifadesi bulunur. Diğer durumda, işlerin bir makinedeki işlemleri boyunca bölünmesine izin verilmez.
- o Öncelik kısıtları (precedence constraints – $prec$): Tek makine veya paralel makine ortamlarında, bir veya daha fazla işin diğer işler işlem görmeden önce tamamlanması gerektiğini ifade eder.
- o Arızalar (breakdowns – $brkdwn$): Makinelerin sürekli uygun olmadığını ifade eder.

- o Permütasyon (permutation – prmu): Akış tipi üretim ortamlarında görülen bu kısıtlama, makinelerde işlem görmek için kuyrukta bekleyen işlerin ilk giren ilk çıkar (FIFO) kuralına göre işleme alınmasını ifade eder.
- o Beklemesiz (no-wait – nwt): Akış tipi üretim ortamlarında görülen söz konusu gereksinim beklemelelere izin verilmemesi durumunu ifade eder. Birbirini takip eden iki makine arasında işlerin beklemesine izin verilmez.
- o Yeniden dolaşım (recirculation – recrc): Atölye tipi ve esnek atölye tipi üretim ortamlarında görülebilen bu kısıtlama, bir işin bir makineyi veya iş merkezini birden fazla sayıda ziyaret etmesi durumunu ifade eder.

γ alanı, daha önce de belirtildiği gibi eniyilenmek istenen amacın gösterildiği alandır. Eniyilenmeye çalışılan amaç tamamlanma zamanının bir fonksiyonudur ve bu sebeple çizelgeye bağlıdır. j işinin i makinesindeki tamamlanma zamanı C_{ij} ile ifade edilir. j işinin sistemden çıkış zamanı ise C_j olarak gösterilir. Ayrıca amaç, teslim tarihinin bir fonksiyonu da olabilir. j işinin tamamlanma zamanı ve termini arasındaki sapma gecikme (lateness) olarak adlandırılır ve $L_j = C_j - d_j$ ile ifade edilir. Gecikme (L_j), j işi termininden geç tamamlandığında pozitif, erken tamamlandığında ise negatif değer alır.

Tamamlanma zamanının bir başka fonksiyonu olan, j işinin gecikme süresi (tardiness) ise, $T_j = \max (C_j - d_j, 0) = \max (L_j, 0)$ ile ifade edilir.

Gecikme (L_j) ve gecikme süresi (T_j) arasındaki fark, gecikme süresi parametresinin asla negatif olmamasıdır.

Enküçüklenecek olası amaç fonksiyonlarından örnekler aşağıda verildiği gibidir:

- o Toplam tamamlanma zamanı (makespan – $C_{\max}$): $Enb (C_1, \dots, C_n)$ olarak tanımlanan tamamlanma zamanı, aynı zamanda sistemi terkedecek son işin tamamlanma zamanını ifade eder.
- o En büyük gecikme (maksimum lateness – $L_{\max}$): En büyük gecikme, $Enb (L_1, \dots, L_n)$ olarak belirtilir ve hedeflenen teslim tarihinden en büyük sapmayı ifade eder.
- o Ağırlıklandırılmış toplam tamamlanma zamanı ($\sum (w_j C_j)$): n adet işin ağırlıklandırılmış toplam tamamlanma zamanı, çizelgeye bağlı olarak, toplam stok maliyeti veya elde tutma maliyetinin bir ölçüsünü verir.

- o Ağırlıklandırılmış toplam gecikme ($\sum(w_j T_j)$): Toplam ağırlıklandırılmış tamamlanma zamanından daha genel bir maliyet fonksiyonudur.
- o Ağırlıklandırılmış geciken iş sayısı ($\sum(w_j U_j)$): Toplam ağırlıklı geciken iş sayısını ifade eder. Uygulamada, kolaylıkla kayıt alınabilmesi sayesinde amaç olarak tercih edilmektedir.

Pinedo (2002)'de verilen ve çizelgeleme problemlerinin tanımlanmasında kullanılan notasyonun gösterildiği bir örnek ele alınacak olursa; $FJ_c / r_j, s_{ijk} / \sum(w_j T_j)$ gösterimi, c iş merkezli esnek atölye tipi üretim ortamında, işlerin farklı serbest bırakma zamanlarının olduğu ve işler arasında sıra bağımlı hazırlık sürelerinin olduğu kısıtları altında ağırlıklandırılmış toplam gecikmenin enküçüklenmesinin amaçlandığı bir problemi tariflemektedir.

Çalışma kapsamında ele alınan problem, Pinedo (2002)'de verilen notasyon doğrultusunda, $FF_c, (PM^{(k)}) / s_{ijk} / C_{max}$ şeklinde tanımlanmakta olup, söz konusu gösterim, c kademeli bir esnek akış tipi üretim ortamında, işler arasında sıra bağımlı hazırlık sürelerinin olduğu, her bir kademede k adet özdeş paralel makinelerin bulunduğu ve toplam tamamlanma zamanının enküçüklenmesinin amaçlandığını gösteren bir problemi tanımlamaktadır.

Bu çalışmadaki makine ortamı, literatürdeki ifadelerden elde edilen bilgiler doğrultusunda “*paralel makineli akış atölyesi (hybrid flow shop - HFS)*” olarak belirtilmiştir. Ribas vd. (2010)'da belirtildiği gibi, ele alınan yapıdaki problem, hybrid flow shop, flow shop with multiple machines (processors), flexible flow shop, multiprocessor flow shop veya flow shop with parallel machines olarak adlandırılabilir.

2.1. Paralel Makineli Akış Atölyesi Çizelgeleme Problemlerinin Yapısı

Paralel makineli akış atölyesi çizelgeleme problemleri, akış atölyesi çizelgeleme ile paralel makine çizelgeleme problemlerinin özelliklerini birleştirmektedir. Akış atölyelerinde bütün işler atölyenin kademelerini (aşamalarını) aynı sırayla ziyaret ederler. Paralel makineli akış atölyelerinde, her aşamada, işleri işleyecek bir veya daha fazla makine vardır. Aynı işlemi yapabilen m tane makine, kademelerde paralel olarak

yerleştirilir ve her iş bu makinelerden herhangi birinde işlenebilir. Bu durum, üretim sistemine esneklik kazandırır.

Bir üretim çizelgeleme probleminin paralel makineli akış atölyesi sınıfına girebilmesi için bazı koşullar bulunmaktadır. Öncelikle paralel makineli akış atölyeleri en az iki işlem kademesine sahiptir ve en az bir kademede birden fazla paralel makine bulunmaktadır. Kademelerdeki makine sayısı kademeden kademeye değişebilir. Paralel makineli bir üretim sisteminde özdeş, benzer veya ilişkisiz makinelerden söz edilebilir. Makineler aynı işi, aynı sürede yapıyorsa *özdeş paralel makine* olarak adlandırılırlar. Böylelikle bir iş söz konusu özdeş paralel makinelerden herhangi birinde işlenebilir ve işlem süresi değişmez. Birbirinden farklı hızlara sahip makineler *benzer paralel makineler* olarak adlandırılırken, makine hızlarının işlere bağlı olarak değiştiği makineler *ilişkisiz paralel makineler* olarak ifade edilmektedir.

Paralel makineli akış atölyesi ortamında işler, işlem sırası önceden belirlenmiş işlemlerden oluşmaktadır. Tüm işler aynı üretim akışına göre işlem görürler (kademe 1, kademe 2, ... , kademe k). Ancak bir iş herhangi bir kademeyi atlayıp bir sonraki kademede işlem görebilir. İşler her bir kademede bir makineye atanır ve bir makinede aynı anda bir iş işlem görebilir. Genellikle kademeler arasında tamponlar (buffer) bulunmaktadır.

Söz konusu yapıda ele alınan bir problem, her kademede işlerin makinelere atanmasını ve bir makineye atanan işlerin sıralanmasını içerir.

Paralel makineli akış atölyesi çizelgeleme problemleri, kademe sayıları baz alınarak iki kademe, üç kademe ve k kademe olmak üzere üç grupta ele alınmaktadır. Standart yapıdaki paralel makineli akış atölyelerinde tüm işlerin ve makinelerin sıfır anında uygun olduğu, kademelerdeki makinelerin özdeş paralel makineler olduğu, bir makinenin aynı anda bir operasyon işleyebildiği, hazırlık sürelerinin ihmal edilebildiği, öncelik kurallarının olmadığı, kademeler arasındaki tamponların kapasitesinin sınırsız olduğu ve problem verilerinin deterministik olup önceden bilindiği söylenebilir. Bu problemin ve atölye ortamının yapısına göre kısıtlar ve varsayımlar gerektiği doğrultuda eklenip çıkartılabilir (Ruiz ve Rodriguez, 2010).

2.2. Literatür Çalışması

Paralel makineli akış atölyesi çizelgeleme problemleri ile ilgili olan ve 1997 – Haziran 2015 yılları arasında yayınlanmış 196 çalışma incelenmiş ve yayınlanma yılları, çözüm yöntemleri ve performans ölçütleri doğrultusunda değerlendirilmiştir.

Çizelgeleme problemlerinin çözüm yaklaşımları, problem yapısı ve atölye şekline bağlı olarak değişir. Eğer işlerin süreleri ve diğer parametreler kesin belirlenebilir ise deterministik çizelgeleme problemi, aksi takdirde stokastik çizelgeleme problemi olarak ele alınır. Stokastik parametreler rastgele değişkenler şeklinde modellenir. Bu rastgele değişkenler bilinen bir olasılık dağılıma göre dağılır. Bu modelin en belirgin özelliği parametrelerin davranışını yansıtan dağılıma uygun olmasıdır. Stokastik modeller gerçek uygulamalarda deterministik modellere göre daha iyi sonuç verir (Baker, 1974). Sisteme gelen işler tek bir işleme ihtiyaç duyuyor ise buradaki problem tek makineli çizelgeleme problemidir ve işlerin hangi sırada yapılacağını belirlenmesine çalışılır. Paralel makineli problemlerde ise sisteme gelen işler mevcut makinelerin herhangi birinde yapılabilir. Seri akışlı ve karmaşık akışlı problemlerde ise atölyeye gelen işler birden fazla işleme ihtiyaç duyar. Seri akışta tüm işlerin rotası aynı iken karmaşık akışlı problemlerde her bir işin rotası farklıdır (Baker, 1974).

Kombinatoryal eniyileme problemleri, dikkate alınan amaç fonksiyonunu eniyileyen kesikli karar değişkenlerinin değerlerinin bulunması ile ilgilenir. Çizelgeleme problemleri kombinatoryal eniyileme problemleri olduğundan bu problemler genel olarak ya P ya da NP problemler olarak adlandırılır. P tipi problemler polinom zaman sınırlı bir algoritma ile etkin zamanda çözülebilmektedir. NP tipi problemler için polinom zaman sınırlı bir algoritmanın bulunması mümkün görülmemekte ve bu problemler eniyi olarak ancak üstel zamanda çözülebilmektedir (Eren ve Güner, 2002).

Çizelgeleme problemleri ile ilgili olarak ele alınabilecek önemli kavramlardan biri hazırlık işlemleridir. Üretimi gerçekleştirmek için makine veya süreç üzerinde yapılan işlemlere hazırlık faaliyetleri denilmektedir. Bunlar; gerekli ekipmanların temini, ayarlanması, takılması, temizlenmesi gibi faaliyetlerden oluşur. Hazırlık işlemleriyle ilgili problemler literatürde iki sınıfta ele alınmıştır. Birincisinde, hazırlıklar sadece işlem

görecek işe bağlı olup sıra bağımsız hazırlık süresi olarak ifade edilir. Diğerinde ise hazırlık, hem o anda işlem göreceği işe hem de bir önceki işe bağlıdır. Bu durum ise sıra bağımlı hazırlık süresi olarak ifade edilir. Sıra-bağımlı hazırlık süresi uygulamalarıyla ilgili örnek olarak matbaa endüstrisi verilebilir. Burada makinenin temizlenmesi ve hazırlanması, en son kullanılan mürekkep rengine, kağıdın boyutuna ve özelliğine bağlıdır. Sıra bağımlı hazırlık sürelerine kimya, ilaç, metal ve plastik endüstrilerinde de sıkça rastlanmaktadır (Özçelik ve Saraç, 2011).

Paralel makineli akış atölyesi çizelgeleme problemleri ile ilgili yayınlar incelendiğinde, çalışmaların bir kısmında hazırlık süresinin ihmal edildiği ya da bu sürelerin sıraya bağlı olmadığı durumlarda işlem sürelerine eklendiği görülmektedir. Ancak bazı problemlerde hazırlık süreleri, ihmal edilemeyecek kadar önemli olup işlem sürelerinden ayrı olarak değerlendirilmeleri gerekmektedir.

Çizelgeleme problemlerinin çözümüne yönelik olarak çalışmalar incelendiğinde, araştırmacıların dal-sınır algoritması, dinamik programlama ve iş çiftlerinin yer değiştirmesi tekniklerini yaygın olarak kullandıkları gözlemlenmiştir. Bu teknikler, çizelgeleme problemlerinin de dahil olduğu çok geniş sayıdaki kombinatoriyal problemlerin çözümünde dikkate değer başarıya sahip bulunmaktadır.

Dinamik programlama, dal-sınır algoritması ve tamsayılı programlama teknikleri birer eniyileme yöntemleridir. Dinamik programlama yöntemi, belli kısıtlayıcı kuralları akılcı bir şekilde uygulayarak çok sayıda aday çözümü elimine eder. Ancak bu teknik, büyük boyutlu problemler için uygun değildir. Çünkü durum değişkenlerinin sayısı artarken problemleri çözmek için gereken işlemler de artar ve bu özellik büyük boyutlu problemlerin çözümünde dinamik programlama yaklaşımının kullanımını kısıtlar (Eren ve Güner, 2002).

Dal-sınır yaklaşımı da kombinatoriyal problemlerin çözümünde en sık kullanılan yöntemlerden biridir. İlk olarak gezgin satıcı probleminde (Eastman 1959) uygulanmıştır. Bu yöntemde, çözüm zamanları farklı veri setlerine göre önemli derecede değişkenlik gösterir. Dallanan değişken ile sınırlama yaklaşımının seçimi algoritmanın performansını

önemli derecede etkiler. Dal-sınır tekniği ile çizelgeleme problemlerinin çözümü, problem boyutu arttıkça zorlaşmaktadır (Eren ve Güner, 2002).

Çizelgeleme problemlerinin değişik versiyonları için tamsayılı programlama modelleri de geliştirilmektedir. Bir çizelgeleme problemi, tamsayılı programlama modeli olarak formüle edilebileceği için mevcut tamsayılı programlama algoritmalarıyla çözülebilir. Ancak böyle bir yaklaşım sadece küçük ölçekli problemlere uygulanabilir. Çizelgeleme problemlerinin matematiksel programlama formülasyonları genellikle çok sayıda değişken ve kısıta ihtiyaç duyar. Bununla beraber, son zamanlardaki, bilgisayar kapasitelerinde ve çözücülerdeki iyileşmeler doğrultusunda, matematiksel modellemenin gittikçe daha da kullanılabilir bir çözüm yaklaşımı olduğunu söylemek mümkündür (Naderi vd., 2009).

Çizelgeleme problemlerinin çözümünde kullanılan eniyileme yöntemleri güçlü bir bilgisayara ve çok fazla hesaplama zamanına ihtiyaç duymaktadır ve büyük boyutlu problemlerin çözümünde kullanılmaları uygun olmamaktadır. Bu nedenle, büyük boyutlu problemlerin çözümünde uygun hesaplama süresi içerisinde eniyiye yakın çözümleri bulabilen sezgisel teknikler geliştirilmiştir.

Akış tipi çizelgeleme problemi, 1950’li yıllarda Johnson tarafından yayınlanan makale ile araştırmacılar tarafından ilgi çekici hale gelmiştir. Klasik akış tipi çizelgeleme problemlerinde, işler her kademede yalnızca bir makinenin olduğu birden fazla kademeden geçerek ve aynı makine sıralarını kullanarak işlemlerini tamamlarlar. Günümüzde, bazı işletmeler kapasitelerini artırmak veya kapasitelerini dengelemek amacıyla bazı kademelerde birden fazla makine olmasına ihtiyaç duymaktadır. Bazı işletmelerde, müşteriye özel ürünlerin (özel paketleme, boyut, özellik vb.) talebindeki artış, bu özel ürünlerin taleplerini karşılamak adına bazı kademelerde ek makine ihtiyacını tetiklemektedir. Bu genişletilmiş yerleşim, paralel makineli akış atölyesi (hybrid flow shop, flow shop with multiple machines (processors), flexible flow shop, multiprocessor flow shop veya flow shop with parallel machines) olarak adlandırılmaktadır (Ribas vd., 2010).

Paralel makineli akış atölyesi çizelgeleme problemi, paralel makine çizelgeleme (parallel machine scheduling) ve akış tipi atölye çizelgeleme (flow shop scheduling) problemlerinin aynı ortamda birleştirilmesi olarak görülebilir. Paralel makine çizelgeleme problemlerinin temel kararı olan “işlerin makinelere atanması” ve akış tipi atölye çizelgeleme problemlerinin temel kararı olan “işlerin akış boyunca sıralanması” özelliklerini birleştirir. Dolayısıyla, paralel makineli akış atölyesi çizelgeleme problemi, eniyilenecek bir veya daha fazla amaç doğrultusunda, her bir kademede işlerin makinelere atanmasını ve bir makineye atanan işlerin sıralanmasını içerir (Ribas vd., 2010).

Paralel makineli akış atölyesi çizelgeleme problemlerinin çözümüne yönelik birçok çözüm yaklaşımı önerilmiştir. Dal-sınır (branch and bound) algoritması, en iyi çözümü bulmaya yönelik tercih edilen bir yöntemdir. Şimdiye kadar çoğu çalışma problemin basitleştirilmiş versiyonları üzerine odaklanmıştır. En basit senaryo, birinci kademede tek makinenin, ikinci kademede iki özdeş paralel makinenin yer aldığı iki kademeli bir paralel makineli akış atölyesini dikkate alır. Bu özel durumdaki problem için ilk bilinen dal-sınır algoritması Rao (1970) tarafından önerilmiştir. Salvador (1973), beklemez paralel makineli akış atölyesi çizelgeleme problemi üzerine çalışmıştır. Önerilen dal-sınır algoritması, yalnızca permütasyon sıralamayı ve işlerin her bir kademede en erken uygun olan makineye atanmasını ele almıştır. Küçük boyutlu örnekler için dinamik programlama yöntemi uygulanmıştır. Dessouky vd. (1998), kademelerdeki makinelerin özdeş paralel makine olduğu iki ve üç kademeli paralel makineli akış atölyesi problemleri için toplam tamamlanma zamanını (C_{enb}) eniyilemeye yönelik bir dal-sınır algoritması önermişlerdir. Choi ve Lee (2009), her kademede özdeş paralel makinelerin yer aldığı iki kademeli bir paralel makineli akış atölyesinde, geciken iş sayısını enküçüklemeyi sağlayan bir dal-sınır algoritması ele almışlardır. Ele alınan yaklaşım, alt sınır elde etmek için yeni metotlar ve arama uzayını küçültmek için birkaç özellik kapsamaktadır. Önerilen çözüm yöntemi ile küçük boyutlu problemler için eniyi çözüm elde edilmiştir. Lee ve Kim (2004), toplam gecikmeyi enküçüklemeye yönelik bir dal-sınır algoritması geliştirmiş ve 15 işe kadar alınan problem örneklerinin makul zamanda çözülebildiğini göstermişlerdir. Sonuç olarak, araştırmacıların genellikle küçük boyutlu problemlerin çözümü için dal-sınır algoritması geliştirdiği söylenebilir.

Eniyileme yöntemlerinin kesin çözüm verme başarısına rağmen orta ve büyük boyutlu problemlerde uygulanabilirliğinin azalması nedeniyle kesin çözüm olmasa da kesin çözüme yakın sonuç verecek ancak çözüm süresini oldukça kısaltacak ve esnekliği arttıracak sezgisel yapılara ihtiyaç duyulmaktadır.

Sezgisel yöntemlerin en basiti, çizelgeleme politikaları ya da liste çizelgeleme algoritmaları olarak da bilinen sıralama kurallarıdır (dispatching rules). Bu sıralama kuralları, işlerin makinelerle atanması ve makinelerde sıralanmasını içerir. Brah (1996), 10 sıralama kuralını k kademeli bir paralel makineli akış atölyesi çizelgeleme problemi üzerinde, en büyük gecikmenin enküçüklenmesi amacı altında kıyaslayarak performanslarını karşılaştırmıştır. Daha sonra, Brah ve Wheeler (1998), aynı problem üzerinde toplam tamamlanma zamanının ve en büyük gecikmenin enküçüklenmesi kriterleri altında sıralama kurallarının performanslarını daha iyi analiz edebilmek için simülasyon çalışmaları gerçekleştirmiştir.

Lee (2009), siparişlerin tedarik sürelerinin tahmin edilmeye çalışıldığı bir paralel makineli akış atölyesi ortamında, FCFS (First Come First Served), EDD (Earliest Due Date) ve SPT (Shortest Processing Time) olmak üzere üç sıralama kuralını ele almıştır. Söz konusu kuralların her biri için ayrı ayrı olmak üzere üç adet tahmin yöntemi geliştirmiştir. Ele alınan üç sıralama kuralı üzerinden (FCFS, EDD ve SPT), geliştirilen tahmin yöntemlerinin performanslarını, toplam iş yükü, kuyrukta bekleyen iş sayısı, darboğaz kuyrukta bekleyen iş sayısı ve üssel yumuşatılmış akış süresi olmak üzere dört kıyaslama yöntemi ile karşılaştırarak gözlemlemiştir. Sonuç olarak geliştirilen üç tahmin yönteminin diğer kıyaslama yöntemlerine göre daha iyi performans sergilediği sonucunu ortaya koymuştur.

Son 20 yıldır, kombinatorial eniyileme ile ilgilenen araştırmacılar, basit deterministik sezgisellerin performansını iyileştirmek amacıyla başarılı kapsamlı stratejiler geliştirmişlerdir. Söz konusu yöntemler metasezgiseller olarak bilinmektedir. Paralel makineli akış atölyesi çizelgeleme problemlerinde en yaygın kullanılan metasezgiseller tavlama benzetimi algoritması, yasaklı arama algoritması ve genetik algoritma olup, karınca kolonisi optimizasyonu, yapay bağışıklık sistemleri ve yapay sinir ağları vb. yöntemler de çizelgeleme problemlerinde kullanılmaktadır (Ruiz ve Rodriguez, 2010).

Haouari and M'Hallah (1997), toplam tamamlanma zamanını enküçükleme kriteri altında, birinci kademesinde tek makine, ikinci kademesinde iki özdeş paralel makine bulunan iki kademeli bir paralel makineli akış atölyesinde yasaklı arama ve tavlama benzetimi algoritmaları tabanlı iki sezgisel yaklaşım önermişlerdir. Önerilen yasaklı arama algoritmasının, problem örneklerinin %35'inde en iyi çözümü verdiğini doğrulamışlardır.

Nowicki ve Smutnicki (1998), toplam tamamlanma zamanını enküçükleme kriteri altında k kademeli bir paralel makineli akış atölyesi çizelgeleme problemine, mevcut çözümün komşuluklarını araştırmak amacıyla araya sokma hareketleri kullanarak bir yasaklı arama algoritması önermişlerdir. 3000 operasyon ve 60 makineye kadar yapılan deneysel çalışmalar ile algoritmanın başarısını göstermişlerdir.

Grabowski ve Pempera (2000), k kademeli bir beklemesiz (no-wait) paralel makineli akış atölyesi çizelgeleme problemine toplam tamamlanma zamanını enküçükleyecek şekilde bir yasaklı arama sezgiseli sunmuşlardır. Bu yaklaşımın temel fikri, ele alınan problem için bir başlangıç çözümden başlama ve buradan en büyük tamamlanma zamanını enküçükleyen bir çözüm için komşuluk aramaya dayanmaktadır. Bulunan en iyi çözüm, başlangıç çözüm olarak yenilenir ve süreç bu şekilde devam etmektedir. Çözümün komşuluğu hareketler ile oluşturulmakta olup, bir hareket çözümdeki bazı elemanların konumlarını değiştirmektedir. Arama geçmişinin hafızası, döngüleri ve yerel eniyilere takılmayı önlemekle beraber, çözüm uzayının iyi bölgelerini aramayı da sağlamış olmaktadır. Kriter değerini artırmayacak şekilde, verilen iterasyon sayısı sonunda arama durmaktadır. Sonuç olarak, önerilen tavlama benzetimi algoritması, gezgin satıcı problemini esas alan ve Widmer ve Hertz (1989) tarafından önerilen SPIRIT algoritmasına göre test edilmiş ve önerilen yasaklı arama algoritmasının daha iyi performans sergilediği gözlemlenmiştir.

Riane vd. (2001), k kademeli bir paralel makineli akış atölyesinde, simülasyon araçlarından yararlanarak bir karar destek sistemi (KDS) geliştirmişlerdir. KDS genel olarak; planlama ve çizelgeleme modülünden, genel bir simülasyon modelinden ve verilerin sisteme alınması ile KDS'nin etkileşimli kullanımı için arayüzlerden oluşmaktadır. Sistemin genel girdileri, ürünlerin talepleri, başlangıç stok seviyeleri, stok

tutma maliyetleri, üretim maliyetleri vb. verilerdir. Bu veriler ve bazı varsayımlar doğrultusunda, süreç içi üretim miktarını, dışarıdan alım yapılacak ürün miktarını ve stok taşıma maliyetlerini minimize edecek bir matematiksel model tariflenmiştir. KDS'nin çizelgeleme modülünde, bir tavlama benzetimi algoritması kullanılmıştır. Genel simülasyon modeli, çizelgeleme yapılırken çizelgeleme modülünden elde edilen sonuçları değerlendirmek ve varsa istenen değişikliklere göre üretim yapılmadan önce sürecin nasıl etkileneceğine dair gözlem yapabilmek amacıyla oluşturulmuştur. Veri tabanı, hem ele alınan atölye ortamını hem de çizelgeleme ve simülasyon sonuçlarını içermektedir. Arayüz modülü ise, atölye ortamının tariflenmesine, sürece ilişkin verilerin girilmesine ve çizelge sonuçlarının izlenebilmesine olanak sağlamaktadır. 5 dönem ve 15 iş olarak ele alınan örnek bir problem üzerinde, ürünlerin talep miktarları, başlangıç stok seviyeleri, stok maliyetleri, işlem süreleri, üretim maliyetleri vb. veriler girildikten sonra, üretim planlamaya yönelik gözlemler yapılmıştır. Ancak çalışmada, KDS'nin genel yapısı tariflenmiş olmakla birlikte, simülasyon ve arayüz ekranları gibi görsel ifadeler yer verilmemiştir.

Janiak vd. (2007), işlerin tamamlanmasının erkenliği ve geçliği ile kademeler arasında işlerin bekleme süreleri kriterlerini ağırlandırarak, k kademeli bir paralel makineli akış atölyesi çizelgeleme problemi için tavlama benzetimi, yasaklı arama ve her iki algoritmayı kombine eden bir melez algoritma olmak üzere üç farklı yaklaşım önermişler ve önerilen melez algoritmanın daha iyi sonuçlar verdiğini göstermişlerdir.

Jenabi vd. (2007), kademelerde ilişkisiz paralel makinelerin bulunduğu k kademeli bir paralel makineli akış atölyesinde, başlangıç çözümü elde etmeye yönelik oluşturulan bir sezgisel algoritma ve çözüm kalitesini iyileştirmeye yönelik bir yerel iyileştirme prosedürü ile kombinasyon halinde olan bir tavlama benzetimi algoritması ile bir genetik algoritma önermişlerdir. Çalışma sonucunda genetik algoritmanın daha iyi sonuçlar verdiği ancak tavlama benzetimi algoritmasının daha kısa bilgisayar zamanına ihtiyaç duyduğu sonucunu ortaya koymuşlardır.

Ruiz vd. (2008), kademelerde ilişkisiz paralel makinelerin bulunduğu ve işler arasında sıra bağımlı hazırlık sürelerinin olduğu k kademeli bir paralel makineli akış atölyesi ortamında, en büyük tamamlanma zamanını enküçüklemeye çalışmışlardır.

Süreçte ek olarak, makine uygunluğunun bulunması (işlerin paralel makinelerin tamamında değil, bir alt kümesinde işlem görebilmesi durumu), serbest bırakma zamanlarının olması (işlerin serbest bırakma zamanından önce işlem görmeye başlayamaması), kademe atlama durumunun sağlanması, işlerin önceliğinin bulunması vb. kısıtları da dikkate almışlardır. Bu doğrultuda, problemin eniyi çözümünü bulmaya yönelik olarak bir karma tamsayılı matematiksel model geliştirmişlerdir. Önerilen matematiksel modelin performansını izlemek amacıyla, karar ağaçları kullanılarak kapsamlı bir istatistiksel analiz gerçekleştirmişlerdir. Yapılan analizler, farklı karakteristikler arasındaki etkileşimlerin tanımlanmasına olanak sağlamıştır. Buna göre, iş sayısı, kademe sayısı, kademelerdeki paralel makine sayısı, bir işin kademe atlama olasılığı, bir makinenin o iş için uygun olma olasılığı vb. kriterlerden birinde değişiklik olduğunda, sürecin nasıl etkilendiğine ilişkin gözlemler yapılmıştır. Bu doğrultuda, 15 iş - 3 kademeye kadar alınan üstel dağılıma uygun türetilmiş örnekler üzerinde, 300 sn. ve 900 sn. olarak belirlenen bilgisayar çalışma süresi ile testler gerçekleştirilmiştir. Karar ağaçları ile de değişiklikler izlenebilmiştir. Yapılan gözlemler ile, süreci etkileyen en önemli faktörün, iş sayısı olduğu sonucunu ortaya koymuşlardır. Büyük boyutlu problemlerin çözümü için ise, beş farklı sıralama kuralının yanısıra, Nawaz vd. (1983) tarafından önerilen NEH algoritması, çalışmada belirlenen öncelik kısıtları dikkate alınarak geliştirilmiştir. 100 işe kadar ele alınan test örnekleri üzerinden algoritmaların performansları gözlenmiştir. Test örnekleri, düzgün dağılım kullanılarak türetilmiştir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda, önerilen NEH algoritmasının diğer algoritmalara göre daha iyi sonuçlar verdiği gösterilmiştir.

Davoudpour ve Ashrafi (2009), sıra bağımlı hazırlık sürelerinin olduğu k kademeli bir paralel makineli akış atölyesinde, erken üretim ve gecikme cezalarını, işlerin ağırlıklı erken tamamlanma sürelerini ve teslim tarihlerine göre yapılan iş atamalarının maliyetlerini eniyilemek amacıyla GRASP algoritmasını kullanmışlardır. Söz konusu algoritma, yapım ve geliştirme aşaması olmak üzere iki temel adımdan oluşmakta olup, geliştirme adımı ise yerel arama ve amaç fonksiyonu değerinin geliştirilmesi olan iki alt adımı kapsamaktadır. Sonuç olarak, bu adımlar doğrultusunda oluşturulan GRASP algoritması, tavlama benzetimi algoritmasına göre test edilmiş ve GRASP algoritmasının daha iyi performans sergilediği gözlemlenmiştir.

Naderi vd. (2009), sıra bağımlı hazırlık sürelerinin olduğu ve kademeler arası taşıma sürelerinin dikkate alındığı k kademeli paralel makineli akış atölyesinde, toplam ağırlıklı gecikmeyi enküçüklemek amacı ile ilgilenmişlerdir. Bu doğrultuda, küçük boyutlu problemlerde eniyi çözümü elde etmek için bir karma tamsayılı matematiksel model geliştirmişlerdir. Belirlenen 2000 sn.'lik çalışma süreci sonucunda, model ile, 7 iş - 3 kademe ve 8 iş - 2 kademeye kadar çözüm elde edebilmişlerdir. Büyük ölçekli problemler için ise, elektromanyetizma teorisindeki itme-çekme prensibini dikkate alan ve elektromanyetizma algoritması (electromagnetism algorithm - (EMA)) olarak adlandırılan bir metasezgisel önermişlerdir. EMA'nın performansı küçük örnekler için, geliştirilen matematiksel model ile; büyük boyutlu örnekler için ise literatürde yer alan ve Ruiz ve Stutzle (2007) tarafından geliştirilen IGA (Iterated Greedy Algorithm) ve Naderi vd. (2008) tarafından önerilen tavlama benzetimi algoritması ile karşılaştırılmıştır. Test örnekleri, düzgün dağılım kullanılarak türetilmiştir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda, EMA'nın diğer iki algoritmaya göre daha iyi sonuçlar verdiği gösterilmiştir.

Jungwattanakit vd. (2009), kademelerde ilişkisiz paralel makinelerin olduğu ve sıra bağımlı hazırlık sürelerinin dikkate alındığı k kademeli bir paralel makineli akış atölyesinde, en büyük tamamlanma zamanı ve geciken iş sayısı kriterleri ile ilgilenmişlerdir. Küçük boyutlu problemlerde eniyi çözümü elde etmek için bir karma tamsayılı matematiksel model geliştirilmiş ve önerilen model ile CPLEX 8.0.0 yazılımı kullanılarak 7 iş - 4 kademeye kadar çözüm elde edilmiştir. Büyük boyutlu problemler için ise, sıralama kurallarından yararlanılarak sezgisel algoritmalar oluşturulmuştur. Çözüm kalitesini iyileştirmeye yönelik bir yerel iyileştirme prosedürü ile, işlerin ikili yer değiştirmesinden ve hareketlerin değişikliğinden yararlanılarak algoritmalar gelişime tabi tutulmuştur. Ek olarak, tavlama benzetimi, yasaklı arama ve genetik algoritma temelli metasezgisel yaklaşımlar da önermişlerdir. Algoritmalar, düzgün dağılım kullanılarak türetilen test örnekleri üzerinden, 50 iş ve 20 kademeye kadar karşılaştırmaya tabi tutulmuştur. Çalışma sonucunda önerilen tavlama benzetimi algoritmasının daha iyi sonuçlar verdiği sonucunu ortaya koymuşlardır.

Rashidi vd. (2010), sıra bağımlı hazırlık süreleri ve makinelerin bloke olma kısıtlarının söz konusu olduğu k kademeli bir paralel makineli akış atölyesi ortamında en büyük tamamlanma zamanını ve en büyük gecikmeyi enküçüklemeye çalışmışlardır. Tüm

popülasyonu çoklu alt popülasyonlara ayıran, özdeş olmayan paralel genetik algoritmalarından oluşan etkili bir algoritma sunmuşlardır. Her alt popülasyona, farklı yönlerde en iyi çözümler bulmak amacıyla farklı ağırlıklar atanmıştır. Pareto-etkin çözümler bulmaya ilaveten her algoritma yeniden yönlendirme prosedürü ile birleştirilmiştir. Yeniden yönlendirme prosedürü, yerel eniyileri aşmakta ve tüm çözüm uzayını taramaktadır.

Dugardin vd. (2010), darboğazlardaki fayda oranını arttırmak ve toplam erken üretim süresini enküçüklemek amacıyla k kademeli bir paralel makineli akış tipi üretimde Lorenz baskınlık ilişkilerini kullanan ve L-NSGA adı verilen genetik algoritma kullanmışlardır. Elde edilen genetik algoritma sonuçları NSGA-II ve SPEA-II ile kıyaslanmış ve L-NSGA'nın diğer iki algoritmaya göre daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

Behnamian ve Ghomi (2011), sıra bağımlı hazırlık sürelerinin olduğu k kademeli bir paralel makineli akış atölyesinde en büyük tamamlanma zamanını ve toplam kaynak atama maliyetini enküçüklemek amacıyla genetik algoritma ve komşu değişken arama yöntemlerini birleştirerek melez bir yaklaşım önermişlerdir. 100 işten fazlasını içeren kıyaslama problemleri için test edilen yaklaşımın, rassal tavlama benzetiminden (RNDSA) daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

Behnamian ve Zandieh (2011), sıra bağımlı hazırlık sürelerinin olduğu k kademeli bir paralel makineli akış atölyesinde işlerin erken ve geç bitirilmesi toplamını enküçüklemek amacıyla bir metasezgisel (discrete colonial competitive algorithm - (DCCA)) yaklaşım önermişlerdir. Algoritmaya geçmeden önce, probleme özgü geliştirdikleri karma tamsayılı matematiksel modele yer vermişlerdir. Algoritma genel olarak, sömürge ve koloni kavramlarından yola çıkarak, yer değiştirmeler ile en güçlü popülasyonun bulunmasıyla ilgilenmektedir. Algoritmanın performansı, farklı parametre setleri için literatürde yer alan ve Wang ve Tang (2009) tarafından önerilen melez tavlama benzetimi algoritması (HTS_{Wang}) ile Liu vd. (2008) tarafından geliştirilen yasaklı arama algoritması (RBT_{Liu}) ile kıyaslanmıştır. Test örnekleri, düzgün dağılım kullanılarak türetilmiştir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda, DCCA'nın diğer iki algoritmaya göre daha iyi sonuçlar verdiği gösterilmiştir.

Behnamian vd. (2012), enbüyük tamamlanma zamanının enküçüklenmeye çalışıldığı, kademelerde özdeş paralel makinelerin bulunduğu ve sıra bağımlı hazırlık süreleri ile kademe atlama durumunun dikkate alındığı k kademeli bir paralel makineli akış atölyesi ile ilgilenmişlerdir. Bu doğrultuda öncelikle, probleme özgü bir karma tamsayılı matematiksel model geliştirmişlerdir. Sonrasında, problemin çözümünü bulmaya yönelik olarak, karınca kolonisi optimizasyonu, değişken komşuluk arama ve tavlama benzetimi algoritmalarını birleştiren melez bir metasezgisel yaklaşım önermişlerdir. Buna göre, karınca kolonisi algoritmasının mantığı olan, karıncalar tarafından güncellenen feromon izleriyle iyi bir çözümün bulunması için bilgi oluşturulması durumu ile değişken komşuluk arama ve tavlama benzetimi algoritmalarının mantığı olan, komşuluk bazlı arama yapabilme durumu dikkate alınmıştır. Önerilen melez algoritmanın performansı, farklı parametre setleri için literatürde yer alan ve Kurz ve Askin (2004) tarafından önerilen rassal anahtarlı genetik algoritma (RKGA_{Kurz}), Zandieh vd. (2006) tarafından geliştirilen bağışıklık algoritması (IA_{Zandieh}), Ruiz ve Stuetzle (2008) tarafından önerilen açgözlü algoritma (IG-L_{Ruiz}) ve Gajpal vd. (2006) tarafından geliştirilen karınca kolonisi optimizasyonu algoritması (ACO-L_{Gajpal}) ile kıyaslanmıştır. Test örnekleri, düzgün dağılım kullanılarak türetilmiştir. 100 işe kadar yapılan ve 252 problemten elde edilen sonuçlar doğrultusunda, geliştirilen melez metasezgisel yaklaşımın, literatürde yer alan diğer algoritmalara göre daha iyi sonuçlar verdiği sonucu ortaya konulmuştur.

Mousavi vd. (2013), enbüyük tamamlanma zamanı ve toplam gecikmenin enküçüklenmeye çalışıldığı k kademeli bir paralel makineli akış atölyesi ile ilgilenmişlerdir. Kademelerde özdeş paralel makinelerin bulunduğu atölye ortamında, sıra bağımlı hazırlık süreleri de dikkate alınmıştır. Problemin çözümü için, tavlama benzetimi ve yerel arama tabanlı bir metasezgisel yaklaşım önermişlerdir. İki amaçlılığın çözümünde kriterlerin normalleştirilmesi yöntemi kullanılan metasezgiselde, başlangıç çözümünden daha iyi yeni çözümler üretmek amacıyla farklı bir komşuluk arama mekanizması kullanmışlardır. Önerilen tavlama benzetiminin önemli özelliklerinden biri, algoritmada tanımlanmış farklı hareket adımlarından (ikili yer değiştirme, öteleme vb.) rastgele birinin seçilmesiyle yapılan komşuluk arama yapısıdır. Önerilen yaklaşımın performansı, literatürde yer alan ve Jungwattanakit vd. (2007) tarafından önerilen genetik algoritma ile kıyaslanmıştır. Test örnekleri, düzgün dağılım kullanılarak türetilmiştir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda, önerilen metasezgiselin daha iyi sonuçlar verdiği gösterilmiştir.

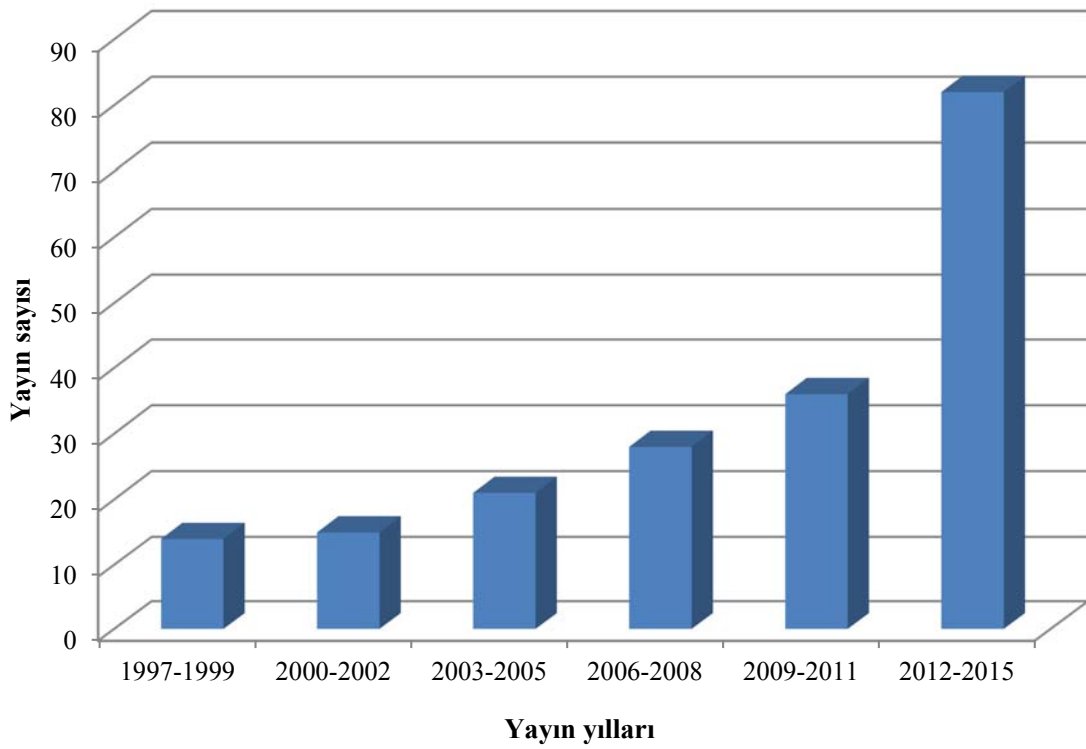
Marichelvam vd. (2014), en büyük tamamlanma zamanını enküçükleme kriteri altında, k kademeli bir paralel makineli akış atölyesi çizelgeleme problemi için, 2009 yılında Yang ve Deb tarafından geliştirilen Cuckoo Search (CS) algoritmasını ele almışlardır. Geliştirilmiş Cuckoo Search algoritmasını kullanarak elde edilen eniyi ya da eniyiye yakın çözüme daha hızlı ulaşmak amacıyla, başlangıç çözümün bulunmasında NEH sezgiselinden yararlanılmıştır. Geliştirilen algoritmanın performansını gözlemlemek amacıyla, bir mobilya üretim fabrikasından alınan gerçek veriler üzerinde testler yapılmıştır. Literatürde yer alan bazı çalışmalar ile geliştirilen algoritmanın performansları karşılaştırılmış ve ICS (Improved Cuckoo Search) algoritmasının diğer metasezgisellere göre daha iyi sonuçlar verdiği ortaya konulmuştur.

Ebrahimi vd. (2014), sıra bağımlı hazırlık sürelerinin olduğu k kademeli bir paralel makineli akış atölyesinde en büyük tamamlanma zamanını ve toplam gecikmeyi enküçükleme amacıyla genetik algoritma temelli olan NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm) ve MOGA (Multi Objective Genetic Algorithm) algoritmalarını önermişlerdir. Söz konusu algoritmaların performansları, farklı parametre setleri için literatürde yer alan MPGA (Multi-phase Genetic Algorithm) ile kıyaslanmıştır. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda, NSGA-II'nin diğer iki algoritmaya göre daha iyi sonuçlar verdiği gösterilmiştir.

Literatürde, paralel makineli akış atölyesi çizelgeleme problemleri ile ilgili incelenen çalışmaların yayınlanma yılları, çözüm yöntemleri ve performans ölçütleri doğrultusunda dağılımları ele alınmış olup söz konusu kriterlere göre yayın sayılarının dağılımı izleyen bölümlerde verilmiştir.

2.2.1. Yıllara göre çalışmalar

Paralel makineli akış atölyesi çizelgeleme problemleri (P.A.Ç.P.) konusundaki tüm yayınlar (kademe sayısı, sıra bağımlı hazırlık süresi, kademe atlama durumu vb. ayrımı yapılmadan) incelenmiş ve yıllara göre yayın sayılarının dağılımı Şekil 2.1'de verilmiştir. Son yıllarda konu ile ilgili yayın sayısında artış olduğu rahatlıkla görülebilmektedir.

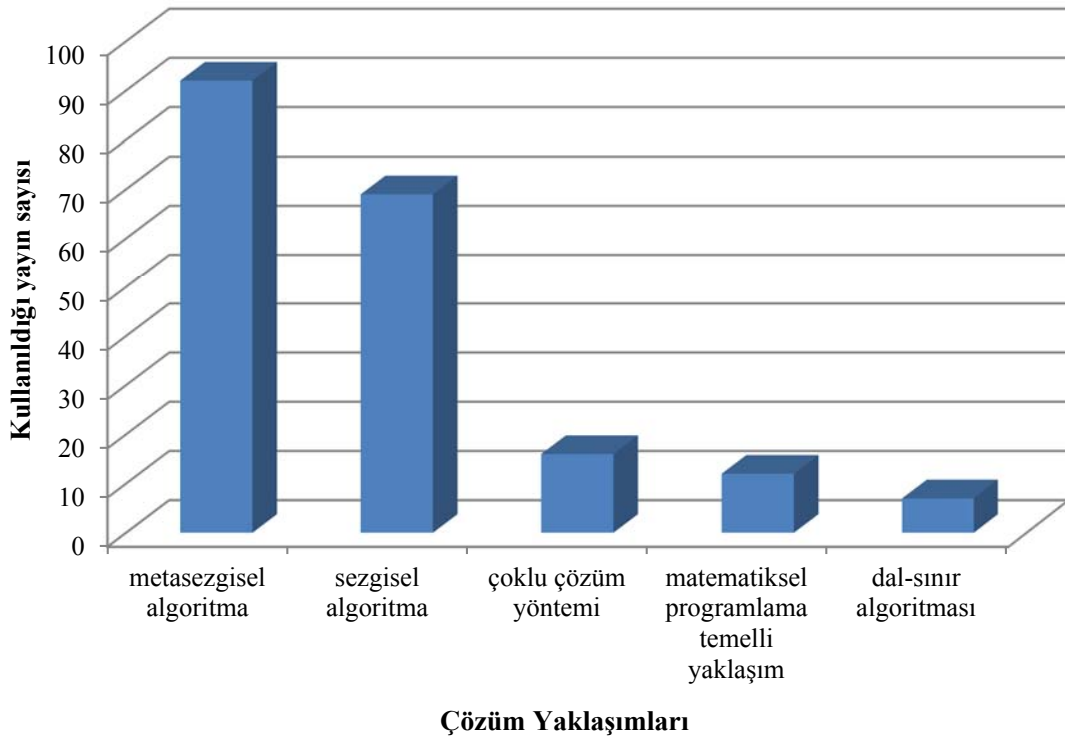


Şekil 2.1. Yıllara göre P.A.Ç.P. yayın sayıları dağılımı

2.2.2. Çözüm yöntemlerine göre çalışmalar

Paralel makineli akış atölyesi çizelgeleme problemlerinin çözümünde kesin çözüm veren yöntemler ile birlikte, sezgisel ve metasezgisel yaklaşımlar da yaygın olarak kullanılmaktadır. Çalışmalar incelendiğinde, çözüm yöntemlerinin dağılımı Şekil 2.2’de verildiği gibidir. Sezgisel ve metasezgisel yaklaşımların oldukça ağırlıklı olduğu sonucu ortaya çıkmaktadır.

Paralel makineli akış atölyesi çizelgeleme problemlerinde en yaygın kullanılan metasezgiseller, tavlama benzetimi algoritması, yasaklı arama algoritması ve genetik algoritma olup, karınca kolonisi optimizasyonu, yapay bağışıklık sistemleri ve yapay sinir ağları vb. yöntemler de çizelgeleme problemlerinde kullanılmaktadır (Ruiz ve Rodriguez, 2010).

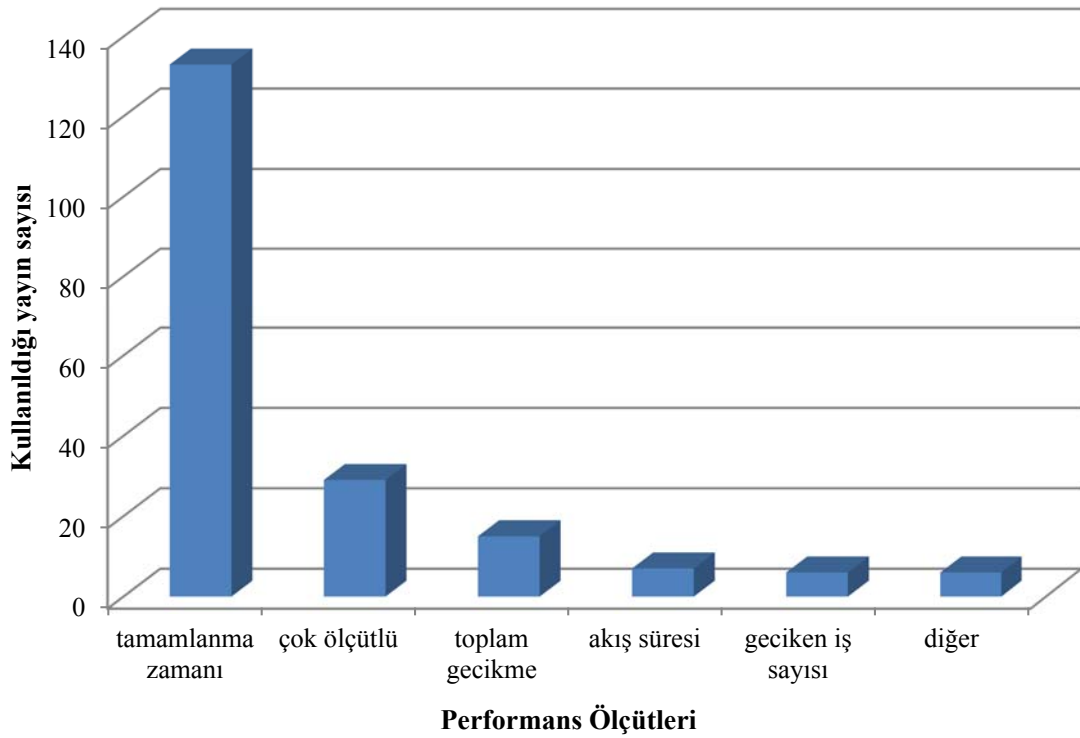


Şekil 2.2. P.A.Ç.P.’nin çözüm yaklaşımlarının dağılımı

Çoklu çözüm yöntemleri olarak ifade edilen çözüm yaklaşımları grubu, söz konusu yayında birden fazla çözüm yöntemi kullanıldığını belirtmektedir. Bu gruba giren çalışmalar, dal-sınır tekniği ve matematiksel programlama temelli yaklaşımlara oranla daha fazla sayıdadır. Genellikle küçük boyutlu problemlerin çözümü için dal-sınır algoritması geliştirilmiştir.

2.2.3. Performans ölçütlerine göre çalışmalar

Literatürde yer alan çalışmalar incelendiğinde, paralel makineli akış atölyesi çizelgeleme problemlerinin içerisinde çok sayıda performans ölçütüne rastlanmıştır. Performans ölçütlerine göre yayın sayılarının dağılımı Şekil 2.3’te görüldüğü gibi olup, çalışmalarda en fazla kullanılan ölçütün belirgin bir farkla “tamamlanma zamanı” olduğu görülmektedir.

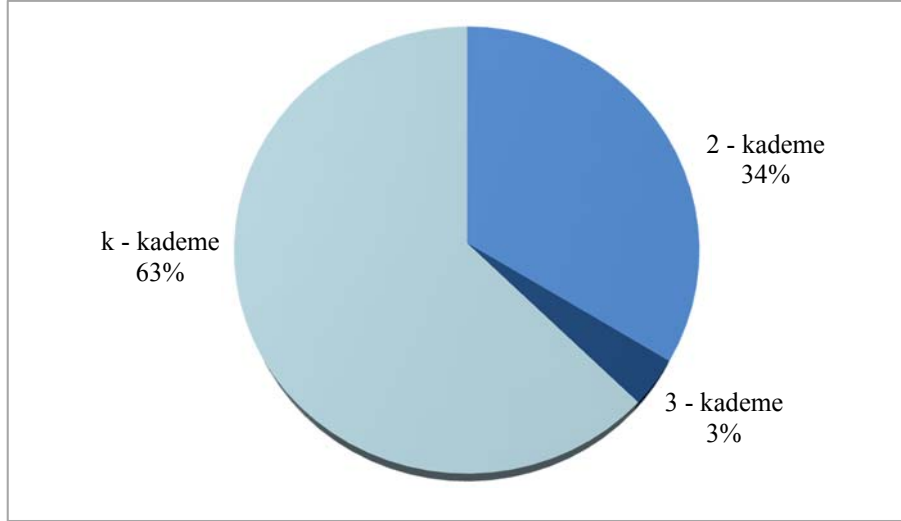


Şekil 2.3. P.A.Ç.P.’de kullanılan performans ölçütlerine göre yayın sayılarının dağılımı

Diğer kriterler ele alındığında, çok ölçütlü problemlerin kullanım oranının diğer ölçütlere oranla daha fazla olduğu gözlenmiştir. Diğer olarak ifade edilen performans ölçütleri grubunda, birkaç performans ölçütünün performanslarının ayrı ayrı değerlendirildiği çalışmalar yer almaktadır.

2.2.4. Kademe sayıları ve sıra bağımlılık gözetme durumuna göre çalışmalar

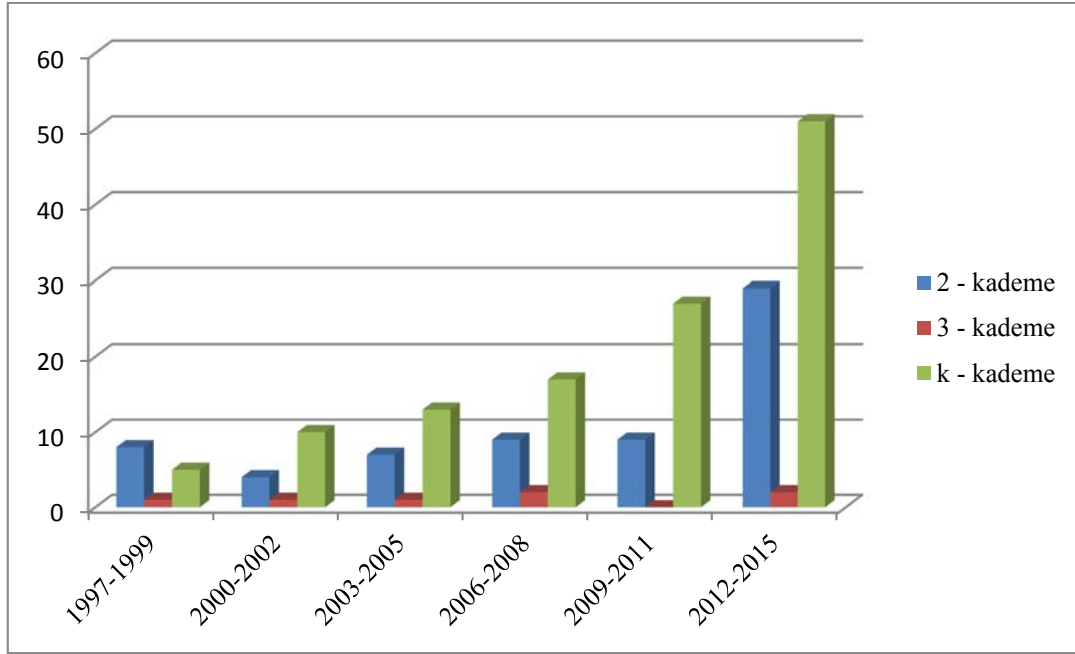
Paralel makineli akış atölyesi çizelgeleme problemlerinde önemli kavramlardan biri de atölye ortamındaki kademe sayısıdır. Bu kapsama giren problemlerde kademeler, iki, üç ve k kademe (çok kademe) olarak üç gruba ayrılmaktadır. Kademe sayılarına göre yayın sayılarının dağılımı Şekil 2.4’te görüldüğü gibi olup, k kademe ile ilgilenen çalışmaların daha fazla olduğu söylenebilmektedir.



Şekil 2.4. P.A.Ç.P.'nin kademe sayılarına göre dağılımı

İki veya üç kademe yerine, k kademe ile ilgilenen çalışmaların daha fazla bulunması, çalışmalarda çözüm yöntemi olarak sezgisel ve metasezgisel yöntemlere daha fazla başvurulmasının bir sonucu olarak da açıklanabilir. Problemin NP-zor yapısı sebebiyle, çoğu durumda bir sezgisel algoritma ile çözüm aramanın kaçınılmaz olduğu belirtilmişti. Bu durum, geliştirilen ve daha büyük boyutlu problemleri hedef alan sezgisellerin de, iki ya da üç kademe yerine, çok kademeli problemlere dönük olmasını sağlamıştır. İki yada üç kademeyi ele alan spesifik bir atölye ortamı yerine, daha genel bir yapıyı ele alan k kademe üzerinden çalışılması, geliştirilen yaklaşımın, benzer sistemler tarafından kullanılabilirliğini artıracaktır.

Şekil 2.5'te, yıllara göre kademe sayılarının dağılımı verilmiştir. Davoudpour ve Ashrafi (2009), çalışmalarında; Salvador (1973), Hunsucker ve Brah (1994) ve Leung (2006) yayınlarını da referans göstererek, iki kademeli paralel makineli akış atölyesini ele alan çalışmaların, üzerinde en fazla çalışılan problem olduğunu belirtmişler ve k kademe ile ilgili oldukça az yayın olduğunu ifade etmişlerdir. Bununla beraber, grafiğe göre, k -kademie ile ilgili çalışmalar istikrarlı olarak artış göstermiş ve 2000 yılından itibaren, iki kademeli çalışmalardan daha fazla ilgilenilmiştir. Özellikle 2009 yılından sonra, k kademeli çalışmaların daha da artış gösterdiği söylenebilmektedir.



Şekil 2.5. Yıllara göre kademe sayılarının dağılımı

Çalışmada ele alınan problem, daha önce de belirtildiği gibi k kademe bir atölye ortamını ele almaktadır. Bununla birlikte, k kademe ile ilgilenen çalışmalarda, sıra bağımlı hazırlık sürelerinin çok fazla dikkate alınmadığı gözlenmiştir. Oransal olarak incelendiğinde, karşılaşılan k kademeli çalışmalar içerisinde, sıra bağımlı hazırlık sürelerini dikkate alan çalışmaların oranı yaklaşık **%15** olarak belirlenmiştir. Bu oran, tüm kademeler göz önüne alındığında ise yaklaşık **%9**'a karşılık gelmektedir.

Ayrıca, çalışmalarda çoğunlukla, işlerin her kademede işlem görme zorunluluğunun olduğu (kademe atlamanın olmadığı) durumlar ele alınmıştır. Ancak, gerçek hayat problemlerinde, zaman zaman her iş her kademede işlem görmek zorunda değildir. Çalışmada, literatürdeki diğer çoğu çalışmadan farklı olarak, kademe atlama durumu da dikkate alınmıştır. Bu doğrultuda, sıra bağımlı hazırlık süresi ile kademe atlama durumlarını aynı anda ele alan çalışma sayısının da oldukça az olduğunu söylemek mümkündür. Bu özellikler, bu çalışmada ele alınan problemin karakteristiklerini oluşturmaktadır.

Literatür incelendiğinde, matematiksel model içeren çalışmalara da çok fazla rastlanmamıştır. Bunlardan da, sıra bağımlı hazırlık sürelerini dikkate alan matematiksel model sayısı oldukça azdır. Ayrıca, çalışmalarda, geliştirilen matematiksel modellerin

sonuçlarına da az sayıda yer verildiği gözlenmiştir. Her ne kadar problemin yapısı sebebiyle, mevcut bilimsel ortamda, büyük boyutlu problemleri çözemeyecek olsa da, varsa, geliştirilen özel bir sezgisel algoritmanın performansının literatürde test problemlerinin olmaması durumunda, ilgili matematiksel model ile sınanması da bir fikir vermektedir. Yine genellikle, çok ümit verici boyutlara ulaşılmasa da, geliştirilen modelin, hangi boyuta kadar çözüm verdiği de kıymetli bir bilgidir.

Mevcut durumda, NP-zor problemlerin çözümlerini elde etmek oldukça zor olduğundan, çalışma kapsamında geliştirilen matematiksel modelin de zordur. Bununla beraber, ileride, bu modellerin çözüm süreçlerinde, bilimsel yeni gelişmeler kaydedilebilir. Bu yönüyle de, bu modelin de, model parametrelerine bağlı olarak karmaşıklığı vb. durumlar incelenebilir ve sürece katkı sağlayabilir.

Sonuç olarak, çalışmada; sıra bağımlı hazırlık sürelerinin dikkate alınması, işlerin kademe atlayabilmesi, yeni ve özgün bir matematiksel model önerilmesi ve modelin çözüm sonuçlarına yer verilmesi, geliştirilen sezgisel algoritmanın dinamik bir yapıya sahip olması, sonuçların analizinde gerçek veri setlerinin kullanılması ve kullanıcı etkileşimli bir arayüz tasarlanması sebebiyle, çalışmanın literatüre ve ilgili problemin çözümüne katkı sağlayabileceği düşünülmektedir.

Ürün tasarımları ve bağılı olarak üretim süreçlerinde yukarıda açıklanan farklılaşmalar, çizelgeleme problemlerine de bir çeşitlilik getirmiştir. Bu sebeple bu çalışmaya konu olan problemle, benzer çeşitliliğin yer aldığı üretim işletmelerinde karşılaşılacaktır. Kapsamın gerek akademik çalışma boyutunda gerekse uygulama bulma potansiyeli açısından da geniş olduğu düşünülmektedir.

Bu bölümde yer alan analizlere esas teşkil eden (kriterlere göre dağılımları incelenen) yayınlar, uluslararası veri tabanlarından indirilen makaleler olup, Ek Açıklamalar-A'da listelenmiştir. Problemin ortaya konması, literatürdeki yerinin belirlenmesi ve çözüm yöntemi geliştirme aşamasında daha ayrıntılı olarak yararlanılan (metin içinde atıf verilen) çalışmalar ise Kaynaklar Dizini'nde verilmiştir.

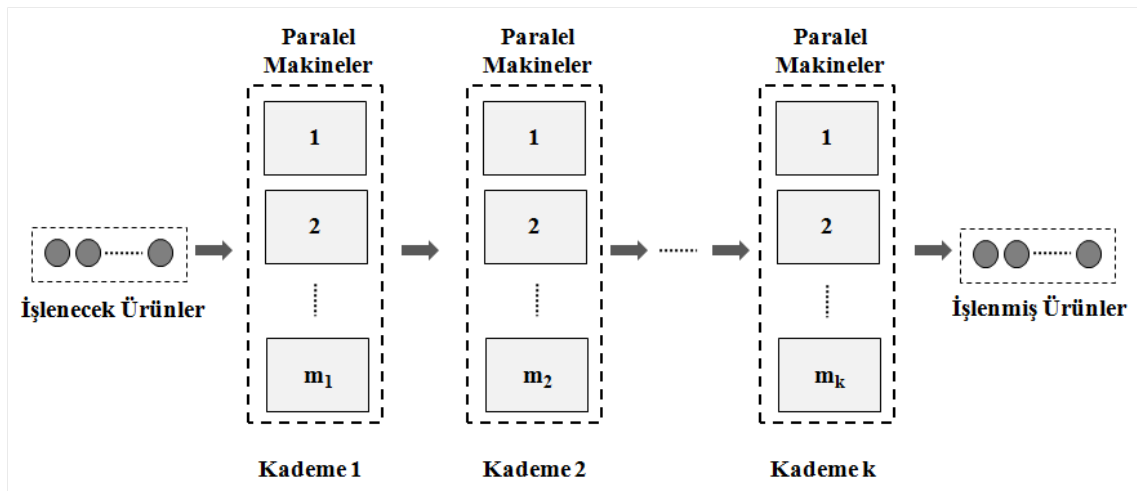
3. PARALEL MAKİNELİ AKIŞ ATÖLYESİ ÇİZELGELEME PROBLEMİ İÇİN YENİ BİR MATEMATİKSEL MODEL

Bu bölümde, önceki bölümde belirtilen gerekçelerle geliştirilmiş olan matematiksel model ayrıntılı olarak ele alınmaktadır.

3.1. Problemin Yapısı

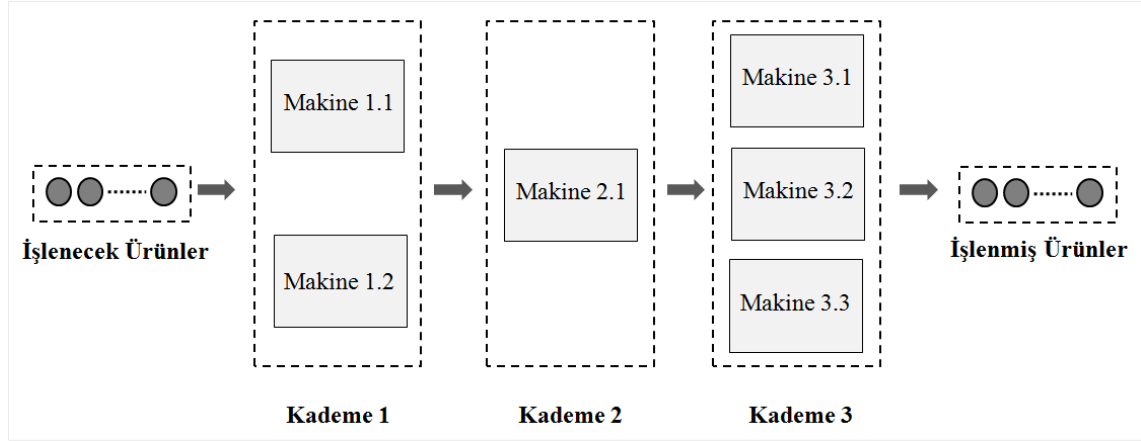
Çalışmada, sıra bağımlı hazırlık sürelerinin söz konusu olduğu, her biri birden fazla kademede işlenmesi gereken n adet işin, k kademeli paralel makineli akış atölyesinde çizelgelenmesi problemi ele alınmıştır. Söz konusu problem, $FF_k, (PM^{(1)}, \dots, PM^{(k)}) / S_{ijk} / C_{enb}$ şeklinde gösterilmekte olup; k kademeli bir esnek akış tipi üretim ortamında, işler arasında sıra bağımlı hazırlık sürelerinin olduğu, $t = \{1, 2, \dots, k\}$ olmak üzere her bir t . kademede m_t adet özdeş paralel makinenin bulunduğu ve toplam tamamlanma zamanının enküçüklenmesinin amaçlandığını gösteren bir yapıyı tanımlamaktadır.

Ele alınan problemde işler, sıraları önceden belirlenmiş işlemlerden oluşmaktadır. Tüm işler aynı üretim akışına göre işlem görürler. Ancak bir iş herhangi bir kademeyi atlayıp bir sonraki kademede işlem görebilir. İşler arasındaki geçişler esnasında meydana gelen sıra bağımlı hazırlık süreleri her kademede değişiklik göstermektedir. Bu probleme karşı gelen atölyenin gösterimi Şekil 3.1.'de verilmiştir.



Şekil 3.1. Ele alınan atölye yapısı

Burada m_t değerlerine bağlı olarak farklı atölye yapıları ortaya çıkabilir. Örneğin $k=3$, $m_1=2$, $m_2=1$, $m_3=3$ için atölye Şekil 3.2.'de verildiği gibi olacaktır.



Şekil 3.2. Örnek bir atölye yapısı

Problem, her bir kademede işlerin makinelere atanmasını ve makinelere atanan işlerin sıralanmasını içermektedir. Problemin en iyi çözümünü bulmaya yönelik olarak geliştirilen matematiksel model ve modelin, farklı parametre setleri için ulaşacağı boyutun izlenebildiği analiz çalışması izleyen bölümde verilmiştir.

3.2. Matematiksel Model ve Boyut Analizi

Tanımlanan problemin çözümünü bulmaya yönelik olarak, yeni bir 0-1 karma tamsayılı matematiksel model geliştirilmiştir. Literatür incelendiğinde, tanımlanan problem kapsamında oldukça az sayıda matematiksel model içeren çalışma olduğu gözlenmiş ve bunlardan da, çalışmada geliştirilen matematiksel modele benzer bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu durumun, problemin daha basit formunun bile NP-zor yapıda olduğunun gösterilmesinin sonucu olduğu söylenebilir. Öte yandan, önceki bölümde belirtilen sebeplerle, bu çalışma kapsamında izleyen model geliştirilmiştir. Geliştirilen modelde kullanılan notasyon, varsayımlar ve model aşağıda açıklanmaktadır.

Varsayımlar:

1. Probleme ilişkin veriler deterministiktir ve bilinmektedir.
2. Tüm işler, çizelgeleme işlemi başlangıcında hazır bulunmaktadır.

3. İşler bölünemez.
4. Makineler, çizelgeleme periyodu içerisinde her zaman uygundur.
5. İşler, bir önceki kademede işlendikten sonra bir sonraki kademede işlenmek üzere hazırdır.
6. Kademelerde yer alan paralel makineler, kapasiteleri ve işleme hızları bakımından özdeştir.

İndisler:

$i, j \in N$	işler
$s \in N$	iş sırası
$l \in M$	makineler
$t \in K$	kademeler

Kümeler:

$N = \{1, 2, \dots, n\}$	iş
$M = \{1, 2, \dots, m_t\}$	makine
$K = \{1, 2, \dots, k\}$	kademe

Parametreler:

n	: iş sayısı
k	: kademe sayısı
m_t	: t . kademede bulunan paralel makine sayısı
p_{jt}	: j . işin t . kademedeki işlem süresi
h_{jt}	: t . kademe ilk sıradaki j işinin başlangıç hazırlık süresi
s_{ijt}	: t . kademede i işinden sonra j işinin yapılması durumunda gerekli olan sıraya bağımlı hazırlık süresi
q_j	: j . işin sipariş miktarı (adet)
M	: büyük bir reel sayı

Karar Değişkenleri:

C_{jt}	: j . işin t . kademedeki tamamlanma zamanı
C_{enb}	: son işin (sıralamadaki n . işin) tamamlanma zamanı

$$X_{jtls} = \begin{cases} 1, & j. \text{ iş } t. \text{ kademedeki } l. \text{ makinenin } s. \text{ sırasına atanırsa} \\ 0, & \text{diğer durumlarda} \end{cases}$$

Amaç Fonksiyonu:

$$\text{EnkZ} = C_{enb}$$

Kısıtlar:

$$\sum_{l=1}^{m_t} \sum_{s=1}^n X_{jtls} = 1 \quad \forall(j, t) \quad (j, s) \in N, l \in M, t \in K \quad (1)$$

$$\sum_{j=1}^n X_{jtls} \leq 1 \quad \forall(t, l, s) \quad (j, s) \in N, l \in M, t \in K \quad (2)$$

$$C_{jt} + M * (1 - X_{jtls}) \geq C_{j(t-1)} + p_{jt} * q_j + h_{jt} \quad \forall(j, l) \quad s = 1, t > 1, (j, s) \in N, l \in M, t \in K \quad (3)$$

$$C_{jt} - C_{it} + M * (2 - X_{itl(s-1)} - X_{jtls}) \geq p_{jt} * q_j + s_{ijt} \quad \forall(i, j, t, l) \quad i \neq j, s > 1, (i, j, s) \in N, l \in M, t \in K \quad (4)$$

$$C_{jt} \geq C_{j(t-1)} + p_{jt} * q_j \quad \forall(j) \quad t > 1, j \in N, t \in K \quad (5)$$

$$\sum_{j=1}^n X_{jtls} - \sum_{i=1}^n X_{itl(s-1)} \leq 0 \quad \forall(t, l) \quad s > 1, i \neq j, (i, j, s) \in N, l \in M, t \in K \quad (6)$$

$$C_{max} \geq C_{jt} \quad \forall(j, t) \quad j \in N, t \in K \quad (7)$$

$$C_{jt} \geq 0 \quad \forall(j, t) \quad j \in N, t \in K \quad (8)$$

$$X_{jtls} \in \{0,1\} \quad \forall(j, t, l, s) \quad (j, s) \in N, l \in M, t \in K \quad (9)$$

(1) nolu kısıt, bir kademedeki işlem görecektir her işin, o kademedeki yer alan bir makinenin bir sırasına atanmasını sağlar.

(2) nolu kısıt, kademelerde yer alan her makinenin her bir işlem sırasına en fazla bir iş atanabileceğini belirtir.

- (3) nolu kısıta göre, bir iş bir kademede yer alan herhangi bir makinenin ilk sırasına yerleştirilmiş ise, söz konusu işin tamamlanma zamanı, işin bir önceki kademedeki tamamlanma zamanı ile mevcut kademedeki işlem süresi ve başlangıç hazırlık süresinin toplamından büyük ya da eşit olmalıdır.
- (4) nolu kısıt, bir iş herhangi bir makinede ikinci ya da daha büyük bir sıraya yerleştirilmiş ise, söz konusu işin tamamlanma zamanının, bir önceki işin tamamlanma zamanı ile işlenecek işin işlem süresi ve sıraya bağımlı hazırlık süresinin toplamından büyük ya da eşit olması gerektiğini gösterir.
- (5) nolu kısıta göre, bir işin bir t . kademedeki tamamlanma zamanı, söz konusu işin bir önceki $(t-1)$ kademede tamamlanma zamanı ile işlenecek işin o kademedeki (t) işlem süresinin toplamından büyük ya da eşit olmalıdır.
- (6) nolu kısıt, işlerin kademelerde, makinelere ardı ardına atanmasını sağlar.
- (7) nolu kısıta göre, en büyük tamamlanma zamanı, her bir işin işlem gördüğü tüm kademelerdeki tamamlanma zamanlarından büyük olmalıdır.
- (8) ve (9) nolu kısıtlar işaret kısıtları olup, sırasıyla karar değişkenlerinin pozitif olmaları koşulu ile 0-1 tamsayı değişken olduklarını ifade etmektedirler.

Literatür incelendiğinde, matematiksel model içeren çalışmalara çok fazla rastlanmamış; bunlardan da, sıra bağımlı hazırlık sürelerini dikkate alan matematiksel model sayısının oldukça az olduğu gözlenmiştir. Modeller incelendiğinde, yapı olarak neredeyse tamamının birbirlerine çok benzerlik gösterdiği görülmüştür. Genellikle, $X_{ijlt}(t)$ kademedeki l . makineye i işinden sonra j işi atanırsa) olarak belirtilen tek bir karar değişkeni tanımlanmış ve kısıtlar bu değişken üzerinden oluşturulmuştur. Örneğin; bir iş bir kademede ilk sıraya atanmışsa, karar değişkeni X_{0jlt} olarak; son iş olarak atanmışsa, $X_{i(n+1)lt}$ olarak belirtilmiştir. Ayrıca, yine ortak olarak çoğunda, B_{it} (i . işin t . kademede işe başlangıç zamanı) olarak tariflenen değişken ile işlerin tamamlanma zamanları kayıt altına alınmıştır. Çalışma kapsamında geliştirilen matematiksel model ise, literatürdeki çalışmalardan farklı bir yapıda tariflenmiş olup, özgün bir modeldir. Bu sayede, literatüre, bu anlamda katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

İzleyen kesimde, geliştirilen matematiksel modelin, farklı parametre setleri için ulaşacağı boyut analiz edilmektedir. i, j çizelgelenecek iş, g kademe sayısı, m_t t . kademede

bulunan paralel makine sayısı olmak üzere iki örnek model üzerinde problemin toplam kısıt ve değişken sayıları hesaplanmıştır. Çizelge 3.1.(a) 10 iş, 2 kademe ve 4 makine, Çizelge 3.1.(b) 10 iş, 5 kademe ve 8 makine, Çizelge 3.1.(c) 1000 iş, 2 kademe ve 4 makine, Çizelge 3.1.(d) 1000 iş, 5 kademe ve 8 makine olarak ele alınan örnek parametre değerleri için elde edilen boyutsal değerleri göstermektedir.

Çizelge 3.1.(a) Matematiksel modele ilişkin boyut analizi
(10 iş, 2 kademe ve 4 makine için örnek)

Kısıt no	İndisler	Kısıt sayısı	$i, j, s = 10,$ $t = 2, l = 4$
1	j, t	$j * t$	20
2	t, l, s	$t * l * s$	80
3	j, t, l, s	$j * t * l * 1$	80
4	i, j, t, l, s	$i * (j-1) * t * l * (s-1)$	6.480
5	j, t	$j * t$	20
6	t, l, s	$t * l * (s-1)$	72
7	j, t	$j * t$	20
8	j, t	$j * t$	20
Değişken	İndisler	Değişken sayısı	
X_{jtls}	j, t, l, s	$j * t * l * s$	800
C_{jt}	j, t	$j * t$	20
Toplam kısıt sayısı		$j * t * (4+l) + t * l * (s-1) * (1+i*j-i) + t * l * s$	6.792
Toplam değişken sayısı		$j * t * (1+l*s)$	820

Çizelge 3.1.(b) Matematiksel modele ilişkin boyut analizi
(10 iş, 5 kademe ve 8 makine için örnek)

Kısıt no	İndisler	Kısıt sayısı	$i, j, s = 10,$ $t = 5, l = 8$
1	j, t	$j * t$	50
2	t, l, s	$t * l * s$	400
3	j, t, l, s	$j * t * l * 1$	400
4	i, j, t, l, s	$i * (j-1) * t * l * (s-1)$	32.400
5	j, t	$j * t$	50
6	t, l, s	$t * l * (s-1)$	360
7	j, t	$j * t$	50
8	j, t	$j * t$	50
Değişken	İndisler	Değişken sayısı	
X_{jtls}	j, t, l, s	$j * t * l * s$	4.000
C_{jt}	j, t	$j * t$	50
Toplam kısıt sayısı		$j * t * (4+l) + t * l * (s-1) * (1+i*j-i) + t * l * s$	33.760
Toplam değişken sayısı		$j * t * (1+l*s)$	4.050

Çizelgelerden de görüldüğü üzere, iş sayısı sabitken kademe ve makine sayısı arttırıldığı zaman toplam kısıt ve değişken sayıları da üstel olarak artmaktadır. 1000 iş, 2 kademe ve 4 makine olduğunda problemin ulaşacağı boyut Çizelge 3.1.(c)'de; 1000 iş, 5 kademe ve 8 makine olduğundaki boyut Çizelge 3.1.(d)'de verilmektedir.

Çizelge 3.1.(c) Matematiksel modele ilişkin boyut analizi
(1000 iş, 2 kademe ve 4 makine için örnek)

Kısıt no	İndisler	Kısıt sayısı	$i, j, s = 1000,$ $t = 2, l = 4$
1	j, t	$j * t$	2.000
2	t, l, s	$t * l * s$	8.000
3	j, t, l, s	$j * t * l * 1$	8.000
4	i, j, t, l, s	$i * (j-1) * t * l * (s-1)$	7.984.008.000
5	j, t	$j * t$	2.000
6	t, l, s	$t * l * (s-1)$	7.992
7	j, t	$j * t$	2.000
8	j, t	$j * t$	2.000
Değişken	İndisler	Değişken sayısı	
X_{jtls}	j, t, l, s	$j * t * l * s$	8.000.000
C_{jt}	j, t	$j * t$	2.000
Toplam kısıt sayısı		$j*t*(4+l)+t*l*(s-1)*(1+i*j-i)+t*l*s$	7.984.039.992
Toplam değişken sayısı		$j*t*(1+l*s)$	8.002.000

Çizelge 3.1.(d) Matematiksel modele ilişkin boyut analizi
(1000 iş, 5 kademe ve 8 makine için örnek)

Kısıt no	İndisler	Kısıt sayısı	$i, j, s = 1000,$ $t = 5, l = 8$
1	j, t	$j * t$	5.000
2	t, l, s	$t * l * s$	40.000
3	j, t, l, s	$j * t * l * 1$	40.000
4	i, j, t, l, s	$i * (j-1) * t * l * (s-1)$	39.920.040.000
5	j, t	$j * t$	5.000
6	t, l, s	$t * l * (s-1)$	39.960
7	j, t	$j * t$	5.000
8	j, t	$j * t$	5.000
Değişken	İndisler	Değişken sayısı	
X_{jtls}	j, t, l, s	$j * t * l * s$	40.000.000
C_{jt}	j, t	$j * t$	5.000
Toplam kısıt sayısı		$j*t*(4+l)+t*l*(s-1)*(1+i*j-i)+t*l*s$	39.920.179.960
Toplam değişken sayısı		$j*t*(1+l*s)$	40.005.000

Çizelgelerden de görüldüğü üzere, iş, kademe ve makine sayısı arttırıldığı zaman toplam kısıt ve değişken sayıları da üstel olarak artmaktadır. İzleyen kısımda, geliştirilen matematiksel modelin küçük boyutlu veri setleri için çözümüne ve çözüm sonuçlarından hareketle duyulan sezgisel yaklaşım ihtiyacına değinilecektir.

3.3. Sezgisel Algoritma Geliştirme Gerekçeleri

Çoğu tamsayılı programlama modelleri NP-zor sınıfına aittir. Dolayısıyla genel doğrusal programlama modelleri polinom zamanda çözülebilirken, aynı modelin tamsayılı çözümünü bulmak, üstel hesaplama zamanı gerektirebilir (Bakır ve Altunkaynak, 2003). Gupta (1988) tarafından gösterildiği üzere, iki aşamalı paralel makineli akış atölyesi problemi de NP-zor sınıfında bulunmaktadır.

Geliştirilen matematiksel model, küçük boyutlu veri setleri için GAMS 24.2.2 yazılımı ile Intel® Core™ i5 CPU / 2.50 GHz / 4 GB Ram kapasiteli kişisel bilgisayarda CPLEX çözücüsü kullanılarak çözdürülmüştür. Eniyi çözümleri elde edilen örneklerin kademe, toplam makine ve iş sayısı değerleri ile elde edilen çözüm süresi sonuçları Çizelge 3.2.'de verilmiştir.

Çizelgeden anlaşılabacağı gibi; “2 kademe, 3 makine, 8 iş”, “4 kademe, 5 makine, 7 iş” ile “6 kademe, 7 makine, 6 iş” için eniyi çözüm elde edilebilirken (proven optimal solution), “4 kademe, 6 makine, 7 iş” için çözüm bulunamamıştır (time limit = 500000 sn.). “6 kademe, 7 makine, 6 iş” ile “4 kademe, 6 makine, 7 iş” örnekleri kıyaslanacak olursa, kademe ve makine sayısında azalma olmasına rağmen, iş sayısındaki bir birim artışın, çözüm elde edilememesine sebep olduğu görülebilir. Problemin yapısındaki karmaşıklıktan dolayı, parametrelerdeki küçük artışlar bile çözüm elde etmeyi oldukça zorlaştırmaktadır. Problem kapsamında, boyutu etkileyen en önemli parametrenin iş sayısı değeri olduğunu söylemek mümkündür.

Çizelge 3.2. Matematiksel model çözüm performansı

Kademe sayısı	Toplam makine sayısı	İş sayısı	Çözüm süresi (00:00:00) sa:dk:sn
2	3	7	00:04:17
2	3	8	05:31:05
2	4	7	03:14:28
2	5	7	02:37:33
3	5	7	00:54:07
4	5	7	00:29:30
4	6	3	00.00.01
4	6	4	00.00.01
4	6	5	00.00.03
4	6	6	00.08.00
5	7	6	00:02:17
5	8	4	00.00.01
5	8	5	00.00.08
5	8	6	06.09.12
6	7	5	02:15:37
6	7	6	06:46:00
6	8	5	02:47:30
7	8	5	00:57:11
7	9	5	05:30:00
4	6	7	-

Literatürde, erişilebildiği kadarıyla, sıra bağımlı hazırlık sürelerini de dikkate alarak geliştirilen matematiksel modellerden yalnızca üç tanesinde model sonuçlarına yer verilmiştir. Karşılaştırma olması açısından, bu çalışmalarda çözüm sonuçlarına da değinilmiştir. Bölüm 2.1.'de detaylarına yer verilen çalışmalardan olan Ruiz vd. (2008), geliştirdikleri model ile, 3 kademe - 7 iş; Naderi vd. (2009), 3 kademe - 7 iş ve 2 kademe - 8 iş; Jungwattanakit vd. (2009) ise 4 kademe - 7 iş (5 makine) kadar eniyi çözüm elde edebilmişlerdir. Daha önce de belirtildiği gibi, literatürdeki matematiksel modeller yapıları itibariyle çok benzerdir. Çalışma kapsamında geliştirilen matematiksel model ise, literatürdeki çalışmalardan farklı bir yapıda tariflenmiş olup, özgün bir modeldir.

Öte yandan, bu çalışmada ele alınan türdeki çizelgeleme problemlerinin çözümünde kullanılan eniyileme yöntemleri, güçlü bir bilgisayara ve çok fazla hesaplama zamanına ihtiyaç duymaktadır. Bu nedenle, orta ve büyük boyutlu problemlerde kesin çözüm elde

etmenin zorluğu nedeniyle, eniyi çözüm yerine eniyiye yakın sonuç verecek ve çözüm süresini kısaltacak sezgisel yaklaşımlara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu doğrultuda, problemin yapısına özel bir sezgisel algoritma geliştirilmiş ve izleyen bölümde yer verilmiştir.

4. SEZGİSEL ALGORİTMA TEMELLİ BİR ÇÖZÜM YAKLAŞIMI GELİŞTİRİLMESİ

Bu bölümde, önceki bölümde belirtilen gerekçelerle geliştirilmiş olan sezgisel yaklaşım ayrıntılı olarak tanıtılmaktadır.

4.1. Geliştirilen Algoritma

Çalışmada ele alınan işler, daha önce de belirtildiği gibi işlem sırası önceden belirlenmiş işlemlerden oluşmaktadır. Tüm işler kademe 1, kademe 2, ..., kademe k şeklinde aynı üretim akışına göre işlem görürler. Ancak bir iş herhangi bir kademeyi atlayıp bir sonraki kademedeki işlem görebilir. İşlem gördüğü bir kademedeki işe, bir iş, bir makineye atanır ve bir makinede aynı anda yalnızca bir iş işlem görebilir. İşler arasındaki geçişler esnasında meydana gelen sıra bağımlı hazırlık süreleri her kademedeki değişkenlik göstermektedir. Ele alınan problem, bu atölye ortamında, her bir kademedeki işlerin makinelerle atanmasını ve makinelerle atanan bu işlerin de ilgili makine için kendi içinde sıralanmasını içermektedir. Bu doğrultuda, toplam tamamlanma zamanının enküçüklenmesinin amaçlandığı, probleme özgü bir sezgisel algoritma geliştirilmiştir.

Algoritma; her biri birden çok kademedeki işlenmesi gereken n adet işin, k kademeli bir esnek akış tipi üretim ortamında, işler arasında sıra bağımlı hazırlık sürelerinin olduğu, t . kademedeki m_t adet özdeş paralel makinenin bulunduğu ve toplam tamamlanma zamanının enküçüklenmesinin amaçlandığı bir yapı için geliştirilmiştir.

Geliştirilen sezgisel algoritma, çizelgelenecek işleri gün bazında üretim programından okumakla başlar. Çizelgelemeye birinci kademedeki işlemlerle başlanır. Her bir iş için öncelikle hangi makineye atanacağı kararı verilir. Hangi makinede tamamlanma zamanı daha küçük olacak ise, işin o makineye atanması gerçekleşir. Makineye yapılabilecek olası atamalar araştırılırken, sıra bağımlı hazırlık süreleri, hazırlık zamanı kaynaklı kayıpları enküçüklemek amacıyla göz önünde bulundurulur.

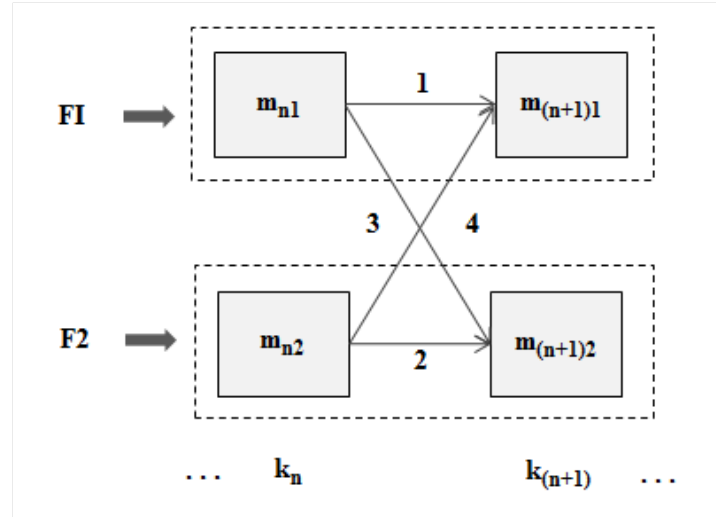
Bir işin ilgili kademede işlemi yok ise, iş o kademede beklemeden bir sonraki kademeye geçmelidir. Bu durumun sağlanması için, algoritmada her işe her kademe için bir işlem süresi tanımlanır. Bu süre, bir kademede işlem görmeyecek işler için sıfırdır. Eğer bir işin bir kademedeki işlem süresi sıfır ise, iş o kademeye uğramaz.

Çalışmada, $(t-1)$. kademede tamamlanma zamanı aynı olan ürünler varsa, t . kademede bunların hangisinin öncelikli olacağına karar verirken, t . kademedeki işlem süresi ve bir önceki işe bağlı olan sıra bağımlı hazırlık süresi toplamı en küçük olan iş öncelikli ele alınır.

Paralel makineli akış atölyesi çizelgeleme problemlerinde, farklı sayılarda makine içeren kademeler ve farklı performans ölçütleri bulunabilmektedir. Bu nedenle, tümünü kapsayacak genel bir çizelgeleme algoritması geliştirmek zordur. Bunun yerine çalışmada modüler bir yapı önerilmektedir.

Paralel makineli akış atölyesi çizelgeleme problemlerinin yapısı gereği, süreçte birden fazla kademe bulunur ve en az bir kademede birden fazla makine yer alır. Bu doğrultuda, çalışmada ele alınan süreç için ilgili kademede tek makine ya da birden fazla makine ($m_t \geq 2$) bulunması durumları için alt algoritmalar oluşturulmuştur.

Öte yandan, birden fazla ve aynı sayıda makine içeren ardışık kademelerde, akış kombinasyonu sayısını azaltmak amacıyla çeşitli kolaylıklar planlanmıştır. Bahsedilen özelliğe uyan alt sistemi tüm akışta barındıran üretim sistemlerinde, bu kolaylık aşağıda anlatıldığı gibi ele alınabilir:



Şekil 4.1. Makine gruplama yapısı gösterimi

Şekil 4.1.'de görüldüğü üzere, k_n ve $k_{(n+1)}$ olarak ele alınan ardışık kademelerde sırasıyla ikişer makine olsun. Bir iş her iki kademede de işlem görsün. k_n kademesinden çıkan işin bir sonraki akışı, şekilden de görülebilen dört kombinasyondan herhangi biri olabilir. Ancak, bu tür olası tüm durumları irdelemek, işlem zamanını arttırabilir. Bunun yerine her iş, $(m_{n1}, m_{(n+1)1})$ veya $(m_{n2}, m_{(n+1)2})$ akışlarından birini seçecek şekilde çizelgelenebilir. Şekilden de görülebildiği gibi, k_n kademesinden çıkan işlerin böylece, yalnızca 1 veya 2 numaralı akışlar üzerinden diğer kademelere aktarılması planlanabilir. Özetle, bir iş sırasıyla ya $(m_{n1}, m_{(n+1)1})$ makinelerinde, ya da $(m_{n2}, m_{(n+1)2})$ makinelerinde işlem görecektir. $(m_{n1}, m_{(n+1)2})$ veya $(m_{n2}, m_{(n+1)1})$ akışlarına izin verilmeyecektir. Bu doğrultuda, $(m_{n1}, m_{(n+1)1})$ makineleri bir araya gelerek FI akış atölyesini; $(m_{n2}, m_{(n+1)2})$ makineleri ise $F2$ akış atölyesini oluştururlar. Daha önce de belirtildiği gibi, bir işin bir kademede işlem süresi sıfırsa, söz konusu iş o kademeyi atlayıp sonraki kademeye geçer. Çalışmada, makine gruplayarak akış atölyeleri oluşturulabilmesi durumu, çizelgelenecek tüm işlerin, gruplanacak tüm kademelerde işlem görmesi gerektiği varsayımı üzerinden ele alınmıştır. Dolayısıyla bu sistemde, bir işin, k_n ve $k_{(n+1)}$ kademelerinin sadece birisinde işlem görmesi söz konusu değildir. Eğer çizelgelenecek işler kümesindeki işlerden bir tanesi bile, gruplama yapılacak kademelerin herhangi birinde işlem görmüyor ise, o kademeler üzerinden akış atölyeleri oluşturulamaz. Sonuç olarak, Şekil 4.1.'deki örneğe göre, tüm işler, k_n ve $k_{(n+1)}$ kademelerinin ikisinde de işlem görmelidir.

İşler arası geçişlerde yaşanan sıra bağımlı hazırlık süreleri her kademedede değişkenlik göstermektedir. $(t-1)$. kademededen çıkan işin, t . kademeye geldiğinde hangi konumda üretime alınacağına karar verilirken, işin o kademedede harcayacağı toplam süre dikkate alınmaktadır. Söz konusu süre, t . kademedede yer alan makineye bağlı olan bir önceki işe göre tanımlanan sıra bağımlı hazırlık süresi ile üretilecek işin t . kademedeki işlem süresi toplamı olarak hesaplanmaktadır. Tüm işler için toplam süreler bu şekilde bulunarak, işlerin kademedede yer alan her makinedeki tamamlanma zamanları üzerinden bir sıralama oluşturulur. Sıralamadaki en küçük tamamlanma zamanını veren iş, çizelgelenmemiş işler kümesinden çıkartılır. Kademedede yer alan makine sayısına göre, algoritma ilgili adım üzerinden işlemlere devam etmektedir. Bununla beraber, eğer üretim sürecinde daha önce de bahsedilen ve akış atölyeleri oluşturma ile ilgili tanımlanan koşullar sağlandıysa, algoritma, tanımlanan adımlar üzerinden ilerlemektedir. Ayrıca, işlerin kademelerden çıktıktan sonraki tamamlanma süreleri, sistemden çıkan son işin tamamlanma zamanının (C_{enb}) belirlenebilmesi amacıyla kayıt altına alınmaktadır. Sezgisel algoritmanın adımlarına ilişkin akış şeması Ek Açıklamalar-B’de verilmiştir.

İzleyen kesimde, akış şeması verilen sezgisel yaklaşıma ilişkin algoritma adımları gösterilmiştir. Algoritmada kullanılacak notasyon aşağıda verildiği gibidir:

4.1.1. Parametre ve karar değişkenleri

$P = \{j \mid j = 1, 2, \dots, n\}$ İş indis kümesi

$SP = \{k \mid k = 1, 2, \dots, s\}, s \leq n$ Çizelgelenmiş iş indis kümesi

$USP = \{z \mid z = 1, 2, \dots, t\}, t \leq n$ Çizelgelenmemiş iş indis kümesi

$SP \cup USP = P, \quad SP \cap USP = \emptyset$

$M = \{l \mid l = 1, 2, \dots, m\}$ Makine indis kümesi

$K = \{t \mid t = 1, 2, \dots, k\}$ Kademe indis kümesi

$A = \{a \mid a = 1, 2, \dots, m_t\}$ Akış atölyesi indis kümesi

m_t : t . kademedede bulunan paralel makine sayısı

ts_{jt} : j . işin t . kademedede harcayacağı toplam süre (işlem + sıra bağımlı hazırlık süresi)

ts_{ja} : j . işin a . akış atölyesinde harcayacağı toplam süre

p_{jt} : j . işin t . kademedeki işlem süresi

s_{ijt} : t . kademede i işinden sonra j işinin yapılması durumunda gerekli olan sıraya bağımlı hazırlık süresi

q_j : j . işin sipariş miktarı (adet)

e : Çizelgelenmek üzere seçilmiş iş indisi

C_{jt} : j . işin t . kademedeki tamamlanma zamanı

C_{jta} : j . işin t . kademede a . akış atölyesindeki tamamlanma zamanı

C_{jtl} : j . işin t . kademede l makinesindeki tamamlanma zamanı

B_{jt} : j . işin t . kademede üretime başlayabileceği zaman

$$B_{jt} = \text{enb}\{C_{j(t-1)}, C_{it}\} \quad ((i, j) \in P, i \neq j)$$

Z_{jt} : j . işin t . kademede bekleme süresi

$$Z_{jt} = \begin{cases} C_{it} - C_{j(t-1)}, & C_{j(t-1)} < C_{it} \\ 0, & C_{j(t-1)} \geq C_{it} \end{cases} \quad (j \in USP, i \in SP, i \neq j)$$

C_{enb} : Son işin (sıralamadaki n . işin) tamamlanma zamanı

$$C_{max} = \text{enb}(C_{jt}) \quad \{j \in SP\}$$

++ : değeri 1 artır.

4.1.2. Algoritma adımları

Önerilen çizelgeleme yaklaşımı aşağıdaki adımlardan oluşmaktadır:

Adım 1: Veri okuma ve gerekli bilgilerin türetilmesi

1.1. Ürünlere ait model, her bir kademede birim üretim ve sıra bağımlı hazırlık süreleri, talep, termin bilgilerini oku.

1.2. Kademe sayısı ve kademelerde yer alan makine bilgilerini oku.

1.3. Çizelgelenecek işler kümesini, USP , oluştur.

Adım 2: Başlangıç atamaların yapılması

2.1. Başlangıç:

$$t = 0, j = 0,$$

$$C_{enb} = \text{büyük bir reel sayı.}$$

2.2. $t++$ (kademeyi bir artır).

Adım 3: Makine ortamına karar verme

3.1. Birden fazla ve aynı sayıda makine içeren ardışık kademeler bulunuyor ve aynı zamanda o kademelerde işlerin tamamı işlem görüyor,

$$m_n, m_{(n+1)}, \dots, m_{(n+x)} \geq 2,$$

$$m_n = m_{n+1} = \dots = m_{(n+x)} \quad j \in P, n \in K, x \in R, x \geq 1,$$

$$p_{jn}, p_{j(n+1)}, \dots, p_{j(n+x)} > 0, \forall j$$

ise, kademelerde yer alan makinelerden birer tane almak üzere akış atölyeleri oluştur ve Adım 4'e git.

3.2. t . kademede yer alan makine sayısı bilgisini oku,

- tek makine varsa, $m_t = 1$,

Adım 5'e git.

- en az iki makine varsa, $m_t \geq 2$

Adım 6'ya git.

Adım 4: İşlerin akış atölyelerine atanması

4.1. $j++$ (iş indisini 1 artır), $j \in USP$,

ve $a = 0$ olarak tanımla.

4.2. $a++$ (akış atölyesi indisini 1 artır).

4.3. Akış atölyesinde yer alan ilk makineye atanmış son işi oku.

4.4. Akış atölyesinde harcanacak toplam süreyi, ts_{ja} , aşağıdaki gibi hesapla.

$$ts_{ja} = (p_{jn} * q_j + s_{ijt}) + (p_{j(n+1)} * q_j + s_{ij(t+1)}) + \dots + (p_{j(n+x)} * q_j + s_{ij(t+x)})$$

$$j \in USP, i \in SP, t \in K, x \in R$$

4.5. j . işin akış atölyesindeki tamamlanma zamanını aşağıdaki gibi hesapla.

$$C_{j(t+x)a} = B_{jt} + ts_{ja} + Z_{j(t+1)} + \dots + Z_{j(t+x)}$$

4.6. Akış atölyesindeki tamamlanma zamanının, $C_{j(t+x)a}$, j işi için, tüm akış atölyeleri üzerinden hesaplandığını kontrol et:

- hesaplanmayan akış atölyesi var ise, $a < m_t$, Adım 4.2'ye git.

- tüm akış atölyeleri için hesaplandı ise, $a = m_t$, Adım 4.7.'ye git.

4.7. USP kümesindeki tüm işler için, $C_{j(t+x)a}$ değerinin hesaplandığını kontrol et:

- USP'de bakılmayan iş var ise, $j < n$, Adım 4.1'e git.

- tüm işlere bakıldı ise, $j = n$, Adım 4.8.'e git.

4.8. İşleri tamamlanma zamanları artan yönde olacak şekilde sırala, $j \in USP$.

4.9. Çizelgelenecek işi, e , aşağıdaki gibi seç.

$$e = \arg\{enk\{C_{j(t+x)a}\}\}, (j \in USP)$$

4.10. Seçilen işi (e), en küçük tamamlanma zamanını veren akış atölyesinin, ilk kademesinde seçilen makineye atanmış son işin arkasına ekle,

$$USP = USP/\{e\}$$

$$SP = SP \cup \{e\}$$

4.11. e işinin akış atölyesindeki tamamlanma zamanını, $C_{e(t+x)a}$, e işinin $(t+x)$. kademedeki tamamlanma zamanı olarak güncelle ve Adım 7'ye git.

$$C_{e(t+x)} = C_{e(t+x)a} \quad (e \in SP, (t+x) \in K)$$

4.12. Çizelgelenmemiş işler kümesinde iş varsa, $USP \neq \emptyset$,
 $j = 0$ olarak tanımla ve Adım 4.1.'e git.

Adım 5: Tek makineli kademeler için işlerin çizelgelenmesi

5.1. $j++$ (iş indisini 1 artır), $j \in USP$.

5.2. j . işin t . kademedeki işlem görüp görmediğine bak. İşlem görmüyor ise, $p_{jt} = 0$,
 $(j \in USP)$,

$t++$ ve Adım 7'ye git.

5.3. t . kademedeki bulunan makineye atanmış son işi oku.

5.4. j . işin t . kademedeki harcayacağı toplam süreyi, ts_{jt} , aşağıdaki gibi hesapla.

$$ts_{jt} = p_{jt} * q_j + s_{ijt} \quad (i \in SP, j \in USP)$$

5.5. j . işin t . kademedeki tamamlanma zamanını aşağıdaki gibi hesapla.

$$C_{jt} = B_{jt} + ts_{jt} \quad (j \in USP, i \in SP, i \neq j)$$

5.6. USP kümesindeki tüm işler için, ts_{jt} değerinin hesaplandığını kontrol et.

- USP'de bakılmayan iş var ise, $j < n$, Adım 5.1'e git.
- tüm işlere bakıldı ise, $j = n$, Adım 5.7.'ye git.

5.7. İşleri, tamamlanma zamanları artan yönde olacak şekilde sırala, $j \in USP$.

5.8. Çizelgelenecek işi, e , aşağıdaki gibi seç.

$$e = \arg\{enk\{C_{jt}\}\}, \quad (j \in USP)$$

5.9. Seçilen işi t . kademedeki bulunan makineye atanmış son işin yanına ekle,

$$USP = USP/\{e\}$$

$$SP = SP \cup \{e\}$$

5.10. e işinin t . kademedeki makinedeki tamamlanma zamanını, C_{et} , kaydet ve Adım 7'ye git.

5.11. Çizelgelenmemiş işler kümesinde iş varsa, $USP \neq \emptyset$,
 $j = 0$ olarak tanımla ve Adım 5.1'e git.

Adım 6: Birden fazla makine içeren kademeler için işlerin çizelgelenmesi

6.1. $j++$ (iş indisini 1 artır), $j \in USP$,

ve $l = 0$ olarak tanımla.

6.2. j . işin t . kademede işlem görüp görmediğine bak. İşlem görmüyor ise, $p_{jt} = 0$,
($j \in USP$),

$t++$ ve Adım 7'ye git.

6.3. $l++$ (makine indisini 1 artır).

6.4. l . makineye atanmış son işi oku.

6.5. j . işin t . kademede harcayacağı toplam süreyi, ts_{jtl} , aşağıdaki gibi hesapla.

$$ts_{jtl} = p_{jt} * q_j + s_{ijt} \quad (i \in SP, j \in USP)$$

6.6. j . işin t . kademede l . makinede tamamlanma zamanını aşağıdaki gibi hesapla.

$$C_{jtl} = B_{jt} + ts_{jtl} \quad (j \in USP, i \in SP, i \neq j, l \in M)$$

6.7. j . işin t . kademede tamamlanma zamanının, C_{jtl} , j işi için, kademede tüm makineler üzerinden hesaplandığını kontrol et:

- hesaplanmayan makine var ise, $l < m_t$, Adım 6.3'e git.
- tüm makineler için hesaplandı ise, $l = m_t$, Adım 6.8.'e git.

6.8. USP kümesindeki tüm işler için, C_{jtl} değerinin hesaplandığını kontrol et:

- USP'de bakılmayan iş var ise, $j \leq n$, Adım 6.1'e git.
- tüm işlere bakıldı ise, $j = n$, Adım 6.9.'a git.

6.9. İşleri tamamlanma zamanları artan yönde olacak şekilde sırala, $j \in USP$.

6.10. Çizelgelenecek işi, e , aşağıdaki gibi seç.

$$e = \arg\{enk\{C_{jtl}\}\}, \quad (j \in USP)$$

6.11. Seçilen işi (e), en küçük tamamlanma zamanını veren makineye atanmış son işin arkasına ekle.

$$USP = USP / \{e\}$$

$$SP = SP \cup \{e\}$$

6.12. e işinin t . kademede tamamlanma zamanını, C_{et} , aşağıdaki gibi güncelle,

$$C_{et} = C_{etl} \quad (e \in SP, t \in K, l \in M)$$

ve Adım 7'ye git.

6.13. Çizelgelenmemiş işler kümesinde iş varsa, $USP \neq \emptyset$,

$j = 0$ olarak tanımla ve Adım 6.1.'e git.

Adım 7: Sonraki kademeye geçişin yapılması

7.1. $t \leq k$ ise (tüm kademelerden geçilmediyse), Adım 3'e git.

7.2. $t > k$ ise (son kademeden çıkıldıysa), k 'nın değerini t 'ye ata, $t = k$, Adım 8'e git.

Adım 8: Enbüyük tamamlanma zamanının (C_{enb}) hesaplanması

Tüm işler için, işler arasındaki en büyük tamamlanma zamanını, C_{enb} , olarak belirle.

$$C_{enb} = enb(C_{jt}), (j \in SP)$$

İzleyen kesimde, geliştirilen sezgisel algoritmanın kodlanması ve arayüzün tasarlanması konularına yer verilmiştir.

4.2. Algoritmanın Kodlanması

Geliştirilen algoritma, “Microsoft Visual Studio Express 2013 for Windows Desktop” ortamında, C# programlama dili kullanılarak kodlanmıştır. Söz konusu yazılım ortamında, nesne yönelimli programlama mantığı esas alınmaktadır.

Nesne yönelimli programlamanın altında yatan ana fikir, her bilgisayar programının, etkileşim içerisinde olan birimler veya nesneler kümesinden oluştuğu varsayımdır. Nesneler, içinde veri ve bu veriler üzerinde işlem yapacak olan metotları (fonksiyon) bulunduran yazılım bileşenleridir. Bu nesnelerin her biri, kendi içerisinde veri işleyebilir ve diğer nesneler ile çift yönlü veri alışverişinde bulunabilir. Bir nesne yapısı, bir sınıf (class) içinde tanımlanır. Sınıf içinde nesneyi oluşturan değişkenler ve metotlar açıkça tanımlanır. Nesne yönelimli programlamadan önce kullanılan yapısal programlama yaklaşımında ise, programlar sadece bir komut dizisi veya birer işlev (fonksiyon) kümesi olarak görülmektedir.

Nesne yönelimli programlama dillerinde, nesneler, ait oldukları sınıfların sunduğu şablonlarla temsil edilirler. Birbirinin benzeri ya da aynı konu ile ilişkili sınıflar bir araya getirilerek “namespace” adı verilen sınıf kümeleri oluşturulur. Bu durumda yazılımın bakımı, mevcut sınıflarda değişiklik ya da yeni sınıf eklenmesi anlamına gelir. Bu da, yazılımın tümünü hiçbir şekilde etkilemeyecek olan bir işlemdir. Bununla birlikte, klasik yapısal programlama dilleriyle geliştirilen programlarda, yazılımın bakım maliyeti oldukça yüksektir. Nesne yönelimli programlamada mevcut bir sınıfa yeni özellik ve metotlar ekleyerek artan işlevsellik sağlamak da oldukça kolaydır.

Bu gerekçelerle, algoritmanın kodlanması aşamasında, C# programlama dili kullanılarak, nesne yönelimli programlamanın sağladığı faydalardan yararlanılmıştır. Problemin, bilgisayar ortamına daha kolay ve anlaşılabilir bir biçimde aktarılabilmesi için; iş, makine, işçi, ürün, günlük üretilecek ürünler, genel veri kaynağı, yürütücü (initializer) ve raporlama olmak üzere sekiz ayrı sınıf oluşturulmuştur. Her bir sınıf içinde, sınıfa ait özellikler ve metotlar açıkça tanımlanmıştır. Algoritmada kullanılan tüm veriler ise, kullanıcı kolaylığı sağlaması amacıyla Microsoft Office Excel ortamında tutulmuştur.

4.3. Kullanıcı Arayüzleri ve Etkinlik

Oluşturulan sınıflar üzerinden tanımlanan veriler ve yazılan kodlar doğrultusunda hesaplanan değerlerin, kullanıcı tarafından görülebilmesi amacıyla bir arayüz tasarlanmıştır. Arayüzde öncelikle, tanımlanan problem verilerinin sisteme yüklenmesi sağlanmıştır. Kullanıcı, Microsoft Office Excel ortamında tanımladığı verileri, geliştirilen arayüz aracılığı ile sisteme kolaylıkla yükleyebilmektedir. Verilerin dosyalara girilmesi esnasında daha önceden herhangi bir hata yapılmışsa (örneğin; sıra bağımlı hazırlık sürelerinin yer aldığı tablolardaki iş sayılarının vb. uyuşmaması gibi) ekrana, yapılan hata ile ilgili uyarı mesajı gelmektedir. Düzeltmeler yapıldıktan sonra, program tekrar çalıştırılıp, hatasız verilerin sisteme tekrar yüklenmesi sağlanmaktadır. Sonrasında arayüzdeki en önemli kısım olan, kodlanan algoritma sonuçlarının ekrana yansıtılması ve kullanıcı tarafından izlenebilmesi üzerine tasarımlar yapılmıştır. Bu doğrultuda, hangi işin, hangi makinede, hangi sırada yapılacağı, tasarlanan Gantt Şeması ile izlenebilmektedir. Ayrıca, makine bazında iş sayıları, makinelerin çalışma ve bekleme süreleri, doluluk oranları, makinelerdeki son işlerin tamamlanma zamanları ile sistemden çıkan son işin tamamlanma zamanı (C_{enb}) değerleri de, arayüzde bulunan sonuçlar bölümünde görülebilmektedir. Ek olarak, işlerin, başlangıç ve bitiş zamanları ile işlendikleri makinede geçirdikleri toplam sürelerin görülebilmesini sağlayan kodlar da yazılmıştır. Gantt Şeması üzerinde, herhangi bir işin üzerine fare ile gelindiğinde; işin, ilgili makinede işe başlama ve tamamlanma zamanları ile makinede geçirdiği süre bilgisi izlenebilmektedir.

4.4. Program Değişikliklerinin Çizelgeye Yansıtılması

Geliştirilen algoritmanın bir diğer katkısı da dinamikliği dikkate alabilmesidir. Talep edilen ürünün cinsinde ve/veya sipariş büyüklüğünde değişiklik olduğunda mevcut çizelge, kolayca güncellenebilmektedir. Önerilen sistem ile üretim programlarında ortaya çıkabilecek değişiklikler için, geliştirilen algoritmada talep bilgilerinin güncellenmesi yeterlidir. Bunun için, önceki programa dönük üretimin başlaması ile değişiklik tarihi arasında gerçekleşen üretim miktarı –yarı mamuller dahil- dikkate alınarak, yeni talep değerinde düzeltme yapılmalıdır. Sistem içindeki yarı mamul göz ardı edilirse, süreç sonunda nihai ürüne zaten dönüşecekleri için, hesaplama dışında kalmaları stok fazlasına sebep olur. Bu yüzden tamamlanmış (süreç sonunda tamamlanacak) üretim miktarı gibi dikkate alınmalıdırlar.

Ayrıca geliştirilen sistem, kullanıcının, üretim adedi verilerini üretim programından doğrudan çekebilmesine izin verebilmektedir. Sürece özgü tüm parametrelerin (işlem süreleri, kademe bazında hazırlık süreleri vb.) Microsoft Office Excel ortamında tutulması halinde, herhangi bir yeni ürün tasarlanması vb. durumunda da, yeni bilgiler sisteme kolaylıkla dahil edilebilecektir.

Yukarıda adımları açıklanan ve bu çalışma kapsamında geliştirilen sezgisel yaklaşımın uygulaması, üretim sektöründe faaliyet gösteren bir işletmede, probleme uyan bir süreçte gerçekleştirilmiştir. İzleyen bölümde, ilgili işletme ve üretim süreci hakkında bilgi verilmesinin ardından, uygulamanın yapıldığı üretim atölyesi tanıtılacaktır. Sonrasında gerçek veri setleri kullanılarak, hali hazırda işletmede kullanılan çizelgeleme yaklaşımı ile önerilen sezgisel algoritma karşılaştırılacaktır.

5. UYGULAMA

Çalışma kapsamında geliştirilen yaklaşım; bir işletmede, paralel makineli ve akış tipi üretim gerçekleştirilen bir atölye ortamında uygulanmıştır.

İzleyen kısımlarda, işletme tanıtılmakta ve ele alınan problemin elde edilen çözümüne yer verilmektedir. Önerilen ve mevcut çözümler bu bölümde karşılaştırılmaktadır.

5.1. İşletmenin Tanıtımı

Buzdolabı üretmek amacıyla 1973 yılında, 200 bin metre kare toplam açık alan ve 30 bin metre kare kapalı alanda kurulmuş olan işletmede, 1975 yılında üretime başlanmıştır. Mevcut durumda, işletmenin ana üretim binası 61200 m², plastik fabrikası ise 15350 m² kapalı alana sahiptir. İşletmede çalışan personel sayısı yaklaşık 4500 kişidir.

Kalite yönetimi bilinci işletme ile birlikte yardımcı sanayinde de yerleşmiştir. Buzdolabı işletmesi, müşteri talepleri doğrultusunda buzdolaplarının en kaliteli şekilde müşterilere ulaştırılmasını ve müşterilerin satış sonrası karşılaşıacağı sorunlarda sağlanan servis imkanı ile müşteri memnuniyetinin en üst düzeye taşınmasını amaçlamaktadır. Kaliteyi göz önünde bulunduran kuruluş için, hatalar fark edilmeden önce önlemlerinin alınarak ortadan kaldırılması en temel hedeflerdendir.

İlgilenilen buzdolabı işletmesinde, kesikli seri üretim yapılmaktadır. Kesikli seri üretim sistemleri, kitle üretiminin önemli alt sistemleridirler. Burada, iletim hatlarında ilerleme genelde “eşzamanlı” olur. Bu tip sistemler temelde ardı ardına dizilmiş iş istasyonlarından oluşur. Hammadde ve yarı mamul parçalar hattın başlangıcından ve ara istasyonlardan sisteme girerler. Her iş istasyonunda bu girdileri işleyen tezgah ve işgücü bulunur. Girdiler bir iş istasyonundan diğerine geçerek en son istasyondan çıktıklarında, tamamlanmış olarak hattı terk ederler. Hat, tümüyle bütün olarak durmakta ya da bütün olarak ilerlemektedir.

İşletmede ürüne (akışa) göre yerleşim mevcuttur. Akış tipi üretimde, belli bir malzeme kalıbı söz konusu olduğundan, çoğu özel maksatlı olan makineler bu sıraya göre dizilmektedir. Üretimdeki malzeme akışlarının düzgün hatlar boyunca olmasını sağlayan bu yerleştirme türünde, bandın bir ucundan giren hammadde beklemeksizin birçok işleminden geçerek bandın sonunda ürün haline gelmektedir. Buzdolabı fabrikasının akışa göre yerleştirilmiş olması ara stokları yok denecek kadar azaltmış, birim üretim sürelerini düşürmüştür. Bunun yanında malzeme aktarımı azaltılmış, akış süreleri de kısaltılmıştır. Ancak her yönden avantaj sağlayabilen bu tip yerleşim bazı durumlarda da büyük kayıplara neden olmaktadır. Büyük yatırım gerektiren bu yerleştirme tipinde, makinelerden birinin arızası ya da işlemlerden herhangi birinin uzaması, tüm hattın aksamasına hatta üretimin durmasına sebebiyet vermektedir.

Akış tipi üretimde hattın güvenilirliği ve dengesi önem kazanır. Güvenilirlik, hattın tümüyle çalışır durumda olması olasılığının daima yüksek tutulması demektir. Ancak bu hattaki tezgahların ard arda dizilmiş olması, herhangi birindeki arızanın bütün hattı durdurmasına yol açar. Peş peşe dizilen tezgah sayısı arttıkça, hattın güvenilirliği de çok büyük bir hızla düşmektedir. Süreçte, boş beklemler, gecikmeler ve ara depolardaki yığılmalar işlem süreleri arasındaki farklardan dolayı meydana gelir. Bu farkları gidermek için hat dengelemesi yapılır. İşlemlerin iş istasyonlarına atanmasının planlanması, çeşitli kısıtları gündeme getirir. Bunlar; süre kısıtları, öncelik kısıtları, üretimin daha kolay işleyebilmesi için bazı istasyonların aynı bölgede yer alması gerekliliği nedeniyle ele alınan bölgeleme kısıtları gibi kısıtlardır. Bu gibi kısıtların oluşu, pratikte tam bir hat dengelemesini güçleştirmektedir. Akış hatlarında en az kayıp ve gecikmeyi sağlayacak uygun hat dengeleme çözümlerini bulabilmek için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir.

Kesikli seri üretim sistemlerinde bir veya birden fazla çeşitte ürün üretildiğinde, hatların yeniden düzenlenmesi gerekmez. Akış hattında birden fazla ürün üretildiğinden önemli olan bunların iş yükünün benzer olmasıdır. İşletmede üretilen ürün buzdolabı olup ürünler modeller üzerinden ele alınır. Modellerin kendi içerisinde gerçekleştirdiği değişiklik ise farklı ürünler yaratmaktadır. Örneğin aynı modelin kapı sapları ya da kapı plastiği farklı olabilir. Bu durumda, modellerin farklı ürünlerinde, ürün dönüşlerinde hazırlık süreleri oluşabilmektedir.

İşletmede, beşi ana binada, ikisi de ek binada olmak üzere toplam yedi üretim hattı bulunmaktadır. Her bir üretim hattında farklı özelliklerde buzdolabı üretimi gerçekleştirilmektedir. Çizelge 5.1.'de üretim hatlarında üretilen ürün bilgilerine yer verilmiştir.

Çizelge 5.1. Üretim hatları ve hatlarda üretilen ürünler

Üretim Hattı	Üretilen Ürünler
1	Tezgah seviyesi dolaplar (54-60 cm eninde ve en çok 140 cm yüksekliğinde)
2	No frost, çift kapılı konvansiyonel, kombi tipi dolaplar (60-70 cm eninde)
3	Çift kapılı konvansiyonel, derin çift kapılı (110 cm), en küçük çift kapılı, tek kapılı konvansiyonel, frezer dolaplar (54-60-70 cm eninde)
4	Çift kapılı konvansiyonel dolaplar (54-60-70 cm eninde)
5	Kombi dolaplar (54-60-70 cm eninde)
6	SidebySide (4 kapılı), gardırop tipi dolaplar (84 cm'den daha geniş ende), çevrim süresi uzun olan dolaplar
7	Çok fazla işçilik gerektiren karmaşık özellikteki dolaplar

Üretim için gerekli olan plastik levha ve aksesuarlar, işletmenin bulunduğu mevcut yerleşke içerisinde yer alan plastik fabrikasında yapılmaktadır. Burada bulunan büyük kapasiteli makineler ile kapı içi levhası ve buzdolabının iç kısmını oluşturacak iç gövde levhası üretilmektedir. Bu levhalar ana fabrikada yer alan termoform makineleriyle iç gövde ve kapı iç plastiği haline getirilir. Plastik fabrikasında aynı zamanda, buzdolabı için gerekli olan raflar, yumurtalıklar, buzluklar gibi plastik aksesuarlar da üretilmektedir.

İşletmede, bilgisayar bütünleşik imalat ve esnek üretim sistemleri uygulanmaktadır. Üretim bantları üzerinde işlemler yapılırken, süreçte bir hata oluşması durumunda istasyon durdurularak hata giderilmektedir. Kalite ile ilgili hedefler doğrultusunda, bant üzerinde tamamen otomatik çalışan test istasyonları bulunmaktadır. Ayrıca, ürün ve üretim hakkındaki tüm bilgiler, sistem içinde yer alan elektronik otomasyon cihazı (PLC – Programmable Logic Controller) ve bir bilgisayar aracılığı ile ortak veritabanında toplanabilmektedir. Ürün etiket bilgisi sayesinde, hat üzerindeki üretim izlenebilmekte ve süreçte oluşan aksaklıklara anında müdahale edilebilmektedir.

Buzdolapları, üretim bantlarından ve ambalaj bantlarına kadar paletler üzerinde taşınmaktadır. Ambalajlama bantlarında buzdolapları paletlerden alınır ve paketlenir. Boş paletler taşıma sistemi yardımıyla yeniden üretim bantlarına gönderilir.

İşletmede havai hat olarak kullanılan üç ayrı konveyör sistemi bulunmaktadır. Bunlardan ilki montaj bantlarından ambalaj bantlarına kadar bitmiş ürün taşıyan ve boş montaj paletlerini geriye getiren kayış sistemidir. İkincisi, otomatik depolama ve boşaltma sisteminden (AS/RS - automated storage and retrieval system) montaj bantlarına malzeme taşıyan akümülayonlu zincirli konveyör sistemi ile tek yönde akan monoporter hattıdır. Üçüncüsü ise boyalı parça stok sisteminden montaj bantlarına boyalı parça taşıyacak olan konveyör sistemidir.

Çeşitli hatlarda, gerekli malzemelerin iş görene daha kolay ulaşması için eğik düzlemlerden yararlanılır. Makaralı, tekerlekli, levhalı, zincirli, kavramalı ve raylı götürücüler, hatlardaki işlem noktalarına gerekli yarı mamulleri taşımak için kullanılırlar. Genellikle bilgisayar destekli çalışan makinelerde bu tip malzeme aktarımı mevcuttur. İşlem bitiminde parçanın bir eğik düzlem üzerine düşerek işçinin önüne gelmesi sağlanır.

Buzdolaplarının kısa mesafelerde taşınmasının gerektiği durumlarda robotlardan yararlanılmaktadır. Poliüretan sürecinden sonra, kompresörün takılması esnasında buzdolabını kaldırıp, çeviren ve yerleştiren bir robot bulunmaktadır. Ayrıca nihai ürünün ambalajlanması esnasında buzdolabına dış kartonunun geçirilmesi işlemi yine robot tarafından yapılmaktadır.

Mekanik atölyeden çıkan, işlemleri tamamlanmamış panel ve kapıların boyahaneye gönderilmesi esnasında asma raylardan yararlanılmaktadır.

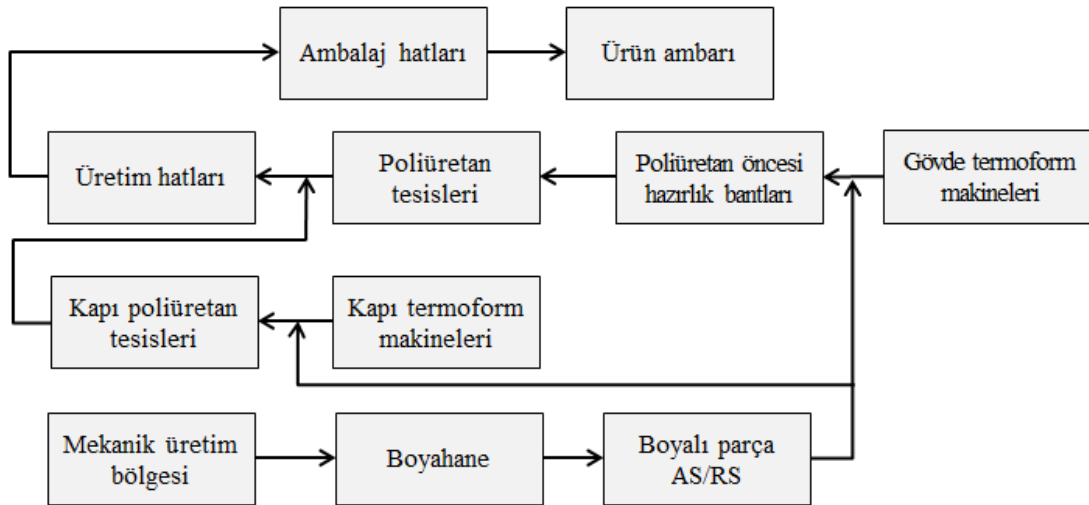
İşletmede iki farklı otomatik depolama ve boşaltma sistemi (AS/RS) bulunmaktadır. Bunlardan biri plastik fabrikasının ve yardımcı sanayinin ürünlerini, diğeri ise boyalı parçaları stoklamada kullanılır. Bu sistem yardımıyla üretim hatları malzemelerle otomatik olarak beslenebilir. Malzemeler giriş kalite güvenceden geçtikten sonra ve sisteme ilgili verileri girilerek ağı katılır. Sonrasında sisteme malzeme aktarımı yapılabilir.

Forkliftler işletme içinde çok yoğun olarak kullanılan taşıma araçlarıdır. Forkliftlerle tel raf, cam raf, kompresör, sebzelik örtüsü, plastik çekmeceler, kapı contaları, tel çekmeceler, paletleri, sac, rulo, arka ayaklar, panel takviye vb. malzemeler taşınabilmektedir. Aynı şekilde, işletmede çok faydalanılan taşıma araçlarından olan transpaletler sayesinde; eva çerçevesi, kabin dibi arka duvar, palet üzerine yerleştirilmiş alt raflar, kondanser vb. parçalar ilgili yerlere iletilebilmektedir.

5.2. İşletmedeki Üretim Süreci

Üretim aşamasında ilk adım, yardımcı sanayiden temin edilen parçaların tasarım kriterlerinin ve üretim süreçlerinin yardımcı sanayi ile birlikte çalışarak oluşturulmasıdır. Yardımcı sanayi ürettiği parçaların kalite sorumluluğunu taşır.

Şekil 5.1.'de fabrika içerisindeki süreçlerin birbiri ile olan ilişkisi ve akışı gösterilmektedir.



Şekil 5.1. Fabrika içi süreçler arası ilişkinin gösterimi

Üretim hatlarında, her hatta ait gövde termoform makinesi, poliüretan öncesi hazırlık bandı ve poliüretan tesisi vardır. Buzdolabının iç gövdesi ve kapı içleri, plastik levhalardan şekillendirilerek elde edilir. Bu bölümde, otomasyon tüm işlemlerde hakimdir. Her bir üretim hattında üretim süreci, gövde termoform makinesi ile başlar. Her ürün için ayrı gövde termoform kalıpları bulunmaktadır. Üretilen ürünün kalıbı, gövde termoform makinesine bağlanır. Plastik fabrikasından gelen plastik levhalar, belirli sıcaklık altında

kalıp şeklini alır ve buzdolabı gövdesi formuna ulaşır. Bir kısım plastik levha da, belirli sıcaklık altında kalıp şeklini alıp, kapı iç plastiği formuna ulaşır.

Buzdolabının panel ve kapı sacları, işletmenin mekanik üretim bölgesinde yer alan otomatik pres ve tezgah hatlarında şekillendirilir.

Kritik olan plastik enjeksiyon parçalar, işletme içinde yer alan plastik fabrikasında üretilmektedir. Gövdeyi oluşturan parçaların birleştirilmesi amacıyla, hazırlanan iç gövde plastikleri poliüretan öncesi montaj hattına alınır. Burada gövdeye, soğutma elemanlarının montajı yapılır ve mekanik bölümden gelen sac panellerin ve buzdolabı arka duvarının takılmasının ardından, buzdolabı gövdesi bir sonraki proses olan poliüretan tesisine iletilir. Burada içerisine poliüretan enjekte edilen dolap, ait olduğu üretim hattı üzerinden son montaj ve işlemleri yapılarak ayrılır.

Diğer taraftan, şekli verilen kapı iç plastikleri, bir sonraki proses olan kapı poliüretan tesisine gönderilir. Burada mekanik bölümden gelen kapı sacı ile kapı iç plastikleri birleştirilir ve içerisine bilgisayar kontrolünde poliüretan dökülerek üretim bandına yollanır. Poliüretan tesislerinde, bilgisayar kontrollü otomasyon sistemleri ile yapılan üretim, yüksek kalitenin sürekliliğini garanti altına almaktadır.

Sonraki adım, tüm parçaların birleştirilerek buzdolabı haline dönüştürülmesidir. Montaj işlemleri biten buzdolabına kapısı da takılarak, nihai ürün ambalaj bandına gönderilir.

Buzdolabı işletmesinde, buzdolaplarına takılan tüm parçalar, bilgisayar kontrollü malzeme dağıtım sistemi ile iş istasyonlarına otomatik olarak ulaştırılır. Montaj hatlarında kullanılan teknoloji ve kalite kontrolleri, buzdolaplarının tüm tüketicileri tatmin edecek düzeyde üretilmesini sağlar. Bu hatlarda, tasarımları doğrultusunda her türlü tüketicinin ihtiyacını karşılayabilecek çeşitli modellerde ve boyutlarda buzdolapları üretilmektedir.

İşletmedeki her işlem noktasında operatörler, yaptıkları işin kalitesinden de sorumludur. Ayrıca her hattın sonunda detaylı ve yüksek teknolojiye dayalı bir kalite ve emniyet kontrolü yapılmaktadır. Üretim hatlarında yapılan kritik kalite ve performans

testleri insan hatalarını da yok edecek şekilde robotlarla veya otomatik kontrol sistemleri ile yapılmaktadır. Her ürün yüzde yüz performans testine tabi tutulur. Performans testlerini geçen tüm ürünlerin % 5'i örnekleme ile seçilerek, daha uzun testlerde değerlendirilir.

5.3. Ele Alınan Problem ve Yaşanan Sorunlar

Daha önce de bahsedildiği gibi, buzdolabının kapı sacları, işletmenin mekanik üretim bölgesinde yer alan otomatik pres ve tezgah hatlarında şekillendirilmektedir. İşlemleri gerçekleştirilen kapı sacları, ilgili üretim hattına iletilir. Burada, kapı sacı ile kapı iç plastikleri birleştirilir ve içerisine bilgisayar kontrolünde poliüretan dökülerek üretim bandına yollanır.

Çalışma kapsamında, işletmenin kapı sacı üretilen mekanik üretim bölgelerinden biri olan Inox Atölyesi ele alınmıştır. Inox Atölyesi 2010 yılında kurulmuş olmasına rağmen, üretim hatlarını aktif olarak Haziran 2011 tarihinden sonra beslemeye başlamıştır. Atölye, Üretim Hattı 2 (ÜH2) ve Üretim Hattı 6 (ÜH6)'nın ihtiyaç duyduğu kapı saclarının üretimini gerçekleştiren bölümdür. Burada çoğunlukla diğer üretim hatlarında üretilmeyen, ebatları itibariyle daha büyük ve kalite itibariyle daha yüksek malzeme grubunda olan ürünlerin kapı sacları üretilmektedir.

Inox Atölyesi'nde ikişer adet punch pres, abkant pres, kapı hattı ve hidrolik pres bulunmaktadır. Üretilecek kapı sacının model ve markasına göre hangi makinelerde işlem göreceği değişkenlik göstermektedir. Bu nedenle her kapı sacının kendine ait rotası bulunmaktadır.

Bir kademede birden fazla makine varsa, bu makineler özdeş olup, makinelerde geçirilen işlem süreleri aynıdır. Aynı kademede yer alan makinelerde kalıp ayrımı yapılmamakta olup, ürün ilgili kademede işlem görecektir ise, bu herhangi bir makinede olabilmektedir.

Kapı sacları; modeli ve markasına göre; sap deliği kesim, display kesim, display form, buzmatik kesim, buzmatik form, su pınarı kesim, su pınarı form, logo form, did (door-in-door) kesim, did form, flanş büküm, etek büküm, köşe büküm işlemlerinin o ürün

için yapılması gereken ilgili alt kümesinden geçmektedir. Atölyede bulunan makinelerin hangi işlemleri yapabildiği, üretilcek modeller ve markalar bazında değişkenlik gösterebilmektedir.

Sap deliği kesim işlemi, kapı saplarının takılabilmesi amacıyla kapı sacı üzerinde açılan delikleri ifade eden işleme denilmektedir. Kapı üzerinde display ekranının yer aldığı buzdolaplarında, ekranın kapıya monte edilebilmesi amacıyla display kesim ve display form işlemleri yapılmaktadır. Buzmatikli buzdolabı modellerinde, buzmatik bölümünün kapıya yerleştirilmesi amacıyla, buzmatik kesim ve form verme işlemleri, su pınarlı buzdolaplarında ise su pınarı kesim ve form verme işlemleri gerçekleştirilmektedir. Buzdolabının kapağının tamamen açılmadan sıklıkla tüketilen yiyecek ve içeceklerle kolayca ulaşılabilmesi ve aynı zamanda doğru soğutma sıcaklığının da muhafaza edilebilmesi amacıyla üretilen pratik kapılı buzdolaplarına (door-in-door), did deliği kesim ve form verme işlemleri uygulanmaktadır. Bunlara ek olarak, kapı saclarının yan taraflarının bükülmesi (kıvrılması) amacıyla flanş büküm, alt ve üst kısımlarının bükülmesi için etek büküm, köşelerin bükülmesi için ise köşe büküm işlemleri yapılmaktadır.

Punch preslerde, kapı sacı üzerinde yapılacak delik delme, köşe kesimleri, display boşaltması vb. işlemler yapılmaktadır. Abkant preslerde, kapı saclarının yan taraflarının (flanş) büküm işlemi yapılmaktadır. Atölyede iki adet kapı hattı bulunmaktadır. Kapı hatlarında bulunan kalıplar aynı olmadığından söz konusu tezgahlar özdeş değildir. Kapı hatlarının üzerinde yedi istasyon bulunmaktadır. İstasyonlar farklı işlemler yapabilmektedir. Örneğin bir kapı hattındaki bir istasyon display kesme işlemini yaparken, bir sonraki istasyon kesilen display ekranına form vermektedir. Diğer kapı hattında, door-in-door (did) bulunan kapı saclarının did kesim ve kesilen bölgeye form verme işlemi yapılmaktadır. Buzdolabının modeli doğrultusunda, eğer söz konusu ürün kapı hatlarına girmeye uygunsa ve kapı sacına logo basılması gerekiyorsa bahsi geçen kapı hatlarında logo da basılmaktadır. Öte yandan kapı sacının etek büküm ve köşe büküm işlemleri de buzdolabının modeline göre iki kapı hattından birinde yapılabilir. Atölyede bulunan diğer makineler hidrolik presler olup, bunlar da punch ve abkant preslerde olduğu gibi özdeşdir. Bu tezgahlarda, buzdolabının modeline göre, display kesim, display form, buzmatik form, su pınarı form, did form işlemleri yapılmaktadır. Kapı hatlarında işlem

görmeye uygun olmayanlar, eğer sac üzerinde belirtilen işlemlerden biri yapılacak ise, abkant preslerde işlem gördükten sonra direkt bu makinelere gelmektedir.

Ele alınan problem, ürünlerin (buzdolabı) kapı saclarının yapıldıkları makinelerin çizelgelenmesidir. Bu nedenle, Inox Atölyesi için, her bir kapı sacı ayrı bir ürün gibi ele alınmıştır. Durumun anlaşılabilirliğinin sağlanması amacıyla, Şekil 5.2’de, farklı buzdolabı örneklerine yer verilmiştir. Şekilde görülen, beş buzdolabının hepsi tek bir modeldir. Buzdolaplarının her biri ise, bu model altında yer alan ayrı markalardır. Aynı model grubuna ait buzdolaplarının, en ve boy ölçüleri aynı olup, kapı sacı üzerindeki değişiklikler, iç aksesuarlardaki farklılıklar vb. özellikler ile ayırım oluşturmaktadır. Örneklenen beş markanın ortak kapı sacları olduğu gibi, farklı kapı sacları da bulunmaktadır. Örneğin; (c) markasının dört kapı sacından biri olan sol üst kapı sacında display ekranı yer alırken, sağ üst kapı sacında door-in-door bölümü yer almaktadır. Benzer şekilde, (e) markasının da sağ üst kapı sacında door-in-door bölümü bulunmaktadır.



Şekil 5.2. Marka örnekleri

Model grupları bazında her makinede geçirilen işlem süreleri farklıdır. Model dönüşleri esnasında her makinede hazırlık süreleri oluşurken, marka dönüşleri sırasında da abkant presler haricindeki makinelerde hazırlık süresi oluşabilmektedir.

Çalışmanın amacı yaklaşık 300 çeşit kapı sacının imalatının gerçekleştirildiği Inox Atölyesi’nde işlerin çizelgelenmesidir. İşletmede yaşanan çizelgeleme problemi, karmaşık

ve içerdği sıra bağımlılık özelliğinin var olan çalışmalarda daha az sayıda ele alındığı bir türdür. Bu problem için geçerli olan, işlerin her kademedede işlem görmemesi durumu da, literatürde göreceli olarak daha az sayıda ele alınmıştır.

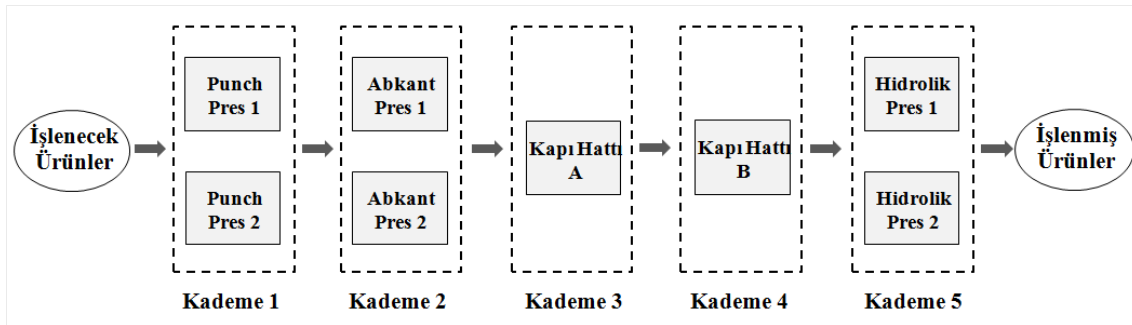
Üretim Planlama Bölümü her bir üretim hattının kapasitesini dikkate alarak üretim programını hazırlamaktadır. Sipariş iptalleri, üretim adedindeki artış talepleri vb. sebepler doğrudan üretim planını etkilemekte, bu nedenle ilgili ayın öncesinde oluşturulan üretim programı ay içerisinde revizyon geçirebilmektedir. Yayınlanan taslak üretim programına bakılarak; gün ve adet bilgileri dikkate alınıp, olası makine arızası gibi durumlara karşı, üretim hattından 1-1,5 vardiya önde gidecek şekilde üretim yapılmaktadır. Süreçte çalışan kişilerin bilgi ve tecrübelerine dayanarak, önde gidilmesi istenen süreye bağlı kalınmaktadır. Ayrıca üretim hattının çevrim süresi, Inox Atölyesi'nin çevrim süresinden küçüktür. Bu nedenle, Inox Atölyesi ile üretim hattının eş zamanlı üretiminin söz konusu olamayacağı açıkça görülmektedir. Inox Atölyesi'ndeki mevcut süreç, karar verici olan kişinin bilgi birikimine dayalı olarak işlemektedir. Yaşanan değişiklikler, oluşan sorunlar sezgisel olarak çözülmektedir. Bu durum, bilgi ve tecrübelerinden dolayı ilgili çalışan kişi ya da kişilere bağımlı kalındığını ve bu kişilerin yokluğunda yaşanacak sorunlara müdahalenin gecikmeye sebep olabileceğini göstermektedir. Kapı sacı üretiminden sonraki üretim hattı prosesine yetişebilmek, üretim hattını durdurmamak için gecikmeleri enaza indirmek, ayrıca kapı sacı üretimi esnasındaki marka ve model dönüşleri sırasında yaşanan hazırlık zamanlarını en küçükleme hedeflenmektedir.

Sonuç olarak, tanımlanan alt sistemde kapasitenin daha verimli kullanılabilmesi ve plansızlığın azaltılabilmesi amacıyla sistematik bir çizelgeleme yaklaşımı geliştirilmesi amaçtır. İzleyen kesimde, Bölüm 4.2.'de verilen algoritma doğrultusunda, problemin çözümüne yönelik yapılan işlemlere yer verilmiştir.

5.4. Problemin Geliştirilen Yaklaşım Kullanılarak Çözümü

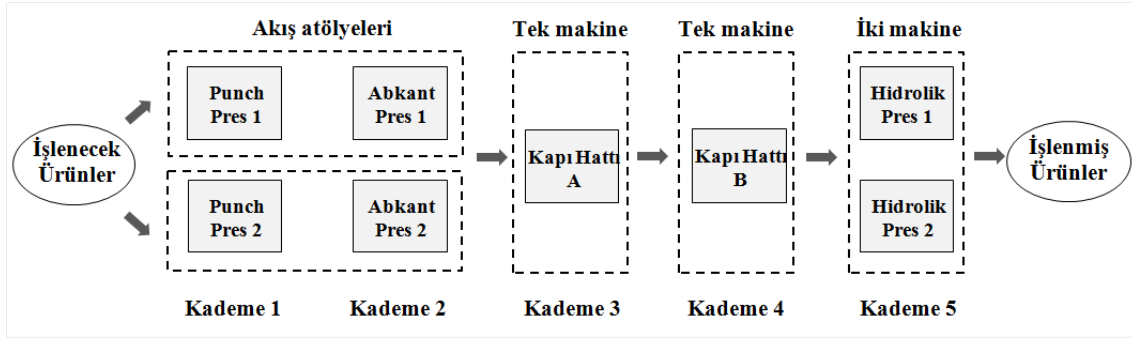
Inox Atölyesi'nde bir kapı sacının şekillendirilmesine yönelik işlemler, birden fazla kademedede yapılmaktadır. Daha önce de belirtildiği gibi, kademelerde özdeş paralel makineler yer almaktadır. Bu nedenle, işlerin çizelgelenmesinde alternatif rotalar söz konusudur.

Bölüm 4.1.'de belirtildiği gibi, algoritma; her biri birden çok kademede işlenmesi gereken n adet işin, k kademeli bir esnek akış tipi üretim ortamında, işler arasında sıra bağımlı hazırlık sürelerinin olduğu, t . kademede m_t adet özdeş paralel makinenin bulunduğu ve toplam tamamlanma zamanının enküçüklenmesinin amaçlandığı bir yapıyı tanımlamaktadır. Inox Atölyesi'nde ele alınan problem için; $k=5$, $m_1=2$, $m_2=2$, $m_3=1$, $m_4=1$, $m_5=2$ şeklindedir. Problemdeki atölyenin gösterimi Şekil 5.3.'te verildiği gibidir.



Şekil 5.3. Inox Atölyesi için kademe ve makine gösterimi

Şekil 5.3.'ten de görüldüğü üzere, Inox Atölyesi'nde birinci ve ikinci kademeler, birden fazla (iki) ve aynı sayıda makine içeren ardışık kademelerdir. Ayrıca, atölyedeki işlerin yapısı gereği, tüm işler birinci ve ikinci kademelerin ikisinde de işlem görmektedir. Bu sayede, geliştirilen algorithmada, makineleri gruplayarak akış atölyesi oluşturulabilir. Çünkü, tüm işler bu iki kademede de işlem görecektir. Atölyede işler, kendi rotaları doğrultusunda ilgili kademe üzerinden işlemlerine devam etmektedirler. İkinci kademeden çıkan işler, üçüncü, dördüncü veya beşinci kademelerin herhangi birinde ilgili markaya göre işlem görebilir; ya da ikinci kademeden çıktıktan sonra tamamlanma zamanı kayıt altına alınarak süreci terk edebilir. Daha önce de belirtildiği gibi, bu durumun sağlanması için, algorithmada her işe her kademe için bir işlem süresi tanımlanır. Bu süre, bir kademede işlem görmeyecek işler için sıfırdır. Eğer işin o kademedeki işlem süresi sıfır ise, iş o kademeye uğramaz ve dolayısıyla o kademede çizelgelenmek üzere bekleyen işler arasına girip boşuna zaman kaybetmez. Örneğin; ikinci kademeden çıkan bir işin sıradaki işi dördüncü kademede yapılacak ise; üçüncü ve beşinci kademelerde işin işlem süresi sıfır olduğundan, iş o kademelere uğramadan süreci terk eder. Bölüm 4.1.'de verilen algorithmada yer alan makine ortamlarının, uygulamada ele alınan gerçek probleme uyarlanmış gösterimi Şekil 5.4.'te verildiği gibidir.



Şekil 5.4. Problem kapsamındaki makine ortamları

Bölüm 4.2’de verilen ve algoritmanın kodlanması aşamasında oluşturulan sınıflardan olan iş sınıfı içinde; işin adı, numarası, üretim miktarı, tamamlanma zamanı gibi tanımlamalara yer verilmiştir. Makine sınıfında; makinenin adı, numarası, makinenin yeni bir iş geldiği ana kadar çalıştığı süre, makinede biten son işin numarası ve makinenin toplam çalışma süresi bilgileri tanımlanmıştır. Makineye gönderilen işin, işlem ve hazırlık süresi toplamı doğrultusunda işlenmesi ve tamamlanma zamanının güncellenmesi, makinenin işi toplam ne kadar sürede tamamlayacağını hesaplanması gibi makine sınıfı kapsamında yapılacak işlemler de burada tarif edilmiştir. İşçi sınıfında; geliştirilen algorithmada tanımlanan makine ortamları (akış atölyesi, tek makine ve çok makine) doğrultusunda, işlerin makinelere atanması ve makinelerde işletilmesi ile ilgili algoritma adımları kodlanmıştır.

Üretim Planlama Bölümü tarafından, her üretim hattının kapasitesi dikkate alınarak bir üretim programı hazırlanmaktadır. Her ayın son haftasında, bir sonraki ayın üretim programı yayınlanmaktadır. Bu üretim programında; ürün bilgileri, üretileceği üretim hattı, ürün kodu, marka kodu, stok numarası, model, teslim tarihi ve üretim adedi bilgileri yer almaktadır. Ele alınan problem, ürünlerin (buzdolabı) kapı saclarının yapıldıkları makinelerin çizelgelenmesi olduğu için, öncelikle ürünlerin hangi kapı saclarını içerdiği bilgisi programdan okunmalıdır. Daha önce belirtildiği gibi, Şekil 5.2’de de örneklenen beş ürünün, ortak kapı sacları olduğu gibi, farklı kapı sacları da bulunmaktadır. Dolayısı ile, söz konusu ürünlerin aynı kapı saclarının (örneğin, door-in-door bulunan kapı sacları), arka arkaya çizelgelenmesi durumunda, bu ürünlere ait işlemlerin gerçekleştirileceği hiç bir kademede sıra bağımlı hazırlık süresi oluşmayacaktır.

Bu durumun algoritmada sağlanması amacıyla, üretim programındaki ürün ve üretim adedi bilgileri, ürünlere karşı gelen kapı sacları ile ilişkilendirilmiştir. Bu doğrultuda, Microsoft Office Excel ortamında, hangi üründe hangi kapı sacının olduğunun belirtildiği “ürün-kapı sacı eşleşme tablosu” Ek Açıklamalar-C’de verildiği gibi oluşturulmuştur. Bir kapı sacının bir üründe kullanılıyor olması durumu, tabloda “X” olarak ifade edilmiştir. Bu sayede, hangi kapı sacının hangi buzdolaplarında ortak kullanıldığı bilgisi matristen rahatça izlenebilir hale gelmiştir. Microsoft Office Excel ortamında yapılan söz konusu işlemler, kodlama ortamına ürün sınıfı üzerinden tanımlanmıştır.

Önerilen sezgisel algoritma, tüm durumları olabildiğince kapsayan ve her sisteme olabildiğince uyabilecek genel bir yapıdan oluşmasına rağmen; bu uygulama için, kodlama ortamı, ilgilenilen atölye isteklerine ve şartlarına özel olarak tasarlanmıştır. Oluşturulan “ürün-kapı sacı eşleşme tablosu” aracılığı ile, kullanıcının, üretim adedi verilerini üretim programından doğrudan çekebilmesi sağlanmaktadır. Diğer uygulama ortamlarında (başka işletmelerde) da, üretilecek ürünün sipariş miktarı bilgisi, algoritmanın önemli bir parametresi olacaktır. Üretim programlarındaki ürün ve sipariş miktarı bilgilerini aynen kullanılabilen sistemlerde, böyle bir tabloya ihtiyaç duyulmayacaktır. Buradaki amaç, daha önce de bahsedildiği gibi, üretim programından ürün bilgisini okuyup, Inox Atölyesi’nin ihtiyacı olan kapı sacı bilgisine dönüştürmektedir. Bu sayede, üretim adetlerinin, üründe yer alan kapı sacları ile bağlantısı sağlanmıştır. Sonuç olarak, uygulamanın yapıldığı işletme açısından, oluşturulan tablo ile son derece kolaylık ve esneklik elde edilmiştir. Günlük üretilecek ürünler sınıfında; üretim programındaki ürünlerin günlük olarak okunması ve daha önce oluşturulan ürün sınıfı sayesinde toplam günlük üretilecek kapı sacları bilgisine ulaşılması için uygun kodlar yazılmıştır.

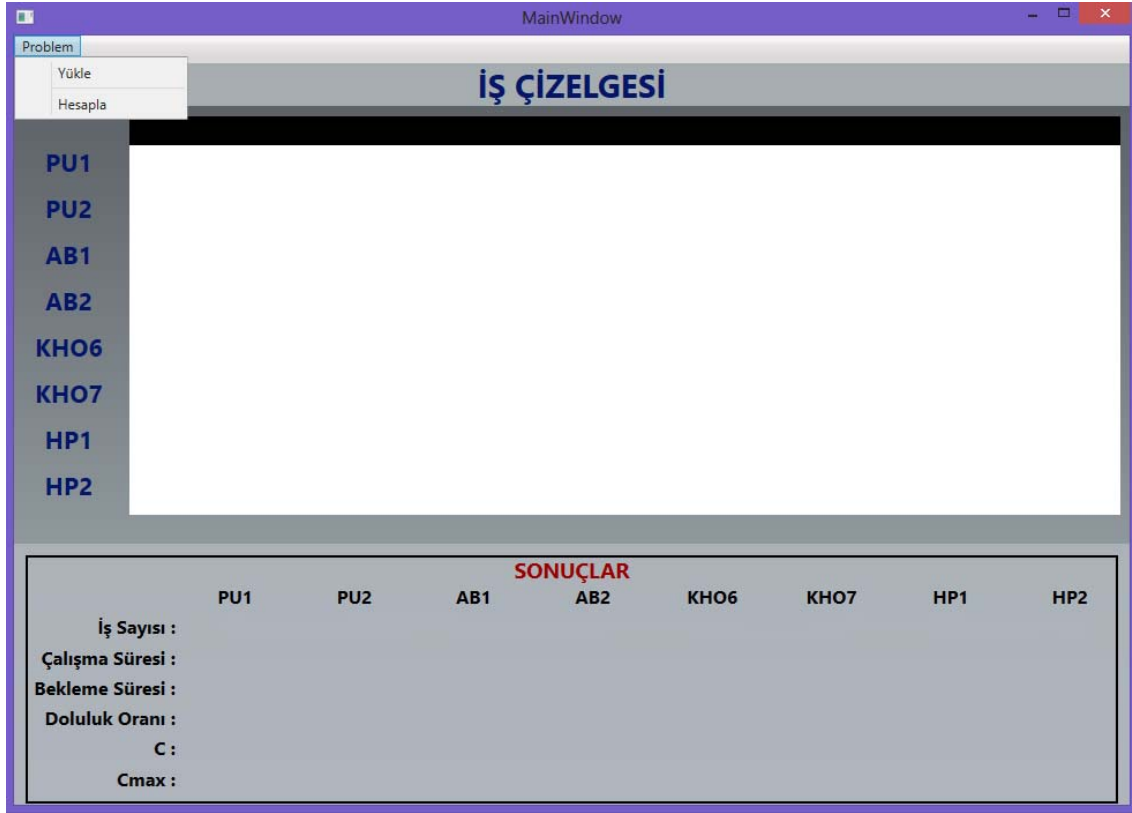
Önerilen sistem ile üretim programlarında ortaya çıkabilecek değişiklikler için, geliştirilen algoritmada talep bilgilerinin güncellenmesi yeterlidir. Bunun için, önceki programa dönük üretimin başlaması ile değişiklik tarihi arasında gerçekleşen üretim miktarı –yarı mamuller dahil- dikkate alınarak, yeni talep değerinde düzeltme yapılmalıdır. Sistem içindeki yarı mamul göz ardı edilirse, süreç sonunda nihai ürüne zaten dönüşecekleri için, hesaplama dışında kalmaları stok fazlasına sebep olur. Bu yüzden tamamlanmış (süreç sonunda tamamlanacak) üretim miktarı gibi dikkate alınmalıdırlar.

Örneğin; 16-26 Ocak tarihleri arası 800 adet A ürününün üretimi çizelgelenmiş olsun. 18 Ocak'ta, 200 adedi sistemde üretim aşamasındayken, sipariş miktarı 1300 olarak güncellensin. Bu durumda yapılacak işlem olarak; 19-26 Ocak arası 700 adet sipariş artışı için çizelgeleme programı yeniden çalıştırılır. Değişiklik talebinin geldiği gün, süreç içinde yarı mamuller olduğu için, onların üretiminin o gün tamamlanması ve olabildiğince çoğunun bitmiş ürüne dönüşmesi istenir. Yeni çizelge, izleyen günden itibaren geçerli olur.

Genel veri kaynağı sınıfında; algoritmada kullanılacak tüm verilerin okunmasını sağlayan kodlar tanımlanmıştır. İşlerin, kademe bazında işlem süreleri, sıra bağımlı hazırlık ve başlangıç hazırlık süreleri ile hangi üründe hangi kapı sacının olduğunun belirtildiği “ürün-kapı sacı eşleşme tablosu” verileri ve üretim programında yer alan üretim miktarı değerleri, Microsoft Office Excel programı üzerinden programa okutulmuştur. İşlerin işlem ve sıra bağımlı hazırlık sürelerini içeren tablolara ilişkin örnekler Ek Açıklamalar-D ve Ek Açıklamalar-E’de verilmiştir.

Yürütücü sınıfında; diğer sınıflarda tanımlanan bilgiler doğrultusunda, kurulan sistemin işletilmesine yönelik nihai kodlar tanımlanmıştır. Son olarak, raporlama sınıfında ise; arka planda yapılan işlemler doğrultusunda, makine bazında iş sayıları, makinelerin çalışma ve bekleme süreleri, doluluk oranları, makinelerdeki son işlerin tamamlanma zamanları ile sistemden çıkan son işin tamamlanma zamanı (C_{enb}) değerlerinin, çıktı ekranında gösterilmesini sağlayan matematiksel ifadeler kodlanmıştır. Bu doğrultuda, makine bazında iş sayısı değerleri, makine sınıfında kodlanmış olan tamamlanan iş bilgileri üzerinden elde edilmiştir. Makinelerin çalışma süreleri, işlerin işlem ve hazırlık süreleri toplamı değerleri kullanılarak hesaplanmıştır. Makinelerin bekleme süreleri ve doluluk oranları, makineden son çıkan işin tamamlanma zamanı değeri ile makinenin çalışma süresi değeri kullanılarak elde edilmiştir. C_{enb} değeri ise; enbüyük tamamlanma zamanına karşılık gelen işin değeri olacak şekilde formüle edilmiştir. Sınıflara örnek olması açısından, makine sınıfına ait kodlar, Ek Açıklamalar-F’de verilmiştir.

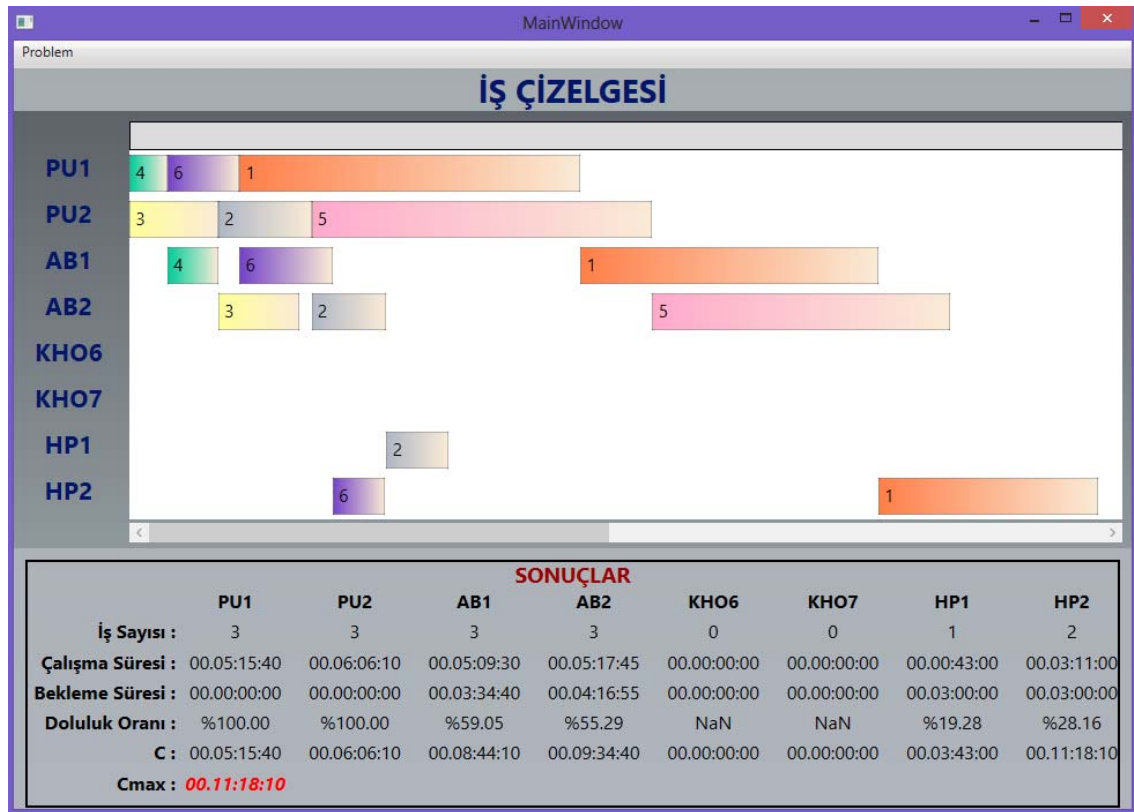
Tüm bu sınıflar üzerinden tanımlanan veriler ve yazılan kodlar doğrultusunda hesaplanan değerlerin, kullanıcı tarafından görülebilmesi amacıyla bir arayüz tasarlanmıştır. Program çalıştırıldığında görülen arayüz ekranı Şekil 5.5.’te verildiği gibidir.



Şekil 5.5. Program arayüzünün görüntüsü

Şekil 5.5.'ten görüldüğü gibi, sol üst kısımda ve düşeyde sırasıyla, kademelerde bulunan makine isimleri yer almaktadır. Makineler, Şekil 5.3.'te görülen temsili makine isimleri yerine, işletmede kullanılan şekilleriyle belirtilmiştir. Bu durumda; PU1 ve PU2 makineleri sırasıyla birinci kademedeki punch presleri, AB1 ve AB2 makineleri, ikinci kademedeki abkant presleri, KH06 makinesi üçüncü kademedeki kapı hattını, KH07 makinesi dördüncü kademedeki kapı hattını, HP1 ve HP2 makineleri ise beşinci kademedeki hidrolik presleri ifade etmektedir. Makine isimlerinin yanında yer alan geniş alan; hangi işin, hangi makinede, hangi sırada yapıldığının görülmesini sağlayacak Gantt Şeması için tasarlanmıştır. Ekranın alt kısmında bulunan, sonuçlara ilişkin bilgilerin yer aldığı bölümde; makine bazında iş sayıları, makinelerin çalışma ve bekleme süreleri, doluluk oranları, makinelerdeki son işlerin tamamlanma zamanları (C) ile sistemden çıkan son işin tamamlanma zamanı – C_{enb} (C_{max}) değerlerinin kullanıcı tarafından görülmesini sağlayan tasarımlar yapılmıştır. Çalışma süresi, bekleme süresi, C ve C_{max} değerleri, birimsel olarak, gün\saat\dakika\saniye (g:sa:dk:sn) cinsinden ifade edilmiştir.

Sol üst köşede, yürütücü sınıfında konumları tanımlanan problem verilerinin, sisteme yüklenmesini sağlayan buton yer almaktadır. “Yükle” butonuna basıldıktan sonra, probleme ilişkin tanımlanan tüm veriler sisteme yüklenmiş olur. Kullanıcı tarafından, verilerin Microsoft Office Excel dosyalarına girilmesi esnasında daha önceden herhangi bir hata yapılmışsa, ekrana, yapılan hata ile ilgili uyarı mesajı gelir. Söz konusu hataya göre verisel düzeltmeler yapıldıktan sonra, program tekrar çalıştırılıp, “Yükle” butonu ile hatasız verilerin sisteme tekrar yüklenmesi sağlanır. Veriler sisteme yüklendikten sonra, Gantt Şemasının ve sonuçlar bölümündeki değerlerin ekrana yansıtılmasını sağlayan “Hesapla” butonuna basılır. Şekil 5.6.’da, altı işten oluşan bir çizelgeleme problemi örneği için, program çalıştırıldıktan sonra, ekrana yansıyan görüntüye yer verilmiştir.



Şekil 5.6. Örnek problem üzerinden çıktı ekranının görüntüsü

Bölüm 4.1.’de verilen algoritma doğrultusunda; çizelgelenecek altı işin öncelikle, iki akış atölyesinden hangisinde çizelgeleneceği belirlenmiştir. Bu doğrultuda, iş yükü en az olan akış atölyesi seçildikten sonra, akış atölyesinde yer alan her makinede son işlenen ürün bilgileri okunmuştur. Başlangıç durumunda, her iki akış atölyesi de uygundur. Çizelgelenmemiş işler kümesinde bulunan altı işin her biri için, akış atölyesinde

harcanacak toplam süreler ve tamamlanma zamanları, algoritma adımları doğrultusunda hesaplanmıştır. İşler, tamamlanma zamanları artan yönde olacak şekilde sıralanmış ve enküçük tamamlanma zamanını veren iş ilk iş olarak atanmıştır. Örnekte verilen veriler doğrultusunda, 4 numaralı iş, birinci akış atölyesinin birinci tezgahı olan punch prese (PU1), 3 numaralı iş, ikinci akış atölyesinin birinci tezgahı olan punch prese (PU2) atanmıştır. Ataması yapılan işlere bağlı gerçekleşen sıra bağımlı hazırlık süreleri baz alınarak, kalan işler de tamamlanma zamanı en küçük olan önce atanmak koşuluyla, makinelere atanmış son işlerin arkasına eklenmiştir. Bu doğrultuda, 4 numaralı işten sonra 6 numaralı işin; 3 numaralı işten sonra 2 numaralı işin atanması, işlem ve sıra bağımlı hazırlık süreleri toplamına göre en uygun atama olarak belirlenmiştir.

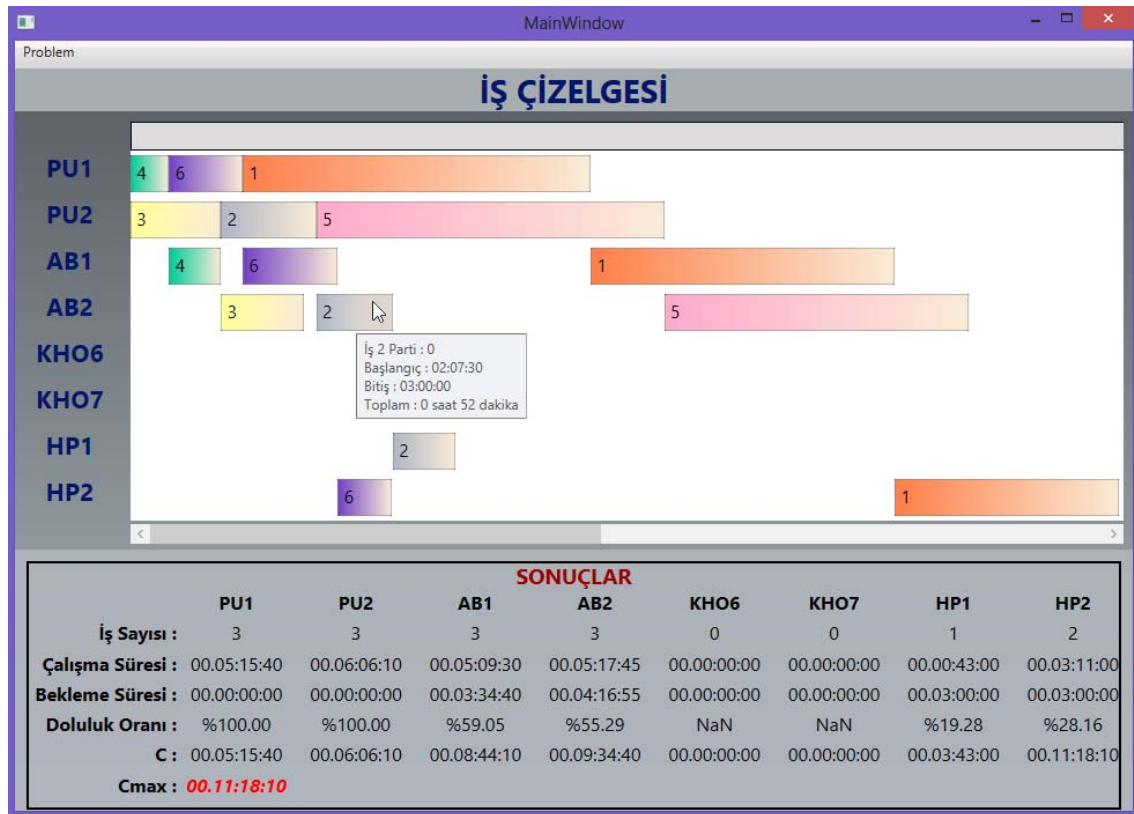
Şekil 5.6.'dan görüldüğü üzere, birinci kademedan çıkan işler, ikinci kademedede de akış atölyesi mantığından dolayı aynı sırayı izleyerek çizelgelenmiştir. Buna göre, 4 ve 3 numaralı işler, makinelerin ilk işleri olduğundan, işlerin sipariş miktarları ve işlem süreleri çarpımı ile abkant preslerdeki başlangıç hazırlık süreleri toplamı baz alınarak o kademedeki geçirecekleri süreler hesaplanmıştır. İşlerin o kademedede başlama süreleri, bir önceki kademedeki tamamlanma zamanlarına göre belirlenmiştir. Benzer şekilde, 6 numaralı iş, punch presten çıkış zamanına göre, birinci akış atölyesinde yer alan ve işlem göreceği izleyen tezgah olan abkant preste işleme başlamıştır. İşin o kademedede geçirdiği süre ise, işin sipariş miktarı ve işlem süresi çarpımı ile abkant preste 4 numaralı işten 6 numaralı işe geçişte oluşan sıra bağımlı hazırlık süresi toplamı baz alınarak hesaplanmıştır. Kademedeki diğer işler de, aynı mantıkla çizelgelenmiştir.

İşlerin kapı hatlarında (KH06, KH07) tanımlı işlemleri bulunmadığı, Şekil 5.6.'dan açıkça görülebilmektedir. Şekilde, sonuçlar bölümünde yer alan, makine bazında iş sayıları bilgisinden de, kapı hatlarına iş uğramadığı söylenebilmektedir. 1, 2 ve 6 numaralı işler, beşinci kademedede de işlem görmektedir. Bu nedenle, abkant presten çıkan işler, beşinci kademedede yer alan hidrolik preslerde, şekilde verilen sırayla çizelgelenmiştir. Sistemden ayrılan son işin 1 numaralı iş olduğu görülmektedir.

Çizelgelenmek üzere bekleyen altı iş, punch preslerde üçer adet olarak dağılım göstermiştir. Makinelerin, tüm işler sistemden çıkana kadar ne kadar süre ile çalıştığı ve boş beklediği de gün, saat, dakika, saniye bazında rahatça görülebilmektedir. Makinelerin

çalışma ve bekleme süreleri üzerinden belirlenen doluluk oranları değerleri doğrultusunda, abkant preslerin, yaklaşık %55 ve %59'luk doluluk oranlarıyla, birbirine yakın yoğunlukta çalıştıklarını söylemek mümkündür. Makine bazında, makinelerde işlenen son işlerin tamamlanma zamanları (C değerleri) da ekrana yansımaktadır. Buna göre, 00:05:15:40 zamanında, punch preste işlenen sonuncu iş, abkant preste işlenmek üzere kademedan ayrılmıştır. Sistemden çıkan son işin (1 numaralı iş) tamamlanma zamanına karşı gelen ve problemde ilgilenilen amaç fonksiyonu değeri olan C_{max} değeri ise, 00:11:18:10 olarak hesaplanmıştır.

Ek olarak, işlerin, başlangıç ve bitiş zamanları ile işlendikleri makinede geçirdikleri toplam sürelerin görülebilmesini sağlayan kodlar da yazılmıştır. Gantt Şeması üzerinde fareyi gezdirirken, herhangi bir işin üzerine gelindiğinde; söz konusu işin, ilgili makinede işe başlama ve tamamlanma zamanları ile makinede geçirdiği süre bilgisi izlenebilmektedir. Şekil 5.7.'de, AB2 makinesinde işlenmiş olan 2 numaralı işin fare ile üzerinde iken, ekrana yansıyan süre bilgileri örnek olarak görülebilmektedir.



Şekil 5.7. İş bazında süre bilgileri görüntüsü

İzleyen bölümde, geliştirilen sezgisel algoritmanın performansı; matematiksel model ve işletmede uygulanan mevcut yaklaşım sonuçları ile gerçek veri setleri kullanılarak karşılaştırılmıştır. Her bir test örneği için, sezgisel algoritma ile elde edilen C_{enb} değerlerinin, diğer iki yaklaşım ile elde edilen çözüm sonuçlarına yakınlıklarını gösteren grafiklere de yer verilmiştir.

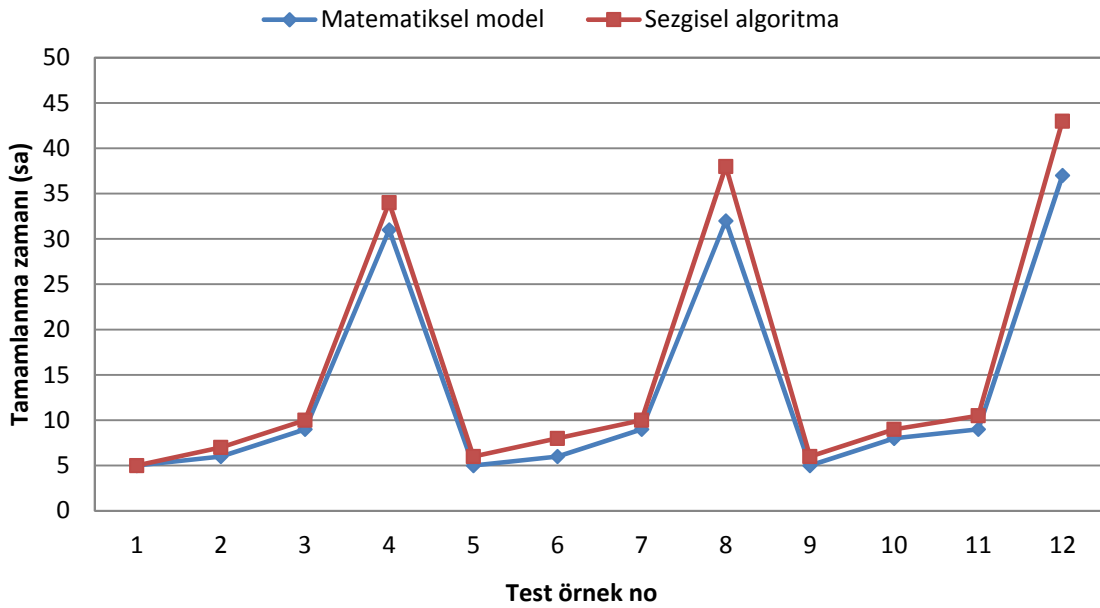
5.5. Çözüm Sonuçlarının Karşılaştırılması

Geliştirilen sezgisel algoritmanın performansı, öncelikle, matematiksel model çözüm sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Matematiksel modelin çözüm süresi, problem boyutunun büyümesi ile üstel olarak arttığından, karşılaştırma, küçük boyutlu örnekler ile gerçekleştirilebilmiştir. Gerçek veri setleri üzerinden yapılan hesaplamalarda, ortaya çıkan enbüyük tamamlanma zamanı (C_{enb}) değerleri, birimsel olarak, gün\saat\dakika\saniye (g:sa:dk:sn) cinsinden ifade edilmiştir. 5 kademe ve 8 makine için, farklı iş sayıları üzerinden oluşturulan bazı test örnekleri için, matematiksel model ve geliştirilen sezgisel algoritma ile elde edilen amaç fonksiyonu değerleri Çizelge 5.2.'de verilmiştir.

Çizelge 5.2. Matematiksel model ve sezgisel algoritma sonuçlarının karşılaştırılması

Test örnek no	İş sayısı	Enbüyük tamamlanma zamanı (C_{enb}) (g:sa:dk:sn)		Çözüm süresi (sa:dk:sn)	
		Matematiksel model	Sezgisel algoritma	Matematiksel model	Sezgisel algoritma
1	4	00:05:20:30	00:05:55:30	00:00:01	00:00:01
2		00:06:38:40	00:07:35:55	00:00:52	00:00:01
3		00:09:47:10	00:10:33:30	00:00:01	00:00:01
4		01:07:41:24	01:10:28:54	00:00:02	00:00:01
5	5	00:05:20:30	00:06:12:55	00:00:08	00:00:01
6		00:06:44:15	00:08:48:55	00:02:37	00:00:01
7		00:09:47:10	00:10:33:30	00:00:02	00:00:01
8		01:08:38:10	01:14:23:16	00:02:00	00:00:01
9	6	00:05:20:30	00:06:12:55	01:44:55	00:00:01
10		00:07:49:35	00:09:16:45	09:52:16	00:00:01
11		00:09:51:30	00:11:38:00	19:21:51	00:00:01
12		01:13:01:36	01:19:07:18	06:09:12	00:00:01

Bölüm 3.2.'de belirtildiği gibi, 5 kademe, 8 makine ve 6 iş için çözüm elde edilebilirken, 7 iş için çözüm elde edilememiştir. Bu nedenle test örnekleri, 6 iş'te sonlandırılmıştır. Çizelgeden de görülebildiği üzere, geliştirilen sezgisel algoritma, tamamlanma zamanı olarak eniyi yerine eniyiye yakın değerler verse de; çözüm sürelerine bakıldığında, matematiksel modelden çok daha kısa sürede sonuç vermekte olup, bu açıdan üstündür. Ayrıca uygulamada, bu kadar küçük iş sayıları ile genelde çalışılmamaktadır. Problemin yapısındaki karmaşıklıklardan dolayı, parametrelerdeki küçük artışlar bile, matematiksel modelde çözüm elde etmeyi oldukça zorlaştırmaktadır. Bu nedenle, sezgisel algoritma ile ulaşılan çözümü kullanmanın, iyi bir ödünleşme ve tercih sebebi olduğu düşünülmektedir. Çizelge 5.2.'de yer alan her bir test örneği için, sezgisel algoritma ile elde edilen C_{enb} değerlerinin, matematiksel model ile elde edilen en iyi çözüm sonuçlarına yakınlıklarını gösteren grafik, Şekil 5.8.'de verildiği gibidir.



Şekil 5.8. Matematiksel model ve sezgisel algoritma sonuçlarının dağılımı

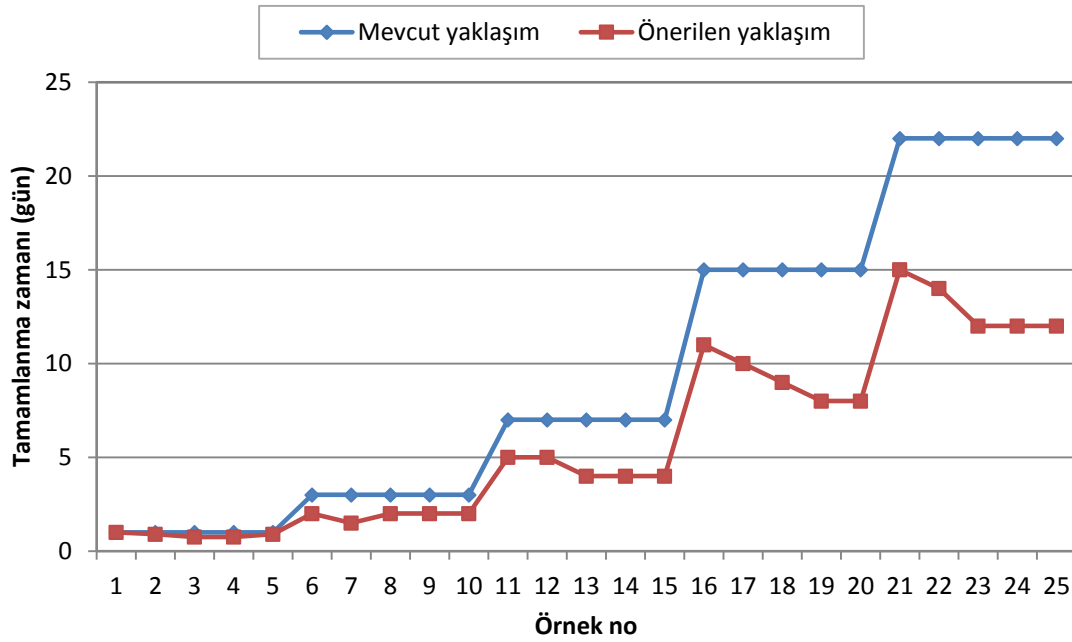
Geliştirilen sezgisel algoritmanın performansı, matematiksel model sonuçlarına ek olarak, işletmede uygulanan mevcut durum sonuçları ile de karşılaştırılmıştır. İşletmede yayınlanan aylık üretim programı verileri kullanılarak elde edilen, mevcut durum ve önerilen yaklaşım sonuçlarının karşılaştırıldığı tablo, Çizelge 5.3.'te verilmiştir.

Çizelge 5.3. Mevcut ve önerilen çözüm yaklaşımlarının karşılaştırılması

Test örnek no	İş sayısı	Enbüyük tamamlanma zamanı (C _{enb}) (g:sa:dk:sn)		İyileşme oranı (%)	Önerilen yaklaşım çözüm süresi
		Mevcut durum	Önerilen yaklaşım		
1	8	1 gün	01:00:39:20	0	00:00:02 (sa:dk:sn)
2	17		00:22:04:10	8	
3	16		00:18:15:50	24	
4	12		00:18:37:52	22	
5	8		00:22:03:30	8	
6	10	3 gün	02:05:23:36	26	
7	20		01:22:02:42	36	
8	24		02:14:53:36	13	
9	34		02:12:04:20	17	
10	28		02:03:15:50	29	
11	39	7 gün	05:19:31:08	17	
12	58		05:07:40:12	24	
13	60		04:12:55:29	35	
14	101		04:16:52:21	33	
15	68		04:08:11:52	38	
16	102	15 gün	11:09:06:57	24	
17	148		10:16:08:45	29	
18	109		09:03:02:59	39	
19	188		08:20:36:06	41	
20	147		08:16:50:47	42	
21	186	22 gün	15:14:25:42	29	
22	211		14:08:41:58	35	
23	183		12:14:05:29	43	
24	254		12:14:48:11	43	
25	210		12:16:22:20	42	
Tamamlanma zamanındaki ortalama iyileşme oranı (%)				28	

Tüm denemelerde, önerilen yaklaşımın daha iyi sonuç verdiği Çizelge 5.3.'ten görülebilmektedir. Geliştirilen sezgisel algoritma ile ortalama olarak %28 oranında iyileşme sağlandığı görülebilmektedir. Bu durum, mevcut sistem parametreleri ile şu anki uygulamadan daha etkili bir üretim çizelgelemesi yapılabileceğini göstermektedir. Algoritmanın çözüm süresi, çizelgeden de görüldüğü üzere yaklaşık 2 sn.'dir. Ayrıca, çözüm süresi performansını gözlemlemek amacıyla, beş aylık üretim programı verilerinin tamamı ile de program çalıştırılmıştır. Testin sonucunda, 720 marka ve markaların altında

yaklaşık 450 kapı sacı ile de çözüm süresinin 2-3 sn. civarı olduğu gözlenmiştir. Tabloda yer alan tamamlama zamanındaki ortalama iyileşme oranı değerini etkilememesi açısından, gerçek hayat için çok uygulanabilir olmayan bir aydan fazla veri içeren denemeler, tabloya eklenmemiştir. Beş aylık veri seti ile yapılan testlerin amacı, daha önce de belirtildiği gibi, iş sayısının daha da artmasıyla, programın vereceği tepkiyi gözlemlemektir. Her bir test örneği için, sezgisel algoritma ile elde edilen C_{enb} değerlerinin, mevcut yaklaşım ile elde edilen çözüm sonuçlarına üstünlüğünü gösteren grafik, Şekil 5.9.'da verildiği gibidir.



Şekil 5.9. Mevcut ve önerilen yaklaşım sonuçlarının dağılımı

Çizelge 5.3.'ten görülebildiği gibi, üretim programında ne kadar fazla ürün birlikte çizelgelenmek istenirse, ürünlerde kullanılan ortak kapı sacları o kadar fazla olacağından, sıra bağımlı hazırlık süresine bağlı kayıplar da bir o kadar azalmış olacaktır. İşletmenin kendi belirlediği günlük çizelgelerinde de, sıra bağımlı hazırlık sürelerinin, sezgisel olarak ele alındığı görülmektedir. Öte yandan, C_{enb} değerini enküçüklemeye dönük, işlem süreleri temelinde bir yaklaşıma işletmede rastlanmamıştır. Geliştirilen algoritma ile mevcut durum karşısında elde edilen iyileşmede, işlem sürelerinin dikkate alınmasının rolü de olmuştur.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Çalışmada, paralel makineli akış atölyesi çizelgeleme problemleri tanıtılmış, çözümü için yeni bir algoritma geliştirilmiştir. Problem, işler arasında sıra bağımlı hazırlık sürelerinin olduğu k kademeli bir esnek akış tipi üretim ortamında, toplam tamamlanma zamanının enküçüklenmesini amaçlamaktadır. Konu ile ilgili literatür incelendiğinde, bu konuda çalışma sayısının son yıllarda arttığı gözlenmiştir. Performans ölçütü olarak klasik ve en yaygın kullanılan ölçütün tamamlanma zamanı olduğu, öte yandan geciken iş sayısı ve toplam gecikme süresinin daha az sayıda çalışmada ölçüt alındığı gözlenmiştir. Çözüm yöntemleri açısından incelendiğinde, sezgisel ve metasezgisel yaklaşımların oldukça ağırlıklı olduğu sonucu ortaya çıkmaktadır. Problemin NP-zor yapısı sebebiyle, çözüm yöntemi olarak, matematiksel modellere sezgisel yöntemlere göre daha az sayıda başvurulabildiği beklenen bir sonuçtur. Özetlenen literatür taraması sonuçlarından hareketle; ilgilenilen konuda önce bir matematiksel model ve sonrasında bir sezgisel algoritma geliştirilmesi konusunda çalışmalar tasarlanmıştır.

Problemin eniyi çözümünü bulmaya yönelik olarak, bir 0-1 karma tamsayılı matematiksel model geliştirilmiştir. Geliştirilen matematiksel model, GAMS 24.2.2 yazılımı ile küçük boyutlu gerçek veri setleri için CPLEX çözücüsü kullanılarak çözdürülmüş, “2 kademe, 3 makine, 8 iş”, “4 kademe, 5 makine, 7 iş” ile “6 kademe, 7 makine, 6 iş” için eniyi çözüm (proven optimal solution) elde edilebilmiştir. Problem boyutunun artması ile matematiksel modelin çözüm süresi de artmakta ve küçük boyutlu problemler olmasına rağmen, makul süreler içerisinde en iyi çözüme ulaşılamamakta, problemin yapısındaki karmaşıklıktan dolayı, parametrelerdeki küçük artışlar bir uygun çözüm elde etmeyi bile oldukça zorlaştırmaktadır. Bu nedenle, orta ve büyük boyutlu problemler için çözüm elde edebilmek amacıyla, problemin yapısına özel bir sezgisel algoritma geliştirilmiştir.

Önerilen sezgisel algoritma, oluşabilecek talep değişikliklerine duyarlı olan dinamik bir çözüm süreci önermektedir. Algoritma, makine ortamına göre, işlerin ilgili kademede uygun makineye, toplam süresi (işlem ve sıra bağımlı hazırlık süresi toplamı) enküçük olanın önce atanması temeline dayanmaktadır. İşlerin kademelerdeki tamamlanma

zamanlarından hareketle, enbüyük tamamlanma zamanı (C_{enb}) değeri bilgisine ulaşılmaktadır. Geliştirilen yöntem, bir buzdolabı işletmesinin kapı sacı üretimi yapan bir atölyesinde uygulanmıştır. Yapılan işlemler ışığında, üretim programında yer alan ürün bilgileri, oluşturulan Excel tablosu aracılığıyla arka planda kapı sacı bilgileri ile ilişkilendirilmiştir. Bu sayede, ilgili zaman diliminde üretilecek kapı sacı miktarlarının, kullanıcı tarafından ilave işlem yapılmasına gerek olmadan üretim programı üzerinden okunabilmesi sağlanmıştır.

Önerilen yaklaşımın performansını görebilmek amacıyla, küçük boyutlu problemler için, matematiksel model sonuçları (eniye çözüm) ile geliştirilen sezgisel algoritma sonuçları karşılaştırılmıştır. Büyük ölçekli problemlerin matematiksel model ile çözülememesi sebebiyle, sezgisel algoritma, işletmede uygulanan mevcut çizelgeler ile karşılaştırılmıştır. Önerilen sezgisel yaklaşım ile çok kısa bir sürede amaca uygun sonuçlar elde edilmiş; uygulamanın yapıldığı işletmede kullanılan yöntemle göre tamamlanma zamanını azaltan sonuçlar verdiği gözlenmiştir.

Çalışmaya konu olan problemle, benzer çeşitliliğin ve atölye ortamının yer aldığı üretim işletmelerinde karşılaşılabilecektir. Geliştirilen program, kullanıcının, üretim adedi verilerini üretim programından doğrudan çekebilmesine izin verebilmektedir. Ayrıca, sürece özgü tüm parametreler (işlem süreleri, kademe bazında hazırlık süreleri, ürün-kapı sacı eşleşme bilgileri vb.) Microsoft Excel ortamında tutulduğundan, herhangi bir yeni ürün tasarlanması vb. durumunda, yeni bilgiler sisteme kolaylıkla dahil edilebilecektir. Önerilen sezgisel algoritma, genel bir yapıdan oluşmasına rağmen, arayüzün yer aldığı program, ilgilenilen atölye isteklerine ve şartlarına özel olarak tasarlanmıştır. Algoritmada değişiklik yapılmasına gerek olmadan, süreçte yer alan kademe ve makine sayısı bilgilerinin değiştirilebilmesine izin veren bir arayüz tasarlanması durumunda, benzer problemlerle karşılaşan farklı firmalar da bu sistemi kullanabilecektir. Sonuç olarak, önerilen sezgisel yaklaşım, anlaşılır ve kolay uygulanabilir olmasının yanı sıra, kullanıcının uygulamada karşılaştığı farklı durumlar karşısında etkili karar alabilmesine yardımcı olacak bilginin üretilmesine de olanak tanımaktadır.

Çalışma, uygulamaya esas olan işletme yönetimine sunulmuş, sonuçlar ve çalışmanın katkısı olumlu karşılanmış, işletmenin benzer sürece sahip, diğer illerde bulunan işletmelerinde de uygulanması işletme tarafından talep edilmiştir.

Kapsamın, gerek akademik çalışma boyutunda gerekse uygulama bulma potansiyeli açısından geniş olduğu düşünülmektedir. Bundan sonraki çalışmalarda, geliştirilen sezgisel yaklaşımın performans ölçütü olan tamamlanma zamanı faktörüne, diğer performans ölçütleri de dahil edilebilir ya da farklı performans ölçütleri ile çözümler araştırabilir. Geliştirilen sezgisel yaklaşım, metasezgisel yöntemlerle karşılaştırılabilir ya da sıralama kuralları kullanılarak simülasyon çalışmaları yapılabilir. Son olarak, probleme özgü yapılan varsayımlarda değişiklik yapılarak (özdeş olmayan paralel makineler, kademeler arası taşıma sürelerinin olması vb.) çözüm sonuçları izlenebilir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Baker, K.R., 1974, Introduction to Sequencing and Scheduling, Wiley, New York.
- Behnamian, J., Fatemi Ghomi, S.M.T., 2011, Hybrid flowshop scheduling with machine and resource-dependent processing times, *Applied Mathematical Modelling*, 35 (3), 1107–1123.
- Behnamian, J., Fatemi Ghomi, S. M. T., Zandieh, M., 2012, Hybrid flowshop scheduling with sequence -dependent setup times by hybridizing max–min ant system, simulated annealing and variable neighbourhood search, *Expert Systems*, 29 (2), 156-169.
- Behnamian, J., Zandieh, M., 2011, A Discrete Colonial Competitive Algorithm for Hybrid Flowshop Scheduling to Minimize Earliness and Quadratic Tardiness Penalties, *Expert Systems with Applications*, 38 (12), 14490–14498.
- Brah, S.A., 1996, A comparative analysis of due date based job sequencing rules in a flow shop with multiple processors, *Production Planning Control*, 7(4), 362–373.
- Brah SA, Wheeler GE., 1998, Comparison of scheduling rules in a flow shop with multiple processors: a simulation, *Simulation*, 71(5), 302–311.
- Choi, H.S., Lee, D.H., 2009, Scheduling algorithms to minimize the number of tardy jobs in two-stage hybrid flow shops, *Computers and Industrial Engineering*, 56 (1), 113–120.
- Davoudpour, H., Ashrafi M., 2009, Solving multi-objective SDST flexible flow shop using GRASP algorithm, *International Journal Advanced Manufacturing Technologies*, 44, 737–747.
- Dessouky, M.M, Dessouky M.I, Verma S.K., 1998, Flowshop scheduling with identical jobs and uniform parallel machines, *European Journal of Operational Research*, 109(3), 620–631.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Dugardin, F., Yalaoui, F., Amodeo, L., 2010, New multi-objective method to solve reentrant hybrid flow shop scheduling problem, *European Journal of Operational Research*, 203, 22-31.
- Ebrahimi, M., Fatemi Ghomi, S.M.T., Karimi, B., 2014, Hybrid flow shop scheduling with sequence dependent family setup time and uncertain due dates, *Applied Mathematical Modelling*, 38, 2490–2504.
- Eren, T., Güner, E., 2002, Tek ve paralel makinalı problemlerde çok ölçütlü çizelgeleme problemleri için bir literatür taraması, *Gazi Üniversitesi Müh. Mim. Fak. Dergisi*, 17 (4), 37-69.
- French, S., 1982, *Sequencing and Scheduling: An Introduction to the Mathematics of the Job-Shop*, Horwood, Chichester.
- Grabowski, J., Pempera, J., 2000, Sequencing of jobs in some production system, *European Journal of Operational Research*, 125 (3), 535-550.
- Gupta, JND., 1988, Two-stage, hybrid flow shop scheduling problem, *Journal of the Operational Research Society*, 39(4), 359–364.
- Haouari, M., M'Hallah, R., 1997, Heuristic algorithms for the two-stage hybrid flowshop problem, *Operations Research Letters*, 21(1), 43–53.
- Herrmann, J., 2007, *The Legacy of Taylor, Gantt, and Johnson: How to Improve Production Scheduling*, The Institute For Systems Research ISR Technical Report: 2007-2026.
- Jungwattanakit, J., Reodecha, M., Chaovalitwongse, P., Werner, F., 2009, A comparison of scheduling algorithms for flexible flow shop problems with unrelated parallel machines, setup times, and dual criteria, *Computers and Operations Research*, 36 (2), 358–378.
- Janiak, A., Kozan, E., Lichtenstein, M., Oguz, C., 2007, Metaheuristic approaches to the hybrid flow shop scheduling problem with a cost-related criterion, *International Journal of Production Economics*, 105 (2), 407-424.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Jenabi, M., Fatemi Ghomi, S.M.T., Torabi, S.A., Karimi, B., 2007, Two hybrid metaheuristics for the finite horizon elsp in flexible flow lines with unrelated parallel machines, *Applied Mathematics and Computation*, 86 (1), 230-245.
- Lee, G.C, Kim Y.D., 2004, A branch-and-bound algorithm for a two-stage hybrid flowshop scheduling problem minimizing total tardiness, *International Journal of Production Research*, 42(22), 4731–4743.
- Lee, G.C., 2009, Estimating order lead times in hybrid flowshops with different scheduling rules, *Computers and Industrial Engineering*, 56 (4), 1668-1674.
- Marichelvam, M.K., Prabakaran, T., Yang, X.S., 2014, Improved cuckoo search algorithm for hybrid flow shop scheduling problems to minimize makespan, *Applied Soft Computing*, 19, 93–101.
- Morton, T.E., Pentico, D.W., 1993, *Heuristic Scheduling Systems*, Wiley-Interscience.
- Mousavi, S.M., Zandieh, M., Yazdani, M., 2013, A Simulated Annealing/Local Search to Minimize the Makespan and Total Tardiness on a Hybrid Flowshop, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 64, 369–388.
- Naderi, B., Zandieh, M., Khaleghi Ghoshe Balagh, A., Roshanaei, V., 2009, An improved simulated annealing for hybrid flowshops with sequence-dependent setup and transportation times to minimize total completion time and total tardiness, *Expert Systems with Applications*, 36 (6), 9625–9633.
- Naderi, B., Zandieh, M., Roshanaei, V., 2009, Scheduling hybrid flowshops with sequence dependent setup times to minimize makespan and maximum tardiness, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 41 (11–12), 1186–1198.
- Nowicki, E., Smutnicki, C., 1998, The flow shop with parallel machines: a tabu search approach, *European Journal of Operational Research*, 106 (2-3), 226-253.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Özçelik, F., Saraç, T., 2009, Sıra bağımlı hazırlık süreli iki ölçütlü tek makine çizelgeleme problemi için sezgisel bir çözüm yöntemi, *Endüstri Mühendisliği Dergisi*, 22 (4), 48-57.
- Pinedo, M., 2002, *Scheduling: Theory Algorithms and Systems*, second ed., Prentice Hall, Upper Saddle, NJ.
- Pinedo, M., 2008, *Scheduling Theory Algorithms and Systems*, Springer, USA.
- Rao, T.B.K., 1970, Sequencing in the order a, b, with multiplicity of machines for a single operation, *Journal of the Operational Research Society of India*, 7, 135-144.
- Rashidi, E., Jahandar, M., Zandieh, M., 2010, An improved hybrid multi-objective parallel genetic algorithm for hybrid flow shop scheduling with unrelated parallel machines, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 49, 1129-1139.
- Riane, F., Artiba, A., Iassinovski, S., 2001, An integrated production planning and scheduling system for hybrid flowshop organizations, *International Journal of Production Economics*, 74(1-3), 33-48.
- Ribas, I., Leisten, R., Framinan, J.M., 2010, Review and classification of hybrid flow shop scheduling problems from a production system and a solutions procedure perspective, *Computers and Operations Research*, 37, 1439-1454.
- Ruiz, R., Serifoglu, F.S., Urlings, T., 2008, Modeling realistic hybrid flexible flowshop scheduling problems. *Computers and Operations Research*, 35(4), 1151-75.
- Ruiz, R., Vazquez-Rodriguez, J.A., 2010, The hybrid flow shop scheduling problem, *European Journal of Operational Research*, 205, 1-18.
- Salvador, M.S., 1973, A solution to a special class of flow shop scheduling problems, *Symposium on the theory of scheduling and its applications*. Berlin: Springer, 83-91

EK AÇIKLAMALAR

Ek Açıklamalar-A: Analizlerde yararlanılan makaleler

Ek Açıklamalar-B: Geliştirilen sezgisel yaklaşıma ait akış diyagramı

Ek Açıklamalar-C: Ürün-kapı sacı eşleşme tablosu örneği

Ek Açıklamalar-D: Makine bazında işlem süreleri tablosu örneği

Ek Açıklamalar-E: Punch pres için sıra bağımlı hazırlık süreleri tablosu örneği

Ek Açıklamalar-F: Makine sınıfına ait kodlar

Ek Açıklamalar-A

ANALİZLERDE YARARLANILAN MAKALELER

- Alaykiran, K., Engin, O., Döyen, A., 2007, Using ant colony optimization to solve hybrid flow shop scheduling problems, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 35, 541–550.
- Allaoui, H., Artiba, A., 2006, Scheduling two-stage hybrid flow shop with availability constraints, *Computers & Operations Research*, 33, 1399–1419.
- Allaoui, H., Artiba, A., 2004, Integrating simulation and optimization to schedule a hybrid flow shop with maintenance constraints, *Computers & Industrial Engineering*, 47, 431–450.
- Almeder, C., Hartl, R.F., 2013, A metaheuristic optimization approach for a real-world stochastic flexible flow shop problem with limited buffer, *International Journal of Production Economics*, 145, 88–95.
- Amin-Naseri, M.R., Beheshti-Nia, M.A., 2009, Hybrid flow shop scheduling with parallel batching, *International Journal of Production Economics*, 117, 185–196.
- Andrés, C., Albarracín, J.M., Tormo, G., Vicens, E., García-Sabater, J.P., 2005, *European Journal of Operational Research*, 167, 272–281.
- Attar, S. F., Mohammadi, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., 2013, Hybrid flexible flowshop scheduling problem with unrelated parallel machines and limited waiting times, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 68, 1583–1599.
- Attar, S. F., Mohammadi, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., Yaghoubi, S., 2014, Solving a new multi-objective hybrid flexible flow shop problem with limited waiting times and machine-sequence-dependent set-up time constraints, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 27(5), 450-469.
- Behnamian, J., Zandieh, M., 2011, A discrete colonial competitive algorithm for hybrid flowshop scheduling to minimize earliness and quadratic tardiness penalties, *Expert Systems with Applications*, 38, 14490–14498.

Ek Açıklamalar-A (devam)

- Behnamian, J., Zandieh, M., 2013, Earliness and Tardiness Minimizing on a Realistic Hybrid Flowshop Scheduling with Learning Effect by Advanced Metaheuristic, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 38, 1229–1242.
- Behnamian, J., Zandieh, M., Fatemi Ghomi, S.M.T., 2009, A multi-phase covering Pareto-optimal front method to multi-objective scheduling in a realistic hybrid flow shop using a hybrid metaheuristic, *Expert Systems with Applications*, 36, 11057–11069.
- Behnamian, J., Fatemi Ghomi, S.M.T., 2011, Hybrid flowshop scheduling with machine and resource-dependent processing times, *Applied Mathematical Modelling*, 35, 1107–1123.
- Behnamian, J., Fatemi Ghomi, S.M.T., Zandieh, M., 2012, Hybrid flowshop scheduling with sequence-dependent setup times by hybridizing max–min ant system, simulated annealing and variable neighbourhood search, *Expert Systems*, 29(2), 156-169.
- Bellanger, A., Hanafi, S., Wilbaut C., 2013, Three-stage hybrid-flowshop model for cross-docking, *Computers & Operations Research*, 40, 1109–1121.
- Bolat, A., Al-Harkan, İ., Al-Harbi, B., 2005, Flow-shop scheduling for three serial stations with the last two duplicate, *Computers & Operations Research*, 32, 647–667.
- Botta-Genoulaz, V., 1997, Considering Bills Of Material In Hybrid Flow Shop Scheduling Problems, 194-199.
- Boudhar, M., Meziani, N., 2010, Two-stage hybrid flow shop with recirculation, *International Transactions in Operational Research*, 17, 239–255.
- Bozorgirad, M.A., Logendran, R., 2013, Bi-criteria group scheduling in hybrid flowshops, *International Journal of Production Economics*, 145, 599–612.
- Bożejko, W., Pempera, J., Smutnicki, C., 2013, Parallel tabu search algorithm for the hybrid flow shop problem, *Computers & Industrial Engineering*, 65, 466–474.

Ek Açıklamalar-A (devam)

- Caricato, P., Grieco, A., Serino, D., 2007, Tsp-based scheduling in a batch-wise hybrid flow-shop, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 23, 234–241.
- Carpov, S., Carlier, J., Nace, D., Sirdey, R., 2012, Two-stage hybrid flow shop with precedence constraints and parallel machines at second stage, *Computers & Operations Research* 39, 736–745.
- Chamnanlor, C., Sethanan, K., Gen, M., Chien, C.F., 2015, Embedding ant system in genetic algorithm for reentrant hybrid flow shop scheduling problems with time window constraints, *Journal of Intelligent Manufacturing*.
- Chen, L., Bostel, N., Dejax P., Cai, J., Xi, L., 2007, A tabu search algorithm for the integrated scheduling problem of container handling systems in a maritime terminal, *European Journal of Operational Research* 181, 40–58.
- Chen, L., Chen, L., 2008, Bottleneck-based heuristics to minimize tardy jobs in a flexible flow line with unrelated parallel machines, *International Journal of Production Research*, 46(22), 6415–6430.
- Cheng, M., Sarin, S.C., Singh, S., 2015, Two-stage, single-lot, lot streaming problem for a 1 + 2 hybrid flow shop, *Journal of Global Optimization*.
- Cho H.M., Bae S.J., Kim, J., Jeong, I.J., 2011, Bi-objective scheduling for reentrant hybrid flow shop using Pareto genetic algorithm, *Computers & Industrial Engineering*, 61, 529–541.
- Choi, H.S., Lee, D.H., 2009, Scheduling algorithms to minimize the number of tardy jobs in two-stage hybrid flow shops, *Computers & Industrial Engineering*, 56, 113-120.
- Choi, B.C., Lee, K., 2013, Two-stage proportionate flexible flow shop to minimize the makespan, *Journal of Combinatorial Optimization*, 25, 123–134.
- Choi, H.S., Kim, J.S., Lee, D.H., 2011, Real-time scheduling for reentrant hybrid flow shops: A decision tree based mechanism and its application to a TFT-LCD line, *Expert Systems with Applications*, 38, 3514–3521.

Ek Açıklamalar-A (devam)

- Choi, S.W., Kim, Y.D., Lee, G.C., 2005, Minimizing total tardiness of orders with reentrant lots in a hybrid flowshop, *International Journal of Production Research*, 43(11), 2149–2167.
- Choong, F., Phon-Amnuaisuk, S., Alias, M.Y., 2011, Metaheuristic methods in hybrid flow shop scheduling problem, *Expert Systems with Applications*, 38, 10787–10793.
- Chou, F.D., 2013, Particle swarm optimization with cocktail decoding method for hybrid flow shop scheduling problems with multiprocessor tasks, *International Journal of Production Economics*, 141, 137–145.
- Chung, T.S., Liao, C.J., 2013, An immunoglobulin-based artificial immune system for solving the hybrid flow shop problem, *Applied Soft Computing*, 13, 3729–3736.
- Costa, A., Cappadonna, F.A., Fichera, S., 2014, A novel genetic algorithm for the hybrid flow shop scheduling with parallel batching and eligibility constraints, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 75, 833–847.
- Costa, A., Cappadonna, F.A., Fichera, S., 2013, A dual encoding-based meta-heuristic algorithm for solving a constrained hybrid flow shop scheduling problem, *Computers & Industrial Engineering*, 64, 937–958.
- Dai, M., Tang, D., Giret, A., Salido, M.A., Li, W.D., 2013, Energy-efficient scheduling for a flexible flow shop using an improved genetic-simulated annealing algorithm, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 29, 418–429.
- Dessouky, M.M., Dessouky, M.I., Verma, S.K., 1998, Flowshop scheduling with identical jobs and uniform parallel machines, *European Journal of Operational Research*, 109, 620–631.
- Dugardin, F., Yalaoui, F., Amodeo, L., 2010, New multi-objective method to solve reentrant hybrid flow shop scheduling problem, *European Journal of Operational Research*, 203, 22–31.
- Ebrahimi, M., Fatemi Ghomi, S.M.T., Karimi, B., 2014, Hybrid flow shop scheduling with sequence dependent family setup time and uncertain due dates, *Applied Mathematical Modelling*, 38, 2490–2504.

Ek Açıklamalar-A (devam)

- Elmi, A., Topaloglu, S., 2014, Scheduling multiple parts in hybrid flow shop robotic cells served by a single robot, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 27(12), 1144-1159.
- Elmi, A., Topaloglu, S., 2013, A scheduling problem in blocking hybrid flow shop robotic cells with multiple robots, *Computers & Operations Research*, 40, 2543–2555.
- Engin, O., Ceran, G., Yilmaz, M.K., 2011, An efficient genetic algorithm for hybrid flow shop scheduling with multiprocessor task problems, *Applied Soft Computing*, 11, 3056–3065.
- Engin, O., Döyen, A., 2004, A new approach to solve hybrid flow shop scheduling problems by artificial immune system, *Future Generation Computer Systems*, 20, 1083–1095.
- Fattahi, P., Hosseini, S.M.H., Jolai, F., Tavakkoli-Moghaddam, R., 2014, A branch and bound algorithm for hybrid flow shop scheduling problem with setup time and assembly operations, *Applied Mathematical Modelling*, 38, 119–134.
- Fattahi, P., Hosseini, S.M.H., Jolai, F., 2013, A mathematical model and extension algorithm for assembly flexible flow shop scheduling problem, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 65, 787-802.
- Figielska, E., 2009, A genetic algorithm and a simulated annealing algorithm combined with column generation technique for solving the problem of scheduling in the hybrid flowshop with additional resources, *Computers & Industrial Engineering*, 56, 142–151.
- Figielska, E., 2008, A new heuristic for scheduling the two-stage flowshop with additional resources, *Computers & Industrial Engineering*, 54, 750–763.
- Figielska, E., 2014, A heuristic for scheduling in a two-stage hybrid flowshop with renewable resources shared among the stages, *European Journal of Operational Research*, 236, 433–444.
- Fugen, S., Dayang, L., 2012, Optimization Solution to Lot Sizing and Scheduling Problem in Hybrid Flow-shop, 2012 Fifth International Symposium on Computational Intelligence and Design, 231,235.

Ek Açıklamalar-A (devam)

- Gómez-Gasquet, P., Andrés, C., Lario, F.C., 2012, An agent-based genetic algorithm for hybrid flowshops with sequence dependent setup times to minimise makespan, *Expert Systems with Applications*, 39, 8095–8107.
- Gerstl, E., Mosheiov, G., 2014, A two-stage flexible flow shop problem with unit-execution-time jobs and batching, *International Journal of Production Economics*, 158, 171–178.
- Ghaleb, M.A., Suryahatmaja, U.S., Alharkan, İ.M., 2015, Metaheuristics for Two-stage No-Wait Flexible Flow Shop Scheduling Problem, *Proceedings of the 2015 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*.
- Gicquel, C., Hege, L., Minoux, M., vanCanneyt, W., 2012, discrete time exact solution approach for a complex hybrid flow-shop scheduling problem with limited-wait constraints, *Computers & Operations Research*, 39, 629–636.
- Grabowski, J., Pempera J., 2000, Sequencing of jobs in some production system, *European Journal of Operational Research*, 125, 535-550.
- Grangeon, N., Tanguy, A., Tchernev, N., 1999, Generic Simulation Model For Hybrid Flow-Shop, *Computers & Industrial Engineering*, 37, 207-210.
- Gupta, J.N.D., Sexton, R.S., Tunc, E.A., 2000, Selecting Scheduling Heuristics Using Neural Networks, *Inform Journal on Computing*, 12(2), 150.
- Gupta, J.N.D., Hariri, A.M.A., Potts, C.N., 1997, Scheduling a two-stage hybrid flow shop with parallel machines at the first stage, *Annals of Operations Research*, 69, 171 – 191.
- Gupta, J.N.D., Krüger, K., Lauff, V., Werner, F., Sotskov Y.N., 2002, Heuristics for hybrid flow shops with controllable processing times and assignable due dates, *Computers & Operations Research*, 29, 1417-1439.
- Hadda, H., Dridi, N., Hajri-Gabouj, S., 2014, Exact resolution of the two-stage hybrid flow shop with dedicated machines, *Optimization Letters*, 8, 2329–2339.

Ek Açıklamalar-A (devam)

- Hadda, H., 2013, A note on “A heuristic method for two-stage hybrid flow shop with dedicated machines”, *Computers & Operations Research*, 40, 2283.
- Haouari, M., M'Hallah, R., 1997, Heuristic algorithms for the two-stage hybrid flow shop problem, *Operations Research Letters*, 21, 43-53.
- Haouari, M., Hidri, L., 2008, On the hybrid flow shop scheduling problem, *International Journal of Production Economics*, 113, 495–497.
- Han, Z., Shi, H., Yuan, W., Zhang, Z., 2012, Hybrid PSO/DE Solution for the Earliness/Tardiness Case of Hybrid Flow shop Scheduling Problem, *Proceedings of 2012 International Conference on Modelling, Identification and Control*, 277-282.
- He, D., Babayan, A., 2002, Scheduling manufacturing systems for delayed product differentiation in agile manufacturing, *International Journal of Production Research*, 40(11), 2461-2481.
- Hekmatfar, M., Fatemi Ghomi, S.M.T., Karimi, B., 2011, Two stage reentrant hybrid flow shop with setup times and the criterion of minimizing makespan, *Applied Soft Computing*, 11, 4530–4539.
- Hidri, L., Haouari, M., 2011, Bounding strategies for the hybrid flow shop scheduling problem, *Applied Mathematics and Computation*, 217, 8248–8263.
- Hmida, A.B., Haouari, M., Huguet, M.J., Lopez, P., 2011, Solving two-stage hybrid flow shop using climbing depth-bounded discrepancy search, *Computers & Industrial Engineering*, 60, 320-327.
- Hong, T.P., Wang, T.T., 2000, Fuzzy flexible flow shops at two machine centers for continuous fuzzy domains, *Information Sciences*, 129, 227-237.
- Hong, T.P., Wang, T.T., Wang, S.T., 2001, A palmer-based continuous fuzzy flexible flow shop scheduling algorithm, *Soft Computing*, 6, 426-433.

Ek Açıklamalar-A (devam)

- Huang, W., Li, S., 1998, A Two-Stage Hybrid Flow shop with Uniform Machines and Setup Times, *Mathematical Computer Modelling*, 27(2), 27-45.
- Huang Y.M., Shiau, D.F., 2008, Combined column generation and constructive heuristic for a proportionate flexible flow shop scheduling, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 38, 691–704.
- Jabbarizadeh, F., Zandieh, M., Talebi, D., 2009, Hybrid flexible flow shops with sequence-dependent setup times and machine availability constraints, *Computers & Industrial Engineering*, 57, 949–957.
- Jafari, A., Elyasi, A., 2015, Minimizing the number of tardy jobs in a dynamic flexible flow shop, *IEEE*.
- Janiak, A., Kozan, E., Lichtenstein, M., Oğuz, C., 2007, Metaheuristic approaches to the hybrid flow shop scheduling problem with a cost-related criterion, *International Journal of Production Economics*, 105, 407–424.
- Jin, Z.H., Ohno, K., Ito, T., Elmaghraby, S.E., 2002, Scheduling hybrid flow shop in printed circuit board assembly lines, *Production and Operations Management*, 11(2), 216.
- Jin, Z., Yang, Z., Ito, T., 2006, Metaheuristic algorithms for the multistage hybrid flow shop scheduling problem, *International Journal of Production Economics*, 100, 322–334. 40
- Jolai, F., Asefi, H., Rabiee, M., Ramezani, P., 2013, Bi-objective simulated annealing approaches for no-wait two-stage flexible flow shop scheduling problem, *Scientia Iranica Elsevier*, 20(3), 861–872.
- Jun, S., Park, J., 2015, A hybrid genetic algorithm for the hybrid flow shop scheduling problem with night-time work and simultaneous work constraints: A case study from the transformer industry, *Expert Systems with Applications*, 42, 6196–6204.

Ek Açıklamalar-A (devam)

- Jungwattanakita, J., Reodechaa, M., Chaovalitwongsea, P., Werner, F., 2009, A comparison of scheduling algorithms for flexible flow shop problems with unrelated parallel machines, setup times and dual criteria, *Computers & Operations Research*, 36, 358 – 378.
- Kahraman, C., Engin, O., Kaya, İ., Ozturk, R.E., 2010, Multiprocessor task scheduling in multistage hybrid flow-shops: A parallel greedy algorithm approach, *Applied Soft Computing*, 10, 1293–1300.
- Karimi, N., Zandieh, M., Karamooz, H.R., 2010, Bi-objective group scheduling in hybrid flexible flow shop: A multi-phase approach, *Expert Systems with Applications*, 37, 4024–4032.
- Khademi Zare, H., Fakhrzad, M.B., 2011, Solving flexible flow-shop problem with a hybrid genetic algorithm and data mining: A fuzzy approach, *Expert Systems with Applications*, 38, 7609–7615.
- Khalili, M., 2014, A multi-objective electromagnetism algorithm for a bi-objective hybrid no-wait flow shop scheduling problem *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 70, 1591–1601.
- Khalouli, S., Ghedjati, F., Hamzaoui, A., 2010, A meta-heuristic approach to solve a JIT scheduling problem in hybrid flow shop, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 23, 765–771.
- Khamseh, A., Jolai, F., Babaei, M., 2015, Integrating sequence-dependent group scheduling problem and preventive maintenance in flexible flow shops, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 77, 173–185.
- Kianfar, K., Fatemi Ghomi, S.M.T., Jadid, A.O., 2012, Study of stochastic sequence-dependent flexible flow shop via developing a dispatching rule and a hybrid GA, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 25, 494–506.
- Kim, Y.D., Joo, B.J., Shin, J.H., 2009, Heuristics for a two-stage hybrid flow shop scheduling problem with ready times and a product-mix ratio constraint, *Journal of Heuristics*, 15, 19-42.

Ek Açıklamalar-A (devam)

- Kim, J.S., Kang, S.H., Lee, S.M., 1997, Transfer Batch Scheduling for a Two-stage Flow Shop with Identical Parallel Machines At Each Stage, *Omega-International Journal Of Management Science*, 25(5), 547-555.
- Komaki, G.M., Teymourian, E., Kayvanfar, V., 2015, Minimising makespan in the two-stage assembly hybrid flow shop scheduling problem using artificial immune systems, *International Journal of Production Research*,
- Koulamas, C., Kyparisis, G.J., 1999, Asymptotically Optimal Linear Time Algorithms for Two-Stage and Three-Stage Flexible Flow Shops, *Naval Research Logistics*, 47 (2000), 259-268.
- Kurz, M.E., Askin, R.G., 2003, Comparing scheduling rules for flexible flow lines, *International Journal of Production Economics*, 85, 371–388.
- Kyparisis, G.J., Koulamas, C., 2006, A note on makespan minimization in two-stage flexible flow shops with uniform machines, *European Journal of Operational Research*, 175, 1321–1327.
- Kyparisis, G.J., Koulamas, C., 2007, A note on performance guarantees for sequencing three-stage flexible flow shops with identical machines to minimize makespan, *IIE Transactions*, 39(5), 559-563.
- Kyparisis, G.J., Koulamas, C., 2001, A note on weighted completion time minimization in a flexible flow shop, *Operations Research Letters*, 29, 5–11.
- Kyparisis, G.J., Koulamas, C., 2006, Flexible flow shop scheduling with uniform parallel machines, *European Journal of Operational Research*, 168, 985–997.
- Lahimer, A., Lopez, P., Haouari, M., 2013, Improved bounds for hybrid flow shop scheduling with multiprocessor Tasks, *Computers & Industrial Engineering*, 66, 1106–1114.
- Lee, G.C., 2014, Real-time order flow-time estimation methods for two-stage hybrid flow shops, *Omega* 42, 1–8.

Ek Açıklamalar-A (devam)

- Lee, G.C., 2009, Estimating order lead times in hybrid flow shops with different scheduling rules, *Computers & Industrial Engineering*, 56, 1668–1674.
- Lee, G.C., Kim, Y.D., 2004, A branch-and-bound algorithm for a two-stage hybrid flow shop scheduling problem minimizing total tardiness, *International Journal of Production Research*, 42(22), 4731–4743.
- Lee, G.C., Kim, Y.D., Choi, S.W., 2004, Bottleneck-focused scheduling for a hybrid flow shop, *International Journal of Production Research*, 42(1), 165–181.
- Li, S., 1997, A hybrid two-stage flow shop with part family, batch production, major and minor set-ups, *European Journal of Operational Research*, 102, 142–156.
- Li, Z., Chen, Q., Mao, N., Wang, X., Liu, J., 2013, Scheduling rules for two-stage flexible flow shop scheduling problem subject total group constraint, *International Journal of Production Economics*, 146, 667–678.
- Li, Z., Chen, Q., Mao, N., Wang, X., Liu, J., 2015, Approximation algorithms for the three-stage flexible flow shop problem with mid in group constraint, *Expert Systems with Applications*, 42, 3571–3584.
- Liao, C.J., Tjandradjaja, E., Chung T.P., 2012, An approach using particle swarm optimization and bottleneck heuristic to solve hybrid flow shop scheduling problem, *Applied Soft Computing*, 12, 1755–1764.
- Lin, H.T., Liao, C.J., 2003, A case study in a two-stage hybrid flow shop with setup time and dedicated machines, *International Journal of Production Economics*, 86, 133–143.
- Liu, J., 2008, Single-job lot streaming in $m - 1$ two-stage hybrid flow shops, *European Journal of Operational Research* 187, 1171–1183.
- Lin, S.W., Ying, K.C., Huang, C.Y., 2013, Multiprocessor task scheduling in multistage hybrid flow shops: A hybrid artificial bee colony algorithm with bi-directional planning, *Computers & Operations Research*, 40, 1186–1195.

Ek Açıklamalar-A (devam)

- Logendran, R., Carson, S., Hanson, E., 2005, Group scheduling in flexible flow shops, *International Journal of Production Economics*, 96, 143–155.
- Logendran, R., deSzoek, P., Barnard, F., 2006, Sequence-dependent group scheduling problems in flexible flow shops, *International Journal of Production Economics*, 102, 66–86.
- Low, C., Hsu C., Su C., 2009, A two-stage hybrid flow shop scheduling problem with a function constraint and unrelated alternative machines, *Computers & Operations Research*, 35, 845 – 853.
- Low, C., 2005, Simulated annealing heuristic for flow shop scheduling problems with unrelated parallel machines, *Computers & Operations Research*, 32, 2013–2025.
- Luo, H., Du, B., Huang, G.Q., Chen, H., Li, X., 2013, Hybrid flow shop scheduling considering machine electricity consumption cost, *International Journal of Production Economics*, 146, 423–439.
- Mainieri, G.B., Ronconi, D.P., 2013, New heuristics for total tardiness minimization in a flexible flow shop, *Optimization Letters*, 7, 665–684.
- Mansouri, S.A., 2006, A simulated annealing approach to a bi-criteria sequencing problem in a two-stage supply chain, *Computers & Industrial Engineering*, 50, 105–119.
- Marichelvam, M.,K., Prabakaran, T., Yang, X.S., 2014, A Discrete Firefly Algorithm for the Multi-Objective Hybrid Flow shop Scheduling Problems, *IEEE Transactions On Evolutionary Computation*, 18(2), 301-305.
- Marichelvam, M.,K., Prabakaran, T., Yang, X.S., 2014, Improved cuckoo search algorithm for hybrid flow shop scheduling problems to minimize makespan, *Applied Soft Computing*, 19, 93–101.
- Mirabi, M., Fatemi Ghomi, S.M.T., Jolai, F., 2013, A two-stage hybrid flow shop scheduling problem in machine breakdown condition, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 24, 193–199.

Ek Açıklamalar-A (devam)

- Moradinasab, N., Shafaei, R., Rabiee, M., Ramezani, P., 2012, No-wait two stage hybrid flow shop scheduling with genetic and adaptive imperialist competitive algorithms, *Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence*, 25(2), 207-225.
- Moursli, O., Pochet, Y., 2000, A branch-and-bound algorithm for the hybrid flow shop, *International Journal of Production Economics*, 64, 113-125.
- Mousavi, S. M., Zandieh, M., Yazdani M., 2013, A simulated annealing/local search to minimize the makespan and total tardiness on a hybrid flow shop, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 64, 369–388.
- Mousavi, S. M., Mousakhani, M., Zandieh, M., 2013, Bi-objective hybrid flow shop scheduling: a new local search, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 64, 933–950.
- Naderi, B., Zandieh, M., Shirazi, M.A.H.A., 2009, Modeling and scheduling a case of flexible flow shops: Total weighted tardiness minimization, *Computers & Industrial Engineering*, 57, 1258–1267.
- Naderi, B., Zandieh, M., Khaleghi Ghoshe Balagh, A., Roshanaei, V., 2009, An improved simulated annealing for hybrid flow shops with sequence-dependent setup and transportation times to minimize total completion time and total tardiness, *Expert Systems with Applications*, 36, 9625–9633.
- Néron, E., Baptiste, P., Gupta, J.N.D., 2011, Solving hybrid flow shop problem using energetic reasoning and global operations, *Omega*, 29, 501–511.
- Nishi, T., Hiranaka, Y., Inuiguchi, M., 2010, Lagrangian relaxation with cut generation for hybrid flow shop scheduling problems to minimize the total weighted tardiness, *Computers & Operations Research*, 37, 189 – 198.
- Niu, Q., Zhou, T., Fei, M., Wang. B., 2012, An efficient quantum immune algorithm to minimize mean flow time for hybrid flow shop problems, *Mathematics and Computers in Simulation*, 84, 1–25.
- Nowicki, E., Smutnicki, C., 1998, The flow shop with parallel machines: A tabu search approach, *European Journal of Operational Research*, 106, 226-253.

Ek Açıklamalar-A (devam)

- Oğuz, C., Ercan, M.F., 2003, Heuristic algorithms for multiprocessor task scheduling in a two-stage hybrid flow-shop, *European Journal of Operational Research*, 149, 390–403.
- Oğuz, C., Ercan, M.F., 1997, Scheduling multiprocessor tasks in a two-stage flow-shop Environment, *Computers Industrial Engineering*, 33(1-2), 269-272.
- Oğuz, C., Ercan, M.F., 2005, A genetic algorithm for hybrid flow-shop scheduling with multi processor tasks, *Journal of Scheduling*, 8, 323–351.
- Oğuz, C., Zinder, Y., Do, V.H., Janiak, A., Lichtenstein, M., 2004, Hybrid flow-shop scheduling problems with multiprocessor task systems, *European Journal of Operational Research*, 152, 115–131.
- Omar, M.K. Teo., S.C., Suppiah, Y., 2010, Mixed Integer Programming Formulation for Hybrid Flow Shop Scheduling Problem, 2010, *IEEE IEEM*, 385,389.
- Pan, Q.K., Wang, L., Mao, K., Zhao, J.H., Zhang, M., 2013, An Effective Artificial Bee Colony Algorithm for a Real-World Hybrid Flow shop Problem in Steelmaking Process, *IEEE Transactions On Automation Science And Engineering*, 10(2), 307-322.
- Pan, Q.K., Dong, Y., 2014, An improved migrating birds optimisation for a hybrid flow shop scheduling with total flowtime minimisation, *Information Sciences*, 277, 643–655.
- Pan, Q.K., Wang, L., Li, J.Q., Duan, J.H., 2014, A novel discrete artificial bee colony algorithm for the hybrid flow shop scheduling problem with makespan minimisation, *Omega*, 45, 42–56.
- Piramuthu, S., Raman, N., Shaw, M.J., 1998, Decision support system for scheduling a Flexible Flow System: Incorporation of feature construction, *Annals of Operations Research*, 78, 219 – 234.
- Portmann, M.C., Vignier, A., Dardilhac, D., Dezalay, D., 1998, Branch and bound crossed with GA to solve hybrid flow shops, *European Journal of Operational Research*, 107, 389-400.

Ek Açıklamalar-A (devam)

- Qiao, P., Sun, C., 2011, Research on Hybrid Flow-shop Scheduling Problem Based on Improved Immune Particle Swarm Optimization, IEEE, 4240-4243.
- Rabiee, M., Rad, R.S., Mazinani, M., Shafaei R., 2014, An intelligent hybrid meta-heuristic for solving a case of no-wait two-stage flexible flow shop scheduling problem with unrelated parallel machines, Journal of advanced manufacturing Technology, 71, 1229–1245.
- Riane, F., Artiba A., Elmaghraby, S.E., 1998, A hybrid three-stage flowshop problem: Efficient heuristics to minimize makespan, European Journal of Operational Research, 109, 321-329.
- Riane, F., Artiba A., Iassinovski, S., 2011, An integrated production planning and scheduling system for hybrid flow shop organizations, International Journal of Production Economics, 74, 33-48.
- Rossi, A., Pandolfi, A., Lanzetta, M., 2014, Dynamic set-up rules for hybrid flow shop scheduling with parallel batching machines, International Journal of Production Research, 52(13), 3842-3857.
- Ruiz, R., Sivrikaya Şerifoğlu, F., Urlings, T., 2008, Modeling realistic hybrid flexible flow shop scheduling problems, Computers & Operations Research, 35, 1151 – 1175.
- Ruiz, R., Maroto, C., 2006, A genetic algorithm for hybrid flow shops with sequence dependent setup times and machine eligibility, European Journal of Operational Research, 169, 781–800.
- Sangsawang, C., Sethanan, K., Fujimoto, T., Gen, M., 2015, Metaheuristics optimization approaches for two-stage reentrant flexible flow shop with blocking constraint, Expert Systems with Applications, 42 , 2395–2410.
- Sawik, T., 2002, An Exact Approach for Batch Scheduling in Flexible Flow Lines with Limited Intermediate Buffers, Mathematical and Computer Modelling, 36, 461-471.
- Sawik, T., 2007, Integer programming approach to reactive scheduling in make-to-order manufacturing, Mathematical and Computer Modelling, 46, 1373–1387.

Ek Açıklamalar-A (devam)

- Sawik, T., Schaller, A., Tırpak, T.M., 2002, Scheduling Of Printed Wiring Board Assembly In Surface Mount Technology Lines, *Journal Of Electronics Manufacturing*, 11(1), 1-17.
- Shiau D.F., Cheng, S.C., Yueh-Min Huang, Y.M., 2008, Proportionate flexible flow shop scheduling via a hybrid constructive genetic algorithm, *Expert Systems with Applications*, 34, 1133–1143.
- Shan, H., Chung, T.P., Hu, L., 2014, A note on “A mathematical model and extension algorithm for assembly flexible flow shop scheduling problem”, *Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 74, 819–822.
- Shengyao, W., Ling, W., Ye., X., 2013, An Estimation of Distribution Algorithm for Solving Hybrid Flow-shop Scheduling Problem with Stochastic Processing Time, 2456-2461.
- Sivrikaya Şerifoğlu, F., Ulusoy, G., 2004, Multiprocessor task scheduling in multistage hybrid flow-shops: a genetic algorithm approach, *Journal of the Operational Research Society*, 55, 504–512.
- Soewandi, H., Elmaghraby, S.E., 2003, Sequencing on two-stage hybrid flow shops with uniform machines to minimize makespan, *IIE Transactions*, 35, 467–477.
- Soltani, S.A., Karimi B., 2015, Cyclic hybrid flow shop scheduling problem with limited buffers and machine eligibility constraints, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 76, 1739–1755.
- Sun, L., Yu, S., 2015, Scheduling a real-world hybrid flow shop with variable processing times using Lagrangian relaxation, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 78, 1961–1970.
- Sung, C.S., Kim, H.A., 2008, A two-stage multiple-machine assembly scheduling problem for minimizing sum of completion times, *International Journal of Production Economics*, 113, 1038–1048.
- Suresh, V., 1997, A note on scheduling of two-stage flow shop with multiple processors, *International Journal of Production Economics*, 49, 77 -82.

Ek Açıklamalar-A (devam)

- Tang, L., Xuana, H., Liu, J., 2006, A new Lagrangian relaxation algorithm for hybrid flow shop scheduling to minimize total weighted completion time, *Computers & Operations Research*, 33, 3344–3359.
- TSENG, C.T., LIAO, C.J., 2007, A particle swarm optimization algorithm for hybrid flow-shop scheduling with multiprocessor tasks, *International Journal of Production Research*, 1–16.
- Tadayon, B., Salmasi, N., 2013, A two-criteria objective function flexible flow shop scheduling problem with machine eligibility constraint, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 64, 1001–1015.
- Tang, L., Liu, W., Liu, J., 2005, A neural network model and algorithm for the hybrid flow shop scheduling problem in a dynamic environment, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 16, 361–370.
- Tseng, C., Liao, C., Liao, T., 2008, A note on two-stage hybrid flow shop scheduling with missing operations, *Computers & Industrial Engineering*, 54, 695–704.
- Wang, H., Jacob, V., Rolland, E., 2003, Design of efficient hybrid neural networks for flexible flow shop scheduling, *Expert Systems*, 20(4), 208-231.
- Wang, K., Choi, S.H., Qin, H. 2014, An estimation of distribution algorithm for hybrid flow shop scheduling under stochastic processing times, *International Journal of Production Research*, 52(24), 7360-7376.
- Wang, K., Choi, S.H., 2014, A holonic approach to flexible flow shop scheduling under stochastic processing times, *Computers & Operations Research*, 43, 157–168.
- Wang, K., Choi, S.H., Qin, H., Huang, Y., 2013, A cluster-based scheduling model using SPT and SA for dynamic hybrid flow shop problems, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 67, 2243–2258.
- Wang, S., Liu, M., 2013, A heuristic method for two-stage hybrid flow shop with dedicated machines, *Computers & Operations Research*, 40, 438–450.

Ek Açıklamalar-A (devam)

- Wang, S., Liu, M., 2013, Two-stage hybrid flow shop scheduling with preventive maintenance using multi-objective tabu search method, *International Journal of Production Research*, 52(5), 1495-1508.
- Wang, S., Liu, M., Chu, C., 2014, A branch-and-bound algorithm for two-stage no-wait hybrid flow-shop scheduling, *International Journal of Production Research*, 53(4), 1143-1167.
- Wang, S., Liu, M., 2013, A genetic algorithm for two-stage no-wait hybrid flow shop scheduling problem, *Computers & Operations Research* 40, 1064–1075.
- Wang, S., Liu, M., 2013, A heuristic method for two-stage hybrid flow shop with dedicated machines, *Computers & Operations Research*, 40, 438–450.
- Wang, S.Y., Wang, L., Liu, M., Xu, Y., 2015, An order-based estimation of distribution algorithm for stochastic hybrid flow-shop scheduling problem, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 28(3), 307-320.
- Wang, S.Y., Wang, L., Liu, M., Xu, Y., 2013, An enhanced estimation of distribution algorithm for solving hybrid flow-shop scheduling problem with identical parallel machines, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 68, 2043–2056.
- Wang, X., Tang, L., 2009, A tabu search heuristic for the hybrid flow shop scheduling with finite intermediate buffers, *Computers & Operations Research*, 36, 907 – 918.
- Wardono, B., Fathi, Y., 2004, A tabu search algorithm for the multi-stage parallel machine problem with limited buffer capacities, *European Journal of Operational Research*, 155, 380–401.
- Weng, W., Wei, X., Fujimura, S., 2012, Dynamic routing strategies for JIT production in hybrid flow shops, *Computers & Operations Research*, 39, 3316–3324.
- Wei, Q., Shang, E., Kang, L., 2014, A FPTAS for a two-stage hybrid flow shop problem and optimal algorithms for identical jobs, *Theoretical Computer Science*, 524, 78–89.

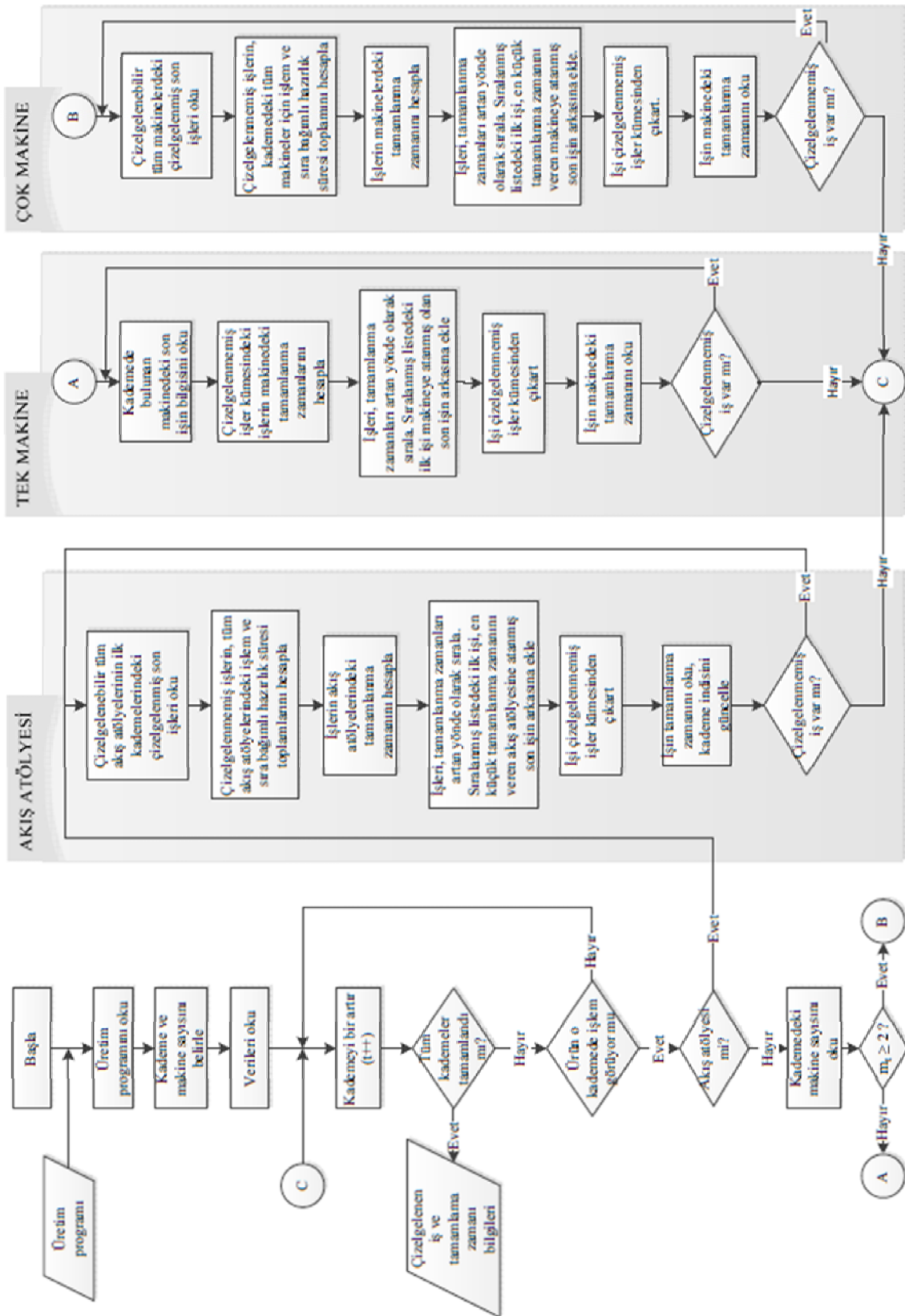
Ek Açıklamalar-A (devam)

- Xie, J., Xing, W., Liu, Z., Dong, J., 2004, Minimum Deviation Algorithm for Two-Stage No-Wait Flow shops with Parallel Machines, *Computers and Mathematics with Applications*, 47, 1857-1863.
- Xu, Y., Wang, L., Liu, M., Wang, S.Y., 2013, An effective shuffled frog-leaping algorithm for hybrid flow-shop scheduling with multiprocessor tasks, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 68, 1529–1537.
- Xu, Y., Wang, L., Liu, M., Wang, S., 2013, An effective shuffled frogleaping algorithm for solving the hybrid flow-shop scheduling problem with identical parallel machines, *Engineering Optimization*, 45(12), 1409-1430.
- Xu, Y., Wang, L., Liu, M., Wang, S.Y., 2013, An effective immune algorithm based on novel dispatching rules for the flexible flow-shop scheduling problem with multiprocessor tasks, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 67,121–135.
- Xuana, H., Tang, L., 2007, Scheduling a hybrid flow shop with batch production at the last stage, *Computers & Operations Research*, 34, 2718 – 2733.
- Voß, S., Witt, A., 2007, Hybrid flow shop scheduling as a multi-mode multi-project scheduling problem with batching requirements: A real-world application, *International Journal of Production Economics*, 105, 445–458.
- Yalaoui, Naim., Ouazene, Y., Yalaoui, F., Amodeo, L., Mahdi, H., 2013, Fuzzy metaheuristic methods to solve a hybrid flow shop scheduling problem with pre-assignment, *International Journal of Production Research*, 51(12), 3609-3624.
- Yang, J., 2011, Minimizing total completion time in two-stage hybrid flow shop with dedicated machines, *Computers & Operations Research*, 38, 1045–1053.
- Yang, J., 2013, A two-stage hybrid flow shop with dedicated machines at the first stage, *Computers & Operations Research*, 40, 2836–2843.
- Yao, F.S., Zhao, M., Zhang, H., 2012, Two-stage hybrid flow shop scheduling with dynamic job arrivals, *Computers & Operations Research*, 39, 1701–1712.

Ek Açıklamalar-A (devam)

- Yaurima, V., Burtseva, L., Tchernykh, A., 2009, Hybrid flow shop with unrelated machines, sequence-dependent setup time, availability constraints and limited buffers, *Computers & Industrial Engineering*, 56, 1452–1463.
- Ying, K.C., Lin, S.W., 2009, Scheduling multistage hybrid flow shops with multiprocessor tasks by an effective heuristic, *International Journal of Production Research*, 47(13), 3525–3538.
- Yokoyama, M., 2001, Hybrid flow-shop scheduling with assembly operations, *International Journal of Production Economics*, 73, 103-116.
- Yue-wen, F., Feng-xing, Z., Xiao-hong, X., Qing-zhu, C., Jia-hua, W., 2011, Hybrid Flow-Shop Scheduling Method Based on Multiagent Particle Swarm Optimization, *International Conference on Information and Automation*, 755-759.
- Zandieh, M., Fatemi Ghomi, S.M.T., Moattar Hussein, S.M., 2006, An immune algorithm approach to hybrid flow shops scheduling with sequence-dependent setup times, *Applied Mathematics and Computation*, 180, 111–127.
- Zhang, W., Yin, C., Liu, J., Linn, R.J., 2005, Multi-job lot streaming to minimize the mean completion time in m-1 hybrid flow shops *International Journal of Production Economics*, 96, 189-200.
- Zhou, X., Lu, Y.Z., 2010, A New Heuristic Method Combined with Lagrangian Relaxation Algorithm for Hybrid Flow Shop Problem, *IEEE IEEM*, 2426-2430.

Ek Açıklamalar-B
GELİŞTİRİLEN SEZGİSEL YAKLAŞIMA AİT AKIŞ DİYAGRAMI



Ek Açıklamalar-C

ÜRÜN-KAPI SACI EŞLEŞME TABLOSU ÖRNEĞİ

Kapı Sacı Stok No Ürün Stok No	5010	5020	5045	5068	5096	5099	5120
1000	X	X					
1100	X	X					
1200	X	X					
1300	X	X			X		
1400			X	X	X		X
1500			X				
1600			X		X		
1700			X				
1800			X		X		
1900			X				X
2000			X				
2100			X		X		X
2200			X	X			

Ek Açıklamalar-D

MAKİNE BAZINDA İŞLEM SÜRELERİ TABLOSU ÖRNEĞİ

Kapı Sacı Stok No	PU1/PU2	AB1/AB2	KH06	KH07	HP1/HP2
5010	20	66	0	0	0
5020	20	66	0	0	0
5045	20	45	0	0	0
5068	20	45	20	0	0
5096	20	45	0	20	0
5099	20	66	0	0	0
5120	20	66	0	0	0
5145	30	45	0	20	0
5169	30	45	20	0	0
5178	25	45	40	0	0
5196	30	45	40	0	0
5200	50	45	0	0	30
5210	30	45	0	20	0

**İşlem süreleri saniye cinsinden verilmiştir.*

Ek Açıklamalar-E

PUNCH PRES İÇİN SIRA BAĞIMLI HAZIRLIK SÜRELERİ TABLOSU ÖRNEĞİ

Kapı Sacı Stok No	5010	5020	5045	5068	5096	5099	5120	5145	5169	5178	5196	5200	5210
Kapı Sacı Stok No													
5010	-	15	10	7	7	5	5	10	8	8	7	7	7
5020	15	-	10	10	8	8	8	15	10	8	8	7	7
5045	10	10	-	5	5	10	10	10	10	5	5	0	0
5068	7	10	5	-	7	10	7	7	10	7	7	5	5
5096	7	8	5	7	-	7	7	10	5	10	7	10	0
5099	5	8	10	10	7	-	10	10	10	0	0	5	5
5120	5	8	10	7	7	10	-	7	7	5	5	7	5
5145	10	15	10	7	10	10	7	-	10	5	7	15	0
5169	8	10	10	10	5	10	7	10	-	15	15	10	7
5178	8	8	5	7	10	0	5	5	15	-	5	5	5
5196	7	8	5	7	7	0	5	7	15	5	-	10	0
5200	7	7	0	5	10	5	7	15	10	5	10	-	15
5210	7	7	0	5	0	5	5	0	7	5	0	15	-

*Sıra bağımlı hazırlık süreleri dakika cinsinden verilmiştir.

Ek Açıklamalar-F**MAKİNE SINIFINA AİT KODLAR**

```
using System;
using System.Collections.Generic;
using System.Linq;
using System.Text;
using System.Threading.Tasks;

namespace HFS
{
    public class Machine
    {
        List<FinishedJobDetail> finishedJobs = new List<FinishedJobDetail>();
        /// <summary>
        /// Biten son işin benzersiz numarası
        /// </summary>
        public int LastJobIndex { get; private set; }
        /// <summary>
        /// Makinenin adı
        /// </summary>
        public string Name { get; private set; }
        /// <summary>
        /// Makinenin numarası
        /// </summary>
        public int MachineIndex { get; set; }
        /// <summary>
        /// Makinenin geçen zamanı
        /// </summary>
        public int C { get; private set; }
        /// <summary>
        /// Makine
```

```

/// </summary>
/// <param name="machinename">Makine adı</param>
/// <param name="index">Makine numarası</param>
public int TotalRuntime { get; private set; }
public Machine(string machinename, int index)
{
    Name = machinename;
    MachineIndex = index;
    LastJobIndex = -1;
}
/// <summary>
/// Makine
/// </summary>
/// <param name="machinename">Makine adı</param>
/// <param name="index">Makine numarası</param>
/// <param name="lastjob">Son işin numarası</param>
public Machine(string machinename, int index, int lastjob)
{
    Name = machinename;
    MachineIndex = index;
    LastJobIndex = lastjob;
}
/// <summary>
/// Makineye gönderilen işi işletir ve C sayısını değiştirir
/// </summary>
/// <param name="operatingjob">Makineye gönderilen iş</param>
public bool Operate(Job operatingjob)
{
    bool isJobCompleted = false;
    int operationTime = CalculateOparetionTime(operatingjob);
    if (operationTime > 0)
    {
        if (C < operatingjob.C)

```

```

        {
            C = operatingjob.C;
        }
        int startC = C;
        C += CalculateOparetionTime(operatingjob);
        operatingjob.C = C;

finishedJobs.Add(new FinishedJobDetail(operatingjob.JobIndex, operatingjob.JobNo,
operatingjob.LotNo, startC, C));
        LastJobIndex = operatingjob.JobIndex;
        TotalRuntime += operationTime;
        isJobCompleted = true;
    }
    return isJobCompleted;
}

public int CalculateOparetionTime(Job operatingjob)
{
    int totalOperationTime = 0;
    int setupTime = 0;
    int jobTime = Initializer.GeneralData.P[operatingjob.JobIndex, MachineIndex] *
operatingjob.Amount ;
    if (jobTime > 0)
    {
        if (LastJobIndex == -1)
        {
            setupTime = Initializer.GeneralData.H[operatingjob.JobIndex,
MachineIndex]*60;
        }
        else
        {
            setupTime = Initializer.GeneralData.S[LastJobIndex, operatingjob.JobIndex,
MachineIndex]*60;
        }
    }
}

```

```

    }

    totalOperationTime = setuptime + jobtime;
    return totalOperationTime;
}

/// <summary>
/// Biten iş listesi
/// </summary>
/// <returns></returns>
public FinishedJobDetail[] GetFinishedJobDetails()
{
    return finishedJobs.ToArray();
}

public override string ToString()
{
    return Name;
}
}

public class FinishedJobDetail
{
    /// <summary>
    /// Biten işin adı
    /// </summary>
    public string Name { get; private set; }

    /// <summary>
    /// Biten işin başlama zamanı
    /// </summary>
    public int StartC { get; private set; }

    /// <summary>
    /// Biten işin bitiş zamanı
    /// </summary>
    public int FinishC { get; private set; }

    /// <summary>

```

```

    /// Tamamlanan isin benzersiz numarası
    /// </summary>
    public int JobIndex { get;private set; }
    public int LotNo { get;private set; }
    public bool IsSelected { get; set; }
    public FinishedJobDetail(int index, string jobname,int _lotno, int jobstart, int
jobfinish)
    {
        JobIndex = index;
        Name = jobname;
        StartC = jobstart;
        FinishC = jobfinish;
        LotNo = _lotno;
    }
    public override string ToString()
    {
        return Name;
    }
}
}

```