

TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÇOK MODELLİ ÜRETİM YAPAN MONTAJ HATLARINDA
EŞ ZAMANLI MONTAJ HATTI DENGELEME VE İSTASYONLAR ARASI
ARA STOK ALANI ATAMA PROBLEMİ İÇİN BİR ÇÖZÜM YAKLAŞIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Elif Gizem Göçer

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Salih TEKİN

ARALIK 2018

Fen Bilimleri Enstitüsü Onayı

.....
Prof. Dr. Osman EROĞUL
Müdür

Bu tezin Yüksek Lisans derecesinin tüm gereksinimlerini sağladığını onaylıyorum.

.....
Prof. Dr. Tahir HANALIOĞLU
Anabilimdalı Başkanı

TOBB ETÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 151311025 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Elif Gizem GÖÇER** 'in ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "**ÇOK MODELLİ ÜRETİM YAPAN MONTAJ HATLARINDA EŞ ZAMANLI MONTAJ HATTI DENGELEME VE İSTASYONLAR ARASI ARA STOK ALANI ATAMA PROBLEMİ İÇİN BİR ÇÖZÜM YAKLAŞIMI**" başlıklı tezi **14.12.2018** tarihinde aşağıda imzaları olan jüri tarafından kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı : **Dr. Öğr. Üyesi Salih TEKİN**
TOBB Ekonomive Teknoloji Üniversitesi

Eş Danışman : **Doç. Dr. Kadir ERTOĞRAL**
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Hadi GÖKÇEN (Başkan)**
Gazi Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Kürşad DERİNKUYU
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, alıntı yapılan kaynaklara eksiksiz atıf yapıldığını, referansların tam olarak belirtildiğini ve ayrıca bu tezin TOBB ETÜ Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlandığını bildiririm.

Elif Gizem GÖÇER

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ÇOK MODELLİ ÜRETİM YAPAN MONTAJ HATLARINDA EŞ ZAMANLI MONTAJ HATTI Dengeleme ve İstasyonlar Arası Ara Stok Alanı Atama Problemi İçin Çözüm Yaklaşımı

Elif Gizem Göçer

TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Salih Tekin

Eş Danışman: Doç. Dr. Kadir Ertoğral

Tarih: Aralık 2018

Montaj hatları birçok üretim sisteminin önemli bir parçası olarak yer almaktadır. Montaj hatlarının tasarımıyla ilgili en temel problemlerden birisi montaj hattı dengeleme problemidir. Bu problem verilen bir üretim hedefi için montaj hattındaki istasyon (işçi) sayısının belirlenmesi ve montaj operasyonlarının öncelik ilişkilerini göz önüne alınarak istasyonlara atanmasıdır. Probleme en yaygın amaç istasyon sayısının azaltılmasıdır. Bu problemin farklı versiyonları literatürde çalışılmıştır. Tez çalışmamızda bir bulaşık makinesi üretim tesisindeki montaj hatları için montaj dengeleme problemi ele alınacaktır. Ele alacağımız problemde operasyonların süreleri stokastik kabul edilecektir ki çoğu montaj hattında bu durum geçerlidir. Probleminizi klasik montaj hattı problemlerinden ayıran temel fark istasyonlar arası ara stok alanlarının sınırlı sayıda olması ve bu ara stok alanlarının istasyon aralarına nasıl atandığının üretim hızını etkileyen bir faktör olmasıdır. Çünkü ara stok atamaları her bir istasyona atanan stokastik süreli operasyonlar nedeniyle, bir istasyonun bir öncekini bloklama ihtimalini etkilemektedir. Dolayısıyla

operasyonların istasyonlara atanması ve limitli ara stok alanlarının atanması problemlerinin beraber ele alınması en iyi çözümün bulunması açısından önemlidir. Tezdeki çalışmanın içeriği verilen bir hedef üretim hızını en az istasyon sayısıyla sağlayacak, operasyon-istasyon ataması ve istasyonlar arası ara stok alanı atamasının beraberce yapılmasını sağlayan bir yaklaşımın geliştirilmesidir. Bu doğrultuda eş zamanlı montaj hattı dengeleme ve ara stok alanı atama sezgiseli geliştirilmiştir. Önerilen sezgisel montaj hattı operasyon atamasını yapan bir optimizasyon modeli, ara stok alanı atamasını yapan bir arama sezgiseli ve performans değerlendirmesi için kullanılan bir simülasyon modelinden oluşmaktadır. Yaklaşımımızın getirisi hem bir gerçek hayat problemi hem de literatürdeki bir probleme dayalı stokastik olarak üretilmiş bir set problem üzerinde gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Montaj hattı dengeleme, Ara stok alanı atama, Stokastik operasyon süresi, Geleneksel hat, Asenkron hat.

ABSTRACT

Master of Science

SIMULTANEOUSLY LINE BALANCING AND BUFFER ALLOCATION FOR MULTI MODEL ASSEMBLY LINE

Elif Gizem Göçer

TOBB University of Economics and Technology
Institute of Natural and Applied Sciences
Industrial Engineering Science Programme

Supervisor: Asst. Prof. Salih Tekin

Co-Supervisor: Assoc. Prof. Kadir Ertoğral

Date: December 2018

Assembly lines are important part of many production systems. One of the most basic problems about the design of the assembly lines is the assembly line balancing problem. The assembly line balancing problem is to determine the number of work stations (workers) for a given throughput rate, and to assign the tasks to the stations taking into account the precedence relations of tasks. The most common goal in this problem is to reduce the number of work stations. Different versions of the problem have been studied in the literature. In our thesis, we consider the assembly line balancing problem for a real-life assembly line of a dishwasher manufacturing plant. In our problem, task times are considered as random values, which is the case in most of the assembly lines. Our problem distinguishes from the classical assembly line problems by recognizing that the number of inter-station buffers is limited, and how these buffers are assigned is an important factor affecting the throughput rate. Because the buffer assignment affects the blockage probability of stations due to the random task times. Thus, assembly line balancing and the buffer allocation problem should be considered simultaneously in order to find the best solution under random

task times. This thesis suggests a heuristic approach that assigns tasks to stations and allocates buffers between stations simultaneously for a given target throughput rate. The suggested heuristic involves an optimisation model for assigning tasks to the stations, a search heuristic for allocating buffers, and a simulation model to evaluate the performance of candidate solutions. We showed the benefits of the suggested approach using both a real life case and a set of random problems based on a problem from the literature.

Keywords: Assembly line balancing, Buffer allocation, Stochastic task times, Serial lines, Asynchronous lines



TEŞEKKÜR

Çalıőmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren hocalarım Dr. Öğr. Üyesi Salih TEKİN'e ve Doç. Dr. Kadir ERTOĞRAL'a, kıymetli tecrübelerinden faydalandığım TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerine, kıymetli zamanlarını ayırıp tezimi okuyan ve tavsiyelerde bulunan tez jürimin saygıdeğer üyelerine, destekleriyle her zaman yanımda olan yöneticilerime, iő ve bölüm arkadaşlarıma ve bugüne kadar en büyük desteği gördüğüm, bugünümü borçlu olduğum aileme çok teşekkür ederim. Burs sağladığı için TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi'ne ayrıca teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİL LİSTESİ	x
ÇİZELGE LİSTESİ	xi
KISALTMALAR	xii
1. GİRİŞ	1
2. ELE ALINAN PROBLEMLER VE KAVRAMLAR	5
2.1 Montaj Hattı Dengeleme Problemi	5
2.1.1 Montaj hattı ve temel kavramlar	5
2.1.2 Montaj Hattı Dengeleme Problemlerinin Sınıflandırılması	7
2.2 Ara Stok Alanı Atama Problemi	10
2.2.1 Ara stok alanı ve temel kavramalar	10
2.2.2 Ara stok alanı atama problemlerinin sınıflandırılması	11
2.3 Üretim Hızı Hesaplama	11
2.4 Varsayımlar	11
3. LİTERATÜR TARAMASI	13
3.1 Montaj Hattı Dengeleme Problemleri.....	13
3.2 Ara Stok Alanı Atama Problemleri.....	16
3.3 Eş Zamanlı Hat Dengeleme ve ASA Atama Problemleri.....	17
3.4 Üretim Hızı Hesaplama ve Performans Analizi	18
4. ÇÖZÜM YÖNTEMİ	21
4.1 Montaj Hattı Dengeleme Problemi için Matematiksel Model.....	21
4.2 Ara Stok Alanı Atama Problemi için Sezgisel Model	23
4.2.1 Ara Stok Alanı Atama Sezgisel Model Kavramları	23
4.2.2 Ara Stok Alanı Atama Sezgisel Adımları	24
4.3 Eş Zamanlı Hat Dengeleme ve ASA Atama Problemi için Sezgisel Model	29
4.3.1 Eş zamanlı hat dengeleme ve ASA atama sezgisel model kavramları.....	29
4.3.2 Eş zamanlı hat dengeleme ve ASA atama sezgisel adımları.....	30
4.4 Montaj Hattı Simülatörü	33
5. NUMERİK ANALİZLER	35
5.1 Gerçek Hayat Problemi için Sezgisel Sonuçları	35
5.2 Gunther Veri Seti için Sezgisel Sonuçları	38
5.2.1 Ara stok alanı sayısı=33 için çözüm sonuçları	38
5.2.2 Ara stok alanı sayısı=25 için çözüm sonuçları	39
5.2.3 Ara Stok Alanı Sayısı=20 için Çözüm Sonuçları	42
5.2.4 Sonuçların Karşılaştırılması	43
6. DEĞERLENDİRME ve ÖNERİLER	47
KAYNAKLAR	49
EKLER	51
ÖZGEÇMİŞ	60

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: Üretim sistemlerinin sınıflandırılması.	1
Şekil 2.1: Örnek montaj hattı tasarımı.	6
Şekil 2.2: Montaj hattı dengeleme problemi sınıflandırması.	7
Şekil 2.3: Ürün çeşitliliği sınıflandırması.	8
Şekil 2.4: Hat yerleşim tipi sınıflandırması.	8
Şekil 2.5: Transfer tipi sınıflandırması (Curry ve Feldman, 2011).	9
Şekil 2.6: Ara stoklu montaj hattı.	10
Şekil 2.7: İstasyon bloklanma durumu örneği.	11
Şekil 4.1: Değiş-tokuş yaklaşımı ile BP' oluşturma örneği.	25
Şekil 4.2: Ara stok alanı atama algoritması iş akış şeması.	28
Şekil 4.3: Eş zamanlı hat dengeleme ve ASA atama algoritması iş akış şeması.	33

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1: Montaj hattı dengeleme problemi için temel kavramlar.....	6
Çizelge 3.1: Deterministik operasyon süreli MHDP literatür çalışmaları.	14
Çizelge 3.2: Stokastik süreli MHDP için literatür çalışmaları.....	15
Çizelge 4.1: Ara stok alanı atama algoritmasını sözde kodu.	27
Çizelge 4.2: Eş zamanlı hat dengeleme ve ASA atama sezgiselinin sözde kodu.	32
Çizelge 5.1: Gerçek hayat problemi sezgisel sonucu dengeleme ve ASA ataması. ..	36
Çizelge 5.2: Gerçek hayat problemi mevcut hat dengeleme ve ASA atama sonucu.	37
Çizelge 5.3: Sezgisel sonucu ile mevcut durumun karşılaştırma tablosu.	37
Çizelge 5.4: Ara stok alanı sayısı=33, cv=0,5 için sezgisel sonuçları.	38
Çizelge 5.5: Ara stok alanı sayısı=33, CV=0,2 için sezgisel sonuçları.	38
Çizelge 5.6: Ara stok alanı sayısı=33 için CV karşılaştırma tablosu.	40
Çizelge 5.7: Ara stok alanı sayısı=25, cv=0,5 için sezgisel sonuçları.	41
Çizelge 5.8: Ara stok alanı sayısı=25, CV=0,2 için sezgisel sonuçları.	41
Çizelge 5.9: Ara stok alanı sayısı=25 için CV karşılaştırma tablosu.	41
Çizelge 5.10: Ara stok alanı sayısı=20, cv=0,5 için sezgisel sonuçları.	42
Çizelge 5.11: Ara stok alanı sayısı=20, CV=0,2 için sezgisel sonuçları.	42
Çizelge 5.12: Ara stok alanı sayısı=20 için CV karşılaştırma tablosu.	42
Çizelge 5.13: Sezgisel sonucu ve eşit ASA atama sonucu karşılaştırması.	44

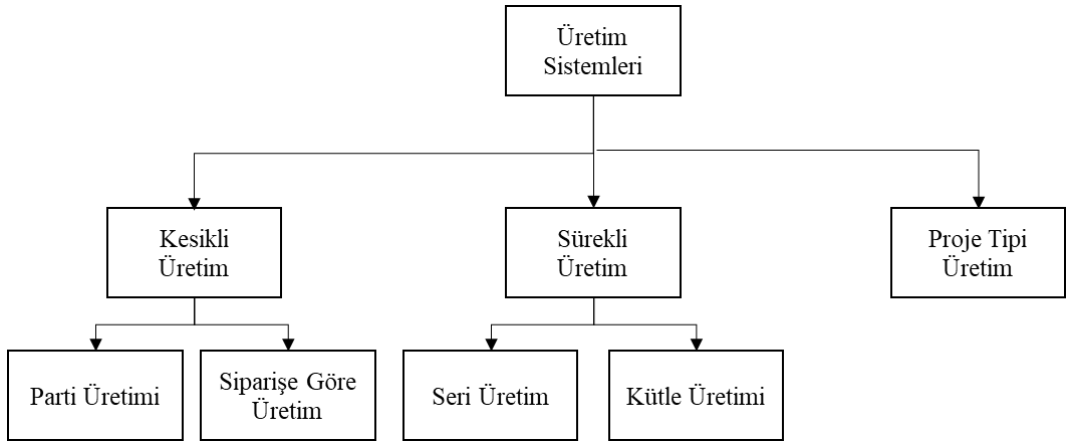
KISALTMALAR

MHD	: Montaj Hattı Dengeleme
MHDP	: Montaj Hattı Dengeleme Problemi
ASA	: Ara Stok Alanı



1. GİRİŞ

Sanayinin büyük gelişim gösterdiği 18. ve 19. yüzyıllarda, üretim ekipmanlarının yaygın olarak kullanılmasıyla yüksek hassasiyette ürünlerin büyük miktarlarda üretilmesi sağlanmıştır. El sanatları döneminden atölye üretimine, ardından da fabrikasyon üretime geçilmiştir. Üretim sistemleri üç ana gruba ayrılmaktadır (Gökşen,2003). Şekil 1.1 üretim sistemlerinin sınıflandırılmasını göstermektedir. Üretim sistemlerinden ilki olan kesikli üretim sistemlerinde farklı ürünler talebe göre ve az miktarlarda üretilir. Düzensiz talep kesikli üretimi zorunlu kılmaktadır. Sürekli üretimde ise kesikli üretimin tersine yüksek miktarda ve düzenli talep vardır. Sürekli üretim sistemlerinde hammadde bir uçtan girerek diğer uçtan ürün halinde çıkmaktadır. Sürekli üretim sistemleri “seri (akış) üretim” ve “kütle (kitle) üretimi” olarak ikiye ayrılmaktadır. Seri üretimde sistem tek bir ürünün (çimento, kağıt, şeker, vb.) üretimi için dizayn edilmiştir. Kütle üretim sistemlerinde ise standart bir veya birkaç ürünün üretimi yapılabilir. Kütle üretimine en güzel örnek beyaz eşya üretimidir. Üçüncü üretim sistemi olan proje tipi üretim sistemlerinde ise taşınamayacak büyüklükteki ürünler (gemi üretimi, inşaatlar, vb.) için kullanılmaktadır. Ürünler hareketsizdir ve operatörler ürünlerin etrafında çalışmaktadır.



Şekil 1.1: Üretim sistemlerinin sınıflandırılması.

Tez çalışmasında sürekli üretim sistemlerinden kütle üretim sistemlerine dahil bir bulaşık makinesi montaj hattı ele alınmıştır.

Giderek artan rekabet ile birlikte işletmeler için düşük maliyet ile yüksek kalite ve yüksek miktarda üretim yapma zorunluluğu ortaya çıkmıştır. Bu amaçla montaj hatlarında bir çok problem ele alınmıştır. En çok çalışılan problemler üretim hızını artırmaya yönelik problemlerdir. Tez çalışmasında ele alınan problemler de üretim hızını artırmaya yönelik problemlerdir. Bu problemler iki grupta incelenebilir:

Montaj hattı dengeleme problemleri: Bu problemler montaj hatlarında karşılaşılan en temel problemlerdir. MHDP’nde operasyon süreleri deterministik ve stokastik olarak ikiye ayrılmaktadır. Literatürde pek çok çalışmada deterministik olarak ele alınsa da gerçek hayatta operatörlerin motivasyonu, el becerisi, tecrübesi, eğitim eksikliği, hat arızaları gibi sebeplerden stokastik olmaktadır. Gerçek hayat problemlerine çözüm olabilmesi için stokastik olarak ele alınmalıdır. MHDP’nin farklı amaçları olabilir. Verilen çevrim süresi için en az istasyon sayısının elde edilmesi veya verilen istasyon sayısı için en küçük çevrim süresinin bulunması bu amaçlardan ikisine örnektir. MHDP hattın yerleşim tipine göre de çeşitlenmektedir. Seri, paralel ve U-tipi yerleşime sahip hatlar vardır. Ürün çeşitliliği de problemin çözüm yöntemini değiştirmektedir. MHDP’nin çözümü için birçok teknik geliştirilmiştir. Bu yöntemler kesin ve sezgisel yöntemler olarak ikiye ayrılır.

Ara stok alanı atama problemleri: Bu problemler stokastik montaj hatlarının üretim hızını etkileyen diğer bir problem tipidir. İstasyonlar arasında ürünlerin bekleyebildiği boş modüller “ara stok alanı (ASA) ” olarak adlandırılmıştır. Bu ara stoklar istasyonlar arasında tampon görevi görmektedir. Yani bir istasyon işlemini verilen çevrim süresi içinde bitiremez ise kendinden önceki istasyonu bloklar, kendinden sonraki istasyonu ise aç bırakır. Bu durum üretim kaybına sebep olmaktadır. ASA atama problemi ASA sayısının sınırlı ve sınırsız sayıda olmasına göre ikiye ayrılmaktadır. Gerçek hayat problemleri genelde sınırlı sayıda ASA atama problemleridir. Üretim hızını artırmak için sınırlı sayıdaki ara stok alanlarının etkili şekilde istasyonlar arasına dağıtılması gerekmektedir. ASA atama problemlerinde üç istasyon üstünde kesin çözüm veren yöntemler bulunmamaktadır. Daha çok istasyon sayısına sahip hatların ASA ataması için sezgisel yöntemler ve kuyruk ağları kullanılmaktadır.

Litereatür incelendiğinde MHDP ve ASA atama problemleri montaj hatlarının üretim hızını artırmak için ayrı ayrı ele alınmıştır. Bu iki problemi birlikte ele alan çok az sayıda çalışmaya rastlanmıştır. En iyi üretim hızını elde edebilmek için bu iki problem birlikte ele alınmalıdır.

Montaj hatlarının performans değerlendirmesi için yöntemler simülasyon ve analitik olarak ikiye ayrılmaktadır. Simülasyon farklı ASA atama konfigürasyonlarının denendiği modeller için daha hızlı sonuçlar verebilmektedir.

Tez çalışmasında bir bulaşık makinesi üretim fabrikasından gerçek hayat problemi ele alınmıştır. Bu problem için stokastik MHDP ve sınırlı sayıda ASA atama problemini eş zamanlı ele alan bir sezgisel yöntem geliştirilmiştir.

Tez çalışmasının devamı şu şekilde ilerlemektedir. İkinci bölümde ele alınan problem tiplerine özgü kavramlar, tanımlar ve sınıflandırmalar hakkında bilgi verilmiştir. Üçüncü bölümde MHDP, ASA atama problemi, eş zamanlı MHDP ve ASA atama problemi ve performans analizi hakkında literatür araştırmasına yer verilmiştir. Dördüncü bölümde eş zamanlı MHDP ve ASA atama problemi için geliştirilen sezgiselin adımları anlatılmıştır. Beşinci bölümde gerçek hayat problemi ve literatürde var olan örnek bir problem için numerik çalışmalara yer verilmiş ve sonuçlar istatistiksel anlamda karşılaştırılmıştır. Örnek veri seti için de eşit ASA ataması sonucu ile sezgisel sonuçlar kıyaslanmıştır. Son bölümde ise çalışma sonuçları değerlendirilmiştir ve gelecekte yapılabilecek iyileştirmelerden bahsedilmiştir.



2. ELE ALINAN PROBLEMLER VE KAVRAMLAR

2.1 Montaj Hattı Dengeleme Problemi

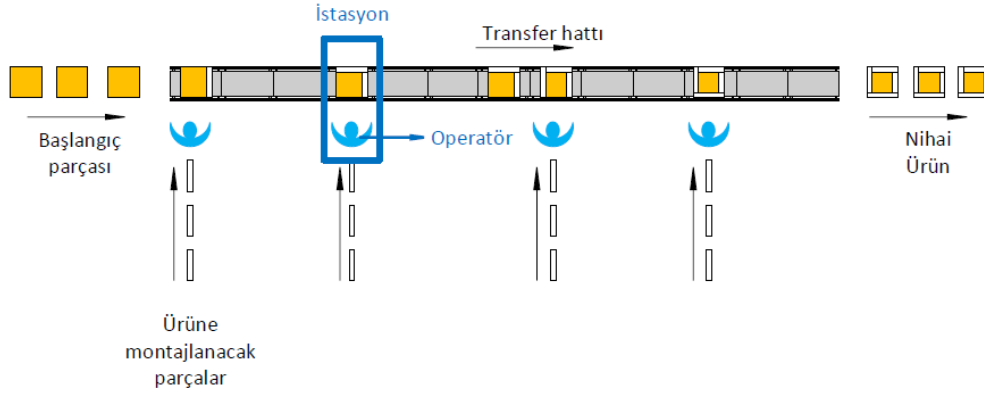
Şirketler rekabetçi pazar ortamında var olabilmek için en az maliyet ile üretim yapmak zorundadırlar. Bu amaca kaynakların en verimli şekilde kullanılması ile ulaşılabilir. Montaj hatlarında karşılaşılan en temel problem montaj hattı dengeleme problemidir. Montaj hattı üzerinde bulunan istasyonlara eşit ve verimli şekilde operasyonların atanması bant dengesi, maliyet ve adaletli çalışma koşulları açısından önemlidir. Değişen üretim temposuna ve pazar ihtiyaçlarına göre hat dengelemesinin yenilenmesi gerekliliği ortaya çıkmaktadır.

2.1.1 Montaj hattı ve temel kavramlar

Montaj hatları malzemelerin bir hat boyunca transferinin gerçekleştiği ve çoğunlukla iş gücüne dayalı bir şekilde işlendiği hatlardır. Tez çalışmasında gerçek hayattan bir montaj hattı ele alınmıştır.

Montaj işlemi hat boyunca sıralanmış iş istasyonlarında çalışan operatörler tarafından bir ürüne ait parçaların bir araya getirilmesi işi olarak tanımlanır (Pınarbaşı, 2015). Ürün hat üzerinde ilerlerken her bir operatör ürüne ait işlemlerin bir kısmını her ürün için tekrarlar. Bu operatörler tarafından gerçekleştirilen operasyonların bir amacı eniyileyecek şekilde istasyonlara atanmasına ise montaj hattı dengeleme problemi (MHDP) denir. Örnek bir montaj hattı tasarımı Şekil 2.1’de gösterilmiştir.

Montaj hattı dengeleme problemlerinde kullanılan kavramlar Çizelge 2.1’de açıklanmıştır.



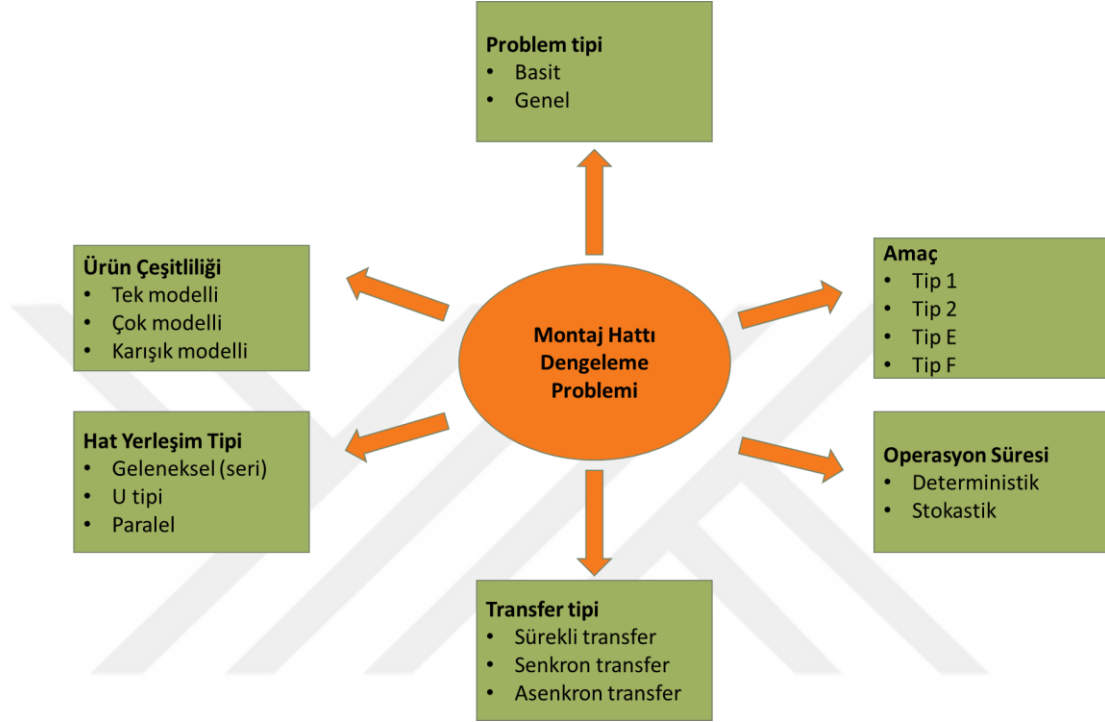
Şekil 2.1: Örnek montaj hattı tasarımı.

Çizelge 2.1: Montaj hattı dengeleme problemi için temel kavramlar.

Kavram	Açıklama
Tempo	Bir vardiyada üretilmesi hedeflenen ürün sayısıdır (birim/vardiya.).
Çevrim zamanı	Standart bir tempodaki bir montaj hattından çıkan iki ürün arasındaki zamandır (birim/dakika). C ile temsil edilir.
Üretim hızı	Birim zamanda üretim sisteminde tamamlanan ürün miktarı
Operasyon	Bölünemeyen en küçük iş parçasıdır. Modelde i ile gösterilir. N adet operasyon vardır ($i = 1, \dots, N$).
Operasyon süresi	Operasyonu tamamlamak için gereken süredir. i operasyonuna ait süre t_i ile gösterilir.
İstasyon	Bir veya daha fazla operatörün atanan operasyonları gerçekleştirdiği hat parçasıdır. Modelde j ile gösterilir. M adet istasyon vardır ($j = 1, \dots, M$).
İstasyon süresi	Bir istasyona atanan operasyonların toplam süresidir. j istasyonuna ait süre k_j ile gösterilir.
Öncelik kısıtları	Bazı operasyonların diğerlerinden önce yapılması gerekliliğini gösteren kısıtlardır.
Öncelik matrisi	Öncelik diyagramında bir operasyon başka bir operasyonun öncelik şartı ise matriste kesişimine "1" yazıldığı, öncelik ilişkisi yok ise "0" yazıldığı matristir.
Öncelik diyagramı	Operasyon sıralarının şematik gösterimidir.
Bölge kısıtları	Öncelik kısıtlarına ek olarak operasyonların gruplanmasını ve belirli istasyonlara atanmasını gerektiren kısıtlardır.
İstasyon bloklanması	İstasyondaki operatörün önündeki parça ile işini bitirdikten sonra parçayı bir sonraki istasyona göndermek için bir sonraki istasyonun işinin bitmesini bekleme durumudur. Bekleme süresi boyunca operatör bloklanır.
İstasyon açlığı	İstasyondaki operatörün önündeki parça ile işini bitirdikten sonra yeni parçanın önüne gelmemesi durumu istasyon açlığı olarak tanımlanır.
Hat verimliliği	Vardiya süresi boyunca hattın çalıştığı orandır. E ile gösterilir.

2.1.2 Montaj Hattı Dengeleme Problemlerinin Sınıflandırılması

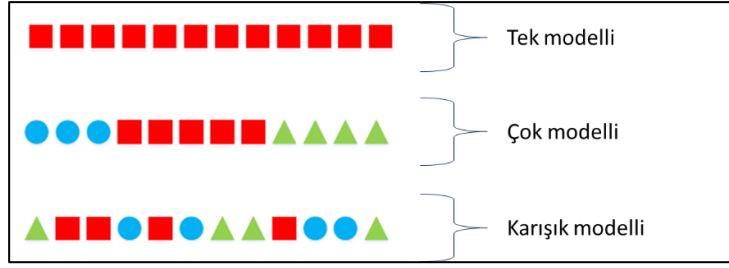
Montaj hattı dengeleme problemi çeşitli kategorilerde sınıflandırılabilir. Montaj hattında üretilen ürünlerin çeşitliliğine göre, hattın yerleşim şekline göre veya operasyon sürelerinin deterministik/ stokastik ele alınmasına göre sınıflandırılabilir. Şekil 2.2 literatürde var olan temel sınıflandırmaları göstermektedir.



Şekil 2.2: Montaj hattı dengeleme problemi sınıflandırması.

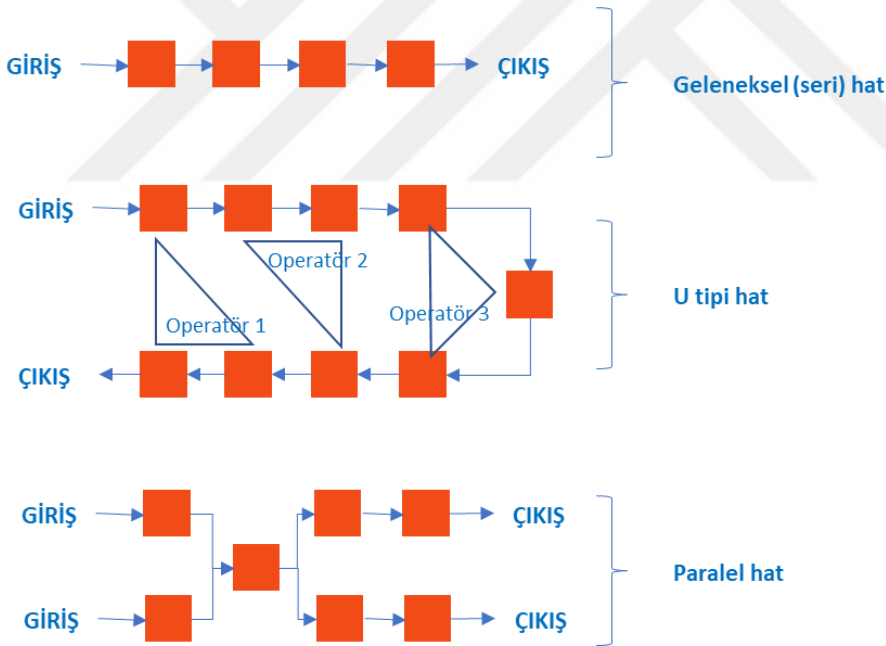
MHDP problem tipine göre Basit MHDP ve Genel MHDP olmak üzere ikiye ayrılır. Basit MHDP problemi en basit tiptir. Bu sebeple gerçek hayat problemleri için gerçekçi değildir. Basit MHDP' ne bölge kısıtları, paralellik, ekipman seçimi, stokastik operasyon süresi vb. dahil edildiğinde problem Genel MHDP' ne dönüşür.

MHDP üretilen ürün çeşitliliğine göre 3'e ayrılır. Tek modelli hatlarda tek bir ürün üretilir. Çok modelli hatlarda iki veya daha fazla ürün modeli gruplar halinde üretilir. Bir ürün grubunun üretimi bitince bantta setup yapılarak diğer ürün grubunun üretimine geçilir. Karışık modelli hatlarda ise farklı ürün modelleri karışık sırada üretilir. Bu hatlarda ürünler gruplar halinde üretime girmez, bant üzerinde eş zamanlı olarak farklı ürün modelleri bulunur. Ürün çeşitliliği gösterimi Şekil 2.3' te verilmiştir.



Şekil 2.3: Ürün çeşitliliği sınıflandırması.

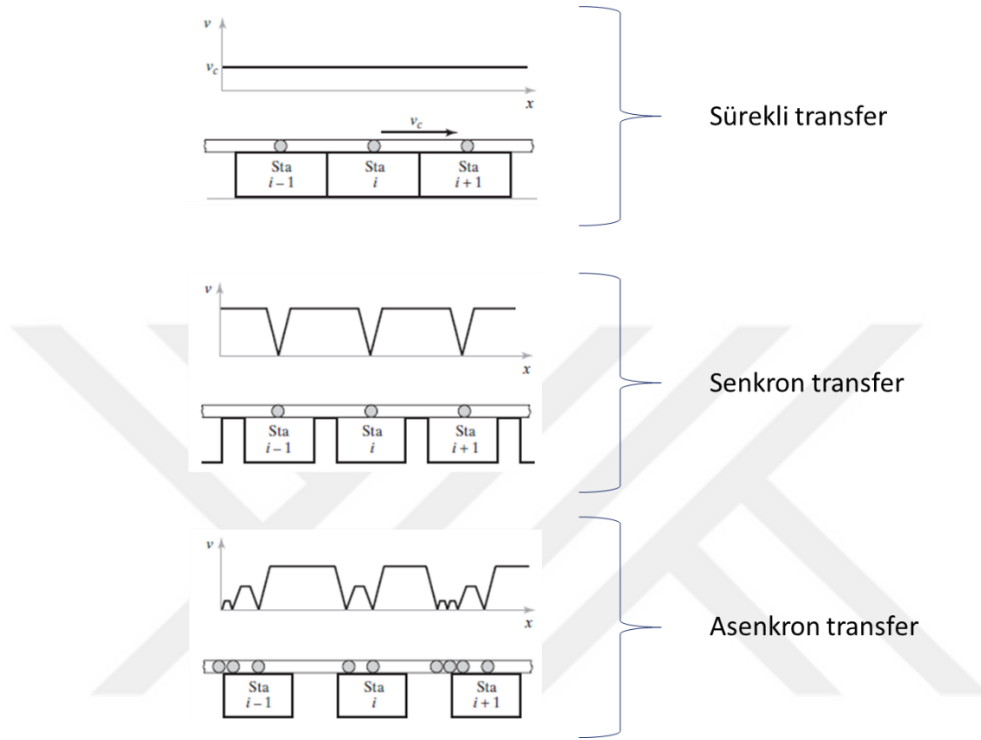
Montaj hatları hattın yerleşim şekline göre 3 gruba ayrılır. Geleneksel hatlar istasyonların yan yana düz bir hat oluşturduğu ve operatörlerin tek bir istasyonda çalıştığı hatlardır. U tipi hatlar yerleşim şekli açısından U harfine benzer konumlanmıştır ve operatörler bant yapısı gereği birden fazla istasyonda operasyon gerçekleştirmektedir. Paralel hatlar ise iki veya daha fazla seri hattın meydana gelen hatlardır. Bu hatlarda ortak istasyonlardaki operatörler her iki hat için de çalışmaktadır (Gökçen vd., 2006). Hat yerleşim tipi sınıflandırması Şekil 2.4'te verilmiştir.



Şekil 2.4: Hat yerleşim tipi sınıflandırması.

Montaj hatları ürünlerin üzerinde hareket ettiği konveyörün hareket şekline göre 3 gruba ayrılır. Sürekli transfer tipi montaj hatlarında konveyör sabit bir hızda durmaksızın hareket eder. Senkron transfer tipi montaj hatlarında ise tüm ürünler konveyör üzerinde aynı anda hareket eder ve aynı anda durur. Bu transfer tipinde operatörler konveyörün bir sonraki hareketine kadar işlerini bitirmek zorundadırlar.

Son transfer tipi asenkron transfer tipi montaj hatlarıdır. Bu hatlarda her operatör önündeki işi kendine atanan tüm operasyonları tamamladığında serbest bırakır. Bu tip hatlarda kuyruklar oluşabilmektedir. Ürünlerin konveyör üzerinde hareketini ve konveyörün hareket hızını gösteren grafikler Şekil 2.5’ te gösterilmiştir (Curry ve Feldman,2011).



Şekil 2.5: Transfer tipi sınıflandırması (Curry ve Feldman, 2011).

MHDP’de operasyon süreleri deterministik ve stokastik olmak üzere ikiye ayrılır. Deterministik montaj hattı dengeleme problemleri operasyonların makineler tarafından gerçekleştirildiği hatlar için daha uygundur. İnsan faktörünün bulunduğu montaj hatlarında operasyon sürelerini deterministik kabul etmek gerçek hayat problemleri için uygun değildir. Stokastik operasyon süreleri çevrim zamanının aşılmasına dolayısıyla istasyonlarda aç kalma ve bloklanma durumlarının meydana gelmesine sebep olur.

MHDP amaçlarına göre de 4 gruba ayrılmaktadır: Tip 1, verilen çevrim zamanı için istasyon sayısını en küçükmek, Tip 2, verilen istasyon sayısı için çevrim zamanını en küçükmek, Tip E, eş zamanlı olarak istasyon sayısını ve çevrim zamanını en küçükmek, Tip F, verilen istasyon sayısı ve çevrim zamanı için olurlu bir çözüm bulmak.

Tez çalışması kapsamında gerçek hayattan alınan problem çok modelli, geleneksel (seri) hat yerleşim tipli, asenkron transferli, stokastik süreli ve Tip 1 amaç fonksiyonuna sahip MHDP'dir.

2.2 Ara Stok Alanı Atama Problemi

Montaj hattının üretim hızını belirleyen tek parametre hat dengelemesi değildir. İstasyonlar arasına "ara stok alanı (ASA)" atamak da üretim hızını artıran bir yaklaşımdır. Bu sebeple montaj hattının verimi için hat dengelemenin yanında ara stok alanı atama problemi de ele alınmalıdır.

Ara stok alanları asenkron hatlarda akışı iyileştirmek için etkilidir. İstasyonlar arasında ASA yoksa istasyonlar bağımlı olur. Bir istasyonda ortaya çıkan duruş diğerlerini de etkiler. ASA olduğunda ise ASA sayısı kadar çalışma boşluğu vardır. Bağımlılık ASA sayısına göre değişir (Malakooti, 1994).

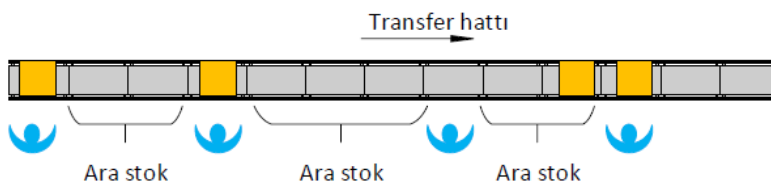
İstasyonun bloklanması durumu limitli sayıda ASA ve operasyon sürelerindeki değişkenlik kaynaklıdır. İstasyonlar arasındaki ara stok alanları operasyon sürelerindeki değişkenliğin etkilerini absorbe eder (Yamashita ve Altıok, 1998).

ASA üretim hızını artırır. Ancak ASA sayısının çok olması WIP stok miktarını da artırır ve maliyetlidir. Aynı zamanda alan kısıtları sebebiyle ASA sayısı artırılamayabilir.

2.2.1 Ara stok alanı ve temel kavramalar

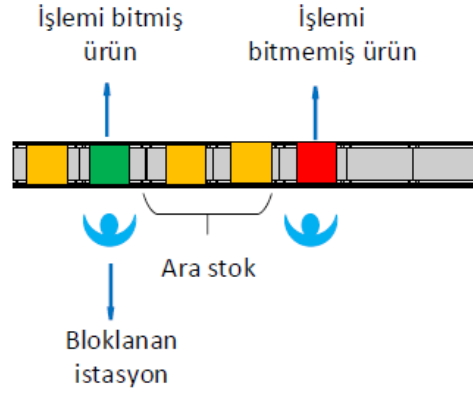
ASA atama probleminde kullanılan temel kavramlar ve ilgili durumlar aşağıda açıklanmıştır.

- *Ara stok alanı (ASA)*: Üretim hattı üzerinde iki istasyon arasında ürünlerin bir sonraki istasyona gitmeden önce geçici süre bekledikleri hat parçasıdır. Şekil 2.6'da ara stok alanlı bir hat parçası gösterilmiştir.



Şekil 2.6: Ara stoklu montaj hattı.

- *İstasyon bloklanması*: Montaj Hattı ve Temel Kavramlar bölümünde anlatıldığı üzere operatörün önündeki parça ile işinin bitmesi ancak parçayı gönderebilmek için bir sonraki istasyonu beklemesi durumudur. ASA olması bir sonraki operatöre ASA sayısı kadar çalışma boşluğu bırakır. Böylelikle istasyon bloklanma ihtimali azaltılmış olur. İstasyon bloklanmasını gösteren örnek Şekil 2.7’de gösterilmiştir.



Şekil 2.7: İstasyon bloklanma durumu örneği.

2.2.2 Ara stok alanı atama problemlerinin sınıflandırılması

ASA atama problemleri amaçlarına göre ikiye ayrılır. İlk amaç verilen limitli sayıdaki ASA sayısı için üretim hızını en büyükmektir. İkinci amaç ise istenen üretim hızı için ASA sayısını en küçükmektir.

2.3 Üretim Hızı Hesaplama

Ele alınan problemde operasyon ve ara stok alanı atama sonuçlarının performansını kıyaslamak için üretim hızının hesaplanması gerekmektedir. Montaj hatlarında üretim hızını hesaplamak için simülasyon veya analitik hesaplamalar kullanılmaktadır. Analitik metodlar ile küçük örnekler için kesin sonuçlar alınabilirken, simülasyon ile daha büyük problem sınıflarıyla uğraşılabilir.

Tez çalışması kapsamında üretim hızını hesaplamak için simülasyon kullanılmıştır.

2.4 Varsayımlar

Ele alınan problem için bazı varsayımlar kabul edilmektedir:

- Son istasyon bloklanmaz, ilk istasyon aç kalmaz.

- Operasyon süreleri bağımsız ve normal dağılmaktadır.
- Her operatör tüm operasyonları yapabilecek bilgi ve tecrübeye sahiptir.
- Her istasyonda bir operatör çalışmaktadır.
- Her operasyon yalnızca bir istasyona atanabilir.
- Bir istasyona atanan operasyonların toplam süresi çevrim zamanını geçemez.
- Operasyonlar arasındaki öncelik ilişkisi ihlal edilemez.
- Tüm operasyonlar gerçekleştirilmelidir.
- Bantta arıza kaynaklı duruşlar yoktur.
- Malzemeler her istasyona zamanında ve yeterli miktarda gelmektedir.

3. LİTERATÜR TARAMASI

Literatürde ele alınan problem dört başlıkta incelenmiştir. Montaj hattı dengeleme problemleri ve ASA atama problemleri literatürde geniş bir şekilde yer almaktadır. İki problem türünü eş zamanlı ele alan çalışmalara ise literatürde çok az rastlanmıştır. Üretim hızı hesaplama ve performans analizi için de literatür ayrıca incelenmiştir.

3.1 Montaj Hattı Dengeleme Problemleri

Montaj hattı dengeleme problemleri literatür araştırmasında iki temel kategoriye ayrılarak incelenmiştir. Operasyon sürelerinin deterministik ve stokastik olması durumuna göre çözüm yöntemleri değişmektedir.

Literatür incelendiğinde MHDP' nin amaç, ürün çeşitliği, hat yerleşim tipi ve operasyon sürelerinin tipine göre çeşitlendiği görülmektedir. MHD problemlerinin literatürdeki tip ve çözüm yöntemleri sınıflandırmaları için Boysen ve diğerleri (2007) ile Sivasanakaran ve Shahabudeen (2014) 'in çalışmalarına bakılabilir.

Deterministik MHDP için literatürde bulunan çalışmalardan birkaçı sınıflandırılarak Çizelge 3.1'de verilmiştir. Literatür incelendiğinde deterministik MHDP' nin çözümünde sezgisel ve matematiksel modellerin kullanıldığı görülmektedir. İncelenen sezgisel yöntemlerden ilki Helgeson ve Birnie (1961)'nin çalışmasıdır. Bu çalışmada her operasyon zaman üzerinden ağırlıklandırılmıştır. Bir operasyonun süresi ve o operasyondan sonra gelen operasyonların sürelerinin toplamı o istasyonun konum ağırlığını belirlemektedir. Konum ağırlıkları büyükten küçüğe sıralanarak atama yapılmaktadır. En büyük konum ağırlığına ait operasyondan başlanarak çevrim süresi ve öncelik diyagramı kısıtlarına göre atama yapılmaktadır.

Diğer bir sezgisel çözüm çalışması Hoffman ve Markowitz (1963)'e aittir. Bu çalışmada montaj hattı dengeleme problemi en kısa yol problemi şeklinde çözülmüştür. Öncelik diyagramı kare matrise çevrilerek matris sütunları toplanmış ve atama önceliği belirlenmiştir. Sütun toplamı sıfır olan operasyonlardan başlanarak

çevrim süresine göre atama yapılmıştır. Atanan operasyonlar matristen çıkartılarak yeni matris oluşturulmuş ve tüm operasyonlar atanana kadar yinelemeli şekilde atamalar devam ettirilmiştir.

Çizelge 3.1: Deterministik operasyon süreli MHDP literatür çalışmaları.

Yayın	Amaç	Ürün çeşitliliği	Hat yerleşim tipi	Operasyon süresi	Çözüm Yöntemi
Helgeson ve Birnie (1961)	Tip-1	Tek modeli	Geleneksel	Deterministik	Sezgisel Yöntemler *Pozisyon ağırlığı yöntemi
Hoffman (1963)	Tip-1	Tek modeli	Geleneksel	Deterministik	Sezgisel Yöntemler *Öncelik diyagramı ile çözüm yöntemi
Klein ve Scholl (1996)	Tip-2	Tek modeli	Geleneksel	Deterministik	Kesin Yöntemler *Dal sınır algoritması
Uğurdağ, Rachamadugu ve Papachristou (1997)	Tip-2	Tek modeli	Geleneksel	Deterministik	Kesin Yöntemler *İki aşamalı simplex
Pastor ve Ferrer (2009)	Tip-1 Tip-2	Tek modeli	Geleneksel	Deterministik	Kesin Yöntemler *Matematiksel model

Kesin yöntemler ile optimum çözümler belirlenebilmektedir. Kesin yöntemlere örnek bir çalışma Klein ve Scholl (1996)' a aittir. Bu çalışma Tip 2 problemini ele alarak üretim hızını en büyükmeyi amaçlamıştır. Tip-2 problemini Tip-1 problemini tekrarlı çözerek çözüm alan çalışmaların aksine direk Tip-2 problemini çözen bir yaklaşım geliştirmişlerdir. Çözüm yöntemi olarak dal-sınır prosedürünü uygulamışlardır.

Uğurdağ ve diğerleri (1997) çalışmalarında Tip-2 problemi için tam sayılı programlamaya dayalı iki aşamalı simplex algoritması geliştirmişlerdir. Geliştirilen prosedür çevrim zamanını en küçüklerken istasyonlar arasındaki iş yükünü de dengelemektedir.

Pastor ve Ferrer (2009) ise hem Tip-1 hem Tip-2 problemi için matematiksel model geliştirmişlerdir. Mevcut matematiksel modele ek kısıtlar ekleyerek Tip-1 ve Tip-2

problemleri için üst sınır belirlemişlerdir. Modeli var olan örnek setler için test ederek optimum çözüme ulaşma açısından kıyaslamışlardır.

Deterministik zamanlı MHP operasyonların makineler tarafından yapıldığı hatlara daha uygundur. İstasyonlarında insan gücü ile montaj yapılan hatlar stokastik zamanlı olmaktadır. Tez çalışmasında gerçek hayat problemi ele alındığı için stokastik operasyon süreli montaj hattı ele alınmıştır.

Genellikle endüstriler stokastikliği çevrim zamanını belirli bir oranda çarparak hat dengeleme çalışmasını elde edilen bu çevrim zamanına göre deterministik süreli prosedürlerle yapmaktadır. Bu şekilde operatörlerin yorgunluk payı, hat arızası, malzeme gecikmesi gibi stokastiklik yaratan durumların önüne geçilmesi hedeflenmektedir. Ancak bu çözüm ile belirli oranda verimsizlik de kabul edilmektedir. Literatürde stokastik operasyon süreli problemler için geliştirilen çalışmalar bulunmaktadır. Stokastik süreli MHDP için literatür çalışmaları sınıflandırılarak Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.2: Stokastik süreli MHDP için literatür çalışmaları

Yayın	Amaç	Ürün çeşitliliği	Hat yerleşim tipi	Operasyon süresi	Çözüm Yöntemi
Modie ve Young (1965)	Tip-1 <i>*Çevrim zamanının belirli bir olasılıkla geçilememesi</i>	Tek model	Geleneksel	Stokastik	Sezgisel
Shin (1990)	Tip-1 <i>*Toplam maliyeti en küçükmek</i>	Tek model	Geleneksel	Stokastik	Sezgisel
Liu, Ong ve Huang (2005)	Tip-2 <i>*Düzensiz iş yükü dağılımı</i>	Tek model	Geleneksel	Stokastik	Sezgisel

Modie ve Young (1965) Tip-1 amacına sahip ve stokastik operasyon süreli problem için iki aşamalı bir sezgisel yaklaşım geliştirmişlerdir. Sezgiselin birinci fazında, sezgisel bir yöntem ile minimum istasyon sayısı elde edilirken ikinci fazında istasyonlardaki boş zamanların çevrim zamanını geçmesi olasılığına göre boş zamanları eşit bir şekilde dağıtmaya çalışmaktadır. Sezgisel optimalite garanti etmese de iyi bir çözüm vermektedir.

Stokastik montaj hattı dengeleme çalışması örneklerinden biri de Shin (1990)'e aittir. Çalışmada ele alınan montaj hattında bir istasyona atanan operasyonları çevrim süresi içerisinde tamamlayamazsa parçayı tamamlamadan gönderip yeni parçaya geçmektedir. Çalışmada beklenen toplam maliyeti en küçükleyecek bir sezgisel metot önerilmiştir. Maliyet fonksiyonu toplam beklenen tamamlanmama maliyeti ile toplam işçilik maliyetinden oluşur. Tamamlanmayan işler hattın sonunda tamamlanır ve görev zamanları normal dağılım varsayılır. Görevlerin atanmasında geliştirilen sezgisel ise deterministik zamanlı atama prosedürüne dayanır. Prosedür çevrim zamanında ulaşılabilecek en alt sınıra ulaşılmıca durur.

Liu ve diğerleri (2005) stokastik MHDP'nin çözümü için üç aşamadan oluşan bir sezgisel çözüm prosedürü önermişlerdir. İlk aşamada ileri ve geri yönlü olarak görevler istasyonlara atanır. İkinci aşamada istasyonlar arasında görev değişimleri ile iş yükünün düzgün dağıtılması sağlanır. Üçüncü aşamada çevrim zamanı için belirlenen üst sınır güven seviyesini sağlayana kadar adım adım düşülür ve en düşük çevrim zamanı elde edilir.

3.2 Ara Stok Alanı Atama Problemleri

Montaj hatlarında ara stok alanı üretim hızını artıran bir yaklaşımdır. Literatürde varolan ara stok alanı atama çalışmaları amaçlarına göre ikiye ayrılmaktadır. İlk amaç verilen limitli sayıdaki ASA sayısı için üretim hızını en büyükmektir. İkinci amaç ise istenen üretim hızı için ASA sayısını en küçükmektir. Tezde ele alınan problem tipi verilen limitli sayıdaki ASA sayısı için üretim hızını en büyükleme amaçlı problemdir.

Gershwin ve Schor (2000) iki tip amaç için de bir algoritma geliştirmiştir. İlk amaç için geliştirilen algoritmadan yola çıkarak ikinci tip amaca sahip problemler için de çözüm yaklaşımı geliştirmişlerdir. Operasyon süreleri deterministik kabul edilmiştir.

Yamashita ve Altıok (1998) ikinci tip amaç için çözüm aramıştır. Çalışmada iki ve üç istasyon için kesin çözüm yöntemi verilirken, üzeri istasyonlar için yaklaşık çözüm veren bir model önerilmiştir. Montaj hattını bir kuyruk ağı gibi kabul ederek bir dinamik programlama algoritması geliştirilmiştir. Ancak bu çözüm yöntemi uzun montaj hatları için zor ve olursuzdur.

Curry ve Feldman (2011) birinci tip amaç için çözüm yöntemi geliştirmiştir. Geliştirilen yöntemde istasyonlar arası ara stok alanlarının yerlerini değiştirerek en iyi üretim hızını veren atamayı aramaktadır. Çalışmada tüm ASA atama olasılıklarını deneyerek en iyiyi bulmaya çalışmanın zaman alıcı ve akıllıca olmadığından bahsedilmiştir. Bu sebeple geliştirilen algoritmada istasyonlar arasında birer ASA yer değiştirerek üretim hızı hesaplanmakta ve en iyiyi veren atama üzerinden algoritma tekrarlanmaktadır. Tez çalışmamızda, ASA atama için bu algoritma geliştirilerek kullanılmıştır.

Amiri ve Mohtashami (2012) ikinci tip amaç için iki aşamalı çözüm önermiştir. İlk aşama kapsamında sistemi daha gerçekçi yansıtacağı için simülasyon ile atama önerilmiştir. İkinci aşamada ise meta-model kurarak atamanın üretim hızını hesaplatmıştır.

3.3 Eş Zamanlı Hat Dengeleme ve ASA Atama Problemleri

Montaj hatlarında müşteri taleplerine göre üretim temposu belirlenmektedir. Tempoya göre çevrim süresi hesaplanmakta ve hat dengelemesi yapılmaktadır. Hat dengelemesi üretim hızını belirlemektedir. Ancak üretim hızını etkileyen tek parametre hat dengesi değildir. Ara stok alanı ataması da üretim hızını etkilemektedir. Literatür incelendiğinde hat dengeleme ve ASA atama problemlerinin ayrı ayrı ele alındığı görülmüştür. Ancak en iyi üretim hızını yakalamak için iki problem birlikte ele alınmalıdır.

Literatürde bu iki problemi birlikte ele alan üç çalışmaya rastlanmıştır. Bu çalışmalardan ilki Malakooti (1994)'nin çalışmasıdır. Malakooti (1994) deterministik zamanlı montaj hattı dengeleme problemini ara stok alanı ile birlikte ele almıştır. Bu çalışmanın ele alınan tez probleminden farkı ASA sayısının limitli olmaması ve operasyon sürelerinin deterministik olmasıdır. Ayrıca istasyonlar arasındaki ASA miktarının eşit olduğu varsayılmıştır. Gerekli ASA sayısı formül ile hesaplanmaktadır. ASA ile MHD probleminin çözümü için yinelemeli bir algoritma önerilmiştir. Algoritmanın amacı verilen çevrim süresi için toplam maliyeti en küçükleyen istasyon sayısını ve ASA miktarını hesaplamaktır. Algoritma öncelikle sezgisel yöntemle hat dengeleme problemini çözmektedir. Ardından hat dengeleme sonuçlarından gelen verilerle bir formül kullanarak ASA miktarını hesaplamaktadır.

Elde edilen istasyon sayısı ve ASA sayısı ile sistemin üretim hızı bir formül ile hesaplanmaktadır. Son olarak ise elde edilen tüm verilerle toplam maliyet hesaplanmakta ve algoritmayı tekrar etmek için bulunan istasyon sayısı için daha küçük bir çevrim zamanı için sağlanıp sağlanmadığı kontrol edilmektedir.

Diğer bir çalışma Battini ve diğerleri (2009)' ne aittir. Bu çalışmanın ele alınan tez probleminden farkı karışık modelli montaj hattını ele alması ve talep ile model dağılımına göre ASA miktarını değiştirmesidir. Önerilen çözüm yönteminin amacı istasyonun boş zamanını ve fazla atamayı en küçükmektir. Önerilen yöntemde ASA miktarını azaltıp, üretim miktarını artıracak hat dengelemesi ve model sıralaması için çözüm önerilmektedir.

Tez çalışmasında ele alınan probleme en çok benzeyen çalışma Tiacci (2015)' e aittir. Çalışmada asenkron hat, limitli ara stok alanı ve stokastik operasyon süresi ele alınmıştır. Bizim çalışmamızdan farkı karışık modelli ve paralel istasyonlu montaj hattını ele alıyor olmasıdır. Eş zamanlı hat dengeleme ve ASA atama için genetik algoritma kullanılmıştır. Amaç fonksiyonunu hesaplatmak için simülasyon kullanılmıştır. Ele alınan tez çalışmasında da üretim hızını hesaplamak için bu çalışmada kullanılan simülasyondan yararlanılmıştır.

3.4 Üretim Hızı Hesaplama ve Performans Analizi

Hat dengelemesinin veya ASA atamasının performansını ölçmek için bir yonteme ihtiyaç vardır. Literatür incelendiğinde analitik ve simülasyon teknikleri karşımıza çıkmaktadır.

Blumenfeld (1990) seri bir hattın üretim hızını hesaplamak için basit bir formül geliştirmiştir. Formülün girdileri operasyon süresinin ortalaması, standart sapması, istasyon sayısı ve ara stok sayısıdır. Basit bir şekilde az sayıda girdi ile üretim hızını hesaplamaktadır. Ancak çalışma tüm istasyonlar arasındaki ara stok sayısını eşit varsaymaktadır. Bu sebeple ele alınan gerçek hayat problemine uygun değildir.

Altıok (1997) montaj hattını bir kuyruk ağı gibi ele alarak çözüm yaklaşımı geliştirmiştir. M adet istasyona sahip bir hatta M. istasyondan geriye giderek hattın üretim hızını hesaplayacak bir yöntem önermiştir.

Son olarak Tiacci (2012) çalışması incelenmiştir. Tiacci montaj hatlarının performans analizini yapmak için Java’da bir sistem simülasyonu geliştirmiştir. Geliştirilen sistem simülasyonu karışık modellenli montaj hatlarının, stokastik süreli operasyon sürelerinin ve ara stok alanlı hatların performans değerlendirmesini yapabilmektedir. En önemli özelliği kompleks montaj hatlarının (stokastik operasyon süreli, karışık modellenli, paralel istasyonlu, ara stok alanlı vb.) üretim hızını çok hızlı hesaplayabilmesidir. Bu hesaplama için üç temel girdiye ihtiyaç duyulmaktadır. Birinci girdi operasyon süreleri, ikinci girdi hat konfigürasyonu (istasyon sayısı, istasyonlar arası ara stok alanı sayısı, paralel istasyon olup olmadığı, istasyonlara atanan operasyonlar) ve son olarak üçüncü girdi hatta girecek model sıralamasıdır. Performans göstergesi olarak üretim hızını baz alan çalışmalar için uygun, esnek ve hızlı bir yöntemdir. Kompleks montaj hatları için üretim hızını hesaplayabilen ve kesin sonuç veren analitik modeller mevcut değildir. Hem zaman hem de kullanım kolaylığı açısından simülasyon, hattın üretim hızını değerlendirmek için tercih edilmektedir.

Ele alınan tez çalışmasında algoritmanın her tekrarında farklı konfigürasyonlar için hattın üretim hızının değerlendirilmesi amacıyla sistem simülasyonundan faydalanılmıştır.



4. ÇÖZÜM YÖNTEMİ

Gerçek hayat problemlerinde talebi karşılamak pazardaki rekabet için önemlidir. Ancak günümüz şartlarında sadece gelen talebi karşılamak rekabet için tek başına yeterli değildir. Gelen talep, aynı zamanda en az maliyet ile zamanında karşılanmalıdır. Ele aldığımız tez probleminde de amacımız en az maliyet ile üretim hızını en büyükmektir. En az maliyetten kasıt, en az istasyon sayısı ile hedef çevrim süresini tutturaktır. Açılan her istasyonun işçilik, ekipman ve yer maliyeti vardır. Üretim hızını etkileyen tek parametre hat dengelemesi değildir. Bölüm 2’de bahsedildiği gibi ara stok alanı dağılımı da üretim hızını etkileyen bir parametredir. Bu sebeple en iyi çözümün bulunabilmesi için bu iki parametrenin birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir.

Bu amaçla eş zamanlı hat dengeleme ve ASA atama algoritması geliştirilmiştir. Geliştirilen algoritma ile öncelikle bir matematiksel model kullanılarak verilen çevrim süresi için minimum istasyon sayısı belirlenir. Ardından, matematiksel modelde bulunan hat dengelemesi kullanılarak simülasyon temelli bir sezgisel ile en yüksek üretim hızını veren ASA dağılımı belirlenir. Hedeflenen üretim hızını yakalayacak atama bulunana kadar dengeleme ve ASA atama tekrarlanır.

4.1 Montaj Hattı Dengeleme Problemi için Matematiksel Model

Geliştirilen algoritmanın hat dengeleme aşamasında kullanılacak olan matematiksel model aşağıda verilmiştir.

Kümeler:

N = operasyon sayısı $(i = 1, \dots, N)$

M = istasyon sayısı $(j = 1, \dots, M)$

Parametreler:

$t_i = i$. operasyonun süresi

$C =$ çevrim süresi

$P_{ir} = i$. operasyonun r . operasyondan önce gelip gelmeme durumu

Karar Değişkenleri:

$x_{ij} \in \{0,1\} = \begin{cases} 1, & \text{eğer operasyon } i \text{ istasyon } j' \text{ye atanırsa} \\ 0, & \text{aksi halde} \end{cases}$

$y_j \in \{0,1\} = \begin{cases} 1, & \text{eğer istasyon } j \text{ açılırsa} \\ 0, & \text{aksi halde} \end{cases}$

$K_j = j$ istasyonuna atanan operasyonların toplam süresi

$S_i = i$. operasyonun atandığı sıra

Matematiksel Model:

$$\text{minimize } z = \sum_{j \in M} y_j \quad (4.1)$$

öyle ki :

$$\sum_{j \in M} x_{ij} = 1, \quad \forall i \in N \quad (4.2)$$

$$\sum_{i \in N} t_i * x_{ij} \leq C * y_j, \quad \forall j \in M \quad (4.3)$$

$$\sum_{j \in M} j * x_{ij} = S_i \quad (4.4)$$

$$S_i - S_r \leq M * (1 - P_{ir}), \quad \forall i, r \in N \quad (4.5)$$

Amaç fonksiyonu olan Eşitlik (4.1) açılan istasyon sayısını en küçükler. Eşitlik (4.2) her operasyonun yalnızca bir istasyona atanmasını sağlar. Eşitlik (4.3) ise eğer bir

istasyon açılmışsa o istasyona atanan operasyonların toplam süresinin çevrim süresini geçmemesini sağlar. Çevrim süresi aşılabarsa o istasyona başka operasyon atanmaz. Eşitlik (4.4) ve (4.5) öncelik matrisine uygunluğu sağlayan eşitliklerdir. Öncelik ilişkisine göre i operasyonu r operasyonundan önce yapılmalıdır. $P_{ir} = 1$ olunca $S_i - S_r \leq 0$ olur. Yani i operasyonu ya r operasyonu ile aynı istasyona ya da r operasyonunun öncesinde bir istasyona atanır.

4.2 Ara Stok Alanı Atama Problemi için Sezgisel Model

Geliştirilen eş zamanlı hat dengeleme ve ASA atama algoritmasının ASA atama kısmında kullanılacak sezgisel bu bölümde anlatılacaktır. Curry ve Feldman (2011) sınırlı sayıda ASA ataması için bir değiş-tokuş algoritması geliştirmiştir. Algoritmanın amacı en yüksek üretim hızını veren ASA atamasını bulmaktır. Bunun için algoritma verilen başlangıç ASA ataması ile başlayarak bir birimlik ASA değişiklikleri ile daha iyi bir atama aramaktadır. Bu algoritma geliştirilerek ASA problemi için kullanılmıştır.

4.2.1 Ara Stok Alanı Atama Sezgisel Model Kavramları

Sezgisel modelde kullanılan kavramlar aşağıda verilmiştir.

BP = başlangıç ara stok ataması ($[B_1, B_2, \dots, B_M]$)

BP' = permütasyon($\overline{\neq}1, BP$)

$thru(BP')$ = BP' ara stok atamasının üretim hızı

$maxthru$ = mevcut en yüksek üretim hızı

$maxpolicy$ = $maxthru$ değerini veren ara stok ataması

$holdthru$ = en yüksek üretim hızı

$found$ = sayaç

$first process$ = ilk döngü

restart process = *maxthru* ve *holdthru* değerleri sıfırlanarak başlatılan ikinci döngü

maxholdthru = enbüyük (*first process*'in *holdthru* değeri, *restart process*'in *holdthru* değeri)

maxpolicy of maxholdthru = *maxholdtru* değerinin ara stok ataması

4.2.2 Ara Stok Alanı Atama Sezgisel Adımları

Algoritma için öncelikle hat dengelemenin belirlenmesi gerekmektedir.

Adım 1: Hat dengelemesi sonucu kaç istasyon açılmış ise eldeki sınırlı sayıdaki ara stok alanı miktarı açılan istasyonların önlerine rasgele atanarak başlangıç ASA ataması belirlenir. Örneğin 3 istasyon açılmış ve elde 13 adet ASA olduğu durumda başlangıç ataması $BP = \{4,4,5\}$ şeklinde olabilir.

Adım 2: *maxthru*, *maxpolicy*, *found* ve *holdthru* değerleri sıfıra eşitlenir.

Adım 3: Döngüye başlamak için başlangıç ASA ataması (BP) için *maxpolicy* atanır. Başlangıç atamasının ara stok alanları arasında birer birim değiş tokuşu ile BP' atamaları oluşturulur. Örnek $BP = \{4,4,5\}$ başlangıç ataması için değiş tokuş yaklaşımı Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Bu yaklaşımda birer adet ASA istasyonlar arasında yer değiştirilerek yeni ASA atamaları oluşturulur. İlk istasyon için değişiklikler sırasıyla şu şekilde gerçekleşir:

- Birinci istasyonun ara stok alanlarından alınan bir birim ikinci istasyonun ara stok alanlarına eklenir ve $BP' = \{3,5,5\}$ ataması elde edilir.
- Birinci istasyonun ara stok alanlarından alınan bir birim üçüncü istasyonun ara stok alanlarına eklenir ve $BP' = \{3,4,6\}$ ataması elde edilir.
- İkinci istasyonun ara stok alanlarından alınan bir birim birinci istasyonun ara stok alanlarına eklenir ve $BP' = \{5,3,5\}$ ataması elde edilir.
- Üçüncü istasyonun ara stok alanlarından alınan bir birim birinci istasyonun ara stok alanlarına eklenir ve $BP' = \{5,4,4\}$ ataması elde edilir.

İlk istasyondan başlanarak tüm istasyonlar için değiş tokuş yapılarak BP' atamaları elde edilir. Hat dengeleme sonucu elde edilen m adet istasyon için $2 * m * (m - 1)$

adet değiş-tokuş ataması vardır. Bu atamalardan tekrarlayan atamaları çıkardığımızda elde edilen özgün atama sayısı $m * (m - 1)$ adet kadardır. Örnek için bakıldığında 3 istasyonlu bir hat için 12 adet değiş-tokuş ataması vardır. Bunlardan tekrarlayan atamalar çıkarıldığında özgün 6 adet atama elde edilir.



Şekil 4.1: Değiş-tokuş yaklaşımı ile BP' oluşturma örneği.

Adım 4: Elde edilen ilk BP' ataması ile döngüye başlanır. Montaj hattı sistem simülasyonu kullanılarak verilen hat dengeleme ve ASA atama (BP') konfigürasyonu için üretim hızı hesaplanır.

Adım 5: Eğer hesaplanan konfigürasyonun üretim hızı $maxthru$ değerinden büyük ise yeni $maxthru$ değeri ve $maxpolicy$ ataması BP' konfigürasyonunun üretim hızına ve ASA atamasına eşitlenir. Eğer hesaplanan konfigürasyonun üretim hızı $maxthru$ değerinden büyük değil ise sıradaki BP' atamasına geçilir ve yeni atama için işlemler tekrar edilir. Eldeki tüm BP' atamaları bitene kadar işlemler tekrarlanır.

Adım 6: Eldeki tüm BP' konfigürasyonları bittikten sonra elde edilen $maxthru$ değerinin $holdthru$ değerinden büyük olup olmadığı kontrol edilir. Eğer büyük ise yeni $holdthru$ değeri $maxthru$ değerine eşitlenir ve bu $maxthru$ değerine sahip BP' konfigürasyonu ile Adım 3'e dönülüp döngüye devam edilir. Eğer büyük değil ise $found$ sayacı bir birim artırılır.

Adım 7: Eğer *found* sayacı 1'e eşit ise *maxthru* ve *holdthru* değerleri sıfıra eşitlenir ve son *holdthru* değerine sahip *BP'* değeri ile Adım 3'e dönülür. *maxthru* ve *holdthru* değerleri sıfıra eşitlenerek yapılan bu proses *restart process* olarak isimlendirilmiştir. Bu prosesin amacı *first process*'te elde edilen çözümün yerel maksimum olması ihtimaline karşın daha iyi bir çözüm aramaktır. *found* değeri 1'e eşit değil ise *first process* ve *restart process* tamamlanmıştır.

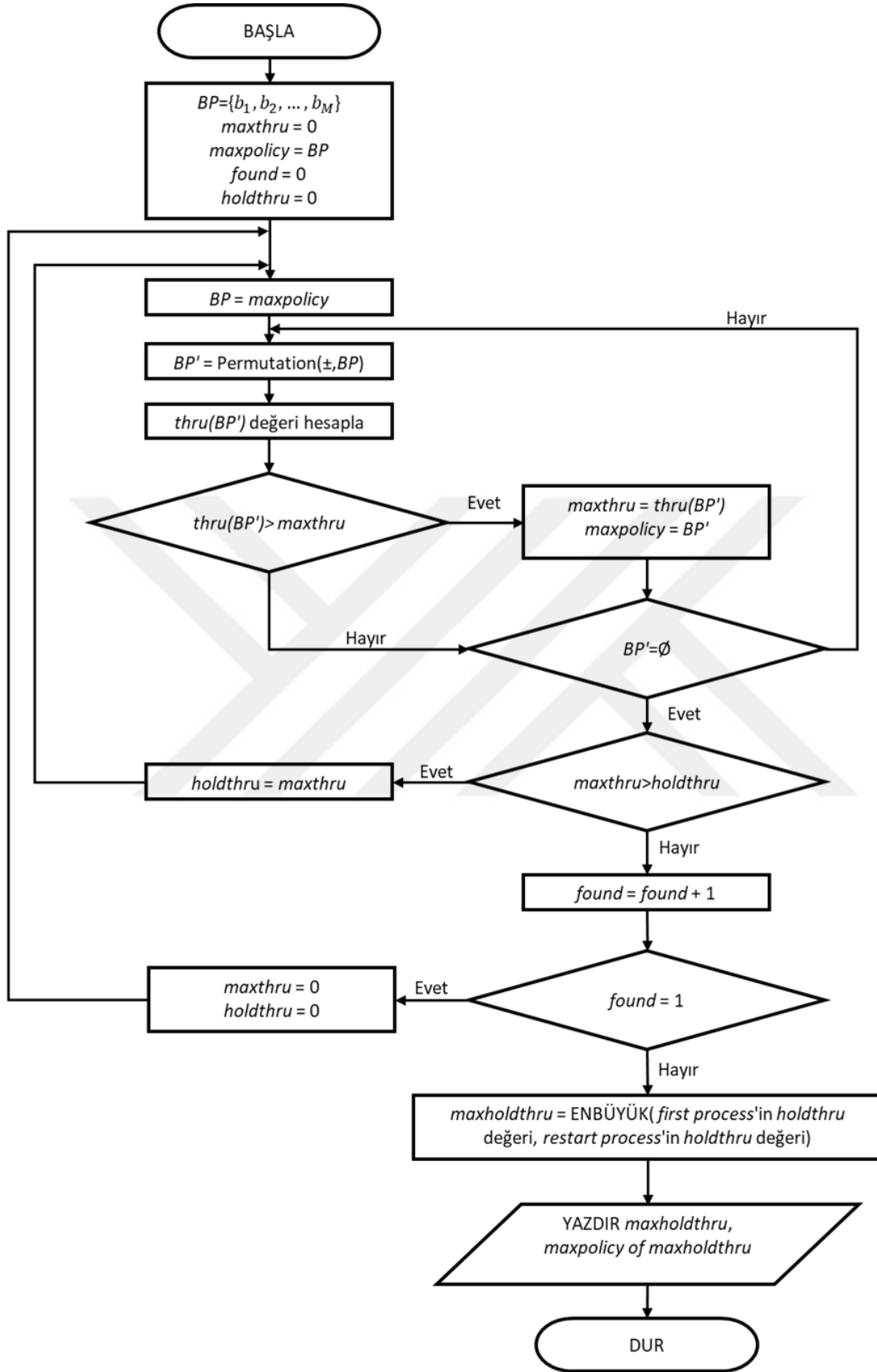
Adım 8: *maxholdthru* değeri ilk ve ikinci döngüden hangisinin *holdthru* değeri büyükse ona eşitlenir.

Adım 9: *maxholdthru* değeri ve bu değere ait ara stok alanı ataması yazdırılarak algoritma tamamlanır.

Ara stok alanı atama algoritmanın sözde kodu Çizelge 4.1'de, iş akış şeması Şekil 4.2' de verilmiştir.

Çizelge 4.1: Ara stok alanı atama algoritmasını sözde kodu.

```
1 : Başla
    $BP \leftarrow \{b_1, b_2, \dots, b_M\}$ 
    $maxthru \leftarrow 0$ 
    $maxpolicy \leftarrow BP$ 
    $found \leftarrow 0$ 
    $holdthru \leftarrow 0$ 
2 : Döngü (first process)
    $BP \leftarrow maxpolicy$ 
   2.1 : Tekrar
        $BP' \leftarrow \text{Permütasyon}(\mp 1, BP)$ 
       Simülasyonu kullanarak thru(BP') değerini hesapla
       Eğer(thru(BP') > maxthru)
            $maxthru \leftarrow thru(BP')$ 
            $maxpolicy \leftarrow BP'$ 
       Eğeri bitir
   2.2 : Tüm permütasyonlar(BP') bitene kadar tekrar et
   2.3 : Eğer(maxthru > holdthru)
        $holdthru \leftarrow maxthru$ 
       Döngüye devam et
   Eğeri bitir
3 : Local (restart process)
    $found \leftarrow found + 1$ 
   3.1 : Eğer(found = 1)
        $maxthru \leftarrow 0$ 
        $holdthru \leftarrow 0$ 
       Döngüye devam et
   Eğeri bitir
4 :  $maxholdthru = \text{enbüyük}(\text{first process'in holdthru değeri, restart process'in holdthru değeri})$ 
5 : Dur
6 : Yazdır(maxholdthru, maxpolicy of maxholdthru)
```



Şekil 4.2: Ara stok alanı atama algoritması iş akış şeması.

4.3 Eş Zamanlı Hat Dengeleme ve ASA Atama Problemi için Sezgisel Model

Ele aldığımız problemde amaç üretim hızını en büyükmektir. Üretim hızını en büyüklerken maliyeti de en küçükmek hedeflenmektedir. Üretim hattı üzerinde açılan her istasyon için işçilik, ekipman ve alan maliyeti gelmektedir. Bu sebeple en az istasyon sayısı ile en büyük üretim hızını yakalamak esastır. Üretim hızını tek etkileyen parametre hat dengelemesi değildir. Aynı zamanda istasyonlar arasında atanan ara stok alanlarının konfigürasyonu da üretim hızını değiştiren bir parametredir. Bu sebeple en büyük üretim hızını elde etmek için hat dengelemesi ve ASA ataması eş zamanlı ele alınmalıdır. Bu bölümde eş zamanlı hat dengeleme ve ASA atama problemi için geliştirilen yaklaşım anlatılmıştır.

4.3.1 Eş zamanlı hat dengeleme ve ASA atama sezgisel model kavramları

Sezgisel modelde kullanılan kavramlar aşağıda verilmiştir.

C = Hedef çevrim süresi

C' = Yeni çevrim süresi

Z = Atanabilecek ara stok alanı sayısı

$C^k[B_1, B_2, \dots, B_M]$ = Ara stok alanı konfigürasyonuna göre hattın hesaplanan çevrim süresi

k = İterasyon sayısı

ε = Sabit sayı

C değeri hedeflenen üretim adeti kullanılarak belirlenmektedir. Gelen talebe göre bir vardiyada üretilmesi gereken ürün sayısı ortaya çıkmaktadır. Vardiyada çalışılan sürenin hedeflenen üretim sayısına bölünmesiyle C bulunmaktadır. Örnek bir C hesaplaması aşağıda verilmiştir.

Vardiyada üretilmek istenen ürün miktarı = 1170 adet

Vardiyalık çalışma süresi = 430 dk = 25800 sn

$$C = \frac{25800 \text{ sn}}{1170 \text{ adet}} \sim 22 \text{ sn/adet}$$

C' değeri algoritmanın başında C değerine eşitlenmektedir ve döngüler sonucu yapılan ε değeri kadar azaltmalar bu değer üzerinden yapılmaktadır. C değeri sabit olarak tutulmaktadır.

Ele alınan problemde ASA sayısı limitlidir. Z adet atanabilecek ASA olduğu kabul edilir. Başlangıçta bu ara stok alanları istasyonlar arasına rasgele dağıtılır. Ele alınan problemde ilk istasyonun aç kalmayacağı varsayılmıştır. Bu sebeple ilk istasyona ASA atanmaz.

$C^k[B_1, B_2, \dots, B_M]$ k. iterasyonun ASA ve hat dengeleme konfigürasyonunun hesaplanan çevrim süresini göstermektedir. B_M , M . İstasyondan önce atanan ara stok alanı sayısını göstermektedir. Örneğin; $C^2[0,3,4,4]$ konfigürasyonu sezgiselin 2. iterasyonunda 4 istasyonlu bir dengelemenin 1. istasyonundan önce 0 ASA, 2. istasyonundan önce 3 adet ASA, 3. istasyonundan önce 4 adet ASA ve 4. istasyonundan önce 4 adet ASA konfigürasyonun çevrim süresini temsil etmektedir.

ε probleme göre belirlenen bir sabittir. Hat dengelemesini değiştirecek en küçük sabit belirlenerek ε değeri olarak kullanılmaktadır. Çalışmada ε değeri operasyon kümesi içindeki operasyonlar arasındaki en küçük fark olarak alınmıştır. Örneğin ε değeri Gunther problemi için 1 alınırken, gerçek hayat problemi için 0,1 alınmaktadır.

4.3.2 Eş zamanlı hat dengeleme ve ASA atama sezgisel adımları

Eş zamanlı hat dengeleme ve ara stok atama sezgiseli için öncelikle her iki problem için de ayrı ayrı çözüm yöntemi geliştirilmiştir. Ardından bu yöntemler bir sezgisel ile eş zamanlı hale getirilerek tekrarlı bir çözüm yöntemi geliştirilmiştir. Sezgisel iki problem birbirlerinin girdisi ve çıktısı olacak şekilde tasarlanmıştır.

Adım 1: Bölüm 4.3.1' de anlatıldığı gibi C hesaplanır.

Adım 2: C' değeri C değerine eşitlenir.

Adım 3: C' değerine göre Bölüm 4.1'de anlatılan matematiksel model çözülür. Matematiksel model sonucu optimal istasyon sayısı ve hangi operasyonların hangi

istasyonlara atanacağı bilgisi elde edilir. Elde edilen istasyonların arasına elimizde bulunan limitli sayıdaki ara stok alanı rasgele atanır. Bu atamada dikkat edilmesi gerek nokta ilk istasyondan önce ASA atanmamasıdır. Çünkü problemde ilk istasyonun aç kalmadığı varsayılmıştır ve bu nedenle ASA atansa bile çevrim süresi hesabında dikkate alınmamaktadır. Örneğin matematiksel model sonucu optimal istasyon sayısının 4 bulunduğu ve eldeki limitli ara stok miktarının 10 adet olduğu bir örnek için başlangıç ASA ataması $C^0[0,3,3,4]$ şeklinde belirlenebilir.

Adım 4: 2. adımda belirlenen başlangıç ataması kullanılarak ara stok alanı atama sezgiseli uygulanır.

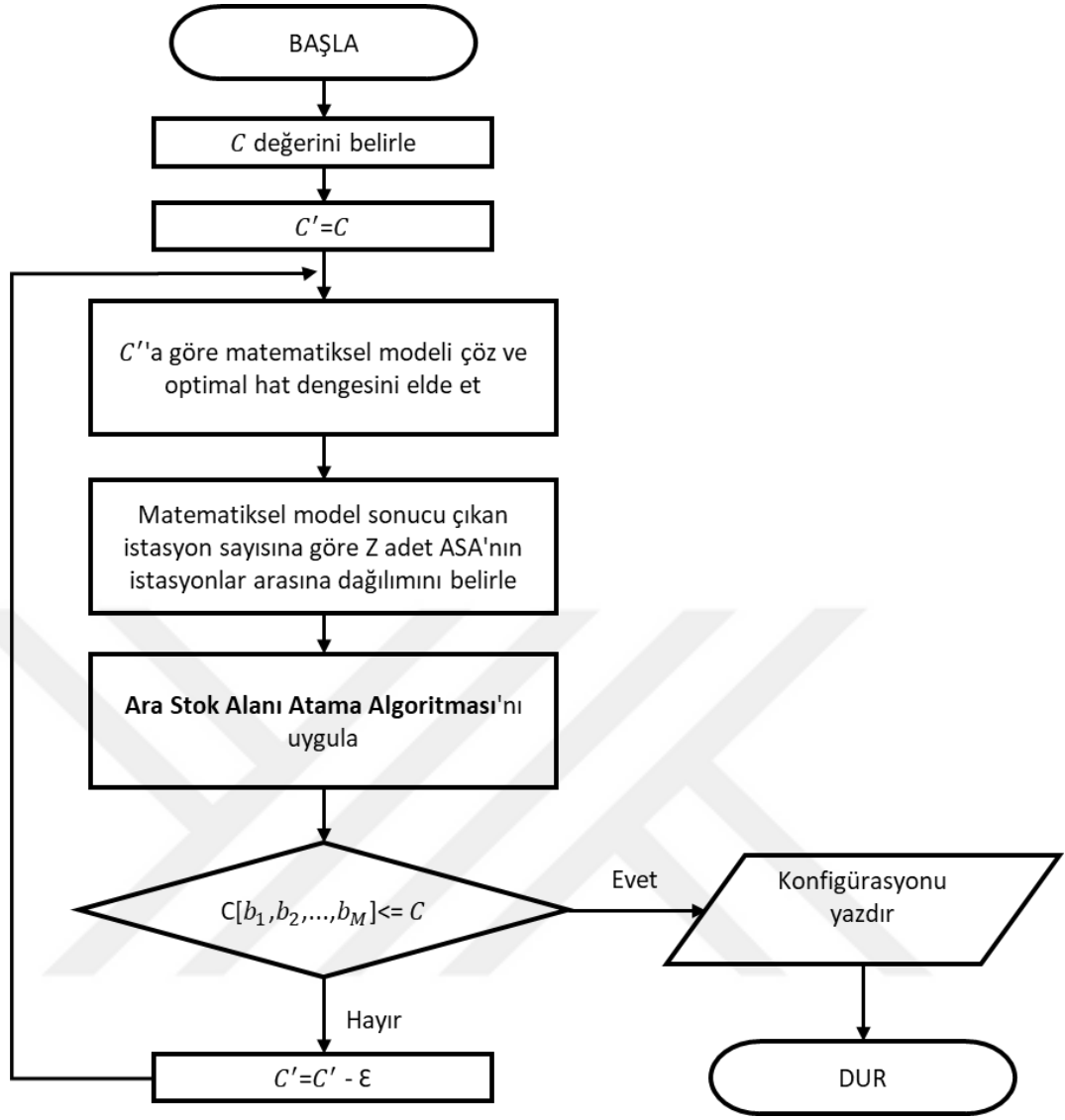
Adım 5: ASA atama sezgiseli sonucu bulunan en iyi ara stok atama konfigürasyonunun çevrim zamanı hesaplanarak C değerinden küçük eşit olup olmadığı kontrol edilir. Eğer C değerinden büyük ise bu konfigürasyon, eldeki istasyon sayısı ve ara stok ataması ile hedeflenen üretim hızı elde edilemeyecek demektir. Bu nedenle hedefi yakalayabilecek başka bir çözüm bulunması için C' değeri hat dengelemesini değiştirecek bir ϵ değeri kadar azaltılarak yeni bir C' değeri hesaplanır. Bu yeni C' değeri ile Adım 3'e dönülür ve adımlar tekrarlanır.

Adım 6: Bu döngü elde edilen bir konfigürasyonun çevrim süresi C değerinden küçük eşit olana kadar devam ettirilir. C değerinden küçük olduğu durumda durulur ve konfigürasyon yazdırılır. Bu konfigürasyon hedeflenen üretim hızını verecek hat dengelemesini ve ASA atamasını temsil etmektedir.

Eş zamanlı hat dengeleme ve ASA atama sezgiselinin sözde kodu Çizelge 4.2'de, iş akışı şeması Şekil 4.3'te verilmiştir.

Çizelge 4.2: Eş zamanlı hat dengeleme ve ASA atama sezgiselinin sözde kodu.

- 1 : C değerini belirle.
- 2 : C' değerini C değerine eşitle.
- 3 : C' değerine göre **matematiksel modeli** çöz ve **optimal** hat dengesini elde et.
- 4 : Matematiksel model sonucu elde edilen istasyonların arasına Z adet ara stoğun dağılımı belirlenir.
- 5 : **Ara Stok Atama Algoritmasını** uygula.
- 6 : Algoritma sonucunda elde edilen hat dengelemesi ve ASA atamasının çevrim süresini hesapla.
- 6.1 : Eğer ($C^k[B_1, B_2, \dots, B_M] \leq C$)
 - 5.1.1: Konfigürasyonu yazdır
 - 5.1.2: Dur
- 6.2 : Başka
 - 5.2.1 : $C' = C' - \epsilon$
 - 5.2.2 : 3. Adıma dönüp adımları tekrarla
- 6.3 : Eğeri bitir



Şekil 4.3: Eş zamanlı hat dengeleme ve ASA atama algoritması iş akış şeması.

4.4 Montaj Hattı Simülatörü

Tiacci (2012)'nin Java'da geliştirdiği montaj hattı simülatörü, geliştirdiğimiz eş zamanlı montaj hattı dengeleme ve ASA atama sezgiselinin her döngüsünde hesaplanması gereken üretim hızı ve çevrim süresini hesaplamak için kullanılmıştır. Bu simülatör çevrim süresini (veya üretim hızı) performans ölçütü olarak kullanan modeller için hızlı sonuç alma ve modele entegre etme açısından kullanışlı bir yöntemdir. Simülatör karışık modelli, paralel istasyonlu, ara stoklu ve stokastik operasyon süreli gibi kompleks hatlarda performans hesaplayabilmektedir.

Simülâtörün hattın çevrim süresini ve üretim hızını hesaplamak için operasyon sürelerine, operasyon sürelerinin dağılımına, değişim katsayısına (cv), model sıralamasına (ele alınan gerçek hayat problemi çok modellidir) ve hat konfigürasyonuna ihtiyacı vardır. Hat konfigürasyonu simülâtöre iki boyutlu bir dizi şeklinde verilmektedir. Bu dizide hattın kaç istasyondan oluştuğu, her istasyon öncesi kaç adet ASA olduğu ve hangi operasyonun hangi istasyona atandığı bilgisi verilir. Ardından simülâtör istenen adet veya zaman birimi cinsinden kesikli olay simülasyonu yaparak ortalama üretim hızını ve çevrim süresini hesaplamaktadır.

Aynı zamanda Tiacci (2015) çalışmasında, geliştirdiğı eş zamanlı montaj hattı dengeleme ve ASA atama modeli için gerekli olan çevrim süresi hesabını bu simülâtör ile yapmıştır.

5. NUMERİK ANALİZLER

Önerilen sezgisel algoritma Java dilinde kodlanmıştır. Nümerik denemeler iki tür problem seti üzerinde gerçekleştirilmiştir. İlk problem tipi bir bulaşık makinesi fabrikasına ait gerçek verileri içermektedir. İkinci tür problem literatürdeki (Scholl, 1993) bir problem baz alınarak üretilmiş problemleri içerir. Aşağıda bu problemler ve sonuçlar detayıyla açıklanmıştır.

Çözümler 8 GB RAM'i olan Intel(R) Core(TM) i5-6200U CPU @2.30GHz işlemcili bilgisayar ile alınmıştır. Matematiksel model için IBM ILOG CPLEX Optimization Studio Versiyon 12.6.2 kullanılmıştır.

Hattın üretim hızını ve çevrim süresini hesaplayan simülasyon için ısınma periyodu 10.000 birimin tamamlanması, simülasyon uzunluğu 100.000 birimin tamamlanması olarak alınmıştır. Yapılan ön denemeler neticesinde 10.000 birimin çevrim süresinin, uzun dönem ortalama değer civarında stabil hale gelmesi için yeterli olduğu değerlendirilmiştir. Simülasyon süresi çevrim süresi ortalama tahminin standart sapmanın en azlanması için oldukça yüksek bir değer olan 100.000 birim olarak alınmıştır.

5.1 Gerçek Hayat Problemi için Sezgisel Sonuçları

Geliştirilen sezgisel ele alınan bir gerçek hayat problemi için çözülmüştür. Bir beyaz eşya üretim fabrikasında bulunan bir montaj hattı ele alınmıştır. Ele alınan hat parçasında istasyon açılabilir veya ara stok yapılabilir 45 modül bulunmaktadır. 45 modülden istasyon açılan modül sayısı çıkarıldığında atama yapılabilir ara stok sayısı ortaya çıkmaktadır. Gerçek hayat problemine ait operasyon süresi tablosu ÇizelgeEk. 1'de, öncelik matrisi ise ÇizelgeEk. 2'de verilmiştir. 46 operasyonlu problem için hedef çevrim süresi 22 sn olarak belirlenmiştir. Operasyonların stokastikliğini modellemek için operasyon sürelerinin cv değeri 0,3 olan normal dağılıma sahip olduğu varsayılmıştır. Stokastiklikle ilgili

varsayımımız datayı aldığımız fabrikadaki gözlem ve görüşler doğrultusunda kabul edilmiştir.

Sırasıyla sezgisel adımları izlendiğinde;

- Öncelikle hat dengelemesi çözülmüştür. Hat dengelemesi sonucu optimal istasyon sayısı 13 bulunmuştur. Hat üzerinde 13 istasyon açıldıktan sonra geriye kalan ara stok olarak kullanılacak modül sayısı 32'dir.
- Sezgiselin diğer adımında açılan istasyonların arasına 32 modül olabildiğince eşit atamaya çalışılarak dağıtılmıştır ve ilk atama elde edilmiştir.
- Ardından ilk ASA ataması kullanılarak Ara Stok Atama Algoritması uygulanmıştır. Bu algoritmanın sonucunda elde edilen ara stok atama ve hat dengeleme konfigürasyonunun çevrim süresi simülasyon sonucunda 21,5473 sn bulunmuştur. Hedef çevrim süresi olan 22 sn' den küçük olduğu için sezgisel durdurulmuştur.

Sezgisel sonucu hedef çevrim süresini sağlayan optimal hat dengelemesi ve en iyi ASA ataması Çizelge 5.1'de tabloda verilmiştir. Gerçek hayat probleminin mevcut hat dengelemesinin ve ASA atamasının tablosu Çizelge 5.2'de verilmiştir.

Çizelge 5.1: Gerçek hayat problemi sezgisel sonucu dengeleme ve ASA ataması.

İstasyon	Operasyon Ataması	ASA Ataması	Ortalama İstasyon Süresi (sn)
1	1,2,32,42	0	21,3
2	4,5,8,	3	21
3	6,7,26	5	21,2
4	9,16,17,18	3	20,6
5	10,13,14,15	1	19,2
6	12,21,22,25	1	20,5
7	19,20,23,24	2	21,1
8	27,30	4	19,6
9	3,34,38,39	3	21,5
10	11,33,37,41	2	19,1
11	40,43	2	19,5
12	28,29,31,35,36,45	4	21,4
13	44,46	2	20,3

Eş zamanlı sezgiselin adımlarını gösteren detay çözüm tablosu ÇizelgeEk. 3'te verilmiştir.

Çizelge 5.2: Gerçek hayat problemi mevcut hat dengeleme ve ASA atama sonucu.

İstasyon	Operasyon Ataması	ASA Ataması	Ortalama İstasyon Süresi
1	1,2,3,8	4	20,3
2	4,5,11	2	21
3	6,9	1	17
4	7,10,26	0	19,8
5	12,13,14,15	1	16,6
6	16,17,18	1	12,8
7	19,20,21	1	14,6
8	22,23,24,25	0	21,8
9	27,28,29,35	1	20,8
10	30,31,32	2	15,4
11	33,34,36	2	8,3
12	37,38,39	2	20,3
13	40,41,42	4	21,8
14	43,44,45	2	19,3
15	46	2	16,5
Ele alınan montaj hattında 5 adet ASA 15. istasyon sonrasında konumlandırılmış.			

Mevcut durum ve sezgisel sonucu alınan çözüm karşılaştırıldığında Çizelge 5.3'teki tablo elde edilmiştir. Sezgisel sonucu elde edilen istasyon sayısı mevcut duruma göre 2 istasyon azdır. Böylelikle 2 işçi kazancı elde edilebilecektir. Adam kazancının yanında bir istasyon için gerekli ekipman ve alan maliyetinden de kazanç sağlanacaktır. Çevrim süresinde sağlanan %2'lik iyileşme ile vardiyada 24 adet fazla üretim yapılabilir. Bu durumda ayda 24 iş günü ve günlük 3 vardiyadan hesaplandığında yılda 18.072 adet ürün kazanç vardır.

Çizelge 5.3: Sezgisel sonucu ile mevcut durumun karşılaştırma tablosu.

	İstasyon Sayısı	Hattın Çevrim Süresi (sn)	Vardiyalık Üretim Adeti
Mevcut durum	15	22,0002	1173 birim
Sezgisel sonucu	13	21,5474	1197 birim

5.2 Gunther Veri Seti için Sezgisel Sonuçları

Geliştirilen sezgisel gerçek hayat probleminin dışında Scholl (1993)'un makalesinde bulunan örnek data setlerinden biri olan Gunther data seti için de çözülmüştür. Gunther data setine ait operasyon süresi ÇizelgeEk. 4'te, öncelik matrisi ise ÇizelgeEk. 5'te verilmiştir.

35 operasyonlu Gunther problemi için hedef çevrim süresi 45 sn olarak belirlenmiştir. Gunther verisi sezgiselin farklı toplam ASA sayılarında nasıl çözüm verdiğini görebilmek için üç farklı ara stok değeri 33,25 ve 20 adet ve iki farklı cv değeri 0,5 ve 0,2 ile çözülmüştür. Beklentimiz ara toplam ara stok adedi azaldıkça ve operasyonların cv değerleri arttıkça önerilen eş zamanlı çözüm yaklaşımının getirisinin artacağıdır.

5.2.1 Ara stok alanı sayısı=33 için çözüm sonuçları

Geliştirilen sezgisel $cv=0,5$ ve $cv=0,2$ değişkenlik katsayıları ile çözülmüştür. $cv=0,5$ değişkenlik katsayısı ile alınan eş zamanlı sezgiselin çözüm sonuçları Çizelge 5.4' te, $cv=0,2$ için alınan sonuçlar da Çizelge 5.5' te verilmiştir.

Çizelge 5.4: Ara stok alanı sayısı=33, $cv=0,5$ için sezgisel sonuçları.

C_0	İstasyon Sayısı	Üretim Hızı	Ortalama Çevrim Süresi	ASA Atama Sonucu
45	12	0,021390	46,750619	0,4,2,1,1,2,5,5,5,3,1,4
44	12	0,021753	45,971654	0,2,3,3,2,2,3,3,3,6,3,3
43	13	0,022578	44,290038	0,2,1,3,3,2,3,3,1,3,3,4,5

Çizelge 5.5: Ara stok alanı sayısı=33, $CV=0,2$ için sezgisel sonuçları.

C_0	İstasyon Sayısı	Üretim Hızı	Ortalama Çevrim Süresi	ASA Atama Sonucu
45	12	0,022143	45,160801	0,3,1,1,3,1,4,7,7,1,3,2
44	12	0,022598	44,251688	0,3,4,2,3,1,1,6,5,3,1,4

Elde edilen sonuçları kıyaslayabilmek Çizelge 5.6 oluşturulmuştur. 33 adet toplam ASA istasyonlar arasına birbirine yaklaşık sayıda olacak şekilde paylaştırılmıştır. Bu eşit atama altında, $cv=0,5$; $cv=0,4$; $cv=0,3$; $cv=0,2$; $cv=0,1$ ve $cv=0$ değerleri için hattın çevrim süresi hesaplanmıştır. Eşit ASA atama ile karşılaştırmanın mantığı, eşit ASA atamanın en basit ve ilk akla gelecek ASA atama şekli olacaktır.

Çizelge 5.6'da sabit sayıda ASA ile farklı cv değerlerinin hattın çevrim süresi üzerine etkisi gösterilmiştir. Hat dengelemesi ve ASA atamaları sabit tutularak cv değerleri değiştirilmiştir. Tablodan görüldüğü üzere cv değerleri arttıkça hattın çevrim süresi artmaktadır. Bunun sebebi operasyonlardaki değişkenliğin artmasıdır. $cv=0$ olduğu durum deterministik operasyon süreli hatlar için geçerlidir.

40 sn'den daha düşük çözümlerin konulmamasının sebebi örnek olarak kullanılan Gunther verisinde en büyük operasyon süresinin 40 sn olmasıdır. Bu nedenle 40 sn'den daha düşük hedeflerde Gunther verisi için optimal hat dengelemesi bulunamaz.

5.2.2 Ara stok alanı sayısı=25 için çözüm sonuçları

Geliştirilen sezgisel $cv=0,5$ ve $cv=0,2$ değişkenlik katsayıları ile çözülmüştür. $cv=0,5$ değişkenlik katsayısı ile alınan eş zamanlı sezgiselin çözüm sonuçları Çizelge 5.7'de, $cv=0,2$ için alınan sonuçlar da Çizelge 5.8'de verilmiştir.

Çizelge 5.6: Ara stok alanı sayısı=33 için CV karşılaştırma tablosu.

C_0	İstasyon sayısı	ASA Sayısı	CV	ASA ataması	Simülasyon sonucu çevrim süresi
45	12	33	0,5	0,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3	47,317176
44	12	33	0,5	0,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3	46,392106
43	13	33	0,5	0,3,3,3,3,3,3,3,3,3,2,2,2	46,272239
42	13	33	0,5	0,3,3,3,3,3,3,3,3,3,2,2,2	45,901232
41	14	33	0,5	0,3,3,3,3,3,3,3,3,2,2,2,2,2,2	44,702224
40	14	33	0,5	0,3,3,3,3,3,3,3,3,2,2,2,2,2,2	44,127884
C_0	İstasyon sayısı	ASA Sayısı	CV	ASA ataması	Simülasyon sonucu çevrim süresi
45	12	33	0,4	0,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3	46,404115
44	12	33	0,4	0,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3	45,448018
43	13	33	0,4	0,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3,2,2,2	44,985002
42	13	33	0,4	0,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3,2,2,2	44,570149
41	14	33	0,4	0,3,3,3,3,3,3,3,3,2,2,2,2,2,2	43,293483
40	14	33	0,4	0,3,3,3,3,3,3,3,3,2,2,2,2,2,2	42,749119
C_0	İstasyon sayısı	ASA Sayısı	CV	ASA ataması	Simülasyon sonucu çevrim süresi
45	12	33	0,3	0,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3	45,744541
44	12	33	0,3	0,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3	44,775974
43	13	33	0,3	0,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3,2,2,2	43,958316
42	13	33	0,3	0,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3,2,2,2	43,480574
41	14	33	0,3	0,3,3,3,3,3,3,3,3,2,2,2,2,2,2	42,168034
40	14	33	0,3	0,3,3,3,3,3,3,3,3,2,2,2,2,2,2	41,579055
C_0	İstasyon sayısı	ASA Sayısı	CV	ASA ataması	Simülasyon sonucu çevrim süresi
45	12	33	0,2	0,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3	45,326370
44	12	33	0,2	0,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3	44,344647
43	13	33	0,2	0,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3,2,2,2	43,288105
42	13	33	0,2	0,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3,2,2,2	42,684812
41	14	33	0,2	0,3,3,3,3,3,3,3,3,2,2,2,2,2,2	41,380075
40	14	33	0,2	0,3,3,3,3,3,3,3,3,2,2,2,2,2,2	40,702952
C_0	İstasyon sayısı	ASA Sayısı	CV	ASA ataması	Simülasyon sonucu çevrim süresi
45	12	33	0,1	0,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3	45,078134
44	12	33	0,1	0,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3	44,086347
43	13	33	0,1	0,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3,2,2,2	43,002711
42	13	33	0,1	0,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3,2,2,2	42,182467
41	14	33	0,1	0,3,3,3,3,3,3,3,3,2,2,2,2,2,2	41,080946
40	14	33	0,1	0,3,3,3,3,3,3,3,3,2,2,2,2,2,2	40,191178
C_0	İstasyon sayısı	ASA Sayısı	CV	ASA ataması	Simülasyon sonucu çevrim süresi
45	12	33	0	0,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3	45,000000
44	12	33	0	0,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3	44,000000
43	13	33	0	0,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3,2,2,2	43,000000
42	13	33	0	0,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3,2,2,2	42,000000
41	14	33	0	0,3,3,3,3,3,3,3,3,2,2,2,2,2,2	41,000000
40	14	33	0	0,3,3,3,3,3,3,3,3,2,2,2,2,2,2	40,000000

Çizelge 5.7: Ara stok alanı sayısı=25, cv=0,5 için sezgisel sonuçları.

C_0	İstasyon Sayısı	Üretim Hızı	Ortalama Çevrim Süresi	ASA Atama Sonucu
45	12	0,021172	47,233099	0,3,2,1,1,1,3,3,4,3,1,3
44	12	0,021483	46,549021	0,3,2,1,1,2,1,3,4,2,3,3
43	13	0,022334	44,774117	0,0,1,0,3,2,3,1,3,3,1,3,5

Sezgisel adımlarının çözüm adımlarını gösteren tablo ara stok alanı sayısı=25 ve cv=0,5 örneği için ÇizelgeEk. 6'da verilmiştir.

Çizelge 5.8: Ara stok alanı sayısı=25, CV=0,2 için sezgisel sonuçları.

C_0	İstasyon Sayısı	Üretim Hızı	Ortalama Çevrim Süresi	ASA Atama Sonucu
45	12	0,022116	45,215434	0,3,2,1,1,1,3,4,6,0,2,2
44	12	0,022557	44,332411	0,2,2,2,2,1,1,5,4,2,1,3

Elde edilen sonuçları kıyaslayabilmek Çizelge 5.9 oluşturulmuştur. 25 adet ara stok alanı istasyonlar arasına birbirine yaklaşık sayıda olacak şekilde paylaştırılmıştır. cv=0,5; ve cv=0,2 değerleri için hattın çevrim süresi hesaplanmıştır.

Çizelge 5.9: Ara stok alanı sayısı=25 için CV karşılaştırma tablosu.

C_0	İstasyon sayısı	ASA Sayısı	CV	ASA ataması	Simülasyon sonucu çevrim süresi
45	12	25	0,5	0,3,3,3,2,2,2,2,2,2,2,2	48,278047
44	12	25	0,5	0,3,3,3,2,2,2,2,2,2,2,2	47,380502
43	13	25	0,5	0,3,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2	46,290072
42	13	25	0,5	0,3,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2	45,920238
41	14	25	0,5	0,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,1	44,824542
40	14	25	0,5	0,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,1	44,140917
C_0	İstasyon sayısı	ASA Sayısı	CV	ASA ataması	Simülasyon sonucu çevrim süresi
45	12	25	0,2	0,3,3,3,2,2,2,2,2,2,2,2	45,477124
44	12	25	0,2	0,3,3,3,2,2,2,2,2,2,2,2	44,497418
43	13	25	0,2	0,3,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2	43,276873
42	13	25	0,2	0,3,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2	42,669227
41	14	25	0,2	0,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,1	41,500550
40	14	25	0,2	0,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,1	40,703742

5.2.3 Ara Stok Alanı Sayısı=20 için Çözüm Sonuçları

Geliştirilen sezgisel $cv=0,5$ ve $cv=0,2$ değişkenlik katsayıları ile çözülmüştür. $cv=0,5$ değişkenlik katsayısı ile alınan eş zamanlı sezgiselin çözüm sonuçları Çizelge 5.10'da, $cv=0,2$ için alınan sonuçlar da Çizelge 5.11'de verilmiştir.

Çizelge 5.10: Ara stok alanı sayısı=20, $cv=0,5$ için sezgisel sonuçları.

C_0	İstasyon Sayısı	Üretim Hızı	Ortalama Çevrim Süresi	ASA Atama Sonucu
45	12	0,020892	47,864884	0,2,1,1,1,1,3,2,3,2,1,3
44	12	0,021277	46,998463	0,2,2,1,1,1,1,2,3,2,2,3
43	13	0,022053	45,345327	0,0,0,1,2,1,2,1,3,2,1,3,4
42	13	0,022435	44,574192	0,2,1,1,1,2,1,1,1,2,1,3,4

Çizelge 5.11: Ara stok alanı sayısı=20, $CV=0,2$ için sezgisel sonuçları.

C_0	İstasyon Sayısı	Üretim Hızı	Ortalama Çevrim Süresi	ASA Atama Sonucu
45	12	0,022137	45,173546	0,2,1,2,0,1,3,3,4,1,2,1
44	12	0,022562	44,322187	0,2,1,2,1,1,1,3,3,2,1,3

Elde edilen sonuçları kıyaslayabilmek Çizelge 5.12 oluşturulmuştur. 20 adet ara stok alanı istasyonlar arasına birbirine yaklaşık sayıda olacak şekilde rasgele paylaştırılmıştır. $cv=0,5$ ve $cv=0,2$ değerleri için hattın çevrim süresi hesaplanmıştır.

Çizelge 5.12: Ara stok alanı sayısı=20 için CV karşılaştırma tablosu.

C_0	İstasyon sayısı	ASA Sayısı	CV	ASA ataması	Simülasyon sonucu çevrim süresi
45	12	20	0,5	0,2,2,2,2,2,2,2,2,2,1,1	49,056687
44	12	20	0,5	0,2,2,2,2,2,2,2,2,2,1,1	48,903498
43	13	20	0,5	0,2,2,2,2,2,2,2,2,1,1,1,1	48,535734
42	13	20	0,5	0,2,2,2,2,2,2,2,2,1,1,1,1	48,172616
41	14	20	0,5	0,2,2,2,2,2,2,2,1,1,1,1,1,1	47,074545
40	14	20	0,5	0,2,2,2,2,2,2,2,1,1,1,1,1,1	46,569011
C_0	İstasyon sayısı	ASA Sayısı	CV	ASA ataması	Simülasyon sonucu çevrim süresi
45	12	20	0,2	0,2,2,2,2,2,2,2,2,2,1,1	45,486630
44	12	20	0,2	0,2,2,2,2,2,2,2,2,2,1,1	44,636615
43	13	20	0,2	0,2,2,2,2,2,2,2,2,1,1,1,1	43,748258
42	13	20	0,2	0,2,2,2,2,2,2,2,2,1,1,1,1	43,222364
41	14	20	0,2	0,2,2,2,2,2,2,2,1,1,1,1,1,1	41,901909
40	14	20	0,2	0,2,2,2,2,2,2,2,1,1,1,1,1,1	41,305149

5.2.4 Sonuçların Karşılaştırılması

Elde edilen sonuçlar arasında istatikselsel olarak fark olduğunu göstermek için güven aralığı hesaplanmıştır. Güven aralığı hesaplamasında Eşitlik (5.1) kullanılmıştır.

$$\bar{X} \mp Z_{\frac{\alpha}{2}} \frac{S}{\sqrt{N}} \quad 5.1$$

Denklemdede \bar{X} simülasyondan alınan ortalama çevrim süresidir. α değeri 0,1 olarak alınmıştır. S değeri simülasyondan alınan çevrim süresi standart sapmasıdır. N değeri de 100.000 birim çalıştırılan simülasyon uzunluğudur.

Çizelge 5.13'te Bölüm 5.2.1, Bölüm 5.2.2 ve Bölüm 5.2.3'te bulunan sonuçlar özetlenmiş ve karşılaştırılmıştır.

Çizelge 5.13'e göre %90 güvenlilikte iki sistem, sezgisel ile alınan sonuç ile eşit ASA ataması sonucu alınan sonuç, arasında istatikselsel olarak anlamlı fark olduğunu söyleyebiliriz. 6 karşılaştırmanın 5 tanesinde çevrim süresi açısından istatikselsel olarak anlamlı fark gözlenmiştir. 3. Karşılaştırmada çevrim süresi açısından istatikselsel anlamda fark olmasa da istasyon sayısı açısından daha iyi sonuç alınmıştır.

Sonuçlar karşılaştırıldığında ara stok sayısı=33 ve cv=0,5 değeri ile alınan eş zamanlı sezgisel sonucunda 13 istasyon ve 44,290038 sn çevrim süresi ile çözüm bulunmuştur. Aynı ASA sayısı ve cv değeri ile eşit ara stok ataması sonucunda 14 istasyon ve 44,70224 sn ile hedef çevrim süresinin yakalanabildiği görülmüştür. Bu durumda 1. karşılaştırmada sezgisel model kullanılarak 1 istasyon kazancı ve çevrim süresi iyileştirmesi elde edilmiştir. cv=0,2 değeri ile yapılan 2. karşılaştırmada sezgisel sonucunun çevrim süresi bakımında daha iyi sonuç verdiği görülmüştür.

ASA sayısı=25 ve cv=0,5 değeri ile yapılan 3. Karşılaştırmada istatikselsel anlamda fark yakalanamasa da 13 istasyon sayısı ile eşit ASA atama sonucuna göre 1 istasyon kazanç sağlamıştır. cv=0,2 değeri ile yapılan 4. karşılaştırmada sezgisel sonucunun çevrim süresi bakımında daha iyi sonuç verdiği görülmüştür.

Çizelge 5.13: Sezgisel sonucu ve eşit ASA atama sonucu karşılaştırması.

		İstasyon Sayısı	CV	ASA Sayısı	Çevrim Süresi	ASA Atama Sonucu	O. Çevrim Süresi Alt Limit	O. Çevrim Süresi Üst Limit
1	Sezgisel sonucu	13	0,5	33	44,290038	0,2,1,3,3,2,3,3,1,3,3,4,5	44,179201	44,400875
	Eşit ara stok atama sonucu	14			44,702224	0,3,3,3,3,3,3,3,2,2,2,2,2	44,585373	44,819075
2	Sezgisel sonucu	12	0,2	33	44,251688	0,3,4,2,3,1,1,6,5,3,1,4	44,209140	44,294236
	Eşit ara stok atama sonucu	12			44,344647	0,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3	44,301505	44,387789
3	Sezgisel sonucu	13	0,5	25	44,774117	0,0,1,0,3,2,3,1,3,3,1,3,5	44,661065	44,887170
	Eşit ara stok atama sonucu	14			44,824542	0,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,1	44,707397	44,941688
4	Sezgisel sonucu	12	0,2	25	44,332411	0,2,2,2,2,1,1,5,4,2,1,3	44,289272	44,375551
	Eşit ara stok atama sonucu	12			44,497418	0,3,3,3,2,2,2,2,2,2,2,2	44,453822	44,541014
5	Sezgisel sonucu	13	0,5	20	44,574192	0,2,1,1,1,2,1,1,1,2,1,3,4	44,461678	44,686707
	Eşit ara stok atama sonucu	Çözüm yok			Çözüm yok	Çözüm yok	-	-
6	Sezgisel sonucu	12	0,2	20	44,322187	0,2,1,2,1,1,1,3,3,2,1,3	44,278599	44,365775
	Eşit ara stok atama sonucu	12			44,636615	0,2,2,2,2,2,2,2,2,2,1,1	44,592435	44,680794

ASA sayısı=20 ve cv=0,5 değeri ile alınan sezgisel sonucunda 13 istasyon sayısı ve 44,57419 sn çevrim süresi ile çözüm bulunmuştur. Aynı ASA sayısı ve cv değeri ile eşit ASA atama sonucunda hedef çevrim süresini verecek bir çözüm bulunamamıştır. Bunun temel nedeni hedef çevrim süresinin en yüksek ortalama operasyon süresine yakın olması ve değişkenliğin yüksek olmasıdır. Bu durumda istasyon sayısını ne kadar artırsakta en büyük operasyon süresinin değişkenliği, eşit ASA atama kısıtı altında, hedef çevrim süresinin elde edilmesine engel olmaktadır. Bu karşılaştırmada görüldüğü üzere eş zamanlı sezgisel kullanılarak eşit ara stok ataması ile çözüm

bulunamayan probleme çözüm bulunmuştur. $cv=0,2$ değeri ile yapılan 6. karşılaştırmada sezgisel sonucunun çevrim süresi bakımından daha iyi sonuç verdiği görülmüştür.

5. karşılaştırmadan da görüldüğü üzere geliştirilen eş zamanlı sezgiselin önemi düşük toplam ASA sayısı, yüksek değişkenlik ve maksimum operasyon süresi hedef çevrim süresine yakınlıkça daha da artmaktadır.

Sonuçlardan görüldüğü gibi değişkenlik katsayısı arttıkça hedeflenen çevrim süresini stokastiklikten dolayı yakalamak zorlaşmaktadır. Bu durumlarda ara stokların etkili bir şekilde atanması hedef çevrim süresine ulaşılmasında etkili olmaktadır. Sonuçlarımıza göre, geliştirilen sezgisel ile yapılan hat dengeleme ve ASA atamasının hedef çevrim süresini daha az istasyon sayısı ile yakalayabildiği görülmüştür. İstasyon sayısında iyileşme olmayan durumlarda ise çevrim süresinde iyileştirme gerçekleştirilmektedir. Her iki iyileştirme de maliyet anlamında kazanç sağlamaktadır. Azaltılan her istasyon iş gücü, ekipman ve yer kazancı anlamına gelmektedir. Çevrim süresindeki iyileştirmeler ise vardiyada artan üretim adedi demektir.

Sonuç olarak stokastik operasyon süresi içeren hatlarda, ki hemen tüm montaj hatları bu kapsama girmektedir, hat dengelemenin yanında ASA ataması da çevrim süresini etkileyen önemli bir parametredir. İstasyonların aralarına yerleştirilen ara stoklar stokastiklikten kaynaklanan bloklanma ve aç kalma durumlarını en azlamak için kullanılmaktadır. Bu sebeple stokastiklik içeren hatlarda en iyi ortalama çevrim süresini yakalamak için hat dengelemesi ve ASA ataması eş zamanlı düşünülmelidir.

Çözüm süreleri örnek sezgisel çözümleri için ÇizelgeEk. 3 ve ÇizelgeEk. 6'daki tablolarda verilmiştir. Matematiksel modelin çözüm süreleri farklı hedef çevrim sürelerine göre 5 dk ile 3 saat arasında değişmektedir. Ara Stok Atama algoritmasının çözüm süresi istasyon sayısına ve döngü sayısına göre değişmekle beraber 8 dk ile 15 dk arasındadır.



6. DEĞERLENDİRME ve ÖNERİLER

Bu çalışmada gerçek hayattan alınmış stokastik operasyon süresi içeren montaj hatları için hedeflenen çevrim süresi değerini sağlayacak eş zamanlı hat dengeleme ve ASA atama problemi ele alınmıştır. Literatür incelendiğinde stokastik zamanlı hatlar için hat dengelemesini ve ASA atamasını birlikte ele alan çok az çalışmaya rastlanmıştır. Bir gerçek hayat problemi olan bu problem için hat dengelemesini ve ara stok atamasını eş zamanlı ele alarak farklı parametreler için sonuç verebilen bir çözüm yöntemi geliştirilmiştir.

Bu amaçla ilk olarak hedeflenen üretim hızından yola çıkılarak hedef çevrim süresi belirlenmiştir. Belirlenen hedef çevrim süresine göre hat dengelemesi için matematiksel model kullanılmıştır. Matematiksel model ile bulunan optimal istasyon sayısına göre istasyonların arasına rasgele ara stok ataması yapılmıştır. Daha sonra çalışmanın diğer bir problemi olan ara stok atama problemi için Ara Stok Atama Algoritması uygulanmıştır. Bu algoritma sırasıyla tüm ara stoklar arasında birer adet değişiklik yaparak daha iyi bir ara stok ataması bulmaya çalışmaktadır. ASA ataması iki kademe yapılarak yerel optimalden kaçınmaya çalışılmıştır.

Elde edilen hat dengeleme ve ara stok konfigürasyonunun çevrim süresinin hedef çevrim süresinden küçük eşit olup olmadığı kontrol edilmiştir. Hedefe ulaşılamamışsa başlangıçtaki çevrim süresi ϵ sabiti kadar azaltılarak matematiksel model tekrar çözülerek tüm adımlar tekrarlanmıştır. Çevrim süresinin ϵ kadar azaltılmasının amacı hat dengelemesini değiştirerek konfigürasyonu esnetmektir. Bu döngü elde edilen hat dengeleme ve ASA atama konfigürasyonunun çevrim süresi hedef çevrim süresinden küçük eşit olana kadar tekrar edilmiştir.

Sonuçlar incelendiğinde gerçek hayat problemi için mevcut duruma göre daha iyi bir çözüm alınabildiği görülmüştür. Geliştirilen sezgisel model mevcut duruma göre 2 istasyon daha az açarak vardiyada 24 adet fazla üretim fırsatı sağlamıştır.

En büyük operasyon süresi hedefe ne kadar yakınsa ara stok ataması o kadar önem kazanmaktadır. Dolayısıyla ara stokların etkili atanmasının önemi ortaya

çıkılmaktadır. Ara stokların etkili atanmasının önemli olduğu diğer bir durum ise operasyon sürelerinin varyansının yüksek olduğu hatlardır. Geliştirilen eş zamanlı sezgiselin önemi en büyük operasyon süresinin hedefe yakın olduğu ve varyansın yüksek olduğu hatlarda artmaktadır. Ayrıca toplam ASA sayısı azaldıkça da bu ASA' nını daha iyi atamak daha önemli hale gelmektedir

Gelecek çalışmalarda daha büyük operasyon kümeleri için sezgisel modeller kullanılabilir. Çalışmada ele alınan gerçek hayat problemi 46 operasyonlu bir hat parçası olduğu için matematiksel model kullanılarak optimal hat dengelemesi elde edilebilmiştir. Ancak büyük operasyon kümeleri için matematiksel model ile çözüm almak mümkün değildir. Bu sebeple eş zamanlı sezgiselin hat dengeleme kısmı için büyük operasyon kümelerini çözebilen ve hızlı olan sezgisel modeller kullanılabilir. Ayrıca eş zamanlı sezgiselin ASA Atama Algoritması için başlangıç çözümü rasgele ve eldeki ara stok sayısı eşit dağıtılmaya çalışılarak belirlenmiştir. Bu ilk atama için daha etkili yöntemler belirlenebilir. Bu sayede ASA Atama algoritmasının süresi kısaltılabilir. Başka çalışılabilecek bir konu ise simülasyon yerine, belirli varsayımlar altında, analitik bir modelin ortalama çevrim zamanı tahmini için geliştirilmesidir.

KAYNAKLAR

- Altıok, T.** (1997). *Performance Analysis of Manufacturing Systems*. New York: Springer.
- Amiri, M., Mohtashami, A.** (2012). Buffer allocation in unreliable production lines based on design of experiments, simulation, and genetic algorithm. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 62, 371-383.
- Battini, D., Faccio, M., Persona, A., Sgarbossa, F.** (2009). Balancing-sequencing procedure for a mixed model assembly system in case of finite buffer capacity. *Int J Adv Manuf Technol* 44, 345-359.
- Blumenfeld, D.E.** (1990). A simple formula for estimating throughput of serial production lines with variable processing times and limited buffer capacity. *Int J. Prod. Res.* 28(6), 1163-1182.
- Boysen, N., Fliedner, M., Scholl, A.** (2007). A classification of assembly line balancing problems. *European Journal of Operational Research* 183, 674-693.
- Curry, G.L., Feldman, R.M.** (2011). *Manufacturing Systems Modeling and Analysis*. New York: Springer.
- Gershwin, S.B., Schor, J.E.** (2000). Efficient algorithms for buffer space algorithm. *Annals of Operation Research* 93, 117-144.
- Gökçen, H., Ağpak, K., Benzer, R.** (2006). Balancing of parallel assembly lines. *Int. J. Production Economics* 103, 600-609.
- Gökşen, Y.** (2003). Geleneksel üretimden esnek üretime: karşılaştırmalı bir inceleme. *Dokuz Eylül Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi* 5(4), 32-48.
- Groover, M.P.** (2015). *Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing*. United States of America: Pearson.
- Helgeson, W., Birnie, D.** (1961). Assembly line balancing using the ranked positional weight technique. *Journal of Industrial Engineering* 12(6), 384-389.
- Hoffman, A.J., Markowitz, H.M.** (1963). A note on shortest path, assignment and transportation problems. *Naval Research Logistics Quarterly* 10(4), 375-379.
- Klein, R., Scholl, A.** (1996). Maximizing the production rate in simple assembly line balancing – A branch and bound procedure. *European Journal of Operational Research* 91, 367-385.

- Malakooti, B.B.** (1994). Assembly line balancing with buffers by multiple criteria optimization. *The International Journal of Production Research* 32:9, 2159-2178.
- Moodie, C.L., Young, H.H.** (1965). A heuristic method of assembly line balancing for assumptions of constant or variable work element times. *J Ind Eng* 16(1), 23-29.
- Liu, S.B., Ong, H.L., Huang, H.C.** (2005). A bidirectional heuristic for stochastic assembly line balancing Type II problem. *Int J Adv Manuf Technol* 25, 71-77.
- Nahmias, S.** (2009). *Production and Operations Analysis (6th Edition)*. New York: McGraw Hill.
- Pınarbaşı, M.** (2015). *Montaj hatlarının dengelenmesinde kısıt programlama ve kuyruk ağları yaklaşımları* (doktora tezi). <http://www.acikarsiv.gazi.edu.tr/>, alındığı tarih: 18.10.2018.
- Pastor, P., Ferrer, L.** (2009). An improved mathematical program to solve the simple assembly line balancing problem. *International Journal of Production Research* 47(11), 2943-2959.
- Scholl, A.** (1993). Data of assembly line balancing problems. *Schr. Quant. Betr* 16, 1-28.
- Shin, D.** (1990). An efficient heuristic for solving stochastic assembly line balancing problems. *Comput Ind Eng* 18(3), 285-295.
- Sivasankaran, P., Shahabudeen, P.** (2014). Literature review of assembly line balancing problems. *Int J Adv Manuf Technol* 73, 1665-1694.
- Tiacci, L.** (2012). Event and object-oriented simulation to fast evaluate operational objective of mixed model assembly lines problems. *Simulation Modelling Practice and Theory* 24, 35-48.
- Tiacci, L.** (2015). Simultaneous balancing and buffer allocation decisions for design of mixed-model assembly lines with parallel workstations and stochastic task times. *Int. J. Production Economics* 162, 201-215.
- Uğurdağ, H.F., Rachamadugu, R., Papachristou, C.A.** (1997). Designing paced assembly lines with fixed number of stations. *European Journal of Operational Research* 102, 488-501.
- Yamashita, H., Altıok, T.** (1998). Buffer capacity allocation for a desired throughput in production lines. *IIE Transactions* 30:10, 883-891.

EKLER

EK 1: ÇizelgeEk. 1: Gerçek hayat probleminin operasyon süreleri

EK 2: ÇizelgeEk. 2: Gerçek hayat probleminin öncelik matrisi

EK 3: ÇizelgeEk. 3: Gerçek hayat problem için sezgiselin çözüm adımları

EK 4: ÇizelgeEk. 4: Gunther veri setinin operasyon süreleri

EK 5: ÇizelgeEk. 5: Gunther veri setinin öncelik matrisi

EK 6: ÇizelgeEk. 6: Ara stok sayısı=25 ve $cv=0,2$ değerleri ile sezgiselin çözüm adımları (a) eş zamanlı sezgisel 1.döngü, (b) eş zamanlı sezgisel 2.döngü, (c) eş zamanlı sezgisel 3.döngü

EK 1

ÇizelgeEk. 1: Gerçek hayat probleminin operasyon süreleri.

Operasyon	Süre (sn)	Operasyon	Süre (sn)
1	9,50	24	4,50
2	3,50	25	7,20
3	4,50	26	4,50
4	9,10	27	11,50
5	9,10	28	3,10
6	9,20	29	3,10
7	7,50	30	8,10
8	2,80	31	4,50
9	7,80	32	2,80
10	7,80	33	3,20
11	2,80	34	2,00
12	5,20	35	3,10
13	3,80	36	3,10
14	3,80	37	5,30
15	3,80	38	1,50
16	6,20	39	13,50
17	3,50	40	8,50
18	3,10	41	7,80
19	6,60	42	5,50
20	5,50	43	11,00
21	2,50	44	3,80
22	5,60	45	4,50
23	4,50	46	16,50

EK 3

ÇizelgeEk. 3: Gerçek hayat problem için sezgiselin çözüm adımları.

C0 (sn)	İstasyon Sayısı	CV	ASA Sayısı
22	13	0,3	32

Döngü	Üretim hızı	ASA Ataması
0	0,0000000	0,3,3,3,3,3,3,3,2,2,2,2
1	0,0463650	0,3,3,3,3,2,3,3,2,2,3,2
2	0,0463866	0,3,3,3,2,2,3,3,2,2,4,2
3	0,0463931	0,3,4,3,3,1,2,3,3,2,2,4,2
4	0,0464017	0,3,4,3,2,1,2,3,3,2,2,5,2
5	0,0464017	0,3,4,3,2,1,2,3,3,2,2,5,2

Döngü (restart)	Üretim hızı	ASA Ataması
0	0,0000000	0,3,4,3,2,1,2,3,3,2,2,5,2
1	0,0464014	0,3,4,3,2,1,2,3,3,2,1,5,3
2	0,0464042	0,3,4,3,2,1,2,3,3,2,2,4,3
3	0,0464048	0,3,4,3,1,1,2,4,3,2,2,4,3
4	0,0464094	0,3,5,3,1,1,2,4,3,2,2,4,2
5	0,0464094	0,3,5,3,1,1,2,4,3,2,2,4,2

Üretim hızı	Çevrim Süresi	ASA Ataması	Süre(dk)
0,046409	21,547373	0,3,5,3,1,1,2,4,3,2,2,4,2	14,1161

EK 4

ÇizelgeEk. 4: Gunther veri setinin operasyon süreleri.

Operasyon	Süre (sn)	Operasyon	Süre (sn)
1	29,00	19	19,00
2	3,00	20	29,00
3	5,00	21	6,00
4	22,00	22	10,00
5	6,00	23	16,00
6	14,00	24	23,00
7	2,00	25	5,00
8	5,00	26	5,00
9	22,00	27	5,00
10	30,00	28	40,00
11	23,00	29	2,00
12	30,00	30	5,00
13	23,00	31	5,00
14	2,00	32	1,00
15	19,00	33	40,00
16	29,00	34	2,00
17	2,00	35	2,00
18	2,00		

EK 5

ÇizelgeEk. 5: Gunther veri setinin öncelik matrisi.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35					
1		1			1		1			1		1																												
2			1																																					
3				1																																				
4											1																													
5					1																																			
6						1	1																																	
7													1					1																						
8								1																																
9												1																												
10													1																											
11																																						1		
12																		1																				1		
13																																						1		
14															1																									
15																1																								
16																						1																		
17																							1																	
18																								1																
19																									1															
20																										1														
21																											1										1			
22																											1													
23																											1													
24																																								
25																																								
26																																								
27																																							1	1
28																																							1	
29																																								
30																																							1	
31																																							1	
32																																							1	
33																																								1
34																																								
35																																								

EK 6

ÇizelgeEk. 6: Ara stok sayısı=25 ve $cv=0,5$ değerleri ile sezgiselin çözüm adımları (a) eş zamanlı sezgisel 1.döngü, (b) eş zamanlı sezgisel 2.döngü, (c) eş zamanlı sezgisel 3.döngü.

(a) Eş zamanlı sezgisel 1. döngü

C0 (sn)	İstasyon Sayısı	CV	ASA Sayısı
45	12	0,5	25

Döngü	Üretim hızı	ASA Ataması
0	0,0000000	0,3,3,3,2,2,2,2,2,2,2
1	0,0209308	0,3,3,3,1,2,2,3,2,2,2
2	0,0209471	0,3,3,2,1,2,2,3,3,2,2
3	0,0210440	0,3,3,2,0,2,2,3,3,3,2
4	0,0210450	0,3,2,2,0,2,2,3,4,3,2
5	0,0211186	0,3,1,2,0,2,3,3,4,3,2
6	0,0211468	0,3,1,2,1,1,3,3,4,3,2
7	0,0211468	0,3,1,2,1,1,3,3,4,3,2

Döngü (restart)	Üretim hızı	ASA Ataması
0	0,0000000	0,3,1,2,1,1,3,3,4,3,2
1	0,0211448	0,3,2,2,1,1,3,3,4,3,1
2	0,0211716	0,3,2,1,1,1,3,3,4,3,1
3	0,0211716	0,3,2,1,1,1,3,3,4,3,1

Üretim hızı	Çevrim Süresi	ASA Ataması	Süre(dk)
0,021172	47,233099	0,3,2,1,1,1,3,3,4,3,1,3	12,32165

ÇizelgeEk. 6 (Devam): Ara stok sayısı=25 ve cv=0,5 değerleri ile sezgiselin çözüm adımları (a) eş zamanlı sezgisel 1.döngü, (b) eş zamanlı sezgisel 2.döngü, (c) eş zamanlı sezgisel 3.döngü.

(b) Eş zamanlı sezgisel 2. döngü

C0 (sn)	İstasyon Sayısı	CV	ASA Sayısı
44	12	0,5	25

Döngü	Üretim hızı	ASA Ataması
0	0,0000000	0,3,3,3,2,2,2,2,2,2,2,2
1	0,0212959	0,3,3,3,2,2,1,2,2,2,2,3
2	0,0213996	0,3,3,2,2,2,1,2,3,2,2,3
3	0,0214587	0,3,3,1,2,2,1,2,4,2,2,3
4	0,0214748	0,3,2,1,2,2,1,2,4,2,3,3
5	0,0214748	0,3,2,1,2,2,1,2,4,2,3,3

Döngü (restart)	Üretim hızı	ASA Ataması
0	0,0000000	0,3,2,1,2,2,1,2,4,2,3,3
1	0,0214827	0,3,2,1,1,2,1,3,4,2,3,3
2	0,0214827	0,3,2,1,1,2,1,3,4,2,3,3

Üretim hızı	Çevrim Süresi	ASA Ataması	Süre(dk)
0,021483	46,549021	0,3,2,1,1,2,1,3,4,2,3,3	8,92098

ÇizelgeEk. 6 (Devam): Ara stok sayısı=25 ve cv=0,5 değerleri ile sezgiselin çözüm adımları (a) eş zamanlı sezgisel 1.döngü, (b) eş zamanlı sezgisel 2.döngü, (c) eş zamanlı sezgisel 3.döngü.

(c) Eş zamanlı sezgisel 3. döngü

C0 (sn)	İstasyon Sayısı	CV	ASA Sayısı
43	13	0,5	25

Döngü	Üretim hızı	Ara Stok Ataması
0	0,0000000	0,3,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2
1	0,0220265	0,3,2,1,2,2,2,2,2,2,2,3
2	0,0221261	0,3,2,0,2,2,3,2,2,2,2,3
3	0,0221537	0,3,1,0,2,2,3,2,2,2,2,4
4	0,0221947	0,2,1,0,2,2,3,2,2,3,2,4
5	0,0222735	0,1,1,0,2,2,3,2,2,3,2,3,4
6	0,0223322	0,1,1,0,2,2,3,2,2,3,1,3,5
7	0,0223322	0,1,1,0,2,2,3,2,2,3,1,3,5

Döngü (restart)	Üretim hızı	ASA Ataması
0	0,0000000	0,1,1,0,2,2,3,2,2,3,1,3,5
1	0,0223049	0,1,1,0,3,2,3,1,2,3,1,3,5
2	0,0223343	0,0,1,0,3,2,3,1,3,3,1,3,5
3	0,0223343	0,0,1,0,3,2,3,1,3,3,1,3,5

Üretim hızı	Çevrim Süresi	ASA Ataması	Süre(dk)
0,022334	44,774117	0,0,1,0,3,2,3,1,3,3,1,3,5	14,21712

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Elif Gizem GÖÇER
Uyruğu : T.C
Doğum Tarihi ve Yeri : 22.05.1992, ANKARA
E-posta : gizemgcr@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2015, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü
- **Yükseklisans** : 2018, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

Yıl	Yer	Görev
2015-2018	Arçelik Bulaşık Makinesi İşletmesi	Üretim Mühendisi
2016-2018	TOBB ETÜ	Araştırma Burslu Yük. Lis. Öğrencisi
2018-halen	ASELSAN	Proje Değerlendirme ve Analiz Mühendisi

YABANCI DİL: İngilizce

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

Göçer, E.G., Tekin, S. (2018) Simultaneous line balancing and buffer allocation f, 29th European Conference on Operational Research, 08-11, Valencia, 268, 64-426.

