



**MONTAJ HATTI DENGELEMEDE YENİDEN İŞLEME  
İSTASYONLARININ PARALEL GÖREVLER İÇİN  
KULLANILMASI VE BİR UYGULAMA**

**Elif KAYMAZ**



T.C.  
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**MONTAJ HATTI DENGELEMEDE YENİDEN İŞLEME İSTASYONLARININ  
PARALEL GÖREVLER İÇİN KULLANILMASI VE BİR UYGULAMA**

**Elif KAYMAZ**

Doç. Dr. Fatih ÇAVDUR  
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ  
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

BURSA - 2017

## TEZ ONAYI

Elif KAYMAZ tarafından hazırlanan “Montaj Hattı Dengelemede Yeniden İşleme İstasyonlarının Paralel Görevler için Kullanılması ve Bir Uygulama” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı’ nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Doç. Dr. Fatih ÇAVDUR

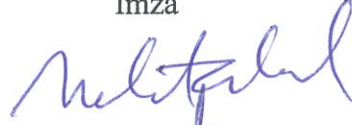
Başkan: Doç. Dr. Fatih ÇAVDUR  
Uludağ Ü. Mühendislik Fakültesi,  
Yöneylem Araştırması Anabilim Dalı

İmza



Üye: Yrd. Doç. Dr. Mehmet AKANSEL  
Uludağ Ü. Mühendislik Fakültesi,  
Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza



Üye: Yrd. Doç. Dr. Fatih KARAKOYUN  
Bursa Teknik Üniversitesi  
Doğa Bilimleri, Mimarlık ve Mühendislik Fakültesi,  
Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

İmza



**Yukarıdaki sonucu onaylarım**

**Prof. Dr. Ali BAYRAM**  
**Enstitü Müdürü**



**U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;**

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

**beyan ederim.**

**09/08/2017**

**İmza**

**Elif Kaymaz**

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### MONTAJ HATTI DENGELEMEDE YENİDEN İŞLEME İSTASYONLARININ PARALEL GÖREVLER İÇİN KULLANILMASI VE BİR UYGULAMA

**Elif KAYMAZ**

Uludağ Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

**Danışman:** Doç. Dr. Fatih ÇAVDUR

İşletmelerde yeniden işleme istasyonu genellikle yalnızca uygun olmayan ürünlerin yeniden işlendiği bir istasyon olarak kullanılmaktadır. Yeniden işleme istasyonunun yalnızca bu amaçla kullanılması, özellikle montaj hatlarındaki hata oranının düşük olması durumunda burada bulunan kaynakların kullanım oranını düşürmektedir. Bu çalışmada yeniden işleme istasyonunun standart bir iş istasyonu olarak kullanılmasını dikkate alan çevrim süresini minimize etmeyi amaçlayan bir doğrusal olmayan tamsayılı programlama modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen modelin doğrusal olmayan kısıtı basit bir değişken dönüşümü ile doğrusal hale dönüştürülmüştür. Önerilen model, montaj hattındaki farklı hata oranlarının yanı sıra, yeniden işleme istasyonunun sadece montaj hattı sonunda değil, farklı pozisyonlarda konumlandırılmasını da dikkate almaktadır. Geliştirilen modelin performansı literatürdeki çeşitli örneklemeler üzerinde test edilmiştir. Gerçek hayattaki montaj hattı dengeleme problemlerinde değişkenlik ve belirsizlikler deterministik varsayımlarla elde edilen çözümlerin kullanım olanağını sınırlamaktadır. Bu nedenle tamsayılı programlama modelinden elde edilen çözümün doğrulanması ve çözüm duyarlılığının incelenmesi için bir test örneklemini üzerinde yeniden işleme istasyonunun son istasyon pozisyonunda ve farklı hata oranlarının dikkate alındığı simülasyon modelleri oluşturulmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Montaj Hattı Dengeleme, Yeniden İşleme İstasyonu, Tamsayılı Programlama, Simülasyon, Çevrim Süresi Minimizasyonu

**2017, vii+54 sayfa.**

## **ABSTRACT**

MSc Thesis

### **USING REWORK STATIONS FOR PARALLEL TASKS IN ASSEMBLY LINE BALANCING AND A CASE STUDY**

**Elif KAYMAZ**

Uludağ University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Industrial Engineering

**Supervisor:** Assoc. Prof. Dr. Fatih ÇAVDUR

In enterprises, rework stations are generally used as a station where only non-conforming product are processed. However, the use of the rework stations only for this purpose reduces the utilization of the resources, especially if the defect rate in the assembly lines is low. In this study, a nonlinear integer programming model was developed to minimize the cycle time considering the use of rework station as a standard workstation. The nonlinear constraint of the developed model is transformed into a linear one with a simple variable transformation. The proposed model considered rework station in different positions not just at the end of the assembly line. The integer programming model has been tested on various cases in the literature. Variability and uncertainties in real life assembly line balancing problems limit the use of solutions with deterministic assumptions. For this reason, based on a test sample for verification of the solution obtained from the integer programming model and for the sensitivity of the solution, simulation models were established in which the rework station was positioned at the last station position and different error rates were considered.

**Keywords:** Assembly Line Balancing, Rework Station, Integer Programming, Simulation, Cycle Time Minimization

**2017, vii+54 pages.**

## ÖNSÖZ

Yüksek lisans tez danışmanlığımı üstlenerek çalışmalarında bana destek olan ve hiçbir zaman ilgisini esirgemeyen Sayın Hocam Doç. Dr. Fatih ÇAVDUR' a teşekkür etmeyi bir borç bilirim.

Bu süreçte sabırlı bir şekilde çalışmamın tüm aşamalarında maddi ve manevi destekleri ile yanımda olan aileme sonsuz teşekkür ederim.



## İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ .....	iii
KISALTMALAR DİZİNİ.....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	vii
1. GİRİŞ .....	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI .....	3
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	16
3.1. Materyal .....	16
3.1.1. Tamsayılı Programlama .....	16
3.1.2. Simülasyon.....	20
3.2. Yöntem.....	27
3.2.1. MHDP için genel formülasyon .....	27
3.2.2. Yİ istasyonunun standart bir iş istasyonu olarak kullanılması.....	29
3.2.3. Simülasyon analizi .....	33
4. BULGULAR.....	38
4.1. Test Verileri .....	38
4.2. Tamsayılı Programlama Modeli.....	38
4.3. Simülasyon Modeli .....	44
5. TARTIŞMA VE SONUÇ .....	47
KAYNAKLAR .....	49
EKLER.....	53
Ek-1 Deneysel Sonuçlar.....	53
ÖZGEÇMİŞ .....	54



## KISALTMALAR DİZİNİ

### Kısaltmalar

### Açıklama

BMHDP

Basit Montaj Hattı Dengeleme Problemleri

ÇMD

Çok/Karışık Modelli Deterministik

ÇMS

Çok/Karışık Modelli Stokastik

GMHDP

Genelleştirilmiş Montaj Hattı Dengeleme Problemleri

MHD

Montaj Hattı Dengeleme

TDP

Tamsayılı Doğrusal Programlama

TMD

Tek Modelli Deterministik

TMS

Tek Modelli Stokastik

Yİ

Yeniden İşleme

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

Şekil 2.1. Montaj hattı dengeleme problemlerinin sınıflandırılması .....	4
Şekil 2.2. Montaj hattı dengeleme problemleri ile ilgili diğer bir sınıflandırma .....	7
Şekil 3.1. Tamsayılı programlarının sınıflandırılması .....	18
Şekil 3.2. Kuyruk sistemi .....	21
Şekil 3.3. Bir simülasyon çalışmasındaki adımlar .....	24
Şekil 3.4. Yİ istasyonunun son istasyon pozisyonunda bulunması.....	29
Şekil 3.5. Yİ istasyonunun sondan bir önceki istasyon pozisyonunda bulunması.....	30
Şekil 3.6. Yİ istasyonunun sondan ikinci istasyon pozisyonunda bulunması.....	31
Şekil 3.7. Yİ istasyonunun paralel görevlerde kullanıldığı durum için oluşturulan akış	35
Şekil 3.8. Yİ istasyonunun son istasyon pozisyonunda olduğu durum.....	36
Şekil 4.1. Mitchells örnekleme için öncelik ilişkisi diyagramı ve işlem süreleri .....	38
Şekil 4.2. Tamsayılı programlama modelinden elde edilen çözüm .....	39
Şekil 4.3. Hata oranının %25 ( $\beta = 1,25$ ) olduğu ve Yİ istasyonunun 6.istasyon pozisyonunda olduğu durum.....	40
Şekil 4.4. Hata oranının %25 ( $\beta = 1,25$ ) olduğu ve Yİ istasyonunun 5.istasyon pozisyonunda olduğu durum.....	41
Şekil 4.5. Hata oranının %25 ( $\beta = 1,25$ ) olduğu ve Yİ istasyonunun 4.istasyon pozisyonunda olduğu durum.....	41

## ÇİZELGELER DİZİNİ

### Sayfa

Çizelge 2.1. BMHDP'nin sınıflandırılması.....	5
Çizelge 2.2. Montaj hattı dengeleme problemleri ile ilgili yapılan çalışmalar .....	10
Çizelge 3.1. Sistem ve bileşen örnekleri .....	23
Çizelge 3.2. Simülasyon modelinin oluşturulması için kullanılan bileşenler .....	34
Çizelge 4.1. Matematiksel modelden elde edilen sonuçlar .....	42
Çizelge 4.2. İstasyonların kullanım oranları .....	45



## 1. GİRİŞ

Günümüzde işletmeler rekabet gücünü arttırabilmek ve varlığını sürdürebilmek için talepleri zamanında ve düşük maliyetle karşılamak istemektedir. Bu durum göz önüne alındığında işletmeler üretim kapasitelerinde artış sağlamalı, verimsizliğe neden olan etkenleri ortadan kaldırarak üretim kaynaklarını daha etkin ve verimli kullanarak üretim hatlarındaki çalışma verimliliğini arttırmalıdır. Günümüzde, bu amaç doğrultusunda montaj hatlarındaki hat etkinliği artırmak için hat dengeleme çalışmaları yapılmaktadır.

İstasyon serisi ve taşıma mekanizmaları, genellikle bir konveyör, montaj hattı olarak adlandırılır (Baybars 1986). Bir montaj hattı birbirine malzeme taşıma sistemleri ile bağlanmış bir dizi istasyondan oluşur ve her bir iş istasyonunda iş parçalarına, çevrim zamanı denilen sınırlı bir zaman dilimi içerisinde bir veya daha fazla montaj işlemi gerçekleştirilir (Foroughi ve Gökçen 2014). Montaj hatlarında bir veya daha fazla hedefin gerekli görevler, işlem süreleri ve bazı belirli kısıtlara bağlı olarak optimize edilecek şekilde ardışık istasyonlara görev atama probleminde Montaj Hattı Dengeleme (MHD) Problemi denir (Tuncel ve Topaloglu 2013).

Montaj hatlarında her bir istasyonda çeşitli işlemlerden geçen iş parçaları son istasyondan ürün olarak çıkmaktadır. Genellikle son istasyonda, istasyonda gerçekleşen işlemler ile birlikte ürünle ilgili kalite kontrol işlemleri de gerçekleştirilmektedir. Kalite kontrol işleminden geçen ürün belirtilen tanımlara uygun değilse, bu tanımlara uygun hale getirmek için yeniden işleme (Yİ) istasyonuna gönderilir ve burada gerekli olan düzenleyici çalışmalar gerçekleştirilir. İşletmelerde genellikle Yİ istasyonu yalnızca uygun olmayan ürünlerin yeniden işlendiği bir bölüm olarak kullanılmaktadır. Bu nedenle bu istasyonda bulunan kaynakların (çalışan operatörler, makine-teçhizat vb.) kullanım oranları montaj hattındaki hata oranına göre değişkenlik gösterebilmektedir. Hata oranının nispeten düşük olduğu durumlarda bu kaynakların kullanım oranlarının da istenen düzeyin altına düşmesi söz konusu olmakta ve bu durum da Yİ istasyonundaki kaynakların etkin şekilde kullanılamamasına neden olmaktadır. Yİ istasyonunun kalite kontrol işlemine ek olarak, normal şartlarda diğer istasyonlarda yapılmakta olan görevlerinde yapılabileceği bir birim olarak düzenlenmesi ile bu etkinliğin arttırılması

mümkün olabilecektir. Bu çalışmada Yİ istasyonunun bu amaçla kullanılmasına olanak sağlayan bir tamsayılı programlama modeli önerilmektedir.

Gerçek hayattaki üretim sistemleri doğası gereği çeşitli stokastik unsurlar (yorulmalar, dikkatin dağılması, hatalı girdiler, araç/gereç bozulmaları) barındırmaktadır. Bu nedenle tamsayılı programlama modelinin çözümünün gerçek hayattaki üretim sistemlerinde etkin bir sonuç vermesi her zaman mümkün değildir. Bu tez çalışması kapsamında geliştirilen tamsayılı programlama modelinden elde edilen çözümlerin doğrulanması ve çözüm duyarlılığının incelenmesine olanak sağlamak amacıyla bir simülasyon modeli oluşturulmuştur.

Bu çalışma beş bölüm olarak düzenlenmiştir. Çalışmanın ikinci bölümünde konuya giriş yapılarak öncelikle MHD problemleri ile ilgili yapılan sınıflandırmalara ve MHDP ile ilgili yapılan çalışmalar ile ilgili olarak detaylı bir kaynak araştırmasına yer verilmiştir.

Üçüncü bölümde, tamsayılı programlama ve simülasyon yöntemi ile ilgili genel bilgiler anlatılmaktadır. Öncelikle tamsayılı programlama modelinin genel versiyonu ve Yİ istasyonunun standart bir iş istasyonu olarak kullanıldığı durum için önerilen tamsayılı programlama modeli sunulmuştur. İkinci olarak tamsayılı programlama modelinden elde edilen sonuçların doğrulanması ve çözüm duyarlılığının incelenmesi için Yİ istasyonunun paralel görevlerde kullanıldığı ve son istasyon pozisyonunda olduğu durum için üç farklı hata oranı için oluşturulan simülasyon modelleri verilmiştir.

Dördüncü bölümde öncelikle geliştirilen yöntemi test etmek için kullanılan test verilerine yer verilmiştir. Daha sonra tamsayılı programlama ve simülasyon modelinden elde edilen sonuçlar analiz edilmiştir.

Son olarak beşinci bölümde önerilen yöntemin genel bir değerlendirilmesi yer almaktadır.

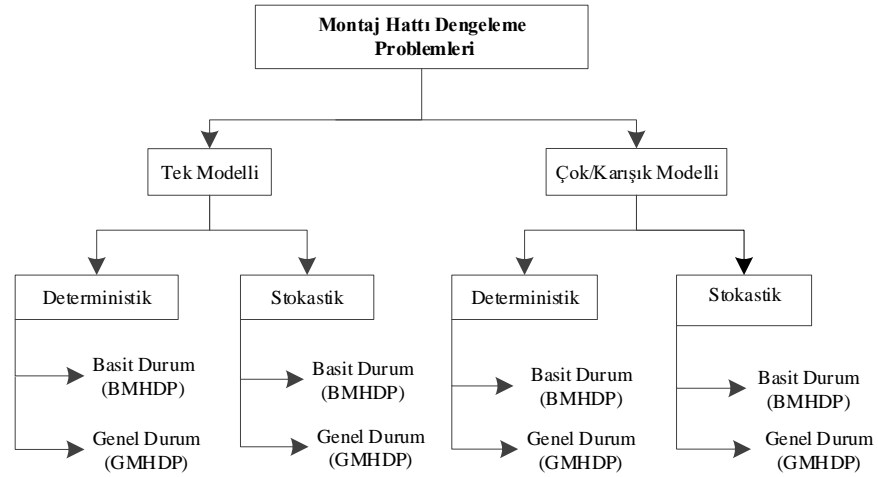
## 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Bir montaj hattı, bir konveyör bandı veya benzer bir mekanik malzeme taşıma ekipmanı boyunca düzenlenen iş istasyonlarından oluşmaktadır. Konveyör çevrim süresi olarak verilen zaman birimi aralığında hareket eder (Becker ve Scholl 2006). Bir istasyon çevrim süresi olarak verilen zaman birimi süresince kullanılır bu nedenle istasyonun çalışma kapasitesi çevrim süresini aşmamalıdır. Her bir istasyona atanan görevlerin işlem sürelerinin toplamı eşit ise montaj hattının mükemmel dengeye sahip olduğu söylenebilir ancak öncelik ilişkileri, bölgesel kısıtlar vb. kısıtlamalar nedeniyle pratikte mükemmel dengeyi sağlamak oldukça zordur (Baybars 1986).

Her görev, önceden belirlenmiş bir işlem süresine ve öncelik ilişkisine sahiptir. Teknolojik ve organizasyonel koşulların öncelik kısıtlamaları nedeniyle görevler arasında öncelik kısıtlarının kullanılması gerekir (Scholl ve Becker 2006). Böylece öncüllerin tamamı tamamlanmadan diğer görev başlayamaz (Ege ve ark. 2009). Öncelik kısıtlarının yanı sıra MHD problemlerinde pozitif ve negatif olmak üzere bölgesel kısıtlar bulunmaktadır. Pozitif bölge kısıtları bir görev grubunun aynı iş istasyonuna atanmasını zorlamak için kullanılırken negatif bölge kısıtları ise aynı iş istasyonuna belirli görevlerin atanmasını yasaklamak için kullanılır (Battaia ve Dolgui 2013).

Birtakım amaçlara göre istasyonlarda gerçekleştirilen montaj işlemini dengeleme kararı problemi MHD problemi olarak adlandırılmaktadır (Becker ve Scholl 2006). MHD problemleri endüstri mühendisliği ve yöneylem araştırmacıları için uzun yıllar ilgi odağı olmuştur (Gökçen ve Ağpak 2006). Literatürde montaj hatlarının dengelenmesi kavramı ilk kez 1954 yılında Bryton tarafından dikkate alınmıştır (Bryton 1954). Montaj hattı dengeleme probleminin tanımını ise Salveson 1955 yılında yapmıştır (Salveson 1955).

MHD problemlerinin sınıflandırılması için literatürdeki kaynaklarda farklı çalışmalara rastlamak mümkündür. Yapılan bir çalışmada MHD problemleri Şekil 2.1' deki gibi sınıflandırılmıştır.



**Şekil 2.1.** Montaj hattı dengeleme problemlerinin sınıflandırılması  
(Ghosh ve Gagnon 1989)

Bu sınıflandırmaya göre; montaj hatları tek modelli deterministik, tek modelli stokastik, çok/karışık modelli deterministik ve çok/karışık modelli stokastik olmak üzere 4 gruba ayrılmaktadırlar (Ghosh ve Gagnon 1989).

Tek modelli deterministik (TMD), montaj hattında yalnızca bir tip ürün üretildiği ve işlem sürelerinin değişkenlik göstermediği, sabit olduğu varsayılmaktadır. Bu tip hatlar robotların veya makinelerin çalıştığı hatlarda geçerli olmakla birlikte insanların çalıştığı hatlarda geçeli değildir (Derya 2012).

MHD probleminin en basit şekli Basit Montaj Dengeleme Problemleri (BMHDP) dir (Ghosh ve Gagnon 1989). BMHD’de bazı temel varsayımlar bulunmaktadır (Baybars 1986):

- Tüm girdi parametreleri belirlidir
- Bir görev ögesi iki veya daha fazla istasyona bölünemez
- Teknolojik ve organizasyonel kısıtlardan dolayı görevler keyfi bir sırayla gerçekleştirilemez
- Tüm görevler yapılmalıdır
- Tüm istasyonlar tüm görevleri gerçekleştirebilecek ekipman ve donanıma sahip olmalıdır
- Her görev herhangi bir istasyonda yapılabilir

- Tüm hat, besleyici veya paralel alt montaj hatlı olmayacak şekilde seri olarak düzenlenmiş olmalıdır
- Montaj sistemi tek bir ürünün tek bir modeli için oluşturulmalıdır.
- Çevrim süresi verilmiştir ve sabittir
- İstasyon sayısı verilmiştir ve sabittir

BMHDP'nin sınıflandırılması Çizelge 2.1'de verilmiştir. (Becker ve Scholl 2006).

**Çizelge 2.1.** BMHDP'nin sınıflandırılması

BMHD Problemi Versiyonları		Çevrim zamanı	
		Verilmiş	Minimizasyon
İstasyon Sayısı	Verilmiş	BMHD-F	BMHD-2
	Minimizasyon	BMHD-1	BMHD-E

Montaj hattı dengeleme problemlerinde araştırmaların çoğu, basit montaj hattı dengeleme probleminin (BMHDP) modellenmesi ve çözümü için ayrılmıştır (Scholl ve Becker 2006). Çizelge 2.1 de verildiği gibi BMHDP amaç fonksiyonuna bağlı olarak çeşitli sınıflara ayrılmaktadır. Bunlar BMHDP-1, BMHDP-2, BMHDP-E ve BMHDP-F tir. BMHDP-1 ve BMHDP-2 ikili bir ilişkiye sahiptir; BMHDP-1 verilen sabit çevrim süresi için istasyon sayısını minimize ederken, diğeri ise verilen sabit istasyon sayısı için çevrim süresini minimize etmektedir. BMHDP-1 araştırmacılar için popüler bir araştırma alanı olmasına rağmen BMHDP-2 daha az çalışılmıştır (Kilinceci 2010). BMHDP-E, hat etkinliği maksimize etmeye ve boşta kalma süresini minimize etmeye çalışır. Başka bir ifadeyle, BMHDP-E, iş istasyonlarının sayısını ve çevrim süresini minimize etmeye çalışmaktadır (Wei ve Chao 2011). BMHDP-F istasyon sayısı ve çevrim süresinin belirli bir kombinasyonu için uygun bir hat dengesi sağlamayı amaçlamaktadır (Scholl ve Becker 2006).

BMHDP ile ilgili belirlenmiş olan varsayımlar gerçek dünya montaj hattı sistemlerine göre oldukça kısıtlayıcıdır. Bu nedenle, son zamanlarda daha gerçekçi genelleştirilmiş montaj hattı dengeleme problemlerini (GMHDP) tanımlama, formüle etme ve çözme yönündeki çalışmalar yoğunlaştırılmıştır (Becker ve Scholl 2006). GMHDP alan kısıtları, bölgesel kısıtlar, paralel istasyon ve paralel görev gibi çeşitli ek kısıtlar ve problem



özellikleri içermektedir. BMHDP ile ilgili olarak kapsamlı inceleme (Scholl ve Becker 2006) tarafından, GMHDP ile ilgili kapsamlı bir inceleme Becker ve Scholl (2006) tarafından verilmiştir. Montaj hattı dengeleme problemleri ile ilgili son zamanlarda yapılan en geniş kapsamlı çalışma Sivasankaran ve Shahabudeen (2014) ve Battaia ve Dolgui (2013) tarafından gerçekleştirilmiştir.

Tek Modelli Stokastik (TMS) problemi tek tip ürün ve modelin üretilebilmesi için gerekli olan işlem zamanlarının sabit olmadığı değişkenlik gösterdiği durumları içermektedir. Bu tip montaj hattı dengeleme problemleri işlem sürelerinin değişkenlik gösterdiği manuel montaj hatları için daha gerçekçidir (Ghosh ve Gagnon 1989). İşlem süreleri birçok nedenden dolayı değişkenlik gösterebilir. Bu değişkenlikler genellikle yorulma, dikkatin dağılması, işçilerin beceri düzeyi (yetenekli veya yeteneksiz iş gücü), makine/ekipman bozulmaları gibi nedenlerden kaynaklanmaktadır. TMS problemlerinde işlem zamanları sabit değildir, işlem zamanları modellenirken belirli bir olasılık dağılımı ile modellenmektedir (Derya 2012).

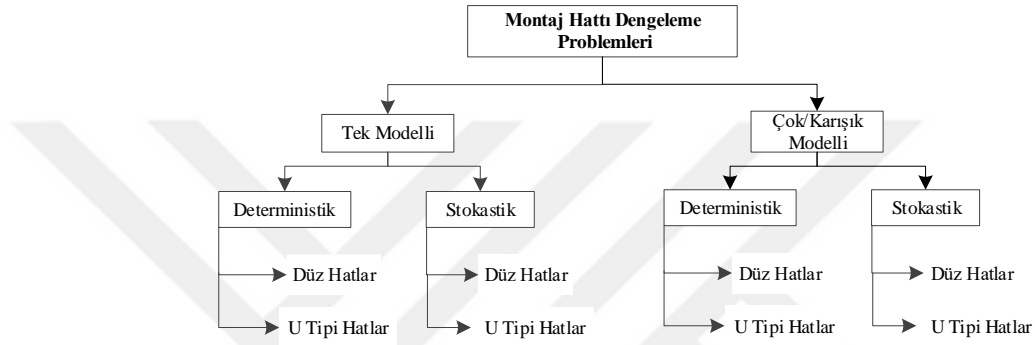
Çok/karışık Modelli Deterministik (ÇMD) problemlerinde işlem sürelerinin deterministik olduğu varsayılmaktadır. Çok modelli üretim yapılan montaj hatlarında iki veya daha fazla ürün büyük partiler halinde ayrı olarak üretilmektedir. Karışık modelli montaj hatlarında ise farklı ürün modelleri herhangi bir sırada karışık olarak üretilmektedir. Tek modelli montaj hatlarından farklı olarak çok/karışık modelli montaj hatlarında model seçimi, model sıralaması, model parti büyüklüklerinin belirlenmesi vb. problemler ele alınmaktadır. Çok/karışık modelli üretimin en önemli yararı müşteri isteğini karşılamak üzere değişik modellerin üretilmesi ve büyük ürün stoklarının bulunmamasıdır (Derya 2012).

Çok/karışık Modelli Stokastik (ÇMS) montaj hattı dengeleme probleminde, işlem süreleri değişkenlik gösterir. ÇMS problemlerinin ÇMD problemlerinden tek farkı işlem sürelerinin stokastik yapıya sahip olmasıdır.

Çok modelli hatlarda yapılan dengeleme işlemleri karışık modelli hatlarda yapılan işlemlerden daha kolaydır. Bu hatlarda benzer tipteki ürünler üretildiğinden hattın bir model için dengelenmesi ile elde edilen sonuçlardan faydalanılarak gerekli düzenlemeler

yapılır ve montaj hattı diğer modeller için uygun hale getirilmiş olur. “Çok ve karışık modelli hatların dengelenmesi probleminin çözümünde yaşanan zorluklar nedeniyle bu tip problemler için en iyi çözüm veren kesin çözüm yöntemleri yerine sezgisel yöntemlerden yararlanılır” (Derya 2012).

MHD problemleri ile ilgili bir diğer sınıflandırmada MHD problemleri Şekil 2.2’deki gibi sınıflandırılmıştır (Sivasankaran ve Shahabudeen 2014).



**Şekil 2.2.** Montaj hattı dengeleme problemleri ile ilgili diğer bir sınıflandırma

Bu sınıflandırmada montaj hatları tek modelli deterministik, tek modelli stokastik, çok /karışık modelli deterministik ve çok /karışık modelli stokastik olmak üzere 4 gruba ayrılmaktadır.

Şekil 2.2’deki sınıflandırmanın Şekil 2.1’deki sınıflandırmadan temel farkı deterministik ve stokastik montaj hatları, hattın yerleşim yapısına göre temel düz montaj hatları ve U tipi montaj hatları olmak üzere iki sınıfa ayrılmasıdır.

Temel düz montaj hatları birbiri ardına dizilmiş iş istasyonlarından oluşmaktadır. İlk istasyondan giriş yapan her bir iş parçası yerleştirme sırasına göre bir dizi iş istasyonunu ziyaret ederek son istasyondan ürün olarak çıkmaktadır (Kara ve ark. 2011). Düz hatların bazı avantajları bulunmaktadır. Bunlar; iş akışının daha hızlı ve kolay olması, basit ve düzenli olması, kolayca yerleşim yapılabilmesi, servis verme olanaklarının kolaylıkla sağlanabilmesi, konveyör sistemlerinin uygulanabilirliğinin artması ve maliyetlerin düşmesi gibi nedenlerdir (Derya, 2012).

Günümüz üretim sistemleri olabildiğince esnek yapıya ihtiyaç duymaktadır. Son yıllarda, işletmelerin tam zamanında üretim ilkesini uygulamaya başlaması ile birlikte montaj hatları üretim ihtiyaçlarını karşılayacak şekilde değişime uğramış ve tam zamanında üretim sistemlerinin bir sonucu olarak U-tipi hatlar daha çok kullanılmaya başlanmıştır. U tipi montaj hatları genellikle manuel olan montaj hatlarıdır. U tipi hatlarda hem giriş hem de çıkış aynı konumdadır. Bu tip hatlarda iki kaynağın arasına yerleştirilen işçilerin birinden diğerine yürütmesine izin verilir. Bu nedenle aynı çevrim süresince burada çalışan işçiler iki veya daha fazla iş parçası üzerinde çalışabilirler. Son yıllarda, işletmelerin tam zamanında üretim ilkesini uygulamaya başlaması ile birlikte montaj hatları üretim ihtiyaçlarını karşılayacak şekilde değişime uğramış ve tam zamanında üretim sistemlerinin bir sonucu olarak U-tipi hatlar daha çok kullanılmaya başlanmıştır (Kara ve ark. 2011).

Yapılan sınıflandırmalarda genellikle düz hatlar ve U tipi hatlar kullanılmaktadır ancak düz ve U tipi hatların yanı sıra paralel hatlar, çift yönlü hatlar ve dairesel aktarmalı hatlar olmak üzere çeşitli hat yapıları da bulunmaktadır. Paralel hatlar genellikle talebin fazla olduğu tek bir hattın kapasitesinin yeterli olmadığı durumlarda kullanılırlar. Çift yönlü montaj hattı hattın her iki tarafının kullanıldığı montaj hatlarıdır. Genellikle büyük boyutlu otobüs, kamyon, otomobil gibi ürünlerin montaj işlemleri çift yönlü hatlarda gerçekleştirilir (Mete ve Ağpak 2013). Dairesel aktarmalı hatlar, döner masa etrafına kurulmuştur ve iş istasyonları iş parçalarını bir iş istasyonundan diğerine yükleme boşaltma ve taşıma işlemlerini gerçekleştirmek için kullanılmaktadır (Battaia ve Dolgui 2013).

Montaj hattı dengeleme çalışmalarında kesin çözüm yöntemleri, sezgisel ve meta sezgisel yöntemler gibi yaklaşık çözüm veren yöntemler kullanılmaktadır (Amen 2006, Scholl ve Becker 2006, Becker ve Scholl 2006, Boysen ve ark. 2007). Montaj hattı dengeleme problemleri için geliştirilen kesin çözüm yöntemleri Baybars (1986) tarafından, sezgisel ve meta sezgisel yöntemlerin kapsamlı bir incelemesi Ghosh ve Gagnon (1989) tarafından verilmiştir.

Çerçioğlu ve ark. (2009) alışmalarında tavlama benzetimi tabanlı bir sezgisel yaklaşım önermişlerdir. Önerilen tavlama benzetimi tabanlı yaklaşım Gökçen ve ark. tarafından paralel montaj hattı dengeleme problemleri için Jackson'ın klasik probleminden değiştirilerek elde edilen iki paralel hatlı test problemi üzerinde özölmüştür.

Kilinci (2010) tarafından yapılan çalışmada basit montaj hattı dengeleme problemini çözmek için bir Petri net tabanlı sezgisel yöntem anlatılmaktadır. Anlatılan sezgisel yöntem mevcut görevleri belirler ve Petri ağlarının ana özelliklerinden biri olan erişilebilirlik analizini kullanarak mevcut iş istasyonuna görev atar. BMHDP-2'nin çözümü birkaç çevrim süresince tekrar edilerek gerçekleştirilir. Belirtilen sayıda iş istasyonu için belirtilen çevrim süresi mümkün olmadığı takdirde, sezgisel yöntem, mümkün olan bir çözüm bulana kadar çevrim süresini bir değer arttıracaktır. Algoritma MATLAB' da kodlanmış ve bunun etkileri literatürdeki örnekler üzerinde test edilmiştir.

Wei ve Chao (2011) alışmalarında BMHDP-1 ve BMHDP -2 modellerini birleştiren BMHDP-E problemi anlatmaktadır. Önerilen model toplam boş zamanı minimize ederken eş zamanlı olarak montaj hattı etkinliğini optimize etmeyi sağlamaktadır.

Foroughni ve Gökçen (2014) alışmalarında maliyet tabanlı stokastik montaj hattı dengeleme problemi ele almaktadırlar. Çalışmada toplam üretim maliyetini minimize etmeyi amaçlayan şans kısıtlı tamsayılı programlama önerilmektedir.

şekil 2.1'deki montaj hattı dengeleme problemleri sınıflandırmasına bağlı olarak literatürde yapılan çalışmalar izelge 2.2'deki gibi özetlenmiştir (Sivasankaran ve Shahabudeen 2014).

**Çizelge 2.2.** Montaj hattı dengeleme problemleri ile ilgili yapılan çalışmalar  
(Sivasankaran ve Shahabudeen 2014).

<b>TEK MODELİ</b>	<b>DETERMİNİSTİK</b>	<b>Düz Hatlar</b>	Tamsayılı programlama
			Petri ağları algoritması
			Sezgiseller
			Genetik algoritma
			Tavlama benzetimi algoritması
			Karınca kolonisi optimizasyonu
			En kısa yol algoritması
			Memetik algoritmalar
			Arı algoritması
		<b>U Tipi Hatlar</b>	Tamsayılı programlama
			Sezgiseller
			Tavlama benzetimi algoritması
			Karınca kolonisi optimizasyonu
			En kısa yol algoritması
<b>STOKASTİK</b>	<b>Düz Hatlar</b>	Tamsayılı programlama	
		Sezgiseller	
		Genetik algoritma	
		Tavlama benzetimi algoritması	
		En kısa yol algoritması	
	Parçacık sürü optimizasyon algoritması		
	<b>U Tipi Hatlar</b>	Genetik algoritma	
		Yasak arama algoritması	
		Yayılmacı rekabetçi algoritma	
<b>ÇOK/KARIŞIK MODELİ</b>	<b>DETERMİNİSTİK</b>	<b>Düz Hatlar</b>	Tamsayılı programlama
			Genetik algoritma
			Tavlama benzetimi algoritması
			Yasak arama
		Karınca kolonisi optimizasyonu	
	<b>U Tipi Hatlar</b>	Genetik algoritma	
	<b>STOKASTİK</b>	<b>Düz Hatlar</b>	Genetik algoritma
			Tavlama benzetimi algoritması
			Karınca kolonisi optimizasyonu
		<b>U Tipi Hatlar</b>	Genetik algoritma
Karınca kolonisi optimizasyonu			

Gerçek hayat uygulamalarda karar verici çelişen hedeflerle uğraşmak zorunda kalabilir ve aynı anda birden fazla hedef gerçekleştirmeyi talep edebilir. Gökçen ve Ağpak (2006) yaptıkları çalışmada öncelikli hedef programlama yaklaşımı ile karar vericinin hedeflerini öncelik seviyesine göre sıralayan öncelikli hedef programlama modeli geliştirmiştir. Geliştirilen model karar vericiye esneklik sağlamaktadır.

Polat ve ark. (2015) tarafından yapılan çalışmada, çevrim süresini minimize etmek ve istasyonlardaki fiziksel yükü dengelemek için hedef programlama modeli geliştirilmiştir.

Mcmullen ve Frazier (1998) tarafından yapılan çalışmada farklı montaj hattı dengeleme problemleri stratejileri veri zarflama analizi kullanılarak hangi montaj hattı sezgiselinin kullanılması gerektiğine karar vermede yardımcı olacak bir teknik sunulmuştur.

Boysen ve ark. (2007) tarafından yapılan çalışmada, montaj hattı dengeleme problemleri; öncelik diyagramı özelliği ( $\alpha$ ), istasyon ve hat yerleşimi ( $\beta$ ), amaç tipi ve sayısına ( $\gamma$ ) göre üç ayrı sınıfa ayrılmaktadır. İstasyon ve hat yerleşimine göre yapılan sınıflandırmada paralellik kavramı ( $\beta_3$ ); hat paralelligi, istasyon paralelligi, görev paralelligi ve iş paralelligi şeklinde dört grupta incelenmektedir. Hat paralelligi, birden fazla paralel hattın aynı anda dengelenmesini ifade etmektedir. İstasyon paralelligi, bir hat üzerinde birbiriyle aynı iş istasyonlarının kullanılmasıdır. Görev paralelligi, herhangi bir görevin birden fazla istasyonda yer alabilmesi olarak tanımlanmaktadır. İş paralelligi ise; aynı iş parçası üzerinde, eş zamanlı ve birbirini engellemeyecek şekilde yapılan iş paylaşımı uygulamalarını içermektedir.

Bazı üretim tesislerinde tek bir görev geri kalanı ile karşılaştırıldığında oldukça yüksek işlem süresine sahip olabilir. Bu gibi durumlarda çevrim süresini böyle bir görevin gerektirdiği kadar yüksek ayarlamak verimsiz olabilir. Bu problemi çözmek için yeni istasyonlar açmak yerine aynı görevin birden fazla istasyona atanması sağlanarak görev paralel hale getirilebilir. Ancak tanım gereği bir görev daha küçük birimler halinde bölünemediğinden bir görev birkaç istasyon arasında paylaşılamaz ama bir görev dönüşümlü olarak işlenebilir (Boysen ve Fliedner 2008). Bu sayede bir görevin birden fazla aşamada gerçekleştirilmesine izin verilmiş olur. Bu nedenle atanan görev için

kullanılacak olan araç/ekipman görevin atandığı istasyonların hepsine yerleştirilmesi gerekir (Ege ve ark. 2009).

Üretim sisteminde işlem süresi çevrim süresinden fazla bir veya daha fazla görev varsa istasyonların paralel hale getirilmesi ile bu sorun çözülebilir. (Battaia ve Dolgui 2013). Bir istasyonun paralel hale getirilmesi için paralel istasyonlara atanan görevler için gerekli olan tüm araç/ekipmanların çoğaltılması gerekir. Paralel istasyonların bazı avantajları aşağıda verilmiştir;

- Paralel hale getirme işçilik gereksinimlerini azaltabilir çünkü artan zaman kapasitesinden dolayı görevler bir etapta daha sık olabilir (Ege ve ark. 2009)
- Hattın üretim hızı paralellik yokluğunda maksimum işlem süresiyle sınırlıdır. Paralel hale getirme ile birlikte getirilen zaman kapasitesi, maksimum iş süresini arttırarak üretim oranını arttırır (Ege ve ark. 2009)
- Paralel montaj hatlarında ekipman sorununu oluşturduğunda diğer hatlar çalışmaya devam eder. Tekli seri hatlarda ise herhangi bir arıza olduğu zaman tek seri hat kapatılmalıdır. Hatların ortak bir kaynakla eş zamanlı olarak çalışması kaynak minimizasyonu açısından oldukça önemlidir. (Gökçen ve ark. 2006)
- İstasyonlar paralel hale getirildiğinde verimlilik artar ve istasyonda çalışan operatörün boş kalma süresinde belirgin bir azalma meydana gelir ve düzenli çalışma akışı sağlanır (Buxey 1974)
- Montaj hattındaki istasyonlarının paralel olması ile çevrim süresinden daha uzun olan görevlerin atanma problemini çözmenin yanı sıra hat etkinliğini de arttırmaktadır (Sarker ve Shanthikumar 1983)

Paralel hale getirmenin avantajları olduğu gibi bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Bunlardan bazıları şunlardır;

- Paralel istasyonların kurulması belirli bir hat tasarımı için sermaye ve ek sabit maliyetlere neden olabilir (Battaia ve Dolgui 2013; Askın ve Zhou 1997).
- Yüksek esnekliğe sahip operatörlere gereksinim olduğundan eğitim ve koordinasyon sağlanması gereklidir. Bu nedenle ek eğitim maliyeti gerektirmektedir.

Bard (1989) çalışmasında paralel iş istasyonlu montaj hattı dengeleme probleminin çözümü için dinamik programlama sunmaktadır. Model gerekli minimum istasyon sayısı ve ek tesislerin kurulma maliyeti arasındaki dengeyi sağlamaktadır. İlk olarak hem görev maliyeti hem de ekipman maliyeti dikkate alınır. İkinci olarak çevrim süresi boyunca üretken olmayan zaman dikkate alınmaktadır.

Askın ve Zhou (1997) çalışmalarında paralel iş istasyonları oluşturmak ve görev atamak için sezgisel geliştirmişlerdir. Amaç paralel iş istasyonu oluşturmak için gerekli olan maliyeti minimize etmektir. Geliştirilen sezgisel yöntemin performansını analiz etmek için bir uygulama gerçekleştirilmiştir.

Süer (1998) tarafından yapılan çalışmada alternatif montaj hattı tasarım stratejileri tartışılmaktadır. Çalışmada amaç minimum insan gücü ile çalışan montaj hattı tasarımını belirlemektir. Bunun için MHDP’de montaj hattı dengeleme, paralel istasyon sayısı belirleme ve paralel hatları belirleme olmak üzere 3 aşamalı metodoloji önerilmiştir.

Kaplan (2004) tarafından yapılan çalışmada tek modelli montaj hattının görevleri paralel hale getirme ile dengelenmesi problemi ele alınmıştır. Çalışmada toplam istasyon açma maliyeti ve ekipman maliyetinin minimize edilmesi amaçlanmaktadır. Problemin çözümü için paralel göreve izin veren bir dal-sınır algoritması önerilmektedir. Dal-sınır algoritması için üst sınır belirlemek ve büyük boyutlu problemler için optimale yakın sonuçlar elde etmek amacıyla sezgisel algoritma geliştirilmiştir.

Boysen ve Fliedner (2008) çalışmalarında paralel iş istasyonları ve paralel işler, maliyet sinerjileri, işlem alternatifleri, bölgesel kısıtlar, stokastik işlem süreleri ve U şekilli montaj hattı dengeleme problemlerini çözmek için tasarlanmış iki aşamalı bir grafik algoritması ele almaktadırlar. İlk aşamada, geçerli bir iş çizelgesi oluşturulur. İkinci aşamada görevlerin istasyona atanması sağlanır.

Gerçek hayattaki üretim sistemleri doğası gereği çeşitli stokastik unsurlar (yorulmalar, dikkatin dağılması, hatalı girdiler, araç/gereç bozulmaları) barındırmaktadır. Bu nedenle deterministik modellerden elde edilen çözümlerin gerçek hayattaki üretim sistemlerinde etkin bir sonuç vermesi her zaman mümkün değildir. Bu amaç doğrultusunda söz konusu



stokastik unsurların bir simülasyon modeliyle incelenmesi ile daha gerçekçi ve uygulanabilir sonuçlar elde edilebilir.

Simülasyon tekniği üretim sistemlerinin bilgisayar ortamında canlandırılmasına analiz edilmesine olanak sağlayan işlevsel bir metottur (Akın 2015). Karmaşık işletme sistemlerini, analitik olarak çözüm veren tamsayılı programlama ile ifade etmek her zaman mümkün değildir. İşletmelerin özellikle araştırma ve geliştirme çalışmalarında önemli bir yeri olan böyle modellerin kurulmasında araştırmacılar son yıllarda simülasyon tekniğine yönelmişlerdir. Simülasyon tekniği, yönetici ve araştırmacılara gerçek sistemleri modellerken zaman faktörünü göz önünde bulundurma olanağı verir. Esneklik kullanım kolaylığı üretim sistemlerinin dinamik ve stokastik özelliklerin modelleme becerisi gibi birçok avantaja sahip simülasyon, bir imalat şirketinin performansı hakkında eleştirel bir bakış açısı kazanmaya yardımcı olur. Simülasyonu hat dengeleme için bir değerlendirme aracı olarak kullanmak, gerçek hedefi bozmadan üretim hattının performansı hakkında bilgi toplamak, farklı alternatifleri değerlendirerek sistemin performansını arttırmak, uygulanmadan önce yeni alternatifleri test etmek amacıyla kullanılmaktadır (Sarıaslan 1986).

Cortes ve ark. (2010) tarafından yapılan çalışmada gerçek hayatta bir motosiklet imalat şirketindeki montaj hattı dengeleme problemi sunulmaktadır. Firmada ilk durumda elde edilen sonuçlar ile yeni bir komşu arama metodu ve sezgisel metot ile sağlanan sonuçlar karşılaştırılmıştır. Farklı önerileri test etmek için ARENA simülasyon yazılımı kullanılmıştır.

Bae ve ark. (2014) çalışmalarında üretkenliği arttırmak ve beklenen talep büyümesine uyum sağlamak için bir simülasyon modeli geliştirmişlerdir. Simülasyon modelinin sonuçları hattaki çıktı oranlarına bakılarak değerlendirilmektedir. Bu doğrultuda çıktıyı arttırmak amacıyla farklı faktörlerin etkisi incelenerek çıktıyı en çok etkileyen senaryo bulunmaktadır.

Zupan ve Herakovic (2015) tarafından yapılan çalışmada üretim hattının optimizasyonu için hat dengeleme ve ayırık olay simülasyon yaklaşımı kullanılarak gerçekleştirilen vaka çalışması sunulmuştur. Makalede “what-if” (olursa ne olur) senaryoları kullanılmaktadır.

Yapılan çalışmanın sonucunda üretim hattında üretilen ürünlerin sayısı yükselirken üretim hatları büyük miktarda stok bulundurmadan çalıştığı görülmektedir.

Jamil ve Razali (2015) yaptıkları çalışma otomotivde montaj hattı dengelenmesi simülasyonuna odaklanmaktadırlar. Mevcut üretim hattında hat verimliliğinin düşük olması ve müşteri talebinin karşılanmaması gibi bazı problemler bulunmaktadır. Bu çalışmanın amacı, hat verimliliğini simülasyon tekniğini kullanarak değerlendirmek ve üretim hattının durumunu kaynak kullanımı, tıkanma/darboğaz ve boş kalma süresi açısından izlemektir.



### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

#### 3.1. Materyal

Bu bölümde yapılan çalışmada kullanılan tamsayılı programlama ve simülasyon yöntemi ile ilgili genel bilgilere yer verilmiştir.

##### 3.1.1. Tamsayılı Programlama

Tamsayılı doğrusal programlama (TDP), değişkenlerden bazılarının veya tümünün tamsayı değerler aldığı bir doğrusal programlama problemidir. Tamsayılı programlama modelleri matematiksel programlamanın neredeyse her alanında ortaya çıkmaktadır. Tamsayılı programlama modelinin genel problem formülasyonu;

$$\max \{ cx \mid Ax \leq b; x \in \mathbb{Z} \} \quad (3.1)$$

olarak belirtilmektedir.  $A$  matris,  $b$  ve  $c$  vektör olarak tanımlanan tamsayılı programlama modelinin diğer formülasyonu aşağıdaki gibidir (Schrijver 1998).

$$\max \{ cx \mid x \geq 0; Ax = b; x \in \mathbb{Z} \} \quad (3.2)$$

Her iki formülasyon yapısı da polinom eşitliği olarak tanımlanmaktadır. Problemin primal ve dual ilişkisi ise aşağıdaki gibi sağlanmaktadır (Schrijver 1998).

$$\max \{ cx \mid Ax \leq b; x \in \mathbb{Z} \} \leq \min \{ yb \mid y \geq 0; yA = c; y \in \mathbb{Z} \} \quad (3.3)$$

Bir doğrusal programlama ( $DP$ ), matematiksel programlamanın bir sınıfıdır.  $DP$  lineer kısıtları sağlarken doğrusal amaç fonksiyonu olan  $z$ 'yi maksimize veya minimize etmeyi sağlayan sürekli değişkenler için bir dizi değer bulmaya çalışır. Doğrusal programlama modelinin kapalı formu aşağıdaki gibidir (Chen ve ark. 2011);

$$\max z = \sum_j c_j x_j \quad (3.4)$$

$$\sum_j a_{ij} x_j \leq b_i, \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (3.5)$$

$$x_j \geq 0, \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (3.6)$$

Tamsayılı doğrusal programlama problemi değişkenlerden en az birinin tamsayı değerleriyle sınırlandırıldığı doğrusal bir programlama problemidir. Bazı değişkenlerin tamsayılı olarak tanımlandığı modellere karışık- tamsayılı programlama modeli denir. Karışık tamsayılı programlama modelinin kapalı formu aşağıdaki gibidir (Chen ve ark. 2011);

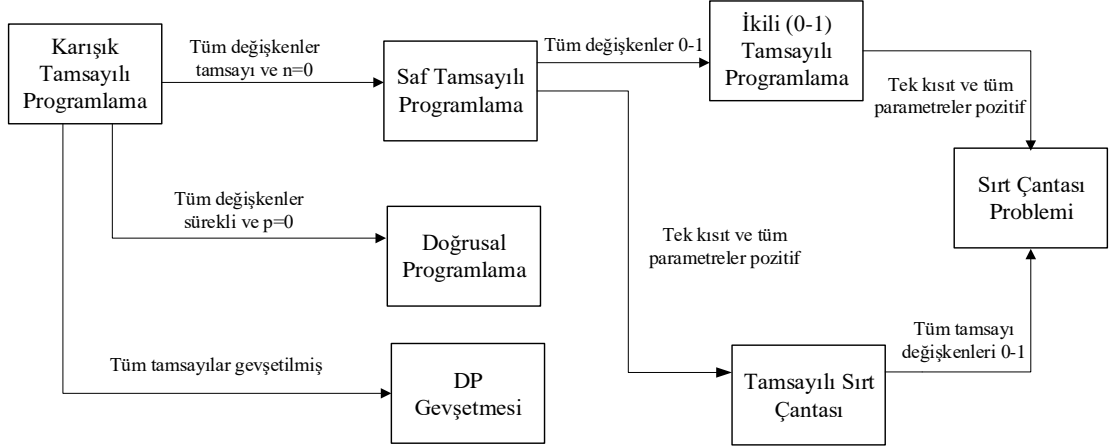
$$\max z = \sum_j c_j x_j + \sum_k d_k y_k \quad (3.7)$$

$$\sum_j a_{ij} x_j + \sum_k g_{ik} y_k \leq b_i, \quad (i = 1, \dots, m) \quad (3.8)$$

$$x_j \geq 0, \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (3.9)$$

$$y_k = 0, 1, 2, \dots, \quad (k = 1, \dots, p) \quad (3.10)$$

Tamsayılı programlama Şekil 3.1'deki sınıflandırılabilir. Karışık tamsayılı programlama tüm değişkenler tamsayı ve  $n = 0$  (sürekli değişkenlerin sayısı) olduğu durumda saf tamsayılı programlamaya indirgenirken, tüm değişkenler sürekli ve  $p = 0$  (tamsayı değişkenlerinin sayısı) olduğu durumda ise karışık tamsayılı programlama doğrusal programlamaya indirgenir. Belirli bir karışık tamsayılı programlama modelinde tam sayı gereksinimlerini rahatlatarak (veya yok sayarak) bir *DP* elde edilebilir. Bu nedenle bu gevşetme *DP* gevşetmesi olarak adlandırılmaktadır (Chen ve ark. 2011).



**Şekil 3.1.** Tamsayılı programlamanın sınıflandırılması (Chen ve ark. 2011)

Tamsayı değişkenlerinin 0 veya 1 olarak kısıtlandığı bir tam sayı programlama modeline ikili tam sayı programlama modeli denilmektedir. Amaç fonksiyonu ve kısıt katsayılarının hepsi pozitif olan ve tek bir kısıtlamaya sahip ikili tamsayılı programlama sırt çantası (veya sırt çantası) problemi, tek bir kısıtlı ve tüm pozitif kısıt katsayılarına sahip bir tamsayılı programlama, tam sayı değişken değerinin 0-1 ile sınırlandırılmadığı durumda ise tam sayı sırt çantası problemi olarak adlandırılmaktadır (Chen ve ark. 2011).

Tamsayılı programlama modellerini çözmek için farklı yaklaşımlar geliştirilmiştir. Bugüne kadar geliştirilen yaklaşımlardan biri Land ve Doig'in 1960 tarihli makalesinde anlattıkları tamsayı programlama problemlerine, çözüm üretmede önemli bir rolü olan dal-sınır (branch and bound) yaklaşımıdır (Jünger ve ark. 2009). Dal-sınır yaklaşımında “böl” ve “yönet” stratejisi kullanılmaktadır. Bu yaklaşımda uygun çözüm bölgesi daha yönetilebilir alt bölümlere bölünür. Gerekirse daha alt bölümlere de ayrılmaktadır. Bir tamsayılı doğrusal programlama tamsayı kısıtları tarafından daha da kısıtlanan doğrusal bir programdır. Bu nedenle, bir maksimizasyon probleminde, doğrusal program optimumunda amaç fonksiyonun değeri, her zaman optimum tamsayı programlama hedefi için üst sınır olacaktır. Buna ek olarak, herhangi bir tam sayı uygun olan nokta daima optimal doğrusal program amaç değerinde bir alt sınırdır. Dal-sınır yaklaşımı, doğrusal programlamanın uygulanabilir bölgesini sistematik olarak alt bölümlere ayırmak ve bu alt bölümlere dayanan tamsayı programlama probleminin değerlendirmelerini yapmak için bu gözlemleri kullanmaktadır. Dal sınırlamanın temel

fikri  $\underline{Z} < Z^* < \bar{Z}$  sınırlarını genişletmek için uygun olan bölgeyi alt bölümlere ayırmaktır. Örneğin maksimizasyon problemleri için alt sınır  $\underline{Z}$  karşılaşılan herhangi bir tamsayı nokta değerinin en yüksek değerini alır. Üst sınır  $\bar{Z}$  doğrusal programın optimum değeri veya herhangi bir kutudaki amaç fonksiyonu için en büyük değer tarafından verilir. Bir alt bölümü değerlendirdikten sonra başka bir alt bölüme geçilir. Ayrıca;

- i)  $L_j$  değeri doğrusal programlama çözümünün değerinden büyük ise uygun olmayan çözümdür
- ii) Optimal doğrusal programlama çözümü  $Z_j$  değerinden büyükse tamsayı çözümdür; veya
- iii) Lineer programlama çözümü  $Z_j$  nin değeri  $Z_j$  değerinden büyük ise, (maksimize ediyorsa)  $Z_j \leq \underline{Z}$  sağlamaktadır

Bu durumlarda bulunan çözüm değeri, tamsayılı programlama metodolojisinde budanmış çözüm olarak adlandırılmaktadır. Durum (i) uygun olmama sonucundaki budama durumu (ii) integrallik sonucu budama durumu (iii) sınırlar sonucundaki budama olarak tanımlanmaktadır (Bradley ve ark.1988).

Çözüm yaklaşımlarından bir diğeri ise 1958 yılında Gomory tarafından geliştirilen kesme düzlemi (cutting plane) yöntemidir (Jünger ve ark. 2009). Dal-sınır algoritmasında olduğu gibi kesme düzlemi algoritması da sürekli bir doğrusal programlama probleminin optimum çözümüyle başlar. Ancak, bu yöntemde dallanma ve sınırlamadan çok, kesme adı verilen özel kısıtlar artarda oluşturularak çözüm uzayının düzenlemesine gidilir (Taha 2007).

Kesme düzlemi algoritmasının adımları aşağıdaki gibidir (Winston ve Goldberg 2004).

#### Algoritma: Kesme Düzlemi

Adım 1:  $TP$ 'nin  $DP$  gevşetmesi için en iyi çözüm tablosunu bulunur. Eğer tüm değişkenler tamsayı değerler almışsa en iyi çözüm bulunmuştur. Aksi takdirde bir sonraki adıma geçilir.

Adım 2: Sağ taraf değerinin kesirli kısmı seçilir ve bu kısıt bir kesim oluşturmak için kullanılır.

Adım 2a: Seçilen kısıt için tüm tamsayı değerleri sol tarafa ve tüm kesirli değerleri sağ tarafa toplanır.

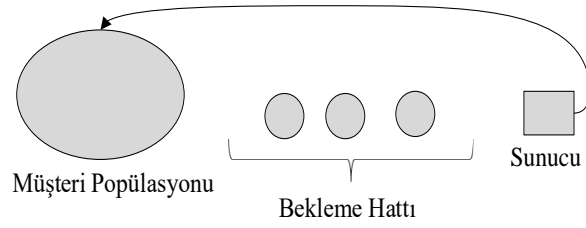
Adım 2b: Değiştirilmiş kısıtın sağ tarafı  $\leq 0$  olacak şekilde bir kesme üretilir.

Adım 3: Dual simpleks yöntemini kullanarak kesme eklenen yeni  $DP$  gevşetmesinin en iyi çözümü bulunur. Tüm değişkenler optimal çözümde tamsayı değerler alırsa,  $TP$  için en uygun çözüm bulunmuş olur. Aksi takdirde, kısıtlamayı kesirli kısımlar belirlenerek yeni bir kesim oluşturmak için kullanılır. Tüm değişkenlerin tamsayı olduğu bir çözüm bulana kadar bu işleme devam edilir.

### 3.1.2. Simülasyon

Simülasyon, bir sistemin yapay bir geçmişinin oluşturulmasını ve bu yapay geçmişin gerçek sistemin çalışma özelliklerine bağlı çıkarımlar üretmek için gözlemlenmesini içermektedir. Simülasyon genellikle imalat uygulamaları, yarıiletken üretimi, inşaat mühendisliği, askeri uygulamalar, lojistik taşımacılık ve dağıtım uygulamaları, iş süreçleri simülasyonu ve insan sistemleri gibi birçok alanda kullanılmaktadır.

Simülasyonunun en genel örneklerinden biri kuyruk sistemi simülasyonudur. Şekil 3.2'de basit bir tek kanallı kuyruk sistemi örneği verilmektedir. Kuyruk sistemi müşteri popülasyonu, gelişlerin doğası, servis mekanizması, sistem kapasitesi ve kuyruk disiplininin oluşmaktadır. Bu sistemde müşteriler zaman içerisinde sisteme gelir, kuyruğa katılır (bekleme hattı) ve servis alarak sistemi terk eder (Banks ve ark. 2005).



**Şekil 3.2.** Kuyruk sistemi

Simülasyon yönteminin birçok avantajı ve bazı dezavantajları bulunmaktadır. Simülasyonun avantajları aşağıdaki gibidir (Banks ve ark. 2005);

- Gerçek sistemin devam eden operasyonlarını bozmadan yeni politikalar, çalışma usulleri, karar kuralları, bilgi akışları, örgütsel prosedürler vb. incelenebilir
- Yeni donanım tasarımları, fiziksel düzenlemeler, ulaşım sistemleri vb., satın alımları için kaynak ayırmadan test edilebilir
- Bazı olayların nasıl ve neden meydana geldiği ile ilgili hipotezler, fizibilite açısından test edilebilir
- Araştırma altındaki olayın hızlandırılması veya yavaşlaması için zaman sıkıştırılabilir veya genişletilebilir
- Değişkenlerin etkileşimi konusunda bir görüş elde edilebilir
- Değişkenlerin sistemin performansını ne kadar etkilediği hakkında bilgi verir
- Darboğaz analizi, işlem sürecinin, bilgi, materyal ve benzerlerinin neden geciktiğini gösterir
- Bir simülasyon çalışması, bireylerin sistemin nasıl çalıştığını düşünmek yerine, sistemin nasıl çalıştığını anlamada yardımcı olabilir
- Senaryo analizi soruları cevaplanabilir. Bu özellikle yeni sistemlerin tasarımında kullanışlıdır

Simülasyon yönteminin bazı dezavantajları aşağıdaki gibidir (Law ve Kelton 1991);

- Bir sistemin bilgisayar simülasyonunu modellemesi ve analizi oldukça zaman alıcıdır



- Simülasyon tekniği öğrenildikten sonra araştırmacılar analitik yöntemlerin daha uygun olduğu durumlarda da simülasyon yöntemini kullanabilirler
- Oluşturulan simülasyon modelini bilgisayarda çalıştırması zaman alabilir
- Simülasyon modelleri genellikle pahalı ve zaman alıcıdır
- Stokastik simülasyon modelinin her bir çalışması için belirli bir girdi parametresi kullanılarak modelin gerçek özellikleri tahmin edilir. Bu nedenle çalışılacak her bir girdi parametresi için modelin bağımsız olarak birkaç kere çalışması gerekecektir. Bu nedenle simülasyon modelleri, belirli bir alternatif sistem tasarımı karşılaştırılmasında, optimizasyonunda iyi değildir. Diğer yandan, uygunsa, analitik bir model, çeşitli girdi parametreleri setleri için o modelin gerçek özelliklerini kolayca üretebilir. Bu nedenle, "geçerli" bir analitik model mevcutsa veya kolayca geliştirilebiliyorsa, genellikle bir simülasyon modeline tercih edilir

Bir simülasyon sistemini anlamak ve analiz etmek için, birkaç terim oldukça önemlidir. Bir *varlık* sistemdeki ilgili nesneyi tanımlamaktadır. Bir *etiket*, sistemdeki bir varlığın özelliğini ifade etmektedir. Bir *işlem*, belirtilen uzunluktaki bir süreyi temsil eder. Örneğin bir banka incelenirse, müşteriler varlıklardan biri olabilir, çek hesaplarındaki bakiye bir durum değişkeni olabilir ve ödeme yapmak bir işlem olabilir (Banks ve ark. 2005).

Bir sistemin *durumu*, sistemin herhangi bir zamanda, çalışmanın amaçlarına göre tanımlanması gerekli olan değişkenler olarak ifade edilebilir. Bir bankanın çalışmasında, olası durum değişkenleri meşgul çalışan kişilerin sayısı, bekleyen müşterilerin sayısı ve bir sonraki müşterinin varış zamanıdır. Bir *olay*, sistemin durumunu değiştirebilecek anlık bir durum olarak tanımlanmaktadır (Banks ve ark. 2005).

Çizelge 3.1’de bazı sistemler için varlıklar, etiketler, işlemler, olaylar ve durum değişkenleri listelenmektedir.

Çizelge 3.1’de verilen üretim sistemini incelenirse burada makineler varlık olarak tanımlanmaktadır. Makinelerin hızı, kapasitesi, arıza oranları etiket olarak tanımlanan varlığın özellikleridir. Kaynak ve presleme sistemde gerçekleşen işlemdir. Sistemin

durumunu anlık olarak değiştirebilecek olan olay arızalardır ve değişkenlerin durumu ise makinelerin durumu (meşgul, boşta veya kapalı) olması durumudur.

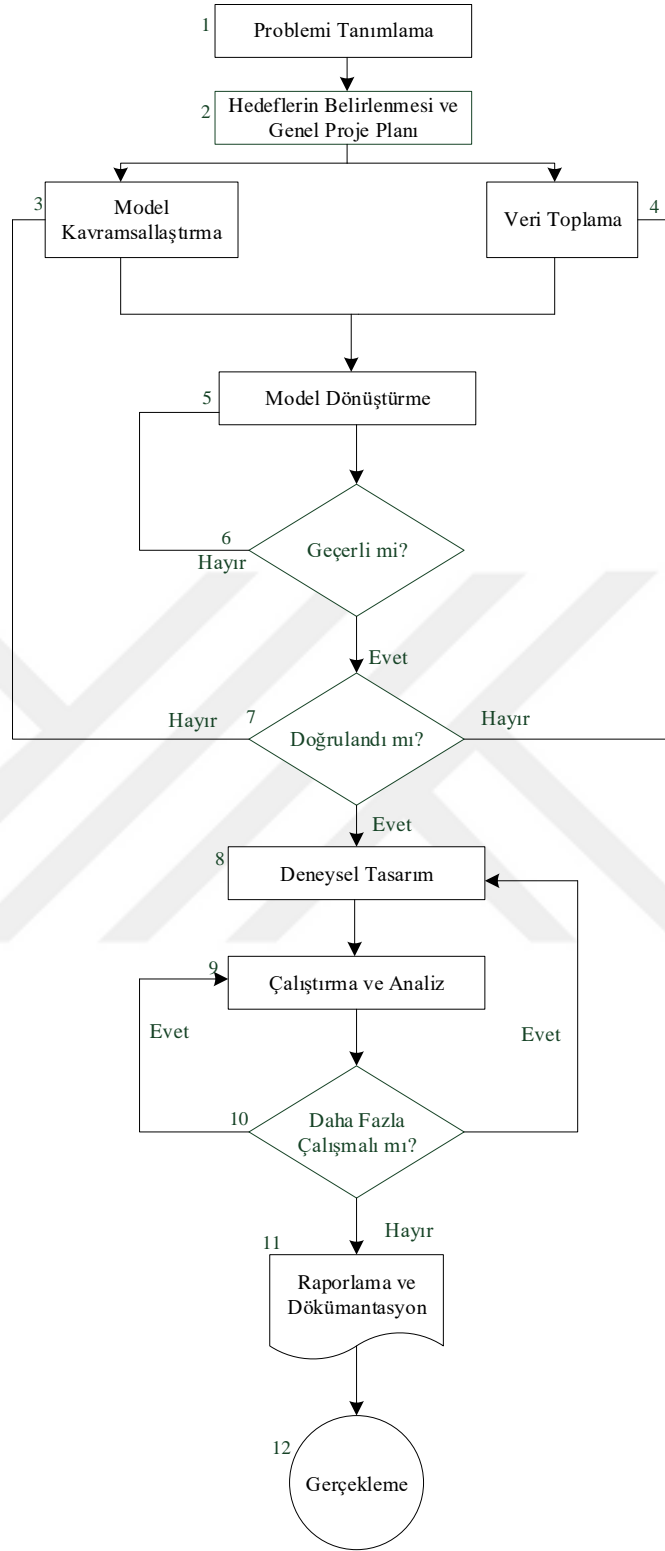
**Çizelge 3.1.** Sistem ve bileşen örnekleri (Banks ve ark. 2005).

Sistem	Varlıklar	Etiketler	İşlemler	Olaylar	Durum Değişkenleri
Bankacılık	Müşteriler	Çek-hesap bakiyesi	Depozito yatırmak	Geliş; ayrılma	Meşgul banka memuru; bekleyen müşteri sayısı
Hızlı demiryolu	Biniciler	Çıkış yeri; varış yeri	Seyahat	İstasyona varış; hedefe varış	Her istasyonda bekleyen sayısı; Taşınan binici sayısı
Üretim	Makineler	Hız; kapasite, hata oranı	Kaynak; pres	Hata	Makinelerin durumu
İletişim	Mesajlar	Uzunluk; gönderilecek yer	İletme	Hedefe varış	İletilmek üzere bekleyen sayısı
Envanter	Depo	Kapasite	Geri alma	Talep	Envanter seviyesi; karşılanmayan talep

Simülasyon modelleri, statik veya dinamik, deterministik veya stokastik ve kesikli veya sürekli olarak sınıflandırılabilir. Statik simülasyon modeli, belli bir noktadaki sistemi temsil eder. Monte Carlo simülasyonu statik bir simülasyon modeline örnektir, Dinamik simülasyon modelleri, sistemlerin zamanla değişimlerini anlatır. Saat 09:00'dan Saat 16:00'a kadar bir bankanın simülasyonu dinamik bir simülasyon örneğidir (Banks ve ark. 2005).

Hiçbir rassal değişken içermeyen simülasyon modelleri deterministik olarak sınıflandırılır. Deterministik modellerin, benzersiz bir çıktı seti ile sonuçlanacak olan bilinen bir girdi kümesine sahip olması gerekir. Stokastik simülasyon modeli, girdi olarak bir veya daha fazla rasgele değişken içerir. Rasgele girdiler rasgele çıktılara neden olur. Çıktılar rasgele olduğu için yalnızca bir modelin gerçek özelliklerinin tahminleri olarak düşünülebilir (Banks ve ark. 2005).

Simülasyon modeli oluşturulurken belli adımlar izlenmektedir. Şekil 3.3'te simülasyon modeli oluşturulurken izlenen adımlar verilmektedir.



Şekil 3.3. Bir Simülasyon Çalışmasındaki Adımlar (Banks ve ark. 2005).

Şekil 3.3’de simülasyon çalışmasında genel olarak izlenen adımların her biri için aşağıda kısa açıklamalar verilmektedir (Banks ve ark. 2005);

1. Problemi tanımlama: Her çalışma problem tanımı ile başlar. Problemin iyi bir şekilde tanımlanması problemin açık bir şekilde anlaşılmasına olanak sağlamaktadır.
2. Hedeflerin belirlenmesi ve genel proje planı: Bu adımda simülasyonunun tanımlanan problem için uygun metodoloji olup olmadığı yönünde belirlenen hedefler doğrultusunda tespit yapılmaktadır.
3. Model kavramsallaştırma: Problemin önemli özelliklerini özetleme, varsayımlarla sistemi tanımlama, işe yarar yaklaşık sonuçlar elde edene kadar modeli geliştirme olarak tanımlanmaktadır. Basit bir model ile başlamak ve karmaşıklığı arttırarak oluşturmak en iyisidir. Ancak karmaşık modellerde oluşturulan simülasyon modeli istenen hedefleri gerçekleştirmek için gerekli olan karmaşıklığı geçmemelidir.
4. Veri toplama: Modelin karmaşıklığına göre gerekli olan veri seti değişebilir. Veri toplama işlemi simülasyonun gerçekleştirilmesinin büyük bir bölümünü aldığından mümkün olduğunca erken başlatılmalıdır.
5. Model dönüştürme: Gerçek dünya sistemleri çok miktarda bilgi ve hesaplama gerektirmektedir. Bu nedenle model bilgisayar tarafından tanınabilen bir formatta girilmelidir. Bu aşamada model kurucu hangi program dilini kullanacağına karar vermelidir.
6. Geçerli mi? Geçerleme gerekli simülasyon programı ile ilgilidir. Çoğu karmaşık yapıli sistemlerde modeli hatasız bir şekilde oluşturmak oldukça güçtür bu aşamada modelin girdi parametreleri ve mantıksal yapısı kontrol edilir.
7. Doğrulandı mı? Geçerleme adımından sonra genellikle simülasyon yazılımı kullanılarak operasyonel model doğrulanır. Bu adımda modelin kalibrasyonu ile gerçek sistemin davranışlarının karşılaştırılır. Bu süreç kabul edilebilir oluncaya kadar devam eder. Bu adımdan sonra deneysel tasarım adımına geçilir.

8. Deneysel tasarım: Bu adımda simüle edilecek alternatifler belirlenmelidir. Simüle edilen her sistem tasarımı, başlangıç periyot uzunluğu, simülasyon çalışma uzunluğu, replikasyon sayısı ile ilgili kararlar belirlenmelidir.

9. Çalıştırma ve analiz: Simüle edilen sistem tasarımları için performans ölçütlerini tahmin etmek için kullanılır.

10. Daha fazla çalışmalı mı? Çalıştırma ve analiz tamamlandıktan sonra daha fazla çalışma ve ek deneysel tasarıma ihtiyaç var mı bu aşamada karar verilir.

11. Dökümantasyon ve rapor: Program ve ilerleme olmak üzere iki çeşit dökümantasyon bulunmaktadır. Program dökümantasyonu, program aynı ya da farklı analistlerce kullanılacaksa programı anlamak için gerekli olmaktadır. Model kullanıcıları analiz bazında karar verebileceklerdir. İlerleme dökümantasyonu, simülasyon projesinin ilerlemesini görmek için oldukça önemlidir. Son olarak final raporunda tüm analizler açık ve kısa bir şekilde raporlanmalıdır. Bu sayede ele alınan sistemin son nihai durumu gözden geçirilmiş olacaktır.

12. Gerçekleme: Çözümlerin doğruluğu bu aşamada gerçekleşir. Başarılı bir gerçekleme önceki 11 aşamaya bağlıdır.

Bir modelcinin veya analistin bir simülasyon çalışması yaparken yapması gereken en önemli kararlardan biri dil seçmektir. Uygun olmayan bir seçim, bir simülasyon projesinin zamanında tamamlanamaması halinde başarısız olmasına neden olabilir. Simülasyon dilleri, bir simülasyon modelinin programlanmasında gerekli olan özelliklerin çoğunu sağladığından programlama süresinin önemli ölçüde azalmasına olanak sağlar. Simülasyon modelleri genellikle bir simülasyon dilinde yazıldığından değiştirilmesi daha kolaydır.

Günümüzde en çok kullanılan simülasyon paketleri Arena, AutoMod, Extend, FlexSim, Micro Saint, ProModel, QUEST, WITNESS ve SIMUL 8 dir.

Bu çalışmada ProModel simülasyon paketi kullanılmıştır. ProModel bir simülasyon aracı olarak iş atölyeleri, konveyör, transfer hatları, seri üretim montaj hatları kaynak kullanımı, üretim kapasitesi, verimlilik, stok seviyeleri, darboğazlar, iş hacmi ve diğer

performans ölçütlerini optimize etmek için kullanılmaktadır (Bowden ve ark. 2000). ProModel, her çeşit üretim sistemini, özellikle de tedarik zinciri sistemlerini hızlı ve hassas bir şekilde modellemek için tasarlanmış bir simülasyon ve animasyon aracıdır. Mühendisler ve yöneticiler, üretim odaklı modelleme unsurlarını ve kural tabanlı karar mantığını öğrenebilmeleri ve kullanmaları açısından oldukça kolay bulmaktadır (Benson 1997).

### 3.2. Yöntem

Bu çalışmada Yİ istasyonu kalite kontrol işlemine ek olarak, normal şartlarda diğer istasyonlarda yapılmakta olan görevlerinde yapılabileceği bir birim olarak düzenlenerek hat etkinliğin artırılması amacıyla öncelikle Yİ istasyonunun bu amaçla kullanılmasına olanak sağlayan bir tamsayılı programlama modeli önerilmektedir. İkinci olarak üretim sistemlerindeki çeşitli stokastik unsurların probleme dahil edilmesi, geliştirilen tamsayılı programlama modelinden elde edilen çözümlerin doğrulanması ve çözüm duyarlılığının incelenmesine olanak sağlamak amacıyla oluşturulan bir simülasyon modeli verilmektedir.

#### 3.2.1. MHDP için genel formülasyon

Bu bölümde sabit bir iş istasyonu için çevrim süresini minimize etmek için literatürde sıklıkla kullanılan montaj hattı dengeleme probleminin genel formülasyonu yapısı verilmiştir.

Modelde tanımlanan indisler, parametreler, değişkenler, amaç fonksiyonu ve kısıtlar aşağıdaki gibidir;

##### İndisler:

$i = 1, \dots, m$  : görevler

$j = 1, \dots, n$  : istasyon

##### Parametreler:

$t_i$  :  $i$ . görevin işlem süresi

$p_{ik}$  : öncelik ilişkisi;  $i$  görevi  $k$  görevinin öncülü ise 1, değilse 0

**Değişkenler:**

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & i. \text{ görev } j. \text{ istasyona atanmışsa} \\ 0, & \text{aksi durumda} \end{cases}$$

$c =$  çevrim süresi

**Amaç Fonksiyonu:**

$$\min z = c \quad (3.11)$$

**Kısıtlar:**

$$\sum_{j=1}^N x_{ij} = 1, \quad \forall i \quad (3.12)$$

$$\sum_{j=1}^N x_{ij} \leq \sum_{j=1}^N x_{kj}, \quad \forall i, k: p_{ik} = 1 \quad (3.13)$$

$$\sum_{j=1}^N t_i x_{ij} \leq c, \quad \forall i \quad (3.14)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\}, \quad \forall i, j \quad (3.15)$$

$$c \geq 0 \quad (3.16)$$

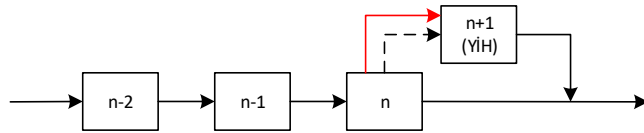
Denklem 3.11 ile amaç fonksiyonu verilmiştir. Amaç fonksiyonu, belirlenmiş istasyon sayısına göre çevrim süresini minimize etmektedir. Denklem 3.12 ile verilen kısıt her görevin bir istasyona atanmasını sağlamaktadır. Denklem 3.13 ile görevler arasındaki öncelik ilişkileri sağlanmaktadır. Denklem 3.14 ile bir istasyona atanan görevlerin işlem sürelerinin toplamının çevrim süresini aşmamasını sağlamaktadır. Denklem 3.15 ve Denklem 3.16 ile verilen kısıt değişken tanımlarını göstermektedir.

### 3.2.2. Yİ istasyonunun standart bir iş istasyonu olarak kullanılması

Seri üretim montaj hatlarında farklı işlem zamanlarına sahip operasyonlar bir araya gelerek istasyonları oluşturmakta ve istasyonlarda belirlenen sıraya göre işlem gören iş parçaları son istasyondan ürün olarak çıkmaktadır. Meydana gelen ürün son istasyonda kontrolden geçirildikten sonra belirtilen tanımlara uygun değilse Yİ istasyonuna gönderilir. Burada gerekli olan düzenleyici işlemler gerçekleştirilerek ürünün belirlenmiş olan tanımlara uygunluğu Yİ istasyonunda sağlanır

Yİ istasyonunun çalışması montaj hattındaki hata oranlarına göre farklılık göstermektedir. Hata oranı düşük seviyede olduğunda bu istasyonda bulunan kaynaklar daha az kullanılmaktadır. Bu durum da kaynakların verimli şekilde kullanılmamasına neden olmaktadır.

Montaj hattında görevler arasında öncelik ilişkileri işlerin yapılış sırasını etkilediğinden, Yİ istasyonuna atanabilecek görevlerin sayısı Yİ istasyonunun bulunduğu pozisyona bağlı olarak değişebilmekte ve bu da çevrim süresini değiştirebilmektedir. Bu nedenle Yİ istasyonunun bulunduğu pozisyon değiştirilerek, en uygun pozisyonda olmasını sağlamak çevrim süresini minimize etmek açısından oldukça önemlidir. Çalışmada Yİ istasyonunun son üç istasyon ait pozisyonlarda bulunduğu durumlar dikkate alınmıştır. Bu doğrultuda Yİ istasyonunun bulunduğu pozisyona göre üç farklı tasarım oluşturulmaktadır (Şekil 3.4, Şekil 3.5 ve Şekil 3.6).

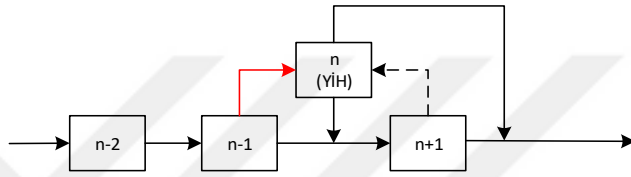


Şekil 3.4. Yİ istasyonunun son istasyon pozisyonunda bulunması

Şekil 3.4’de Yİ istasyonu son istasyon pozisyonundadır. Burada Yİ istasyonu sadece kalite kontrol sonucunda çıkan hatalı ürünlerin düzenlendiği bir istasyon olarak değil, aynı zamanda şekil 3.4’ de kırmızı ok ile gösterildiği gibi n. istasyondan gelen iş parçasını

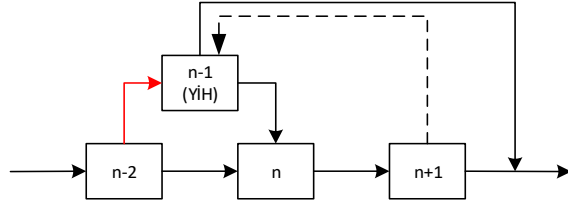


işleyen bir istasyon ((n+1). istasyon) olarak da görev yapmaktadır. Şekil 3.5’ de Yİ istasyonu sondan bir önceki istasyon pozisyonundadır, son istasyondan gelen hatalı ürünlere ek olarak, bir önceki istasyondan ((n-1). istasyon) gelen iş parçasının da işlendiği standart bir istasyon olarak da görev yapmaktadır. Benzer şekilde, Şekil 3.6’da ise Yİ istasyonu sondan ikinci istasyon pozisyonunda olduğundan, diğer durumlarda olduğu gibi son istasyondan ((n+1). istasyon) gelen hatalı ürünlere ek olarak, bir önceki istasyondan ((n-2). istasyon) gelen iş parçasının da işlendiği standart bir istasyon olarak da görev yapmaktadır.



**Şekil 3.5.** Yİ istasyonunun sondan bir önceki istasyon pozisyonunda bulunması

Yİ istasyonunun daha önceki istasyonların bulunduğu pozisyonlara alınması da mümkün olmaktadır. Bununla birlikte Yİ istasyonunun öncelikli görevinin hatalı ürünlerin düzenlenmesi olduğu düşünüldüğünde, bu istasyonun son istasyon pozisyonundan fiziksel olarak uzaklaşması, yeniden işlem gerektiren parçaların taşıma sürelerinin artmasına neden olmaktadır. Öte yandan, Yİ istasyonunun son istasyon pozisyonunda yer alması yerine, verilen alternatif tasarımlarda olduğu gibi son istasyon yakınlarındaki pozisyonlara yerleştirilmesi ile ((n-1). istasyon, (n-2). istasyon gibi), öncelik ilişkileri kısıtlarına bağlı olarak Yİ istasyonunun atanabilecek potansiyel görevlerin sayısı artmaktadır. Dolayısıyla Yİ istasyonunun pozisyonu ilk istasyona doğru yaklaştığında, bu istasyona atanabilecek görevlerin sayısı ve yeniden işlem gerektiren ürünlerin taşıma süre/mesafeleri maksimize edilirken; Yİ istasyonunun pozisyonu son istasyona doğru yaklaştığında ise bu istasyona atanabilecek görevlerin sayısı ve yeniden işlem gerektiren ürünlerin taşıma süre/mesafeleri minimize edilmektedir.



**Şekil 3.6.** Yİ istasyonunun sondan ikinci istasyon pozisyonunda bulunması

Bu bölümde anlatılan Yİ istasyonunun standart bir iş istasyonu olarak kullanıldığı durum için geliştirilen tamsayı programlama modelinin detayları aşağıda verilmektedir. Modelin amaç fonksiyonu, karar değişkenleri ve kısıtları aşağıda verilmiştir.

**İndisler:**

$i = 1, \dots, m$  : görevler

$j = 1, \dots, n$  : istasyon

**Parametreler:**

$t_i$  :  $i$ . görevin işlem süresi

$p_{ik}$  : öncelik ilişkisi;  $i$  görevi  $k$  görevinin öncülü ise 1, değilse 0

**Değişkenler:**

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & i. \text{ görev } j. \text{ istasyonuna atanmışsa} \\ 0, & \text{aksi durumda} \end{cases}$$

$$y_i = \begin{cases} 1, & i. \text{ görev Yİ istasyonuna atanmışsa} \\ 0, & \text{aksi durumda} \end{cases}$$

$$z_{ij} = \begin{cases} 1, & i. \text{ görev } j. \text{ istasyona ek olarak Yİ istasyonuna atanmışsa} \\ 0, & \text{aksi durumda} \end{cases}$$

$c$  = çevrim süresi

**Amaç Fonksiyonu:**

$$\min z = c \quad (3.17)$$

**Kısıtlar:**

$$1 \leq \sum_{j=1}^N x_{ij} \leq 2, \quad \forall i \quad (3.18)$$

$$x_{lj} \leq 1 - x_{ik}, \quad \forall j, l; \forall i, k: p_{ik} = 1; \forall k \geq j + 1 \quad (3.19)$$

$$\sum_{i=1}^M \left(\frac{t_i}{2}\right) x_{ij} y_i + \sum_{i=1}^M (1 - y_i) t_i x_{ij} \leq c, \quad \forall j \quad (3.20)$$

$$\sum_{i=1}^M x_{ij} y_i \left(\frac{t_i}{2}\right) \beta \leq c, \quad \forall j \quad (3.21)$$

$$x_{ij} = y_i, \quad \forall i, j \quad (3.22)$$

$$y_i = \sum_{j=1}^N x_{ij} - 1, \quad \forall i \quad (3.23)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\}, \quad \forall i, j \quad (3.24)$$

$$y_i \in \{0,1\}, \quad \forall i \quad (3.25)$$

$$c \geq 0 \quad (3.26)$$

Denklem 3.17 ile amaç fonksiyonunu verilmektedir. Model belirlenmiş istasyon sayısına göre çevrim süresini minimize etmeyi amaçlamaktadır. Denklem 3.18 ile verilen kısıt görevlerin en az bir en çok iki istasyona atanmasını sağlamaktadır. Bu kısıt ile, eğer

görevler Yİ istasyonuna atanmışlarsa iki istasyona, Yİ istasyonuna atanmamışlarsa sadece bir istasyona atanmış olmaktadır. Denklem 3.19 ile verilen kısıt görevler arasındaki öncelik ilişkilerini sağlamaktadır. Denklem 3.20 ile bir istasyona atanan görevlerin işlem sürelerinin toplamının çevrim süresini aşmaması sağlanmaktadır. Denklem 3.21 ile verilen kısıt ile montaj hattındaki hata oranına bağlı olarak Yİ istasyonuna atanabilecek görevleri sınırlandırarak çevrim süresinin oluşmasını sağlamaktadır. Denklem 3.22 ve 3.23 değişkenler arasındaki ilişkileri sağlamaktadır. Denklem 3.24, Denklem 3.25 ve Denklem 3.26 ile verilen kısıt değişken tanımlarını göstermektedir.

$$z_{ij} \geq x_{ij} + y_i - 1, \quad \forall i, j \quad (3.27)$$

$$z_{ij} \leq x_{ij}, \quad \forall i, j \quad (3.28)$$

$$z_{ij} \leq y_i, \quad \forall i, j \quad (3.29)$$

Denklem 3.20 ve 3.21 her  $i$  ve  $j$  için, iki değişkenin çarpımını ( $x_{ij}y_i$ ) ifadesini içermeleri nedeniyle doğrusal olmayan kısıtlardır. Bununla birlikte, söz konusu değişkenlerin her ikisi de ikili değişkenler olduğundan, her  $i$  ve  $j$  için  $z_{ij} = x_{ij}y_i$  şeklinde tanımlanan değişkenlerin, 3.27, 3.28 ve 3.29 numaralı denklemler kullanılarak eklenmesiyle modelin doğrusal hale dönüştürülmesi mümkün olmaktadır.

### 3.2.3. Simülasyon analizi

Simülasyon modelinde gerekli olan verilerin doğru bir şekilde tespit edilmesi modellenecek sistemin geçerliliğini arttıracaktır. Bu nedenle oluşturulan simülasyon modelinde elde edilen verilerin doğruluğu oldukça önemlidir. Çalışmada simülasyon modeli için tamsayı programlama modelinden elde edilen görev ve kaynak atamaları ve her bir görev için gerekli olan işlem süreleri kullanılmaktadır.

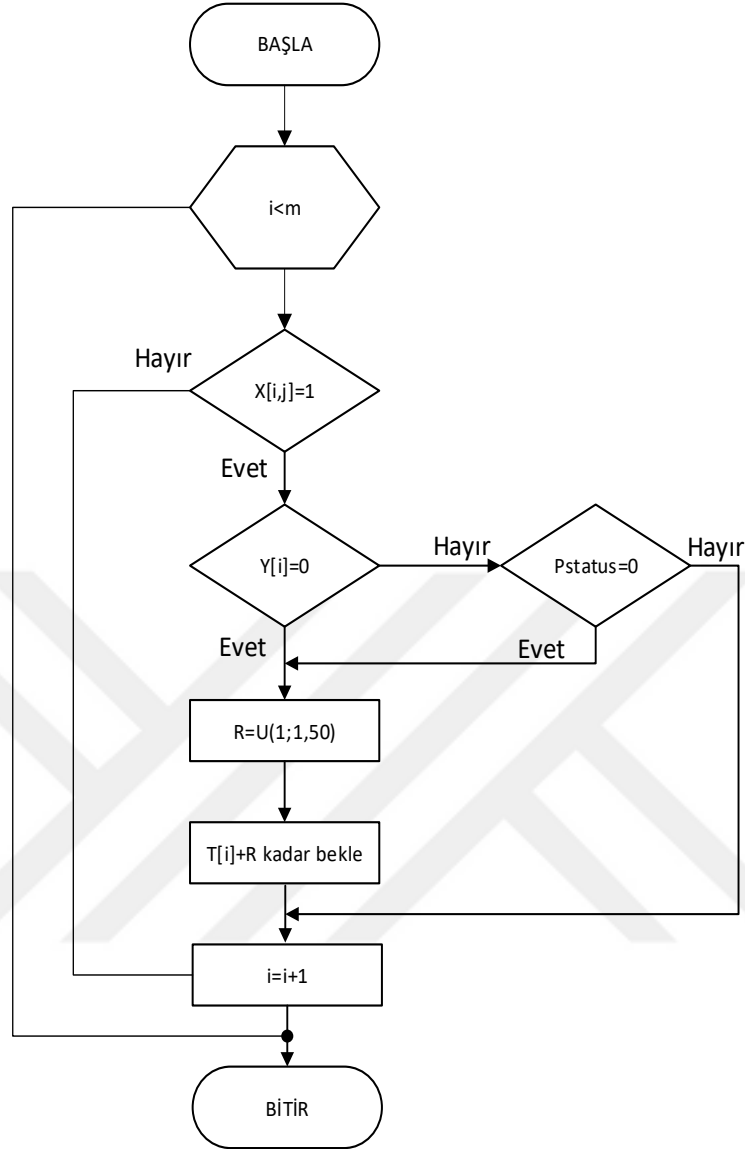
Simülasyon modelinin için gerekli olan veriler elde edildikten sonra simülasyon modeli oluşturulması aşamasına geçilir. Simülasyon modeli Yİ istasyonunun son istasyon

pozisyonunda olduğu durum için %0 ( $\beta = 1,00$ ), %25 ( $\beta = 1,25$ ) ve %50 ( $\beta = 1,50$ ) olmak üzere üç farklı hata oranı için oluşturulmaktadır. Çizelge 3.2 de simülasyon modelin oluşturmak için lokasyonlar, gelişler, varlıklar, değişkenler, veriler ve işlemlerden oluşan simülasyon modelinin oluşturulması için kullanılan bileşenlerin detayları verilmiştir.

**Çizelge 3.2.** Simülasyon modelinin oluşturulması için kullanılan bileşenler

Simülasyon Bileşeni	Açıklama
Lokasyonlar (Locations)	Simülasyon modellenmesi aşamasında öncelikle montaj hattında bulunan lokasyonlar belirlenmiştir. Simülasyon modelinde lokasyonlar; iş istasyonlarından, istasyonların önündeki kuyruklardan ve Yİ istasyonundan oluşmaktadır. Yİ istasyonu montaj hattındaki hata oranına göre 3 farklı durum dikkate alınarak kullanılmaktadır.
Gelişler (Arrivals)	Sisteme giren ilk malzeme burada tanımlanmıştır. Sisteme giren ilk malzeme ilk kuyruktan 1'er adet olarak gelmektedir
Varlıklar (Entitites)	Oluşturulan modelde görevler varlık olarak tanımlanmaktadır.
Değişkenler (Variables)	Her bir kuyruktaki varlık sayısı değişkenler ile saydırılmaktadır. Buna ek olarak Yİ istasyonunda hatalı ürünlerin düzeltilmesi için gerekli olan Yİ süresi de değişken olarak tanımlanmıştır.
Veriler (Data)	Sistemde modelin oluşturulması için gerekli olan veriler tamsayı programlama sonucunda elde edilen görev ve kaynak atamaları, her bir görev için gerekli işlem süreleridir. İlgili veriler Microsoft Excel dosyasından okutulmaktadır.
İşlemler (Processes)	Sisteme giren varlık sırasıyla istasyonlardan geçmekte ve en sonuncu istasyondan ürün olarak çıkmaktadır. İşlemler bileşeninde bu süreç modellenir.
Attributes (Etiketler)	Sistemde "RWStatus" ve "PStatus" olmak üzere iki adet etiket tanımlanmıştır. "RWStatus" sistemden çıkan varlığın hatalı olup olmadığını belirlemek için kullanılır. "PStatus" ise sisteme giren varlığın paralel görev olup olmadığını belirlemek için kullanılır.

Tamsayı programlamadan elde edilen görev ve kaynak atamalarını modelde gerçekleştirmek amacıyla işlem bölümünde Şekil 3.7'de verilen akış kullanılmaktadır.

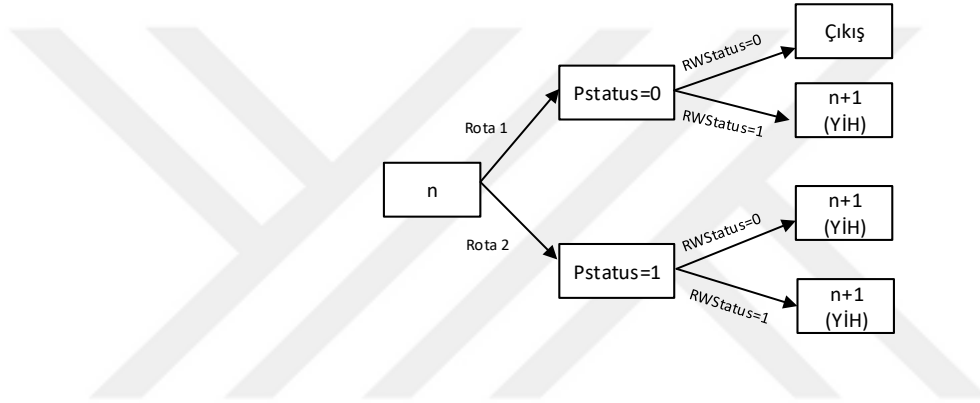


**Şekil 3.7.** İstasyonların standart ve paralel görevler için kullanım durumunu gösteren akış diyagramı

Şekil 3.7’ de görüldüğü gibi tamsayılı programlamadan gelen  $x[i,j]$  değişkeni değeri 1’e eşit ise söz konusu görev ilgili istasyona atanmaktadır. Eğer  $y[i]$  değişkeni 0’a eşit ise ilgili görev standart bir görevdir. Bu durumda işlem sürelerini stokastik hale getirmek için uniform dağılım ile 1 ve 1,50 arasında rassal sayı üretilir. Üretilen rassal sayı ve o istasyona atanan görevin işlem süresi kadar ilgili görev o istasyonda işlem görür. Eğer  $y[i]$  değişkeni 0’a eşit değil ise görevin paralel olup olmadığı kontrol edilir. “PStatus” etiketi 0’a eşit ise söz konusu görev ilgili istasyonda yapılır eğer 0’ a eşit değil ise  $Y_i$  istasyonunda yapılır. “PStatus” etiketinin 0 olduğu durumda uniform dağılım ile 1 ve 1,50

arasında rassal sayı üretilir. “PStatus” etiketi 0’a eşit değilse  $i$  bir arttırılarak  $x[i,j]=1$  olup olmadığına karar verilen aşamaya geri dönlür. Döngü  $i < m$  olduğu sürece devam eder. Döngü tamamlandığında algoritma sonlanır.

Oluşturulan simülasyon modelinde Yİ istasyonu hem standart bir iş istasyonu olarak kullanılmakta hem de son istasyondan çıkan ürün de herhangi bir kalite sorunu olduğunda gerekli olan denetleyici ve düzenleyici işlerin yapıldığı bir yer olarak kullanılmaktadır. Bunu sağlamak amacıyla son istasyonun bulunduğu proste iki rota oluşturulmuştur. Oluşturulan rota Şekil 3.8’ de verilmektedir.



Şekil 3.8. Yİ istasyonunun son istasyon pozisyonunda olduğu durum

Şekil 3.8’de görüldüğü gibi  $n$ . istasyondan çıkan varlık için iki rota bulunmaktadır. Simülasyon modelinde görevlerin paralel olma durumunu tanımlayan “PStatus” etiketi 0’a eşit ise ( $n$ ). istasyondan çıkan varlık rota 1’i seçmektedir. Rota 1 tercih edildiğinde, simülasyon modelinde sistemden çıkan ürünün hatalı olması durumu tanımlayan “RWStatus” etiketi 0’a eşit olması durumunda ürün sistemden çıkış yapmaktadır. Eğer “RWStatus” etiketi 1’e eşit ise sistemden çıkan ürün hatalı demektir. Bu durumda gerekli olan düzenleyici ve denetleyici işlemler ( $n+1$ ).istasyon olan Yİ istasyonunda gerçekleştirilmektedir. Sistemde çıkan ürünün hatalı olması durumu montaj hattındaki hata oranına göre farklılık göstereceğinden sistemden çıkan ürün hata oranına göre ( $n+1$ ). istasyona gönderilmektedir. Örneğin hata oranı %25 olduğuunda  $n$ . istasyondan çıkan ürün %25 olasılıkla ( $n+1$ ).istasyona gönderilmekte ve %75 olasılıkla da çıkışa gönderilmektedir.

İşlerin paralel olması durumunda (“PStatus=1”) ise rota 2 tercih edilmektedir. Rota 2 tercih edilmesi durumunda paralel görevler (n+1). istasyona gönderilmektedir. Bu istasyon artık standart bir iş istasyonu olarak çalıştığından burada gerçekleştirilen görevlerden sonra kalite kontrol işlemleri yine bu istasyonda gerçekleştirileceğinden ürün de herhangi bir kalite sorunu var ise yani “RWStatus” 1’e eşit ise bu istasyonda ürünün hatasını düzeltmek için gerekli olan işlemler gerçekleştirilmektedir.

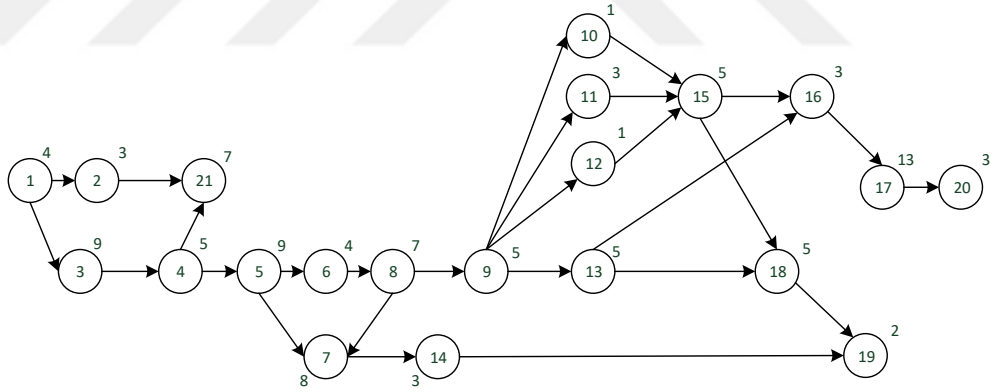




## 4. BULGULAR

### 4.1. Test Verileri

Literatürdeki test problemlerinden Mitchell test problemi (Uğurdağ ve ark. 1997) üzerinde çözüm yaklaşımı gösterilmiştir. Mitchell test örneğine ilişkin öncelik ilişkisi diyagramı ve işlem süreleri Şekil 4.1’de verilmektedir. Test örneğine ait işlem süreleri için birim verilmediğinden zaman birimi olarak ifade edilmektedir. Şekil 4.1’de Mitchell test örneği için öncelik ilişkileri gösteren bir ağ yapısı (öncelik ilişki diyagramı) verilmiştir. Bu ağda düğümler görevleri, bağlantılar da görevler arasındaki öncelik ilişkilerini göstermektedir. Şekilden de görüldüğü gibi Mitchell test örneği 21 görevden oluşmaktadır ve örneğin işlem süresi 3 zaman birimi olan 2. görev 1. görevin öncülüdür. Görevler arasındaki öncelik ilişkisi görevlerin yapılış sırasını etkilediğinden, 2. görev yapılmadan önce 1. görev yapılmak zorundadır. Bu nedenle görev atamaları gerçekleştirilirken öncelik ilişkilerinin dikkate alınması gerekmektedir.



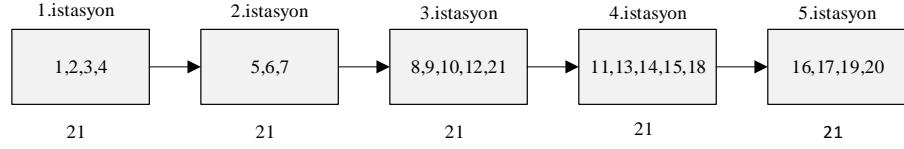
Şekil 4.1. Mitchells örneği için öncelik ilişkisi diyagramı ve işlem süreleri

Çalışmada istasyon sayısı sabit ve çevrim süresini minimize etmek amaçlandığından mitchells örneği istasyonu sayısı 5 olan durum göz önüne alınarak çözülmüştür.

### 4.2. Tamsayı Programlama Modeli

Oluşturulan model Intel (R) Core™ I7-7500 Cpu 2.70 Ghz 2.90 Ghz bilgisayar özellikleri olan bir kişisel bilgisayarda Mathematical Programming Language (MPL) ile kodlanarak

GUROBI çözücüsü ile çözülmüştür. Çözüm sonuçları Şekil 4.2 'de özetlenmiştir. Montaj hattı dengeleme probleminin Tip 2 modeli çözüldüğünden burada istasyon sayısı sabit olarak alınmış ve istasyon sayısına göre çevrim süresini minimize etmek amaçlanmıştır.



**Şekil 4.2.** Tamsayı programlama modelinden elde edilen çözüm

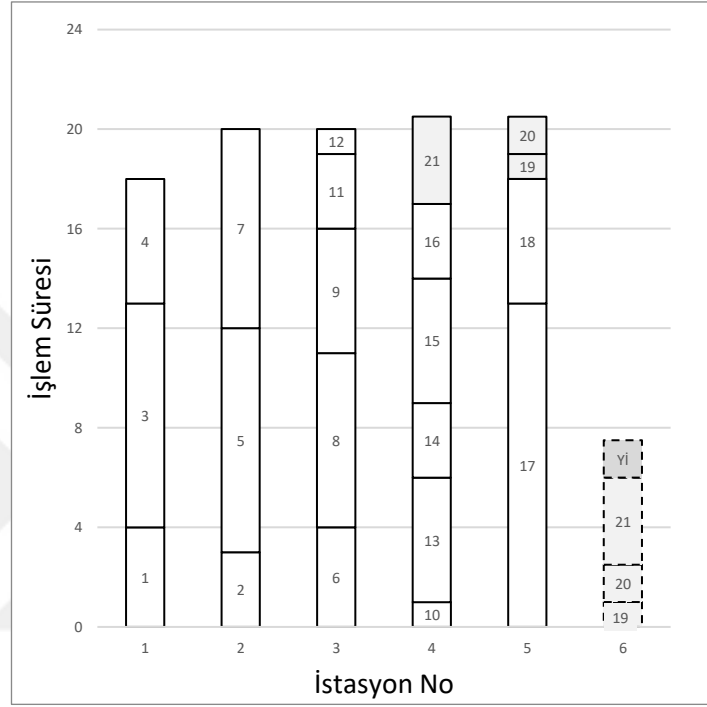
Modelden elde edilen sonuçlar incelendiğinde her istasyona atanan görevlerin işlem süresinin toplamının 21 olduğu görülmektedir. Bu durumda tüm istasyonlar çevrim süresince çalışmaktadır ve hiçbir istasyon beklememektedir. Bu sonuçlar doğrultusunda montaj hattının mükemmel dengeye sahip olduğu söylenebilir.

Görevler arasındaki öncelik ilişkileri, görevlerin yapılış sırasını etkilediğinden Yİ istasyonunun bulunduğu pozisyona göre çevrim süresi değişmektedir. Bu nedenle Yİ istasyonunun pozisyonunun değiştirilmesinin çözüm üzerindeki etkisini göstermek amacıyla farklı Yİ istasyonu pozisyonları dikkate alınarak Yİ istasyonu son 3 istasyon pozisyonunda değiştirilerek çözümler elde edilmiştir. Mitchells örneğinin 5 istasyon içeren versiyonu dikkate alındığından, altıncı istasyon olarak eklenen Yİ istasyonunun dördüncü, beşinci ve altıncı istasyon pozisyonları olmak üzere üç farklı durum için tamsayı programlama modeli çözülmüştür.

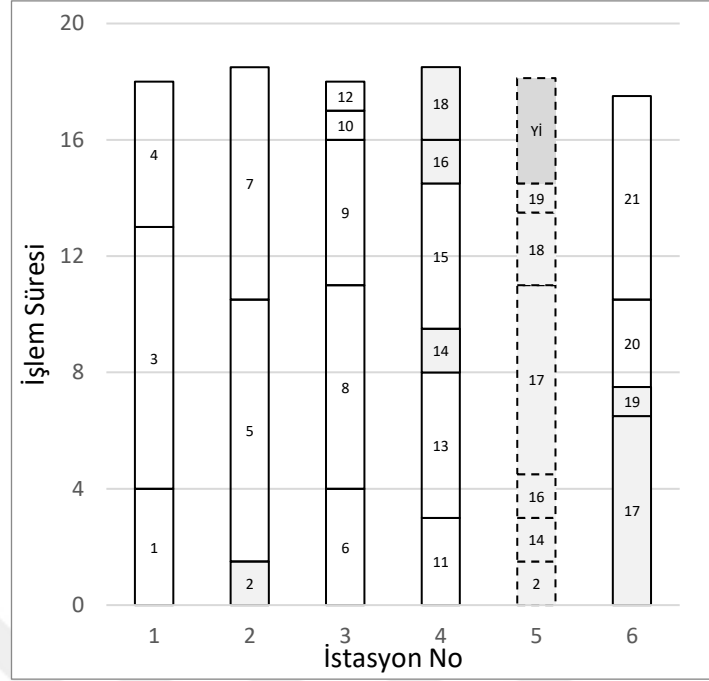
Yİ istasyonu pozisyonu dışında çevrim süresini etkileyen bir başka faktörde Yİ istasyonunun ne kadarlık bir bölümünün hatalı ürünler için kullanıldığıdır. Montaj hattındaki hata oranının düşük seviyede olması durumunda Yİ istasyonunun kullanım oranı düşük olacağından, bu istasyona atanabilecek görevlerin sayısı (diğer istasyonlarda yapılabilecek olan diğer görevler) artmaktadır. Bu nedenle, bu istasyona daha fazla görev ataması gerçekleştirilebilir. Ancak hata oranı yüksek olduğunda ise Yİ istasyonu çoğunlukla hatalı ürünlerin işlenmesi için kullanılacağından, Yİ istasyonuna daha az sayıda görev ataması gerçekleştirilebilecektir. Hata oranının çözüme olan etkisini

gösterebilmek için model %0 ( $\beta = 1,00$ ), %25 ( $\beta = 1,25$ ) ve %50 ( $\beta = 1,50$ ) olmak üzere üç farklı hata oranı için çözülmüştür.

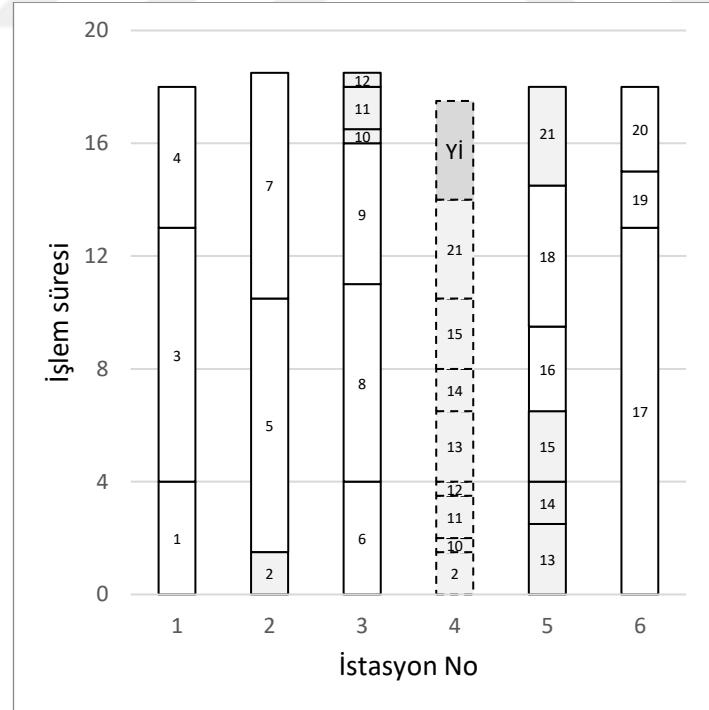
Model de hata oranının %25 ( $\beta = 1,25$ ) olduğu durum için elde edilen sonuçlar Şekil 4.3, Şekil 4.4 ve Şekil 4.5' de gösterilmiştir.



**Şekil 4.3.** Hata oranının %25 ( $\beta = 1,25$ ) olduğu ve Yİ istasyonunun 6.istasyon pozisyonunda olduğu durum



Şekil 4.4. Hata oranının %25 ( $\beta = 1,25$ ) olduğu ve Yİ istasyonunun 5.istasyon pozisyonunda olduğu durum



Şekil 4.5. Hata oranının %25 ( $\beta = 1,25$ ) olduğu ve Yİ istasyonunun 4.istasyon pozisyonunda olduğu durum

Şekil 4.3’de Yİ istasyonu son istasyon (6.istasyon) pozisyonunda olduğu durumda çevrim süresinin 20,50 olduğu ve Yİ istasyonuna 3 görev atandığı görülmektedir. Yİ istasyonuna atanan görevler 19, 20 ve 21 numaralı görevlerdir. Bu görevler paralel görev olduğundan Yİ istasyonun yanısıra diğer istasyonlardan herhangi birine atanmış görevlerdir. Örneğin; 19 numaralı görev hem Yİ istasyonuna atanmış hem de 5.istasyona atanmıştır. Benzer şekilde 20 ve 21 numaralı görev Yİ istasyonuna ve sırasıyla 5. ve 4.istasyona atanmıştır. Yİ istasyonunun 6.istasyon pozisyonunda bulunması ile Yİ istasyonuna problemdeki öncelik ilişkilerine bağlı olarak Yİ istasyonuna atanabilecek potansiyel görevlerin sayısının azalmış olduğu görülmektedir. Yİ istasyonunun bir önceki istasyon (5.istasyon) pozisyonunda olması durumunda elde edilen çözüm Şekil 4.4’de görülmektedir. Yİ istasyonunun pozisyonun bu şekilde değiştirilmesi ile öncelik ilişkileri nedeniyle yapılamayan atamaların sayısı azalmış olup Yİ istasyonuna 6 görev ataması gerçekleştirilmiştir. Yİ istasyonunun 5.istasyon pozisyonunda olması ile çevrim süresi 18,50 olmaktadır. Şekil 4.5’de Yİ istasyonunun 4.istasyon pozisyonunun da olduğu durum verilmiştir. Yİ istasyonu 4.istasyon pozisyonunda olduğunda Yİ istasyonuna 8 görev atandığı çevrim süresinin ise 18,5 olduğu görülmektedir. Bu sonuçlar incelendiğinde Yİ istasyonunun bulunduğu pozisyona göre çevrim süresinin değiştiği görülmektedir. Bu sonuca ek olarak Yİ istasyonuna atanan görevler az olduğunda ise görevler arasındaki öncelik ilişkisine bağlı olarak çevrim süresinin de arttığı görülmektedir. Bu sonuçlara ek olarak farklı hata oranları için elde edilen sonuçlar Çizelge 4.1’ de verilmektedir.

**Çizelge 4.1.** Matematiksel modelden elde edilen sonuçlar

İstasyon Sayısı	Çevrim süresi	CPU süresi (sn)	Yİ İstasyonu	$\beta = 1,00$ (hata oranı %0)			$\beta = 1,25$ (hata oranı %25)			$\beta = 1,50$ (hata oranı %50)		
				Çevrim Süresi	CPU Süresi (sn)	Hat Etkinliği	Çevrim Süresi	CPU Süresi (sn)	Hat Etkinliği	Çevrim Süresi	CPU Süresi (sn)	Hat Etkinliği
5	21	0,01	4	18,5	0,06	%95	18,5	0,17	%95	19,0	0,12	%92
			5	18,0	0,06	%97	18,5	0,10	%95	19,0	0,13	%92
			6	20,5	0,03	%85	20,5	0,03	%85	20,5	0,02	%85

Çizelge 4.1'deki sonuçlar analiz edildiğinde farklı  $\beta$  oranları için Yİ istasyonunun bulunduğu pozisyona göre çevrim süresinde değişiklik olduğu görülmektedir. Yİ istasyonu 4.istasyon pozisyonunda ve  $\beta = 1,00$  (hata oranı %0) olduğunda çevrim süresi 18,50 iken Yİ istasyonu 5.istasyon pozisyonunda olduğunda çevrim süresi 18 olduğu ve Yİ istasyonu 6.istasyon pozisyonunda iken ise 20,5 olduğu görülmektedir. Yİ istasyonu son istasyona yaklaştıkça çevrim süresi artmaktadır. Hata oranının değişimi analiz edildiğinde ise hata oranı arttığında Yİ istasyonu hatalı ürünler için daha fazla kullanıldığından çevrim süresinin de arttığı görülmektedir. Hata oranı %0 ve 5.istasyon pozisyonunda olduğunda çevrim süresinin 18, hata oranı %25 olduğunda 18,50 ve hata oranı %50 olduğunda ise 19 olduğu görülmektedir.

Hat etkinlikleri analiz edildiğinde en yüksek hat etkinliğinin  $\beta = 1,00$  (hata oranı %0) olduğu ve Yİ istasyonunun 5.istasyon pozisyonunda olduğu durum için %97 olduğu görülmektedir. Yİ istasyonunun son istasyon pozisyonunda olduğu durum için ise hat etkinliğinin %85 olduğu görülmektedir.

Bu bölümdeki sonuçlara ek olarak model Mitchells, Jackson, Sawyer, Heskiaoff ve Kilbrid test problemlerinin farklı istasyon sayıları için çözülmüştür. Test problemlerinin verilerine <http://assembly-line-balancing.mansci.de/> adresinden erişilebilir. Elde edilen sonuçlar Ek- 1' de verilmektedir.

Ek-1'de ki sonuçlardan da görüldüğü gibi Yİ istasyonunun standart bir iş istasyonu olarak da kullanılması çevrim sürelerinde iyileşmeler sağlamaktadır. Buna ek olarak, Yİ istasyon pozisyonunun değiştirilmesi ile (son istasyondan uzaklaşması) çevrim sürelerindeki iyileşme miktarının da arttığı görülmektedir. Çözüm süresi açısından incelendiğinde, önerilen modelin çözüm sürelerinin eklenen yeni değişken ve kısıtlar nedeniyle standart modele göre daha yüksek olduğu ve farklı senaryolar için önemli miktarda değişkenlik gösterdiği görülmektedir. Örneğin 45 görevden oluşan ve en büyük örneklem olan Kilbrid örneklemının 6 istasyonlu durumu için çözüm süresi standart modelde 0,19 saniyedir. Önerilen modelde Yİ istasyonunun farklı pozisyonlarına ve farklı hata oranlarına bağlı olarak, 0,27 saniye (Yİ istasyonunun 7. (son) istasyon pozisyonunda bulunduğu ve %50

hata oranı) ile 502 saniye (Yİ istasyonunun 5. istasyon pozisyonunda bulunduğu ve %25 hata oranı) arasında değişkenlik göstermektedir. Buna karşılık, standart modelden elde edilen çevrim süresi 92 zaman birimi iken, söz konusu kombinasyonlarda çevrim sürelerinin sırasıyla 91 ve 81,50 zaman birimi olduğu görülmektedir. Minimum çevrim süresi ise Yİ istasyonunun 5. ve 6. istasyon pozisyonlarında bulunduğu ve %0 hata oranına karşılık gelen kombinasyonunda 0,61 ve 0,93 saniyede ve 79 zaman birimi olduğu görülmektedir.

### 4.3. Simülasyon Modeli

Simülasyon modeli, Yİ istasyonunun paralel görevlerde kullanıldığı ve son istasyon pozisyonunda olduğu %0 ( $\beta = 1,00$ ), %25 ( $\beta = 1,25$ ) ve %50 ( $\beta = 1,50$ ) olmak üzere üç farklı hata oranı için oluşturulmuştur.

Yİ istasyonu hem hatalı ürünlerin yeniden işlendiği bir istasyon olarak hem de paralel görevlerin atandığı standart bir iş istasyonu olarak kullanıldığından Yİ istasyonuna gelen hatalı ürünler bu istasyonda gerekli olan denetleyici ve düzenleyici işlemlerin gerçekleştirilebilmesi için belirli bir süreye ihtiyaç duymaktadır. Gerçekleştirilecek işlemler için gerekli süre hatanın büyüklüğüne göre değişmektedir. Örneğin hatanın büyüklüğü nispeten düşük olduğu durumda Yİ süresi daha az iken hatanın büyüklüğü arttığında Yİ süresi daha fazla olmaktadır. Çalışmada Yİ süresi 1, 2, 3 olmak üzere üç farklı durum göz önüne alınarak çözülmüştür.

Simülasyon modelleri ProModel simülasyon paketi kullanılarak oluşturulmuş ve model 1 saat ve 50 tekrar sayısı için çalıştırılmıştır Simülasyon modeli sonucunda elde edilen istasyonların kullanım oranları Çizelge 4.2’de verilmektedir.

Çizelge 4.2’deki sonuçları incelendiğinde  $\beta = 1,00$  (hata oranı %0) olduğu durumda Yİ istasyonunun kullanım oranı %28 ve standart sapmasının 0,31 olduğu görülmektedir. Bu durumda montaj hattında hiç hata bulunmadığından ve Yİ istasyonu yalnızca paralel görevlerin işlendiği bir istasyon olarak kullanıldığından Yİ süresinin artması kullanım oranını değiştirmemektedir.  $\beta = 1,25$  (hata oranı %25) olduğu durum için Yİ istasyonunun kullanım oranı  $\beta = 1,00$  (hata oranı %0) olduğu duruma kıyasla arttığı

söylenbilir. Buna ek olarak.  $\beta = 1,25$  (hata oranı %25) olduğu durumda Yİ süresi arttıkça kullanım oranı artmaktadır. Örneğin Yİ süresinin 1 olduğu durumda kullanım oranı %46,83 ve standart sapması 2,19 iken, Yİ süresinin 2 olduğu durumda kullanım oranı %64,73 ve standart sapması 5,97 olduğu görülmektedir ve benzer şekilde Yİ süresinin 3 olduğu durumda Yİ süresinin 1 ve 2 olduğu duruma göre kullanım oranı artmıştır.

**Çizelge 4.2.** İstasyonların kullanım oranları

İstasyon No	Yİ Süresi	$\beta = 1,00$ (hata oranı %0)		$\beta = 1,25$ (hata oranı %25)		$\beta = 1,50$ (hata oranı %50)	
		Kullanım Oranı	Standart Sapma	Kullanım Oranı	Standart Sapma	Kullanım Oranı	Standart Sapma
1	1	99,88	0,01	99,88	0,01	99,88	0,02
	2	99,88	0,01	99,88	0,02	99,88	0,02
	3	99,88	0,01	99,88	0,02	99,88	0,01
2	1	99,13	0,05	99,13	0,05	99,15	0,04
	2	99,13	0,05	99,14	0,05	99,15	0,04
	3	99,13	0,05	99,14	0,05	99,16	0,04
3	1	97,83	0,43	98,14	0,16	98,15	0,11
	2	97,83	0,43	98,17	0,17	98,17	0,13
	3	97,83	0,43	98,14	0,14	98,18	0,16
4	1	97,31	0,12	95,07	0,60	94,98	0,57
	2	97,31	0,12	94,79	0,74	95,05	0,66
	3	97,31	0,12	94,78	0,59	94,84	0,67
5	1	95,74	0,59	95,82	0,47	95,81	0,48
	2	95,74	0,59	95,73	0,64	95,83	0,57
	3	95,74	0,59	95,62	0,57	95,63	0,66
6 (Yİ İstasyonu)	1	28,00	0,31	46,83	2,19	66,39	3,33
	2	28,00	0,31	64,73	5,97	93,43	2,79
	3	28,00	0,31	81,74	7,52	95,11	1,21

$\beta = 1,50$  (hata oranı %50) olduğu durumda Yİ istasyonunun kullanım oranı  $\beta = 1,00$  (hata oranı %0),  $\beta = 1,25$  (hata oranı %25) olduğu duruma göre daha yüksek olduğu söylenbilir. Yİ süresinin 1 olduğu ve  $\beta = 1,00$  (hata oranı %0) durumda kullanım oranı



%28 iken  $\beta = 1,25$  (hata oranı %25) olduğu durumda kullanım oranı %46,83 ve  $\beta = 1,50$  (hata oranı %50) durumda ise kullanım oranının 66,39 olduğu görülmektedir. Bu sonuçlar incelendiğinde  $\beta = 1,50$  (hata oranı %50) olduğu durumda montaj hattında hata oranı daha fazla olduğundan Yİ istasyonu paralel görevlere ek olarak hatalı ürünler için de daha fazla kullanılmakta, Yİ istasyonunun  $\beta = 1,50$  (hata oranı %50) olduğu durum  $\beta = 1,00$  (hata oranı %0) ve  $\beta = 1,25$  (hata oranı %25) olduğu duruma göre kullanım oranı artmaktadır. Bu doğrultuda Yİ süresine göre kullanım oranının değişimi incelendiğinde, Yİ süresi 1 olduğunda kullanım oranının %66,39, Yİ süresi 2 olduğunda kullanım oranının %93,43, Yİ süresi 3 olduğunda ise %95,11 olduğu ve kullanım oranının %100 e yaklaştığı görülmektedir. Bu durum Yİ istasyonunun paralel görevler için kullanılması ile ilgili olarak sınır değerine ulaştığını göstermektedir. Bu sonuçlara ek olarak Yİ istasyonunun dışındaki istasyonlarda ise yoğun bir kullanım oranının olduğu söylenbilir.

Simülasyon modelinin verifikasyon ve validasyonu için çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Bu amaçla çeşitli değerkenler tanımlanarak kuyruklardaki varlık sayılarının modelin çalışması sırasında doğru bir şekilde değerıştığı gözlemlenmiştir. Farklı parametre kombinasyonları kullanılarak modelin farklı koşullar altında çalıştırılması ile modelin beklenen şekilde sonuç verdiği görülmüştür. Modelin validasyonu için tamsayılı programlama modelinden elde edilen çözümler ile simülasyon sonuçları karşılaştırılarak model sonuçlarının ilgili parametre kombinasyonları altındaki ilişkileri analiz edilmiştir. Böylece simülasyon sonuçlarının tamsayılı programlama modelinden elde edilen sonuçlarla doğerulanması sağlanmıştır. Bu alışmalar sırasında kullanılan simülasyon yazılımı (ProModel) kapsamında sunulan çeşitli araçlardan da faydalanılmıştır.

## 5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada öncelikli olarak montaj hatlarında bulunan Yİ istasyonunun standart bir iş istasyonu olarak kullanılmasını dikkate alan bir tamsayılı programlama modeli geliştirilmiştir. Önerilen model ile Yİ istasyonu yeniden işleme ve kalite kontrol işlemlerine ek olarak diğer istasyonlara atanan görevlerinde bu istasyonda atanması sağlanmıştır. Geliştirilen doğrusal olmayan tamsayılı programlama modeli yeni kısıtlar ve değişkenler eklenerek doğrusal tamsayılı programlama modeline dönüştürülmüştür. Modelin performansını analiz etmek amacıyla literatürde bilinen çeşitli örneklemeler üzerinde model test edilmiştir. Montaj hatlarında öncelik ilişkisi görevlerin yapılış sırasını etkilediğinden Yİ istasyonuna atanabilecek olan görevlerin sayısı öncelik ilişkilerinden etkilenmektedir. Bu nedenle çalışmada Yİ istasyonu son istasyon, sondan bir önceki istasyon ve sondan ikinci istasyon olmak üzere üç farklı pozisyonlarda bulunması durumu dikkate alınarak oluşturulan tamsayılı programlama modellerinin çözüme olan etkileri analiz edilmiştir.

Tamsayılı programlama modelinden elde edilen sonuçlar ile deterministik denge sağlamıştır ancak gerçek dünya üretim sistemlerinin doğası gereği çeşitli stokastik unsurlar barındırmaktadır. Bu nedenle çalışmada ikinci olarak sistemdeki çeşitli stokastik unsurların probleme dahil edilmesi sağlamak ve tamsayılı programlama modelinden elde edilen sonuçların geçerliliğini sağlamak amacıyla simülasyon modelleri oluşturulmuştur. Simülasyon modeli, Yİ istasyonunun son istasyon pozisyonunda olduğu durum için ve %0 ( $\beta = 1,00$ ), %25 ( $\beta = 1,25$ ) ve %50 ( $\beta = 1,50$ ) olmak üzere üç farklı hata oranı için simülasyon modelleri oluşturulmuştur. Buna ek olarak Yİ istasyonuna gelen hatalı ürünler bu istasyonda gerekli olan denetleyici ve düzenleyici işlemlerin uygulanabilmesi için Yİ istasyonunda belirli bir süreye ihtiyaç duymaktadır. Gerçekleştirilecek işlemler için gerekli süre hatanın büyüklüğüne göre değişmektedir. Bu nedenle çalışmada hatanın büyüklüğünün değişiminin etkilerini gözlemlemek amacıyla farklı Yİ süreleri denenmiş ve Yİ süresinin değişiminin kullanım oranı üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Gelecekte yapılacak çalışmalarda, Yİ istasyonun bulunduğu farklı pozisyonlar için simülasyon modelleri oluşturularak daha kapsamlı deneyler yapılması düşünülmektedir. Buna ek olarak tamsayılı programlama modeli ve simülasyon modelinin entegrasyonu

sağlayacak şekilde dinamik bir sistem yapısı oluşturularak bu dinamik yapıyı sağlamak amacıyla yazılım oluşturulması planlanan çalışmalar arasındadır.



## KAYNAKLAR

- Akın, Nalan G. 2015.** Kanepe Montaj Hattının Dengelenmesi ve Benzetim Yöntemi İle Sınanması. *İİBF Dergisi*, 5(1): 95-120.
- Amen, M. 2006.** Cost-oriented assembly line balancing: Model formulations, solution difficulty, upper and lower bounds. *European Journal of Operational Research*, 168(3): 747-770.
- Askin, R.G., Zhou, M. 1997.** A parallel station heuristic for the mixed-model production line balancing problem. *International Journal of Production Research*, 35(11): 3095-3106.
- Bae, Ki-Hwan G., Long Zheng, Imani F. 2015.** Asimulation analysis of the vehicle axle and spring assembly lines. Proceedings of the 2015 Winter Simulation Conference, IEEE Press, 2015.
- Banks, J., Carson II, J.S., Nelson, B.L, Nicol, D.M. (2005).** Discrete-event system simulation. 528.
- Bard, Jonathan F. 1998.** Assembly line balancing with parallel workstations and dead time. *The International Journal Of Production Research*, 27(6): 1005-1018.
- Battaia, O., Dolgui, A. 2013.** A taxonomy of line balancing problems and their solution approaches. *International Journal of Production Economics*, 142(2): 259-277.
- Baybars, I. 1986.** A survey of exact algorithms for the simple assembly line balancing problem. *Management science*, 32(8): 909-932.
- Becker, C., Scholl, A. 2006.** A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing. *European journal of operational research*, 168(3): 694-715.
- Boysen, N., Fliedner, M., ve Scholl, A. 2007.** A classification of assembly line balancing problems, *European Journal of Operational Research*, 183(2): 674-693.
- Boysen, N., Fliedner, M. 2008.** A versatile algorithm for assembly line balancing. *European Journal of Operational Research*, 184(1): 39-56.
- Bradley, S., Hax, A., Magnanti, T. 1977.** Applied mathematical programming. Addison-Wesley
- Bryton, B. 1954.** Balancing of a continuous production line. Y.Lisans tezi, Northwestern University, Evanston.
- Buxey, G. M. 1974.** Assembly line balancing with multiple stations. *Management Science*, 20(6): 1010-1021.

**Chen, D. S., Batson, R. G., Dang, Y. (2011).** Applied integer programming: modeling and solution. John Wiley & Sons.

**Cortes, P., Onieva, L., Guadix, J. 2010.** Optimising and simulating the assembly line balancing problem in a motorcycle manufacturing company: a case study. *International Journal of Production Research*, 48(12): 3637-3656.

**Çerçioğlu, H., Özcan, U., Gökçen, H., Toklu, B. 2009.** Paralel Montaj Hattı Dengeleme Problemleri İçin Bir Tavlama Benzetimi Yaklaşımı. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 24(2): 331-341.

**Derya, T. 2012.** Maliyet Tabanlı Paralel Montaj Hattı Dengeleme Problemleri: Yeni Modeller. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

**Ege, Y., Azizoglu, M., Ozdemirel, Nur E. 2009.** Assembly line balancing with station paralleling. *Computers & Industrial Engineering*, 57(4): 1218-1225.

**Foroughi, A., Gökçen, H. 2014.** Maliyet Tabanlı Stokastik Montaj Hattı Dengeleme Problemi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 29(3): (2014).

**Ghosh, S., Gagnon, Roger J. 1989.** A comprehensive literature review and analysis of the design, balancing and scheduling of assembly systems. *International Journal Production Research*, 27(4): 637-670.

**Gökçen, H., Ağpak K., Benzer, R. 2006.** Balancing of parallel assembly lines. *International Journal of Production Economics*, 103(2): 600-609.

**Gökçen, H., Ağpak, K. 2006.** A goal programming approach to simple U-line balancing problem. *European Journal of Operational Research*, 171(2): 577-585.

**Jamil, M., Razali, Noraini M. 2016.** Simulation of Assembly Line Balancing in Automotive Component Manufacturing. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 114(1).

**Jünger, M., Liebling, T. M., Naddef, D., Nemhauser, G. L., Pulleyblank, W. R., Reinelt, G., Wolsey, L.A. 2009.** 50 years of integer programming 1958-2008: From the early years to the state-of-the-art. Springer Science & Business Media.

**Kaplan, Ö. 2004.** Assembly Line Balancing Task Paralleling. Y.Lisans Tezi, ODTÜ, Fen Bilimler Enstitüsü, Ankara.

**Kara, Y., Özgüven, C., Yalçın, N., Atasagun, Y. 2011.** Balancing straight and U-shaped assembly lines with resource dependent task times. *International Journal of Production Research*, 49(21): 6387-6405.

**Karaca, S. 2007.** Simülasyon modellemesi ile mobilya üretiminde sistem analizi ve optimizasyonu. Doktora Tezi, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Orman Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Bartın.

**Kilincçi, O. 2010.** A Petri net-based heuristic for simple assembly line balancing problem of type 2. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 46(1): 329-338.

**Law, A. M., Kelton, W. D., Kelton, W.D. (1991).** Simulation modeling and analysis . New York: McGraw-Hill, 760.

**McMullen, Patrick R., Frazier. Gregory V. 1999.** Using simulation and data envelopment analysis to compare assembly line balancing solutions. *Journal of Productivity Analysis*, 11(2): 149-168.

**Mete, S., Ağpak, K. 2013.** Çok Amaçlı Genelleştirilmiş Kaynak Kısıtlı Çift Taraflı Montaj Hattı Dengeleme Problemi Ve Hesaplama Analizi. *Journal of the Faculty of Engineering & Architecture of Gazi University*, 28(3): 567-576.

**Polat, O., Mutlu, Ö., Özgörmüş, E. 2015.** A Goal Programming Model For Assembly Line Balancing Problem Type 2 Under Workload Constraint. In The 2015 Northeast Decision Sciences Conference, Cambridge/MA, USA.

**Salveson, M. E. 1955.** The assembly line balancing problem. *The Journal of Industrial Engineering*, 18-25.

**Sarıaslan, H. 1986.** Sıra Bekleme Sistemlerinde Simülasyon Tekniği. Ankara Üniversitesi Siyasal Bilgiler Fakültesi Yayınları, Ankara. 155.

**Sarker, B.R., Shanthikumari, J. G. 1983.** A generalized approach for serial or parallel line balancing. *International Journal Production Research*, 21(1): 109-133.

**Scholl, A., Becker, C. 2006.** State-of-the-art exact and heuristic solution procedures for simple assembly line balancing. *European Journal of Operational Research*, 168(3): 666-693.

**Schrijver, A. 1998.** Theory of linear and integer programming. John Wiley & Sons, 471.

**Sivasankaran, P., Shahabudeen. P. 2014.** Literature review of assembly line balancing problems. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 73(9-12): 1665-1694.

**Süer, Gürsel A.1998.** Designing parallel assembly lines. *Computers & industrial engineering*, 35(3-4): 467-470.

**Taha, Hamdy A. 1992.** Operations research: an introduction. Macmillan, 648.

**Tuncel, G., Topaloglu, S. 2013.** Assembly line balancing with positional constraints, task assignment restrictions and station paralleling: A case in an electronics company. *Computers & Industrial Engineering*, 64(2): 602-609.

**Uğurdağ, H. F., Rachamadugu, R., Papachristou, C. A.1997.** Designing paced assembly lines with fixed number of stations. *European Journal of Operational Research*, 102(3): 488-501.

**Wei, N., Chao, I. 2011.** A solution procedure for type E simple assembly line balancing problem. *Computers & Industrial Engineering* , 61(3): 824-830.

**Winston, Wayne L. 2004.** Operations research: applications and algorithms. Belmont: Thomson Brooks/Cole.1418.

**Zupan, H., Herakovic, N. 2015.** Production line balancing with discrete event simulation: A case study, *IFAC-PapersOnLine* 48(3): 2305-2311.



## EKLER

### Ek-1 Deneysel Sonuçlar

Problem No	İstasyon Sayısı	evrim süresi	CPU süresi (sn)	YİH	$\beta = 1,00$		$\beta = 1,25$		$\beta = 1,50$	
					çevrim süresi	CPU süresi (sn)	evrim süresi	CPU süresi (sn)	evrim süresi	CPU süresi (sn)
Jackson 11 görev	3	16	$\approx 0$	2	12,00	0,05	12,50	0,03	13,00	0,03
				3	12,50	0,04	12,50	0,03	13,00	0,04
				4	15,00	0,06	15,00	0,00	15,00	0,00
	4	12	$\approx 0$	3	9,50	0,07	10,00	0,06	10,50	0,06
				4	9,50	0,04	10,00	0,06	10,50	0,06
				5	11,00	0,01	11,00	0,00	11,00	0,01
Mitchells 21 görev	3	35	0,01	2	31,00	0,03	31,00	0,02	31,00	0,02
				3	31,00	0,04	31,00	0,04	31,00	0,06
				4	33,50	0,01	33,50	0,01	33,50	0,02
	5	21	0,01	4	18,50	0,06	18,50	0,17	19,00	0,12
				5	18,00	0,06	18,50	0,10	19,00	0,13
				6	20,50	0,03	20,50	0,03	20,50	0,02
Heskiaoff 28 görev	4	256	0,04	3	205,00	0,24	213,50	111,00	219,50	0,40
				4	205,00	0,20	213,50	2,61	219,50	0,25
				5	247,00	0,03	247,00	0,02	247,00	0,03
	5	205	0,04	4	171,00	0,19	176,88	1,95	181,00	7,27
				5	171,00	0,21	176,88	2,46	181,00	4,53
				6	198,00	0,05	198,00	0,05	198,00	0,05
Sawyer 30 görev	5	65	0,07	4	55,00	0,84	56,00	2,27	57,50	1,20
				5	57,00	0,71	57,50	1,57	57,50	4,01
				6	61,00	0,08	61,00	0,08	61,00	0,07
	8	41	0,08	7	37,00	5,74	37,50	4,50	38,00	4,93
				8	36,50	3,72	37,00	3,82	38,00	5,47
				9	39,00	2,83	39,00	1,91	39,00	1,28
Kilbrid 45 görev	3	184	0,01	2	141,00	0,28	145,50	1,00	150,75	0,44
				3	138,00	0,28	145,50	0,76	150,75	0,97
				4	182,00	0,28	182,00	0,24	182,00	0,44
	6	92	0,19	5	79,00	0,61	81,50	502,00	83,00	0,97
				6	79,00	0,93	81,50	12,54	83,00	1,54
				7	91,00	0,13	91,00	0,31	91,00	0,27



## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Elif KAYMAZ  
Doğum Yeri ve Tarihi : Kütahya-15.03.1990  
Yabancı Dili : İngilizce ve Fransızca  
Eğitim Durumu  
Lise : Bursa Süleyman Çelebi Anadolu Lisesi (2003-2006)  
Lisans : Uludağ Üniversitesi-Endüstri Mühendisliği (2009-2014)  
Yüksek Lisans : Uludağ Üniversitesi-Endüstri Mühendisliği (2015-2017)  
İletişim : eliifkaymaz@gmail.com

