

KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Esnek İmalat Sistemlerinin Tasarım Süreci ve  
Performans Analizinde Kuyruk Ağı Modelleri

Mehmet PINARBAŞI

HAZİRAN 2010

**Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalında** Mehmet PINARBAŞI tarafından hazırlanan ESNEK İMALAT SİSTEMLERİNİN TASARIM SÜRECİ VE PERFORMANS ANALİZİNDE KUYRUK AĞI MODELLERİ adlı Yüksek Lisans Tezinin Anabilim Dalı standartlarına uygun olduğunu onaylarım.



Yrd. Doç. Dr. Ahmet Kürşad TÜRKER

Anabilim Dalı Başkanı

Bu tezi okuduğumu ve tezin **Yüksek Lisans Tezi** olarak bütün gereklilikleri yerine getirdiğini onaylarım.



Yrd. Doç. Dr. Mustafa YÜZÜKIRMIZI

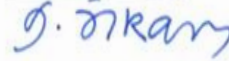
Danışman

Jüri Üyeleri

Başkan : Yrd. Doç. Dr. A. Kürşad TÜRKER

Üye (Danışman): Yrd. Doç. Dr. Mustafa YÜZÜKIRMIZI

Üye : Yrd. Doç. Dr. M. Sıtkı İLKAY



...../...../.....

Bu tez ile Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onaylamıştır.

Doç. Dr. Burak BİRGÖREN

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

**Saygıdeğer Babama  
Fedakâr Anneme  
Sevgili Kardeşime  
Biricik Yeğenime**

## ÖZET

### ESNEK İMALAT SİSTEMLERİNİN TASARIM SÜRECİ VE PERFORMANS ANALİZİNDE KUYRUK AĞI MODELLERİ

PINARBAŞI, Mehmet

Kırıkkale Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans tezi

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Mustafa YÜZÜKIRMIZI

Haziran 2010, 145 sayfa

Bu çalışmada Esnek İmalat Sistemleri (EİS) incelenerek, tasarım süreci ve kuyruk ağları ile modellerinin oluşturulması ve performans analizi çalışmaları yapılmıştır. EİS için Integration Definition for Function Modeling (IDEF) diyagramları kullanılarak tasarım modelleri sunulmuştur. Bu modeller detaylı olarak incelenmiş, EİS tasarımı için gerekli parametreler araştırılarak, girdi, çıktı, kontrol ve mekanizma faktörleri tespit edilmiştir.

Daha sonra, IDEF diyagramlarında belirlenen parametrelerden EİS tasarım sürecine etki eden faktörler belirlenmeye çalışılmıştır. Bu faktörler Operating Characteristic (OC) eğrileri kullanılarak değerlendirilmiştir. OC eğrileri iki veya daha fazla değişken arasındaki ilişkinin incelenmesini sağlayan bir karar destek sistemi olarak kullanılmıştır. Çalışmada Kırıkkale Üniversitesi CIM (Computer Integrated Manufacturing) laboratuvarının simülasyon modeli oluşturulmuş, doğrulandıktan sonra, OC eğrileri ile tespit edilen parametreler ile test edilmiştir. EİS tasarım süreci üzerinde etkili olan bekleme yeri kapasiteleri, konveyör hızı ve işlem zamanlarının olasılık dağılımları faktörlerinin etkileri izlenmiştir.

Kuyruk ağları ile analitik performans değerlendirmesi hakkında bilgiler verilmiştir. EİS sistemlerinin kuyruk ağları ile performans ölçümü için Ortalama Değer Analizi (ODA) algoritmaları kullanılmış, çeşitli kuyruk ağları topolojileri incelenmiş ve bu

topolojilere ait algoritmaların yer aldığı bir yazılım geliştirilmiştir. Yazılım tek sınıflı blokesiz ve blokeli, çok sınıflı blokesiz sistemler için performans değerlendirmesi yapmaktadır.

Simülasyon kullanılarak kuyruk ağı algoritmaları test edilmiştir. Müşteri/ürün sayıları, işlem oranları ve işlem zamanları dağılımları incelenerek ODA algoritmaları değerlendirilmiştir. Simülasyon modeli sonuçları ile kuyruk ağı sonuçlarının %5 izafi fark değerini aşmadığı tespit edilmiştir. Bu durum kuyruk modellerinin esnek imalat sistemlerinin performans ölçümü için etkin bir araç olduğunu göstermiştir.

Çalışmalar otomotiv ve uçak endüstrisinde faaliyet gösteren iki firmadan elde edilen bilgilerle desteklenmiştir. Otomotiv firması EİS hücresi ile Kırıkkale Üniversitesi Bilgisayarla Bütünleşik İmalat laboratuvarı simülasyon modelleri ve kuyruk ağları ile analiz edilmiştir. Uygulama ve vaka çalışması olarak, Turkish Aerospace Industries (TAI) yeni kurulması planlanan bir EİS hücresi için tasarım süreci, parametrelerin belirlenmesi ve optimizasyonu çalışmaları yürütülmüştür. TAI sistemi için bir EİS modeli önerilmiş, bu sistemin simülasyon modeli oluşturulmuştur. Önerilen sisteme ait kuyruk modeli ortaya konulmuştur. Simülasyon modeli ve kuyruk ağı modeli sonuçları karşılaştırılarak performans değerlendirmesi yapılmıştır. Sonuç olarak EİS'in TAI'deki mevcut duruma nazaran daha iyi bir üretim sistemi tercihi olacağı öngörülmüştür.

**Anahtar kelimeler:** Esnek İmalat Sistemleri, Kuyruk Ağları, Performans Değerlendirme, Simülasyon, Tasarım Süreci

## ABSTRACT

### DESIGN PROCESS OF FLEXIBLE MANUFACTURING SYSTEMS AND PERFORMANCE EVALUATION WITH QUEUEING NETWORK MODELS

PINARBAŞI, Mehmet

Kırıkkale University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Industrial Engineering, M.Sc Thesis

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Mustafa YÜZÜKIRMIZI

June 2010, 145 pages

In this study, the design process of Flexible Manufacturing Systems (FMS) and performance analysis with queueing network models has been studied. Design models for FMS have been presented using the Integration Definition for Function Modeling (IDEF) diagrams. These models have been analyzed in detail. Also parameters that are necessary for the FMS design are examined and input, output, control and mechanism factors are determined.

The factors affecting on the FMS design process have been determined considering IDEF diagrams parameters. These factors have been determined by using OC curves. OC curves have been used as a decision support system that investigates interactions of between two or more variables. In this thesis, simulation model of Kırıkkale University Computer Integrated Manufacturing Laboratory has been created and the model has been verified, then analyzed with parameters determined with OC curves. The parameters effective on FMS design process such as buffer capacities, conveyor velocity and probability distributions of process times are analyzed.

Also, information about analytical performance evaluation with queueing networks has been given. Mean Value Analysis (MVA) algorithms have been used for the performance measurements of the FMS systems with Queueing Networks (QN).

Different types of QN topologies have been analyzed and software has been developed which includes algorithms for these topologies. Software makes performance evaluation for single-class networks with blocking and unblocking and also multi-class networks with unblocking systems.

QN algorithms are tested with simulation. Number of customers/products, service rates and distributions of process times are examined and then MVA algorithms are evaluated. It has been observed that simulation model and queuing network model results did not exceed 5% relative difference value. This results show QN models is an effective tool for performance evaluation of FMS.

Studies have been supported by the information obtained from two firms which are operating in automotive and aircraft industries. Automotive firm FMS cell and Kırıkkale University Computer Integrated Manufacturing Laboratory are analyzed with simulation models and queueing networks. In this thesis, design process, parameters design and parameters optimizations are studied for new FMS cell of Turkish Aerospace Industries (TAI) as an application and case study. A FMS model has been proposed for TAI production system and the system simulation has been created. Also a QN model has been created for the system. Results of the simulation and QN model have been compared and then system performances have been evaluated. As a result, it is shown that the FMS is better alternative than current system for TAI.

**Keywords:** Flexible Manufacturing Systems, Queueing Networks, Performance Evaluation, Simulation, Design Process

## TEŞEKKÜR

Tezimin hazırlanmasında tüm bilgi birikimi ile yanımda olup, çalışmalarım da desteklerini ve kıymetli zamanını ayırıp her türlü desteğini eksik etmeyen, bilimsel açıdan gelişimim için her türlü imkanı sunan, tez yöneticisi hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Mustafa YÜZÜKIRMIZI'ya sonsuz teşekkür ederim. Tez jürimde yer alan Sayın Yrd. Doç. Dr. A. Kürşad TÜRKER, Sayın Yrd. Doç. Dr. M. Sıtkı İLKAY'a, değerli hocalarım Sayın Yrd. Doç. Dr. Süleyman ERSÖZ ve Sayın Doç. Dr. Burak BİRGÖREN'e desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

Tez çalışmalarım boyunca büyük fedakârlıklarla desteklerini esirgemeyen mesai arkadaşlarım Çağrı SEL, Fatih KESKİNKILIÇ ve H. Mehmet ALAĞAŞ'a sonsuz teşekkür ederim. Manevi destekleri için öğrenci arkadaşlarım Gözde KARACA, Saim SOYARSLAN ve Kübra TAMYÜKSEL'e, analiz çalışmalarında gösterdikleri özverili çalışmaları için Didem SOFUOĞLU, İnanç EĞİLMEZ, Zeynep HANBABA ve Yasemin TÜRKMEN'e teşekkür ederim.

Bu tez çalışması 106M367 numaralı “Esnek İmalat Sistemlerinin Kuyruk Ağı Modelleri” başlıklı proje olarak, TÜBİTAK Ulusal Genç Araştırmacı Kariyer Geliştirme Programı kapsamında desteklenmiştir.



# İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

<b>ÖZET</b> .....	i
<b>ABSTRACT</b> .....	iii
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	v
<b>İÇİNDEKİLER DİZİNİ</b> .....	vi
<b>ÇİZELGELER DİZİNİ</b> .....	ix
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b> .....	x
<b>1. GİRİŞ</b> .....	1
1.1. Esnek İmalat Sistemleri.....	4
1.1.1. Esnek İmalat Sistemlerinin Tarihsel Gelişimi.....	7
1.1.2. Esnek İmalat Sistemlerinin Özellikleri .....	9
1.1.3. Esnek İmalat Sistemlerinin Amaçları.....	10
1.1.4. Esnek İmalat Sistemlerinin Önemi.....	10
1.1.5. Esnek İmalat Sistemlerinin Faydaları .....	11
1.2. IDEF Sistem Tasarım Tekniği.....	12
1.3. Performans Değerlendirme Teknikleri .....	13
<b>2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI</b> .....	15
2.1. Esnek İmalat Sistemleri.....	15
2.2. Esnek İmalat Sistemleri Tasarım Modelleri .....	18
2.2.1. Petri Ağları .....	18
2.2.2. Simülasyon.....	19
2.2.3. Nesne Tabanlı Modelleme .....	20
2.2.4. Sanal Fabrika Kullanımları .....	21
2.2.5. Diğer Yöntemler.....	22

2.3.	Performans Faktörlerinin Belirlenmesi .....	22
2.4.	Kuyruk Ağları.....	23
2.4.1.	Tek Sınıflı Ağlar .....	26
2.4.1.1.	Matematiksel Formdaki Sistemler .....	26
2.4.1.2.	Blokeli Sistemler.....	28
2.4.2.	Çok Sınıflı Ağlar .....	29
2.4.2.1.	Matematiksel Formdaki Sistemler .....	29
2.4.2.2.	Matematiksel Formda Olmayan Sistemler .....	32
2.4.2.3.	Blokeli Sistemler.....	32
<b>3.</b>	<b>ESNEK İMALAT SİSTEMLERİ TASARIM SÜRECİ .....</b>	<b>34</b>
3.1.	A3-Yerleşim Tasarımı ve Performans Değerlendirme Alt Seviye Diyagramı .....	45
3.2.	A4-Sistem Performans Analizi Alt Seviye Diyagramı.....	47
<b>4.</b>	<b>ESNEK İMALAT SİSTEMLERİNİN PERFORMANSINA ETKİ EDEN FAKTÖRLER .....</b>	<b>51</b>
4.1.	Simülasyon Modeli.....	51
4.2.	Performans Değerlendirme Sonuçları .....	57
4.2.1.	Bekleme Yeri Kapasitelerinin Sistem Performansı Üzerindeki Etkileri.. .....	57
4.2.2.	Konveyör Hızının Sistem Performansı Üzerindeki Etkisi .....	62
4.2.3.	Olasılık Dağılımlarının Sistem Performansı Üzerindeki Etkileri .....	66
<b>5.</b>	<b>ESNEK İMALAT SİSTEMLERİNİN KUYRUK AĞI MODELLERİ</b>	<b>70</b>
5.1.	Tek Sınıflı Kuyruk Ağları .....	71
5.2.	Kapalı Kuyruk Ağlarının Matematiksel Formu .....	75
5.3.	Tek Sınıflı Blokeli Sistemler.....	77
5.3.1.	Efektif Servis Zamanları .....	77
5.3.2.	Bloke Olasılığı .....	77

5.4.	Çok Sınıflı Kuyruk Ağları .....	78
5.5.	Ortalama Değer Analizi (ODA) .....	82
5.5.1.	Tek Sınıflı Blokesiz Sistemler İçin ODA .....	82
5.5.2.	Tek Sınıflı Blokeli Sistemler İçin ODA.....	84
5.5.3.	Çok Sınıflı Blokesiz Sistemler İçin ODA .....	85
5.6.	Esnek İmalat Sistemleri Kuyruk Modeli Performansının Değerlendirilmesi . .....	86
5.6.1.	Simülasyon Modelleri .....	87
5.6.2.	DeneySEL Analizler .....	90
5.6.2.1.	Müşteri/Ürün Sayılarının Analizi .....	92
5.6.2.2.	İşlem Oranları Analizi .....	95
5.6.2.3.	İşlem Zamanları Dağılımının Analizi .....	97
<b>6.</b>	<b>VAKA ANALİZLERİ</b> .....	<b>105</b>
6.1.	TAI Tasarım Süreci Modeli .....	105
6.1.1.	TAI Yerleşim Tasarımı ve Performans Değerlendirme Süreci.....	106
6.1.2.	TAI Sistem Performans Analizi .....	114
6.2.	TAI Kuyruk Modeli.....	124
6.3.	Sonuç .....	128
<b>7.</b>	<b>SONUÇ VE TARTIŞMA</b> .....	<b>129</b>
	<b>KAYNAKLAR</b> .....	<b>131</b>
	<b>EKLER</b> .....	<b>142</b>
	EK 1. QueNET ODA (MVA) PROGRAMI .....	142

## ÇİZELGELER DİZİNİ

### ÇİZELGE

### Sayfa

1.1. Performans değerlendirme araçlarının karakteristikleri.....	14
4.1. Birinci istasyon $T = 1$ $B_2, B_3, B_4 = \infty$ için kullanım oranları .....	58
4.2. Birinci istasyon $T = 1$ $B_2, B_3, B_4 = \infty$ için kullanım oranı .....	58
4.3. İkinci istasyon $T = 1$ $B_1, B_3, B_4 = \infty$ için kullanım oranı .....	59
4.4. Üçüncü istasyon $T = 1$ $B_1, B_2, B_4 = \infty$ için kullanım oranı .....	60
4.5. Dördüncü istasyon $T = 1$ $B_1, B_2, B_3 = \infty$ için kullanım oranı.....	62
4.6. Dördüncü istasyon $T = 2$ $B_1, B_2, B_3 = \infty$ için kullanım oranı.....	62
4.7. $T = 1$ $B = 1$ için kullanım oranları .....	64
4.8. $T = 1$ $B = \infty$ için kullanım oranları .....	64
4.9. $T = 2$ $B = 1$ için kullanım oranları .....	66
4.10. $T = 2$ $B = \infty$ için kullanım oranları .....	66
4.11. $T = 1$ $\mu = 1$ için kullanım oranları.....	68
4.12. $T = 2$ $\mu = 1$ için kullanım oranları.....	68
5.1. Üretim tesisi deney parametreleri .....	92
5.2. KÜ CIM deney parametreleri.....	92
6.1. Makine ve tezgâhlardaki işlem süreleri.....	107
6.2. Mevcut durum makineler arası mesafeler .....	108
6.3. Parça kodları ve iş akışları .....	109
6.4. EİS hücresi belirlenen tezgahlar arası taşınan parça miktarları .....	110
6.5. Den/E oranları .....	111
6.6. Önerilen EİS hücresi makinelerin yerleşim sırası.....	111
6.7. Önerilen EİS hücresi tezgâhlar arası taşıma mesafeleri .....	112
6.8. Mevcut durum ve önerilen EİS hücresi senaryoları özet tablosu.....	116
6.9. TAI kuyruk modeli için kullanılan parametre değerleri .....	125
6.10. TAI simülasyon ve kuyruk ağı detaylı karşılaştırma sonuçları.....	127

## ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>ŞEKİL</u>	<u>Sayfa</u>
1.1. Kırıkkale Üniversitesi EİS hücresi.....	5
1.2. EİS robot ve makine bileşenleri .....	6
1.3. EİS depolama üniteleri.....	6
1.4. EİS taşıma sistemleri (konveyör ve AGV).....	7
1.5. Üretim sistemlerinde tarihsel yenilikler .....	8
1.6. IDEF Diyagram bileşenleri .....	13
2.1. Açık ve Kapalı kuyruk ağları (sıra ile).....	24
2.2. Kuyruk ağlarındaki temel topolojiler .....	25
2.3. Durum değerlerinin öncelikleri .....	31
3.1. EİS Tasarım süreci IDEF0 diyagramı .....	35
3.2. EİS tasarım süreci IDEF0 içerik diyagramı .....	39
3.3. Yerleşim tasarımı ve performans değerlendirme IDEF0 içerik diyagramı.....	46
3.4. Sistem performans analizi IDEF0 içerik diyagramı.....	48
4.1. Kırıkkale Üniversitesi CIM Laboratuvarı Yerleşim Düzeni.....	52
4.2. Ürünlere ait iş akışları (sıra ile).....	52
4.3. CIM hücresi ARENA simülasyon modeli .....	53
4.4. ASRS Ünitesinin modüler yapısı .....	55
4.5. Tezgahlara ait modüler yapı.....	56
4.6. Birinci tip ürün için birinci istasyon bekleme yeri kapasiteleri .....	57
4.7. İkinci tip ürün için birinci istasyon bekleme yeri kapasiteleri .....	58
4.8. Birinci tip ürün için ikinci istasyon bekleme yeri kapasiteleri.....	59
4.9. Birinci tip ürün için üçüncü istasyon bekleme yeri kapasiteleri .....	60
4.10. Birinci tip ürün için dördüncü istasyon bekleme yeri kapasiteleri.....	61
4.11. İkinci tip ürün için dördüncü istasyon bekleme yeri kapasiteleri .....	61
4.12. T=1 B=1 için konveyör hızları.....	63
4.13. T=1 B= $\infty$ için konveyör hızları.....	63
4.14. T=2 B=1 için konveyör hızları.....	65
4.15. T=2 B= $\infty$ için konveyör hızları .....	65
4.16. T=1 için olasılık dağılımları sonuçları .....	67

4.17. T=2 için olasılık dağılımları sonuçları .....	67
5.1. Bir EİS sisteminin kapalı kuyruk ağı modeli .....	70
5.2. 3 istasyon ve 5 müşterili bir kapalı ağ için durum geçiş diyagramı .....	75
5.3. Üretim tesisi ürün gelişleri modüler yapısı .....	88
5.4. Yükleme boşaltma istasyonu modüler yapısı .....	89
5.5. İstasyonların modüler yapısı .....	89
5.6. Kırıkkale Üniversitesi CIM hücresi kuyruk ağı modeli .....	90
5.7. Üretim tesisi CIM hücresi .....	91
5.8. Üretim tesisi kuyruk ağı modeli .....	91
5.9. Üretim tesisi CIM hücresi birinci ürün sınıfı müşteri/ürün sayıları analizi .....	93
5.10. Üretim tesisi CIM hücresi ikinci ürün sınıfı müşteri/ürün sayıları analizi .....	93
5.11. KÜ CIM hücresi birinci ürün sınıfı müşteri/ürün sayıları analizi .....	94
5.12. KÜ CIM hücresi ikinci ürün sınıfı müşteri/ürün sayıları analizi .....	94
5.13. Üretim tesisi CIM hücresi birinci ürün sınıfı işlem oranları analizleri .....	95
5.14. Üretim tesisi CIM hücresi ikinci ürün sınıfı işlem oranları analizleri .....	96
5.15. KÜ CIM hücresi işlem birinci ürün sınıfı işlem oranları analizleri .....	96
5.16. KÜ CIM hücresi işlem ikinci ürün sınıfı oranları analizleri .....	97
5.17. Üretim tesisi CIM hücresi birinci ürün sınıfı sabit işlem zamanları analizleri ..	98
5.18. Üretim tesisi CIM hücresi ikinci ürün sınıfı sabit işlem zamanları analizleri...	98
5.19. KÜ CIM hücresi birinci ürün sınıfı sabit işlem zamanları analizleri .....	99
5.20. KÜ CIM hücresi ikinci ürün sınıfı sabit işlem zamanları analizleri .....	99
5.21. Üretim tesisi CIM hücresi birinci ürün sınıfı normal dağılımlı işlem zamanları analizleri .....	100
5.22. Üretim tesisi CIM hücresi ikinci ürün sınıfı normal dağılımlı işlem zamanları analizleri .....	100
5.23. KÜ CIM hücresi birinci ürün sınıfı normal dağılımlı işlem zamanları analizleri .....	101
5.24. KÜ CIM hücresi ikinci ürün sınıfı normal dağılımlı işlem zamanları analizleri .....	101
5.25. Üretim tesisi birinci ürün sınıfı işlem zamanları dağılımları analizi .....	102
5.26. Üretim tesisi ikinci ürün sınıfı işlem zamanları dağılımları analizi .....	102
5.27. KÜ CIM hücresi birinci ürün sınıfı işlem zamanları dağılımları analizi .....	103
5.28. KÜ CIM hücresi ikinci ürün sınıfı işlem zamanları dağılımları analizi .....	103

6.1. TAI Yerleşim tasarımı ve performans değerlendirme IDEF içerik diyagramı .	107
6.2. Mevcut durum yerleşim düzeninin görsel modeli.....	110
6.3. Önerilen EİS hücresi yerleşim düzeninin görsel modeli.....	113
6.4. TAI sistem performans analizi IDEF içerik diyagramı.....	114
6.5. Mevcut durum- önerilen EİS senaryosu için çevrim zamanları ile ürün bekleme zamanlarının karşılaştırması.....	116
6.6. Mevcut durum ve önerilen EİS senaryosu için kuyruk uzunlukları karşılaştırması .....	117
6.7. Mevcut durum ve önerilen EİS senaryosu için kullanım oranları karşılaştırması .....	117
6.8. Orantılı palet sayıları kullanılarak iyileştirilmiş mevcut-EİS senaryoları için çevrim zamanı karşılaştırması.....	118
6.9. Orantılı palet sayıları kullanılarak iyileştirilmiş mevcut-EİS senaryoları İçin üretilen ürün miktarları karşılaştırması .....	119
6.10. Orantılı palet sayıları kullanılarak iyileştirilmiş mevcut-EİS senaryoları için kuyruk beklemeleri karşılaştırması .....	119
6.11. Orantılı palet sayıları kullanılarak iyileştirilmiş mevcut-EİS senaryoları için makine kullanım oranları karşılaştırması .....	120
6.12. Dengeli palet sayıları kullanılarak iyileştirilmiş mevcut-EİS senaryoları için çevrim zamanları karşılaştırması.....	121
6.13. Dengeli palet sayıları kullanılarak iyileştirilmiş mevcut-EİS senaryoları için üretilen ürün miktarları karşılaştırması .....	121
6.14. Dengeli palet sayıları kullanılarak iyileştirilmiş mevcut-EİS senaryoları için kuyruk beklemeleri karşılaştırması .....	122
6.15. Dengeli palet sayıları kullanılarak iyileştirilmiş mevcut-EİS senaryoları için makine kullanım oranları karşılaştırması .....	122
6.16. Orantılı palet durumunda makine sayılarındaki değişikliklere göre ürünlerdeki çıkış oranları.....	123
6.17. Dengeli palet durumunda makine sayılarındaki değişikliklere göre ürünlerdeki çıkış oranları.....	123
6.18. TAI EİS tasarımı kuyruk ağı modeli.....	124
6.19. TAI simülasyon ve kuyruk ağı karşılaştırmalı sonuçlar.....	125

## 1. GİRİŞ

Günümüz üretim endüstrisi gelişen teknoloji ile birlikte sürekli bir değişim içindedir. Değişken müşteri talepleri ve isteklerini karşılamak için daha hızlı, kaliteli ve büyük üretim hacimlerinde üretim yapma gereği işletmeleri yeni üretim sistemleri arayışına itmiştir. Teknolojinin getirdiği avantajlar ile beraber işletmelerin otomasyona dayalı sistemlere geçişi hızlanmıştır.

Esnek İmalat Sistemleri (EİS-FMS) rekabetçi küresel piyasada işletmelerin müşteri taleplerine daha hızlı, etkin, verimli ve kaliteli cevap verebilmesini sağlayacak bir üretim sistemi olarak ortaya çıkmıştır. EİS, insan faktörünün etkisini azaltarak bilgisayarla bütünleşik bir otomasyon imkânı sunmaktadır. Bu nedenle işletmelerin yeni yüzyılda tercih etmeye başladığı bir üretim sistemi olmuştur. Özellikle otomobil, uçak, mobilya gibi endüstrilerde uygulama alanları yaygınlaşmaktadır.

EİS, sağladığı büyük avantajların yanında, sistemi kullanacak nitelikli eleman eksikliği, istihdamı azaltması, özellikle sistemin kontrolünü sağlayacak yazılımların geliştirilmesinin güçlüğü ve kurulum maliyetinin yüksek olması gibi dezavantajlı yönleri işletmelerin üzerinde en çok düşündüğü faktörlerdir. Birçok işletme yüksek kurulum maliyetleri sebebi ile ya EİS uygulamaktan vazgeçmekte ya da EİS'i uygulamaya geçirdikten sonra yüksek maliyetler altında ekonomik sıkıntılar içerisine girmektedir. Bu sebeplerle esnek imalat sistemleri uygulamak isteyen işletmelerin öncelikle sistemin henüz tasarım aşamasında etkin bir analiz yapmaları gerekmektedir.

EİS tasarımı gerçekleştirmek için birçok teknik ve yöntem geliştirilmiştir. Bunlar çeşitli yapısal analiz ve tasarım teknikleri (Petri Ağları, IDEF diyagramları, veri akış diyagramları vb) olan genellikle şematik sistemler ile simülasyon, Taguchi deney tasarımı gibi yaklaşım metotları ve analitik metotlar olabilmektedir. Bu tez çalışmasında EİS tasarımı için esnek tasarımlar oluşturmaya imkân veren Integration Definition for Function Modeling -Fonksiyon Modelleme için Bütünleşik Tanımlama- (IDEF) tasarım metodolojisi seçilmiştir.



IDEF, sistem girdileri, çıktıları, kontrol sistemleri ve çalışma mekanizmalarını bir bütün halinde incelememizi ve tasarlamamızı sağlayan bir yapısal analiz ve tasarım tekniğidir. EİS' de bu parametrelerin belirlenmesi maliyet hesaplamaları, sistem kontrol mekanizmasının tespiti ve performans değerlendirme aşamalarında avantajlar sağlayacaktır. Bu parametrelerin doğru ve tam olarak belirlenmesi sistem değerlendirmeleri yapılırken önem arz etmektedir. Tez çalışmasında bu parametreler Operating Characteristic -Çalışma Davranışı- (OC) eğrileri kullanılarak belirlenmiştir.

OC iki veya daha fazla değişken arasındaki ilişkinin tespiti için kullanılan eğrilerdir. Bu değişkenler talep ve kapasitedeki değişkenlik, bekleme zamanları, maliyet kalemleri, kapasite ve makine kullanım oranları gibi sistem girdi veya çıktı değişkenleri olabilir. OC eğrileri çalışmalarda EİS tasarım sürecinde performans analizlerinde kullanılmak üzere bilgi edinmek amacıyla bir karar destek sistemi olarak kullanılmıştır. Bu elde edinilen bilgiler kullanılarak belirlenen sistem tasarımlarına ait parametreler elde edilmiş ve performans değerlendirmesi yapılmıştır.

EİS sistemlerinin performans değerlendirmesi için çeşitli analitik metotlar ve yaklaşım metotları kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasında performans değerlendirme yöntemi olarak Kuyruk Ağları kullanılmıştır. Matematiksel altyapısı çok karmaşık olan kuyruk ağları analiz edilen sistem hakkında tam ve kesin sonuç sağlar. Kuyruk ağlarının diğer avantajlarından biri de optimizasyon imkanı sunmasıdır. Kuyruk ağları ile analizler amaç genellikle ürünlerin/müşterilerin belirlenen performans ölçütleri ile değerlendirilmesidir. Bu ölçütler makine kullanım oranı, çıktı hızı, çevrim zamanı, ortalama bekleme zamanları gibi ölçütler olabilmektedir.

Tez çalışması kapsamında Kırıkkale Üniversitesi Computer Integrated Manufacturing -Bilgisayarla Bütünleşik İmalat- (CIM) laboratuvarı ile otomotiv ve uçak endüstrisinde faaliyet gösteren iki ayrı üretim tesisinin simülasyon modelleri oluşturulmuştur. IDEF diyagramları ve OC eğrileri ile belirlenen sistem parametre değerleri çeşitli senaryolar ile simüle edilmiştir. Simülasyon modelleri sonuçları ile

uygulama alanlarına ait tasarlanan kuyruk ağı modelleri performans sonuçları karşılaştırılmıştır.

Bu tez çalışmasının amaçları, EİS sistem tasarımı için bir yapısal analiz ve tasarım süreci ortaya koymak ve elde edilen parametre değerleri ile EİS'in kuyruk ağı ile modellenebilirliğini test etmektir. Yapılan uygulama ve vaka analizleri ile EİS'in kuyruk ağı modellerinin üretim endüstrisine sağlayacağı katkının tespiti de çalışmanın bir amacı olarak belirlenmiştir.

Tez çalışması genel olarak şu sınıflandırma ile ilerlemektedir. Bölüm 2'de tez çalışmasında kullanılan teknik ve yöntemler için geniş bir literatür araştırması verilmiştir. Literatür araştırması esnek imalat sistemleri, EİS tasarım metodolojileri ve kuyruk ağları ile performans değerlendirmesi alt başlıklarını kapsamaktadır.

Bölüm 3'te esnek imalat sistemleri tasarım süreci çalışmalarına ait geniş bilgiler sunulmuştur.

Bölüm 4'te bir esnek imalat sisteminin tasarımına etki eden performans parametrelerinin tespiti için OC eğrileri ile yapılan analiz çalışmaları yer almaktadır.

Bölüm 5'te kuyruk ağları kullanılarak performans değerlendirmesi hakkında bilgiler verilmiştir. Bu bölümde kuyruk ağlarının sınıflandırılması, kullanılan algoritmalar ve bir EİS sistemine ait kuyruk ağı modelinin simülasyon testleri ile doğrulanması çalışması yer almaktadır.

Bölüm 6'da tez çalışmasının genel amacını oluşturan EİS tasarım süreci, kuyruk ağı ile EİS modelleme ve değerlendirme adımları vaka analizleri ile desteklenmiştir. Çalışmalar konusunda yorum ve değerlendirmeler de bu bölümde yer almaktadır.

Ekte ise EİS kuyruk modellerinin analizini gerçekleştirmek için yazılan QueNET Kuyruk Ağı Performans Değerlendirme Programına ait bilgiler yer almaktadır.

Ayrıca tezin ana uygulama alanı olan esnek imalat sistemleri, EİS tasarım metodolojisi olan IDEF diyagramları ve performans değerlendirme teknikleri hakkında genel bir bilgi bu bölümde verilmiştir.

### **1.1. Esnek İmalat Sistemleri**

Bir üretim sistemi belirsizlikler ve düzensizlikler ortamında faaliyet gösterir. Bu düzensizlik ve belirsizlik çeşitli nedenlere dayanabilmektedir. Tezgah ve ekipman arızaları, işlem öncelikleri, beklemelemlerden doğan kuyruklar, maliyetlerin öngörülenden yüksek çıkması, kalite düzeyinin düşmesi, ürünün talep dengesinin değişmesi, üretim girdilerinin değişkenliği, teknolojik ve yasal değişiklikler gibi çeşitli düzensizlik ve belirsizlikler sayılabilir.

İşletmeler daha önceden tahmin edip öngöremedikleri bu tür durumlar karşısında sistemlerini daha iyi yapılandırmak istemektedir. Bir üretim sisteminin bu tür durumlarda ortama adapte olabilme yeteneğine sistemin esnekliği denir. Genel olarak esnek bir sistem çevresinde oluşan değişikliklere cevap verebilir durumdadır.

Esneklik sistem parametrelerini etkileme yönünden çeşitli sınıflandırmalara tabi tutulmuştur. Tezgâh/makine esnekliği, değişik durumlarda tezgâhın maliyet ve süre açısından cevap verebilme yeteneğidir. Üretim süreci esnekliği, üretim sisteminin farklı proselere sahip çeşitli tipteki ürünleri üretebilme yeteneği olarak tanımlanır. Ürün esnekliği, üretilen ürünlerin en az maliyetle ikameleri ile değiştirilebilme kolaylığıdır. İş akışı esnekliği, arıza veya başka nedenle kullanılmayacak olan bir sistem öğesinin yerine alternatiflerinin getirilebilmesi kabiliyetidir. Genişleme esnekliği, sistemin teknolojik gelişmeler ve kapasite artışları karşısında büyümesi ve ürün çeşitliliğini ihtiyaç duyulduğunda değiştirebilme yeteneğidir. Hacim esnekliği ise sistemin değişik miktarlarda girdi kullanarak değişik miktarlarda çıktı üretebilme özelliği olarak tanımlanır.

Bir üretim sisteminin bu esneklik tiplerini kazanarak rekabetçi ortamda faaliyet gösterebilmesi için Esnek İmalat Sistemleri geliştirilmiştir. Genellikle EİS'e sahip

işletmeler ekonomik krizde, yasal dzenlemelerden doğan olumsuzluklardan ve teknolojik gelişmelerin getirdiği dezavantajlardan en az etkilenen işletmeler olmuşlardır. Fakat bu avantajı sağlamanın yanında EİS uygulamak isteyen işletmelerin sistemlerine çeşitli sistem oğeleri sağlayarak kocklő değişikliklere gitmeleri gerekmektedir.

Bir uturetim sisteminin EİS ile yonetilebilmesi iwin çeşitli sistem bileşenlerinin bulunması gerekmektedir. Bu bileşenler genel olarak bilgisayarlar, sayısal kontrollő tezgahlar, taşıma ve depolama sistemi ve robotlardır (şekil 1.1). Ozet olarak, EİS bir taşıma sistemi ile birbirine bağlanmış, bilgisayarlar tarafından kontrol edilen tezgahlardan oluşan ve gelişmiş bir bilgisayar sistemi iweren uturetim sistemidir.



**şekil 1.1.** Kırıkkale ˘niversitesi EİS hucresi

Bir EİS hucresi bileşenleri aşağıdaki oğelerden oluşur.

- Robotlar: EİS'in kritik bileşenlerindedir. İnsan etkileşiminin gerektiği işlerde otomasyonu sağlar (Şekil 1.2).



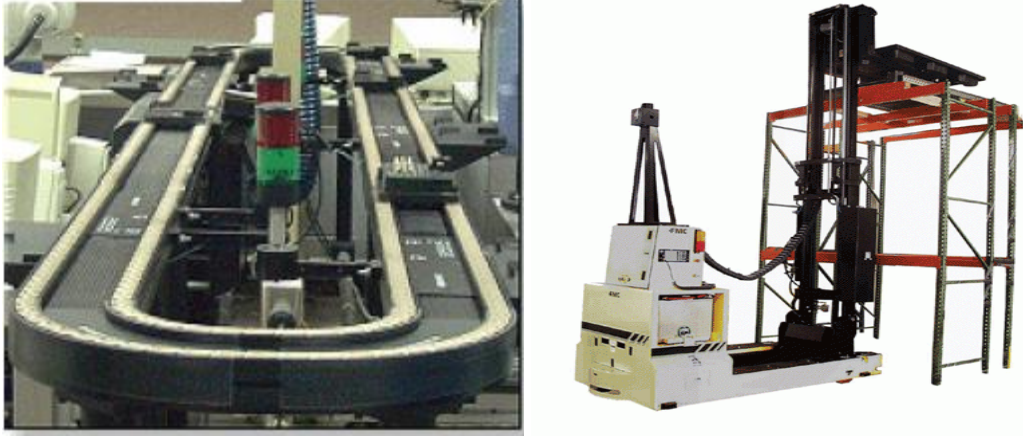
Şekil 1.2. EİS robot ve makine bileşenleri

- Depolama üniteleri: Üretim öncesi hammaddelerin ve üretim sonrası ürünlerin konulduğu/depolandığı bölümlerdir (Şekil 1.3). Tam otomatiktirler ve robot kolları ile kontrol edilirler.



Şekil 1.3. EİS depolama üniteleri

- Makineler: Değişik işlemleri yapan CNC cihazlardır (Şekil 1.2).
- Taşıma sistemleri: Parçaların bir istasyondan diğerine taşınmasını sağlarlar. Konveyör, otomatik kılavuzlu cihaz (AGV), ray kontrollü cihaz (RGV) gibi çeşitli türleri vardır (Şekil 1.4).



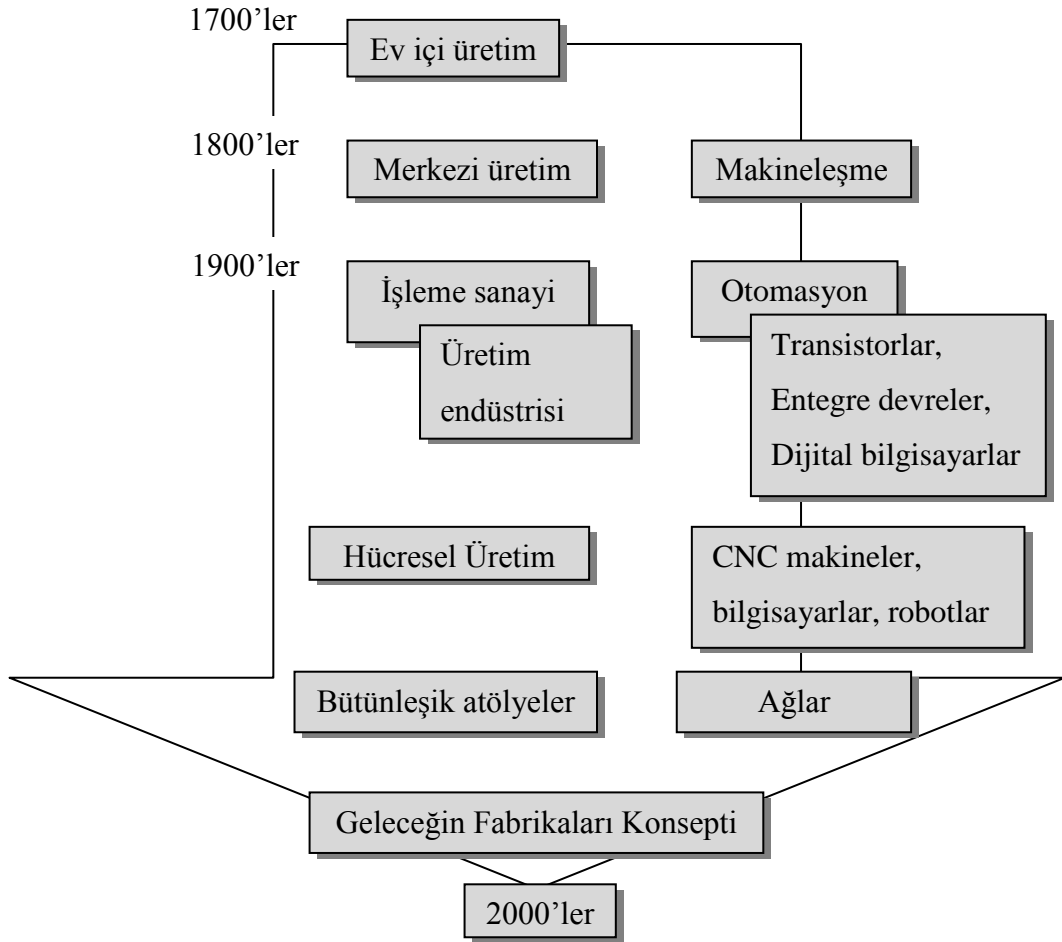
**Şekil 1.4.** EİS taşıma sistemleri (konveyör ve AGV)

### **1.1.1. Esnek İmalat Sistemlerinin Tarihsel Gelişimi**

Üretim teknolojileri yüzyıllardır sürekli bir gelişim içerisinde. Henüz makineleşmenin gerçekleşmediği yıllarda tüketiciler ev tipi üretim ürünleri kullanmaktaydılar. Daha sonra 1800'li yıllarla beraber makineleşme gerçekleşmiş ve üretim merkezi fabrikalar veya atölyelerde yapılmaya başlamıştır. Bunu takip eden yüzyılda elektronik teknolojinin ilerlemesi ve otomasyona geçişin sağlanması ile makine tipleri ve insan faktörünün etkisinin azaltılması konusunda gelişmeler gösterilmiştir.

Yüksek teknolojilerin kullanılmadığı 1940'lı yıllardan önce torna, freze gibi belli işlemleri yapabilen bağımsız tezgâhlar kullanılmıştır. İlk olarak; Sayısal Kontrollü Tezgâhlar (Numerical Controlled- NC) geleneksel tezgâhlara eklenerek oluşturulmuştur. Sayısal Kontrollü Tezgâhları, her bir tezgâh takımını kontrol edecek bir mikrobilgisayar kullanımı esasına dayanan Bilgisayar Kontrollü Sayısal tezgâhların (Computer Numerically Controlled-CNC) ortaya çıkışı izlemiştir. 1960'lı yıllarda robotlar, malzeme taşıma sistemleri ve bilgisayar kontrol teknolojilerinde sağlanan gelişmelerle birleşince, çeşitli parçaların orta ve küçük hacimlerdeki partiler halinde daha ekonomik bir şekilde üretilmesine olanak veren esnek imalat

sistemlerinin ortaya çıkmasına neden olmuştur. EİS'in gelişimini gösteren şema Şekil 1.5'te verilmiştir (Shivanand vd., 2006).



**Şekil 1.5.** Üretim sistemlerinde tarihsel yenilikler

Günümüzde artık geleceğin fabrikaları olarak nitelendirilen Computer Integrated Manufacturing -Bilgisayar Bütünleşik İmalat- (CIM) sistemleri gelişmektedir. Bilgisayar destekli tasarım ve imalat işlemlerini de kapsayan CIM entegre olmuş bir veritabanı ile sisteme bilgi akışını da sağlayabilen bir sistemdir.

### 1.1.2. Esnek İmalat Sistemlerinin Özellikleri

Her üretim sisteminin kendine has bazı karakteristikleri vardır. EİS de sahip olduğu avantajlar ile uygulamada bazı karakteristik özelliklere sahiptir. EİS'in ürün çeşitliliği, makine teçhizat, malzeme taşıma gibi üretim sistemlerinin değerlendirildiği bazı karakteristik özellikleri aşağıda bahsedildiği gibidir.

1. Esnek Üretim Sistemleri ürün çeşidinin fazla olduğu işletmelerde uygulanabilir.
2. Esnek Üretim Sistemleri aynı gruptan olup farklılık gösteren parçaları üretmek amacıyla kullanılmaktadır. Genel amaçlı makine-teçhizatı içermektedir.
3. Farklı parçaları üretmek için makine-teçhizatta küçük çaplı değişiklikler yapılabilir.
4. Mamul, yarı mamul ve hammadde otomatik bantlarla, malzeme ve taşıyıcılarla hareket edebilmektedir.
5. Genel amaçlı makine-teçhizat ve malzeme taşıma sistemini kontrol eden ana bir bilgisayar vardır.
6. Farklı parçaların üretilmesi makineler üzerinde gerçekleşen otomatik değişikliklerle mümkün olabilmektedir. Üretimde personel müdahalesi asgariye indirilmiştir.
7. Fabrikaya hammadde girişinden mamul çıkışına kadar kalite kontrol, tasarım, üretim gibi tüm işlemler otomasyona dayalı olarak bilgisayarla gerçekleştirilmektedir.

Özet olarak EİS ürün çeşitliliğinin fazla olduğu, ürün gruplarının oluşturulabildiği, çeşitli sistem bileşenlerini barındıran, genel amaçlı makinelerin kullanıldığı ve tüm sistem yönetiminin bilgisayar kontrollü olduğu bir karakteristiğe sahiptir.



### **1.1.3. Esnek İmalat Sistemlerinin Amaçları**

Bir üretim sistemini uygulamaya almanın işletme stratejisi açısından bir amacı vardır. EİS sistemleri ise işletmeye kazandıracığı teknolojik ve sistematik yenilikler açısından birçok amaca yöneliktir. Esnek imalat sistemlerinin Bölüm 1.1.2’de bahsedilen karakteristik özellikleri göz önünde bulundurulduğunda uygulama amaçlarını aşağıdaki gibi sıralayabiliriz.

1. Küçük parti büyüklükleri
2. Hızlı stok çevrimleri
3. Tezgâh kurmalarının ortadan kaldırılması
4. Hızlı malzeme aktarımı
5. Mamul gamındaki değişmelere hızlı uyum
6. Tezgâh arızalanmalarında hızla alternatif rotalama
7. Tasarım değişimlerine hızla uyum
8. Tüm sistemi sürekli ve bütünleşik olarak izlenme
9. Sözlü ve yazılı iletişime bağımlılıktan kurtulma
10. İmalat hacimlerinde hızla değişiklik yapılabilme
11. Planlanan imalata atölye personeline sık sık müdahale yapma gereğini kaldırmak
12. Teslimat sürelerindeki değişkenliğin düzenlenmesi.

EİS’in amacı genel itibari ile iletişimi kolaylaştırarak üretim sürecini hızlandırmak, insan faktörünün etkisini en aza indirmek, sisteme esneklik kazandırmak olarak düşünülebilir. Bu amaç ve özellikleri dikkate alındığında EİS hücresinin işletmeler için önemi açıkça anlaşılmaktadır.

### **1.1.4. Esnek İmalat Sistemlerinin Önemi**

Esnek imalat sistemlerinin önemi teknolojik gelişmelerin üretim endüstrisini etkilemesi ile ortaya çıkmıştır. Teknolojik gelişmeler müşteri talepleri ile üretim arzında esnekliklere neden olmuştur. Bu durum pazarda rekabetçi bir ortam

oluşturmuştur. Günümüzde tüketici istediği ürünü çeşitli alternatifleri ile küresel bazda elde edebilir durumdadır.

İşletmeler bu piyasada özellikle talep ve ürün esnekliği kazanmak için EİS'i tercih etmek istemektedirler. Ayrıca günümüzde stoklar işletmelerin en önemli maliyet kalemlerindedir. EİS kullandığı altyapı sayesinde minimum stok kullanarak sistemi dinamik tutmaktadır.

EİS üretim sürecinde insan faktörünü en aza indirdiği için kaliteli ürün üretilmesi konusunda işletmelere büyük faydalar sağlamaktadır. İnsan kaynaklı hatalardan ortaya çıkacak makine arızaları ve süreç değişikliklerinden doğacak zaman kayıplarını da azaltarak işletmelere pazarda rekabet avantajı sağlamaktadır. EİS hem teknolojinin gelişimi hem ekonomik kalkınma hem de işletmelerin gelişmesi açısından büyük öneme sahiptir.

#### **1.1.5. Esnek İmalat Sistemlerinin Faydaları**

EİS özellikleri ve amaçları dikkate alınarak işletmelere büyük yararlar sağlamaktadır. EİS işletmeye maliyet, işçilik, otomasyon, kalite, genişleme, krizlere dayanıklılık gibi bazı stratejik faydalar getirmektedir.

1. Müşteri istekleriyle doğru orantılı olarak bilgisayar destekli imalat sayesinde ürün tasarımı hızla geliştirilmektedir.
2. Sistemde otomasyonun hâkim olması dolayısıyla işçilik maliyetleri azalmıştır.
3. Anabilgisayarda sistemdeki aksaklıklar anında görülebilmektedir.
4. Üretimin otomasyona dayalı olarak gerçekleştirilmesi üretim süresini kısaltmıştır.
5. Üretimin tamamen robotlar ve otomatik tezgâhlarla yapılması ürünlerin standart hale gelmesini sağlamıştır.
6. İşgücü, tasarım ve üretim gibi maliyetlerin azalması sonucu verimlilik artmıştır.

7. Ürün çeşitliliğinin fazla ve kalitesinin standart olması dolayısıyla müşteri tatmini artmıştır.
8. Makine kullanım oranı artmış ve yer tasarrufu sağlanmıştır.
9. Düşük stokla çalışma sonucu stok tutma maliyetleri azalmıştır.
10. Maliyetlerin düşmesiyle birlikte karlılık artmıştır.
11. Sistemin kurulmasıyla birlikte işletmenin rekabet gücü artmıştır.

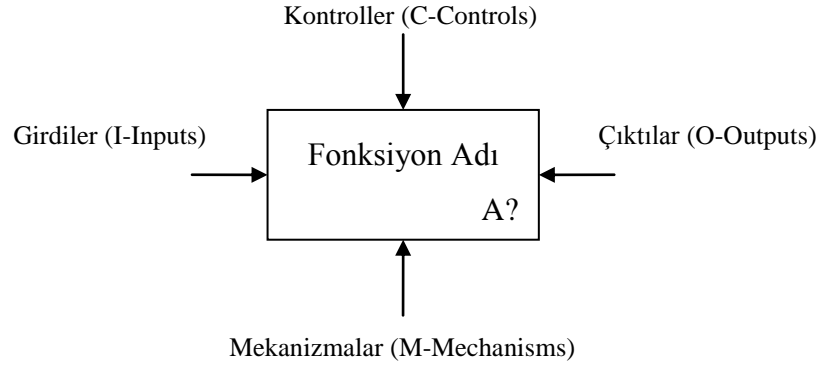
Ayrıca EİS üretim esnekliğinin artması ile müşteriye ürün çeşitliliği de sunmaktadır. EİS sağladığı faydalar, sisteme kazandırdığı özellikler ve günümüz teknolojisinde sahip olduğu büyük önem ile geleceğin üretim sistemi olarak görülebilir.

## **1.2. IDEF Sistem Tasarım Tekniği**

Bir üretim sisteminin tasarım modelini oluşturmak için yapısal bazı teknikler veya analitik metotlar ve yaklaşım metotları kullanılır. Bir tasarım tekniğinin sistem parametrelerini tam ve doğru olarak nitelendirip tanımlaması sistemin kurulumu aşamasında ve daha sonraki analizlerde kritik öneme sahiptir.

Tez çalışmasında EİS tasarım modelleri oluşturulurken esnek tasarımlar oluşturmaya imkân veren IDEF diyagramları tercih edilmiştir. IDEF diyagramları kısaca Şekil 1.6'deki mantık çerçevesinde hazırlanır. Diyagramın her bileşeni yanında parantez içinde, bileşenin İngilizce karşılığının baş harfi yazılarak gösterilmiştir. Daha sonraki bölümlerde de notasyon bu şekilde yapılacaktır.

IDEF diyagramlarında amaç girdi ve çıktıların daha iyi analiz edilip sistem parametrelerinin değerlendirilmesinin daha doğru yapılabilmesini sağlamaktır.



**Şekil 1.6.** IDEF Diyagram bileşenleri

Girdiler, fonksiyonun gerçekleştirilmesi için gerekli olan gerçek nesnelere veya verilerdir. Bir üretim sistemi tasarımı için işlem süreleri, makine teçhizat bilgisi, ürün bilgisi ve süreç bilgisi gibi parametrelerdir. Çıktılar, fonksiyon sonucunda ortaya çıkan nesnelere veya verilerdir. Uygun olan ve olmayan sistem tasarımları, maliyet bilgisi, yerleşim planı gibi çıktılar örnek olarak verilebilir. Kontroller, fonksiyonun başarı ile tamamlanmasını sağlayan veya çıktıların oluşmasına etki eden parametrelerdir. Tasarım amaçları, üretim stratejisi, maliyet kalemleri ve maliyet hesaplama sistemi gibi üretim sistemi fonksiyonlarıdır. Mekanizma, fonksiyonun uygulanmasını sağlayan kişi, aygıt veya verilerdir. Sistem performans değerlendirme yöntemleri, simülasyon senaryoları gibi sistem işleyiş mekanizması etmenleridir.

IDEF sistematığında her bir fonksiyona A? gibi bir tanımlama kodu/numarası verilir. Bu kod sistemi alt seviyelere ayrıştırırken diyagramın ve süreçler arasındaki ilişkilerin daha anlaşılır ve sistematik olmasını sağlar. Örneğin, sistemi en genel hali ile gösteren IDEF diyagramına A0 kodlaması verilir.

### **1.3. Performans Değerlendirme Teknikleri**

Performans değerlendirme bir üretim sistemi tasarımının uygulamaya geçilmesi kararını vermek için en önemli aşamadır. Özellikle üretim sistemlerinin tasarım aşamasında veya karşılıklı alışverişlerin (trade-off) inceleneceği durumlarda

performans değerlendirmesi yapılmaktadır. Bu değerlendirmenin doğru yapılması sistemin geleceği için alınacak stratejik kararlara etki edecektir. Bu nedenle performans analizleri çeşitli sistem parametreleri ve değişkenleri göz önüne alınarak aralarındaki ilişkiler de incelenerek gerçekleştirilmelidir. Performans değerlendirme; çıktı hızı, işlem gören parça sayısı, makine kullanım oranı, üretim oranı ve çevrim zamanı gibi ölçütler hakkında bilgi sağlar.

Performans değerlendirmesi yapmak için analitik ve yaklaşım metotları geliştirilmiştir. Bu tekniklerin birbirlerine göre çeşitli yönlerden üstünlükleri vardır. Diğer yöntemlere nazaran analitik yöntemler çok düşük maliyetli, hızlı ve etkin, sonuçlara kolaylıkla ulaşılmasını sağlar.

Simülasyon karmaşık sistemleri detaylı olarak incelemek için kullanılır. Simülasyon çok etkin olmasına rağmen, uzun süreli modelleme ve uzun hesaplama zamanı gerektirebilir. Bu yüzden simülasyon modelinin yeterliliği kullanıcının amaçları ve varsayımları ile orantılıdır. Performans ölçümünün yeterliliği ise modelin doğruluğuna ve denemelerin uzunluğuna bağlıdır.

Performans değerlendirme araçlarının karakteristikleri Tablo 1 de verilmiştir (Matta ve Semeraro, 2005). Analist bu tekniklerden kendi sistemine uygun olan teknik veya teknikleri seçerek ilerlemelidir.

**Çizelge 1.1.** Performans değerlendirme araçlarının karakteristikleri

<b>Karakteristik</b>	<b>Simülasyon</b>	<b>Tam analitik metotlar</b>	<b>Yaklaşık analitik metotlar</b>
<b>Tamlık</b>	Kullanıcı tanımlı	Düşük	Ortalama
<b>Doğruluk</b>	Kullanıcı tanımlı	Ortalama (sıradan)	Yüksek-ortalama
<b>Maliyet</b>	Yüksek	Düşük	Düşük

Tez çalışmasında performans değerlendirme tekniklerinden analitik metot kuyruk ağları olarak seçilirken yaklaşım metodu simülasyon olarak seçilmiştir.

## 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bu tez çalışmasında esnek imalat sistemlerinin tasarımı ve performans değerlendirmesi amaçlarından yola çıkarak, literatür araştırmasında ilk olarak EİS'in kuyruk ağları ile modellenebilirliği üzerinde durulmuştur. İleriki bölümlerde tasarım modelleri ve kuyruk performans değerlendirmesi ile ilgili literatüre değinilecektir.

### 2.1. Esnek İmalat Sistemleri

Esnek İmalat Sistemleri (EİS) birçok bileşenden oluşan bilgisayar, elektronik, makine, üretim, mekatronik ve endüstri disiplinlerini ilgilendiren karmaşık bir konudur. EİS için literatürde birçok tanımlama yapılmıştır.

EİS, Aşkın ve Standridge (1993) tarafından, merkezi bilgisayar tarafından kontrol edilen, otomatik taşıma sistemleriyle birbirine bağlanmış ve iş istasyonları ile desteklenen otomatik nümerik kontrollü tezgâhların oluşturduğu imalat sistemleri olarak tanımlamıştır.

EİS, Monks (1987) tarafından ise, denetleyici bir bilgisayar, otomatik takım tezgâhları ve otomatik malzeme taşıma sistemlerini kapsayan, takımlar ve taşıma donanımlarının, istenilen özelliklere uygun, farklı parçaların yüzlercesini üretmek için bilgisayar talimatlarıyla yönlendirildiği imalat sistemleri olarak tarif edilmiştir. Sipper ve Bulfin (1997) ise EİS'i, materyal akışı, bilgisayar kontrolü, iletişim, imalat ya da montaj işlemlerinin bütünleştirilmesini ifade eden bir kavram olarak açıklamışlardır.

Özet olarak, EİS bir taşıma sistemi ile birbirine bağlanmış, bilgisayarlar tarafından kontrol edilen tezgâhlardan oluşan ve gelişmiş bir bilgisayar sistemi içeren üretim sistemidir.

Esnek imalat sistemi süreçleri otomatik taşıma sistemleri sayesinde kapalı bir çevrim halinde işlemektedir. Bir ürün depolama ünitesinden çıktıktan sonra gerekli görülen

tezgâh veya makinelerde işlem görmekte ve tekrar taşıma sistemi vasıtasıyla depolama ünitesine dönmektedir. Sürecin bu şekilde kapalı bir çevrim halinde ilerlemesi EİS'in kuyruk ağları ile modellenebileceği konusunu akla getirmiştir. Bu konunun detaylı olarak incelenmesi Bölüm 5'te verilecektir.

EİS, insan etkisi olmaksızın arıza durumunda veya sistemde oluşacak aksaklıklara karşı makine kullanım ve çıktı oranlarını ayarlayabilmektedir. EİS, karmaşık ve maliyetli bir sistem olmasından dolayı, özellikle yatırım aşamasında performans değerlendirmesi önem kazanmaktadır. Bu yöndeki çeşitli çalışmalar Kunnathur ve Sundararaghavan (1992) ile Raj vd. (2007) olarak verilebilir.

EİS'i kuyruk ağları ile ilk olarak Yao ve Buzacott (1985) modellemiştir. Genel işlem zamanlı tek sınıflı kapalı kuyruk ağlarının analizi için üssel yaklaşımı önermişlerdir. Keza işlem zamanlarının deterministik varsayımı modelleme için oldukça zordur. Üssel yaklaşıma göre orijinal ağ durum-bağımlı üssel zamanlardan oluşan yaklaşık eşit dağılmış bir ağ olarak temsil edilir.

Kuyruk ağlarının Esnek İmalat Sistemlerine uygulanmasının uygun olacağı birçok araştırmacı tarafından da teklif edilmiştir. Tempelmeier ve Kuhn (1993)' un kitabı bu öncü çalışmalardandır. Caramanis (2001) EİS'in karakterizasyonunu yaparak değişik kuyruk ağlarından örnekler vermiş ve karşılaştırmalarını yapmıştır. Buzacott ve Yao (1986) analitik kuyruk ağ modelleri kullanarak EİS'i çalışmış ve bu modellerin ana özelliklerini EİS'teki işlevsel karakteristiklerine izdüşümünü incelemiştir. EİS'in kuyruk ağları ile modellenmesi hakkında bir başka literatür taraması Bitran (1992) tarafından yapılmıştır.

Baynat ve Dallery (1993a) üssel yaklaşımı çok sınıflı kapalı kuyruk ağlarının analizi için kullanmışlardır. Daha sonra var olan üssel dağılım teknikleri ile birleştirmişlerdir (Baynat ve Dallery, 1993b).

EİS üzerine kuyruk ağları kullanarak optimizasyon çalışmaları da yapılmıştır. Örneğin Azadivar ve Lee (1986) bekleme yerlerinin optimizasyonunu kuyruk ağları

kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Tetzlaf (1990) hücreyel imalat ile esnek imalat sistemi arasındaki iş yükünün optimal dağılımının çözümü için kuyruk ağlarını kullanmıştır. Thesen (1999) EİS'de bekleme yerlerinin ve çizelgelemenin ortak optimizasyonu için kuyruk ağlarından faydalanmıştır. Gershwin ve Schor (2000) EİS'te de kullanılan Toyota üretim sistemlerinin kalite ve nicelik özelliklerini artırmak için kuyruk ağı modeller geliştirmişlerdir. Zhuang ve Hindi (1990) çalışmalarında çok sınıflı EİS için kapalı ağ modellerini kullanan yaklaşık bir algoritma önermişlerdir Benzer bir çalışmada Sung ve Kwon (1994) tek sınıflı EİS ve blokeli durumlar için performans ölçütlerini yaklaşık olarak hesaplayan bir algoritma sunmuşlardır.

Son dönemlerde de EİS'in kuyruk ağları ile modellenmesi üzerine çalışmalar devam etmiştir. Örneğin Jain vd. (2008) EİS taşıma sistemlerinin etkileşimini iki kuyruk modeli ile analiz etmişler ve sonuçları bulanık sinir yaklaşımı ile karşılaştırmışlardır. Savsar ve Aldaihani (2008) makine arızalarının EİS' teki etkilerini incelemişlerdir.

EİS üzerine özellikle, üretim planlama, çizelgeleme, rotalama ve konfigürasyonu konularında bilhassa tamsayılı algoritmalar kullanan birçok sayıda güncel çalışma da bulmak mümkündür (Das vd., 2008; Ahkioon vd., 2009; Hsu vd., 2008). Lakin bu tezin hedefleri doğrultusunda kuyruk ağları ile modeller üzerine yoğunlaşmak tercih edilmiştir.

EİS'in dünyada ve Türkiye'de uygulama alanları konusunda da birçok çalışma yapılmıştır. EİS'in özellikle otomotiv üretiminde uygulamalarını yaygın olarak bulmak mümkündür. Çiçek, Yüzükırmızı ve Ersöz (2007) Türk sanayisi ve eğitimi açısından EİS'in mevcut uygulamalarını incelemişlerdir. Bu konuda Türkiye'den diğer çalışmalar olarak (Macit, 1999; Çiçek Öztürk, 2000; Matur, 2003; Tunçer, 2003) sayılabilir.

EİS sistemini uygulamaya geçirmeden önce ilk yapılması gereken iyi bir tasarım modelinin ortaya konulmasıdır. Yapılan tasarım modeli analizlerinin doğruluğu ve tamlığı sistemin çalışması açısından stratejik bir öneme sahiptir.



## **2.2. Esnek İmalat Sistemleri Tasarım Modelleri**

Esnek imalat sistemleri uygulamada, kurulum ve işletim maliyetlerinin yüksek olması sebebi ile sistem bileşenlerinin sayısının, yerleşim düzeninin ve süreç mekanizmalarının belirlenmesinde detaylı analizler yapılmasını gerektirir. Belirlenecek tasarım amaçları ve kısıtları doğrultusunda sistem parametreleri tasarım araçları vasıtası ile değerlendirilmelidir. Esnek İmalat Sistemlerinin tasarımı için literatürde birçok araç ve yöntem kullanılmıştır. Bu yöntemler ve ilgili yöntem ile yapılmış çalışmaların sınıflandırılmış şekilde literatürü takip eden bölümlerde verilmiştir.

### **2.2.1. Petri Ağları**

Petri Ağları (PA) bir üretim kontrol metodu olarak özet bilgi şeklinde sistem süreçlerini incelememizi sağlayan yapısal bir tasarım aracıdır. PA genellikle sistem bileşenlerinin dinamik davranışlarını incelemek için kullanılırlar. PA, esnek imalat sistemleri süreçlerinin kontrolünde, bilgisayar sistemlerinin ve veri akışlarının modellenmesinde yaygın kullanım alanı bulmuştur.

Petri Ağları ilk çalışmalarda EİS tasarımında bir tasarım aracı olarak parametreler arasındaki ilişkilerin ve model dönüşümlerinin incelenmesinde kullanılmıştır. Stotts vd. (1989) EİS'in PA ile modellenmesi için mantıksal yapıyı ortaya koymuşlardır. Bu yapıda esnek bir üretim hattı incelenmiş, Binary Timed Petri Nets ismi verilen yeni bir Petri Ağı ile robot kontrol mimarisi analiz edilmiştir.

Santarek ve Buseif (1998) Structured Analysis and Design Technique (SADT) ve PA kullanarak bir EİS tasarım modeli için otomatik mantıksal kontrol modeli önermişlerdir. Çalışmada yüksek seviye sistem tasarımları için otomatik mantıksal kontrol üretimine izin veren bir üretim sistemi tasarım modeli önerilmiştir. Yüksek seviye sistem tasarım spesifikasyonları SADT metodolojileri ile geliştirilmiş ve Integration Definition for Function Modeling (IDEF) diyagramları ile modellenmiştir. Sistem dönüşümleri IDEF0 diyagramları kullanılarak

oluşturulmuştur. Ayrıca simülasyon PA'da bir tasarım aracı olarak kullanılmaktadır. Yim ve Barta (1994) PA için simülasyon tabanlı bir tasarım ve analiz modeli geliştirmişlerdir. Simülasyon modeli için üç ayrı model önermişlerdir. Bunlar nesne modeli, Petri Ağı ve kontrol modeli. Sistem bileşenleri Petri Ağları ile modellenirken, kontrol fonksiyonu ayrı ayrı modellenmiş ve sisteme entegre edilmiştir. Modelin etkinliği vaka analizleri ile tespit edilmiştir.

Ayrıca birçok çalışmada Petri Ağları üretim sistemleri tasarımı uygulama süreci (Zhou vd., 1992), nesne tabanlı kontrol yazılımı geliştirilmesi (Venkatesh ve Zhou, 1998) gibi alanlara da uygulanmıştır. PA kullanılarak EİS'i bütün halinde tasarlamak yerine bazı sistem parametrelerinin kontrolü için de modeller geliştirilmiştir. Raju vd. (1993) PA tabanlı simülasyon kullanarak taşıyıcı sayısı, taşıyıcı çizelgeleme ve AGV yönlendirmesi gibi analizlerde bulunmuşlardır.

### **2.2.2. Simülasyon**

Simülasyon analitik ve matematiksel modellere nazaran daha karmaşık sistemlerin tasarımında etkin kullanılan bir araçtır. Bu kapsamda çeşitli simülasyon dilleri kullanılarak istatistikî analizler yapmak ve sistem performansını ölçmek mümkün olabilmektedir. Anglani vd. (2002), Klingstam ve Gullander (1999), Ahmari ve Ridgway (1999) EİS tasarımları için simülasyon modelleri geliştirmişlerdir.

Klingstam ve Gullander (1999), üretim mühendisliği için simülasyon çalışmalarını derlemiştir. Ayrıca Bilgisayar destekli üretim mühendisliği için bir simülasyon yazılım aracı önermişlerdir. Çalışmalarında üretim sistemi yatırımından önce önemli olan sistem özelliklerini incelemişlerdir. Ahmari ve Ridgway (1999), üretim sistemleri ihtiyaçlarını karşılamak için bir simülasyon modeli geliştirmişlerdir. Bütünleşik modelde üretim sistemi amaçlarını birinci seviye IDEF0 diyagramları kullanarak belirlemişlerdir. IDEF0 alt aktivite diyagramları ile sistem performansının ölçülmesi ve değerlendirilmesi için bir simülasyon model aracı kullanmışlardır. Ayrıca geliştirilen bilgisayar tabanlı destek aracının nesnelere arası bağlantıları ve genel yapıyı ortaya koyduğu görülmektedir. Anglani vd. (2002), ARENA simülasyon

yazılımını kullanarak EİS simülasyon modeli için yeni bir prosedür sunmuşlardır. Bu çalışmada simülasyon modeli için iki ana prosedür geliştirilmiştir. Birincisi sistematik kavramsal model, ikincisi kavramsal model dönüşümleri için kural setleridir. Çalışmanın amacı kural tabanlı yaklaşım vasıtasıyla yazılım etkinliğini geliştirmek ve ARENA simülasyon yazılımına temel nesne tabanlı özellikler kazandırmaktır.

### **2.2.3. Nesne Tabanlı Modelleme**

Nesne tabanlı modelleme gerçek sistem parametrelerinin nesnel modellerini kullanarak dil bağımsız yapılan bir tasarım tekniğidir (Rumbaugh vd., 1991). Karmaşık sistemlerin modellenmesinde nesne tabanlı çalışmak için genellikle simülasyon araçları tercih edilmiştir (Al-Ahmari ve Ridgway, 1999; Anglani vd., 2002). Narayanan vd. (1998) nesne tabanlı üretim tasarımı için bir yazılım modeli önermişlerdir. Çalışmalarında Object Oriented Programming -Nesne Tabanlı Programlama- (OOP)'i kullanarak üretim sistemlerinin sürekli/devamlı simülasyonu üzerine odaklanan bir model geliştirmişlerdir. Model ile temel araştırma ve uygulama alanlarının sorunları, değerlendirmeleri ve ihtiyaçları belirlenmeye çalışılmıştır. Kovacs vd. (1999) EİS bileşenlerinin tekrar kullanımı üzerine nesne tabanlı modeller geliştirmiştir. Amaç EİS simülasyon modellerini ve kontrol stratejilerini kolay, hızlı ve güvenilir olarak sağlamaktır. Simülasyon modelinin oluşturulması ve değerlendirilmesi için sistem sınıflandırması ve düzenlemesinde kullanılan SALMS (The Systematic Asset Library Management Systems-Sistematik Sistem Yönetimi Değerlendirme Kütüphanesi) aracını kullanmışlardır.

Zhou vd. (1992), tasarım ve uygulama adımlarının yönetilmesi üzerine çalışmışlardır. Nesne tabanlı modelleme ve Petri ağları gibi nesne tabanlı modelleme tekniklerinin zorluklarına vurgu yapmışlardır. Object Oriented Design -Nesne Tabanlı Tasarım- (OOD) isminde yeniden modellenebilir ve kullanımı kolay bir teknik geliştirmişlerdir. Petri ağlarını modelin dinamik davranışlarını incelemek ve performans analizlerini gerçekleştirmek için kullanmışlardır. Choi ve diğerleri. (1996), JR-Net (Job Resource relation-net - İş Kaynaklı ilişki ağı -) ismini verdikleri

EİS için grafiksel bir yapı sunan yeni bir metod geliştirmişlerdir. Geliştirilmiş JR-net kullanarak grafiksel EİS modellerinin adım adım prosedürlerini oluşturmuşlardır. Ou-Yang vd. (2000), üretim bölümünün Object Model Technique -Nesne Modelleme Tekniği- (OMT) kullanarak analizini yapmışlardır. Ana amaç üretim planlama ile Computer Integrated Manufacturing (CIM) üretim seviyesi arasındaki boşlukları incelemek için bir kontrol modeli geliştirmektir.

#### **2.2.4. Sanal Fabrika Kullanımları**

Son dönemlerde Virtual Factory (Sanal Fabrika) isminde nesne tabanlı simülasyon modeli olan yeni bir teknik kullanılmaya başlanmıştır. Onosato ve Iwata (1993), sanal fabrika modeli ihtiyaçlarını araştırmışlardır. Çalışmalarında diğer üretim konseptleri ile sanal fabrika arasındaki ilişkiler tanımlanmıştır. Sistem ihtiyaçları belirlendikten sonra, sanal fabrika mimarisi açıklanmış ve bazı sistem geliştirmelerinde bulunulmuştur. Lin vd. (1999), sanal fabrika modellerinin matematiksel modelini oluşturmayı denemişlerdir. Analitik olarak sanal fabrika uygulamaları yapmışlardır. Yeni kaynaklar ekleyerek modeli genişletmişler ve denemeler yapmışlardır. Sonuç olarak geleneksel model ile sanal fabrika modeli karşılaştırılmış ve matematiksel model doğrulanmıştır. Ho ve Ranky (1997), nesne tabanlı modeller ile esnek montaj hatları için konveyör modelleri oluşturmuşlardır. Park (2005), nesne tabanlı sanal fabrika ve simülasyon modeli oluşturmuştur. Önerdiği sanal EİS modeli dört farklı nesne içermektedir: sanal aygıt modeli (object model), taşıma sistemi modeli (functional model), durum yönetim modeli (state manager model) ve akış kontrol (flow control) modelidir. Sanal bir aygıt modeli ise iki kısımda incelenir: hücre ve çekirdek. Sanal fabrikanın tekrar tekrar geliştirilebilmesi için, hücre tasarımının farklı konfigürasyonlara uyacak şekilde tasarlanması gerekir. Park çalışmasında önerdiği sanal EİS sisteminin çeşitli uygulamalarını ve testlerini örnekler vererek gerçekleştirmiştir.

### **2.2.5. Diğer Yöntemler**

EİS ve EİS bileşenleri tasarımı üzerine çok çeşitli metodolojiler kullanılarak çalışmalar yapılmıştır. EİS' in ilk uygulamalarında fayda-maliyet analizleri ile performans değerlendirmeleri yapılarak tasarım modelleri değerlendirilmiştir (Arbel ve Seidmann, 1984). Bi vd. (2001) tarafından yapılan çalışmada EİS bileşen tasarımı için geniş bir literatür özetlemesi ve çözüm teknikleri üzerinde durulmuştur. Benito Martin ve Paredes (1999), multiagent sistemler kullanarak FAMSA (Flexible Autonomous Management System Architecture) ismini verdikleri bir metod geliştirmişlerdir. Chan vd. (2007), EİS tasarım performansının ölçümü için Taguchi's metodunu uygulamışlardır. Çalışmalarının sonucunda fiziksel ve operasyonel işlemlerde alternatif makine sayıları değiştirilirse, sistem esneklik seviyesinin artacağını belirtmişlerdir.

EİS uygulama sürecinin tasarım aşamasının ardından sistemin henüz kurulmadan önce gerek analitik gerekse senaryo analizleri ile test edilmesi gerekir. Bu tez çalışmasında tasarım modellerinin analizleri kuyruk ağları kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

### **2.3. Performans Faktörlerinin Belirlenmesi**

Çalışmada EİS performansını analiz ederken kullanılacak parametrelerin tespitinde Operating Characteristic -Çalışma Davranışı- (OC) eğrileri kullanılmıştır.

OC Eğrileri iki veya daha fazla değişken arasındaki ilişkiyi gösteren eğrilerdir. Buradaki değişkenler talep kapasitesi ve değişkenliği gibi pazar etkileri, hazırlık ve işlem zamanları gibi sistem faktörleri, lot kapasitesi ve planlanan teslim zamanı gibi kontrol parametreleri ve kapasite kullanımı, bekleme zamanları ve sistem maliyetleri gibi çıktı değişkenleri de olabilir (Olhager ve Persson, 2008).

Çevrim zamanı ve kullanım oranı arasındaki ilişki hat performans eğrisi veya çalışma davranışı eğrisi ile gösterilir. (Nazzal vd., 2006)

OC Eğrisi ayrıca ara stok kapasitesi, akış kontrol parametreleri ve işlem zamanı değişkenliklerinin çıktı hızı ve akış zamanı arasındaki ilişki üzerine etkisinin analiz edilmesi için kullanılmıştır. (Han ve McGinnis, 1989)

OC eğrilerini oluşturma işlemi üç aşamaya ayrılmıştır (Olhager ve Persson, 2008):

1. Gerçek sistemden temel faktör verilerinin toplanması
2. Simülasyon modelinin oluşturulması ve bunun sistemin geçerli bir temsili olduğundan emin olunması
3. Simülasyon modelinin çalıştırılması ve sonuçların alınması

Tez çalışmasında performansa etki eden parametrelerin tespitinde bu sistematik izlenmiştir. Bölüm 4'te bu sistematiğe gerçekleştirilen çalışma ve sayısal sonuçlar verilmiştir.

#### **2.4. Kuyruk Ağları**

Kuyruk ağları Açık Kuyruk Ağları ve Kapalı Kuyruk Ağları olarak iki ana bölümde incelenirler. Bu alanda birçok kitap saymak mümkündür, bazıları (Cooper, 1981; Papadopoulos vd., 1993; Nain, 1998; De Meer vd., 1998) olarak belirtilebilir.

- Açık kuyruk ağları; müşterilerin/ürünlerin bir veya daha fazla yolla dışarıdan gelerek hizmet aldıkları ve sonrasında sistemi terk ettikleri modellerdir. Açık ağlarda sistemdeki müşteri sayısı random (rastgele) gelişlere ve terk edişlere bağlı olarak zamanla değişir.
- Kapalı kuyruk ağları; sistemdeki müşteri sayısının sabit olduğu ve sürekli bir şekilde sistemde dolaştıkları modellerdir. Bu ağlarda dışarıdan girişler veya sistemden çıkışlar yoktur.



**Şekil 2.1.** Açık ve Kapalı kuyruk ağları (sıra ile)

Kapalı kuyruk ağları ile modellenen sistemler, ürün çeşitliliğine göre Tek sınıflı veya Çok sınıflı, bekleme yerlerinin sınırsız veya sınırlı olmasına göre Blokesiz veya Blokeli olabilmektedir.

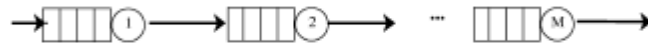
Bu tanımlamaya ek olarak kuyruk ağları sistemdeki müşteri tiplerinin sayısına göre de ayrılırlar: Tek Müşteri Sınıflı Kuyruk Ağları ve Çok Müşteri Sınıflı Kuyruk Ağları.

- Tek Müşteri Sınıflı veya sadece Tek Sınıflı kuyruk ağları sistemdeki müşterilerin aynı özellikte varsayıldığı sistemlerdir.
- Çok Müşteri Sınıflı veya sadece Çok Sınıflı kuyruk ağları, sistemdeki müşterilerin değişik özellikte olduğu, işlem sürelerinin, izlediği yolların vb niteliklerin müşterilerin tiplerine bağlı olduğu sistemlerdir.

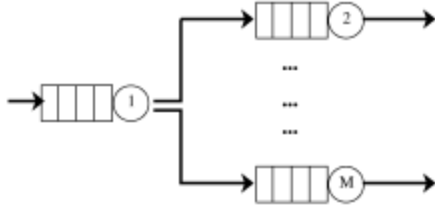
Topoloji yönünden kuyruk ağları, istasyonların üç temel düzenlemesinin kombinasyonundan oluşmaktadır: tandem (sıralı), birleşen ve ayrışan (Şekil 2.2). Tandem topolojide istasyonlar birbiri ardınca sıralanmışlardır. Eğer ağ, kapalı bir ağ ise bu tip sistemlere Döngüsel Ağ adı verilir. Ayrışan topolojilerde bir istasyon  $M(>1)$  istasyona ilintilenmiştir. İlk seviye  $i$  istasyonunda işlemi biten bir müşteri, takip eden seviyedeki bir  $j$  istasyonuna  $p_{ij}$  olasılığı ile ilerler. Birleşen topolojide ise birden çok akış bir istasyona ilintilenmiştir.

Bunlara ek olarak kuyruk ağları değişik karakterizasyonlarla da sınıflandırılabilir.

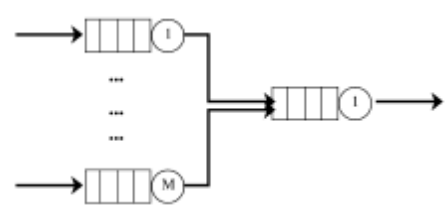
- Blokesiz Kuyruk Ağları: Ağdaki bütün kuyrukların sonsuz kapasitede olduğu sistemlerdir. Sınırsız sistemler olarak da adlandırılır.
- Blokeli Kuyruk Ağları: Ağdaki bazı veya tüm istasyonların bekleme yerlerinin belirli bir sayıda olduğu sistemlerdir. Sınırlı sistemler adı da verilir. Böyle bir ağda, sınırlı sayıda yeri olan kuyruğa ilerleyen müşteri eğer bekleme yerleri dolu ise bloke durumu ile karşılaşır. Bu durum üç ana bloke çeşidi ile betimlenir:



a) Tandem (Sıralı) topoloji



b) Ayrışan topoloji



c) Birleşen topoloji

Şekil 2.2. Kuyruk ağlarındaki temel topolojiler

- İşlem Sonrası Bloke: Daha çok üretim hatlarında görüldüğü için üretim blokesi diye de adlandırılır. Bu bloke durumunda, istasyon  $i$ 'de işlemini bitiren müşteri bir sonraki istasyon  $j$ 'ye ilerlemek ister. Eğer istasyon  $j$  dolu ise  $i$ 'inci istasyonu işgal etmeye devam eder ve bu istasyon  $i$  bloke olmuş olur.  $i$ 'deki işlemci, sırasında bekleyen başka müşterilere hizmet veremez.
- İşlem Öncesi Bloke: Daha çok bilgisayar ve telekomünikasyon ağlarında görüldüğünden iletişim blokesi diye de adlandırılır. İstasyon  $i$ 'deki müşteri işleme başlamadan sonraki istasyonu  $j$ 'yi tayin eder. Eğer o istasyon dolu ise  $i$ 'inci istasyon bloke olur.  $j$ 'den



bir müşteri ayrıldığında  $i$  bloke durumundan kurtulur ve işleme başlar. Eğer işlem süresinde  $j$  tekrar dolarsa, işlem kesilir ve istasyon  $i$  bloke olur. Tayin edilen istasyon  $j$  boşalır boşalmaz  $i$ 'de işleme kaldığı yerden devam edilir.

- Tekrarlı Bloke:  $i$  istasyonunda işlemini tamamlayan müşteri sonraki  $j$  istasyonuna gitmek ister. Eğer istasyon  $j$  dolu ise  $i$ 'deki kuyruğun en arkasına geçer. Bu süreç müşteri  $j$  istasyonuna ilerleyene kadar devam eder.

Kuyruk ağlarının müşteri tipleri açısından detaylı bir şekilde değerlendirilmesi, tezde kuyruk ağlarının performans değerlendirme aracı olarak kullanılmasından dolayı fayda sağlayacaktır.

## **2.4.1. Tek Sınıflı Ağlar**

### **2.4.1.1. Matematiksel Formdaki Sistemler**

Matematiksel-form terimi, üssel gelişler arası ve işlem zamanları olan ağlarda önce açık sistemler için Jackson (1963) ve sonrasında kapalı sistemler için Gordon ve Newell (1967) tarafından kullanılmıştır. Bu sistemlerde kuyruk disiplini First In First Out –İlk Gelen İlk İşlenir- (FIFO) olarak varsayılmıştır. Bu ağlar için, karar durum olasılıklarının her bir istasyonu oluşturan faktörlerin çarpımı olarak ifade edilebileceği gösterilmiştir.

Daha sonrasında bu çözüm yöntemi, Baskett vd. (1975) tarafından açık, kapalı veya karışık, çok sınıflı müşteri tipleri de olabilen ve değişik kuyruk disiplinleri içeren kuyruk ağlarına genişletilmiştir. Bu bölümde bu yaklaşım değişik kuyruk ağları için detaylı olarak incelenmiştir.

Bu çözüm yaklaşımlarında normalizasyon katsayısının hesaplanması gereklidir. Bu amaçla, normalizasyon katsayısını hesaplayan Convolution Algoritması Buzen (1973) tarafından önerilmiştir.

Reiser ve Lavenberg (1980) normalizasyon katsayısının hesaplanması güçlüğünü bertaraf eden yeni bir algoritma olan Ortalama Değer Analizini -ODA- (Mean Value Analysis-MVA) geliştirmişlerdir. Kapalı, çok sınıflı ve bekleme yerlerinin sınırsız olduğu ağlar için olan algoritma çevrim zamanı, çıktı hızı ve ortalama müşteri sayıları gibi ilgilenilen performans değerlerini direkt olarak hesaplayan bir algoritmadır. Little Teoremine ve Arrival (Geliş) teoremine dayanan algoritma iteratif bir şekilde ortalama performans değerlerini hesaplar.

- Little Teoremi: Tüm düğümler veya bütün sistem için ortalama iş sayısı, çıktı hızı ve ortalama işlem zamanı arasındaki ilişkiyi tanımlamaktadır. Teorem bir sistemdeki ortalama iş sayısı ( $\bar{K}$ ), birim zamandaki çıktı hızı ( $\lambda$ ) ve ortalama işlem zamanının ( $\bar{T}$ ) çarpımı ile elde edilebildiğini açıklar.

$$\bar{K} = \lambda \cdot \bar{T} \quad (2.1)$$

Ayrıca ortalama kuyruk uzunluğu ( $\bar{Q}$ ) ise birim zamandaki çıktı hızı ( $\lambda$ ) ile ortalama bekleme zamanının ( $\bar{W}$ ) çarpılması ile hesaplanır.

$$\bar{Q} = \lambda \cdot \bar{W} \quad (2.2)$$

- Arrival Teoremi: Kapalı kuyruk ağı modelleri için,  $i$ 'inci düğümden  $k$  adet iş varken olasılık yoğunluk fonksiyonu, aynı düğümden bir eksik ( $k - 1$ ) iş varken işlerin olasılık yoğunluk fonksiyonuna eşittir.

Başka matematiksel formdaki kuyruk ağlarını analiz edebilen algoritma Akış-Denk-İşlemci'dir (Chandy vd., 1975). Bu metot elektrik devrelerindeki Norton Teoremini kuyruk ağlarına uygulamaktadır.

Convolution, Ortalama Değer ve Akış-denkleşimci algoritmaları aynı zorluk değerlerine sahiptir. Fakat Ortalama Değer Analizi Algoritmasının pratikliği oldukça cezbedici olmuş, hatta algoritma bilimsel olarak yayımlanmadan eksik kaldığı yönlerde yaklaşık algoritmalar geliştirilmiştir (Bard, 1979; Schmidt, 1979). Wang (1997) ODA algoritmasını koşum zorluğu yönünden incelemiş, bu konuda sunulmuş yakınsama algoritmalarını karşılaştırmıştır.

Kapalı ağların sınırlı bekleme yerleri olması durumunda sadece bir kaç özel durumda matematiksel formda olduğu gösterilmiştir. Bu konudaki bir derleme çalışma Balsamo (1993) tarafından yapılmış, değişik blokeli durumdaki sınırlı ağların tam ve yaklaşık algoritmaları sunulmuştur.

Şu ana kadar, blokeli kapalı bir ağın şu durumlarda matematiksel forma sahip olduğu ispatlanmıştır:

- Ağın sadece iki istasyona sahip olduğu (Akyıldız, 1987)
- Ağdaki müşteri sayısının en küçük bekleme yerinden bir fazla olduğu sistemler (Onvural ve Perros, 1986)

Sınırlı bekleme yerli kapalı ağlar üzerine bir başka derlemede R. Onvural (1989) bu özel durumlar dışında işlem sonrası bloke olan kapalı ağların matematiksel forma sahip olmadığını belirtmiştir.

#### **2.4.1.2. Blokeli Sistemler**

Kuyruk ağları, eğer bazı veya tüm istasyonları limitli kapasiteli bekleme yerlerine sahiplerse bloke durumu ortaya çıkar ve sınırlı ağlar olarak adlandırılır. Sınırlı kapalı ağlar üzerine ilk çalışmalar 1960'lı yıllarda Gordon ve Newell (1967)'in araştırmalarına kadar dayanır. Fakat bunların çoğu tandem sıralı tek işlemcili ağlardır (Suri ve Diehl, 1986; Akyıldız, 1988; Onvural ve Perros, 1989; Zhuang vd., 1994 gibi).

Tek sınıflı kapalı kuyruk ağlarında çok işlemci, genel topoloji gibi en kapsayıcı varsayımlar yapan algoritma Yüzükırmızı (2005) tarafından önerilmiştir. Benzer şekilde, genişletilmiş ağlar ile geliştirilmiş algoritmalar, açık ağlarda Kerbache ve Smith (1987; 1988), ve Gonzales (1997) 'in çalışmalarında da kullanılmıştır.

#### **2.4.2. Çok Sınıflı Ağlar**

Çoklu sınıflı kuyruk ağları, izledikleri yolları, işlem süreleri ve gereksinimleri, maliyetleri, bekleme yerleri farklı olan, değişik tiplerde ürünlerden oluşan sistemlerin modellenmesinde kullanılmaktadır. Esnek imalat sistemlerinin yanı sıra paket-değişimli telekomünikasyon ağlarına, çok programlı bilgisayar sistemlerine gibi çok önemli uygulamaları bulunmaktadır. Tek tip ürün modellerine göre bu modeller:

- Her bir ürün tipinin performansının ölçülebilmesi,
- Çok sayıda girdi parametre gereksinimi,
- Çok sayıda parametre gereksiniminden dolayı zor veri toplanması,
- Daha zor çözüm teknikleri ve metotları ve daha fazla işlemci kapasitesi,

gibi özelliklere sahiptirler. Ek olarak, bu modellerin incelenmesi önemli derecede farklı özellik gösteren ürünleri içeren sistemlerde daha doğru sonuçlar sağladıkları için zorunludur.

##### **2.4.2.1. Matematiksel Formdaki Sistemler**

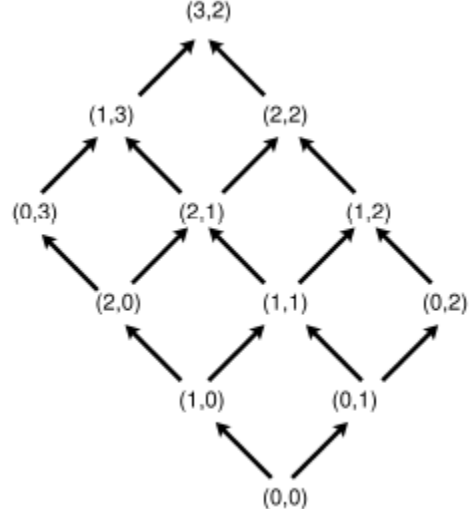
Çok sınıflı bir takım ayrıştırılabilir, matematiksel formdaki ağlar için kesin sonuç sağlayan çözüm teknikleri mevcuttur (Baskett vd., 1975). Bu çok iyi bilinen matematiksel-formlu sınırsız bekleme yerine sahip ağlarda, iş istasyonlarının ilk-gelen-ilk-işlenir, ortak işlemcili, sonsuz işlemcili ve son-gelen-ilk-işlenir disiplinine sahip olduğu durumlarıdır. Çok rastlanan ilk-gelen-ilk-işlenir disiplininde servis süresi her bir ürün tipi için eşit olarak üssel dağılım olmak zorundadır.

Tek tip ürüne sahip ağlar için 1973 yılında Büzen (1973) ve sonrasında çoklu ürünü olan ağlar için 1979 yılında Reiser (1979) tarafından geliştirilen Convolution algoritmasında normalizasyon sabiti verimli bir şekilde hesaplanabilir.

Matematiksel formdaki ayrıştırılabilir tabir edilen ağlar için bir başka teknik Zincirle Tekrarlama (Recursion by Chain)'dir ve Conway ve Georganas tarafından 1986 yılında geliştirilmiştir (Conway ve Georganas, 1986). Az sayıda iş istasyonu ve yüksek sayıda ürün çeşidi için çok uygundur. Bu algoritmalar performans ölçütlerini kesin olarak hesaplar. Ama hafıza gereksinimi ve işlem zamanı ürün çeşidine ve istasyon sayısına göre üssel olarak artar. İşlem sayısınınca zor olan ayrıştırılabilir ağlar için yaklaşık metotlar geliştirilmiştir: Kendini düzeltmeli yakınsama tekniği (Neuse ve Chandy, 1981), Toplama metodu (Bolch vd., 1987), Darboğaz yakınsaması (Bolch ve Fischer, 1993) bunlardan birkaçıdır.

Bir diğer önemli algoritma, Ortalama Değer Analizi 'dir ve Geliş Teoremine (Arrival Theorem) ve Little'in denklemine (1961) dayanmaktadır (Reiser ve Lavenberg, 1980).

Bu algoritmada temel metodoloji tek sınıflı ağlara benzerdir. Öncelikle  $i$  istasyonundaki  $r$  sınıf ürün için ortalama bekleme zamanları,  $W_{ir}$ , geliş teoremi kullanılarak hesaplanır. Böylelikle, ürün sınıflarına göre çevrim zamanı elde edilir. Little Teoremi kullanılarak her bir sınıf  $r$  için sistem çıktı hızı hesaplanır. En son olarak da ortalama müşteri sayıları güncellenir.



**Şekil 2.3.** Durum değerlerinin öncelikleri

Bu algoritmada, her bir  $\vec{n} = \vec{1}_r$ , ( $r = 1, \dots, R$ ) popülasyon için  $R$  girdi gereklidir. Bu durum,  $R = 2$  sınıflı  $N_1 = 3$  ve  $N_2 = 2$  ünlü bir sistem için Şekil 2.3'te gösterilmiştir. Algoritma,  $\vec{0}$  boş sistemi ile başlamakta, burada hesaplanan değerler (1,0) ve (0,1) popülasyon değerlerini belirlemek için kullanılmaktadır. Benzer, şekilde tüm popülasyon kombinasyonları için, her bir popülasyon girdi olarak kullanılmaktadır. Bu karmaşık etkileşimden dolayı algoritmanın koşum zamanı ve hafızası:

$$Zaman = O\left(RM \prod_{r=1}^R (N_r + 1)\right) \quad Hafıza = O\left(M \prod_{r=1}^R (N_r + 1)\right) \quad (2.3)$$

şeklinde. Örneğin 10 istasyonlu ve 10'ar üründen oluşan 5 sınıflı bir ağ için 8.052.550 aritmetik işlem ve 146.410 hafıza yeri gerekmektedir. Bu ihtiyaç, 10 istasyonlu ve 50 müşterili tek sınıflı ağ için 510 aritmetik işlem ve 10 hafıza yeridir.

Çok sınıflı ve sınırlı bekleme yerli Esnek İmalat Sistemlerinin bazı özel durumlarında algoritmalar geliştirilmiştir. Nadir çalışmalardan biri olan Zhuang ve Hindi (1990), makinelerin hiç bloke olmadığı, merkezi bir depolama biriminin

olduğu ve taşıma sistemi için bloke-ve-dön mekanizmasına sahip sistemler için bir algoritma geliştirmişlerdir.

#### **2.4.2.2. Matematiksel Formda Olmayan Sistemler**

Yukarıda tanımlanan sistemler dışında çok sınıflı sistemler matematiksel forma sahip değildir. Örneğin, işlem zamanlarının sınıflara göre farklılık gösterdiği FIFO istasyonlar içeren sistemler bile matematiksel formda değildir ve Bölüm 2.4.2.1'deki metotlar kullanılamazlar. Bu gibi durumlarda yaklaşık algoritmalar değerlendirilebilir. Nitekim Bard (1979) işlem zamanlarının sınıflara göre farklılık gösterdiği tek işlemcili FIFO sistemler için yaklaşık bir Ortalama Değer Analizi algoritması teklif etmiştir. Benzer tipte yaklaşık algoritmalar, çoklu işlemciye sahip sistemler için Hahn (1988) ve Schmidt (1979) tarafından önerilmiştir.

Üssel işlem zamanına sahip olmayan genel işlem zamanlı sistemler de matematiksel formda değildir. Baynat ve Dallery (1996) bu tip sistemler için matematiksel formdaki sisteme yakınsama şeklinde bir algoritma geliştirmişlerdir.

#### **2.4.2.3. Blokeli Sistemler**

Blokeli çoklu ürünlü kapalı kuyruk ağlarının çok az bir takım özel durumlarda matematiksel form özelliği gösterdiği gözlemlenmiştir. Üretim sistemlerinde karşılaşılan sınırlı bekleme kapasitesinden dolayı oluşan servis sonrası blokeli ağlar sadece şu hallerde matematiksel forma sahiptir:

- Sadece iki istasyona sahip ağlar (R. Onvural, 1989)
- Sistemdeki ürün sayısının minimum bekleme yeri kapasitesinden bir fazla olduğu ağlar (R. Onvural, 1989)
- İlk-gelen-ilk-işlenir iş istasyonlarının komşularının sonsuz veya öncelikli sunucuya sahip olduğu merkezi işlemcili ağlar (Akyıldız ve Huang, 1992)

Ek olarak, Liebeherr ve Akyıldız (1995) bu tip ağlarda kilitlenme (deadlock) özelliklerini incelemiştir. Sonuç olarak, çoklu ürünli ve sınırlı bekleme yerli kapalı kuyruk ağlarına literatürde pek sık rastlanmamıştır.

Özellikle EİS tasarım aşamasında sistem performansına etki eden parametrelerin belirlenmesi ve analitik açıdan incelenmesi büyük önem taşımaktadır. Esnek imalat sistemlerinin performanslarının değerlendirilmesinde kullanılmak üzere kabul edilebilir varsayımlardan oluşan kuyruk ağ modellerinin araştırılması gereklidir.

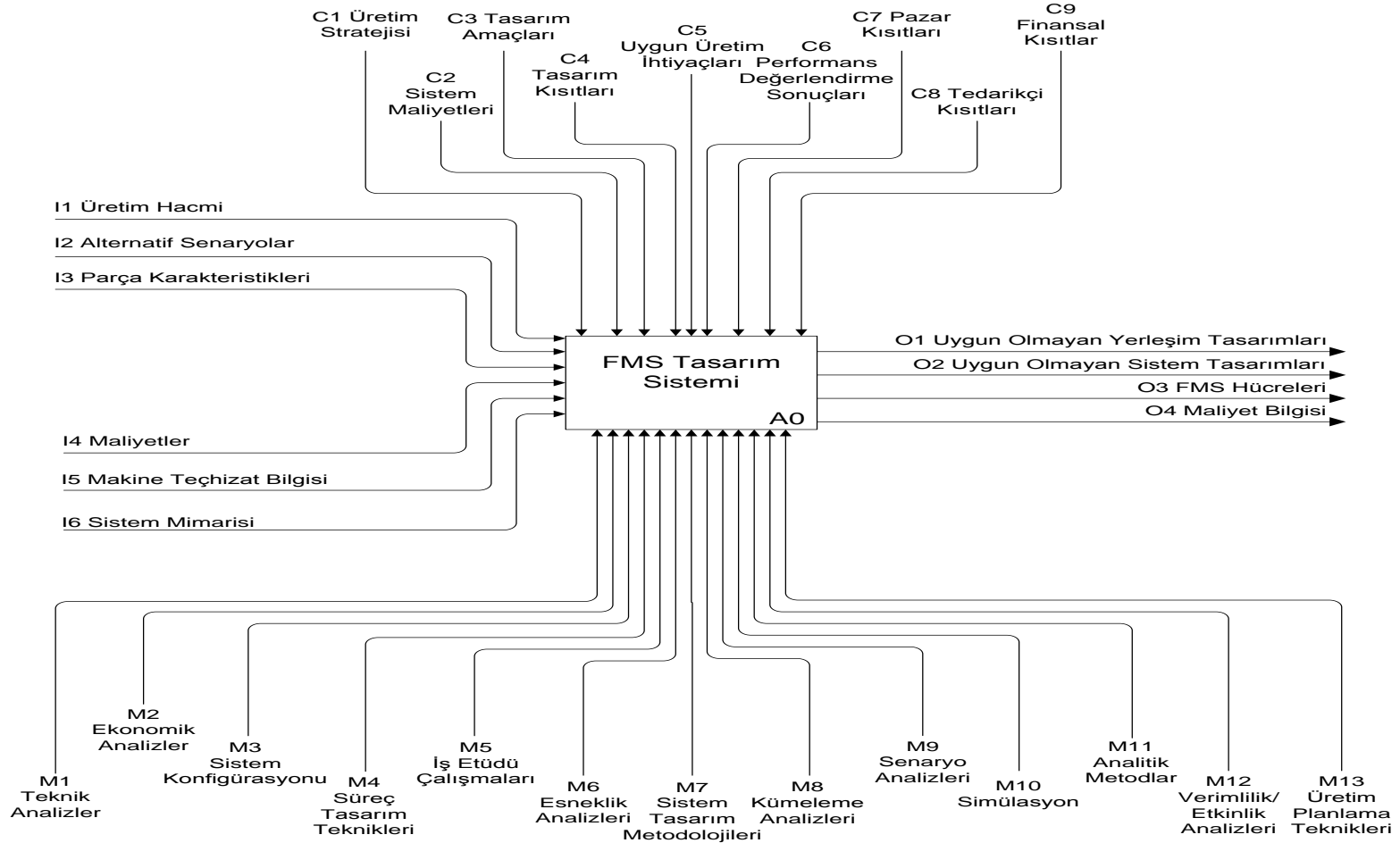


### 3. ESNEK İMALAT SİSTEMLERİ TASARIM SÜRECİ

İşletmeler açısından EİS tasarımı çok zor ve karmaşık bir süreçtir. İşletmenin şu anki ve gelecekteki stratejisi ile örtüşen bir tasarım kurmak büyük önem taşımaktadır. Tasarım sürecindeki kritik kararların doğru ve tam olarak alınması sistem performansı üzerine doğrudan etkilidir. Bu kararlar makinelerin, taşıyıcıların, diğer cihazların sayısı gibi parametreleri içermektedir. EİS için bu parametrelerin belirlenmesi ve değerlendirilmesi oldukça zordur. Ayrıca bu tür problemler çok geniş ve kompleks olmaktadır. Bu nedenle tez çalışmasının bu bölümünde EİS tasarımı ile ilgili bir tasarım modeli sunulacaktır.

Bir EİS tasarımı genel olarak; ürün, üretim süreci, maliyet ve makine bilgilerini girdi olarak alıp; sistem performansı, bütçe ve tasarım kısıtları ile işletmenin stratejik karar verme parametrelerinin kontrolünde; çeşitli ekonomik, analitik, sezgisel performans teknikleri ile iş geliştirme metodolojileri mekanizmaları altında; uygun ve uygun olmayan tasarımlar ile bu tasarımlara ait maliyet bilgilerinin çıktı olarak alındığı bir tasarım süreci takip eder. Şekil 3.1’de bu sürece ait önerilen IDEF0 içerik diyagramı gösterilmiştir.

A0 EİS tasarım sistemi süreci bir dizi alt faaliyetler içerir. Sistemin kurulumuna ait gerekli bilgilerin toplanıp derlendiği süreç A1 Sistem Gereksinimleri faaliyetidir (Şekil 3.2). Bu faaliyette derlenen bilgiler EİS üretim süreçlerinin belirlendiği A2 Süreç Tasarımı (Şekil 3.2) faaliyetine girdi olarak alınır. A3 Yerleşim Tasarımı ve Performans Değerlendirme (Şekil 3.2) faaliyeti A1 ve A2 faaliyetlerinden elde edilen çıktılar ile EİS hücresinin yerleşim düzenine karar verildiği ve alternatiflerin değerlendirildiği faaliyettir. Bu aşamaya kadar elde edilen bilgi ve çıkarımlarla bir EİS sistemi/hücresi elde edilmiştir.



Şekil 3.1. EİS tasarım süreci IDEF0 diyagramı

A4 Sistem Performans Analizi (Şekil 3.2) faaliyeti ile tasarlanan sistemin performansı belirlenen kriterler ışığında ölçülür ve gerekli önlemler alınır, ilgili faaliyetlere geri bildirimler gönderilir. Performans analizlerinin üretim stratejisinde istenilen seviyede olması durumunda A5 Uygulama Süreci (Şekil 3.2) faaliyeti gerçekleştirilir. Bu beş faaliyeti içeren önerilen EİS tasarım süreci IDEF0 içerik diyagramı Şekil 3.2’de verilmiştir.

Şekil 3.2’de verilen IDEF0 içerik diyagramının her bir faaliyetine ait bileşenler aşağıda sıra ile açıklanmıştır (Matta ve Semeraro, 2005).

#### 1. A1-Sistem Gereksinimleri

EİS tasarımında bu süreç, kurulacak olan sisteme ait fiziksel bileşenler ile bu bileşenlere ait karakteristik bilgilerin elde edilip analiz edildiği faaliyetleri kapsar. Bu analiz sonucunda EİS’ nin işleyiş mekanizmasını oluşturacak genel hatlar ve uygun sistem bileşen karışımı belirlenecektir. Bu yönüyle önem arz eden A1 sürecinin detayları aşağıdaki gibidir.

##### - Girdiler

- I1-Üretim hacmi: Kapasite kısıtları göz önünde bulundurularak üretilmesi planlanan ürün/ürünler miktarı.
- I2-Alternatif senaryolar: Sistem için gerekli makine teçhizat, kalıp, uç vs bileşenlerin kullanılması için araştırılmış çeşitli alternatifleri içerir.
- I3-Parça karakteristikleri: Ürünlerin teknolojik ve müşteri isteklerine bağlı olan karakteristik özellikleridir. Çalışılacak iş, makine özellikleri, üretim sorunları, ürünün niteliksel (renk vs) özellikleri gibi parametreleri içerir.
- I4-Maliyetler: Yeni bir sistem kurmanın makine teçhizat, insan gücü, doğal kaynaklar vs açısından maliyet bilgilerini içerir.
- I5-Makine teçhizat bilgisi: Yeni sistem için uygun olabilecek makine teçhizatın teknolojik ve nicelik-nitelik olarak bilgisini içerir.
- I6-Sistem mimarisi: Sistemin işleyiş mekanizmasını ve davranışlarını oluşturan temel yapıdır.

- Çıktılar

- İş/Süreç tanımlamaları: A1 faaliyetinin girdilerinden elde edilen üretilecek ürünlerin iş akışları, işlem süreleri gibi süreç ve makine, aparat, uç gibi iş bilgileridir. Bu bilgiler sistemin kurulum aşamasında stratejik karar vermek için önem arz etmektedir.
- Uygun makine teçhizat: Alternatif makinelerden sistemin işleyişi ve ürünlerin karakteristiklerine en uygun olan makine teçhizat ile ilgili bilgilerdir.
- Sistem tanımlamaları (spesifikasyonları): Sistemin kaynakları kullanılarak yerine getirilmesi gereken özel gereksinimler ve özelliklerdir.

- Kontroller

- C1-Üretim stratejisi: Üretim amaçlarının başarıya ulaşması için üreticilerin üretimi düzenlemek için aldığı stratejik kararlar ve tercihlerdir. Strateji belirlerken iki boyut önemlidir. Birincisi müşterilerin taleplerine dikkat ederek kalite ve maliyet avantajını göz önüne alarak belirlenecek olan Pazar boyutudur. Pazar talebini karşılamak için tercih edilen Teknolojik boyut ise ikinci önemli boyuttur.
- C2-Sistem maliyetleri: Sistemin kurulumu için gerekli görülen bileşenlere ait maliyet bilgilerini içerir.

- Mekanizmalar

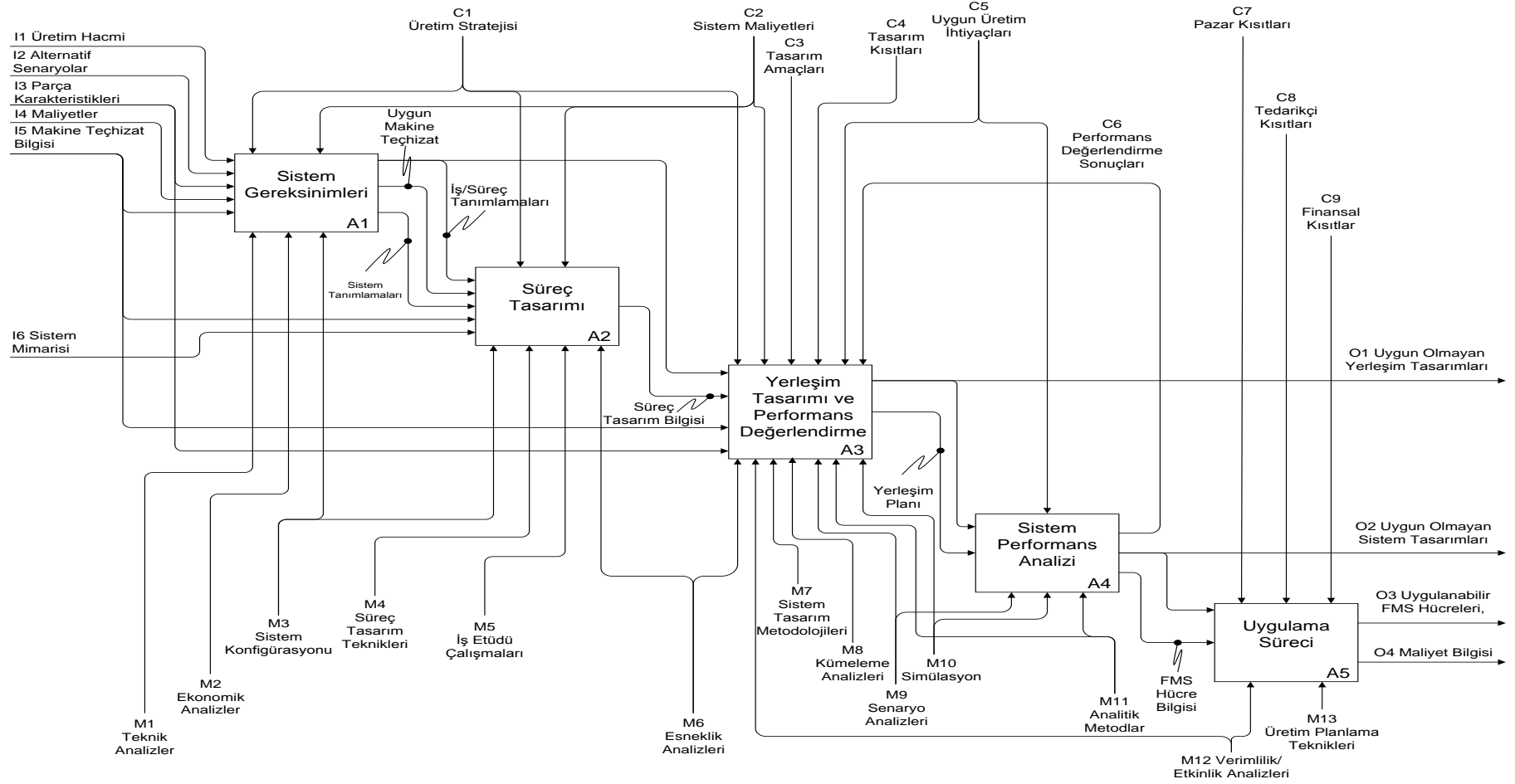
- M2-Ekonomik analizler: Net bugünkü değer, Gelecek değer, İç verim oranı gibi çeşitli ekonomik yöntemlerdir. Bu analizlerin doğruluğu fizibilite aşamasında sistemin kurulabilirliği için önemlidir.
- M3-Sistem konfigürasyonu: Sistemin yapısal olarak üretimi gerçekleştirmek için gerekli ayarlarla yapılandırılması için kullanılacak yöntem ve çalışmalardır.
- M4-Süreç tasarım teknikleri: Sistem gereksinimlerinin esneklik adına süreçler dikkate alınarak belirlenmesinde kullanılan tekniklerdir.

## 2. A2-Süreç Tasarımı

A1 sürecinden elde edilen sistem verileri ile uygulamaya geçirilmesi planlanan EİS için süreç bilgilerinin elde edildiği süreçtir. Bu faaliyet A1 sürecinde elde edilen bilgileri alternatiflerin değerlendirilerek tanımlamalarının yapılmasını ve EİS' e temel teşkil edecek iş süreçlerinin belirlenmesini sağlar. A2 sürecinden elde edilen veriler ise alternatif tasarımların değerlendirilip yorumlanması için performans değerlendirme sürecinden geçirilir. Sürecin detaylı olarak incelenmesi aşağıda verilmiştir.

### - Girdiler

- İş/Süreç tanımlamaları: A1 faaliyetinin bir çıktısı olarak A2 faaliyetlerinde süreçlerin tasarımının oluşturulmasında girdi olarak kullanılacak temel bilgilerdir.
- Uygun makine teçhizat: Alternatif makinelerden sistemin işleyişi ve ürünlerin karakteristiklerine en uygun olan makine teçhizat ile ilgili bilgilerdir.
- Sistem tanımlamaları: Sistemin kaynakları kullanarak yerine getirmesi gereken özel gereksinimler ve özelliklerdir.
- I5-Makine teçhizat bilgisi: Yeni sistem için uygun olabilecek makine teçhizatın teknolojik ve nicelik-nitelik olarak bilgisini içerir.
- I6-Sistem mimarisi: Sistemin işleyiş mekanizmasını ve davranışlarını oluşturan temel yapıdır.



Şekil 3.2. EİS tasarım süreci IDEF0 içerik diyagramı

- Çıktılar
  - Süreç tasarım bilgisi: Üretilecek ürünlere ait iş süreçlerinin sistematik bir şekilde oluşturulmuş bilgilerini içerir.
- Kontroller
  - C1-Üretim stratejisi: Talebi karşılamak için pazar ve teknolojik yönler göz önünde bulundurularak ürün süreçleri tasarlanmalıdır.
  - C2-Sistem maliyetleri: Süreçler sistem bileşenlerinin maliyetleri ve bütçe dikkate alınarak tasarlanmalıdır.
- Mekanizmalar
  - M3-Sistem konfigürasyonu: Süreç tasarımının etkinliği için sistem bileşenlerinin yapılandırılmasıdır.
  - M4-Süreç tasarım teknikleri: Süreçlerin esnek ve sistemin çalışma mekanizmasına engel olmayacak şekilde tasarlanması için kullanılan tekniklerdir (Robust Design vs).
  - M5-İş etüdü çalışmaları: Süreçler tasarlanırken işlerin yapılış şekli, hangi makinelerde yapılacağı, kimin yapacağı gibi analizlerin olduğu metot etüdü ile işlerin standart sürelerinin tespit edildiği ve iş örneklemelerinin yapıldığı zaman etüdü çalışmalarıdır.
  - M6-Esneklik analizleri: Tezgah, üretim süreci, ürün, iş akışı, genişleme, işlem ve üretim yönetimi esnekliklerinin optimum değerlerinin bulunması için yapılan analizlerdir.

### 3. A3- Yerleşim Tasarımı ve Performans Değerlendirme

Bu aşamaya kadar elde edilen sistem tasarım bilgileri ile alternatif tasarımların çeşitli analiz teknikleri kullanılarak performans değerlendirmeleri bu süreçte yapılmaktadır. Çeşitli sayısal ve sayısal olmayan veriler kullanılarak analitik ve yaklaşık teknikler vasıtasıyla analizler gerçekleştirilir. Bu süreç alternatiflerden en iyi tasarımın seçilmesi ve kurulacak sistemin gelecek işleyişi açısından stratejik bir öneme sahiptir. Bu aşamadaki analizlerin doğruluğu sistemin işleyişini doğrudan etkileyecektir. Bu sistemin detaylı olarak açıklaması aşağıdadır.

- Girdiler
  - İş/Süreç tanımlamaları: A1 faaliyetinin bir çıktısı olarak A3 faaliyetlerinde süreçlerin tasarımının oluşturulmasında girdi olarak kullanılacak temel bilgilerdir.
  - Süreç tasarım bilgisi: A2 faaliyetinin çıktısı olarak üretilecek ürünlere ait iş süreçlerinin sistematik bilgilerini içerir.
  - Parça karakteristikleri: Ürünlerin teknolojik ve müşteri isteklerine bağlı olan karakteristik özellikleridir. Çalışılacak iş, makine özellikleri, üretim sorunları, ürünün niteliksel (renk vs) özellikleri gibi parametreleri içerir.
  - I5-Makine teçhizat bilgisi: Yeni sistem için uygun olabilecek makine teçhizatın teknolojik ve nicelik-nitelik olarak bilgisini içerir.
  
- Çıktılar
  - O1-Uygun olmayan yerleşim tasarımları: Yerleşim performans değerlendirmeleri sonucunda alternatif yerleşimler içinde gerekli performans değerine ulaşamamış tasarımlardır.
  - Yerleşim planı: Performans değerlendirmeleri sonucunda elde edilen uygun yerleşim planıdır.
  
- Kontroller
  - C1-Üretim stratejisi: Pazar talebini karşılamak için pazar ve teknolojik yönler göz önünde bulundurularak yerleşim düzeninin tasarlanmasıdır.
  - C2-Sistem maliyetleri: Yerleşim düzeni sistem bileşenlerinin maliyetleri ve bütçe dikkate alınarak tasarlanmalıdır.
  - C3-Tasarım amaçları: Tesis içerisinde düzenlenmesini istediğimiz tasarım amaçları (taşımaların azaltılması, sürelinin optimize edilmesi vs) doğrultusunda yerleşim yapılmalıdır.
  - C4-Tasarım kısıtları: Yerleşim düzeni tasarlanırken arazi büyüklüğü, makine kısıtları, bina yapısının özellikleri gibi kısıtları içerir.
  - C5-Uygun üretim ihtiyaçları: Sisteminin talep edilen üretimi karşılaması için gerekli eldeki stok, beklenen stok, ana ürünün üretimi



için gerekli hammadde ve yarı ürün gibi üretim gereksinimlerine ait teknolojik bilgidir.

- C6-Performans değerlendirme sonuçları.

- Mekanizmalar

- M6-Esneklik analizleri: Sistem yerleşiminin esneklik analizi teknikleridir.
- M7-Sistem tasarım metodolojileri: Tesis yerleşimi metodolojileri kullanılarak yapılan alternatif yerleşim analizleridir.
- M8-Kümeleme analizleri: Tesis yerleşimine etkiyen değişkenlerin kümeleme analizleri ile aralarındaki ilişkilerin belirlenmesidir.
- M9-Senaryo analizleri: Alternatif yerleşim düzenleri oluşturmak için sistemin çalışma mekanizmasına ve belirlenen değişkenlere göre oluşturulan senaryolardır. Uygun yerleşim düzeni bu senaryolardan seçilecektir.
- M10-Simülasyon: Alternatif yerleşim senaryolarının performansının ve etkinliğinin, henüz sistem kurulmadan analiz etmek için kullanılacak etkili bir yöntemdir.
- M11-Analitik metotlar: Alternatif yerleşimlerin simülasyon sonuçlarını teyit etmek amacıyla kullanılan analitik metotlardır (Kuyruk ağları vs).
- M12-Verimlilik/Etkinlik analizleri: Çeşitli sayısal ve parametrik analiz teknikleri kullanılarak yapılan tek ve çok parametreleri verimlilik analizleridir.

#### 4. A4-Sistem Performans Analizi

A4 süreci, bu aşamaya kadar yapılan analizler ile tespit edilmiş olan en iyi tasarım modelinin çeşitli senaryolar ile performans değerlendirmesinin yapıldığı süreçtir. Uygun EİS hücresi bilgileri alınarak çeşitli sistem durumlarında değerlendirilip henüz sistem tasarım aşamasında iken ortaya çıkabilecek olumsuz durumların belirlenmesi ve önlem alınması için analizler özenle yapılmalıdır. Bu süreçten elde

edilecek sonucun olumlu olması durumunda belirlenen EİS uygulamaya geçirilecektir. Sürece ait detaylar aşağıdaki gibidir.

– Girdiler

- Uygun olmayan yerleşim tasarımları: Alternatif yerleşim düzenleri içerisinde gereken performansı gösteremeyen yerleşimlerdir. Bu yerleşimlerden elde edilen veriler olağandışı veri olarak performans analizlerinde kullanılır.
- Yerleşim planı: A3 faaliyeti sonucunda belirlenen yerleşim düzenine ait teknolojik bilgileri içerir.

– Çıktılar

- Performans değerlendirme sonuçları: A3 faaliyetinde belirlenen yerleşim düzenine ait kurulmuş sistemin performans değerleri işletme stratejisi doğrultusunda olmadığı durumda A3 faaliyetine geribildirim sağlamak için elde edilen teknolojik bilgilerdir.
- O2-Uygun olmayan sistem tasarımları: Yerleşim düzenlerinin sistem parametreleri de eklenerek yapılacak olan performans analizleri sonucunda istenilen düzeyde performansa sahip olmayan sistemlerdir.
- EİS hücre bilgisi: Uygun yerleşim düzeni ve sistem bileşenleri ile en iyi performansı gösteren sisteme ait teknolojik bilgilerdir.

– Kontroller

- C5-Uygun üretim ihtiyaçları: Sistemde üretilecek ürüne ait alt parça ve genel stok bilgileridir.

– Mekanizmalar

- M9-Senaryo analizleri: Bu aşamaya kadar elde edilen bilgilerle oluşturulan alternatif sistemlerin belirlenmesi için yapılan analizlerdir. Uygun sistem bu senaryolardan seçilecektir.
- M10-Simülasyon: Alternatif senaryoların değerlendirilmesi için kullanılacak bir araçtır.

- M11-Analitik metotlar: Gerçeğe daha yakın performans değerleri elde etmek için sistem kısıtları da göz önünde bulundurularak yapılan deterministik analizlerdir.

## 5. A5-Uygulama Süreci

Sistem tasarım sürecinin son faaliyeti olan A5 süreci performans değerlendirmesi yapılmış EİS sisteminin kurulumu ve işletilmesi için gerekli ihtiyaçların giderildiği bölümdür. Sistem bileşenlerinin temin edilmesi, tesis inşası, yerleşim düzeninin sağlanması, yazılımsal altyapının kurulması gibi bir dizi faaliyetten oluşur. Sürecin genel girdi, çıktı, kontrol ve mekanizması aşağıda anlatıldığı gibidir.

### - Girdiler

- O2-Uygun olmayan sistem tasarımları: Sistem bileşenleri ile oluşturulmuş EİS'lerden performans düzeyi düşük olan sistemlerdir.
- EİS hücre bilgisi: Sistemin uygulama aşamasında ve çalışmasında ihtiyaç duyacağı çeşitli sistem bilgileridir (ürün ağaçları, işlem süreleri, teslim süreleri vs).

### - Çıktılar

- O3-Uygulanabilir EİS hücreleri: Üretim sürecini etkin olarak yürüten EİS sistemidir.
- O4-Maliyet bilgisi: Sistemin tüm bileşenlerini ve kurulum faaliyetlerini de göz önünde bulundurularak oluşturulan sistem maliyeti bilgisidir.

### - Kontroller

- C7-Pazar kısıtları: Ürünlere olacak olan müşteri/pazar talebi sistemin uygulanmasında dikkat edilecek en önemli kısıtlardandır. Bu kısıt üretim kapasitesinin ve planlarının oluşturulması için önemli bir parametredir.
- C8-Tedarikçi kısıtları: Sistemin ürün talebini karşılaması ve etkin bir şekilde çalışması hammadde ve yarı ürünlerin zamanında sistemde

bulunmasına bağlıdır. Bu durum sistemi tedarikçileri seçme konusunda etkin analizler yapmaya zorlayacaktır.

- C9-Finansal kısıtlar: Pazar talebinin minimum maliyetle karşılanması için sistem minimum maliyet ile kurulmalı ve üretim yapmalıdır. Bu durum bütçe ve sistem kurulumunda bulunacak finansal kaynaklara bağlı olarak sistemi kısıtlamaktadır.

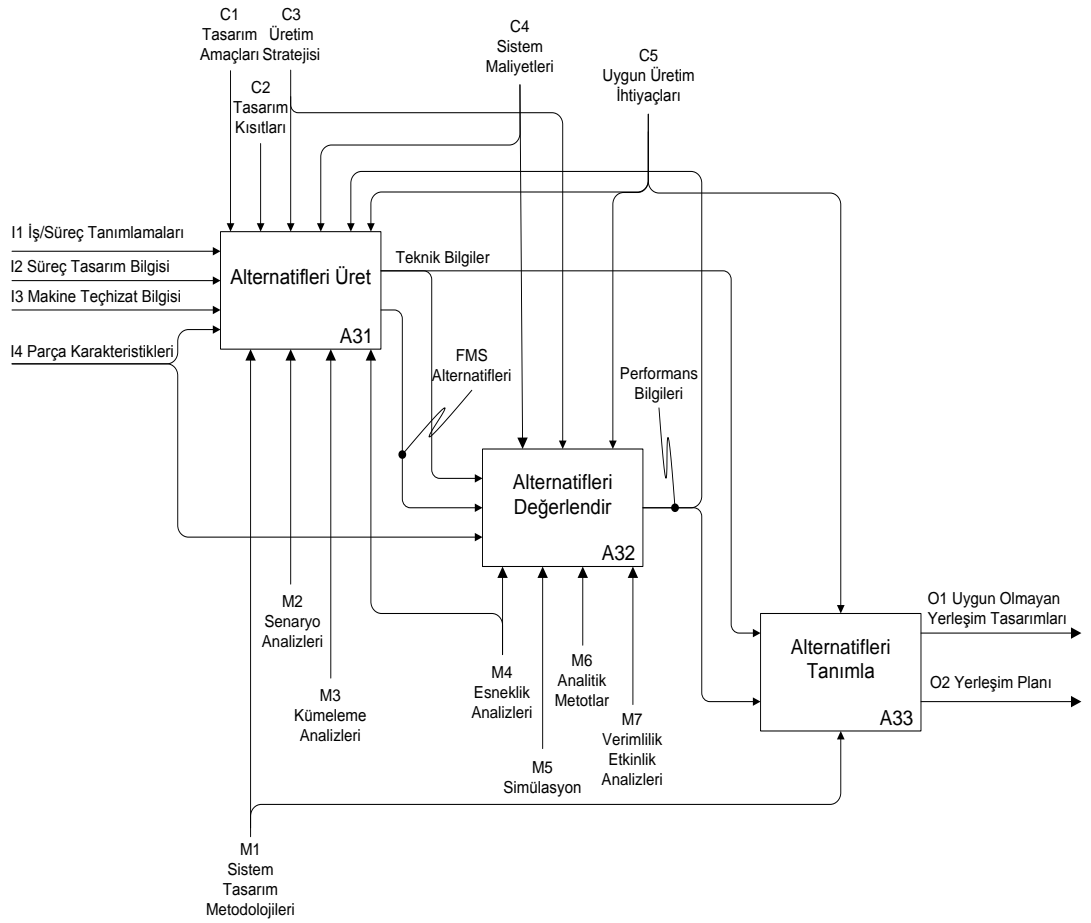
– Mekanizmalar

- M12-Verimlilik/Etkinlik analizleri: Sürekli iyileştirme ve izleme açısından sistem belli periyotlarda verimlilik analizlerine tabi tutulur. Belirlenen aksaklıklar için çözüm önerileri geliştirilerek EİS esnekliğinin sürekliliği sağlanır.
- M13-Üretim planlama teknikleri: Sistemin talebi zamanında ve müşteri isteklerine göre karşılaması için çok etkin bir üretim planlaması yapılmalıdır. Üretim planlamanın aksaması sistemin tüm esnek noktalarında sorunlara neden olacaktır.

Tez çalışmasında Şekil 3.2’de verilen tasarım süreci içerik diyagramı faaliyetlerinde en önemli yere sahip olan performans değerlendirme faaliyetleri üzerinde durulmuştur. Bu faaliyetler A3-Yerleşim Tasarımı ve Performans Değerlendirme ve A4- Sistem Performans Analizi faaliyetleridir. Aşağıda bu faaliyetler hakkında bilgiler verilmiştir.

### **3.1. A3-Yerleşim Tasarımı ve Performans Değerlendirme Alt Seviye Diyagramı**

Tez çalışmasının ana amaçları bir EİS sistem tasarımı modeli ortaya koymak ve bu modelin performans değerlendirmesini yapmak olarak belirlenmiştir. Bu sebeple Şekil 3.2’de verilen EİS tasarım sürecine ait alt süreçlerden olan A3 süreci detaylı olarak ele alınacaktır. Bu süreçte yapılacak olan analizlerin ve alınacak kararların kritik olması nedeniyle süreç detayları Şekil 3.3’te IDEF0 içerik diyagramı modellenerek verilmiştir. Faaliyete ait alt faaliyetler ve bunlara ait girdi, çıktı, mekanizma ve kontrollerin detayları aşağıdaki gibidir.



**Şekil 3.3.** Yerleşim tasarımı ve performans değerlendirme IDEF0 içerik diyagramı

**A31-Alternatifleri Üret:** Bu faaliyette amaç sistem kısıtlarını da göz önünde bulundurarak mümkün tüm üretim sistemi yerleşim planlarının belirlenmesidir. A3 faaliyeti girdileri, çıktıları ve mekanizmalarında anlatılan bilgiler kullanılarak aşağıdaki çıktılar elde edilir.

- **Teknik Bilgiler:** Yerleşim tasarımı sürecinin A32 faaliyetinde performans değerlendirmesi yapmak amacıyla kullanılacak çalışma alanı, enerji ihtiyacı, makine sayısı, makine eksen sayısı, uç değişim zamanları ve taşıyıcı değişim zamanları gibi teknik bilgileri içerir.

- EİS Alternatifleri: Sistemin talebi karşılması için uygun/mümkün olan alternatif EİS yerleşim planlarına ait bilgilerdir.

**A32-Alternatifleri Değerlendir:** Faaliyet, A31 faaliyetinde belirlenen alternatifler arasından üretimi en iyi şekilde gerçekleştirecek EİS yerleşimini belirlemek için yapılır. Performans değerlendirmesi üretim sistemleri için çıktı oranı, yapılan işler, makine kullanım oranları ve çevrim süreleri gibi performans ölçüm sonuçları sağlar. Bu yüzden performans değerlendirme modelinin doğru ve tam olarak belirlenmesi gerekir.

Şekil 3.3'te görülen girdi, çıktı ve mekanizmalar kullanılarak A32 faaliyetinden Performans Bilgileri çıktısı üretilir.

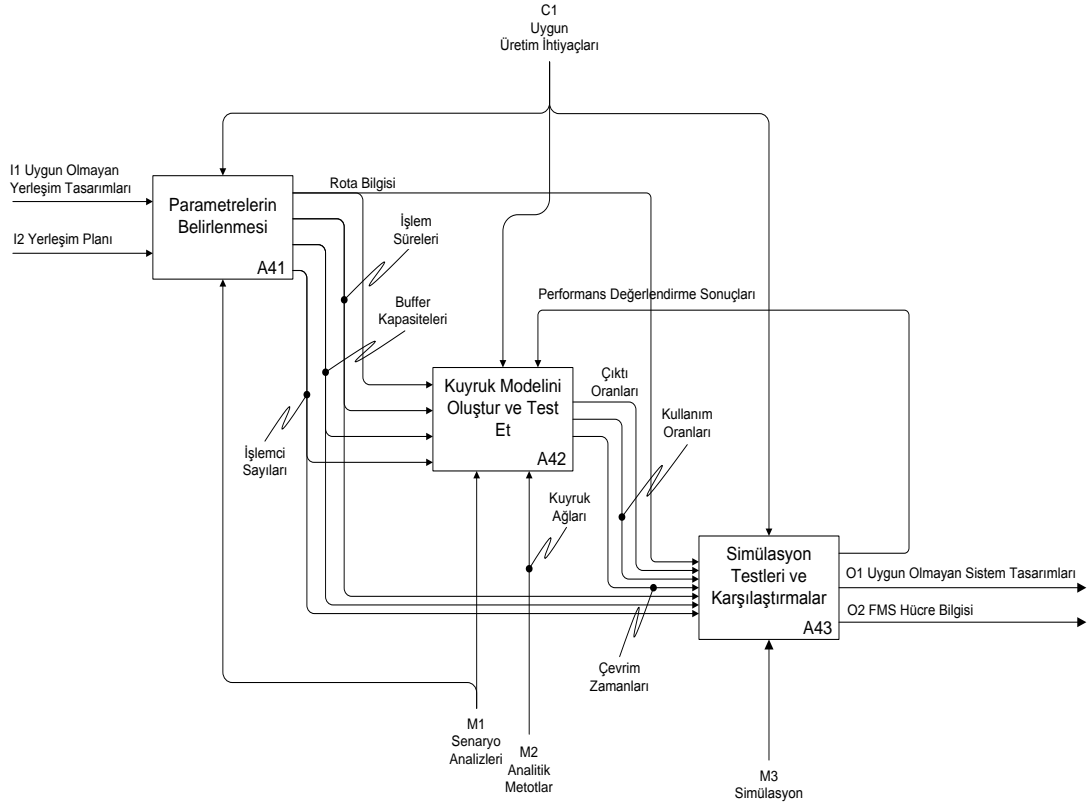
- Performans Bilgileri: Alternatif yerleşimlerin M4, M5, M6, M7 performans değerlendirme mekanizmalarından geçirildikten sonra elde edilen, taşıma, yükleme boşaltma süreleri minimize edilmiş, makine kullanım oranları maksimize edilmiş, daha az sürede daha çok çıktının elde edildiği yerleşim planı ile ilgili performans değerleridir. Bu sonuçlar A33 faaliyeti için girdi oluştururken A32 faaliyeti için bir geri bildirim sağlayarak kontrol mekanizması oluşturmaktadır.

**A33-Alternatifleri Tanımla:** A31-A32 faaliyetlerinden elde edilen bilgiler, ilgili çıktılar ve mekanizmalar ile karar verilen sistem yerleşimlerinin uygunluğunun saptandığı faaliyettir. Bu faaliyet sonucunda O1-Uygun olmayan yerleşim tasarımları ve O2-Yerleşim Planı çıktıları elde edilir (Bkz A3 faaliyeti çıktıları). Faaliyet sonucunda bu çıktılar için sistem bileşenleri, maliyet ve üretim oranı gibi bilgiler tanımlanır.

### **3.2. A4-Sistem Performans Analizi Alt Seviye Diyagramı**

Uygulamaya alınan EİS tasarımının performans analizlerinin yapıldığı süreçtir. Bu süreçte elde edilecek bilgiler sistemin geleceği açısından önemlidir. Tez çalışmasında

bu süreçte kullanılan performans değerlendirme teknikleri kuyruk ağları ve simülasyondur. Ayrıca çeşitli senaryo analizleri ile uygulama çalışmaları desteklenmiştir. A4 faaliyetine ait IDEF0 içerik diyagramı Şekil 3.4.'de verilmiştir. Faaliyete ait alt faaliyetler ve bunlara ait girdi, çıktı, mekanizma ve kontroller aşağıdaki gibidir.



**Şekil 3.4.** Sistem performans analizi IDEF0 içerik diyagramı

**A41-Parametrelerin Belirlenmesi:** Bu faaliyet performans değerlendirmesi yapılacak uygun EİS sistemi için performans parametrelerinin belirlendiği faaliyettir. Şekil 3.4'de görüldüğü gibi çalışmada kuyruk ağları ve simülasyon değerlendirmeleri kullanılmıştır. Bu yüzden parametreler bu metodolojilerde kullanılacak parametreler olarak belirlenmiştir. Bu parametrelere, I1 ve I2 girdilerinden elde

edilen sistem bilgilerinin uygun üretim ihtiyaçları ile çeşitli senaryolar oluşturularak aşağıdaki gibi karar verilmiştir.

- Rota bilgisi: Bir sonraki modelleme sürecinde kuyruk ağı tipinin belirlenerek modelin oluşturulması için gerekli olan bilgilerdir. Sınıf sayısı, üretim miktarı, müşteri sayıları, iş akışları gibi bilgileri içerir.
- İşlem süreleri: Kuyruk ağı algoritması için gerekli olan makinelerin işlem süreleridir.
- Buffer (Bekleme yeri) kapasiteleri: Modelde ürünlerin iki işlem veya makine arasında sistemi bloke etmemesi için eklenen bekleme yeri (buffer) kapasiteleridir.
- İşlemci sayıları: Kuyruk modelinde her bir makineye eşdeğerde kaç alternatif makine olduğunu gösterir. Performans analizinde işlem süresi ve bloke olma durumlarının kontrolü için önemli bir parametredir.

**A42-Kuyruk Modelini Oluştur:** A41 faaliyetinden elde edilen sistem parametreleri kullanılarak kuyruk ağı metodolojisine uygun, sistemi temsil eden kuyruk modelinin oluşturulması faaliyetidir. Bu faaliyette kuyruk modeli tipine, sınıf sayılarına, işlemci sayılarına ve buffer (bekleme yeri) kapasitelerine göre sistem modellenir. Elde edilen model A41 faaliyetinden gelen veriler ile analiz edilir (Bkz. Bölüm 5, Algoritma 1-2-3). Bu analiz sonucunda bulunan aşağıdaki çıktılar simülasyon testlerinden elde edilecek sonuçlar ile karşılaştırılır.

- Çıktı Oranları: Sistemden birim zamanda çıkan ürün/müşteri sayısıdır. Bu oran ne kadar büyükse sistem o kadar etkin demektir.
- Çevrim Zamanları: Sistemden bir ürün/müşteri çıkışı için geçen ortalama süredir. Modelde çevrim zamanı ne kadar düşük çıktı oranı ne kadar fazla ise sistem o kadar etkin ve verimlidir.
- Kullanım Oranları: Kısaca sistemdeki makinelerin iş süreçlerin de ne kadar kullanıldığı ile ilgilidir. Başka bir deyişle sistemde bulunan işlemcilerin gelen müşteri yoğunluğunu karşılayabilme oranıdır. Sistemde bekleyen müşteri sayısının sonsuza gitmemesi için bu oranın 1'den küçük olması gerekir.



**A43-Simülasyon Testleri ve Karşılaştırmalar:** Sistem henüz tasarım aşamasında iken performans parametreleri için tahminlerde bulunmak için simülasyon testleri yapılır. Bu testlerde dikkat edilecek en önemli nokta simülasyon modelinin gerçek sistemi tam ve doğru bir şekilde temsil etmesidir. Ayrıca sonuçların gerçek değerleri en iyi temsil etmesi için simülasyon deneylerinin uzun süreler ve tekrarlarla yapılması gerekir. Elde edilen sonuçlar analitik model sonuçları ile karşılaştırılıp süreçte gerekli faaliyet geri bildirimleri sağlanarak önlemler alınmalıdır.

Bu faaliyetin girdileri A41 ve A42 faaliyetlerinden gelen sistem parametreleri ile değerlendirme sonuçlarıdır (Şekil 3.4). Çıktılar ise yukarıda bahsedilen O1-Uygun olmayan sistem tasarımları ve O2-EİS hücre bilgisidir.

EİS özellikle sistem kurulmadan tasarım aşamasında iken etkin bir şekilde analiz edilmedikçe uygulama aşamasında ekonomik olarak büyük sorunlara neden olabilmektedir. Bu sebeple tez çalışmasında sistem tasarımı ve performans değerlendirmesini bir bütün olarak ele alan bir yapısal süreç verilmiştir.

Önerilen tasarım süreci, uygulama aşamasına geçilmeden işletmelerin dikkat edeceği noktaları belirleyebilmeleri, belirli bir sistematik içerisinde tasarım sürecinin yönetilmesini sağlaması ve parametre belirlemede sağlayacağı kolaylık açısından faydalı olacaktır.

## 4. ESNEK İMALAT SİSTEMLERİNİN PERFORMANSINA ETKİ EDEN FAKTÖRLER

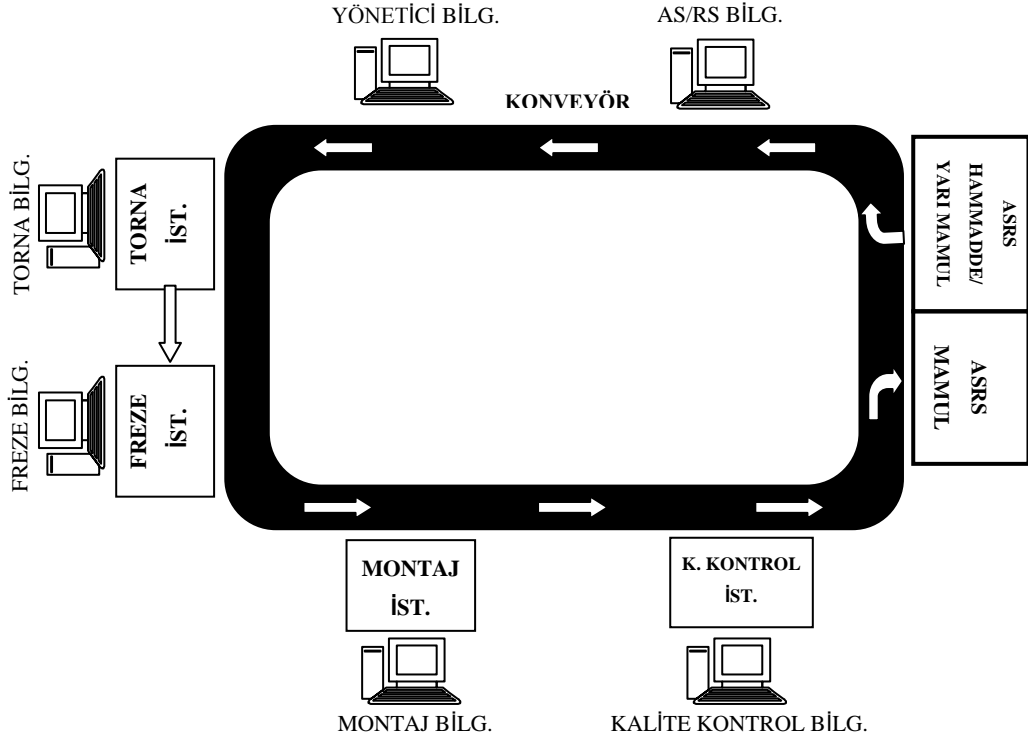
Esnek imalat sistemlerinin kurulumu gerçekleştirilmeden önce çeşitli performans analizlerinin yapılması işletmeleri ileride karşı karşıya kalacakları bazı olumsuz durumlardan koruyacaktır. Yapılacak etkin ve doğru analizler bu durumların ortaya çıkmasına meydan vermeden önlem almayı sağlar. Analizlerin doğru ve tam olması ise belirlenecek parametrelerin sistemi en çok etkileyen faktörlerden seçilmesi ile mümkün olacaktır.

Çalışmanın bu bölümünde bir EİS hücresinin Arena 11.0 yazılımı ile simülasyon modeli oluşturulmuş, modelin gerçek sistemle uyumluluğu test edilmiş ve bekleme yeri kapasitesi, konveyör hızı, işlem zamanları gibi parametrelerin toplam çevrim zamanı ve tezgah kullanım oranlarına etkisi OC (Operating Characteristic-Çalışma Davranışı) eğrileri ile incelenmiştir. İncelenen parametreler kuyruk modeli performans ölçütleri olarak kullanılmıştır.

Kısaca, çalışmada bir CIM sisteminin parametrelerinin kullanım oranı ve toplam çevrim zamanı üzerindeki etkilerinin bir karar destek sistemi olarak kullanılan OC eğrileri üzerinde incelenmesi amaçlanmıştır. Çalışma sisteme ait faktörlerin belirlenmesi ile başlayıp simülasyon modelinin oluşturulması ve sonuçların alınması ile sonlanmıştır.

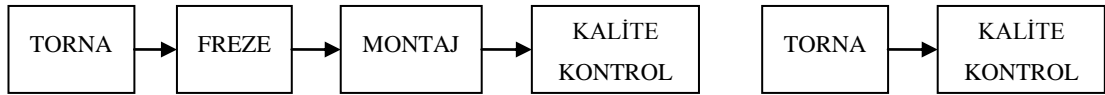
### 4.1. Simülasyon Modeli

Performans değerlendirmesi için Kırıkkale Üniversitesi CIM (Computer Integrated Manufacturing) laboratuvarının simülasyon modeli oluşturulmuş ve yukarıdaki üç aşamadan geçirildikten sonra simülasyon testleri yapılmıştır. Simülasyon modeli, dört tezgâh, konveyör ve ASRS (Automated Storage and Retrieval System -Otomatik Yükleme ve Boşaltma Ünitesi-)’den oluşmaktadır (Şekil 4.1).



**Şekil 4.1.** Kırıkkale Üniversitesi CIM Laboratuvarı Yerleşim Düzeni

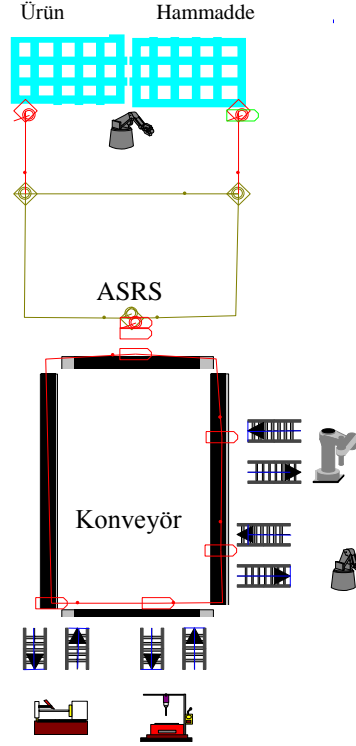
Model Şekil 4.2’de iş akışları verilen iki ürün sınıfını içermektedir. ASRS’den hammadde olarak çıkan 1’inci tip ürün sırasıyla torna, freze, montaj ve kalite kontrol tezgâhlarında işlem görerek tekrar ASRS’de depolanmaktadır. Yine ASRS’den hammadde olarak çıkan 2’nci tip ürün sırasıyla torna ve kalite kontrol tezgâhlarında işlem görerek tekrar ASRS’de depolanmaktadır. ASRS’nin 18 ürün ve 18 hammadde/yarı mamul kapasitesi bulunmaktadır.



**Şekil 4.2.** Ürünlere ait iş akışları (sıra ile)

CIM hücresinin simülasyon modeli kuyruk ağı metodolojisine uygun olarak tasarlanmıştır. Ayrıca model çalışmanın amacına uygun olarak esnek tasarlanmıştır.

Bu anlamda, model işlem süreleri, bekleme yeri kapasiteleri ve konveyör hızı gibi parametrelere müdahale imkânı sağlamaktadır. Sistemin ARENA simülasyon programında oluşturulmuş örneği Şekil 4.3'te verilmiştir.



**Şekil 4.3.** CIM hücresi ARENA simülasyon modeli

ASRS'nin ARENA 11 programı ile oluşturulan modüler yapısı Şekil 4.4'te verilmiştir. Bu yapıda ASRS sisteminin bir robot ile konveyöre bağlantısı yapılmıştır. ASRS'nin yükleme ve boşaltma hızı faktörü çeşitli testler ve doğrulamalar sonucunda 100 birim/dakika olarak belirlenmiştir.

CIM hücresinde bulunan dört adet tezgâhı temsil eden modüler yapı ise Şekil 4.5'te verilmiştir. Her bir tezgâh işlenmek üzere gelen ürünü öncelikle konveyörden almakta daha sonra gerekli işlemi yapmak için bekleme yerine almaktadır. Eğer bekleme yerleri ve tezgâh uygunsuzsa işlem gerçekleştirilmekte ve ürün tezgâhı terk etmektedir. Eğer bekleme yeri kapasitesi aşılmış veya tezgâhta işlem gören bir ürün

varsa ürün beklemekte ya da sistem bloke olmaktadır. Daha sonra ürünler sınıflarına göre iş rotalarını takip etmekte ve ASRS ünitesine tekrar dönmektedir.

ASRS robotunu temsil eden modüller Şekil 4.4'teki mavi renkteki modüllerdir. Request modülü ile robot bir ürünü almak için harekete geçer, Transport modülü ürünü ilgili yere götürür, Free modülü de robotun ürünü bırakmasını sağlar.

Şekil 4.5'deki modüler yapıda yeşil renkli modüller ise ARENA da konveyör sistemini temsil etmektedir. Access modülü ile konveyöre alınan ürün Convey modülü ile ilgili tezgaha ya da ASRS'ye taşınmakta Exit modülü ile de konveyörden ayrılmaktadır.

Simülasyon testleri sonuçları için oluşturulan notasyon aşağıdaki gibidir.

$B_1$  = 1. istasyon (torna tezgâhı) bekleme yeri kapasitesi

$B_2$  = 2. istasyon (freze tezgâhı) bekleme yeri kapasitesi

$B_3$  = 3. istasyon (montaj tezgâhı) bekleme yeri kapasitesi

$B_4$  = 4. istasyon (kalite kontrol tezgâhı) bekleme yeri kapasitesi

$B$  = Tüm bekleme yeri kapasiteleri

$V$  = Konveyör hızı

$T$  = Ürün tipi

$n$  = Ürün sayısı (Simülasyon testleri iki tip ürün için de  $n = 1$ 'den  $n = 18$ 'e kadar oluşturulmuştur.)

$PD$  = Olasılık dağılım tipi

$E$  = Üssel dağılım

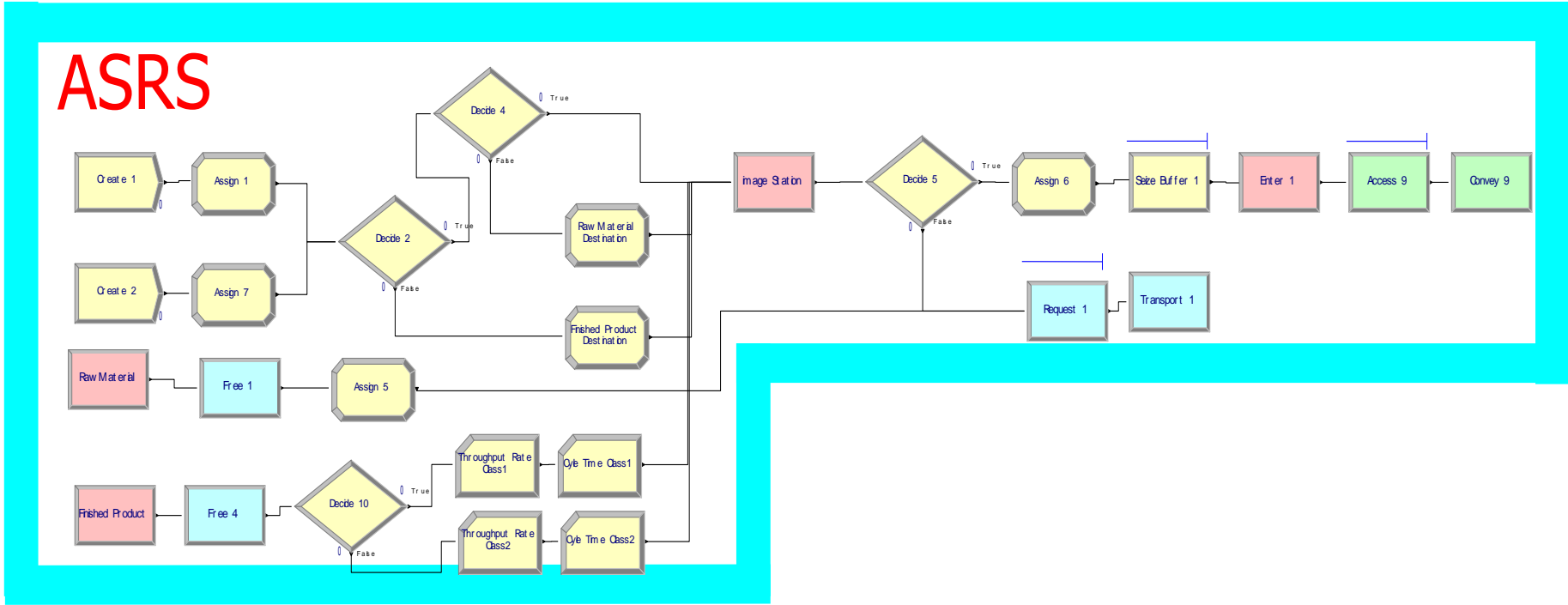
$N$  = Normal dağılım

$C$  = Sabit dağılım

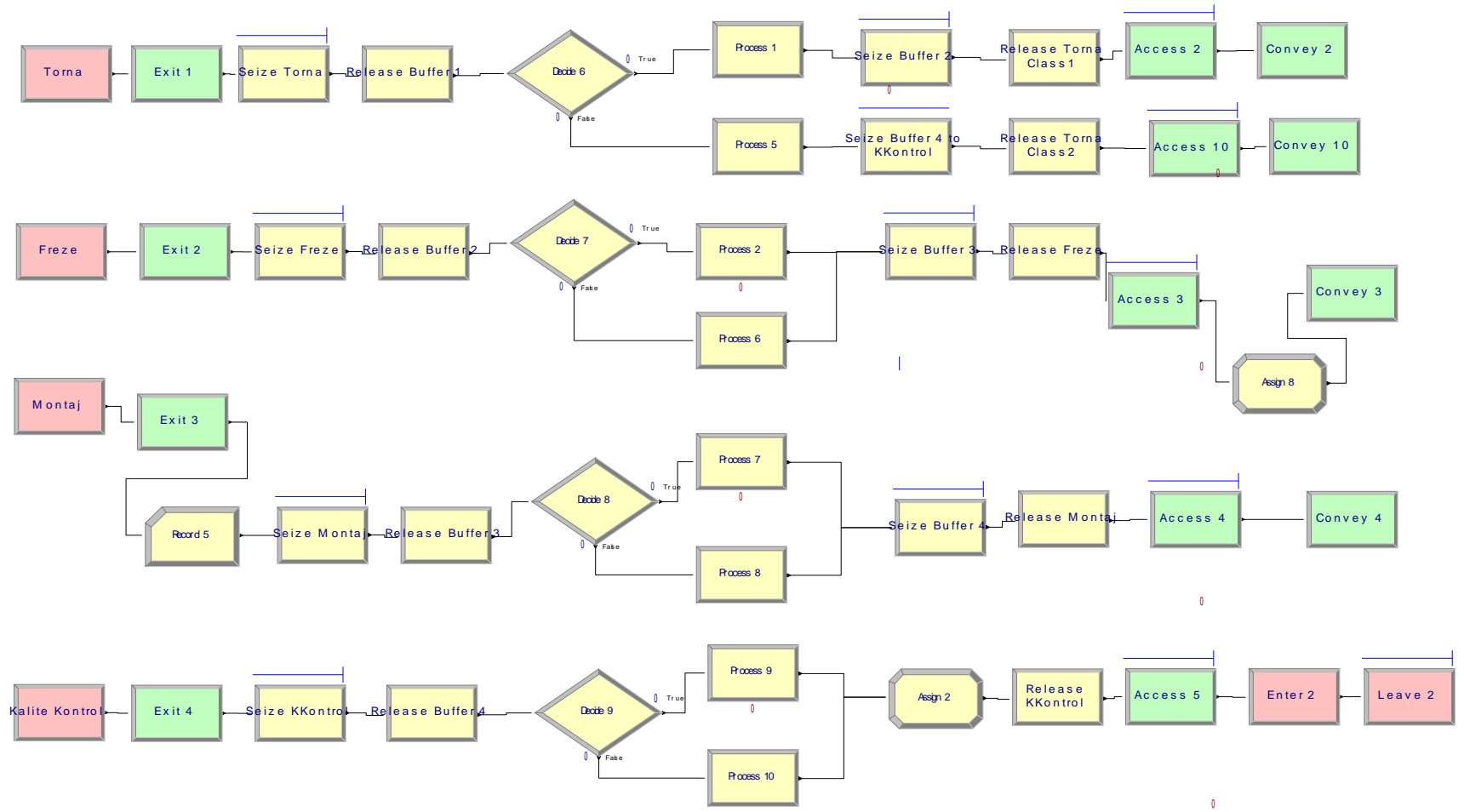
$\mu$  = Ortalama işlem zamanı

$\sigma$  = İşlem zamanları için standart sapma

$CT$  = Toplam çevrim zamanı



Şekil 4.4. ASRS ünitesinin modüler yapısı



Şekil 4.5. Tezgahlara ait modüler yapı

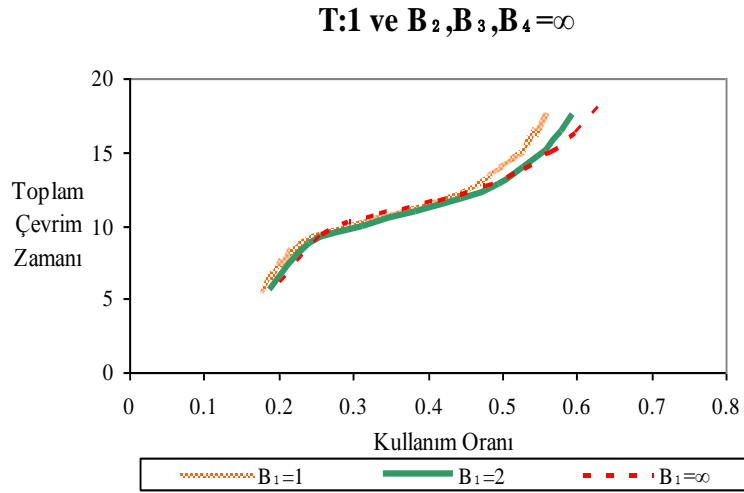
## 4.2. Performans Değerlendirme Sonuçları

Performans değerlendirme testleri bekleme yeri kapasiteleri, konveyör hızı ve işlem oranlarının olasılık dağılımları ölçütlerine göre yapılmıştır. Bu ölçütler için detaylı sonuçlar Bölüm 5.6'da verilmiştir.

### 4.2.1. Bekleme Yeri Kapasitelerinin Sistem Performansı Üzerindeki Etkileri

Bekleme yeri kapasiteleri sistemin bloke olmasını engellemek için dikkatle belirlenmesi gereken bir parametredir. Bu sebeple sistemin performansına etki eden önemli bir ölçüt olarak performans değerlendirme testlerinde ele alınmıştır.

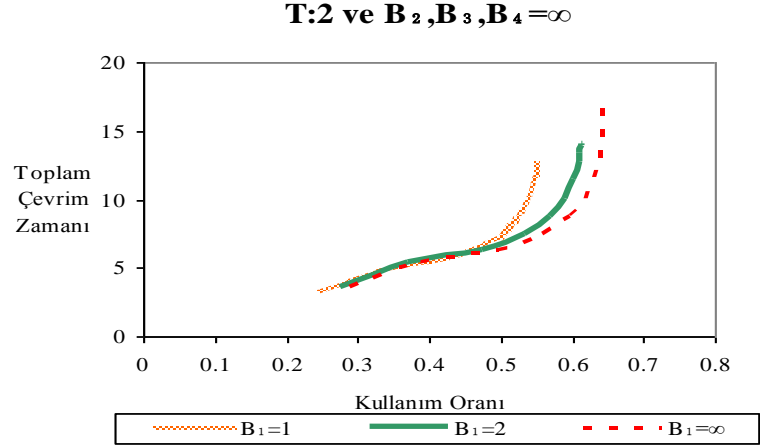
Şekil 4.6 ve 4.7'de sırasıyla birinci ve ikinci tip ürün için birinci istasyon bekleme yeri kapasitesinin 1, 2,  $\infty$  olduğu durumlarda, birinci istasyon kullanım oranı ve toplam çevrim zamanı arasındaki ilişki, simülasyon testlerinden alınan sonuçlarla oluşturulan OC eğrileri ile incelenmiştir.



**Şekil 4.6.** Birinci tip ürün için birinci istasyon bekleme yeri kapasiteleri

Birinci tip ürün için toplam çevrim zamanının 6, 10 ve 15 dk olduğu durumlarda üç farklı bekleme yeri kapasitesi için kullanım oranları Çizelge 4.1'de verilmiştir.





**Şekil 4.7.** İkinci tip ürün için birinci istasyon bekleme yeri kapasiteleri

İkinci tip ürün için toplam çevrim zamanının 4, 10 ve 12 dk olduğu durumlarda üç farklı bekleme yeri kapasitesi için kullanım oranları verilmiştir. Çizelge 4.2’de gösterildiği gibi bekleme yeri kapasitesi arttıkça kullanım oranının arttığı gözlemlenmiştir.

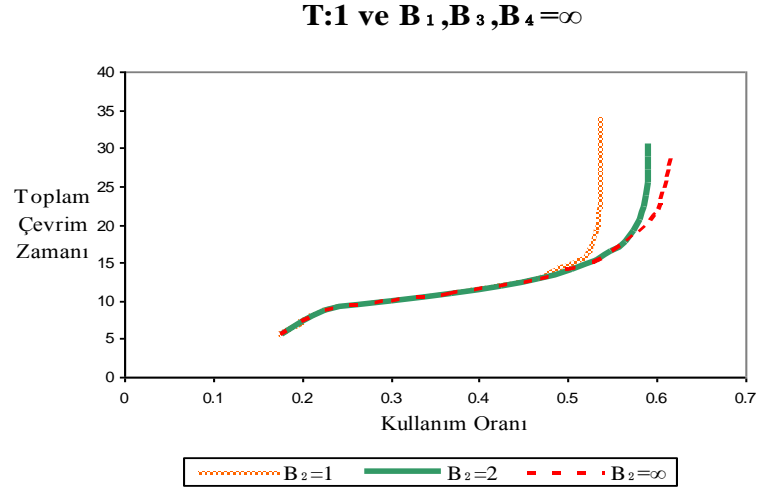
**Çizelge 4.1.** Birinci istasyon  $T = 1$   $B_2, B_3, B_4 = \infty$  için kullanım oranları

Durum	Kullanım Oranları		
	CT=6 dk.	CT=10 dk.	CT=15 dk.
$B_1=1$	%19.22	%33.68	%52.58
$B_1=2$	%19.22	%33.64	%52.85
$B_1=\infty$	%20.18	%31.32	%56.64

**Çizelge 4.2.** Birinci istasyon  $T = 2$   $B_2, B_3, B_4 = \infty$  için kullanım oranı

Durum	Kullanım Oranları		
	CT=4 dk.	CT=10 dk.	CT=15 dk.
$B_1=1$	%27.62	%52.56	%54.90
$B_1=2$	%30.84	%58.53	%57.40
$B_1=\infty$	%32.38	%61.20	%64.00

İkinci istasyonda sadece 1'inci tip ürün işlenmektedir. Şekil 4.8.'de görüldüğü gibi ikinci istasyon için bekleme yeri kapasitesinin artmasıyla kullanım oranı artmıştır.



**Şekil 4.8.** Birinci tip ürün için ikinci istasyon bekleme yeri kapasiteleri

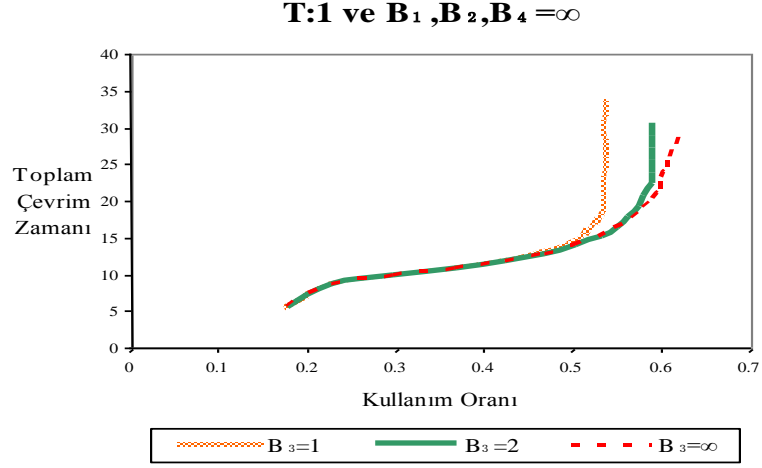
Şekil 4.8'deki durum için çevrim zamanı 6, 15 ve 25 olduğunda elde edilen sonuçlar Çizelge 4.3'te verilmiştir.

**Çizelge 4.3.** İkinci istasyon  $T = 1$   $B_1, B_3, B_4 = \infty$  için kullanım oranı

Durum	Kullanım Oranları		
	CT=6 dk.	CT=15 dk.	CT=25 dk.
$B_2=1$	%19.12	%49.74	%55.09
$B_2=2$	%19.12	%52.70	%57.87
$B_2=\infty$	%19.12	%52.70	%61.77

Üçüncü istasyon için de durum ikinci istasyonda olduğu gibi gözlemlenmiştir (Şekil 4.9).

Şekil 4.9'daki durum için çevrim zamanı 6, 15 ve 25 olduğunda elde edilen sonuçlar Çizelge 4.4'te verilmiştir.



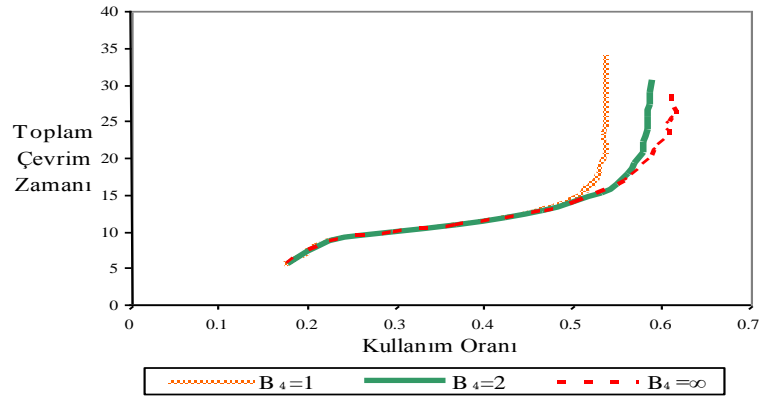
**Şekil 4.9.** Birinci tip ürün için üçüncü istasyon bekleme yeri kapasiteleri

**Çizelge 4.4.** Üçüncü istasyon  $T = 1$   $B_1, B_2, B_4 = \infty$  için kullanım oranı

Durum	Kullanım Oranları		
	CT=6 dk.	CT=15 dk.	CT=25 dk.
$B_3 = 1$	%19.12	%49.72	%55.49
$B_3 = 2$	%19.12	%52.80	%57.65
$B_3 = \infty$	%19.12	%52.80	%61.77

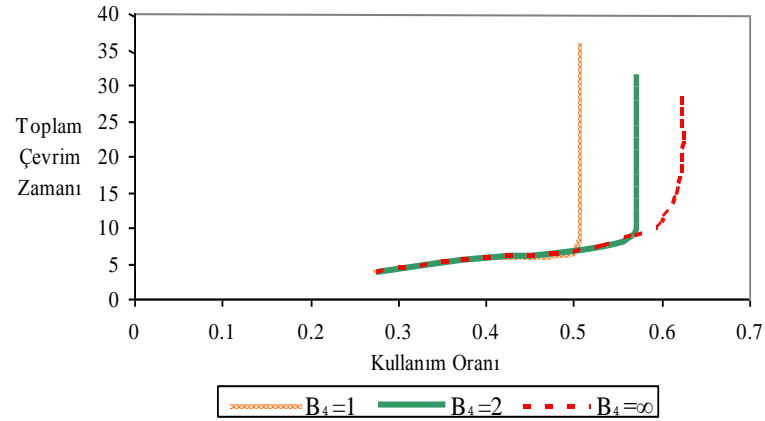
Şekil 4.10 ve Şekil 4.11'de sırasıyla 1'inci tip ve 2'nci tip ürün için dördüncü istasyon bekleme yeri kapasitesinin 1, 2 ve  $\infty$  olduğu durumlarda, kullanım oranı ve toplam çevrim zamanı arasındaki ilişki incelenmiştir. Her iki ürün sınıfı için de bekleme yeri kapasitesi arttıkça kullanım oranının arttığı gözlemlenmiştir.

**T:1 ve  $B_1, B_2, B_3 = \infty$**



**Şekil 4.10.** Birinci tip ürün için dördüncü istasyon bekleme yeri kapasiteleri

**T:2 ve  $B_1, B_2, B_3 = \infty$**



**Şekil 4.11.** İkinci tip ürün için dördüncü istasyon bekleme yeri kapasiteleri

Şekil 4.10 ve 4.11'deki durumlara ait kullanım oranı sonuçları Çizelge 4.5 ve 4.6'da verilmiştir. Çevrim zamanı arttıkça bir istasyon için bekleme yeri kapasitelerinin artırılması kullanım oranını artıracaktır.

**Çizelge 4.5.** Dördüncü istasyon  $T = 1$   $B_1, B_2, B_3 = \infty$  için kullanım oranı

Durum	Kullanım Oranları		
	CT=6 dk.	CT=15 dk.	CT=25 dk.
$B_4 = 1$	%19.12	%49.73	%55.38
$B_4 = 2$	%19.12	%52.74	%57.28
$B_4 = \infty$	%19.12	%52.74	%61.77

**Çizelge 4.6.** Dördüncü istasyon  $T = 2$   $B_1, B_2, B_3 = \infty$  için kullanım oranı

Durum	Kullanım Oranları		
	CT=5 dk.	CT=15 dk.	CT=25 dk.
$B_4 = 1$	%34.80	%48.37	%49.60
$B_4 = 2$	%34.80	%54.70	%58.70
$B_4 = \infty$	%34.80	%62.00	%62.30

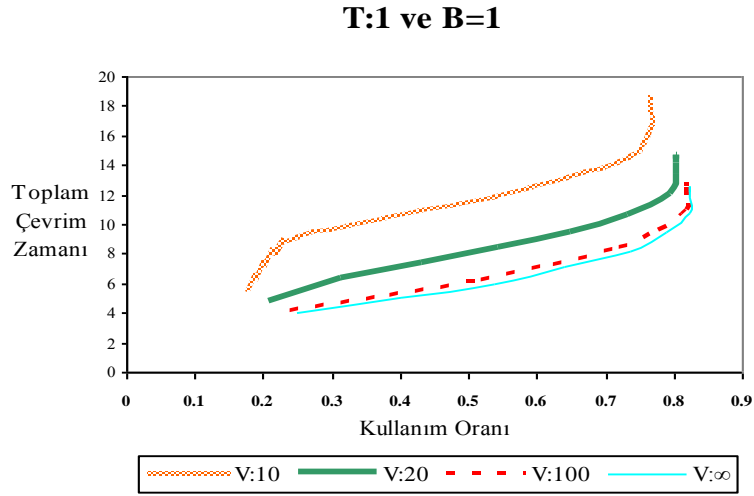
Bekleme yerleri kapasitelerinin artmasıyla sistemin kullanım oranının arttığı gözlenmiştir. 1'inci ve 2'nci tip ürün için bekleme yerleri kapasitelerinin 1, 2 ve sonsuz kabul edildiği durumlarda toplam çevrim zamanı ve kullanım oranı arasındaki ilişki incelendiğinde, 1'inci istasyon bekleme yeri kapasitesinin artmasıyla 1'inci tip ürün için kullanım oranında %4.06 ve 2'nci tip ürün için %9.10'a, 2'nci istasyon bekleme yeri kapasitesinin artmasıyla 1'inci tip ürün için kullanım oranında %6.68'e varan, 3'üncü istasyon bekleme yeri kapasitesinin artmasıyla 1'inci tip ürün için kullanım oranında %6.28'e varan, 4'üncü istasyon bekleme yeri kapasitesinin artmasıyla 1'inci tip ürün için kullanım oranında %6.39 ve 2'nci tip ürün %12.70'e varan artışlar gözlemlenmiştir.

#### 4.2.2. Konveyör Hızının Sistem Performansı Üzerindeki Etkisi

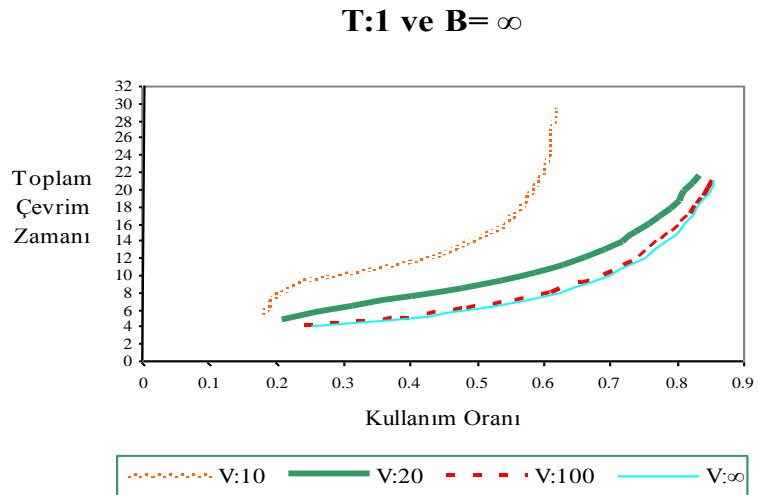
Bir üretim sisteminin performansını etkileyen en önemli parametrelerden biri de boşa geçen zamanlardır. Bu zamanlardan biri de taşıma zamanlarıdır. Yarı ürünlerin veya ürünlerin bir yerden bir yere taşınması için geçen zamanların kısaltılması taşıyıcı hızlarına veya taşıma işleminin tamamen kaldırılmasına bağlıdır.

Bu bölümde sistem tasarımında taşıyıcı hızlarının değiştirilmesi ile kullanım oranı ve çevrim zamanı performans ölçütlerinin nasıl etkilendiği incelenmiştir. Aşağıda her bir ürün tipi için gerçekleştirilmiş analizler verilmiştir.

Şekil 4.12 ve 4.13'te sırasıyla birinci tip ürün için bekleme yeri kapasitesinin 1 ve  $\infty$  olduğu durumda kullanım oranı ve toplam çevrim zamanı arasındaki ilişki OC eğrileri ile gösterilmiştir.



Şekil 4.12. T=1 B=1 için konveyör hızları



Şekil 4.13. T=1 B=∞ için konveyör hızları.

Çizelge 4.6 ve Çizelge 4.7'deki veriler ışığında; konveyör hızının artmasının bekleme yeri kapasitesinin 1 ve sonsuz olduğu her iki durumda da kullanım oranını artırdığı söylenebilir.

**Çizelge 4.7.**  $T = 1$   $B = 1$  için kullanım oranları

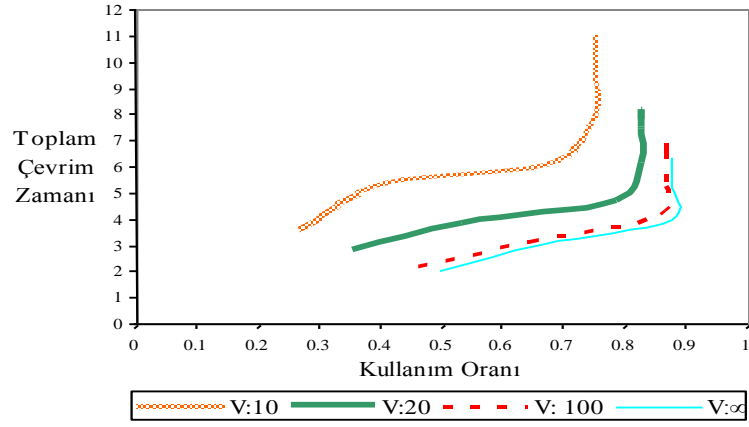
Durum	Kullanım Oranları		
	CT=6 dk.	CT=9 dk.	CT=12 dk.
V=10 m/dk.	%19.14	%23.76	%54.97
V=20 m/dk.	%29.49	%61.79	%79.00
V=100 m/dk.	%49.77	%76.36	%82.07
$V=\infty$	%50.21	%77.38	%82.21

**Çizelge 4.8.**  $T = 1$   $B = \infty$  için kullanım oranları

Durum	Kullanım Oranları		
	CT=6 dk.	CT=15 dk.	CT=20 dk.
V=10 m/dk.	%19.14	%52.57	%58.09
V=20 m/dk.	%29.40	%71.64	%80.02
V=100 m/dk.	%47.04	%78.90	%84.39
$V=\infty$	%49.78	%80.19	%84.71

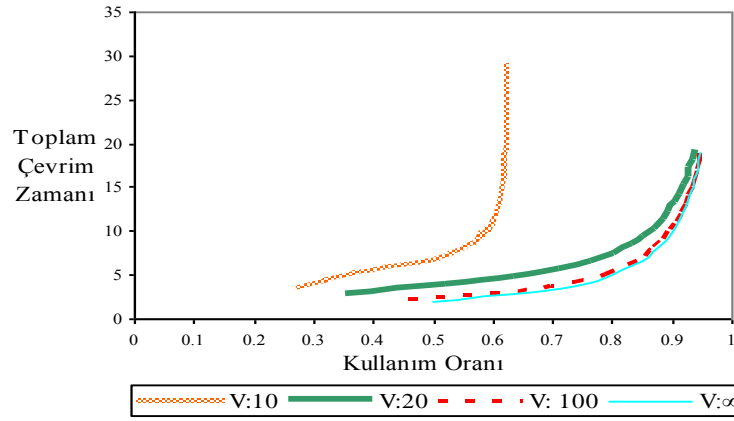
Şekil 4.14 ve Şekil 4.15'te sırasıyla ikinci tip ürün için bekleme yeri kapasitesinin 1 ve  $\infty$  olduğu durumda kullanım oranı ve toplam çevrim zamanı arasındaki ilişki OC eğrileri ile gösterilmiştir. Bekleme yeri kapasitesinin 1 ve sonsuz olduğu iki durumda konveyör hızının artmasının sisteme etkisi aynı olmamıştır.

### T:2 ve B=1



Şekil 4.14. T=2 B=1 için konveyör hızları

### T:2 ve B=∞



Şekil 4.15. T=2 B=∞ için konveyör hızları

Analizlerden elde edilen çeşitli konveyör hızları ve çevrim zamanlarına karşılık gelen makine kullanım oranı verileri Çizelge 4.9 ve 4.10'da verilmiştir.



**Çizelge 4.9.**  $T = 2$   $B = 1$  için kullanım oranları

Durum	Kullanım Oranları	
	CT=4 dk.	CT=6 dk.
V=10 m/dk.	%30.78	%66.42
V=20 m/dk.	%55.95	%81.06
V=100 m/dk.	%84.47	%80.41
V= $\infty$	%87.31	%82.78

**Çizelge 4.10.**  $T = 2$   $B = \infty$  için kullanım oranları

Durum	Kullanım Oranları		
	CT=6 dk.	CT=10 dk.	CT=15 dk.
V=10 m/dk.	%45.04	%58.44	%63.64
V=20 m/dk.	%75.75	%84.18	%90.64
V=100 m/dk.	%81.92	%89.34	%93.31
V= $\infty$	%83.13	%89.73	%93.31

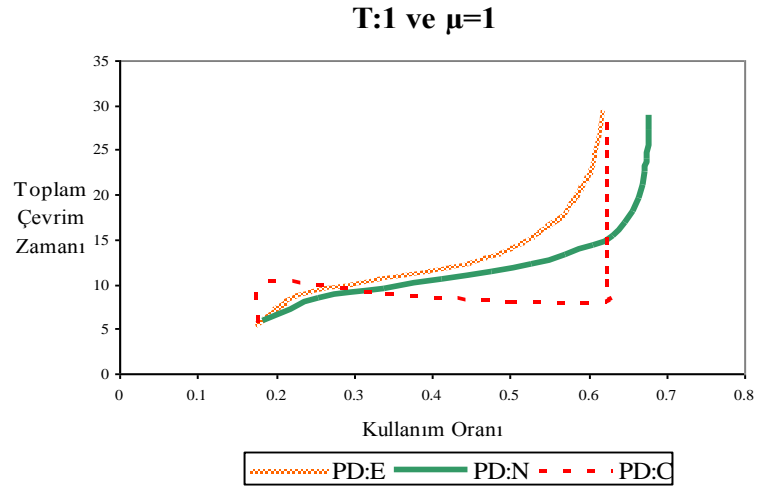
Konveyör hızının artmasıyla sistem kullanım oranının arttığı gözlenmiştir. 1'inci ve 2'nci tip ürün için konveyör hızının 10 m/dk, 20 m/dk, 100 m/dk ve sonsuz kabul edildiği durumlarda toplam çevrim zamanı ve kullanım oranı arasındaki ilişki incelendiğinde; bütün bekleme yeri kapasitelerinin 1 olduğu durumda, sistem kullanım oranlarında 1'inci tip ürün için %53.62, 2'nci tip ürün için %56.53'e varan ve bütün bekleme yerleri kapasitelerinin sonsuz kabul edildiği durumda 1'inci tip ürün için %30.64'e, 2'nci tip ürün için %38.09'a varan artış gözlenmiştir. Ayrıca konveyör hızının 10 m/dk ile 100m/dk arasındaki değişiminin sisteme etkisi dikkate değer olmasına rağmen, 100 m/dk'den sonra sonsuza kadar değişiminin sistem üzerindeki etkisinin daha az olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum ürünlerin iş akışları ve işlem süreleri gibi parametrelerinden dolayı sistemin kararlı duruma geldiğini gösterir.

#### 4.2.3. Olasılık Dağılımlarının Sistem Performansı Üzerindeki Etkileri

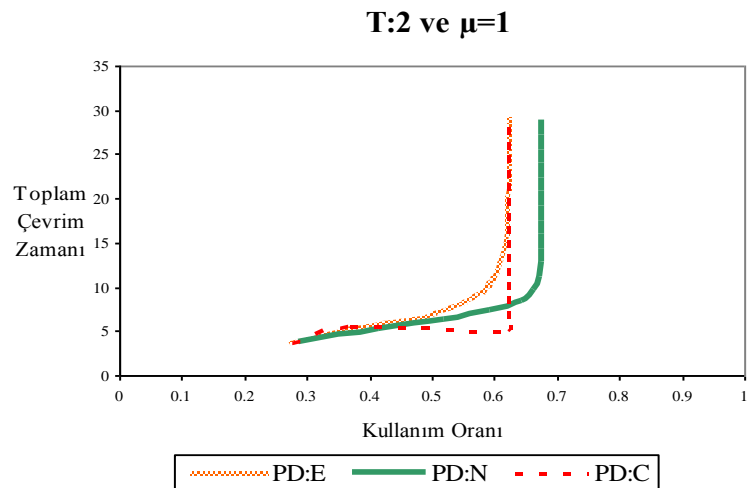
Bir üretim tesisinde işlem süreleri genellikle sabittir. Fakat operatör, arızalar, hazırlık zamanları ve üretilen ürünün özelliği gibi bazı faktörlerden dolayı işlem süreleri

stokastik bir özellik gösterir. Bu durum işlem sürelerinin bir dağılım olarak ifadesini gerektirir. Çalışmanın bu bölümünde işlem zamanlarının olasılık dağılımlarının sistem tasarımında performansı nasıl etkilediği araştırılmıştır.

Deneyler üssel, sabit ve normal dağılımlı işlem zamanları alınarak yapılmıştır. Üssel dağılım için  $\mu=1$ , sabit dağılım için  $\mu=1$  ve normal dağılım için  $\mu=1$  ve  $\sigma=1$  olduğu durum için toplam çevrim zamanı ve kullanım oranı arasındaki ilişkiyi gösteren eğriler Şekil 4.16 ve Şekil 4.17’de verilmiştir.



**Şekil 4.16.** T=1 için olasılık dağılımları sonuçları



**Şekil 4.17.** T=2 için olasılık dağılımları sonuçları

Çeşitli çevrim zamanları ve olasılık dağılımları için elde edilen analiz sonuçları Çizelge 4.11 ve 4.12’de verilmiştir. Sonuçlardan görüldüğü üzere dağılımların değişmesi sonucu kullanım oranı artsa da çevrim zamanlarına bağlı olarak en iyi dağılım türü değişmektedir. Bu durumun detaylı analizi Bölüm 5.6.2.3’te işlem zamanları değişiminin analitik ve simülasyon sonuçları ile yapılmıştır.

**Çizelge 4.11.**  $T = 1$   $\mu = 1$  için kullanım oranları

Durum	Kullanım Oranları	
	CT=6 dk.	CT=15 dk.
PD:E	%18.20	%53.02
PD:N	%18.22	%61.12
PD:C	%17.90	%62.50

**Çizelge 4.12.**  $T = 2$   $\mu = 1$  için kullanım oranları

Durum	Kullanım Oranları	
	CT=6 dk.	CT=15 dk.
PD:E	%46.40	%61.82
PD:N	%50.80	%67.60
PD:C	%62.50	%62.50

Bütün istasyonlar için işlem zamanları dağılımının normal dağılım olduğu durumlarda üssel dağılıma göre 1’inci ve 2’nci tip ürün için sırasıyla %8.10 ve %5.78 artış olduğu gözlemlenmiştir. Sabit dağılımda ise belli bir çevrim zamanına kadar kullanım oranı diğer iki dağılıma göre daha fazla olmasına rağmen, belli bir çevrim zamanından sonra üssel dağılımdan fazla ve normal dağılımdan az olduğu gözlemlenmiştir

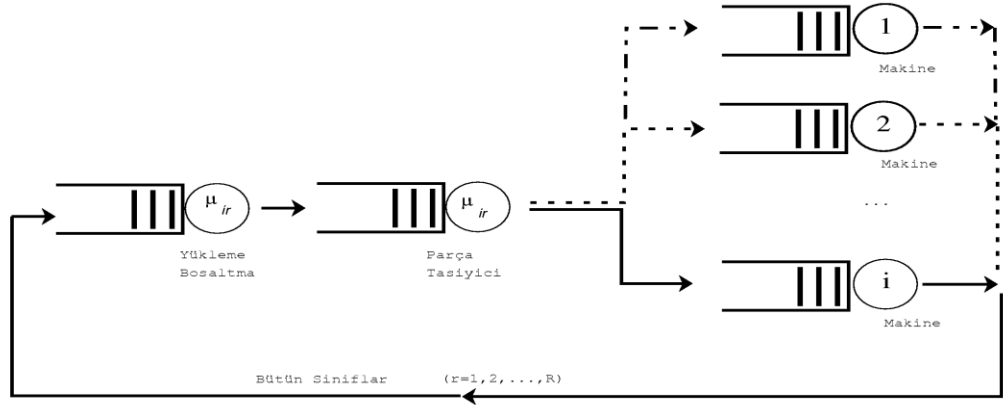
Bu çalışmada dört tezgâh, bir konveyör ve ASRS’den oluşan ve iki tip ürün üretilen bir CIM hücresinin parametrelerinin sistem üzerindeki etkilerinin OC eğrileri ile incelenmesi amaçlanmıştır. İlk olarak CIM hücresinin simülasyon modeli oluşturulmuş, sonrasında simülasyon modelinin geçerliliği CIM hücresinin

alıştırılmasıyla elde edilen gerçek verilerle doğrulanmış ve son olarak simülasyon modelinde yapılan değişikliklerin sistemin kullanım oranı ve toplam çevrim zamanı üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Elde edilen bulgulara göre, bekleme yeri kapasitesi, konveyör hızı ve işlem zamanlarının olasılık dağılımların kullanım oranı ve toplam çevrim zamanı arasındaki ilişkiyi etkilediği gözlenmiştir. EİS tasarım süreci düşünüldüğünde belirlenen bu parametreler ve ilişkiler kullanılarak EİS sistem performansının analitik olarak kuyruk ağları ile değerlendirmesi yapılabilir.

## 5. ESNEK İMALAT SİSTEMLERİNİN KUYRUK AĞI MODELLERİ

Esnek imalat sistemlerinde üretim süreci ürünün depolama ünitesinden alınması ile başlayıp gerekli işlemlerin ilgili tezgâhlarda yapıldıktan sonra tekrar ürünün depolama ünitesine dönmesi ile sona ermektedir. EİS sistemlerindeki ürünler genellikle benzer özelliklere ve iş süreçlerine sahip ürün grupları olmaktadır. Bu tür bir süreç ve ürün sınıfına sahip EİS’de üretilecek bir ürün sanki sistemi terk etmeyip ardı ardına aynı süreçlere tekrar tekrar giriyor gibi bir işleyiş takip etmektedir. Yani, bir ürünün işlemi bitse de onu takip eden ürün aynı özelliklere sahip ürün olduğu için aynı ürün işlem görüyormuş kabul edilmektedir. Bu durum kapalı kuyruk ağlarının topolojisine uymaktadır. Şekil 5.1’de örnek bir EİS sisteminin kapalı kuyruk ağı modeli verilmiştir.



**Şekil 5.1.** Bir EİS sisteminin kapalı kuyruk ağı modeli

Şekil 5.1.’de taşıma sistemi ile 8 ayrı makineden birine giren ürün işlemi bittikten sonra tekrar taşıma sistemi ile kuyruk ağının başlangıcına gelmektedir. Bu şekilde bir çevrim içinde süreç devam etmektedir. Bu tip topolojiler kapalı kuyruk ağları olarak tanımlanır.

Bu bölümde tek ve çok sınıflı kapalı kuyruk ağları ile modellenen EİS sistemlerinin analitik performans değerlendirmesinde kullanılan kuyruk ağı metodolojileri anlatılacaktır.

### 5.1. Tek Sınıflı Kuyruk Ağları

Kuyruk ağları algoritmalarında kullanılan parametrelere ait notasyonlar aşağıdaki gibidir.

$M$	İstasyon sayısı
$N$	Müşteri/Ürün sayısı
$n_i$	$i^{inci}$ istasyondaki müşteri sayısı ( $\sum_i^M = N$ )
$(n_1, n_2, \dots, n_M)$	Ağın anlık durumu
$\pi_i(n_1, n_2, \dots, n_M)$	$i^{inci}$ istasyonda $n_i$ müşteri olma olasılığı ( $i = 1, \dots, M$ )
$\mu_i$	$i^{inci}$ istasyonun işlem oranı ( $i = 1, \dots, M$ )
$1/\pi_i$	$i^{inci}$ istasyondaki işlerin ortalama süresi ( $i = 1, \dots, M$ )
$V_i$	$i^{inci}$ istasyona geliş oranı ( $i = 1, \dots, M$ )
$r_{ij}$	Bir müşterinin $i^{inci}$ istasyonda işlemini tamamladıktan sonra $j^{inci}$ istasyona gelme olasılığı, rota olasılığı ( $i \neq j, i = 1, \dots, M, j = 1, \dots, M$ )
$\pi_i(j n)$	Sistemde $n$ müşteri varken $i^{inci}$ istasyonda $j$ iş olma koşullu olasılığı ( $i = 1, \dots, M, j = 0, \dots, n, n = 0, \dots, N$ )
$K_i$	$i^{inci}$ istasyonun işlemcilerde dahil olmak üzere bekleme yeri kapasitesi ( $i = 1, \dots, M$ )
$c_i$	$i^{inci}$ istasyondaki paralel işlemcilerin sayısı ( $c_i \geq 1, i = 1, \dots, M$ )
$b_i$	$i^{inci}$ istasyondaki bekleme yeri sayısı ( $i = 1, \dots, M$ )
$P_i(b)$	Bir müşterinin $i^{inci}$ istasyonda bloke olma olasılığı
$P_{K_i}$	$K_i$ yer kapasiteli bir $i$ istasyonunun bir önceki istasyondaki müşterileri bloke etme olasılığı
$\lambda$	Sistemin çıktı hızı

$\lambda_i$	$i^{\text{inci}}$ istasyondaki çıktı hızı ( $i = 1, \dots, M$ )
$\rho_i$	$i^{\text{inci}}$ istasyonun kullanım oranı ( $i = 1, \dots, M$ )
$W$	Çevrim zamanı, müşterilerin sisteme giriş anından çıktıkları ana kadar geçen veya bir çevrimi tamamladıkları süre.
$W_i$	$i^{\text{inci}}$ istasyondaki ortalama süre ( $i = 1, \dots, M$ )
$Q_i$	$i^{\text{inci}}$ istasyondaki ortalama müşteri sayısı ( $i = 1, \dots, M$ )

Kuyruk ağları tek kanallı sistemlere göre daha çok istasyondan oluşmaktadır. Yalnız her iki sistemde de önemli olan karar durum olasılıklarının hesaplanmasıdır. Bu olasılıkların hesaplanması ile diğer ölçütler de hesaplanabilir. Kuyruk ağları ile sistem analizinde göz önüne alınan performans ölçütleri aşağıdaki gibidir.

- Karar Durum Olasılıkları,  $\pi_i(k)$

$$\pi_i(k) = \sum_{n_i=n} \pi(n_1, n_2, \dots, n_M) \quad (5.1)$$

Buradaki ifade  $1, 2, \dots, M$ 'deki istasyonlardaki  $n_i$  müşteri olasılıkları olarak okunabilir.

- Kullanım Oranı,  $\rho_i$

$$\rho_i = \sum_{k=1}^{\infty} \pi_i(k) \quad (5.2)$$

Ayrıca  $\rho_i$  istasyonunun doluluk oranı olduğundan, tek işlemcisi olan istasyonlar için şu şekilde de hesaplanabilir.

$$\rho_i = 1 - \pi_i(0) \quad (5.3)$$

$c_i$  sayıda işlemcisi olan bir istasyon için ise:

$$\rho_i = 1 - \sum_{k=0}^{c_i-1} \frac{c_i - k}{c_i} \pi_i(k) \quad (5.4)$$

Eğer işlem oranı müşteri sayısından bağımsız ise:

$$\rho_i = \frac{\lambda_i}{c_i \mu_i} \quad (5.5)$$

- Çıktı Hızı,  $\lambda_i$  : Birim zamanda istasyonu terk eden işlerin sayısıdır.

$$\lambda_i = \sum_{k=1}^{\infty} \pi_i(k) \mu_i(k) \quad (5.6)$$

Eğer işlem oranı müşteri sayısından bağımsız ise;

$$\lambda_i = c_i \rho_i \mu_i \quad (5.7)$$

Bunlara ek olarak, denge halinde çıktı hızı (birim zamanda çıkan müşteri sayısı) ile girdi hızı (birim zamanda giren müşteri sayısı) eşittir. Eğer bekleme yerleri sınırlı ise bu durumda gelen müşterilerin bir kısmı kaybolacağından çıktı hızı girdi hızından düşük olacaktır.

- Sistem Çıktı Hızı,  $\lambda_i$  : Açık ağlar için sistem çıktı hızı, birim zamanda çıkan müşterilerin sayısıdır. Denge durumunda çıktı hızı sisteme giren akışların toplamıdır. Yani;

$$\lambda = \sum_{i=1}^N \lambda_{0i} \quad (5.8)$$

Kapalı sistemler için ise müşterilerden birim zamanda bir turu tamamlayanların sayısıdır.



$$\lambda = \frac{\lambda_i}{e_i} \quad (5.9)$$

- Ortalama Müşteri Sayısı,  $Q_i$  : bir  $i$  istasyonundaki ortalama müşteri sayısı.

$$Q_i = \sum_{n=1}^{\infty} n \pi_i(k) \quad (5.10)$$

Little Teoreminden;

$$Q_i = \lambda_i W_i \quad (5.11)$$

- Kuyruktaki Ortalama Müşteri Sayısı,  $q_i$  : Bir  $i$  istasyonundaki kuyrukta bekleyen ortalama müşteri sayısı.

$$q_i = \sum_{n=c_i}^{\infty} (n - c_i) \pi_i(k) \quad (5.12)$$

Little Teoreminden;

$$q_i = \lambda_i \omega_i \quad (5.13)$$

- İstasyondaki Ortalama Süre,  $W_i$  : Bir müşterinin  $i$  istasyonda harcadığı ortalama zaman

$$W_i = \frac{Q_i}{\lambda_i} \quad (5.14)$$

- İstasyondaki Ortalama Kuyruk Süresi,  $\omega_i$  : Bir müşterinin  $i$  istasyonunda kuyrukta harcadığı ortalama zaman

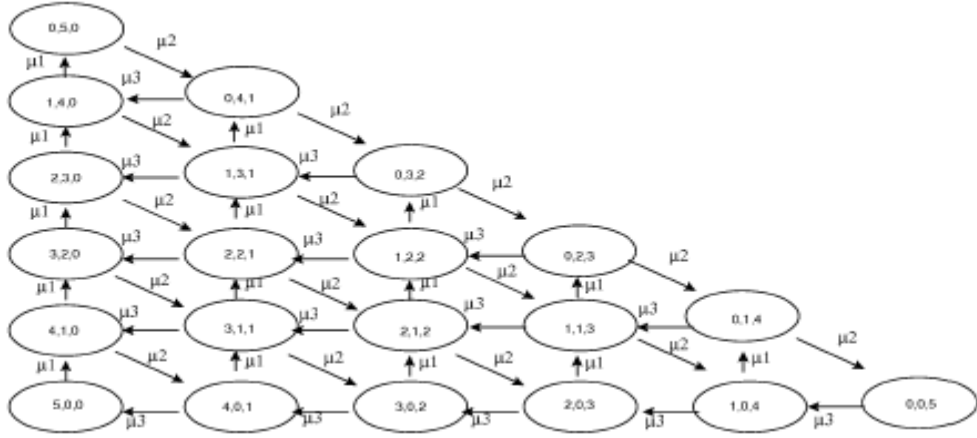
$$\omega_i = W_i - \frac{1}{\mu_i} \quad (5.15)$$

## 5.2. Kapalı Kuyruk Ağlarının Matematiksel Formu

Kapalı ağlarda matematiksel form özelliği Gordon ve Newell tarafından gösterilmiştir. Kapalı ağlarda sisteme giriş ve çıkış yoktur, sistemdeki müşteri sayısı sabittir ( $N = \sum_{i=1}^M n_i$ ). Dolayısıyla mümkün durum sayısı N sayıdaki müşterinin M istasyona dağıtılması olarak şu şekilde binomial olarak ifade edilebilir.

$$\binom{N + M - 1}{M - 1} \quad (5.16)$$

Örneğin bir 3 istasyonlu ve 5 müşterili kapalı ağ için durumlar ve durumlar arası geçiş diyagramı Şekil 5.2 deki gibidir. Aslında bu durumların karar olasılıkları Sürekli-Zamanlı Markov Zinciri yaklaşımı kullanılarak hesaplanabilir. Fakat, şebekeler büyüdükçe ve ağdaki müşteri sayıları arttıkça durum sayısı üssel olarak artar.



Şekil 5.2. 3 istasyon ve 5 müşterili bir kapalı ağ için durum geçiş diyagramı

Karar durum olasılıklarının hesaplanması ise Gordon ve Newell tarafından şu teoremlerle ispatlanmıştır.

**Teorem 1:** Bir kapalı ağda, ağın karar durum olasılıkları her bir istasyonun karar durum olasılıkları çarpımı olarak şu şekilde ifade edilebilir. Bu durum kuyruk ağlarında Product Form -Çarpım Formu- olarak adlandırılır.

$$\pi(n_1, n_2, \dots, n_M) = \frac{1}{G(N)} \prod_{i=1}^M F_i(n_i) \quad (5.17)$$

Burada  $G(N)$  normalizasyon katsayısı olarak tanımlanır ve şu şekildedir:

$$G(N) = \sum_{\sum_{i=1}^M n_i = N} \prod_{i=1}^M F_i(n_i) \quad (5.18)$$

$F_i(n_i)$  ise istasyonların ziyaret oranları, servis süreleri ve işlemci sayılarına bağlı olarak şu şekilde ifade edilir:

$$F_i(n_i) = \left( \frac{V_i}{\mu_i} \right) \frac{1}{\beta_i n_i} \quad (5.19)$$

$\beta_i(n_i)$  katsayısı ise;

$$\beta_i n_i = \begin{cases} n_i!, & n_i \leq c_i \\ c_i! c_i^{n_i - c_i}, & n_i > c_i \\ 1, & c_i = 1 \end{cases}$$

Normalizasyon katsayısının hesaplanarak karar durum olasılıklarının belirlenmesi kolay bir hesaplama gibi görülebilir. Fakat örneğin 5 istasyon ve 10 müşterili bir küçük ağ için 1001 durum hesaplanması gerekir. Ağ biraz daha genişletilirse yukarıdaki binomial hesabı uyarınca 10 istasyon ve 35 müşteri için 52.451.256 durum hesaplanması gerekir. Dolayısıyla daha verimli algoritmalar geliştirilmiştir.

### 5.3. Tek Sınıflı Blokeli Sistemler

Tek sınıflı sistemlerde bir işlemciye gelen ürün miktarı işlemci sayısından büyük olduğu durumda o işlemcinde bloke durumu ortaya çıkmaktadır. Bu durumda analitik hesaplarda sistemde bir ürünün bloke olma olasılığının bilinmesi gerekmektedir. Belirli bir olasılıkla bloke olan bir sistemde ürünlerin işlem süreleri de uzayacaktır. Kuyruk ağlarında işlem sürelerinin bekleme ile birlikte toplamına efektif servis zamanı denir.

#### 5.3.1. Efektif Servis Zamanları

$i$  düğümünde işlemi tamamlanan bir işin  $i + 1$  düğümünde işlem var iken beklemeye geçmesi sistemi bloke eder. Bu durumda ortalama iş süresi bloke olan düğümdeki son işin kalan işlem süresi kadar artacaktır.  $P_i(b)$ ,  $i$  düğümünün bloke olması olasılığını göstermek üzere, efektif servis zamanı:

$$\frac{1}{\mu_i^e} = \frac{1}{\mu_i} + P_i(b) \frac{1}{\mu_h} \quad (5.20)$$

Bloke olan düğümdeki son işin kalan süresinin dağılımı,  $\mu_h$  aşağıdaki dağılım formülü ile hesaplanır:

$$\mu_h = \frac{2\mu_{i+1}}{1 + \sigma_{i+1}^2 \mu_{i+1}^2} \quad (5.21)$$

Buradaki  $\sigma^2$  servis zamanının varyansını temsil etmektedir.

#### 5.3.2. Bloke Olasılığı

Tez çalışmasında bloke olasılığı İşlem Sonrası Bloke mekanizmasına göre hesaplanmaktadır. İşlem sonrası bloke durumu,  $i$  düğümündeki bir işin

tamamlandıktan sonra  $j$  düğümüne hareket etmesi halinde,  $j$  düğümünün dolu olması durumunu ifade eder.

Bloke olan  $i$  düğümünden çıkan ürün  $j$  düğümünün kuyruk kapasitesini 1 artırır.  $i$  düğümünün kuyruk bekleme kapasitesi  $K_i$  olarak gösterilirse, bloke olasılığı aşağıdaki gibi formüle edilir:

$$P_{K_i} = \sum_{j=K_i+1}^n \pi_i(j|n) = 1 - \sum_{j=0}^{K_i} \pi_i(j|n) \quad (5.22)$$

Analizlerde sınırlı bekleme yerine sahip kuyruk ağları için bloke olasılığı bu formülasyon ile hesaplanmıştır

#### 5.4. Çok Sınıflı Kuyruk Ağları

Çok sınıflı kuyruk ağları tek sınıflı kuyruk ağlarının müşteri/ürün tipi sayısının 2 ve daha fazla olduğu durum olarak özetlenebilir. Çok sınıflı kuyruk ağlarında müşteriler işlem sürelerine ve izledikleri rotalara göre farklılıklar göstermektedir. Bazı durumlarda müşterilerin sınıf değiştirmeleri de mümkündür. Tek sınıflı kuyruk ağlarında olduğu gibi, eğer bir sınıfta müşteri sayısı sabitse kapalı, değilse açık adı verilir. Eğer bir ağ hem kapalı hem de açık müşteri sınıfları içeriyorsa karışık ağ adı verilir.

Çok sınıflı ağlarda tek sınıflı ağlardaki notasyonlara ek olarak aşağıdaki notasyonlar eklenir.

$R$	Ağdaki müşteri sınıflarının sayısı
$M$	Ağdaki istasyon sayısı
$\vec{N}$	Popülasyon vektörü, $N_r$ 'in $r^{inci}$ ( $r = 1, \dots, R$ ) sınıftaki müşteri sayısını ifade ettiği ( $\vec{N} = N_1, N_2, \dots, N_R$ ) şeklindeki vektör.
$\vec{n}$	Ağın durumu, ( $\vec{n} = n_1, n_2, \dots, n_R$ )

$\mu_{ir}(j)$	$r^{inci}$ sınıfın $i$ istasyonunda toplam $j$ müşteri olduğundaki işlem oranı ( $j = \sum_{r=1}^R n_r$ )
$\mu_{ir}(\vec{n})$	$r^{inci}$ sınıfın $i$ istasyonunda $\vec{n}$ müşteri olduğundaki işlem oranı ( $j = \sum_{r=1}^R n_r$ )
$\lambda_r(\vec{n})$	$r^{inci}$ sınıfın $\vec{n}$ durumunda iken çıktı hızı
$W_{ir}(\vec{n})$	$r^{inci}$ sınıfın $\vec{n}$ müşteri olduğundaki $i$ istasyonunda geçirdiği süre.
$Q_{ir}(\vec{n})$	$\vec{n}$ müşteri olduğunda $i$ istasyonunda ortalama $r^{inci}$ sınıf müşteri sayısı
$\pi_i(j \vec{n})$	Ağ $\vec{n}$ olduğu durumda $i$ istasyonunda $j$ müşteri olma olasılığı
$\pi_i(\vec{n}_k \vec{n})$	Ağ $\vec{n}$ olduğu durumda $i$ istasyonunda $\vec{n}_k$ müşteri olma olasılığı
$P_i(\vec{n})$	Ağ $\vec{n}$ olduğu durumda $i$ istasyonun bloke olma olasılığı
$V_{ir}$	$r^{inci}$ sınıfın $i^{inci}$ istasyonu ziyaret oranı
$\vec{1}_r$	$r^{inci}$ sınıfın 1 birim olduğu birim vektör $(0_1, \dots, 1_r, \dots, 0_R)$

Çok sınıflı ağlar değişik müşteri tiplerinden oluştuğu için tek sayısal değerler üzerinden değil vektörel olarak değerlendirilir. Örneğin marjinal (karar-durum) olasılıkları  $\pi(\vec{n}_1, \vec{n}_2, \dots, \vec{n}_M)$  şeklindedir. Ama temel kanunlar çoğu çok sınıflı sistemler için de geçerlidir. Çok sınıflı ağların performans ölçütleri ve hesaplanması aşağıdaki gibidir.

Karar Durum Olasılıkları kapalı ağlarda müşteri sayılarının sınıf toplamlarına eşit olması gerektiğinden  $i^{inci}$  istasyon için;

- Kullanım Oranı:  $i^{inci}$  istasyonun  $r$  sınıfı tarafından kullanım oranı:

$$\rho_{ir} = \frac{1}{c_i} \sum_{\text{tüm } n_r > 0} \pi_i(\vec{n}) \frac{n_{ir}}{n_i} \min(c_i, n_i), \quad n_i = \sum_{r=1}^R n_{ir} \quad (5.23)$$

Eğer servis oranları müşteri sayılarından bağımsız ise:

$$\rho_{ir} = \frac{\lambda_{ir}}{c_i \mu_{ir}} \quad (5.24)$$

- Çıktı Hızı:  $\lambda_{ir}$  birim zamanda  $i^{inci}$  istasyonu  $r^{inci}$  sınıftan terk eden müşteri sayısıdır.

$$\lambda_{ir} = \sum_{\text{tüm } n_r > 0} \pi_{\vec{n}} \frac{n_{ir}}{n_i} \mu_i(n_i) \quad (5.25)$$

Eğer servis oranları müşteri sayılarından bağımsız ise:

$$\lambda_{ir} = c_i \rho_{ir} \mu_{ir} \quad (5.26)$$

Tek sınıflı ağlardaki Jackson ve Gordon-Newell sonuçları Baskett, Candy, Muntz ve Palacios (BCMP) tarafından 1975 yılında genişletilerek çok sınıflı açık, kapalı ve karışık kuyruk ağları için sonuçlar elde edilmiştir. Bu ağlar için şu kabuller vardır.

- Kuyruk disiplini: FIFO, LIFO-Öncelikli, Oİ(Ortak İşlem) veya Sİ(Sonsuz İşlem) sayısı olabilir.
- İşlem sürelerinin dağılımı: FIFO istasyonunun işlem süreleri üssel dağılmalı ve müşteri tiplerinden bağımsız olmalı (tüm müşteriler için aynı olmalı ( $\mu_i = \mu_{i1} = \mu_{i2} = \dots \mu_{iR}$ )). Diğer üç disiplin için değişik müşteri sınıfları değişik zamanlar olabilir.
- Bekleme yerleri sınırsız olmalı.

**Teorem 2. BCMP Teoremi:** Çok sınıflı açık, kapalı ve karmaşık ağda, ağın karar durum olasılıkları her bir istasyonun karar durum olasılıklarının çarpımı olarak şu şekilde ifade edilebilir.

$$\pi(\vec{n}_1, \vec{n}_2, \dots, \vec{n}_M) = \frac{1}{G(\vec{n})} d(\vec{n}) \prod_{i=1}^M f_i(\vec{n}_i) \quad (5.27)$$

Burada  $\vec{n} = (\vec{n}_1, \vec{n}_2, \dots, \vec{n}_M)$  dir.

BCMP teoreminin kapalı kuyruk ağları için özel hali

$$\pi(\vec{n}_1, \vec{n}_2, \dots, \vec{n}_M) = \frac{1}{G(\vec{n})} \prod_{i=1}^M f_i(\vec{n}_i) \quad (5.28)$$

Normalizasyon katsayısı  $G(\vec{n})$  şu şekildedir:

$$G(\vec{n}) = \sum_{\sum_{i=1}^M \vec{n}_i = \vec{n}} \prod_{i=1}^M f_i(\vec{n}_i) \quad (5.29)$$

$f_i(\vec{n}_i)$  fonksiyonu ise şu şekildedir:

$$f_i(\vec{n}_i) = \begin{cases} n_i! \frac{1}{\beta_i(n_i)} \left(\frac{1}{\mu_i}\right)^{n_i} \prod_{r=1}^R \frac{1}{n_{ir}!} VR_{ir}^{n_{ir}} & , FIFO istasyonlar için \\ n_i! \prod_{r=1}^R \frac{1}{n_{ir}!} \left(\frac{VR_{ir}}{\mu_{ir}}\right)^{n_{ir}} & , LIFO öncelikli ve \\ & ve SI istasyonlar için \\ \prod_{r=1}^R \frac{1}{n_{ir}!} \left(\frac{VR_{ir}}{\mu_{ir}}\right)^{n_{ir}} & , OI istasyonlar için \end{cases}$$

$n_i$  değişkeni,  $n_i = \sum_{r=1}^R n_{ir}$  şeklinde istasyondaki tüm sınıflardan müşterilerin toplamıdır.  $\beta_i(n_i)$  değişkeni ise:

$$\beta_i(n_i) = \begin{cases} n_i!, & n_i < c_i \\ c_i! c_i^{n_i - c_i}, & n_i \geq c_i \\ 1, & c_i = 1 \end{cases}$$

şekindedir.

BCMP teoreminin açık kuyruk ağları için özel hali ise:



$$\pi(\vec{n}_1, \vec{n}_2, \dots, \vec{n}_M) = \prod_{i=1}^M \pi_i(\vec{n}_i) \quad (5.30)$$

Burada;

$$\pi_i(\vec{n}_i) = \begin{cases} (1 - \rho_i) \rho_i^{n_i}, & \text{FIFO, LIFO ve SI için} \\ e^{\rho_i} \frac{\rho_i^{n_i}}{n_i!}, & \text{OI için} \end{cases}$$

$n_i$  değişkeni,  $n_i = \sum_{r=1}^R n_{ir}$  şeklinde istasyondaki tüm sınıflardan müşterilerin toplamı,

$$\rho_{ir} = \begin{cases} \lambda_r \frac{VR_{ir}}{\mu_i}, & \text{FIFO için} \\ \lambda_r \frac{VR_{ir}}{\mu_{ir}}, & \text{Diğer disiplinler için} \end{cases}$$

şeklinde hesaplanır.

## 5.5. Ortalama Değer Analizi (ODA)

Ortalama değer analizi çarpım formu olarak ifade edilebilen ağların analizinde kullanılan tam sonuç veren bir algoritmadır. ODA, çarpım formunda olan ağlar için etkin olsa da efektif servis zamanı yaklaşımı kullanılan çarpım formu şeklinde olmayan sistemler için etkin olamamaktadır. Bu yüzden blokeli ağlar için kullanılan ODA algoritması Genişletilmiş Ortalama Değer Analizi olarak genişletilmiştir.

### 5.5.1. Tek Sınıflı Blokesiz Sistemler İçin ODA

Tez çalışmasının tek sınıflı blokesiz sistemler için yapılan analizlerinde ve QueNET programının tek sınıflı blokesiz modülünde aşağıdaki ODA algoritması kullanılmıştır.

Algoritma 1:

Adım 1. Başlangıç değerlerini ata.  $i = 1, \dots, M$  için

$$\pi_i(0|0) = 1$$

Adım 2. İterasyon:  $n = 1, \dots, N$  tüm popülasyon kombinasyonlarını itere et

Adım 2.1. Her  $i = 1, \dots, M$  için işlem oranlarını hesapla

$$\mu_i(n) = \begin{cases} n\mu_i, & \text{eğer } n \leq c_i \\ c_i\mu_i, & \text{eğer } n > c_i \end{cases}$$

Adım 2.2. Her  $i = 1, \dots, M$  için istasyon  $i$ 'deki ortalama istasyon zamanlarını hesapla

$$W_i(n) = \sum_{j=1}^n \frac{j}{\mu_i(j)} \pi_i(j-1|n-1)$$

Adım 2.3. Sistem çıktı hızını hesapla

$$\lambda(n) = \frac{n}{\sum_{i=1}^M W_i(n)V_i}$$

Adım 2.4.  $i = 1, \dots, M$  için koşullu olasılıkları hesapla

$$\pi_i(j|n) = \frac{\lambda(n)}{\mu_i(j)} \pi_i(j-1|n-1)V_i, \quad \text{her } j = 1, \dots, n \text{ için}$$

$$\pi_i(0|n) = 1 - \sum_{j=1}^n \pi_i(j|n) \quad j = 0 \text{ için}$$

### 5.5.2. Tek Sınıflı Blokeli Sistemler İçin ODA

Tek sınıflı blokeli sistemler için Ek 1'deki QueNET programı vasıtasıyla analizlerin gerçekleştirildiği tek sınıflı blokeli sistemler için kullanılan ODA algoritması aşağıdaki gibidir:

Algoritma 2:

Adım 1. Başlangıç değerlerini ata.  $i = 1, \dots, M$  için

$$\pi_i(\vec{0}|\vec{0}) = 1, \quad P_i(0) = 0$$

Adım 2. İterasyon:  $n = 1, \dots, N$  tüm popülasyon kombinasyonlarını itere et

Adım 2.1. Her  $i = 1, \dots, M$  için işlem oranlarını hesapla

$$\mu_i(n) = \begin{cases} n\mu_i, & \text{eğer } n \leq c_i \\ c_i\mu_i, & \text{eğer } n > c_i \end{cases}$$

Adım 2.2. Her  $i = 1, \dots, M$  için efektif servis zamanlarını hesapla

$$\frac{1}{\mu_i^e(n)} = \begin{cases} \frac{1}{\mu_i}, & n = 1 \text{ için} \\ \frac{1}{\mu_i(n)} + P_{i+1}(n-1) \frac{1}{\mu_h(n)}, & n = 2, \dots, N \text{ için} \end{cases}$$

Adım 2.3. Her  $i = 1, \dots, M$  için istasyon  $i$ 'deki ortalama istasyon zamanlarını hesapla

$$W_i(n) = \sum_{j=1}^n \frac{j}{\mu_i^e(n)} \pi_i(j-1|n-1)$$

Adım 2.4. Sistem çıktı hızını hesapla

$$\lambda(n) = \frac{n}{\sum_{i=1}^M W_i(n) V_i}$$

Adım 2.5. Her  $i = 1, \dots, M$  için koşullu olasılıkları hesapla

$$\pi_i(j|n) = \frac{\lambda(n)}{\mu_i^e(n)} \pi_i(j-1|n-1) V_i, \quad \text{her } j = 1, \dots, n \text{ için}$$

$$\pi_i(0|n) = 1 - \sum_{j=1}^n \pi_i(j|n) \quad j = 0 \text{ için}$$

Adım 2.6. Her  $i = 1, \dots, M$  için bloke olasılığını hesapla

$$P_i(n) = 1 - \sum_{j=0}^{K_i} \pi_i(j|n)$$

### 5.5.3. Çok Sınıflı Blokesiz Sistemler İçin ODA

Çalışmalarda çok sınıflı blokesiz sistemler de incelenmiştir. QueNET programının son modülü olan bu sistemler için algoritma aşağıda verildiği gibidir:

Algoritma 3:

Adım 1. Başlangıç değerlerini ata.  $i = 1, \dots, M$  için

$$\pi_i(\vec{0}|\vec{0}) = 1$$

Adım 2. İterasyon:  $\vec{n} = \vec{1}, \dots, \vec{N}$  tüm popülasyon kombinasyonlarını itere et

Adım 2.1. Her  $i = 1, \dots, M$  ve  $r = 1, \dots, R$  için işlem oranlarını hesapla

$$\mu_{ir}(n) = \begin{cases} n\mu_i, & \text{eğer } n \leq c_i \\ c_i\mu_i, & \text{eğer } n > c_i \end{cases}$$

Adım 2.2. Her  $i = 1, \dots, M$  için istasyon  $i$ 'deki ortalama istasyon zamanlarını hesapla

$$W_{ir}(n) = \sum_{j=1}^n \frac{j}{\mu_{ir}(j)} \pi_i(j-1|\vec{n}-\vec{1}), \quad n = \sum_{r=1}^R n_r$$

Adım 2.3. Sistem çıktı hızını hesapla

$$\lambda_r(\vec{n}) = \frac{k_r}{\sum_{i=1}^M W_{ir}(n) V_{ir}}$$

Adım 2.4.  $i = 1, \dots, M$  için koşullu olasılıkları hesapla

$$\pi_i(j|\vec{n}) = \begin{cases} \sum_{r=1}^R \frac{\lambda_r(\vec{n})}{\mu_{ir}(j)} \pi_i(j-1|\vec{n}-\vec{1}) V_{ir}, & \text{her } j = 1, \dots, n \text{ için} \\ 1 - \sum_{l=1}^n \pi_i(l|\vec{n}), & j = 0 \text{ için} \end{cases}$$

Sistem analizlerinde kullanılan başlıca algoritmalar bunlardır. Sonraki bölümlerde bu algoritmalar kullanılarak yapılan testler verilecektir.

## 5.6. Esnek İmalat Sistemleri Kuyruk Modeli Performansının Değerlendirilmesi

EİS modelleri genellikle tek sınıflı sınırsız bekleme yerine sahip kuyruk ağları ile modellenmiştir. Fakat gerçek sistemlerde birden fazla ürün grubu ve iş akışı bulunmaktadır. Bu tür sistemlerin matematiksel olarak modellenmesi çok zordur. Bu nedenle çalışmanın bu bölümünde çok sınıflı sınırsız bekleme yerine sahip kapalı

kuyruk ağları kullanılarak EİS'in performans değerlendirmesi yapılmıştır. Otomotiv sektöründe faaliyet gösteren bir firmanın ve Kırıkkale Üniversitesi Bilgisayarla Bütünleşik İmalat Laboratuvarı EİS hücrelerinin simülasyon modelleri oluşturulmuştur. Bu simülasyon testlerinden elde edilen performans değerleri, analitik olarak elde edilen verilerle karşılaştırılmıştır. Çeşitli imalat sistemleri için çok sınıflı kapalı kuyruk ağları kullanılarak performansın ölçülebilirliği araştırılmıştır.

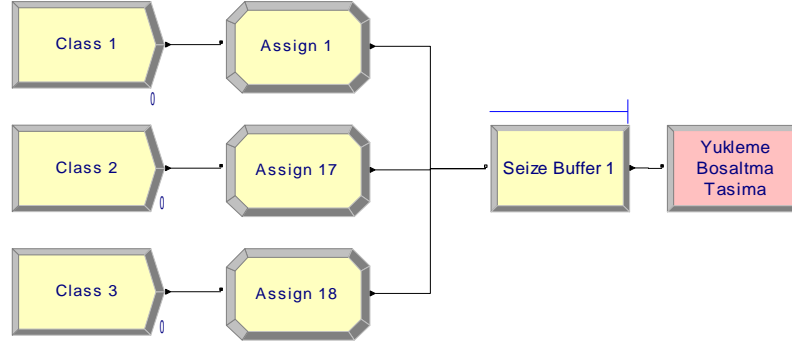
Simülasyon modelinin test edilmesi için kullanılan analitik algoritma çok sınıflı sınırsız bekleme yerine sahip kapalı kuyruk ağları için geliştirilmiştir (Yüzükırmızı, 2009). Ayrıca çalışmada tek sınıflı sistemlerin yer aldığı ve sınırlı bekleme yerine sahip algoritmaların da yer alacağı bir yazılım geliştirilmiştir. Simülasyon sonuçları bu yazılım kullanılarak elde edilen analitik verilerle karşılaştırılmıştır.

Analitik denemeler için geliştirilen yazılım Ek 1'de verilmiştir. Program sayesinde sonuçlar yaklaşık 0,01 sn'de alınabilmektedir.

### **5.6.1. Simülasyon Modelleri**

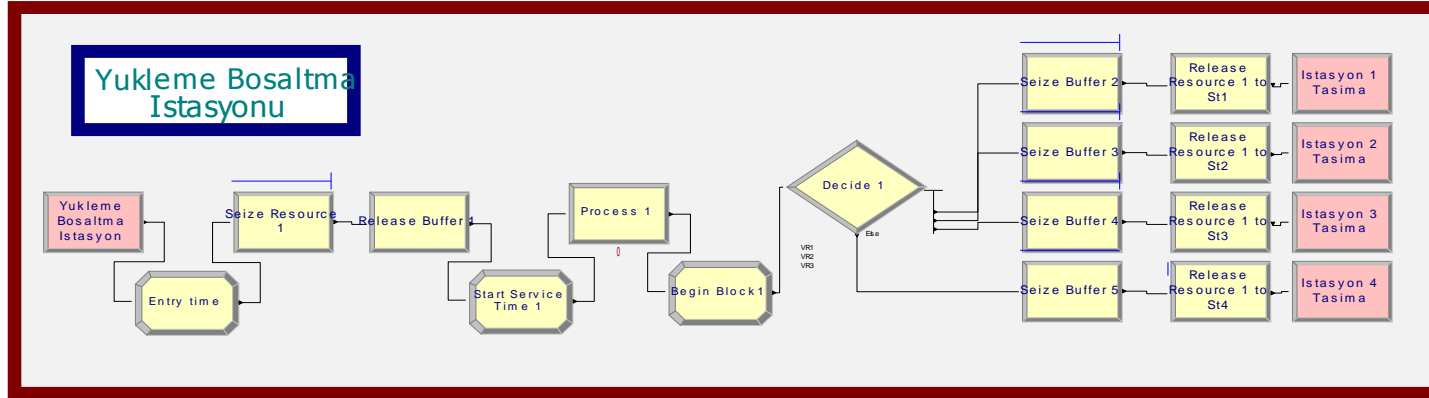
Bu çalışmada Kırıkkale Üniversitesi CIM laboratuvarının ve otomotiv sektöründe faaliyet gösteren bir üretim tesisin CIM hücrelerinin ARENA 11.0 programında simülasyon modeli hazırlanmıştır. Kırıkkale Üniversitesi (KÜ) CIM hücresi Bölüm 4.1'deki gibi modellenirken, Üretim tesisi CIM hücresi bir yükleme boşaltma istasyonu ve işlem sıraları aynı olan 4 makineden oluşmaktadır.

Üretim tesisi CIM hücresinde ürünlerin gelişlerini temsil eden ARENA modüler yapı Şekil 5.3'te verilmiştir. 3 tip ürün öncelikle yükleme boşaltma istasyonunun bekleme yerine gelmekte ve sistem uygun olduğunda istasyona geçmektedir.

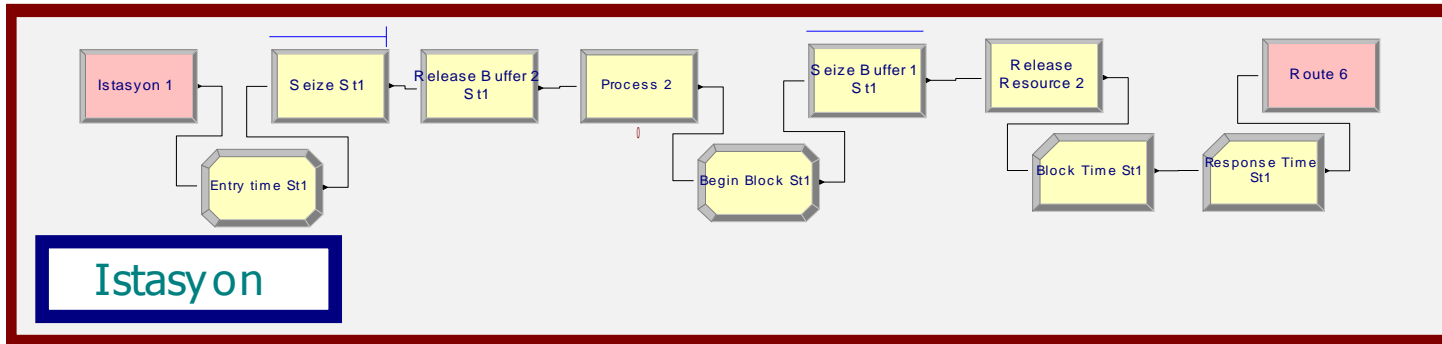


**Şekil 5.5.1.** Üretim tesisi ürün gelişleri modüler yapısı

Yükleme boşaltma istasyonuna alınan ürün sistemde bulunan 4 tezgâhtan birinin bekleme yerine yerleştirildikten sonra, uygun durum sağlandığında tezgâha geçerek işlem görmektedir. Yükleme boşaltma istasyonunun modüler yapısı Şekil 5.4'te verilmiştir.



Şekil 5.5.2. Yüklem boşaltma istasyonu modüler yapısı



Şekil 5.5.3. İstasyonların modüler yapısı

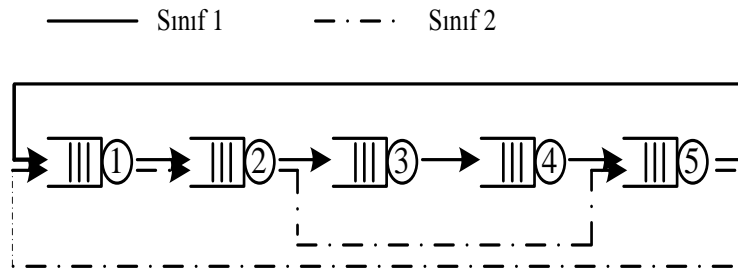


Şekil 5.5'te üretim tesisinde yer alan istasyonlar için modüler yapı verilmiştir. Ürünler taşıma sistemi vasıtasıyla ilgili tezgâhlara gelmekte önce bekleme yerine alınıp, sonra tezgâha alınmakta ve gerekli işlemler yapılmaktadır. Daha sonra gerekli istatistikî bilgilerin elde edilmesi için gerekli modüller çalışmakta ve ürün sistemi terk etmektedir.

Simülasyon çalışmaları 1000 dakikasını istatistikî ısınma süresi olmak üzere 11000 dakika ve 10 tekrarlama ile çalıştırılmıştır. Isınma süresi verilmesindeki amaç sistemin kararlı duruma geldikten sonra istatistik olarak daha doğru sonuçlar elde etmektir. Tekrarlamalar ise farklı rassal durumlar için sistemi denemek için yapılmıştır.

### 5.6.2. Deneysel Analizler

Hem KÜ hem de üretim tesisi EİS hücreleri çok sınıflı kapalı kuyruk ağları olarak modellenmiştir. Analizlerde kullanılan KÜ CIM hücresi için ürün tipleri ve iş akışları Şekil 4.2'de verilen akışlardır. KÜ CIM hücresinin Bölüm 4.1'de bahsedilen iki ürün tipi için, Şekil 5.6'da simülasyon modelinde kullanılan kuyruk ağı modeli verilmiştir.

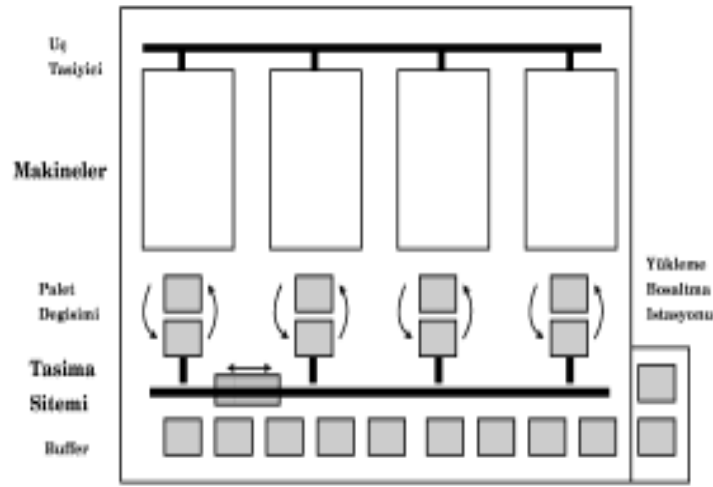


**Şekil 5.5.4.** Kırıkkale Üniversitesi CIM hücresi kuyruk ağı modeli

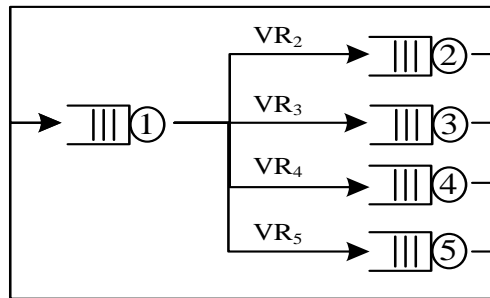
Şekil 5.7'de modellenen üretim tesisi CIM hücresinin sistem görünümü verilmiştir. Bu sistemde ürünler yükleme boşaltma istasyonunda taşıma sistemine yüklenmekte,

daha sonra ürün sınıfına göre boş olan istasyona yerleştirilmekte, sonra tekrar taşıma sistemi ile bekleme yerlerine (buffer) alınmaktadır.

Bir otomotiv üreticisi olan firmada gözlemlendiği gibi eşit işleri yapan eşit özellikte dört makine bulunmaktadır. Bu sisteme ait kuyruk modeli Şekil 5.8’de verilmiştir. Burada yine iki tip ürün olup, sisteme yükleme boşaltma istasyonundan giren ürünler dört istasyona eşit olasılıkla (ziyaret oranı ile) gelmektedir.



Şekil 5.5.5. Üretim tesisi CIM hücresi



Şekil 5.5.6. Üretim tesisi kuyruk ağı modeli

Yapılan çeşitli analizlerde, sistem parametrelerinin (müşteri sayısı, işlem süreleri, işlem süreleri dağılımları vb) değişkenliği incelenmiş, simülasyon sonucu ile analitik

model arasındaki fark üretim tesisi CIM hücresi ve KÜ CIM hücresi için analiz edilmiştir.

### 5.6.2.1. Müşteri/Ürün Sayılarının Analizi

Müşteri/ürün sayıları sistemin bloke olup olmaması için özenle belirlenmesi gereken parametrelerden biridir. Sistemin müşteri sayısı minimum bekleme yeri kapasitesinden az ise sistem bloke olmayan, aksi durumda ise blokeli bir sistem olarak adlandırılır. Bu sebeple sistemde aynı anda bulunması gereken maksimum müşteri/ürün sayısının tasarım aşamasında belirlenmesi sistem faaliyete geçtiğinde ortaya çıkacak problemleri en aza indirecektir.

Modellenen her iki sistemde de işlem oranları sabit tutularak sadece sınıflarda bulunan müşteri/ürün sayılarının değiştirilmesi ile 33 adet simülasyon deneyi yapılmıştır. Her iki sistem için deney parametreleri Çizelge 5.1 ve 5.2’de verilmiştir.

**Çizelge 5.5.1.** Üretim tesisi deney parametreleri

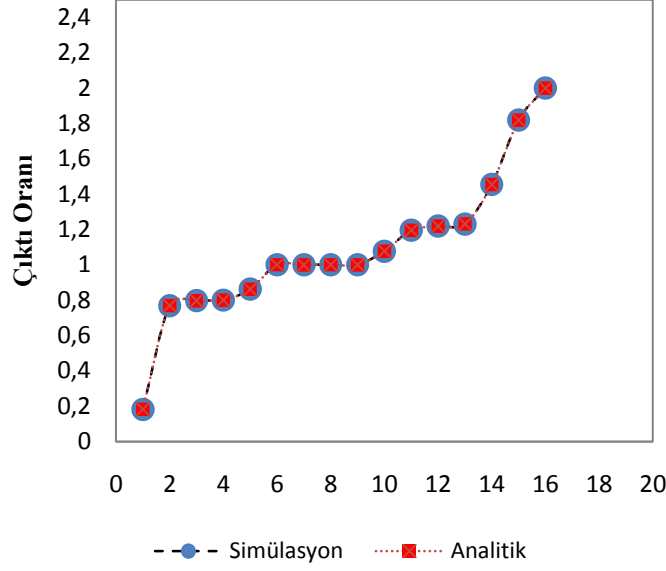
$\mu_1$	$\mu_2$	$\mu_3$	$\mu_4$	$\mu_5$	VR <sub>2</sub>	VR <sub>3</sub>	VR <sub>4</sub>	VR <sub>5</sub>
2	3	4	2	5	0.25	0.25	0.25	0.25

**Çizelge 5.5.2.** KÜ CIM deney parametreleri

$\mu_1$	$\mu_2$	$\mu_3$	$\mu_4$	$\mu_5$
10	20	20	10	10

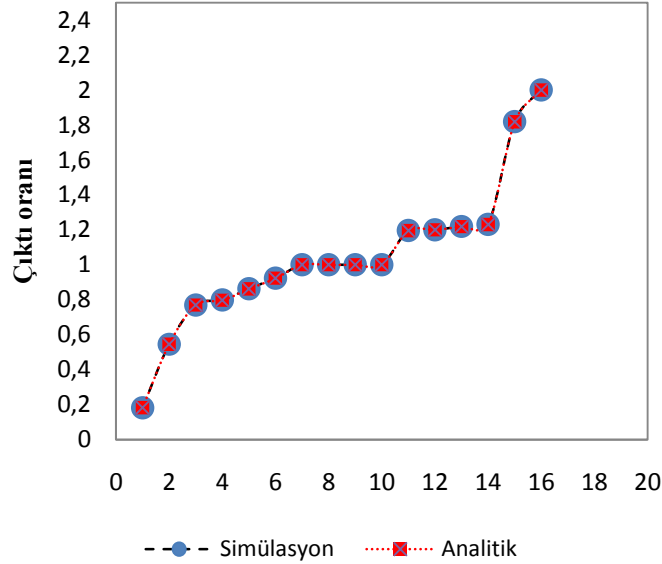
Çizelge 5.1’de istasyonların işlem oranları ve ziyaret oranlarını vermektedir. Üretim tesisi CIM hücresinde işler operatör tarafından belirlenen sıralama ile işlem görmektedir. Bu durumda bir ürünün herhangi bir istasyona gelme ihtimali yaklaşık olarak eşit olmaktadır. Bu yüzden ziyaret oranları eşit alınmıştır. Birinci istasyon yükleme boşaltma istasyonu olduğu için her ürün bu istasyona gelmek zorunda

kalmaktadır ki bu istasyonun ziyaret oranı bir olacaktır. Çizelge 5.2 ise KÜ CIM hücresinde gerçekleştirilen deneylerde kullanılan işlem oranlarını vermektedir.



Test	Simülasyon	Analitik	$\Delta\%$
1	0,182	0,1818	0,11%
2	0,7696	0,7692	0,05%
3	0,7975	0,7969	0,08%
4	0,8005	0,7999	0,08%
5	0,8627	0,8615	0,14%
6	1,0003	1	0,03%
7	1,0004	0,9999	0,05%
8	1,0004	1	0,04%
9	1,0005	0,9999	0,06%
10	1,077	1,0769	0,01%
11	1,1959	1,1954	0,04%
12	1,2194	1,2182	0,10%
13	1,231	1,2307	0,02%
14	1,4553	1,4545	0,06%
15	1,8189	1,8181	0,04%
16	2,0008	1,9999	0,05%

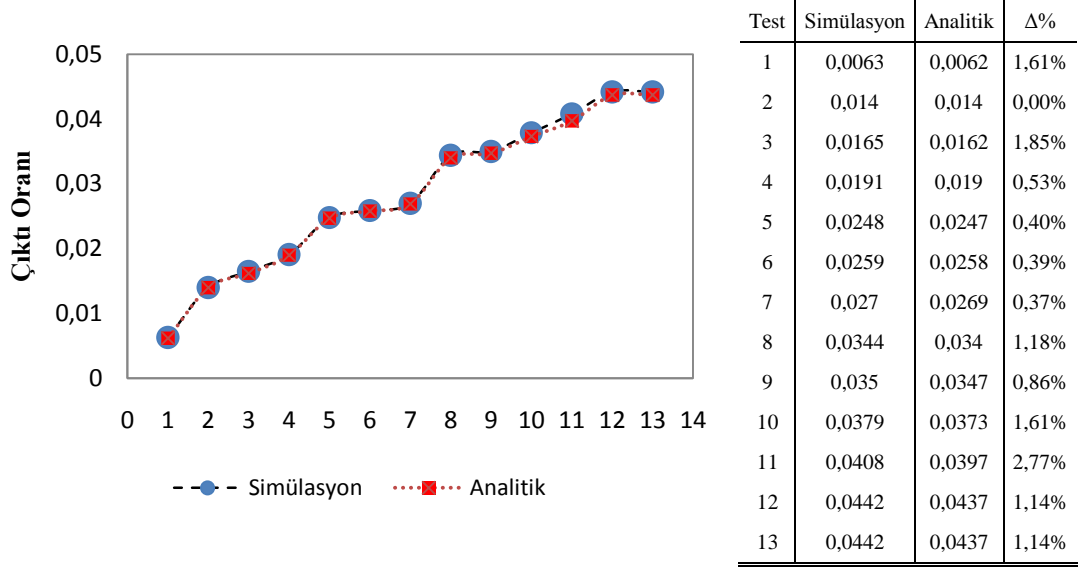
Şekil 5.5.7. Üretim tesisi CIM hücresi birinci ürün sınıfı müşteri/ürün sayıları analizi



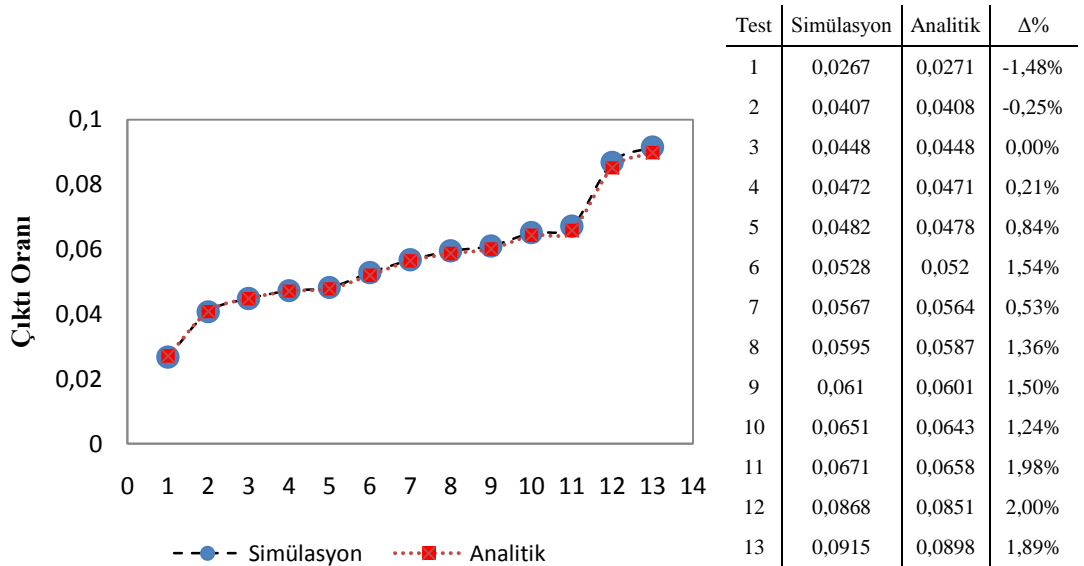
Test	Simülasyon	Analitik	$\Delta\%$
1	0,1818	0,1818	0,00%
2	0,5455	0,5454	0,02%
3	0,7698	0,7692	0,08%
4	0,7987	0,7969	0,23%
5	0,8638	0,8615	0,27%
6	0,9238	0,923	0,09%
7	1,0003	0,9999	0,04%
8	1,0004	0,9999	0,05%
9	1,0004	1	0,04%
10	1,0005	1	0,05%
11	1,1971	1,1954	0,14%
12	1,2003	1,1999	0,03%
13	1,2194	1,2182	0,10%
14	1,2312	1,23	0,10%
15	1,8188	1,8181	0,04%
16	2,0008	1,9999	0,05%

Şekil 5.5.8. Üretim tesisi CIM hücresi ikinci ürün sınıfı müşteri/ürün sayıları analizi

Şekil 5.9-5.12’de görüldüğü üzere hem üretim tesisi hem de KÜ CIM hücresi için simülasyon modeli ile analitik model sıfır hataya yakın olarak sonuçlanmıştır. Grafiklerin birbiri üzerinde çıkmış olması analiz sonuçlarının güvenilirliğinin göstergesidir. Nitekim üretim tesisi hücresi için izafi yüzdesel fark en çok %0,27, ortalama %0,07, KÜ CIM hücresi için ise ortalama %1 olmuştur.



Şekil 5.5.9. KÜ CIM hücresi birinci ürün sınıfı müşteri/ürün sayıları analizi



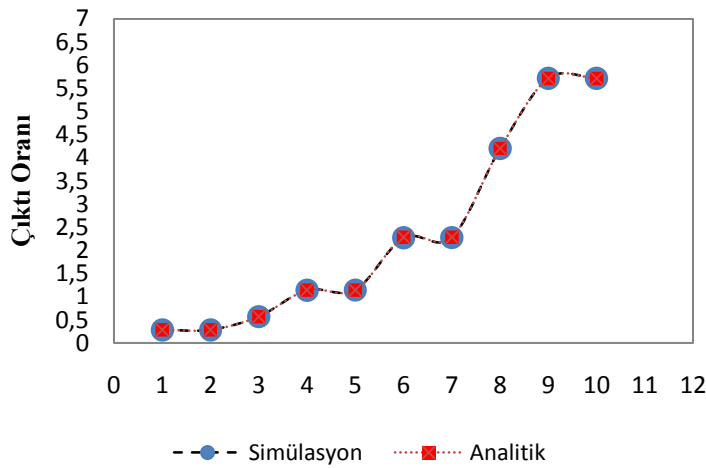
Şekil 5.5.10. KÜ CIM hücresi ikinci ürün sınıfı müşteri/ürün sayıları analizi

Müşteri/ürün sayılarının doğru ve güvenilir belirlenmesi sistem performansının iyileştirilmesi için önemli bir parametredir. Bu durum simülasyon ve analitik yöntemler kullanılarak tespit edilmiştir.

### 5.6.2.2. İşlem Oranları Analizi

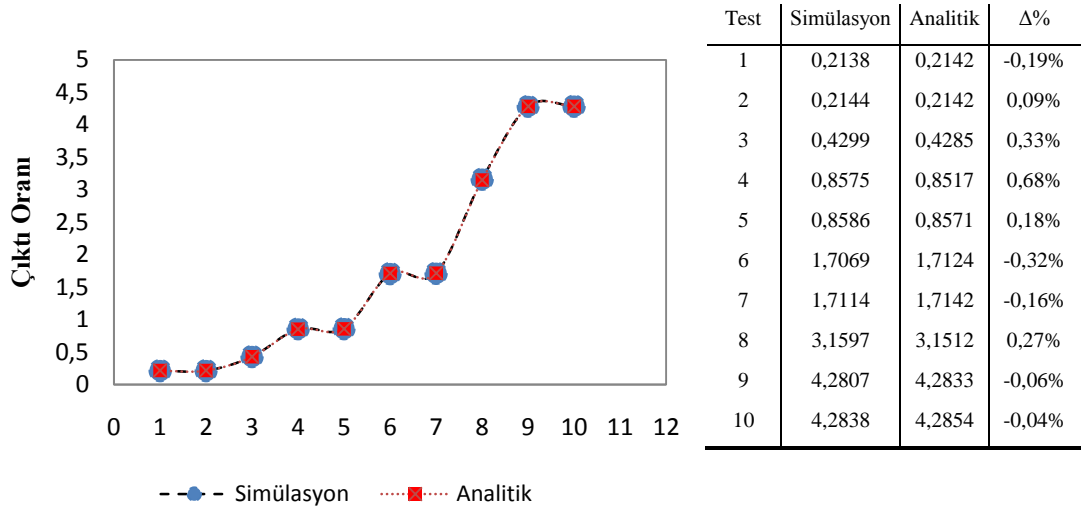
Bir EİS sisteminin bloke olmadan çalışabilmesi işlem ve taşıma sürelerinin dengeli olmasına bağlıdır. Eğer bir istasyonda ürün işlem süresi çok uzun sürerse, aynı anda istasyona gelen diğer ürünlerin beklemesine neden olacaktır. Bekleme yeri kapasitesinin yetmemesi durumunda uzun işlem süresi sistemi bloke edecek ve ürün sonraki istasyonlara ilerleyemeyecektir. Sistem performansını etkileyen bu durumun analizi bu bölümde yapılmıştır.

Üretim tesisi CIM hücresi için sınıflardaki ürün miktarları 8 ve 6, KÜ CIM hücresi için ise 4 ve 8 olmak üzere modellerde üssel dağılımlı değişik işlem oranları için 22 adet deney yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 5.13-5.16'da verilmiştir.



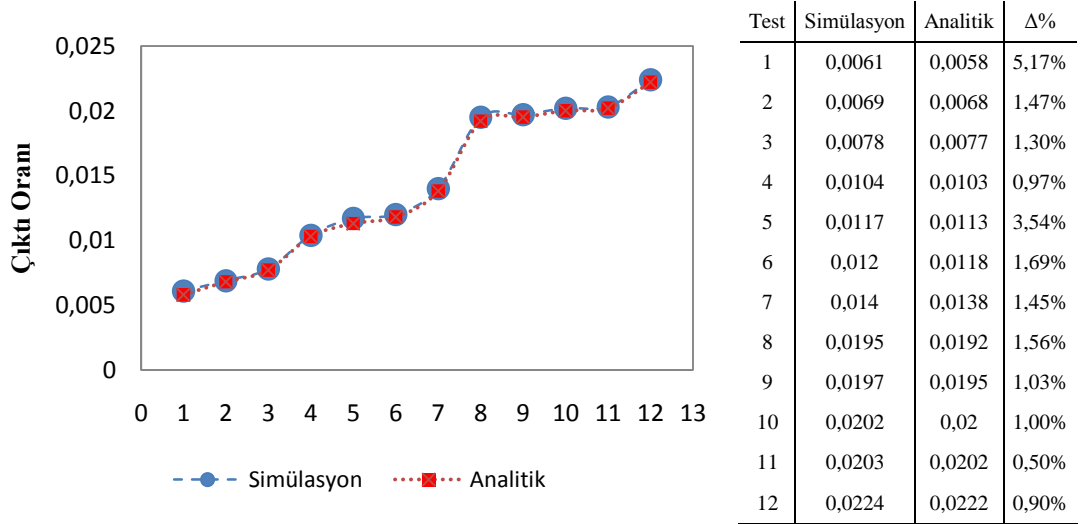
Test	Simülasyon	Analitik	$\Delta\%$
1	0,285	0,2857	-0,25%
2	0,2857	0,2857	0,00%
3	0,5733	0,5714	0,33%
4	1,1433	1,1428	0,04%
5	1,1461	1,1428	0,29%
6	2,2739	2,2832	-0,41%
7	2,2793	2,2856	-0,28%
8	4,2025	4,2016	0,02%
9	5,7137	5,7139	0,00%
10	5,7167	5,7114	0,09%

Şekil 5.5.11. Üretim tesisi CIM hücresi birinci ürün sınıfı işlem oranları analizleri

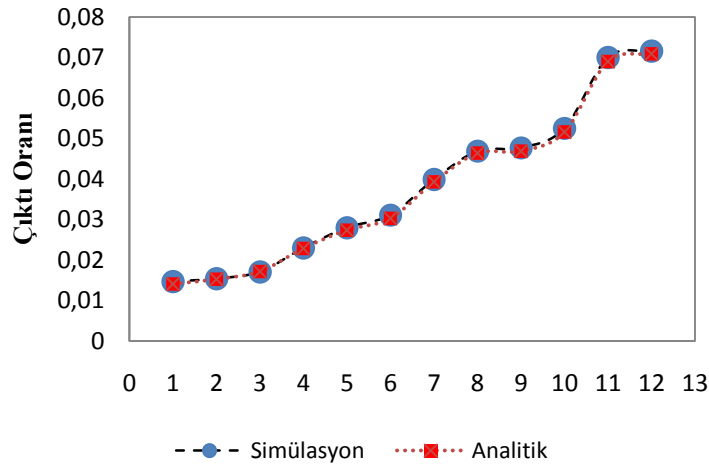


**Şekil 5.5.12.** Üretim tesisi CIM hücresi ikinci ürün sınıfı işlem oranları analizleri

Üretim tesisi CIM hücresi için işlem oranları 1 ile 10 dk arasında, KÜ CIM hücresi için 10 ile 50 dk birim arasında sürelerle deneyler gerçekleştirilmiştir. Üretim tesisi CIM hücresi %0,03 gibi çok düşük bir hata oranı ile sonuçlanırken, KÜ CIM hücresi %1,61 hata oranı ile sonuçlanmıştır. Her iki durumda kabul edilebilir değerler almıştır.



**Şekil 5.5.13.** KÜ CIM hücresi işlem birinci ürün sınıfı işlem oranları analizleri



Test	Simülasyon	Analitik	$\Delta\%$
1	0,0147	0,0141	4,26%
2	0,0154	0,0153	0,65%
3	0,0171	0,0172	-0,58%
4	0,023	0,0229	0,44%
5	0,028	0,0274	2,19%
6	0,0311	0,0303	2,64%
7	0,0399	0,0393	1,53%
8	0,0469	0,0464	1,08%
9	0,0477	0,0469	1,71%
10	0,0525	0,0516	1,74%
11	0,07	0,069	1,45%
12	0,0716	0,0709	0,99%

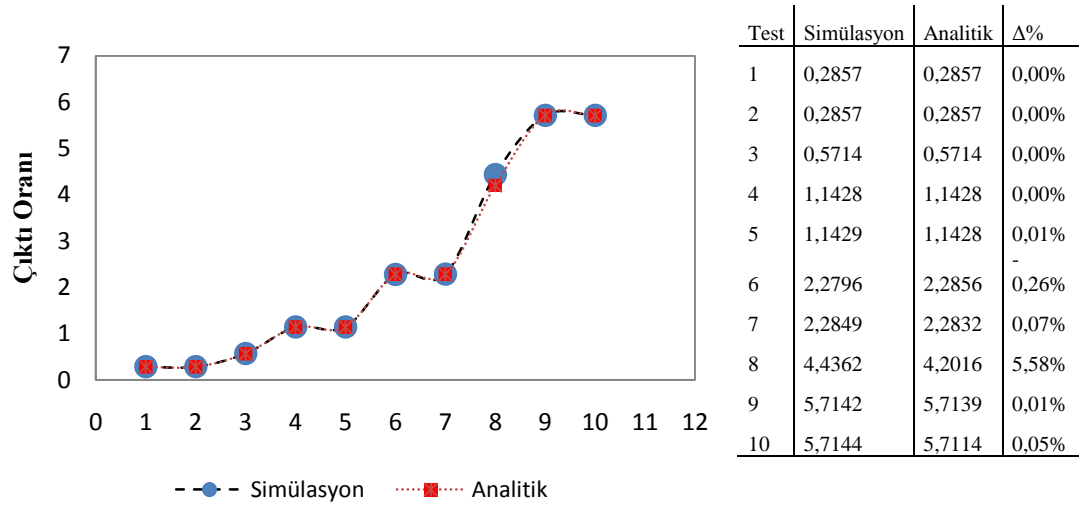
**Şekil 5.5.14.** KÜ CIM hücresi işlem ikinci ürün sınıfı oranları analizleri

### 5.6.2.3. İşlem Zamanları Dağılımının Analizi

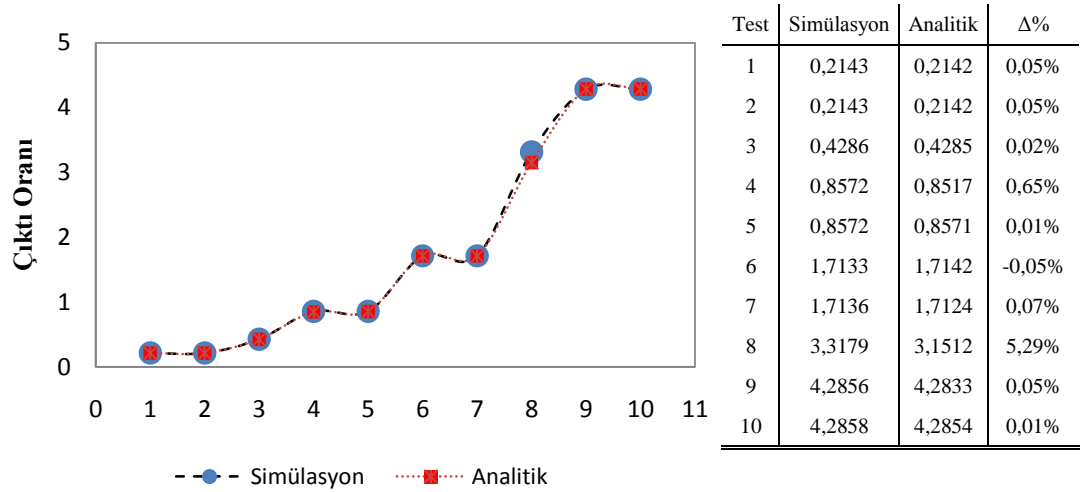
ODA algoritmasında işlem zamanları üssel dağılım varsayımına göre çalışmaktadır. Fakat gerçekte işlem zamanları sabit veya başka bir dağılıma uygun olabilmektedir. Ancak işlem zamanlarının deterministik kabul edilmesi modelleme için oldukça zordur. Bu bölümde işlem zamanlarının sabit veya normal dağılım olmasının üssel işlem zamanlı ODA algoritması sonuçları ile karşılaştırması yapılmıştır.

Ürün miktarları Bölüm 5.6.2.2'deki gibi alınarak, her iki sistem için de işlem zamanlarının sabit süreler ve normal dağılım olduğu durumlar için toplam 44 adet deney yapılmıştır. Şekil 5.17-5.20 sabit işlem zamanlarında elde edilen sonuçları gösterirken Şekil 5.21-5.24 normal dağılım olması durumundaki sonuçları göstermektedir. Yapılan dağılım analizlerinin toplu sonuçları ise Şekil 5.25-5.28'da verilmiştir.

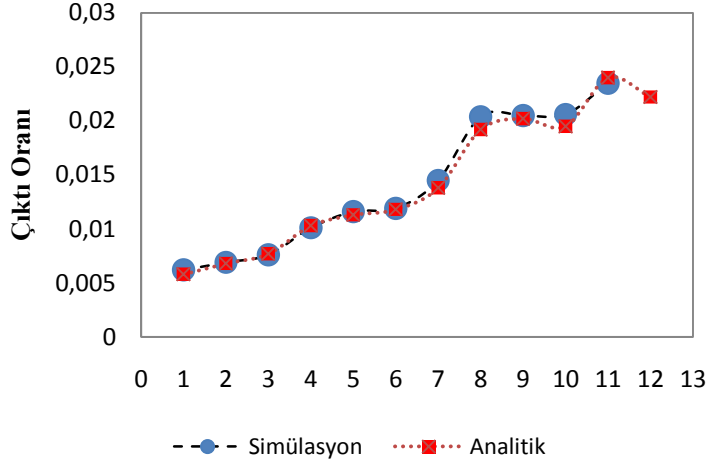




Şekil 5.5.15. Üretim tesisi CIM hücresi birinci ürün sınıfı sabit işlem zamanları analizleri

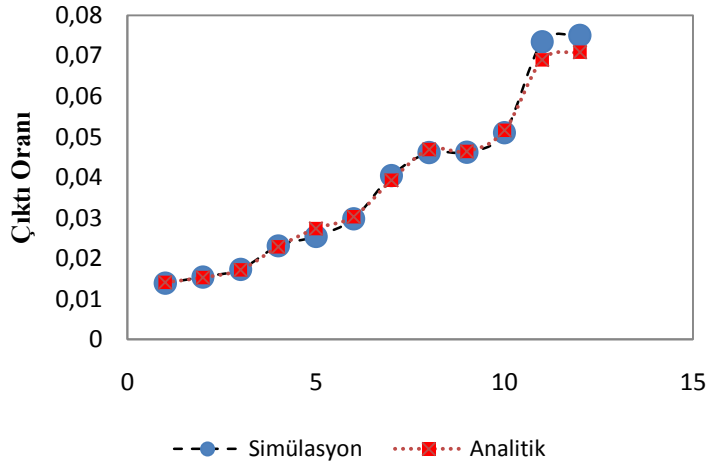


Şekil 5.5.16. Üretim tesisi CIM hücresi ikinci ürün sınıfı sabit işlem zamanları analizleri



Test	Simülasyon	Analitik	$\Delta\%$
1	0,0061	0,0058	5,17%
2	0,0069	0,0068	1,47%
3	0,0078	0,0077	1,30%
4	0,0104	0,0103	0,97%
5	0,0117	0,0113	3,54%
6	0,012	0,0118	1,69%
7	0,014	0,0138	1,45%
8	0,0195	0,0192	1,56%
9	0,0197	0,0195	1,03%
10	0,0202	0,02	1,00%
11	0,0203	0,0202	0,50%
12	0,0224	0,0222	0,90%

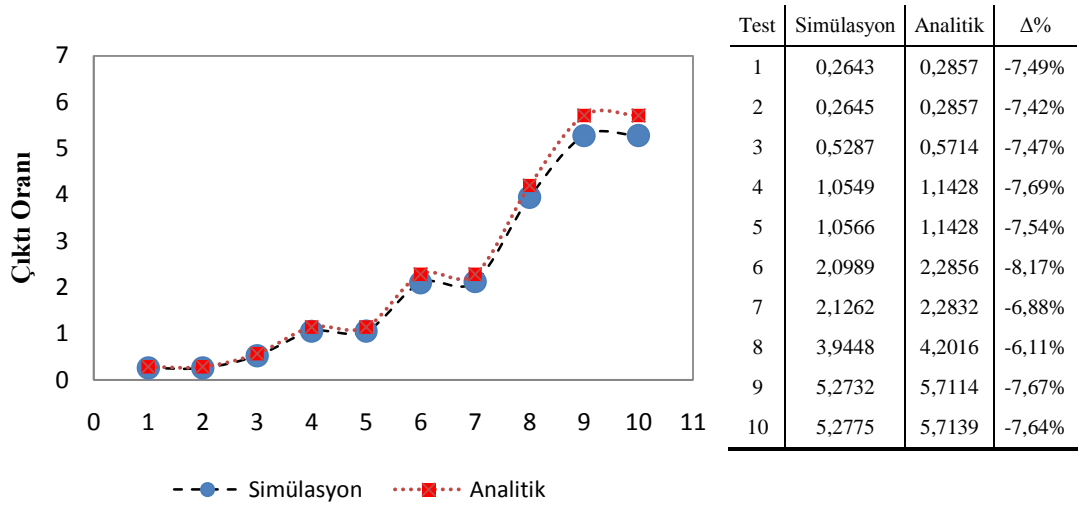
Şekil 5.5.17. KÜ CIM hücresi birinci ürün sınıfı sabit işlem zamanları analizleri



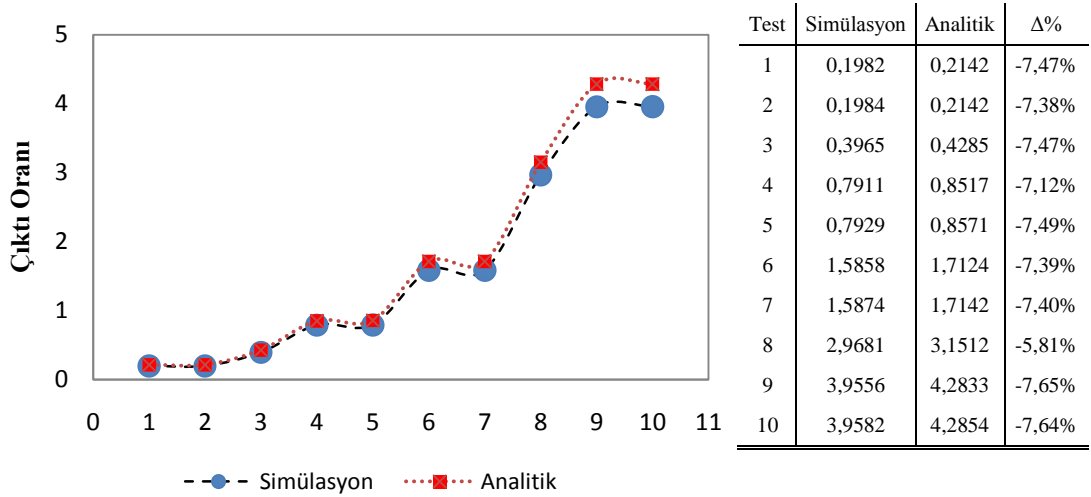
Test	Simülasyon	Analitik	$\Delta\%$
1	0,0147	0,0141	4,26%
2	0,0154	0,0153	0,65%
3	0,0171	0,0172	-0,58%
4	0,023	0,0229	0,44%
5	0,028	0,0274	2,19%
6	0,0311	0,0303	2,64%
7	0,0399	0,0393	1,53%
8	0,0469	0,0464	1,08%
9	0,0477	0,0469	1,71%
10	0,0525	0,0516	1,74%
11	0,07	0,069	1,45%
12	0,0716	0,0709	0,99%

Şekil 5.5.18. KÜ CIM hücresi ikinci ürün sınıfı sabit işlem zamanları analizleri

Sabit işlem zamanlı sonuçlar üretim tesisi için %0,58, KÜ için %1,69 hata oranı ile elde edilmiştir. Bu durumda gerçek sistemlerde işlem zamanlarının sabit olması durumunda dahi analitik model ve simülasyon modelinin etkin çalışabileceği anlaşılmaktadır.

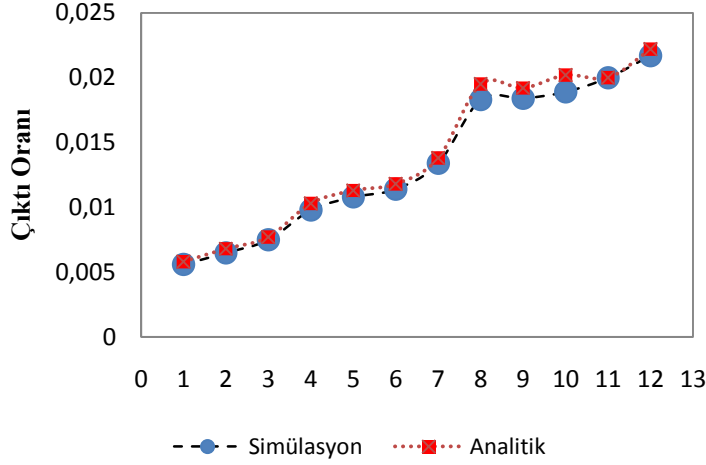


**Şekil 5.5.19.** Üretim tesisi CIM hücresi birinci ürün sınıfı normal dağılımlı işlem zamanları analizleri



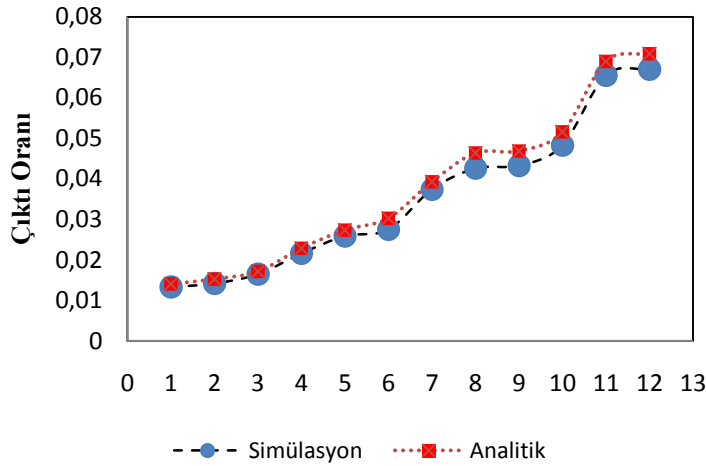
**Şekil 5.5.20.** Üretim tesisi CIM hücresi ikinci ürün sınıfı normal dağılımlı işlem zamanları analizleri

İşlem oranlarının normal dağılıma uyması durumunda üretim sistemi için ortalama %7, KÜ için %4,99 hata payı elde edilmiştir. Üretim tesisi için bu durumun gerçekleşmesinde, gerçek sistemlerde taşıyıcı sistem sürelerindeki değişkenliğin etkisi de görülmektedir.



Test	Simülasyon	Analitik	$\Delta\%$
1	0,0056	0,0058	-3,45%
2	0,0065	0,0068	-4,41%
3	0,0075	0,0077	-2,60%
4	0,0098	0,0103	-4,85%
5	0,0108	0,0113	-4,42%
6	0,0114	0,0118	-3,39%
7	0,0134	0,0138	-2,90%
8	0,0183	0,0195	-6,15%
9	0,0184	0,0192	-4,17%
10	0,0189	0,0202	-6,44%
11	0,02	0,02	0,00%
12	0,0217	0,0222	-2,25%

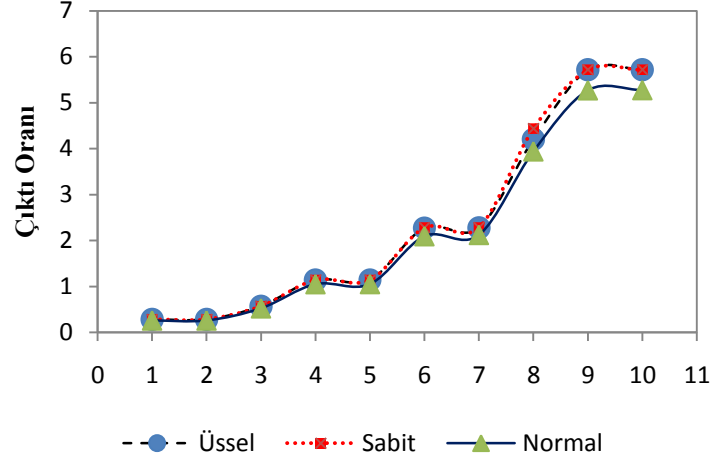
**Şekil 5.5.21.** KÜ CIM hücresi birinci ürün sınıfı normal dağılımlı işlem zamanları analizleri



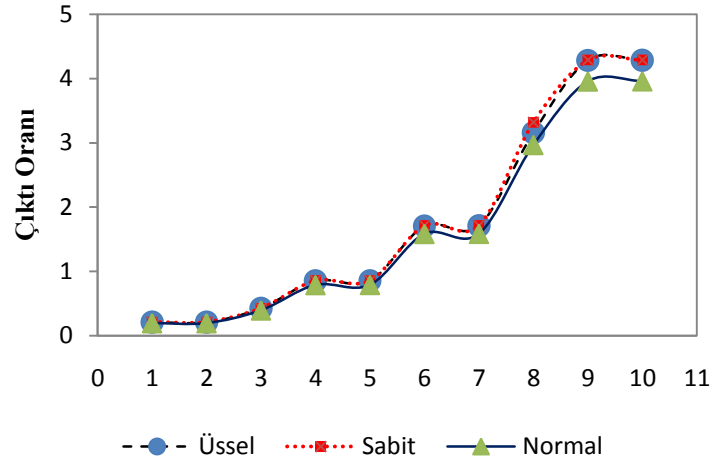
Test	Simülasyon	Analitik	$\Delta\%$
1	0,0133	0,0141	-5,67%
2	0,0142	0,0153	-7,19%
3	0,0165	0,0172	-4,07%
4	0,0216	0,0229	-5,68%
5	0,0259	0,0274	-5,47%
6	0,0275	0,0303	-9,24%
7	0,0374	0,0393	-4,83%
8	0,0426	0,0464	-8,19%
9	0,0433	0,0469	-7,68%
10	0,0483	0,0516	-6,40%
11	0,0656	0,069	-4,93%
12	0,0671	0,0709	-5,36%

**Şekil 5.5.22.** KÜ CIM hücresi ikinci ürün sınıfı normal dağılımlı işlem zamanları analizleri

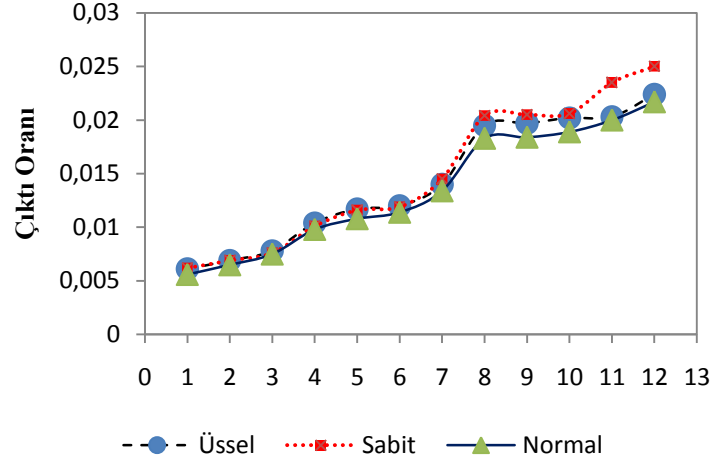
Tüm dağılımların karşılaştırmalı sonuçları üretim tesisi hücresi için ortalama %4,9, KÜ hücresi için %4,2 olarak gerçekleşmiştir. Kuyruk modeli üssel varsayımlarla çalışmasına rağmen, normal ve sabit zamanlar için de kullanılabilirliği analizlerle gösterilmiştir.



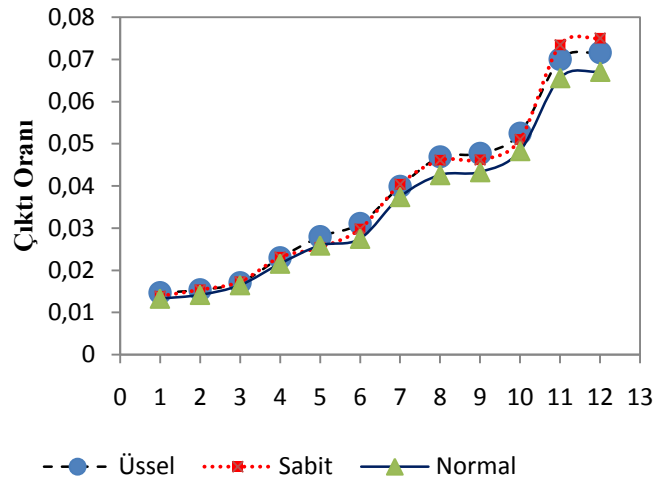
Şekil 5.5.23. Üretim tesisi birinci ürün sınıfı işlem zamanları dağılımları analizi



Şekil 5.5.24. Üretim tesisi ikinci ürün sınıfı işlem zamanları dağılımları analizi



Şekil 5.5.25. KÜ CIM hücresi birinci ürün sınıfı işlem zamanları dağılımları analizi



Şekil 5.5.26. KÜ CIM hücresi ikinci ürün sınıfı işlem zamanları dağılımları analizi

Bu bölümde EİS'in kuyruk ağı ile modellenmesi, kuyruk ağlarına ait matematiksel formalar, yapılan simülasyon çalışmaları ve analitik incelemelerin karşılaştırmalı sonuçları üzerinde durulmuştur. Değişik üretim ve CIM sistemlerinin çok sınıflı kapalı kuyruk ağları kullanılarak performans değerlendirmesi yapılmıştır.

Performans ölçütü çıktı oranları olarak belirlenmiş ve modellenen sistemlerin genel olarak değerlendirmesi yapılmıştır.

Simülasyon ve analitik testler sonucunda hata payları literatürde kabul gören %5'lik sınırı genellikle geçmemiştir. Bu durum kullanılan analitik modelin etkinliğini göstermektedir.

## 6. VAKA ANALİZLERİ

Bu bölümünde vaka analizleri ile Esnek İmalat Sistemlerinin diğer imalat sistemleri arasındaki yeri ve EİS tasarım modellerinin karşılaştırmalı sonuçları verilmiştir. TAI için bir kuyruk ağı modeli oluşturulmuş ve bu model yapılan simülasyon çalışmaları ve kuyruk ağı analitik değerlendirmesi ile test edilmiştir.

Çalışmanın bu bölümünde, TAI 'de uygulanmakta olan geleneksel imalat yöntemi ile modern bir imalat yöntemi olan esnek imalat sistemi simülasyon programında modellenmiş, her iki sistemden elde edilen performans analiz sonuçları kıyaslanmıştır. Öncelikle, TAI' de sistem analizi çalışmaları yapılmış mevcut durum tespit edilmiştir. Üretimdeki ürün çeşitliliğinin çok olması, hazırlık sürelerinin ve maliyetlerinin yüksek olması, taleplerde meydana gelen ani değişiklikler gibi problemlere çözüm üretebilmek için TAI' de esnek imalat sisteminin kurulması alternatif bir çözüm olarak kullanılmıştır. Esnek imalat sistemi tasarlanırken, Hollier Metodu ile makine sırası ve yerleşimi düzenlenmiş simülasyon deneyleri kullanılarak performans değerlerinin karşılaştırması yapılmıştır.

### 6.1. TAI Tasarım Süreci Modeli

EİS uygulama süreçleri tasarım aşamasından itibaren detaylı ve etkin bir analiz sürecinden geçirilerek oluşturulmalıdır. Bu sebeple Bölüm 3'te önerilen EİS tasarım süreci modeli TAI için uygulamalı olarak bu bölümde gerçekleştirilecektir.

TAI için EİS modeli ortaya konulurken tasarım sürecinin en önemli adımları olarak Bölüm 3.1 ve 3.2'de bahsedilen Yerleşim Tasarımı ve Performans Değerlendirme ve Sistem Performans Analizi süreçleri uygulamalı olarak ele alınmıştır. Bu süreçleri TAI için uyarlamaları ve analiz çalışmaları ileriki bölümlerde anlatılacaktır.

Çalışmalarda TAI Sikorsky model helikopterin imalat bölümünde sistem analizi yapılmıştır. Analiz sonucunda şu anki yerleşim düzeninde en yoğun işlemin



gerçekleştiği 14 makine ve tezgâh tespit edilmiştir. TAI' de Sikorsky model helikopterin üretimi için yaklaşık 1500 çeşit parçanın üretimi yapılmaktadır. Bu parçalardan imalat süreci birbirine en çok benzeyen ve belirlenen makinelerde yoğun işlem gören 4 çeşit parça seçilmiştir. Belirlenen tezgâhlarda 4 çeşit parçanın işlem görmediği 6 tezgâh analizden çıkarılarak diğer 8 tezgah üzerinde çalışılmıştır.

### **6.1.1. TAI Yerleşim Tasarımı ve Performans Değerlendirme Süreci**

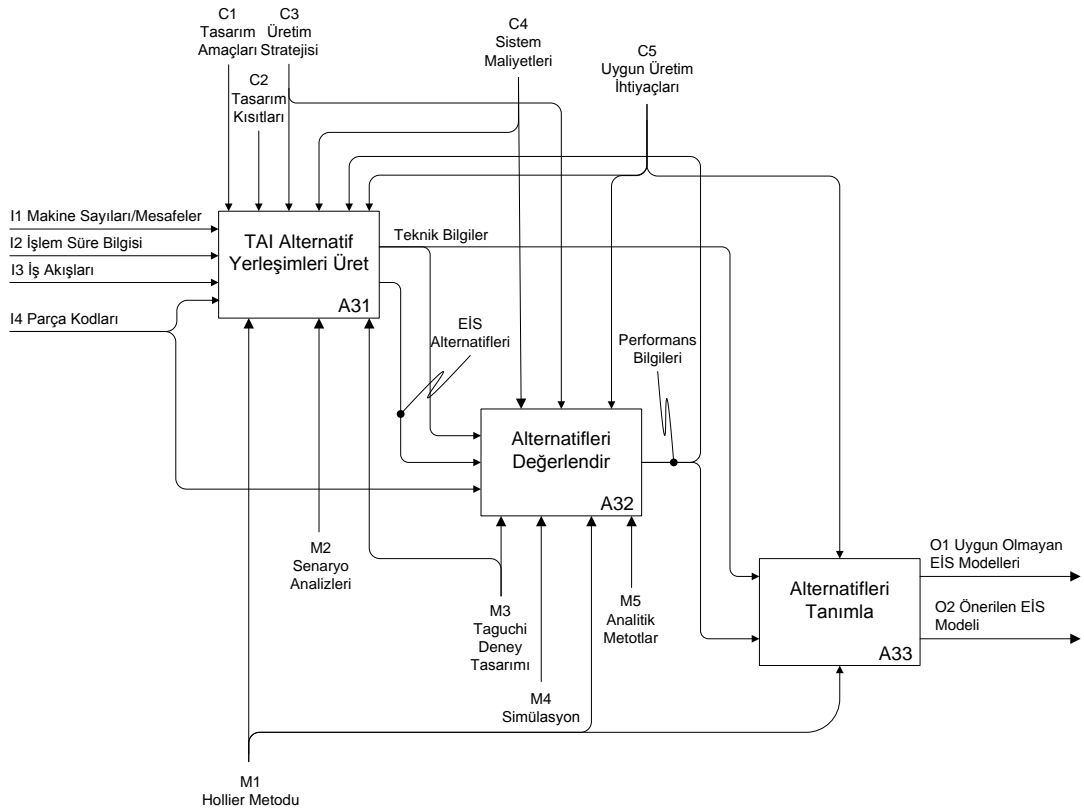
TAI, uçak endüstrisinde faaliyet gösteren bir firmadır. İş süreçlerinin ve üretilen ürünlerin fazla olması sebebiyle kurulacak EİS'in yerleşim planı ve değerlendirmesi titizlikle yapılmalıdır. Tez çalışmasının bu bölümünde TAI için EİS yerleşim tasarımı süreci işletilecektir. Şekil 6.1'de TAI yerleşim tasarımı ve performans değerlendirme süreci IDEF diyagramı verilmiştir.

Şekil 6.1'de önerilen IDEF diyagramının her bir faaliyeti için detaylı açıklaması aşağıdaki gibidir.

**A31- TAI Alternatif Yerleşimleri Üret:** Bu faaliyette tasarım kısıtları, amaçları, maliyetler, üretim stratejisi ve ihtiyaçlar düşünülerek alternatif sistem yerleşim planları oluşturulmuştur. Bu faaliyette kullanılan girdi, çıktı, kontrol ve mekanizmalar şöyledir.

- Girdiler

- I1- Makine sayıları/mesafeler: Bu girdi TAI'de şu an ilgili bölümde kullanılan makine sayıları ile bu makineler arasındaki mesafeyi içerir. Yerleşim planının değerlendirilmesi kısmında bu verilerden faydalanılmıştır. Çizelge 6.1 makine kodları, makine sayıları, ve işlem süreleri verilmiştir.



**Şekil 6.1.** TAI Yerleşim tasarımı ve performans değerlendirme IDEF içerik diyagramı

**Çizelge 6.1.** Makine ve tezgâhlardaki işlem süreleri

MAKİNE NO	YAPTIĞI İŞLEM	İŞLEM SÜRESİ	MAKİNE SAYISI
109	Çapak Alma	4 dk	1 Adet
137	Hammadde Kesme	2 dk	1 Adet
151	Deep Press	6 dk	1 Adet
100	Operatör İşlemi (Dışarı)	15 dk	1 Adet
864	Kalite Kontrol	30 dk	1 Adet
114	Hydropress	6 dk	1 adet
551	Isıl İşlem	35 dk	1 Adet
402	Al Yaşlandırma ve Çelik Isıl İşlem	15 dk	1 Adet

Çizelge 6.2 makineler arası mesafeleri göstermektedir. Bu mesafeler TAI şu anki mevcut yerleşim planı göz önüne alınarak hesaplanmıştır.

- I2-İşlem süre bilgisi: Bu bilgi sistemin analitik olarak ve simülasyon ile değerlendirilmesi aşamasında sayısal veri olarak kullanılmıştır. Her bir makineye ait işlem süresi Çizelge 6.1’de verilmiştir.

**Çizelge 6.2.** Mevcut durum makineler arası mesafeler

<b>MAKİNELER ARASI MESAFE</b>										
	<b>239</b>	<b>137</b>	<b>109</b>	<b>551</b>	<b>151</b>	<b>864</b>	<b>114</b>	<b>402</b>	<b>22</b>	<b>100</b>
<b>239</b>	0	6	1	28	14	20	21	39	16	38
<b>137</b>	6	0	1	30	10	24	22	40	13	32
<b>109</b>	1	1	0	26	13	19	19	39	16	32
<b>551</b>	28	30	26	0	14	5	1	9	10	2
<b>151</b>	14	14	14	14	0	5	16	34	10	1
<b>864</b>	20	24	19	5	5	0	10	14	14	4
<b>114</b>	21	22	22	1	15	10	0	15	6	1
<b>402</b>	39	40	39	9	34	14	15	0	24	8
<b>22</b>	16	13	16	10	10	14	7	24	0	16
<b>100</b>	38	32	32	2	1	4	1	8	16	576

- I3-İş akışları: Bu bilgi alternatif yerleşimler belirlenirken ürün rotaları dikkate alınarak etkin bir yerleşim seçimi yapabilmek için kullanılacak olan metodolojilerin bir girdisidir. Yapılan sistem analizleri sonucunda belirlenen 4 ürün için iş akışları Çizelge 6.3’te verilmiştir. Her ürün akışında 239 numaralı hammadde istasyonu ilk istasyonu, 22 numaralı istasyon ise çıkış istasyonunu temsil etmektedir.

**Çizelge 6.3.** Parça kodları ve iş akışları

Ürün Kodu	OPERASYONLAR													
70203-102	239	137	100	864	100	22								
70207-110	239	137	109	151	100	551	100	551	151	402	100	864	100	22
70201-117	239	137	109	114	100	551	864	100	22					
70207-119T	239	100	551	100	864	100	402	100	864	22				

- I4-Parça kodları: Bu girdi ile ürünlerin sistem içi takibinin karışıklığa yol açmaması ve analizlerde karmaşıklığı önlemek için kullanılmıştır. Parça kodları Çizelge 6.3'te verilmiştir. Analizlerde her bir ürünü, ürün kodunun son üç hanesi ile ifade ettiğimizde ürün miktarları, 102 kodlu ürün için 16, 110 kodlu için 36, 117 kodlu için 13 ve 119 kodlu ürün için 100 adet olarak belirlenmiştir.
- Kontroller  
Önerilen TAI yerleşim tasarımı ve performans değerlendirme sürecindeki kontroller Bölüm 3'te anlatılan A3- Yerleşim Tasarımı ve Performans Değerlendirme süreci kontrolleri ile paraleldir.
- Çıktılar
  - Teknik bilgiler: Bu süreç sonucunda belirlenen alternatifler için teknik bazda bilgiler elde edilir.
  - EİS alternatifleri: Yapılan analizler ile belirlenmiş alternatif EİS yerleşimleridir.
- Mekanizmalar
  - M1 Hollier Metodu: Bu metot süreçte makineler arası parça akışını optimize ederek alternatif yerleşimler bulmaya yarayan bir tekniktir. Bu kapsamda TAI mevcut yerleşim planı düşünülerek metot için veriler değerlendirilip bir önerilen başlangıç yerleşimi belirlenmiştir. TAI mevcut durum yerleşim düzeni Şekil 6.2'de verilmiştir.

Hollier metodunda makineler arasındaki parça transferlerinin “Den/E” tabloları ile düzenlenmesi gerekmektedir. Çizelge 6.4’te her makine için “Den” ve “E” toplamaları hesaplanmıştır. Hollier metodu ile “Den/E” oranları hesaplanmış ve makineler oranlarına göre dizilmiştir. Makineler arasından “239” makinesinin “Den/E” oranı en büyük olduğu için hücredeki ilk makine “239” olmuştur. Çizelge 6.5’te Den/E oranları ve Çizelge 6.6’da bu oranlara göre makinelerin yerleşim sırası verilmiştir.



Şekil 6.2. Mevcut durum yerleşim düzeninin görsel modeli

Çizelge 6.4. EİS hücresi belirlenen tezgahlar arası taşınan parça miktarları

HOLLIER METODU											
	239	137	109	551	151	864	114	402	22	100	‘DEN TOPLAMI
239	0	65	0	0	0	0	0	0	0	100	165
137	0	65	49	0	0	0	0	0	0	16	130
109	0	0	0	0	36	0	13	0	0	0	49
551	0	0	0	0	36	13	0	0	0	136	185
151	0	0	0	0	0	0	0	36	0	36	72
864	0	0	0	0	0	0	0	0	100	165	265
114	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13	13
402	0	0	0	0	0	0	0	100	0	136	236
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
100	0	0	0	172	0	252	0	100	65	576	1165
‘E TOPLAMI	0	130	49	172	72	265	13	236	165	1178	

**Çizelge 6.5.** Den/E oranları

<b>SIRA NO</b>	<b>'DEN TOPLAMI'E TOPLAMI</b>
<b>1</b>	SAYI/0= $\infty$
<b>2</b>	1
<b>3</b>	1
<b>4</b>	1,075581395
<b>5</b>	1
<b>6</b>	1
<b>7</b>	1
<b>8</b>	1
<b>9</b>	1
<b>10</b>	1,075581395

- EİS alternatifleri: Yapılan analizler ile belirlenmiş alternatif EİS yerleşimleridir.

**Çizelge 6.6.** Önerilen EİS hücresi makinelerin yerleşim sırası

<b>SIRA NO</b>	<b>YERLEŞİM SIRASI</b>
<b>1</b>	239
<b>2</b>	551
<b>3</b>	137
<b>4</b>	109
<b>5</b>	151
<b>6</b>	864
<b>7</b>	114
<b>8</b>	402
<b>9</b>	100
<b>10</b>	22

**A32- Alternatifleri Değerlendir:** Bu faaliyet Hollier metodu ile belirlenen alternatif EİS yerleşiminin test edilmesi içindir. Bu faaliyette önemli olan IDEF mekanizmalarıdır. Burada kullanılan teknikler ve çalışmalardan aşağıda bahsedilmiştir.

- Mekanizmalar

- M1- Hollier Metodu: Hollier metodundan elde edilen yeni tezgah yerleşimine göre esnek imalat sistemi ile kontrol edilen yeni sistemin simülasyon modeli kurulmuştur. Bu sistemde belirli bir taşıma hattı belirlenmiş, hat üzerinde insansız AGV (Automated Guided Vehicle) 'ler taşıma için kullanılmıştır. Yeni sistemin tezgâhlar arası taşıma mesafeleri Sikorsky helikopter üretimi için ayrılmış üretim alanı göz önünde bulundurularak hesaplanmış ve Çizelge 6.7'deki gibi belirlenmiştir.

**Çizelge 6.7.** Önerilen EİS hücresi tezgâhlar arası taşıma mesafeleri

<b>TEZGÂHLAR ARASI MESAFE</b>										
	<b>239</b>	<b>137</b>	<b>109</b>	<b>551</b>	<b>151</b>	<b>864</b>	<b>114</b>	<b>402</b>	<b>22</b>	<b>100</b>
<b>239</b>	0	6	8	4	10	12	14	16	20	18
<b>137</b>	18	0	4	20	6	8	10	12	16	14
<b>109</b>	16	20	0	18	4	6	8	10	14	12
<b>551</b>	20	4	6	0	8	10	12	14	18	16
<b>151</b>	14	18	20	16	0	4	6	8	12	10
<b>864</b>	12	16	18	14	20	0	4	6	10	8
<b>114</b>	10	14	16	12	18	20	0	4	8	6
<b>402</b>	8	12	14	10	16	18	20	0	6	4
<b>22</b>	4	8	10	6	12	14	16	18	0	20
<b>100</b>	6	10	12	8	14	16	18	20	4	0

Hollier Metodu kullanılarak, parça akışı mümkün olduğunca parça ailesinin proses akışı yönünde ardışık hareket etmesi ve geriye dönüş hareketinin en aza indirilmesi sağlanmıştır. Bu nedenle yeni sistemde tezgâh sayıları değiştirilmemiş sadece yerleşim düzeninde değişiklikler yapılmıştır. Önerilen EİS hücresi yerleşim düzeni Şekil 6.3'te verilmiştir.



Şekil 6.3. Önerilen EİS hücresi yerleşim düzeninin görsel modeli

- M2- Senaryo analizleri: Hollier metodu ile elde edilen önerilen EİS hücresi için sistem parametrelerinin değiştirilmesi ile çeşitli senaryolar oluşturulmuştur. Bu senaryolar için yapılan analizler ileriki bölümlerden anlatılacaktır.
- M3- Taguchi deney tasarımı: Parametre ve deney sayısının çok olduğu durumlarda analizleri kolaylaştıran bir sistem tasarım tekniğidir.
- M4- Simülasyon: Sistem analizi sonucunda elde edilen veriler kullanılarak mevcut sistem ve önerilen EİS hücresi tasarımı simülasyon programında modellenmiştir. Çeşitli senaryo çalışmaları sonucunda simülasyon sonuçları değerlendirilerek karşılaştırmalar yapılmıştır.

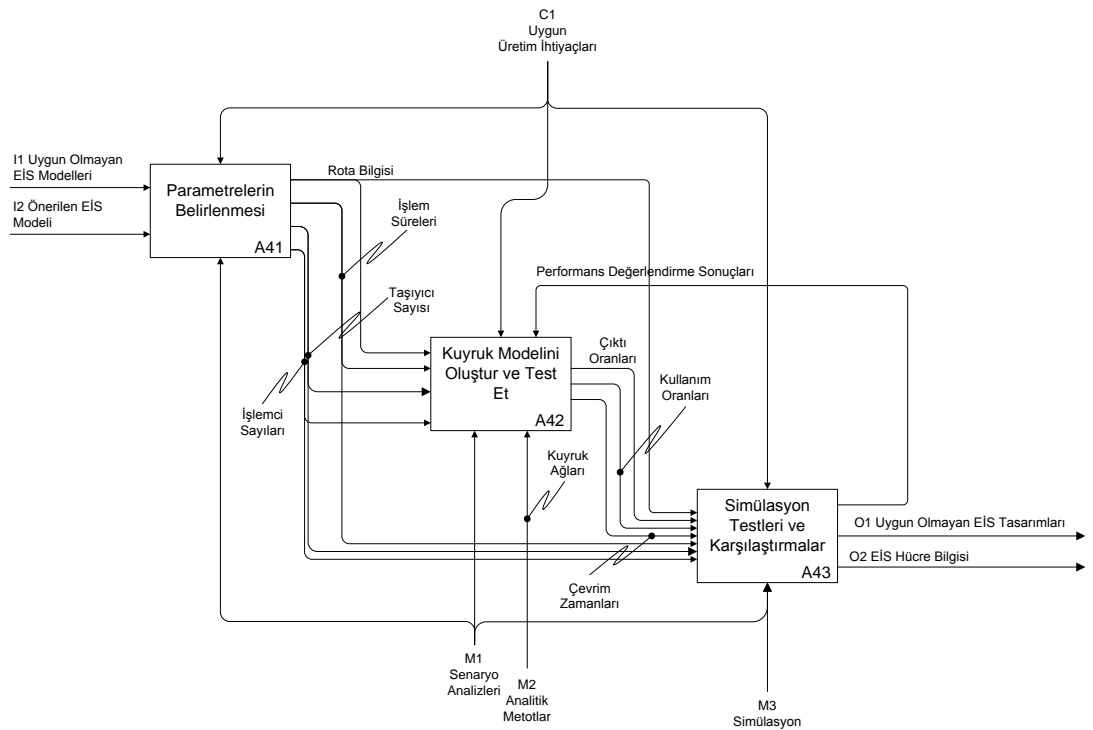


- M5- Analitik metotlar: Sistem değerlendirme için analitik olarak kuyruk ağı metodolojisi kullanılmıştır. Bu analizler ileriki bölümlerde verilecektir.

**A32- Alternatifleri Tanımla:** Bu faaliyet performans değerlendirmesi yapılmış ve uygulamaya geçirilebilecek sistemler için makine, süreç ve üretilecek ürün gibi bilgilerinin belirlendiği faaliyettir.

### 6.1.2. TAI Sistem Performans Analizi

Belirlenen uygun yerleşim tasarımının performans değerlendirmesi yapıldıktan sonra EİS hücresi faaliyete geçirilmeden bazı sistem parametreleri ile analizler yapıp sistem değerlendirilir. Bu yüzden tez çalışmasının bu bölümünde TAI için EİS sistem performans analizi süreci incelenecektir. Şekil 6.4'te TAI sistem performans analizi süreci IDEF diyaframı verilmiştir.



Şekil 6.4. TAI sistem performans analizi IDEF içerik diyaframı

Şekil 6.4'te önerilen IDEF diyagramının her bir faaliyeti için detaylı açıklama aşağıda verilmiştir.

**A41- Parametrelerin Belirlenmesi:** Analizlerde işlem süreleri, işlemci sayıları, rota bilgisi ve taşıyıcı sayıları test parametreleri olarak belirlenirken, çevrim zamanları ve makine kullanım oranları performans parametreleri olarak belirlenmiştir.

**A42- Kuyruk modelini oluştur ve test et:** Önerilen sistem için kuyruk modeli oluşturulur ve analitik olarak testler yapılır. Bu analizler Bölüm 6.2'de detaylı olarak verilmiştir.

**A43- Simülasyon testleri ve karşılaştırmalar:** Parametreler değiştirilerek çeşitli senaryoların simülasyon ortamında test edilmesi ve sonuçların karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesi faaliyetidir.

Bu sürecin en önemli faaliyeti senaryoların belirlenmesidir.

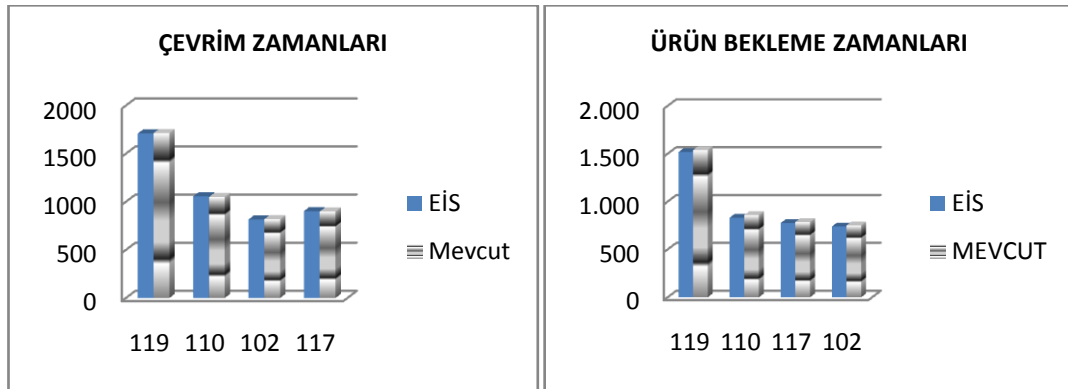
- M1- Senaryo Analizleri: Sayısal deneyler için çeşitli senaryolar oluşturulmuştur. Mevcut durum ve önerilen EİS hücresi için çeşitli parametreler (makine sayıları, taşıyıcı sayıları, taşıyıcı hareket yönü gibi) değiştirilerek uygun model araştırılmıştır. Bu anlamda incelenen senaryolar ve karşılaştırılan sistem parametreleri denenmiş senaryolar Çizelge 6.8'de verilmiştir.

İlk deneyler mevcut durum ve Hollier metodu ile iyileştirilmiş sistem için mevcut makine sayıları kullanılarak yapılmıştır. Esnek imalat sistemi modelinde ilk etapta tek taşıyıcı ve her bir makine için tek işlemci kullanılmıştır. Bu deneyler sonucunda elde edilen çevrim zamanları, ürün bekleme zamanları Şekil 6.5'te, kuyrukta bekleme süreleri Şekil 6.6'da, kullanım oranları Şekil 6.7'de verilmiştir. Bu sonuçlara göre esnek imalat sistemi tasarımı ile mevcut sistem arasında büyük farklılıklar gözlenmemiştir.

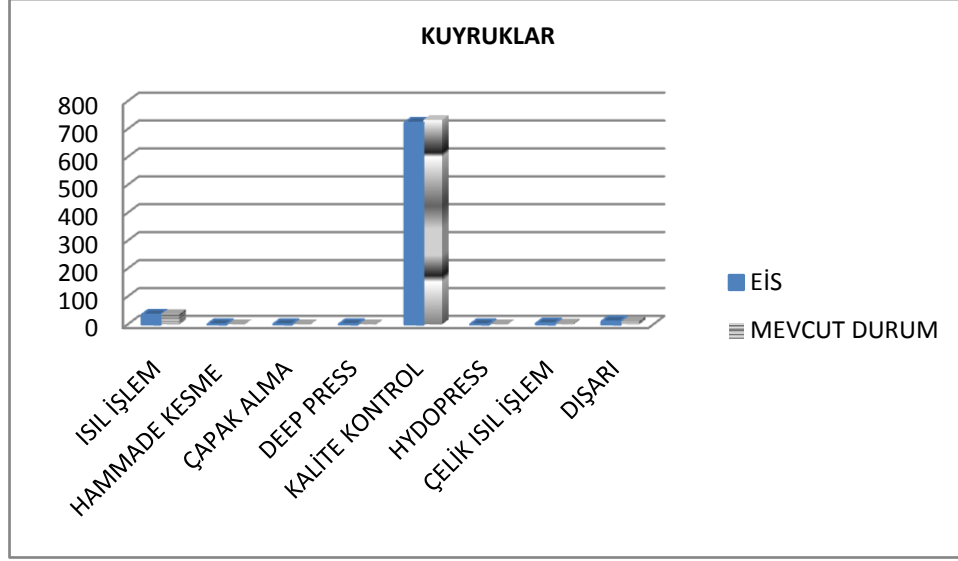
**Çizelge 6.8.** Mevcut durum ve önerilen EİS hücresi senaryoları özet tablosu

ANA SENARYO	ALT SENARYO	KARŞILAŞTIRILAN SİSTEMLER
	MEVCUT MAKİNE SAYILI	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mevcut Sistem</li> <li>• Esnek İmalat Sistemi</li> </ul>
<b>ORANTILI PALET SAYILARI (17-8-3-2)</b>	<b>İYİLEŞTİRİLMİŞ MAKİNE SAYISI İLE</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Kalite Kontrol: 3</li> <li>• Isıl İşlem: 2</li> <li>• Operatör: 2</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mevcut Sistem</li> <li>• EİS 1 Taşıyıcı</li> <li>• EİS Çift Yönlü Taşıyıcı</li> <li>• EİS 2 Taşıyıcı</li> <li>• EİS 3 Taşıyıcı</li> </ul>
<b>DENGELİ PALET SAYILARI (8-8-8-8)</b>	<b>İYİLEŞTİRİLMİŞ MAKİNE SAYISI İLE</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Kalite Kontrol: 2</li> <li>• Isıl İşlem: 2</li> <li>• Operatör: 2</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mevcut Sistem</li> <li>• EİS 1 Taşıyıcı</li> <li>• EİS Çift Yönlü Taşıyıcı</li> <li>• EİS 2 Taşıyıcı</li> <li>• EİS 3 Taşıyıcı</li> </ul>

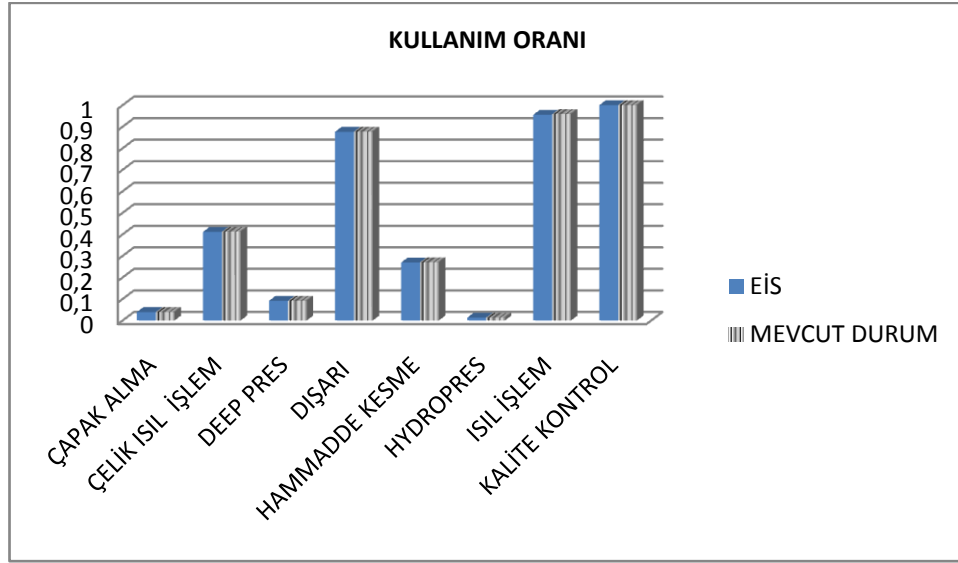
Bunun muhtemel nedenlerinden biri, kalite kontrol istasyonunda yoğun bir darboğaz belirlenmiş olup, bekleme sürelerinin 700 dk'ya kadar ulaştığı görülmüştür. Daha dengeli bir sistem elde etmek, EİS'i daha iyi analiz etmek için sistemde iyileştirmeler yapılması düşünülmüş tezgâh sayılarında değişikliğe gidilmiştir.



**Şekil 6.5.** Mevcut durum- önerilen EİS senaryosu için çevrim zamanları ile ürün bekleme zamanlarının karşılaştırması



**Şekil 6.6.** Mevcut durum ve önerilen EİS senaryosu için kuyruk uzunlukları karşılaştırması



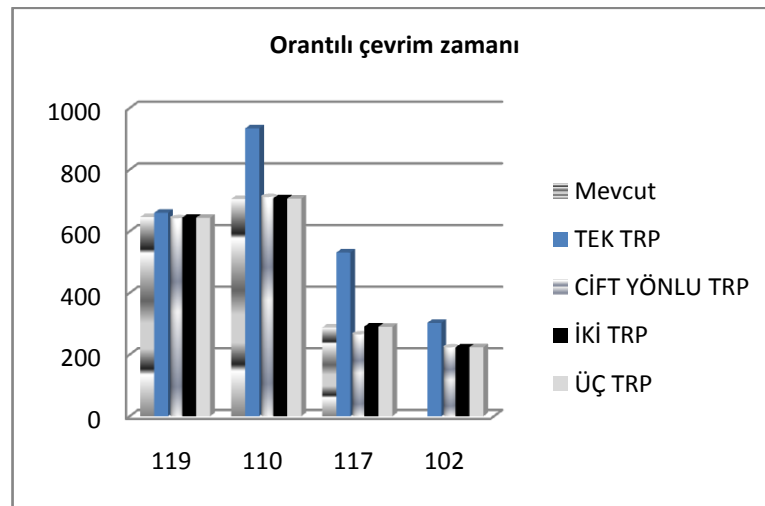
**Şekil 6.7.** Mevcut durum ve önerilen EİS senaryosu için kullanım oranları karşılaştırması

Aşağıda denenmiş değişik senaryolardan bahsedilmiştir.

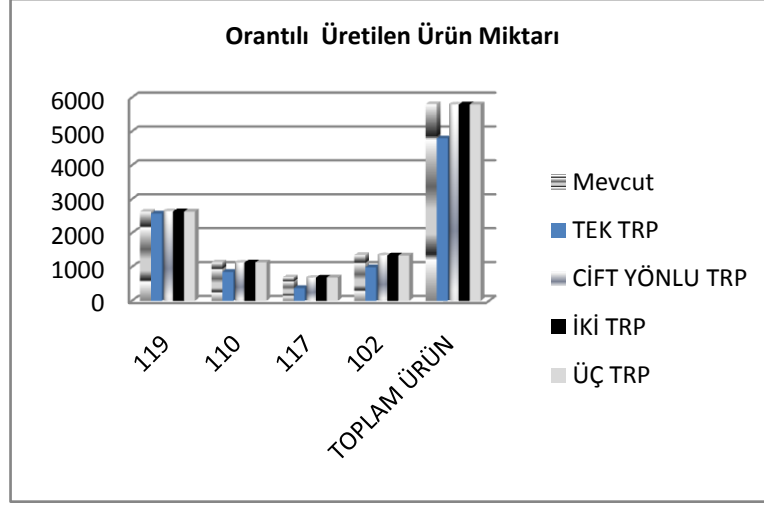
- İyileştirilmiş Mevcut- EİS Senaryoları( Orantılı Palet Sayıları Kullanılarak)

Darboğazların önlenmesi için ilk olarak kalite kontroldeki yoğunluğun azaltılması amaçlanmış ve tezgâh sayısı 2'ye çıkarılmıştır. Bunun sonucunda elde edilen sistemde operatör ve ısıl işlemden darboğazların olduğu görülmüştür. Bunların giderilmesi için bu bölümdeki tezgâh sayıları da 2'ye çıkarılarak sistem tekrar analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlarda kalite kontrolde yoğunluğun devam ettiği görülmüş ve tezgâh sayısı sadece orantılı palet durumunda 3'e çıkarılarak uygun ürün çıkışına ulaşılmıştır. Burada iyileştirilmiş tezgâh sayısı ile kurulan sistem diğer iyileştirme çalışmalarında da kullanılmıştır. Sonuç olarak, Çizelge 6.8'de verilen makine sayıları kullanılarak karşılaştırmalar yapılmıştır.

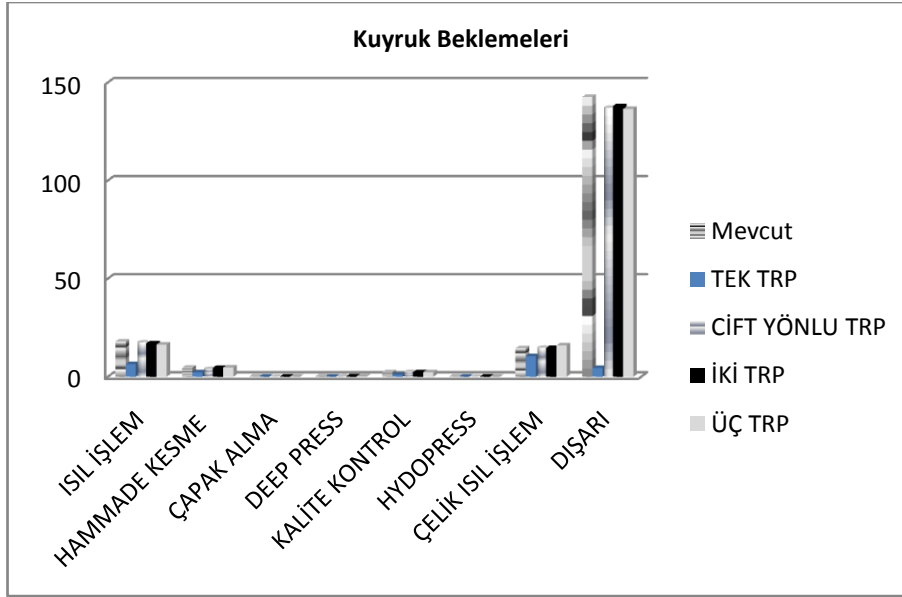
Bu değişikliklerle oluşturulan yeni makine sayıları, tek taşıyıcı, çift yönlü taşıyıcı, iki taşıyıcı, 3 taşıyıcı ile mevcut sistem karşılaştırılmıştır. Orantılı palet sayıları kullanılarak iyileştirilmiş durumda çevrim zamanı grafiğine bakıldığında çift yönlü çalışan taşıyıcının en iyi sonucu verdiği görülmektedir (Şekil 6.8 ve 6.9). Şekil 6.10 ve 6.11'deki tezgâh kuyruk bekleme sürelerine ve makine kullanım oranlarına bakıldığında operatör işleminde istasyonunda bir yoğunluk görülmektedir.



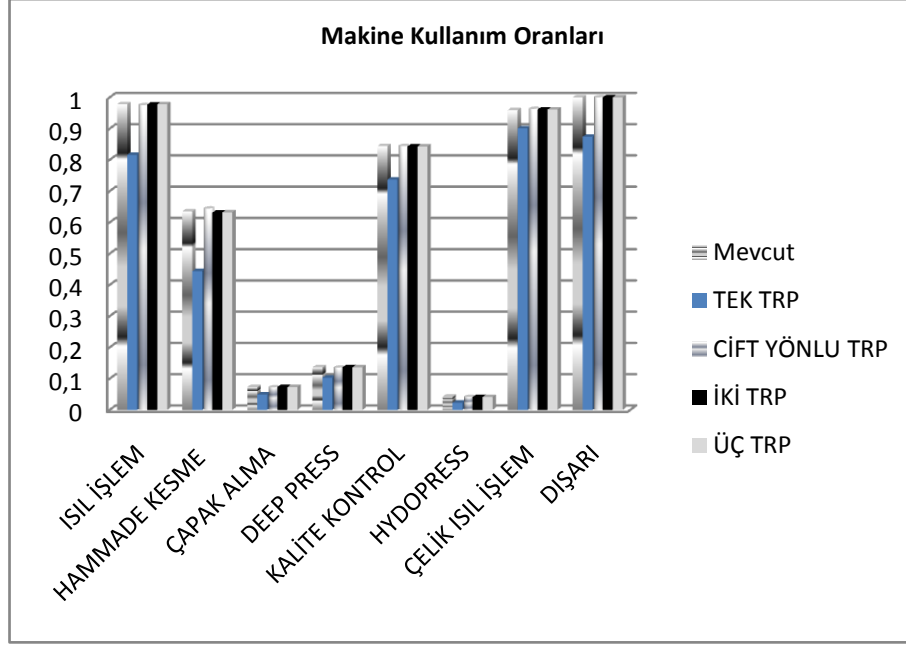
**Şekil 6.8.** Orantılı palet sayıları kullanılarak iyileştirilmiş mevcut-EİS senaryoları için çevrim zamanı karşılaştırması



**Şekil 6.9.** Orantılı palet sayıları kullanılarak iyileştirilmiş mevcut-EİS senaryoları için üretilen ürün miktarları karşılaştırması



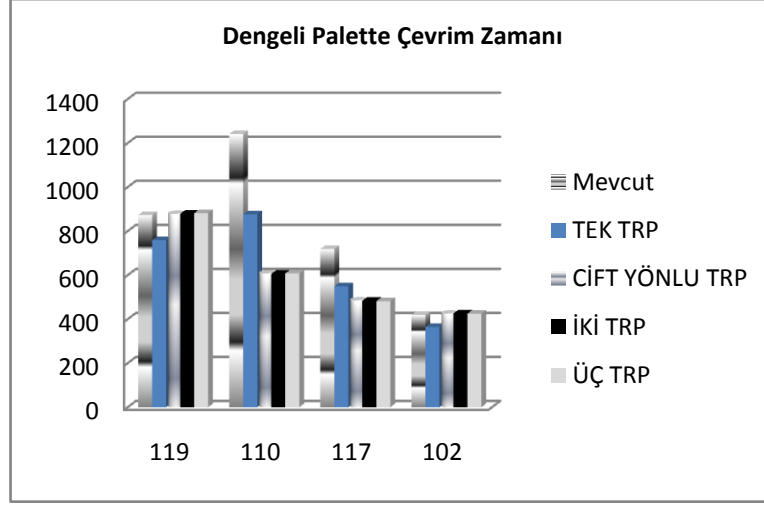
**Şekil 6.10.** Orantılı palet sayıları kullanılarak iyileştirilmiş mevcut-EİS senaryoları için kuyruk beklemeleri karşılaştırması



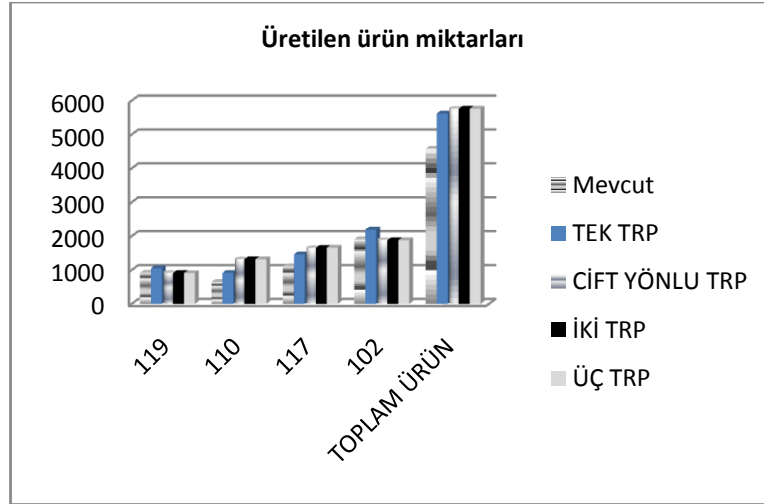
**Şekil 6.11.** Orantılı palet sayıları kullanılarak iyileştirilmiş mevcut-EİS senaryoları için makine kullanım oranları karşılaştırması

- İyileştirilmiş Mevcut- EİS Senaryoları( Dengeli Palet Sayıları Kullanılarak)

Yukarıdaki senaryolarda ürün ağacından alınmış ürün sayılarına göre orantılı palet sayıları kullanılmıştır. Bu bölümde ürün ağacından alınan orantılı ürün sayıları yerine dengeli palet yani eşit ürün sayıları belirlenmiştir. Dengeli palettteki kıyaslamalarda mevcut sistemin en kötü çevrim zamanlarını ve en az ürün miktarlarını verdiği görülmektedir (Şekil 6.12 ve 6.13).



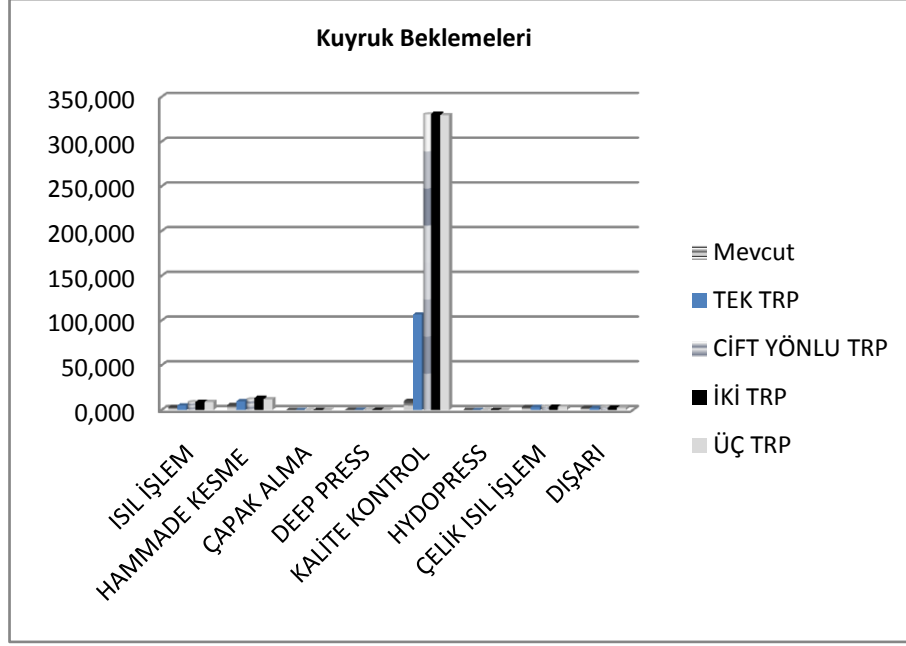
**Şekil 6.12.** Dengeli palet sayıları kullanılarak iyileştirilmiş mevcut-EİS senaryoları için çevrim zamanları karşılaştırması



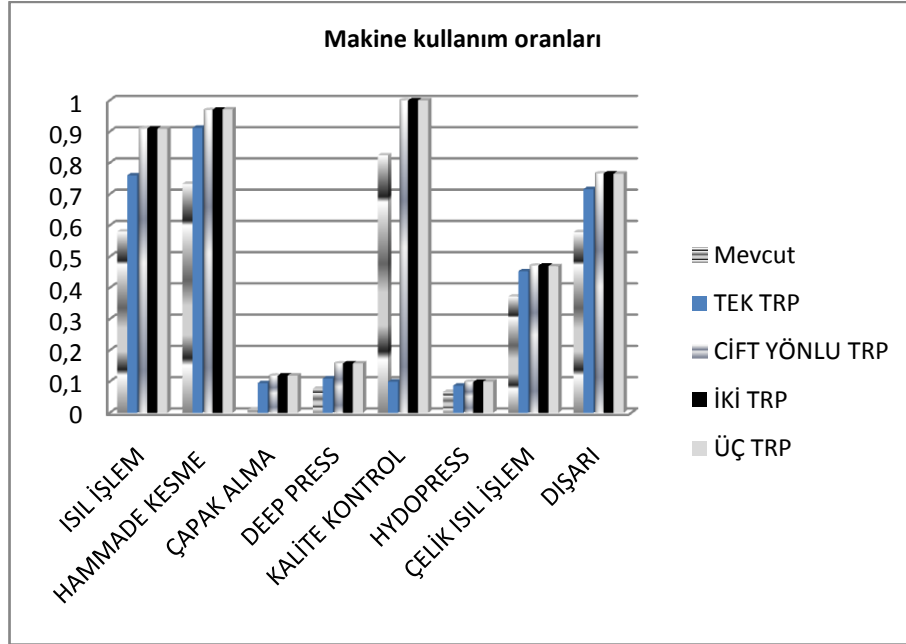
**Şekil 6.13.** Dengeli palet sayıları kullanılarak iyileştirilmiş mevcut-EİS senaryoları için üretilen ürün miktarları karşılaştırması

Bu durumda tezgâhlardaki kuyruk bekleme sürelerinde azalma görülmektedir. Makine kullanım oranlarına bakıldığında ise en düşük oran mevcut sistemde görülmektedir (Şekil 6.14 ve 6.15).





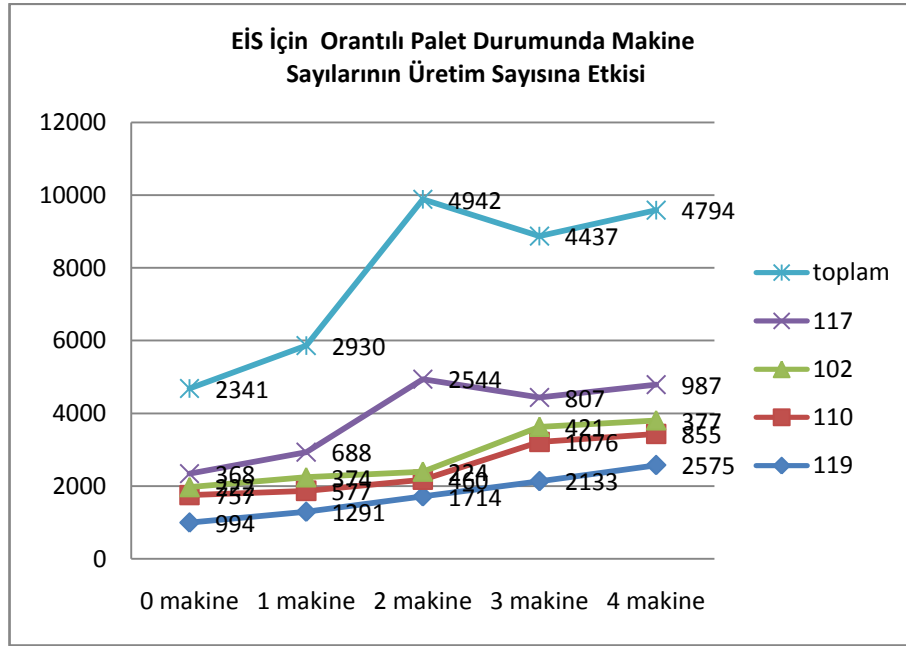
**Şekil 6.14.** Dengeli palet sayıları kullanılarak iyileştirilmiş mevcut-EİS senaryoları için kuyruk bekleme süreleri karşılaştırması



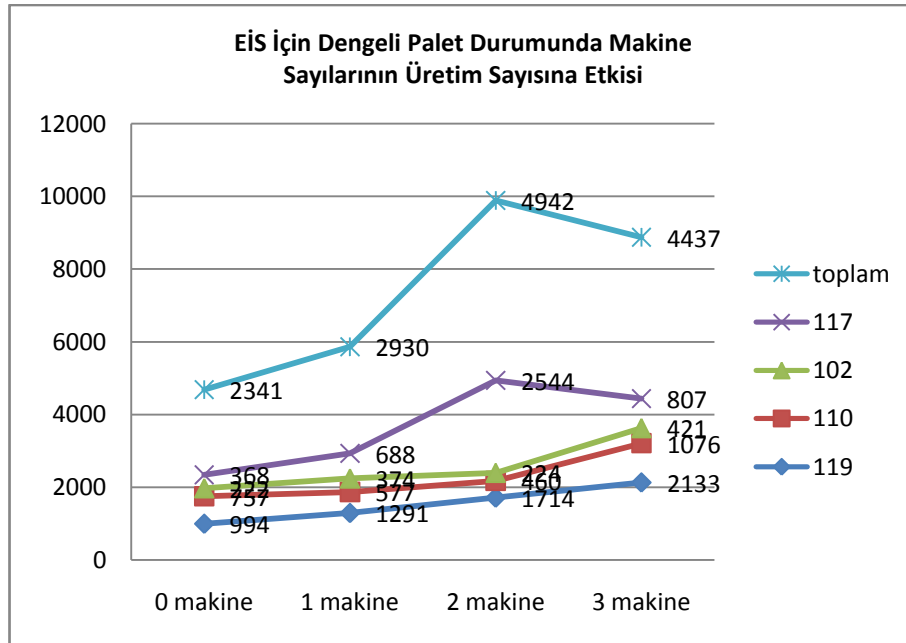
**Şekil 6.15.** Dengeli palet sayıları kullanılarak iyileştirilmiş mevcut-EİS senaryoları için makine kullanım oranları karşılaştırması

Bir diğer analizle de makine sayılarındaki artışların ürün artışlarına etkisi üzerine yapılmıştır (Şekil 6.16 ve 6.17). Burada ilginç bir şekilde makine sayıları belli bir

sayıya ulaştıktan sonra, makine sayılarının artırılması ürünlerin çıkış miktarını (çıkış oranını) çok değiştirmemektedir.



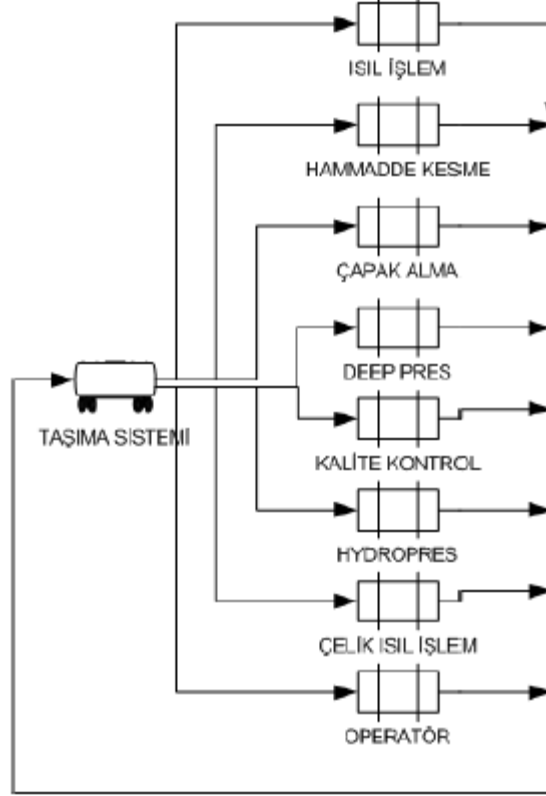
**Şekil 6.16.** Orantılı palet durumunda makine sayılarındaki değişikliklere göre ürünlerdeki çıkış oranları



**Şekil 6.17.** Dengeli palet durumunda makine sayılarındaki değişikliklere göre ürünlerdeki çıkış oranları

## 6.2. TAI Kuyruk Modeli

Bu bölümde Bölüm 6.1’de simülasyon testleri gerçekleştirilip performansı değerlendirilen TAI EİS hücresi için kuyruk ağı modeli kurulmuştur. Kurulan model Şekil 6.18’deki gibi olup toplam 9 istasyondan oluşmaktadır. Ürünler iş akışı içerisindeki tüm hareketlerini taşıma sistemi üzerinden yapmakta daha sonra ilgili istasyonlara iletilmektedir.



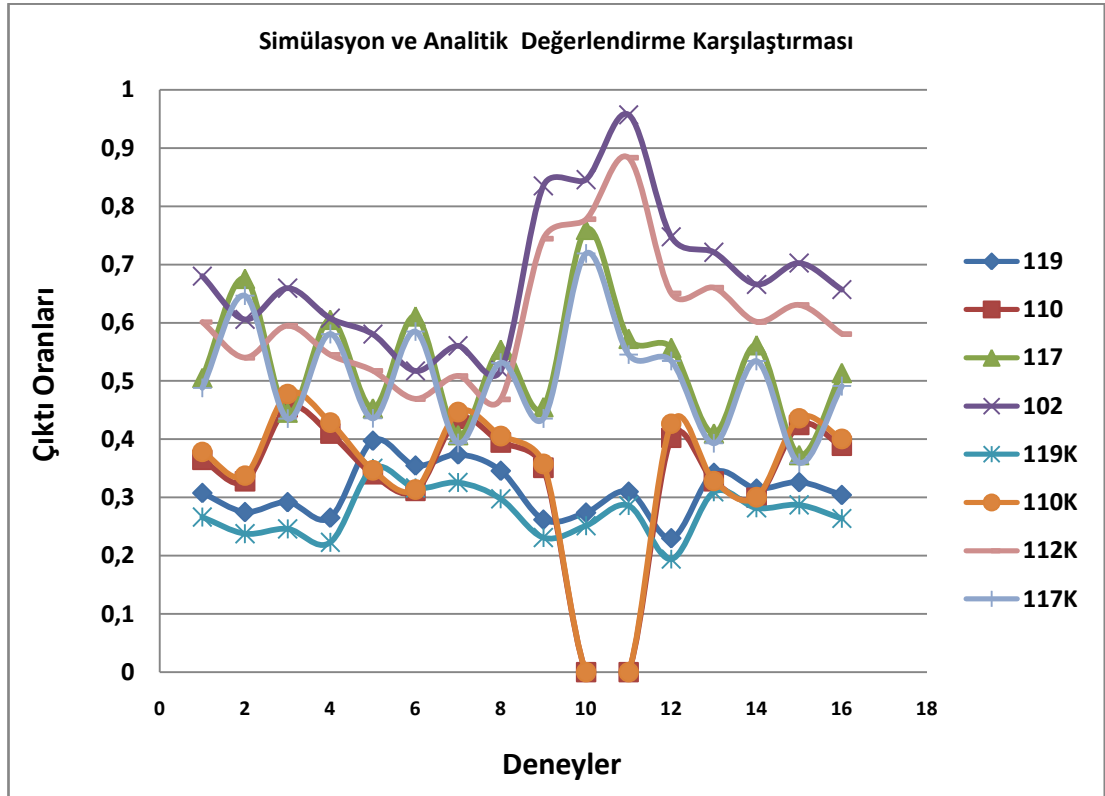
Şekil 6.18. TAI EİS tasarımı kuyruk ağı modeli

Kuyruk ağı analizleri Bölüm 5.5.3’te verilen Algoritma 3 QueNET programına eklenerek gerçekleştirilmiştir. Çizelge 6.9’da verilen ziyaret ve işlem oranları kullanılarak çeşitli deneyler yapılmış ve aynı parametreler kullanılarak yapılan simülasyon deneyleri ile karşılaştırılmıştır.

**Çizelge 6.9.** TAI kuyruk modeli için kullanılan parametre değerleri

	T.porter	Isıl İşlem	H. Kesme	Çapak Alma	D. Press	K. Kontrol	H. Press	Çelik I. İşlem	Operatör
$\mu$	1	35	20	4	6	30	6	15	15
VR <sub>102</sub>	4	0	1	0	0	1	0	0	1
VR <sub>110</sub>	12	2	1	1	2	1	0	1	3
VR <sub>117</sub>	7	1	1	1	0	1	1	0	1
VR <sub>119</sub>	8	1	0	0	0	2	0	1	3

TAI kuyruk sistemi için oluşturulan simülasyon modeli 10.000 dakika ısınma zamanı toplam 110.000 dakika, her bir deney 10 tekrarlı olarak çalıştırılmıştır. Şekil 6.19’da simülasyon ve kuyruk ağı sonuçların karşılaştırılmasına ait grafik verilmiştir. Grafikte yanında “K” indisi bulunan ürün kodu kuyruk ağı sonucunu, indis bulunmayan kod ise simülasyon sonucunu göstermektedir. Analizlerde ürün gruplarının çıktı oranları baz alınarak performans değerlendirmesi yapılmıştır.



**Şekil 6.19.** TAI simülasyon ve kuyruk ağı karşılaştırmalı sonuçlar

Çizelge 6.10'da ise kuyruk ağı ve simülasyon deneylerinde kullanılan parametre değerleri ve bunlara ait detaylı sonuçlar verilmiştir. Müşteri sayılarının 10 ile 15 arasında değiştirilmesi ile deneyler yapılmıştır. Çünkü ürün sayısının 15'ten fazla alınması kuyruk ağı algoritmasında uzun çalışma zamanları ve yüksek hafıza gerektirmektedir.

Yapılan analizlerde simülasyon ile kuyruk ağı arasındaki izafi fark %15'lere kadar çıksa da ortalama %7'lik bir izafi fark oluşmaktadır. Yüksek izafi farklar simülasyon deneyleri ile kuyruk ağı değerlendirmesinde taşıma zamanlarının tam olarak dengelenememesinin bir sonucu olarak ortaya çıkmaktadır. Keza taşıma zamanları yüksek, müşteri/ürün sınıfı sayısı fazla ve yüksek müşteri sayıları ile kuyruk ağı deneyleri yapmak hem analitik olarak çok zor, hem de zaman alıcı olmaktadır. Bu durumda algoritmanın simülasyon deneyleri ile arasındaki izafi farkın yükselmesi olağandır.

Ortalama izafi fark göz önüne alındığında, Şekil 6.19'da verilen grafikte görüldüğü üzere simülasyon ve kuyruk ağı sonuçları paralel hareket etmektedir. Bu stabil durum da kuyruk ağı modelinin performans değerlendirmesi için kullanılabilirliğinin bir göstergesidir.

**Çizelge 6.10.** TAI simülasyon ve kuyruk ağı detaylı karşılaştırma sonuçları

Müşteri Sayıları				Simülasyon Çıktı Oranı				Kuyruk Ağı Çıktı Oranı				İzafi Farklar			
Ürün Kodu				Ürün Kodu				Ürün Kodu				Ürün Kodu			
102	110	117	119	102	110	117	119	102	110	117	119	102	110	117	119
10	10	10	10	0,3076	0,3642	0,5053	0,6801	0,2663	0,3782	0,4881	0,6012	-13,4%	3,8%	-3,4%	-11,6%
10	10	15	10	0,2748	0,3275	0,6757	0,6057	0,2379	0,3377	0,6464	0,54	-13,4%	3,1%	-4,3%	-10,8%
10	15	10	10	0,2918	0,4543	0,4458	0,6594	0,2461	0,4777	0,4352	0,5949	-15,7%	5,2%	-2,4%	-9,8%
10	15	15	10	0,2651	0,4096	0,6053	0,6077	0,2229	0,4286	0,5807	0,545	-15,9%	4,6%	-4,1%	-10,3%
15	10	10	10	0,3972	0,3397	0,4531	0,5803	0,3499	0,3467	0,4357	0,5177	-11,9%	2,1%	-3,8%	-10,8%
15	10	15	10	0,3546	0,311	0,6111	0,5173	0,3163	0,3136	0,5847	0,4692	-10,8%	0,8%	-4,3%	-9,3%
15	15	10	10	0,3736	0,4347	0,4071	0,5604	0,3255	0,4467	0,3935	0,5087	-12,9%	2,8%	-3,3%	-9,2%
15	15	15	10	0,3456	0,3942	0,554	0,5183	0,2975	0,4054	0,5312	0,4685	-13,9%	2,8%	-4,1%	-9,6%
10	10	10	15	0,2618	0,3509	0,4552	0,8353	0,2312	0,3577	0,4355	0,7444	-11,7%	1,9%	-4,3%	-10,9%
10	0	15	15	0,2739	0	0,76	0,846	0,2516	0	0,719	0,7777	-8,1%	0	-5,4%	-8,1%
10	0	10	15	0,3098	0	0,5726	0,9573	0,2858	0	0,5451	0,8834	-7,7%	0	-4,8%	-7,7%
10	15	15	15	0,2299	0,4021	0,5571	0,7476	0,1943	0,4265	0,5342	0,6507	-15,5%	6,1%	-4,1%	-13,0%
15	10	10	15	0,3421	0,3273	0,4099	0,7211	0,3093	0,3283	0,3929	0,6602	-9,6%	0,3%	-4,1%	-8,4%
15	10	15	15	0,315	0,2995	0,5616	0,6659	0,2819	0,3004	0,5341	0,6017	-10,5%	0,3%	-4,9%	-9,6%
15	15	10	15	0,3261	0,4243	0,3728	0,7025	0,2871	0,4359	0,3594	0,6306	-12,0%	2,7%	-3,6%	-10,2%
15	15	15	15	0,3041	0,3883	0,5139	0,6569	0,2638	0,4006	0,4911	0,5807	-13,3%	3,2%	-4,4%	-11,6%

### 6.3. Sonuç

Bu b6l6mde TAI için esnek imalat sistemi değerlendirilmiş ve sim6lasyon kullanarak analizler gerçekleştirilmiştir. Analizlerin ilk aşamada mevcut sistemle, Hollier 2 metodu kullanarak tasarlanmış EİS modeli karşılaştırılmıştır. Daha sonra makine sayıları artırılarak sistemlerde iyileştirmeler yapılmıştır. Mevcut durum ile alternatif durumlar olan tek taşıyıcı, çift y6nl6 taşıyıcı, 2 taşıyıcı ve 3 taşıyıcı senaryoları karşılaştırılmıştır. Son olarak dengeli palet sayıları d6ř6n6lerek oluşturulmuş senaryolar benzer alternatifler için karşılaştırılmıştır. Sonuçlar değerlendirildiğinde çift y6nl6 taşıyıcının diğer alternatiflere g6re daha iyi performans değerleri verdiği tespit edilmiştir.

TAI için bir kuyruk ağı modeli oluşturulmuştur. Daha 6nceki çalışmalarda etkinliği ortaya konulan sim6lasyon modeli ile QueNET programı kullanarak yapılan kuyruk ağı analizleri karşılaştırılmıştır. Sonuçlar kuyruk ağı modelinin TAI EİS sistemi değerlendirmesi için kullanılabileceğini g6stermiştir. Sonuç olarak EİS'in TAI için iyi bir alternatif olduğu ve daha etkin bir 6retim sistemi elde edilebileceği 6ng6r6lmektedir.

## 7. SONUÇ VE TARTIŞMA

Esnek imalat sistemleri ilerleyen teknoloji ve değişen müşteri istekleri beraberinde gelecekte çok daha büyük öneme sahip olacaktır. Bu çalışmada EİS sistemlerinin önemine binaen EİS'in henüz kurulum aşamasında değerlendirilerek etkin ve verimli çalışması için performans değerlendirmesi yapmak amaçlanmıştır. Bu amaçla işletmeler üretim sistemi kurulumunda işletme stratejisine paralel bir tasarım yapmak istemektedir.

Tasarım sürecindeki kritik noktaların tam ve doğru olarak tespiti ve değerlendirilmesi için tüm sistem performansına doğrudan etkilidir. EİS sistemleri genel olarak kompleks bir yapıya sahiptir. Bu kompleks yapının tasarımı ve yönetimi de oldukça güç olmaktadır. Tez çalışmasında işletmelere tasarım parametresi belirlemekten, performans değerlendirmesi ve uygulama kısmına kadar karar almada yardımcı olacak bir tasarım süreci sunulmuştur.

Tasarım süreçleri ile elde edilen alternatif EİS 'in değerlendirilmesi için çeşitli teknik ve yöntemler kullanılmıştır. Bu çalışmada öncelikle EİS performansına etki eden parametreler OC (Çalışma Davranışı) eğrileri ile tespit edilip değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre bekleme yeri kapasitesi, konveyör hızı ve işlem zamanlarının olasılık dağılımlarının makine kullanım oranı ve toplam çevrim zamanı arasındaki ilişkiyi etkilediği gözlenmiştir.

Daha sonra tez çalışmasının amaçlarından biri olan EİS kuyruk ağı modelleri incelenmiştir. Üretim tesisi ve KÜ CIM laboratuvarı uygulamalarından elde edilen sonuçlar göstermiştir ki, kuyruk ağları EİS sisteminin performans ölçümü için iyi bir temsilcisidir. Yapılan deneyler literatürde kabul gören ortalama %5'lik izafi fark sınırından yüksek değildir. Bu durum kuyruk ağ algoritmalarının etkinliğini göstermektedir.



Uygulama çalışmalarına TAI için kurulacak olan EİS hücresi çalışması ile devam edilmiştir. TAI iş süreçleri gereği EİS uygulamaya uygun bir altyapı içermektedir. Bu sebeple yapılan sistem analizleri ile TAI'de kurulması planlanan EİS hücresi için parametreler belirlenmiştir. Bu parametreler Hollier metodu ile test edilmiştir. Elde edilen yerleşim tasarımı kullanılarak simülasyon çalışmaları yapılmış sistem performans açısından test edilmiştir.

TAI kuyruk modeli oluşturularak simülasyon çalışmaları analitik olarak test edilmiştir. Kuyruk ağları ve simülasyon sonuçlarından elde edilen verilere göre EİS sisteminin TAI için uygun bir alternatif üretim sistemi olduğu öngörülmüştür.

Bu çalışmada, tek sınıflı blokesiz ve blokeli sistemler ile çok sınıflı blokesiz sistemler ele alınmıştır. İleriki bir çalışma olarak çok sınıflı blokeli sistemler için kuyruk modelleri geliştirilerek performans ölçümleri yapılabilir. Ayrıca kuyruk ağlarının optimizasyonu çalışmaları da yapılabilecek bir çalışma olarak değerlendirilebilir. Kuyruk ağlarının optimizasyonu sağlanarak çizelgeleme, iş dengeleme ve bekleme yeri atama problemleri de incelenebilir konulardır. Taguchi deney tasarımı gibi deneylerin daha etkin yapılmasını sağlayan metotlar kullanılarak belirlenecek kalite parametresi için performans değerlendirmeleri ve sistem parametre değişkenlikleri incelenebilir.

Ayrıca kuyruk disiplinlerinin (ilk giren ilk çıkar, son giren ilk çıkar vb) kuyruk ağı performansına etkileri de çalışılabilir konulardır. Bu durumlarda işlerin rotalama problemleri de incelenebilir.

## KAYNAKLAR

- Ahkioon, S., Bulgak, A. A., Bektas, T., Cellular manufacturing systems design with routing flexibility, machine procurement, production planning and dynamic system reconfiguration. *Int. J. of Production Research* 47 (6): 1573-1600, 2009.
- Akyildiz, I. F., Exact product form solution for queueing networks with blocking. *IEEE Transactions on Computers* 36 (1): 122-125, 1987.
- Akyıldız, I. F., On the Exact and Approximate Throughput Analysis of Closed Queueing Networks with Blocking. *IEEE Transactions on Software Engineering* 14 (1): 62-70, 1988.
- Akyıldız, I. F., Huang, C. C., Exact analysis of queueing networks with multiple job classes and blocking after service. *Queueing systems* 13: 427-440, 1992.
- Al-Ahmari, A. M. A., Ridgway, K., An integrated modelling method to support manufacturing systems analysis and design. *Computers in Industry* 38 (3): 225-238, 1999.
- Anglani, A., Grieco, A., Pacella, M., Tolio, T., Object-oriented modeling and simulation of flexible manufacturing systems: a rule-based procedure. *Simulation Modelling Practice and Theory* 10 (3-4): 209-234, 2002.
- Arbel, A., Seidmann, A., Performance evaluation of flexible manufacturing systems. *IEEE Transactions on Systems*, 606-617, 1984.
- Aşkın, R. G., Standridge, C. R., Modelling analysis of manufacturing systems. Wiley, USA, 1993.

- Azadivar, F., Lee, Y., Optimum number of buffer spaces in flexible manufacturing systems. *Queueing Theory in Man. Systems* içinde. 344-346. Yazan H. T. Papadopoulos, C. Heavey ve J. Browne,. 1986.
- Balsamo, S., Properties and analysis of queueing network models with finite capacities. *Lecture Notes in Comp. Sci*: 21-52, 1993.
- Bard, Y., Some extensions to multiclass queueing network analysis. *Queueing Networks and Markov Chains* içinde. 469-470. Yazan G. Bolch, S. Greiner, H. De Meer ve S. Trivedi, 4th Int. Symp. on Modelling and Performance Evaluation of Computer Systems, USA , 1979.
- Baskett, F., Chandy, K. M., Muntz, R. R., Palacios-Gomez, F., Open, closed and mixed networks fo queues with different classes of customers. *Journal of A.C.M* 22 (2): 248-260, 1975.
- Baynat, B., Dallery, Y., A product-form approximation method for general closed queueing networks with several classes of customers. *Performance Evaluation* 24: 165-188, 1996.
- Baynat, B., Dallery, Y., A Unified View of Product-Form Approximation Techniques For General Closed Queueing Networks. *Performance Evaluation* 18 (1): 205-224, 1993b.
- Baynat, B., ve Y. Dallery. Approximate Techniques For General Closed Queueing Networks with Subnetworks Having Population Constraints. *European Journal of Operational Research* 18, no. 1 (1993a): 250-264.
- Benito Martin, J. J., Paredes, A. L., Modelling flexible manufacturing systems as multiagent systems. *International Conference on Modeling and Simulation*, s. 141-150, 1999.

- Bi, Z. M., Zhang, W. J., Flexible fixture design and automation: Review, issues and future directions. *International Journal of Production Research*: 2867-2894, 2001.
- Bitren, G. R., A review of open queueing network models of manufacturing systems. *Queueing Systems*: 248-260, 1992.
- Bolch, G., Fleischmann, G., Schreppel, R., Ein funktionales konzept zur anlyse von warteschlangennetzen und optimierung von leistungsgrossen. *Informatik-Fachberichte 154*: 327-342, 1987.
- Bolch, G., Fischer, M., Botapproz: Eine engpassanalyse fur geschlossene warterschlangennetze auf der basis der summations- methode. h. dyckhoff, u. derigs, m. salomon and h. tijms, editors, *operations research proc. içinde*. 511-517. *Informatik-Fachberichte*, Amsterdam, 1993.
- Buzacott, J. A., Yao, D., On queueing network models of flexible manufacturing systems. *Queueing Systems*: 5-27, 1986.
- Buzen, J., Computational algorithms for closed queueing networks with exponential servers. *Communications of A.C.M.* 16 (9): 527-531, 1973.
- Caramanis, M., Queueing network models of flexible manufacturing systems. *Production System Design Lecture Notes*, 2001.
- Chan, F. T. S., Bhagwat, R., Wadhwa, S., Flexibility performance: Taguchi's method study of physical system and operating control parametres of FMS. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*: 25-37, 2007.
- Chandy, K., Herzog, U., Woo, L., Parametric analysis of queueing networks. *IBM Journal of Research and Development* 19 (1): 36-42, 1975.
- Choi, B. K., Han, K. H., Park, T. Y., Object-oriented graphical modeling of FMSs. *The International Journal of Flexible Manufacuring Systems*: 159-182, 1996.

- Conway, E., Georganas, D., RECAL-a new efficient algorithm for the exact analysis of multiple chain closed queueing networks. *Journal of A.C.M.* 33 (4): 768-791, 1986.
- Cooper, R. B., *Introduction to queueing theory.* North Holland, 1981.
- H., Çiçek Öztürk, *Laboratuar ortamında Esnek İmalat Sistemi ve PLC tasarımı.* Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara, 2000.
- Çiçek, N., Yüzükırmızı, M., Ersöz, S., *İleri Üretim Teknolojilerinin Türk Eğitim ve Sanayisinde Uygulamaları. Yöneylem Araştırması/Endüstri Mühendisliği 27. Ulusal Kongresi, İzmir, 2007.*
- Das, K., Baki, M. F., Li, X., *Optimization of operation and changeover time for production planning and scheduling in a flexible manufacturing system.* *Computers and Industrial Engineering*, 2008.
- De Meer, H., Bolch, G, Greiner, S., Trivedi, K. S., *Queueing networks and markov chains, modelling and performance evaluation with computer science applications,* John Wiley and Sons Inc., New York, 1998.
- Gershwin, S. B., Schor, J. E., *Efficient algorithms for buffer space allocation.* *Annals of Operations Research*, s. 117-144, 2000.
- E., A., Gonzales, *Optimal resource allocation in closed finite queueing networks with blocking after service.* Doktora Tezi, University of Massachusetts-Amherst, Massachusetts, 1997.
- Gordon, W. J., Newell, G. F., *Cyclic Queueing Systems with Restricted Length Queues.* *Operations Research* 15 (2): 266-277, 1967.
- Gordon, W., Newell, G., *Closed queueing systems with exponential servers.* *Operations Research* 15 (2): 254-265, 1967.

- Groover, M. P., Automation, production systems and computer-integrated manufacturing. Prentice Hall, New York, 2001.
- Hahn, T., Implementierung und Validierung der Mittelwertanalyse für höhere Momente und Verteilungen. Universität Erlangen-Nürnberg. IMMD IV, Studienarbeit, 1988.
- Han, M. H., McGinnis, L., Shop operating characteristic curves for shop control. International Journal of Production Research 27 (11): 1843-1853, 1989.
- Ho, J., Ranky, P. G., Object oriented modelling and design of reconfigurable conveyors in flexible assembly systems. International Journal of Computer Integrated Manufacturing 10 (5): 360-379, 1997.
- Hsu, T., Korbaa, O., Dupas, R., Goncalves, G., Cyclic scheduling for FMS modelling and evolutionary solving approach. European Journal of Operational Research 191: 464-684, 2008.
- Jackson, J., Jobshop-like queueing systems. Management Science 10 (1): 131-142, 1963.
- Jain, M., Maheshwari, S., Baghel, K. P. S., Queueing network modeling of Flexible Manufacturing System using mean value analysis. Applied Mathematical Modelling 32: 700-711, 2008.
- Kerbache, L., Smith, J. M., Asymptotic behavior of the expansion method for open finite queueing networks. Computers and Operations Research 15 (2): 157-169, 1988.
- Kerbache, L., Smith, J. M., The generalized expansion method for open finite queueing networks. European Journal of Operational Research 32: 448-461, 1987.

- Klingstam, P., Gullander, P., Overview of simulation tools for computer-aided production engineering. *Computers Industry* 38 (2): 173-186, 1999.
- Kovacs, G. L., Kopacsi, S., Nacsa, J., Haidegger, G., Groumpos, P., Application of software reuse and object-oriented methodologies for the modelling and control of manufacturing systems. *Computers in Industry* 39 (3): 177-189, 1999.
- Kunnathur, A. S., Sundararaghavan, P. S., Issues In FMS Installation: A Field Study And Analysis. *IEEE Transactions on Engineering Management* 39(4): 370-377, 1992.
- Liebeherr, J., Akyıldız, I. F., Deadlock properties of queuing-networks with finite capacities and multiple routing chains. *Queueing Systems* 20: 409-431, 1995.
- Lin, M., Fu, L., Shih, T., Virtual factory-a novel testbed for an advanced flexible manufacturing system. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Detroit, 2422-2427, 1999.
- Little, J. D. D., A proof for the queueing formula  $L=\lambda*W$ . *Operations Research* 9: 383-387, 1961.
- İ., Macit, Esnek Üretim Sistemlerinde Bilgisayar Ağları ve Akıllı Ajanlar İle Gerçek Zamanlı Üretim Kontrol Yaklaşımı. Yüksek Lisans Tezi. Çukurova Üniversitesi, Adana, 1999.
- Matta, A., Semeraro, Q., *Design of Advanced Manufacturing Systems*. Springer, Dordrecht, 2005.
- B., Matur, Esnek Üretim Süreçlerinin Türkiye Sanayileşmesinde bir strateji olarak geçerliliği. Yüksek Lisans Tezi. Gazi Üniversitesi, Ankara, 2003.
- Monks, J. G., *Operations management: Theory and problems*. McGraw-Hill Inc., USA, 1987.

- Nain, P., Basic elements of queueing theory. Ders Notları. 1998.
- Narayanan, S., Bodner, D. A., Sreekanth, U., Govindaraj, T., McGinnis, L. F., Mitchell, C. M., Research in object-oriented manufacturing simulations: an assessment of the state of the art. IIE Transaction 30 (9): 795-810, 1998.
- Nazzal, D., Mollaghasemi, M., Anderson, D., A simulation-based evaluation of the cost of cycle time reduction in Agere Systems wafer fabrication facility – a case study. International Journal of Production Economics 100: 300-313, 2006.
- Neuse, D., Chandy, K., Scat: A heuristic algorithm for queueing network models of computing systems. ACM Sigmetrics Performance Evaluation Review 10 (3): 59-79, 1981.
- Olhager, J., Persson, F., Using Simulation-Generated Operating Characteristics Curves for Manufacturing Improvement. Lean Business Systems and Beyond. International Federation for Information Processing, 195-204, 2008.
- Onosato, M., Iwata, K., Development of a virtual manufacturing system by integrating products models and factory models. CIRP, 399-402, 1993.
- Onvural, R., A note on the product form solutions of multiclass closed queueing networks with blocking. Performance Evaluation 10: 247-253, 1989.
- Onvural, R. O., Perros, H. G., Approximate Throughput Analysis of Cyclic Queueing Networks with Finite Buffers. IEEE Transactions on Software Engineering 15 (6): 800-808, 1989.
- Onvural, R., Perros, H., On equivalences of blocking mechanism in queueing networks with blocking. Operations Research Letters 5 (6): 293-298, 1986.
- Ou-Yang, C., Guan, T. Y., Lin, J. S., Developing a computer shop floor control model for a CIM system using object modeling technique. Computers in Industry: 225-238, 2000.



- Papadopoulos, H. T., Heavey, C., Browne, J., Queueing theory in manufacturing systems, analysis and design. Chapman and Hall, 1993.
- Park, C., A methodology for creating a virtual model for a flexible manufacturing system. Computers in Industry: 734-746, 2005.
- Pınarbaşı, M., Yüzükırmızı, M., QueNET: Esnek İmalat Sistemleri İçin Üretim Performans Değerlendirme Programı. Yöneylem Araştırması ve Endüstri Mühendisliği 29. Ulusal Kongresi. Bilkent Üniversitesi, Ankara, 2009.
- Raj, T., Shankar, R., Suhaib, M., A Review of Some Issues and Identification of Some Barriers in the Implementation of FMS. Int. J. Flexible Manufacturing Systems 19: 1-40, 2007.
- Raju, R. K., Chetty, K. O., Addressing design and control issues of AGV -based FMSs with Petri net aided simulation. Computer Integrated Manufacturing Systems 12 (4): 125-134, 1993.
- Reiser, M., A queueing network analysis of computer communication networks with window flow control. IEEE Trans. Commun. 27: 1199-1209, 1979.
- Reiser, M., Lavenberg, S., Mean value analysis for closed multi-chain queueing networks. Journal of A.C.M. 27 (2): 313-322, 1980.
- Rumbaugh, J., Blaha, M., Premerlani, W., Losenson, W., Object-Oriented Modeling and Design. Prentice Hall Inc., New York, 1991.
- Santarek, K., I. Buseif, M., Modeling and design of flexible manufacturing systems using SADT and Petri nets tools. Journal of Materials Processing Technology: 212-218, 1998.
- Savsar, M., Aldaihani, M., Modeling of machine failures in a flexible manufacturing cell with two machines served by a robot. Reliability Engineering and System Safety 93: 1551-1562, 2008.

- Schmidt, R., An approximate mva algorithm for exponential, class dependent multiple servers. *Performance Evaluation* 29: 245-254, 1979.
- Shivanand, H. K., Benal, M. M., Koti, V., *Flexible Manufacturing System*. New Age International Limited Publishers, Delhi New ,2006.
- Sipper, D., Robert, B. L., *Production planning control and integration*. McGraw Hill Inc., USA, 1997.
- Stotts, D. P., Newcomb, R. W., Cai, N. Z., Modelling the logical structure of flexible manufacturing systems with Petri-Nets. *Computer Communications* 12(4): 193-203, 1989.
- Sung, C. S., Kwon, S. T., Performance modeling of an FMS with finite input and output buffers. *Int. J. of Production Economics* 37: 161-175, 1994.
- Suri, R., Diehl, G. W., A variable buffer size model and its use in analyzing closed queueing networks with blocking. *Management Science* 32: 206-224, 1986.
- Tempelmeier, H., Kuhn, H., *Flexible manufacturing systems*. John Wiley and Sons Inc, New York, 1993.
- Tetzlaff, U., Optimal design of flexible manufacturing systems. *Flexible Manufacturing Systems içinde*. 308-314. Yazan H. Tempelmeier ve Kuhn, H., Wiley, 1990.
- Thesen, A., Some simple, but efficient, push and pull heuristics for production sequencing for certain flexible manufacturing systems. *International Journal of Production Research* 37 (7): 1525-1539, 1999.
- O., Tunçer, *Esnek Üretim Sistemleri ve Endüstri İşletmelerinde uygulanabilirliğinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi. Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, 2003.

- Venkatesh, K., Zhou, M., Object-oriented design of FMS control software based on object modeling technique diagrams and Petri nets. *Journal of Manufacturing Systems* 17 (2): 118-136, 1998.
- H., Wang, Approximate MVA algorithms for solving queueing network models. Yüksek Lisans Tezi. University of Toronto, Toronto, 1997.
- Yao, D. D., Buzacott, J. A., Modeling a Class of State-Dependent Routing in Flexible Manufacturing System. *Annual Operations Research*: 153-167, 1985.
- Yim, D. S., Barta, T. A., A Petri net -based simulation tool for the design and analysis of flexible manufacturing systems. *Journal of Manufacturing Systems* 28 (6): 251-261, 1994.
- Yüzükırmızı, M., Behavioral Analysis of Flexible Manufacturing Systems with Multiple Classes and Finite Capacities. 6. Vienna Conference on Mathematical Modeling ARGESIM, Viyana, s. 283-291, 2009.
- M., Yüzükırmızı, Finite Closed Queueing Networks with Multiple Servers and Multiple Chains. Doktora Tezi. University of Massachusetts Amherst, Massachusetts, 2005.
- Yüzükırmızı, M., Performance evaluation of closed queueing networks with limited capacities. *Turkish J. Eng. Env. Sci.* 30: 269-283, 2005
- Zhou, M. C., Dicesare, F., Rudolph, D. L., Design and implementation of a petri net based supervisor for a flexible manufacturing system. *Automatica* 28 (6): 1199-1208, 1992.
- Zhuang, L., Buzacott, J., Liu, X. G., Approximate mean-value performance analysis of cyclic queueing-networks with production blocking. *Queueing Systems* 16: 139-165, 1994.

Zhuang, L., Hindi, K. S., Mean value analysis for multiclass closed queueing network models of Flexible Manufacturing Systems with limited buffers. *European Journal of Operational Research* 46: 366-379, 1990.

## EKLER

### EK 1. QueNET ODA (MVA) PROGRAMI

Tez kapsamında kuyruk ağırları literatüründe sistem performansını ölçmek için kullanılacak bir program hazırlanması kararlaştırılmıştır. QueNET ismi verilen yazılım kullanıcı tarafından girilecek algoritma verilerini kullanarak ortalama değer analizi ile sistem çıktıları hesaplayıp kullanıcıya sunmaktadır. Program kullanıcının istasyon ve müşteri sayılarını girmesi ile girilecek diğer verilerin alınacağı kutuları otomatik olarak kullanıcıya sunmakta ve sistem çıktıları üretmektedir.

QueNET, Visual Studio 2005 programı ile Visual Basic. Net programlama dili kullanılarak hazırlanmıştır. QueNET, Single Class (tek sınıflı) ve Multi Class (çok sınıflı) sistemler için de ODA yapabilmektedir.

#### 1. Tek Sınıflı Sistemler İçin QueNET

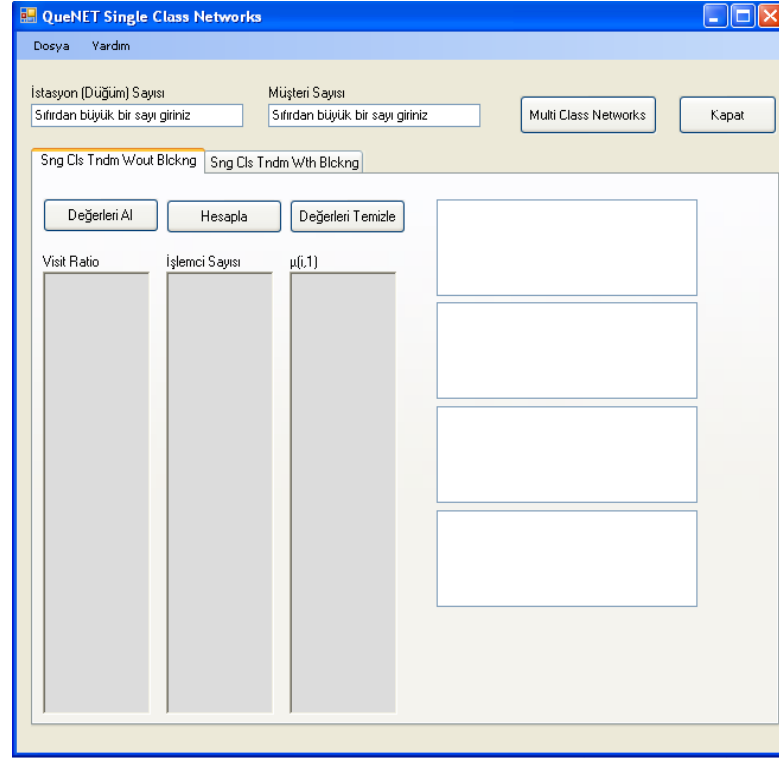
QueNET tek sınıflı sistemler için bloke olma durumu ve olmama durumuna göre ayrı ayrı analiz yapmaktadır. Bu analizleri yaparken Bölüm 5'te verilen tek sınıflı blokesiz sistemler için Algoritma 1, tek sınıflı blokeli sistemler içinse Algoritma 2'yi kullanmaktadır.

Şekil E1.1' de QueNET'in Single Class (tek sınıflı) ağlar için başlangıç sayfası verilmiştir. Şekildeki resimde görülen program penceresinin sol tarafında sistem girdilerinin alınacağı, sağ tarafta ise sistem çıktılarının verileceği bölümler yer almaktadır.

QueNET, kısaca aşağıdaki gibi çalışmaktadır:

- “İstasyon (Düğüm) Sayısı” kutusuna sistemdeki istasyon sayısı girilir.
- “Müşteri Sayısı” kutusuna sistemdeki oluşacak müşteri sayısı girilir.

- “Değerleri Al” butonuna tıklanarak sistem için gerekli diğer girdilerin alınacağı kutular aktif hale getirilir.



**Şekil E1.1.** QueNET Tek Sınıflı Sistemler Başlangıç Sayfası

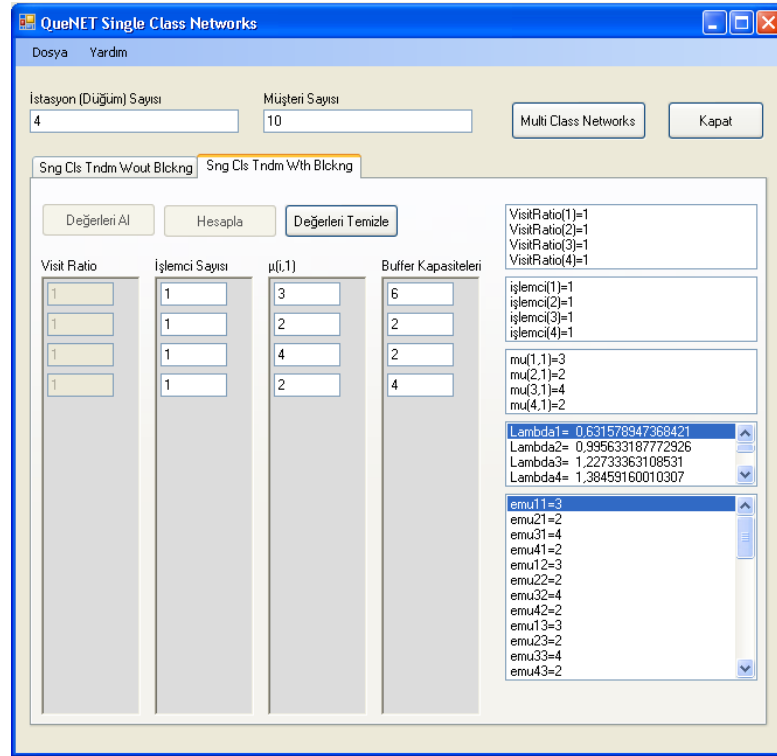
- Açılan yeni kutulara gerekli sistem girdileri yazıldıktan sonra “Hesapla” butonuna tıklanarak sistem çıktılarının sağ taraftaki kutularda listelenmesi sağlanır.
- “Değerleri Temizle” butonu ise sisteme, yeni değerler girmeniz için girdi kutularını temizler.

**Örnek:**

4 istasyondan oluşan bir esnek imalat hücresi için aşağıdaki girdiler verilmiş olsun;

- Her bir istasyonda birer adet işlemci vardır
- İşlem süreleri her bir istasyon için sıra ile (3, 2, 4, 2) dir
- Buffer kapasiteleri (6, 2, 2, 4) tür.

Böyle bir sistem 10 adet müşteri/ürün için çalıştırılırsa aşağıdaki gibi bir ekran çıktısı elde edilir (Şekil E2.2). Ekran da görülen “visit ratio” değerleri sistemde her bir istasyonun ziyaret oranını vermektedir. Bu oranlar tandem sistemler için bir(1) alınır. Değişik topolojili sistemlerde, uygun ziyaret oranları verilerek performans değerlemesi yapmak mümkündür. Sınırlı buffer kapasitelerinin verilmesi sistemin bloke olabileceğini gösterir.



Şekil E1.2. QueNET Tek Sınıflı Sistemlerin Bloke Durumu İçin Bir Örnek

Çıktı ekranının sağ alt köşesinde, blokeli durum için verilen “emu” (bloke olma durumunu da içeren servis süresi) değerleri görülmektedir. Bu değerler sistemin bloke olma olasılığına göre servis sürelerinin değişikliklerini görmemizi sağlar. Bu listenin üzerinde ise performans çıktılarında birim zamandaki çıktı sayısı ve çevrim süresi değerleri 1,64 ve 6,09 olarak görülmektedir. Bu değerler belirlenen zaman birimi başına sistemde işlem gören ortalama müşteri sayısını vermektedir.

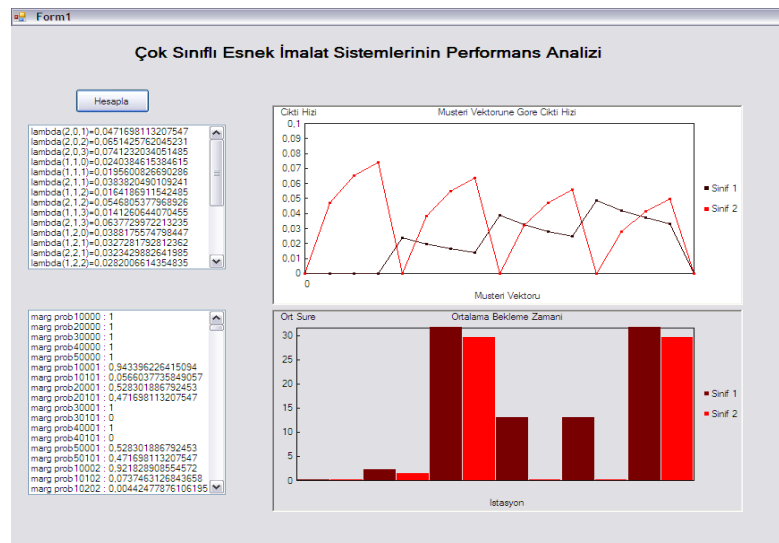
## 2. Çok Sınıflı Sistemler İçin QueNET

Çok sınıflı sistemlerin algoritmalarının yazılması ve çalıştırılması tek sınıflı sistemlere göre çok daha zordur. Buna istinaden bu sistemlerin yazılımının hazırlanması da bu ölçüde zorlaşmaktadır. QueNET programının geliştirilmesindeki ikinci adımı çok sınıflı sistemlerin ortalama değer analizini yapmak olmuştur.

Yazılımının zor olması ve çeşitli sistem durumları için analizin değişebilirliği nedeniyle programın yazılımı zaman almaktadır. Ayrıca bu tür değişik durumların programa eklenmesi yazılımın çalışmasını yavaşlatacak ve hantallaştıracaktır. Bu yüzden QueNET şimdilik sadece Bölüm 5’te bahsedilen çok sınıflı blokesiz sistemler için Algoritma 3 için çalışmaktadır

QueNET için düşünülen geliştirmeler program çıktılarının grafikler veya şekiller ile görselleştirilmesi, olabilecek muhtemel hata denetimlerinin yazılması, en uygulanabilir durumlar için çok sınıflı algoritmaların geliştirilmesi ve çeşitli sistemler ve durumlar için denemelerin yapılması olacaktır.

Çok sınıflı sistemler için programın deneme ekranı çıktısı Şekil E1.3’te verilmiştir. Yazılım sayesinde kuyruk ağı ODA değerlendirmesi 0,01 saniye gibi kısa bir sürede elde edilebilmektedir.



Şekil E1.3. QueNET Tek Sınıflı Sistemler Örnek Ekran Çıktısı