MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE ÖĞRENİMİ YÖNTEMİNİN HAT DENGELEMENİN GELİŞTİRİLMESİ ÜZERİNE ETKİSİ: HAZIR GİYİM SEKTÖRÜNDE BİR VAKA ÇALIŞMASI

CANBERK ELMALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Tekstil Mühendisliği
Anabilim Dalı
Tekstil Mühendisliği Programı

DANIŞMAN
Dr. Öğr. Üyesi Özge URAL

İSTANBUL, 2024

MARMARA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Öğrencisi, CANBERK ELMALI'nın "**Makine Öğrenimi Yönteminin Hat Dengelemenin Geliştirilmesi Üzerine Etkisi: Hazır Giyim Sektöründe Bir Vaka Çalışması**" Başlıklı tez çalışması, .../..../.... tarihinde savunulmuş ve jüri üyeleri tarafından başarılı bulunmuştur.

Jüri Üyeleri

Dr. Öğr. Üyesi Özge URAL (Danışman)
Marmara Üniversitesi .....(İMZA).....

Doç. Dr. Bekir Cenkkut GÜLTEKİN (Üye)
Marmara Üniversitesi .....(İMZA).....

Dr. Öğr. Üyesi Vedat ÖZYAZGAN (Üye)
Haliç Üniversitesi .....(İMZA).....

ONAY

Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun ..../..../... tarih ve ..... sayılı kararı ile Canberk ELMALI'nın Tekstil Anabilim Dalı, Tekstil Mühendisliği Programında Yüksek Lisans derecesi alması onanmıştır.

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ ii
SEMBOLLER iii
KISALTMALAR iv
ŞEKİL LİSTESİ vii
TABLO LİSTESİ ix
GRAFİK LİSTESİ xi
DİYAGRAM LİSTESİ xii
ÖZET xiii
ABSTRACT xiv
1. GİRİŞ 1
1.1. Giriş ve Amaç 1
2. ÜRETİM YÖNETİMİ 3
2.1. Üretim ve Üretim Yönetiminin Tarihsel Gelişimi 3
2.2. Üretim Sistemleri 4
2.2.1. Siparişe Göre Üretim 5
2.2.2. Parti Üretimi 5
2.2.3. Seri Üretim 6
2.2.4. Sürekli Üretim 6
2.3. Çekme/Pull Sisteminin Üretime Entegre Edilmesi 8
2.3.1. FIFO (First In, First Out) Sistemi 8
2.3.2. Kanban Sistemi 8
2.3.3. CONWIP Sistemi 9
2.3.4. POLCA Sistemi 10
2.3.5. Yeniden Sipariş Noktası 11
2.3.6. Kısıtlar Teorisi 12
2.3.7. COBACABANA Sistemi 13
2.4. MONTAJ HATLARI 14
2.4.1. Bir Montaj Hattının Temel Çalışma Mekanizması 15
2.4.2. Montaj Hatlarını Kapsayan Temel Kavramlar 17
2.4.2.1. Senkron/Asenkron Prensibi 17
2.4.2.2. Doymuş/Doymamış Hatlar 18
2.4.2.3. Sonlu ve Sıfır Stok Politikasının Hat Üzerindeki Etkisi 18
2.4.2.4. Arızalar 18

2.4.2.5. İşlem/Görev Süresi 19
2.4.2.6. Öncelik Diyagramı 20
2.4.2.7. Darboğaz Oluşumu 22
2.4.2.8. Beceri Matrisi 24
2.4.3. Montaj Hattına Operatör Ataması Üzerine Yapılan Çalışmalar 25
2.4.4. Montaj Hatları Problemlerinin Sınıflandırılması 28
2.4.4.1. Varsayımsal ALB Türleri 29
2.4.4.2. İş Akış Özelliklerine Göre ALB 32
2.4.4.3. Ürün Özelliklerine Bağlı ALB 34
2.4.4.4. Hat Yerleşimine Göre ALB 36
2.4.4.5. Amaca Göre ALB 40
2.4.4.6. Görev Süresine Göre ALB 42
2.4.5. Modern ALB Yöntemleri 43
2.4.5.1. Robotik Montaj Hatları 43
2.4.5.2. Yazılım Tabanlı Algoritmalar 44
2.4.5.2.1. Kesin Algoritmalar 44
2.4.5.2.2. Sezgisel Algoritmalar 45
2.4.5.2.3. Meta-Sezgisel (Meta-Heuristic) Algoritmalar 46
2.4.5.2.4. Simülasyon Tabanlı Optimizasyon 46
2.4.6. Makine Öğrenimi Yöntemi 47
2.4.7. İş Sürelerinin Belirlenmesi 49
2.4.7.1. Kronometre Yardımıyla İş Sürelerinin Belirlenmesi 50
2.4.7.2. GSD Yöntemi 52
2.4.7.3. Refa Yöntemi 53
2.4.7.4. Algoritma Bazlı İş Sürelerinin Belirlenmesi 54
2.4.7.4.1. Metrik Sınıflandırma 54
2.4.7.4.2. Aralıklı Sınıflandırma 54
2.4.7.4.3. Şekil Tabanlı Sınıflandırma 54
2.4.7.4.4. Sözlük Tabanlı Sınıflandırma 55
2.4.7.4.5. Hibrit Sınıflandırma 55
3. DENEYSEL ÇALIŞMA 56
3.1. Malzeme 56
3.1.1. Kapüşonlu Sweatshirt Ürünü 56
3.1.2. Dikiş Makineleri 57

3.1.3. Yazılım 58
3.1.4. Dijital Pano 60
3.2. Yöntem 60
3.3. Kronometre Metodunun Kullanıldığı Sistem 63
3.3.1. Kronometre Metodu ile Montaj Hattı Dengeleme 68
3.4. DTW-SAX Yazılımının Kullanıldığı Sistem..... 73
3.4.1. DTW-SAX Metodu ile Montaj Hattı Dengeleme 75
4. ANALİZ VE BULGULAR 79
4.1. DTW-SAX Yazılımı ile Operatör Performanslarının Ölçülmesi 79
4.1.1. Kol Manşet Hazırlama Operasyonu 79
4.1.2. Etek Ribana Hazırlama..... 80
4.1.3. Cep Ağzı Reçme 81
4.1.4. Cep Regula..... 81
4.1.5. Cep Takma..... 82
4.1.6. Punteriz..... 83
4.1.7. Omuz Çatma 84
4.1.8. Açık Kol Takma..... 84
4.1.9. Yan Çatma 85
4.1.10. Fermuar Takma 86
4.1.11. Fermuar Biye Takma..... 87
4.1.12. Fermuar Gaze..... 87
4.1.13. Kapüşon Hazırlama 88
4.1.14. Kapüşon Birleştirme..... 89
4.1.15. Kapüşon Ağzı Çıma 89
4.1.16. Kapüşon Biye Takma 90
4.1.17. Kuşgözü İşaret..... 91
4.1.18. Kuşgözü..... 92
4.1.19. Kapüşon Takma 92
4.1.20. Kapüşon Ucu Kapama..... 93
4.1.21. Kapüşon Biye Tutturma..... 94
4.1.22. Kapüşon Biye Kapama-Etiket..... 95
4.1.23. Kapüşon Ağzı Çiftiğne 95
4.1.24. Etek Takma 96
4.1.25. Kol Manşet Takma 97

4.2. Operasyonların Gerçekleşme Süreleri 98
4.3. İki Sistem Arasında Operasyon Bazlı Üretim Miktarı 99
4.4. İki Sistem Arasında Vardiya Üretim Miktarı 100
4.4.1. Kronometre Sisteminde Hedef Ürünün Tamamlanma Oranı 101
4.4.2. DTW-SAX Yazılımında Hedef Ürünün Tamamlanma Oranı 101
4.5. Çevrim Süresi 101
4.5.1. Çevrim Sürelerinin Kronometre Sisteminde Değerlendirilmesi 102
4.5.2. Çevrim Sürelerinin DTW-SAX Yazılımında Değerlendirilmesi.....103
4.5.3. İdeal Sistemde Operasyon Başına Düşen Operatör Sayıları.....104
4.6. Hat Dengeleme Oranı.....106
4.7. Yazılım Sisteminin İşletmeye Kârı 107
5. SONUÇ ve ÖNERİLER 108
KAYNAKÇA.....110
ÖZGEÇMİŞ 123

ÖNSÖZ

Hazır giyim sektöründe, seri üretimin verimli bir şekilde gerçekleşmesi için montaj hattı üretim yapısı en temel adımdır. Üretimde uygun montaj hattı kurulamadığı takdirde, dar boğaz gibi problemlerin oluşması üretimi ciddi bir şekilde etkilemektedir. Dar boğazların oluşumunu; yetersiz iş istasyonu, yetersiz işçi atamaları, malzeme akış yönünü doğru planlanmaması, performansı düşük operatörlerin çalışması gibi faktörler etkilemektedir.

Geleneksel yöntemlerde (kronometre vb.) montaj hattında hatalar yaygın olarak görülmektedir. Günümüzde geleneksel yöntemlerde meydana gelen problemleri ortadan kaldırmak ve işletme verimliliklerini arttırmak için hazır giyim sektöründe son yıllarda ön plana çıkan yenilikçi montaj hattı dengeleme yaklaşımları geliştirilmiştir. Bu yaklaşımlar içinde dijital yazılımlar daha verimli üretimler için öncülük etmektedir.

Bu çalışmada operasyon sürelerinin tespit edilmesi için Kronometre ve DTW-SAX yazılımından alınan veriler kıyaslanmış ve montaj hattına operatör ataması yapılarak hattın dengesi sağlanmaya çalışılmıştır.

Hazırlamış olduğum tez çalışmamda, bana rehberlik eden ve destek olan birçok kişi ve kuruma teşekkür etmek isterim. Öncelikle, tez danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Özge URAL'a tez sürecim boyunca bana verdiği değerli yönlendirmeler ve hiçbir zaman bana olan desteğini esirgemediği için sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, çalışmamın her aşamasında beni destekleyen aileme ve arkadaşlarıma da minnettarım.

Promar Tekstil İşletmesinde Şebnem YAVER Hanım'a ve Serkon Bilişim İşletmesinde Hüseyin AÇIKGÖZ Bey ve Ersin KARTAL Bey'e tez çalışmam süresince bana sağladıkları destek ve bilgiler için ayrıca teşekkür ederim.

Canberk ELMALI

İstanbul, 2024

SEMBOLLER

C:	Çevrim Süresi
K:	Sistemdeki Makine Sayısı
Mi:	Makine
Bi:	Stok
E:	Hat Etkinliği
N1:	Montaj Hattındaki Toplam İş Öğesi Sayısı
N2:	Dengeleme Sonrasında Oluşan İş İstasyonu Sayısı
j:	İstasyon
İ:	Ürünün Proses Süresi
Dİ:	Düzgünlük İndeksi
SI:	Pürüzsüzlük İndeksi
%:	Yüzde
Λ:	Yavru Sayısı (Evrimsel Algoritma)
μ:	Ebeveyn Sayısı (Evrimsel Algoritma)
Ne:	İngiliz İplik Numaralandırma Sistemi
te:	Öngörülen Zaman
tg:	Temel Zaman
ter:	Dinlenme Zamanı
tv:	Dağılım Zamanı
L:	Büyük Beden

KISALTMALAR

DTW: Dynamic Time Warping

SAX: Symbolic Aggregate Approximation

WDTW: Weighted Dynamic Time Warping

TWE: Time Warp Edit

MSM: Move-Split-Merge

CID: Complexity Invariant Distance

DD_{DTW}: Derivative Dynamic Time Warping

DTD_C: Derivative Transform Distance

TSF: Time Series Forest

TBSF: Time Series Bag of Features

LPS: Learned Pattern Similarity

FS: Fast Shapelets

ST: Shapelet Transform

LS: Learned Shapelets

BOP: Bag of Patterns

SAXVSM: Symbolic Aggregate Approximation - Vector Space Model

BOSS: Bag of Symbolic Fourier Approximation Symbols

EE: Elastic Ensemble

COTE: Collective of Transformation Ensembles

DTW_F: Dynamic Time Warping Features

APICS: American Production and Inventory Control Society

MTS: Make to Stock

MTO: Make to Order

FIFO: First In, First Out

TÜS: Toyota Üretim Sistemi

CONWIP: Constant Work in Progress

POLCA: Paired-Cell Overlapping Loops of Card

ROP: Reorder Point

SKU: Stock Keeping Unit

IBM: International Business Machines

AI: Artificial Intelligence

AGI: Artificial General Intelligence

COBACABANA: Control of Balance by Card Based Navigation

sn:	Saniye
dk:	Dakika
SÜA:	Saatlik Üretim Adeti
SMV:	Standard Minute Value
GA:	Genetic Algorithm
SALBP:	Simple Assembly Line Balancing
GALBP:	Generalized Assembly Line Balancing
ALB:	Assembly Line Balancing
UALBP:	U-Type Assembly Line Balancing Problem
MALBP:	Mixed-Model Assembly Line Balancing Problem
RALBP:	Robotic Assembly Line Balancing Problem
MOALBP:	Multi-Purpose Assembly Line Balancing Problem
JIT:	Just in Time Production
LB:	Line Balancing
MS:	Model Sorting
WIP:	Work in Progress
IoT:	Internet of Things
CC:	Cloud Computing
PWAL:	Assembly Line with Parallel Workstation
PAL:	Parallel Assembly Line
2SAL:	Two-Sided Assembly Line
STAL:	Straight Assembly Line
PAUL:	Parallel U Type Assembly Line
PMAL:	Parallel Multi-Human Assembly Line
HLs:	Hybrid Line
DP:	Dynamic Programming
B&B:	Branch Border Procedure
AGSA:	Adapted General Setting Algorithm
RPW:	Rank Positional Weight
LCR:	Largest Candidate Rule
COMSOAL:	Computer Method of Sequencing Operations for Assembly Lines
GA:	Genetic Algorithm
GP:	Genetic Programming
ES:	Evolutionary Strategy

EP:	Evolutionary Programming
PSO:	Particle Swarm Optimization
MOSA:	Multi-Purpose Simulated Annealing
PASA:	Pareto Archived Simulated Annealing
MTM:	Method Time Measurement
GSD:	General Sewing Data
İTO:	İstanbul Ticaret Odası
ÇTSO:	Çorlu Ticaret ve Sanayi Odası
İTKİB:	İstanbul Tekstil ve Konfeksiyon İhracatçı Birliği
İHKİP:	İstanbul Hazır Giyim ve Konfeksiyon İhracatçıları Birliği
ÖRSAD:	Örme Sanayicileri Derneği
SCC:	Swedish Chamber of Commerce
CRM:	Customer Relations Management
B2B:	Business-to-Business
B2C:	Business to Customer
RPT:	Repetitive Product
ERP:	Enterprise Resource Planning
Mm:	Milimetre
ÜA:	Üretim Adeti
TÇS:	Toplam Çalışma Süresi
HATO:	Hedef Adetin Tamamlanma Oranı

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1 Şematik Üretim Sistemi 4
Şekil 2 İtme/Push Sisteminin Şematik Olarak Gösterilmesi 7
Şekil 3 Çekme/Pull Sisteminin Şematik Olarak Gösterilmesi 8
Şekil 4 FIFO Sisteminin Şematik Olarak Gösterilmesi 8
Şekil 5 Temel Kanban Sistemi Şeması 9
Şekil 6 CONWIP Sisteminin Üretim Akışı Sırasındaki Davranışı 10
Şekil 7 CONWIP Sisteminin Şematik Olarak Gösterilmesi 10
Şekil 8 POLCA Sisteminin Şematik Olarak Gösterilmesi 11
Şekil 9 Bir Yeniden Sipariş Noktasının Örnek Fonksiyon Grafiği 11
Şekil 10 Yeniden Sipariş Noktasında Zaman İçerisinde Envanter ve Güvenli Stoğun Grafiği 12
Şekil 11 Kısıtlar Teorisinin Çıkış Fikri 12
Şekil 12 Kısıtlar Teorisinin Temel Şematik Gösterimi 13
Şekil 13 COBACABANA Geri Bildirim Döngüsünün Şeması 13
Şekil 14 Paralel İş İstasyonlarına Sahip Bir Montaj Hattının Şematik Gösterimi 14
Şekil 15 5 Makineli Örnek Montaj Hattının Şematik Gösterimi 16
Şekil 16 Darboğaz (Bottleneck) Oluşumunun Şematik Olarak Gösterilmesi 24
Şekil 17 Beceri Matrisinin Örnek Kullanım Şeması 24
Şekil 18 İstasyonlar Arasında Parça Akışını Sağlayan Örnek Bir Konveyör Hattı 32
Şekil 19 Ürün Özelliklerine Bağlı Olarak Tek Modelli (A), Karma Modelli (B) ve Çoklu Modelli (C) Montaj Hattı Tipleri 36
Şekil 20 Örnek "j" İstasyonunun Düz Montaj Hat Hali ve Paralel Montaj Halinin Şematik Gösterimi 37
Şekil 21 Düz Montaj Hattının Şematik Gösterimi 37
Şekil 22 U-Şekilli Montaj Hattının Şematik Gösterimi 38
Şekil 23 İki Taraflı Montaj Hattının Şematik Olarak Gösterimi 38
Şekil 24 S-şekilli Montaj Hattının Şematik Gösterimi 39
Şekil 25 L-Şekilli Montaj Hattının Şematik Gösterimi 40
Şekil 26 Otomotiv Endüstrisinde Örnek Bir Robotik Montaj Hattı (RAL) 43
Şekil 27 Montaj Hatlarında Kullanılan Algoritmaların Sınıflandırılması 44
Şekil 28 Makine Öğrenimi Yönteminde Kullanılan Algoritmalar 48
Şekil 29 Süre Ölçülürken Dikkat Edilmesi Gereken Beş Temel Hareket 50
Şekil 30 Beş Temel Hareket Verilerinin Gruplandırılması 51
Şekil 31 Kronometre Uygulamasının Sürekli İyileştirme Süreci 51
Şekil 32 Bir İşletmede İş Sürelerinin Ölçülmesi Uygulamasında Sürekli İyileştirme Süreci 52
Şekil 33 Refa Standart Zaman Ölçümü Yönteminin Temel Mekanizması 53
Şekil 34 Kapüşonlu Sweatshirt Ürünün Teknik Çizimi 56
Şekil 35 Üç İplik Örgü Yapısı 57
Şekil 36 Çalışmada İncelenen Ürünün Görseli 57

Şekil 37 Üretim Sahasından Veri Toplama ve Çalışanların Performansının Analiz Edilmesi 58
Şekil 38 Operatörün Makineyi Etkin Çalıştırma Çizelgesi 60
Şekil 39 Her İş İstasyonunda Bulunan Dijital Pano 60
Şekil 40 A İşletmesinde Süre, Performans ve Hat Kurulumu Analiz Yöntemleri.....61
Şekil 41 Kapüşonlu Sweatshirt Ürününün İş Akış Diyagramı 62
Şekil 42 Promar Tekstil İşletmesinin 2 Ayrı Sistemde Dikimhane ve Montaj Hatlarının Yerleşimi 63
Şekil 43 Fermuar Takma Operasyonunun Operatör Başına Düşen Operasyon Süresi 70
Şekil 44 Cep Regula ve Cep Ağzı Reçme Operasyonlarının Operatör Başına Düşen Operasyon Süresi 70
Şekil 45 Kapüşon Birleştirme ve Kapüşon Takma Operasyonlarının Operatör Başına Düşen Operasyon Süresi 71
Şekil 46 Kronometre Yönteminin Uygulandığı Montaj Hattında, Makine İş İstasyonlarının Yerleşimi, İş ve Malzeme Akış Yönü 71
Şekil 47 DTW-SAX Yazılımının Kullanıldığı Montaj Hattında, Makine İş İstasyonlarının Yerleşimi, İş ve Malzeme Akış Yönü 77

TABLO LİSTESİ

Tablo 1 Öncelik Diyagramı için Örnek Görevler ve Süreleri**Error! Bookmark not defined.**
Tablo 2 Verilen Örnekte Görevlerin İş İstasyonlarına Atanması**Error! Bookmark not defined.**
Tablo 3 Montaj Hatlarında Operatör Ataması ve Algoritmalar Üzerine Yapılan Çalışmalar 27
Tablo 4 Zaman Sınıflandırma Modellerinin Problem Tipine Göre Performansları.....**Error! Bookmark not defined.**
Tablo 5 İncelenen Ürünün Eski Sistemdeki Operasyon Verileri.....64
Tablo 6 Montaj Hattı Üzerinde Yapılan Makine İşlerinin Hedef ve Gerçekleşen Süreleri 66
Tablo 7 Gerçekleşen Süre Üzerinden Vardiya/Saatlik Üretim Adeti Kıyaslaması 67
Tablo 8 Kronometre Metodu Üzerinden Belirlenen Süreler Üzerinden Hat Dengeleme İşlemi .....**Error! Bookmark not defined.**
Tablo 9 DTW-SAX Yazılımının Tespit Ettiği Operasyon Süreleri ve Hedef Süreler .**Error! Bookmark not defined.**
Tablo 10 Gerçekleşen Süreler ve Hedef Süreler Üzerinden Gerçekleşmesi Planlanan Üretim Adetleri .....**Error! Bookmark not defined.**
Tablo 11 DTW-SAX Yazılımı Kullanılarak Hatta Atanan Operatörlerin Operasyon Süreleri, Operatör Sayıları ve Operasyon Adetleri 76
Tablo 12 Kol Manşet Hazırlama Operasyonunun Operatörler Bazında Gerçekleştirilen Süreleri .....**Error! Bookmark not defined.**
Tablo 13 Etek Ribana Hazırlama Operasyonunun Operatörler Bazında Gerçekleştirilen Süreleri 80
Tablo 14 Cep Ağzı Reçme Operasyonunun Operatörler Bazında Gerçekleştirilen Süreleri .....**Error! Bookmark not defined.**
Tablo 15 Cep Regula Operasyonunun Operatörler Bazında Gerçekleştirilen Süreleri.....81
Tablo 16 Cep Takma Operasyonunun Operatörler Bazında Gerçekleştirilen Süreleri.....82
Tablo 17 Punteriz Operasyonunun Operatörler Bazında Gerçekleştirilen Süreleri.....83
Tablo 18 Omuz Çatma Operasyonunun Operatörler Bazında Gerçekleştirilen Süreleri 84
Tablo 19 Açık Kol Takma Operasyonunun Operatörler Bazında Gerçekleştirilen Süreleri 84
Tablo 20 Yan Çatma Operasyonunun Operatörler Bazında Gerçekleştirilen Süreleri 85
Tablo 21 Fermuar Takma Operasyonunun Operatörler Bazında Gerçekleştirilen Süreleri 86
Tablo 22 Fermuar Biye Takma Operasyonunun Operatörler Bazında Gerçekleştirilen Süreleri 87
Tablo 23 Fermuar Gaze Operasyonunun Operatörler Bazında Gerçekleştirilen Süreleri...87
Tablo 24 Kapüşon Hazırlama Operasyonunun Operatörler Bazında Gerçekleştirilen Süreleri .....**Error! Bookmark not defined.**
Tablo 25 Kapüşon Birleştirme Operasyonunun Operatörler Bazında Gerçekleştirilen Süreleri 89

Tablo 26 Kapüşon Ağzı Çıma Operasyonunun Operatörler Bazında Gerçekleştirilen Süreleri 89
Tablo 27 Kapüşon Biye Takma Operasyonunun Operatörler Bazında Gerçekleştirilen Süreleri .....**Error! Bookmark not defined.**
Tablo 28 Kuşgözü İşaret Operasyonunun Operatörler Bazında Gerçekleştirilen Süreleri .91
Tablo 29 Kuşgözü Operasyonunun Operatörler Bazında Gerçekleştirilen Süreleri 92
Tablo 30 Kapüşon Takma Operasyonunun Operatörler Bazında Gerçekleştirilen Süreleri 92
Tablo 31 Kapüşon Ucu Kapama Operasyonunun Operatörler Bazında Gerçekleştirilen Süreleri 93
Tablo 32 Kapüşon Biye Tutturma Operasyonunun Operatörler Bazında Gerçekleştirilen Süreleri 94
Tablo 33 Kapüşon Biye Kapama-Etiket Operasyonunun Operatörler Bazında Gerçekleştirilen Süreleri 95
Tablo 34 Kapüşon Ağzı Çiftiğne Operasyonunun Operatörler Bazında Gerçekleştirilen Süreleri 95
Tablo 35 Etek Takma Operasyonunun Operatörler Bazında Gerçekleştirilen Süreleri 96
Tablo 36 Kol Manşet Takma Operasyonunun Operatörler Bazında Gerçekleştirilen Süreleri 97
Tablo 37 Kronometre ve DTW-SAX yazılımının Kullanıldığı Sistemde Tespit Edilen Operasyon Süreleri.....99
Tablo 38 Operasyonların 2 Ayrı Sistemde Gerçekleşen Üretim Adeti Kıyası 100
Tablo 39 2 Ayrı Sistem Arasında Hedeflenen Vardiya Ürün Adeti 101
Tablo 40 Kronometre ve DTW-SAX yazılımının Hedef Adetinin Tamamlanma Oranı (%) 101
Tablo 41 2 Ayrı Sistem Arasındaki Çevrim Süresi Kıyası.....102
Tablo 42 Kronometre Sisteminde Operatör Başına Düşen Sürelerin Çevrim Süresine Kıyası 103
Tablo 43 DTW-SAX Yazılımında Operatör Başına Düşen Sürelerin Çevrim Süresine Kıyası 104
Tablo 44 İdeal Sistemde Operasyon Başına Düşen Operatör Sayıları ve Ç.S. Arasındaki Süre Farkı 106
Tablo 45 İki Ayrı Sistemde Hesaplanan Hat Dengeleme Oranı 107

GRAFİK LİSTESİ

Grafik 1 Kol Manşet Hazırlama Operasyonunu Gerçekleştiren Operatörlerin Performansları 80
Grafik 2 Etek Ribana Hazırlama Operasyonunu Gerçekleştiren Operatörlerin Performansları.....80
Grafik 3 Cep Ağzı Reçme Operasyonunu Gerçekleştiren Operatörlerin Performansları ...81
Grafik 4 Cep Regula Operasyonunu Gerçekleştiren Operatörlerin Performansları 82
Grafik 5 Cep Takma Operasyonunu Gerçekleştiren Operatörlerin Performansları.....83
Grafik 6 Punteriz Operasyonunu Gerçekleştiren Operatörlerin Performansları.....83
Grafik 7 Omuz Çatma Operasyonunu Gerçekleştiren Operatörlerin Performansları 84
Grafik 8 Açık Kol Takma Operasyonunu Gerçekleştiren Operatörlerin Performansları....85
Grafik 9 Yan Çatma Operasyonunu Gerçekleştiren Operatörlerin Performansları.....86
Grafik 10 Fermuar Takma Çatma Operasyonunu Gerçekleştiren Operatörlerin Performansları.....86
Grafik 11 Fermuar Biye Takma Çatma Operasyonunu Gerçekleştiren Operatörlerin Performansları.....87
Grafik 12 Fermuar Gaze Operasyonunu Gerçekleştiren Operatörlerin Performansları.....88
Grafik 13 Kapüşon Hazırlama Operasyonunu Gerçekleştiren Operatörlerin Performansları 88
Grafik 14 Kapüşon Birleştirme Operasyonunu Gerçekleştiren Operatörlerin Performansları 89
Grafik 15 Kapüşon Ağzı Çıma Operasyonunu Gerçekleştiren Operatörlerin Performansları 90
Grafik 16 Kapüşon Biye Takma Operasyonunu Gerçekleştiren Operatörlerin Performansları 91
Grafik 17 Kuşgözü İşaret Operasyonunu Gerçekleştiren Operatörlerin Performansları 92
Grafik 18 Kuşgözü Operasyonunu Gerçekleştiren Operatörlerin Performansları.....92
Grafik 19 Kapüşon Takma Operasyonunu Gerçekleştiren Operatörlerin Performansları ..93
Grafik 20 Kapüşon Ucu Kapama Operasyonunu Gerçekleştiren Operatörlerin Performansları.....94
Grafik 21 Kapüşon Biye Tutturma Operasyonunu Gerçekleştiren Operatörlerin Performansları.....94
Grafik 22 Kapüşon Biye Tutturma Operasyonunu Gerçekleştiren Operatörlerin Performansları.....95
Grafik 23 Kapüşon Ağzı Çiftiğne Operasyonunu Gerçekleştiren Operatörlerin Performansları.....96
Grafik 24 Etek Takma Operasyonunu Gerçekleştiren Operatörlerin Performansları.....97

Grafik 25 Kol Manşet Takma Operasyonunu Gerçekleştiren Operatörlerin Performansları 98

DİYAGRAM LİSTESİ

Diyagram 1 Hat Üzerinde Bulunan Görevlerin Öncelik Diyagramı.....22
Diyagram 2 Beş İstasyonun Çevrim Süreleri ve İstasyon Başına Saatte Üretim Adetleri..22
Diyagram 3 Montaj Hattı Türlerinin Genel Olarak Sınıflandırılması 29

ÖZET

MAKİNE ÖĞRENİMİ YÖNTEMİNİN HAT DENGELEMENİN GELİŞTİRİLMESİ ÜZERİNE ETKİSİ: HAZIR GİYİM SEKTÖRÜNDE BİR VAKA ÇALIŞMASI

Hazır giyim sektöründe, montaj işleminin yapılabilmesi için öncelikle ilgili ürünü oluşturacak her bir operasyonun belirlenmesi gerekmektedir. Belirlenen operasyonlar, gerekli olan işlem önceliklerine göre iş istasyonlarına atanmaktadır. Operasyonlara ilgili operatörlerin atanması ile birlikte oluşturulan sistem, "montaj hattı" olarak adlandırılmaktadır.

Geleneksel yöntemler ile montaj hattı oluşturulduğu zaman operasyonlara yeterli sayıda operatör atanmadığı durumlarda hat üzerinde, dar boğaz oluşumu gibi bazı problemler ortaya çıkmaktadır. Montaj hattında dar boğazların meydana gelmesinde birçok faktör rol oynamaktadır. Bu faktörlerden en yaygın olanları; yetersiz iş istasyonu atanması, iş istasyonlarına yetersiz operatör atanması, hat üzerinde malzeme akış yönünün doğru planlanmaması, atanan operatörlerin operasyonu yapabilecek yeterlilikte olmaması, operasyonlar için hedeflenen sürenin ilgili mühendisler tarafından doğru saptanamaması vb. olarak sıralanabilir. Bu faktörler montaj hattı üzerinde istenmeyen sorunlara yol açabilmektedir. Geleneksel hat oluşturma yöntemlerinde dar boğazlar gibi bazı olumsuz durumlar dışında, yeni üretilecek ürünler için yeniden hesapların yapılması, hattın baştan düzeltilmesi vb. durumlar işletmelerin çok fazla zaman kaybetmesine yol açacaktır. Hattın tekrar oluşturulmasındaki zaman kaybı, üretim esnasında dar boğazların oluşması ve uygun operatörlerin istasyonlara atanmaması hem verimlilik hem de kalite kayıplarına sebep olmaktadır.

Montaj hattı dengeleme işleminde operasyon sürelerinin, çevrim süresine yakın olması hedeflenmektedir. Operatörlerin, ürünü makine üzerinde tamamlama süreleri ortalama olarak bellidir ancak malzemeyi alışı-bırakışı sırasında harcanan süreler ve planlı olmayan duruşlar ile birlikte operatörlerin performanslarının etkisi kritik bir parametre olarak ortaya çıkmaktadır. Bu çalışmada, tespit edilen operasyonel bazda performansı yakın olan çalışanların iş istasyonlarına atanması ile çevrim süresinin azaltılması, üretim verimliliğinin artırılması ve montaj hattının dengelenmesi amaçlanmaktadır.

Bu çalışmada, operasyon sürelerinin belirlenmesi ve operatör performanslarının analiz edilerek montaj hattına atanmasında kronometre ve DTW-SAX yazılımı olmak üzere 2 ayrı sistem üzerinde kıyaslama yapıldı. Çalışmada kullanılan DTW-SAX yazılımı birçok noktada kronometre sistemine göre üstünlük sağladı.

Hazır giyim sektöründe son yıllarda ön plana çıkan yenilikçi montaj hattı dengeleme yaklaşımları ile hatta operatör atama, çalışanların performansını geliştirme ve dengelemede

meydana gelen problemlerin çözümü incelenecektir. Çalışma hazır giyim üretimi yapan A ve işletmeye dijital yazılım desteği veren B işletmesinin katkılarıyla gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Montaj Hattı Dengeleme, Makine Öğrenimi Yöntemi, Operatör Atama, Hat Dengeleme Problemi, Boş Zamanların ve Kayıpların Önlenmesi

ABSTRACT

THE IMPACT OF MACHINE LEARNING METHOD ON IMPROVEMENT OF LINE BALANCING: A CASE STUDY IN THE READY-TO-WEAR INDUSTRY

In the ready-to-wear industry, in order to carry out the assembly process each operation that will create the relevant product must first be determined. Determined operations are assigned to workstations according to the required processing priorities. The system created by assigning relevant workers to operations is called "assembly line".

When an assembly line is created using traditional methods, some problems such as bottleneck formation on the line arise when not enough workers are assigned to the operations. Many factors play a role in causing bottlenecks on the assembly line. The most common of these factors are the assignment of inadequate workstations, the assignment of insufficient workers to the workstations, the direction of material flow on the line not being planned correctly, the assigned workers not being competent to perform the operation, the targeted time for the operations not being determined correctly by the relevant engineers, etc., which can lead to undesirable problems on the assembly line.

In traditional line creation methods, apart from some negative situations such as bottlenecks, re-calculations for new products to be produced, correcting the line from scratch, etc. will cause the company to lose a lot of time. The loss of time in rebuilding the line, the formation of bottlenecks during production and the failure to assign skilled workers to stations will negatively affect the quality of the final product.

In the assembly line balancing process, the operation times are aimed to be close to the cycle time. The average time it takes for workers to complete the product on the machine is certain, but the impact of the workers' performance along with the time spent picking up and dropping off the material and unplanned stoppages, emerges as an important parameter. In this study, it is aimed to reduce the cycle time, increase the production quantity and balance the assembly line by assigning employees whose performance is close to the determined operational basis to the workstations.

In this study, a comparison was made on two separate systems: stopwatch and DTW-SAX algorithm to determine operation times and analyze worker performances and assign them to the assembly line. The DTW-SAX algorithm used in the study was superior to the stopwatch system in many points.

Innovative assembly line balancing approaches that have come to the fore in the ready-made clothing industry in recent years and the solution to the problems that occur in assigning workers and improving and balancing the performance of employees will be examined. In this study was carried out with Promar Textile, a ready-to-wear company, and B Informatics, which provides software support to the business.

Key Words: Assembly Line Balancing, Machine Learning Method, Worker Assignment, Balancing Problem, Preventing Idle Time and Losses

1. GİRİŞ

1.1. Giriş ve Amaç

Endüstrileşme sürecinde, toplam iş öğelerini parçalara ayırarak, işin çalışanlar tarafından daha seri, hızlı ve ucuz üretim yapabileceği düşüncesi ön plana çıkmıştır. İnsanların geçmişe kıyasla, günümüzde artan refah ve yaşam düzeyi aynı zamanda dünya nüfusunun hızla artması ve içinde bulunduğumuz pandemi dönemiyle birlikte hızlı tüketimin zirve yaptığı bir noktada bulunmaktayız. Geçmişte, çok aşamalı yollar ile üretilebilecek karmaşık ürün veya ürün gruplarının hızlı ve daha büyük miktarlarda üretilmesi düşüncesi ön plana çıkmıştır. Günümüzde ise üretimi basit bir ürün dahi olsa müşteri ya da kullanıcılar, ürünün kısa bir süre içerisinde eline geçmesini istediği için ürünün karmaşık ya da basit üretimine bakmaksızın, üretim süreçlerinin daha hızlı ve büyük miktarlarda olması zorunluluğu ortaya çıkmıştır.

Bu yaklaşıma, rakip işletmelerin dahil olmasıyla, ortaya çıkan rekabet yarışı ile piyasa koşulları zorlaşmaya başlayacağından, üretim hatlarını tasarlamak ve bu hatlarda meydana gelebilecek çeşitli zorluklar karşısında yeterli esnekliği verebilecek seviyede hat tasarımına ve yaklaşımları üzerine yeni çalışmalar ve araştırma yapmak kaçınılmaz olmuştur. Bu nedenle, üretim sektörlerinde, üretim hattı içerisinde iş bölümü, uzmanlaşma ve teknolojik altyapılardan yararlanmaya başlanmıştır.

Seri üretimin olduğu ve üretimin birimler halinde yapıldığı sistemlerde, yüksek üretim hızı ve büyük miktarlarda çıktıyı karşılamanın yolu montaj hatlarını oluşturmaktan geçmektedir. Malzemelerin veya ürünün, akış hattı boyunca donanım ve işgücünden faydalanarak birimlere aktarıldığı ve ürün parçalarının üzerindeki işlemlerin; aralarındaki "öncelik ilişkileri ve çevrim süresi gibi" kısıtlar dikkate alınarak birleştirilmesiyle oluşturulan istasyonların, bir hat boyunca sıralanmalarıyla oluşturulan sisteme, montaj hattı denir. Bir montaj hattının temel özelliği iş parçalarının bir istasyondan diğer bir istasyona transfer edilmesidir [1].

İşletmelerin rekabet güçleri, kaynakların verimli ve etkin biçimde kullanılması sonucunda belirlenmektedir. Kaynakların verimli ve etkin biçimde kullanılması, montaj hatlarında, iş yüklerinin, iş istasyonlarına dengeli bir şekilde dağıtılması sonucu mümkün olmaktadır. Montaj hattı dengeleme problemi, montaj hattı yapan işletmelerde, montaj işlemi sırasında, istasyonlar arasındaki öncelik ilişkileri dikkate alınarak iş istasyonlarında düzenleme yapılmasıdır.

Günümüz dünyasında işletmelerin büyük bir bölümü montaj yoluyla üretim yapmaktadır. İstenilen ürünü en uygun maliyetle ve talebe en uygun şekilde gerçekleştirmesi, işletmelere ciddi bir rekabet avantajı getirmektedir. Üretim taleplerinin her geçen gün artmasından dolayı, montaj hatları, fazla miktarlarda siparişleri, minimum maliyetle, istenen kalitede ve talep edilen sürede üretilmesi, amaçlanan seri üretim sistemlerinin değiştirilemez bir parçası durumuna getirmiştir [2].

Montaj hattının verimli olarak çalışması için; mevcut kısıtlar altında, işlem sayısının fazla ve üretim hızının yüksek olması sebebiyle iş istasyonları arasındaki süre farkı en aza indirgenmelidir.

Bu çalışmada, işletmeleri zaman ve mali açıdan zarara uğratan, dar boğazları önlemek için hat dengeleme çalışması yapılmıştır. Çalışma, hat üzerinde tanımlı olan iş istasyonlarına operatör atamayı kapsamaktadır. Burada hat üzerine operatör ataması yapılırken makine öğrenimi metodu kullanılmaktadır. Makine öğrenimi metodu yapılan iş üzerinden veri toplar ve bu verilerin gerçek zamanlı analizini yaparak, yapılan işin optimum seviyede olması için makinenin aksiyon almasını içermektedir.

Geleneksel yöntemler ile çalışan işletmeler, hedef süreyi belirlemek için her bir operasyonu kronometre ile ölçmektedir ya da önceden çalışılan (RPT) ürünler için sistemde kayıtlı olan verileri kullanmaktadırlar.

Kronometre metodu ile zaman ölçümleri ekonomik ancak uzun zaman alan etütlerle gerçekleşmektedir. Operasyonların zamanlarının belirlenmesinde etüt alan operatörün uzmanlığı çalışmanın doğru ve güvenilir olmasında önemli bir etkendir. Operatörün uygulama sırasında yapacağı hatalar, değerlendirme kriterlerinde göz ardı edilebileceği veya inisiyatif kullanma gibi durumları ölçüm sonuçlarını etkilemektedir.

Hedef süre doğru belirlenmediği zaman hat dengeleme üzerinde yapılan bütün hesaplar, planlamalar hatalı olacaktır. Bu sebeplerle hedef süreyi yapay zekâ teknolojisi ile belirlemek, hat dengeleme uygulamasına çok büyük avantaj sunacaktır.

Bu teknoloji kullanılarak, her operatörün operasyonlardaki süreleri ve performansları buluta kaydedilmektedir. Hat üzerine operatör atama, operasyon bazlı olarak yapılmaktadır. Operasyonlara operatör ataması yapılırken ilgili operasyonda çalışan operatörlerin performansları kullanılan yazılım tarafından analiz edilir ve birbirine yakın performans sergileyen çalışanlar iş istasyonuna atanmaktadır. Burada amaç, birbirine uygun sürelerde çalışan operatörleri montaj hattına atayarak, montaj hattın dengesini sağlamaktır.

2. ÜRETİM YÖNETİMİ

Üretim, kuruluşun üretim alt sisteminde kullanılan çeşitli kaynakları, kuruluşun politikalarına göre belirli bir sırada ve kontrollü bir şekilde bir araya getirerek katma değerli ürün/hizmetlere dönüştüren süreçtir [2].

Bu nedenle, bir organizasyonun, bir dizi girdinin gerekli kalite düzeyine sahip gerekli ürünler ya da hizmetler haline dönüştürülmesi ile ilgili kısmıdır. Belirli ürünlerin imalatında yer alan birbiriyle ilişkili yönetim faaliyetleri kümesine "üretim yönetimi" denir. Aynı kavram hizmet yönetimine genişletilirse, karşılık gelen yönetim faaliyetleri kümesine "operasyon yönetimi" denir [2].

Üretim fonksiyonu, bir organizasyonun, bir dizi girdinin gerekli kalite düzeyine sahip gerekli çıktılara (ürünlere) dönüştürülmesiyle ilgili kısmıdır [2].

Üretim, "ürünün kullanıcıya faydasını yaratmak veya geliştirmek için kimyasal veya mekanik işlemler yoluyla bir malzeme formunun başka bir forma adım adım dönüştürülmesi" olarak tanımlanır. Dolayısıyla üretim bir katma değer sürecidir. Bundan dolayı ürünü işlemenin her aşamasında katma değer olacaktır.

Elwood S. Buffa, üretimi "mal ve hizmetlerin yaratıldığı bir süreç" olarak tanımlar. Elwood'a göre üretimin bazı örnekleri şunlardır; belirli bir kapasiteye sahip kazanlar, apartmanlar inşa etmek, seçilmiş müşteriler için bazı yapısal imalat işleri vb. gibi ısmarlama ürünlerin imalatı ve araba, otobüs, motosiklet, radyo, televizyon, vb. ürünleri kapsamaktadır [3].

2.1. Üretim ve Üretim Yönetiminin Tarihsel Gelişimi

Sanayi devrimi sonrası, iki yüzyılı aşkın bir zamandır operasyonlar ve üretim yönetimi, geçmişten günümüze ülkelerin ekonomik büyümesinde önemli bir faktör olarak kabul edilmektedir.

İmalat yönetimine ilişkin geleneksel görüş, Adam Smith'in emeğin uzmanlaşmasının ekonomik faydalarını fark etmesiyle on sekizinci yüzyılda başlamıştır. Ürünü elde etmek için işlerin alt görevlere bölünmesini tavsiye etmiş ve operatörleri, yüksek beceri ve verimliliğe sahip olacakları uzmanlaşmış görevlere ayırmıştır. Yirminci yüzyılın başlarında Frederick W. Taylor, Smith'in teorilerini uygulamış ve bilimsel yönetimi geliştirmiştir. O zamandan 1930'a kadar geleneksel görüşe hâkim olan birçok teknik ve teori geliştirilmiştir [4].

Araştırmacıların bu konu hakkında yapmış oldukları araştırmalar sonrası üretim yönetimi, 1930'lardan 1950'lere kadar kabul edilebilir bir terim haline gelmiştir. Frederick W. Taylor'ın çalışmaları daha yaygın olarak bilinir hale geldikçe, işletme yöneticileri imalatta ekonomik verimliliğe odaklanan teknikler geliştirmişlerdir. Üretim işletmeleri ilk olarak, üretim esnasında boşa harcanan süreleri ortadan kaldırmak ve daha fazla verimlilik elde etmek için operatörleri ve proses akışlarını ayrıntılı olarak incelemişler ve üretimde durmaya yol açabilecek aşamalar üzerine yoğunlaşmışlardır. Bu konu sadece üretim yapan işletmeler ile sınırlı kalmamıştır. Aynı zamanda psikologlar ve diğer sosyal bilimciler çalışma ortamındaki insanları ve insan davranışlarını incelemeye başlamıştırlar. Ayrıca ekonomistler,

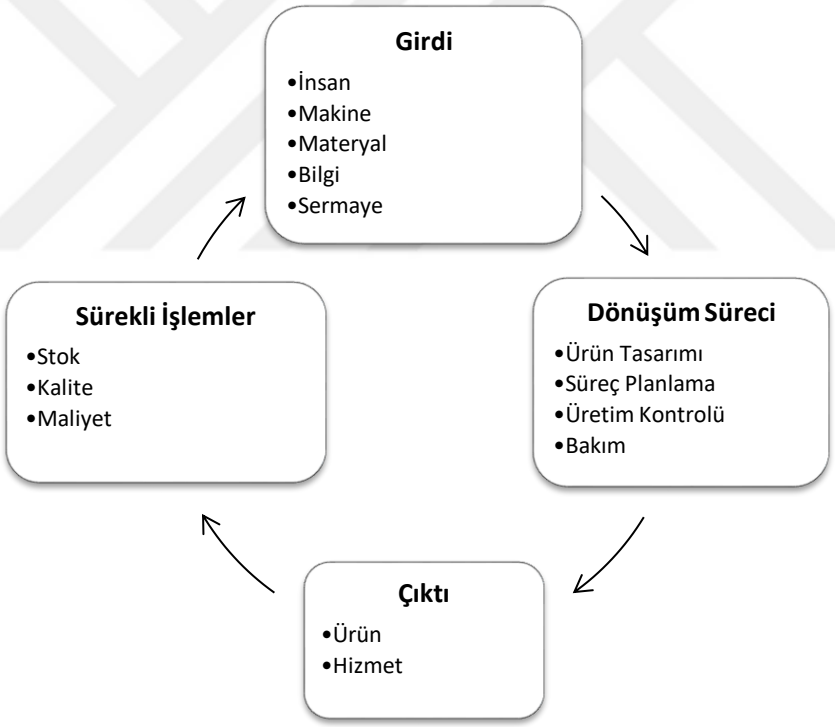
matematikçiler ve bilişim sektöründe çalışanlar bu alana daha yeni, daha sofistike analitik yaklaşımlar ile katkıda bulunmuştur [4], [5].

1970'lerle birlikte bu konu hakkındaki görüşlerde iki belirgin değişiklik ortaya çıkmaktadır. Bunlardan en bariz olanı, yeni adıyla operasyon yönetimine yansıyan, ekonominin "hizmet" ve "imalat" sektörleri olarak 2'ye ayrıldığı görülmektedir [2].

Günümüzde üretim ve hizmet kavramları paralellik göstermektedir. Toplumun belirli ürün ve ürün gruplarına göstermiş olduğu talebi karşılamak için üretim sektörleri bu talepleri karşılamak adına farklı alanlarda üretim yapmaktadır. Günümüzde üretim ve hizmet sektörü sadece, insanların yaşadığı ülkede ki taleplerini karşılamak olarak düşünülmemektedir. Bunun en büyük sebebi ülke ekonomilerinin globalleşmeye açılmasıyla birlikte üreticiler, dış ülkelerin pazarına açılmıştır.

2.2. Üretim Sistemleri

Üretim sistemi, bir organizasyonun ürünlerini üreten kısımdır. Yönetim tarafından iletilen politikalara uygun olarak tanımlanmış bir sistem içerisinde akan kaynakların, kontrollü bir şekilde birleştirilerek değer katmaya dönüştürüldüğü faaliyettir. Basitleştirilmiş bir üretim sistemi Şekil 1'de gösterilmiştir [6].



Şekil 1 Şematik Üretim Sistemi

Üretim sistemleri aşağıdaki özelliklere sahiptir;

1. Üretim organize bir faaliyettir, dolayısıyla her üretim sisteminin bir amacı vardır.
2. Sistem, çeşitli girdileri yararlı çıktılara dönüştürür.
3. Üretim sistemi, diğer organizasyon sistemlerinden izole çalışamaz.
4. Sistem performansını kontrol etmek ve iyileştirmek için gerekli olan faaliyetler hakkında geri bildirim alınması gerekmektedir [6].

Üretim sistemleri; girdi, süreç, çıktı, talep tahmini ve üretim kontrol sisteminin işlevleriyle ilgilenir. Şekil 1'de de ifade edildiği gibi girdi; insan, malzeme, makine, maliyet, dakika ve yöntemlerin kullanımını ifade etmektedir. Dönüşüm süreci yani işlemler; yarı mamul, yan ürün, mamul gibi imalat faaliyetini ifade eder. Çıktı, diğer bir deyişle nihai ürün anlamına gelen ürün hizmetidir. Sürekli devam eden işlemler içerisinde; üretim kontrol sistemi, etkin ve zamanında bir üretim sistemi için envanter ve tesis yerleşimi ölçümleri dahildir. Sürekli devam eden işlemlerin içerisine, tüketici talebi anlamına gelen talep tahmini de girmektedir. Talep tahmini, pazardaki tüketici talebindeki değişime ve pazar rekabetine bağlı bir faktördür [7].

Üretim sistemi, girdiyi verimli ve etkili bir şekilde istenen çıktıya dönüştürme sürecinde yönetimsel işlevlerin planlanması, organize edilmesi, yönlendirilmesi ve kontrol edilmesi yoluyla üretim sürecinde yönetim işlevlerinin uygulanmasıdır [6].

Üretim dört kategoriye ayrılmaktadır. Tüm üretim süreci, girdilerin insanların daha verimli kullanımı için çıktı ve hizmetlere dönüştürülmesi ile ilgilidir. Bu sınıfta bulunan üretim sistemleri göz önüne alındığında aşağıdaki gibi sıralanmaktadır [7].

2.2.1. Siparişe Göre Üretim

Siparişe göre üretim, önceden belirlenmiş zaman ve maliyet içinde müşterilerin taleplerine göre tasarlanan ve üretilen ürünlerin bir veya birkaç miktarının üretilmesi ile karakterize edilmektedir. Bunun ayırt edici özelliği, düşük hacimli ve yüksek ürün çeşitliliğidir.

Genellikle bu tür üretim belirli bir süre içindir ve tekrarlayıcı nitelikte değildir. Müşterilerin o ürüne olan talebi dikkate alınarak kuruluş tarafından üstlenilen üretim türüdür. Bu üretim türünün belirli bir standardı, kalitesi, boyut, renk, ağırlık ve ayrıca ambalaj özellikleri vardır. Üretim organizasyonunun çoğu maliyeti nedeniyle siparişe göre üretimi tercih etmez ve çoğu durumda düzenli bir üretim süreci değildir.

Bir atölye ya da üretim yeri, farklı departmanlara ayrılmış genel amaçlı makinelerden oluşmaktadır. Her iş, benzersiz teknolojik gereksinimler gerektirmektedir. Burada makineler üzerinde belirli bir sırayla ürünün işlenmesini farklı bir bağlamda ürüne katma değer katmak gerekmektedir. Bu üretim yöntemi, her biri özel olarak tasarlanmış ve kendi benzersiz işlem adımlarını veya üretim süreci boyunca yönlendirmeyi gerektiren birçok farklı ürünün küçük partilerinin üretimi için uygundur [7].

2.2.2. Parti Üretimi

Bu üretim yöntemini uygulayan, organizasyonlar da üretim sırasının mevcut olmadığı, daha az akış üretimi kapsamının olduğu yerlerde, toplu üretim daha uygun üretim türüdür. Bu kategoride her üretim küçük bileşenlere ayrılmıştır. Bu üretim yaklaşımı, parti üretimi olarak adlandırılmaktadır. Bu üretim sürecinde tüm üretim sistemi, ürünün özelliklerine göre çeşitli parti veya bileşenlere bölünür. Üretim sürecini kolaylaştırmak için her parti için farklı makineler kullanılabilir ve her partideki kalite düzgün bir şekilde ölçülebilmektedir. Öte yandan, bir ürün talebe göre farklı fonksiyonel alanlarda da kullanılabilmektedir [7].

Toplu üretim, American Production and Inventory Control Society (APICS) tarafından "işin fonksiyonel departmanlardan partiler veya partiler halinde geçtiği ve her partinin farklı bir rotaya sahip olabileceği bir üretim şekli" olarak tanımlanır. Belirli aralıklarla üretilen ve

satışa hazır stoklanan sınırlı sayıda ürünün üretilmesi ile karakterize edilmektedir. Bu üretime; bir alanda presleme, diğer alanda frezeleme, diğer alanda renk vb. gibi örnekler verilebilir [8].

2.2.3. Seri Üretim

Kesintisiz bir süreç kullanılarak ayrı parçaların veya düzeneklerin imalatına seri üretim denir. Bu kategori altında üretim sıralı olarak çalışmaktadır. Seri üretim sistemi, çok büyük üretim hacmini kapsamaktadır. Büyük üretim hacimlerini karşılamak için makineler bir hat veya ürün düzeninde düzenlenmektedir. Bu üretim sisteminde genel olarak yalın üretim bantları işletmeler tarafından benimsenmektedir. Seri üretim sisteminde, iki üretim süreci arasında boşluk olmamalıdır. İki üretim süreci arasında boşluk olmaması için üretim planlamacılar buna uygun bir şekilde üretim planı yapmaktadır.

Her operasyonda geçen süre, sürekli operasyon akışına sahip olmak için güncelleme ve daha fazla makine kullanılarak korunabilmektedir. Bu tip üretim, yüksek talep gören ürünler için daha uygundur. Bu üretimin meziyeti, her üretim operasyonunda girdi ve çıktıda da sıkı kontrol ve ölçüm yapılabilmesidir. Hammadde tedariğine, makine kapasitesine ve kalite standartlarına azami özen gösterilerek üretim sürecindeki herhangi bir kusurun kolaylıkla tespit edilebilmesi ve her süreçte kaliteli üretim yapılması sağlanmaktadır [7].

2.2.4. Sürekli Üretim

Sürekli üretim anlayışına sahip üretim tesisleri, ilk operasyondan bitmiş ürüne kadar olan üretim operasyonlarının sırasına göre düzenlenmiştir. Burada ürün veya ürün parçaları konveyörler, transfer cihazları, vb. gibi malzeme taşıma cihazları aracılığıyla işlem sırası boyunca akacak şekilde yapılmaktadır. Bu üretim sisteminde, malzeme ve ürünler, partiler veya ayrı birimler yerine sürekli, sonsuz akışlarda üretilmektedir. Üretim hatları, makineler ve malzeme akış yönü genellikle sabittir bundan dolayı üretim standardize edilmektedir. Sürekli akış teknolojisi, yüksek hacimli ve özel otomasyon sistemleri ile günün her saati çalışma sağlamaktadır [9].

Yukarıda anlatılan üretim sistemlerinde de kullanılan; Push/İtme ve Pull/Çekme tipi üretim yaklaşımları da kullanılmaktadır. Bir itme sisteminde, üretimi gerçekleştirmeye yönelik talimatlar merkezi bir planlama departmanından gelmektedir. Tüm durumlarda, bu yönetim biçimi ne satışla ne de üretim sürecinin kendisiyle net bir şekilde bağlantılı değildir. Bu üretim yaklaşımının özelliklerini tanımlayan anahtarlardan biri, üretim aşamaları arasında, boşluklar yaratarak hata riskini kontrol etmektir. Bu "boşluk", riskleri azaltmak için üretim aşamalarını ayırmaktadır. Bu şekilde, bir sonraki aşamayı etkilemeden önce olabilecek bir sorunu çözmek için yeterli zaman yaratılmış olmaktadır [10].

İtme sisteminde, üretimin fiili talebe dayalı olmadığı bundan dolayı “Stoğa Göre Üretim” yapıldığı anlamına gelmektedir. Her üretim aşamasında, herhangi bir üretim aşamasının başarısız olması durumunda sonraki üretim aşamasının malzemeden mahrum kalmamasını sağlamak için bir tampon stok tutulmaktadır. Hattın her aşamasında tutulan tampon stoklar ne kadar yüksekse, üretimde aksamaya sebep olabilecek bir sorun çıktığı zaman, stoklar kullanılarak hat üzerinde üretimin devamı sağlanmaktadır.

Bu üretim anlayışında, her bir departman, bir sonraki departmanın talebini karşılamaya yetecek kadar üretim yapmak yerine, büyük üretim hacimlerinde üretim yapmaktadır. Bu

İtme yaklaşımı, tesis genelinde departmanlar arasında “Devam Eden Envanter” yığınları ile sonuçlanır. Ayrıca, maliyet muhasebesi sistemi, bu kısmen tamamlanmış partiler için maliyetleri biriktirerek, tahsis etmelidir. Bu durum sebebiyle, yönetim muhasebesi süreci ve gerekli kaynak ayırımı sürecini karmaşıklık hale getirmektedir [11].

İtme sisteminde, departmanlar arasında koordinasyon çok az olduğu veya hiç olmadığı için üretim departmanlarının her birinin yönetiminin daha kolay olduğu araştırmacılar tarafından ifade edilmektedir. Bu sistem, üretim sabit olduğu veya yavaş arttığı sürece iyi çalışmaktadır. Ancak müşterilerden plan dahilinde olmayan talepler gelirse bu sistem, taleplere reaksiyon verme konusunda gecikecektir.

İtme sistemi ile çalışan işletmeler, çalışanlarını kaliteli ürünler üretmeye teşvik ediyor olsalar da çalışanların üretim sırasında kalite kontrol konusunda büyük sorumlulukları yoktur. Bunun en büyük sebebi, bu sistem ile çalışan işletmelerin departmanları arasında ki bağlantılarının zayıf olmasıdır. Kalite kontrol işlemi, bitmiş ürünleri ya da hat içi kontrol yapan, kalite kontrol denetçilerinin elindedir. Bu nedenle, denetim zamanında yapılmaz ise üretim sorunlarının veya kusurların nerede ortaya çıktığının takibini yapmak oldukça zorlaşmaktadır [12].

Bir itme sisteminin, vurgusu kaliteden ziyade niceliktir. Bu nedenle operatörler, kalitesiz üretilmiş ürünleri, düzeltmeler yapmak veya kaliteyi artırmak yerine bir sonraki departmana itmek/yönlendirmektedir. Şekil 2’de itme sistemi, şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 2 İtme/Push Sisteminin Şematik Olarak Gösterilmesi [13]

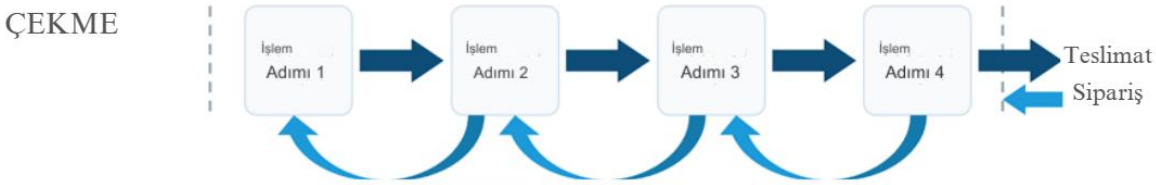
Çekme sistemi, üretim sürecinde israfı azaltmak için kullanılan yalın bir üretim stratejisidir. Bu sistemde, üretim sürecinde kullanılan bileşenler ancak tüketildikten sonra değiştirilir, böylece işletmeler yalnızca müşteri talebini karşılamaya yetecek kadar ürün üretmektedir. Bu durum, şirketin tüm kaynaklarını hemen satılacak ve kar getirecek malları üretmek için kullanıldığı anlamına gelmektedir [14].

Temel olarak bir çekme sistemi, müşterinin siparişinden başlayarak, sürecin önceki her adımında harekete geçmek için görsel sinyaller kullanarak geriye doğru çalışır. Ürün, tüketicinin talebi ile üretim sürecinden çekilmektedir.

Çekme sisteminde, üretim bir sonraki operasyonda aynı tesis içinde veya ayrı bir tesiste, genellikle bir kanban kartı aracılığıyla, hangi parça veya malzemeye ihtiyaç duyulduğu, ihtiyaç duyulan miktar, ne zaman ve nerede olduğu hakkında yukarı akış operasyonuna bilgi sağlamaktadır. Müşteri süreci bir ihtiyaç sinyali verene kadar tedarikçi süreci tarafından hiçbir şey üretilmez. Bu, itmeli üretimin tam tersidir [15].

Tedarik Zinciri Yönetiminde, bir hedef veya sorun için bir çözüm, yani "arz" ve "talep" oluşturulmaktır. "İtme tipi" ve "Çekme tipi" tedarik zinciri modelleri, talep ve arz ilişkisi açısından birbirlerine zıttır. "İtme tipi", üretimin gerçek talebe dayalı olmadığı "Stokta Üret" (MTS) ile temsil edilir ve "Çekme tipi", üretimin fiili talebe dayalı olduğu "Sipariş Üzerine

Üret" (MTO) ile temsil edilmektedir. Şekil 3'de çekme sistemi, hali şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 3 Çekme/Pull Sisteminin Şematik Olarak Gösterilmesi [13]

2.3. Çekme/Pull Sisteminin Üretime Entegre Edilmesi

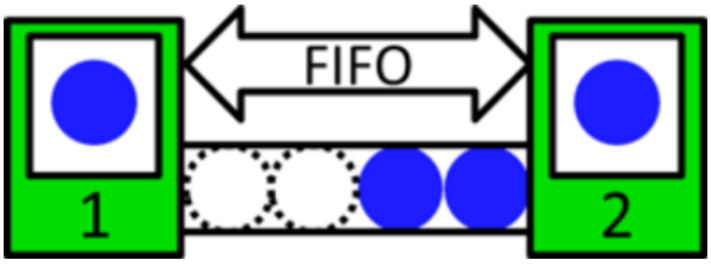
Üretim işletmelerinde, çekme sistemi 7 farklı yolla üretime entegre edilebilmektedir. Bu yollar aşağıdaki bölümlerde sırasıyla açıklanmaktadır [16].

2.3.1. FIFO (First In, First Out) Sistemi

İlk Giren İlk Çıkar (FIFO), bir işleme veya depolama konumuna giren ilk parçanın aynı zamanda ilk çıkan parça olmasını sağlayarak hassas üretim ve taşıma sırasını koruma ilkesi ve uygulamasıdır. Bu sistem, depolanan parçaların eskimemesini ve kalite sorunlarının envantere gömülmemesini sağlamaktadır [14].

FIFO dizisi genellikle, belirli miktarda envanter tutan boyalı bir şerit veya fiziksel kanal tarafından korunmaktadır. Tedarik süreci, şeridi yukarı akış ucundan doldururken, müşteri süreci aşağı akış ucundan geri çekilmektedir. Şerit dolarsa, tedarik süreci ve müşteri envanterin bir kısmını tüketene kadar üretimi durdurmalıdır. Bu şekilde FIFO kulvarı, tedarik süreci tüketim süreciyle sürekli akış veya bir süpermarket tarafından bağlantılı olmasa bile tedarik sürecinin aşırı üretimini önleyebilmektedir [14].

FIFO'da eksik olan tek şey, boş kalan bir üretim aşamasının, önceki sürece üretmesi için sinyal verirken, ne üreteceğine dair sinyal vermemesidir. Bu nedenle, işletme sadece FIFO kullanıyor ise ne üretilecek ürün konusunda ilgili departmanın ek bilgilere ihtiyacı olacaktır. Gerçekte, FIFO tipik olarak daha büyük bir üretim sisteminin parçasıdır ve ne üretileceğine ilişkin bilgi, genellikle bir çekme sistemi aracılığıyla sağlanmaktadır [16].



Şekil 4 FIFO Sisteminin Şematik Olarak Gösterilmesi [16]

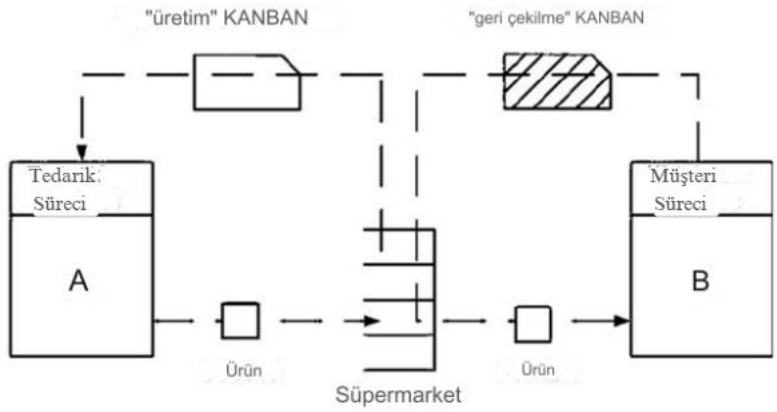
2.3.2. Kanban Sistemi

"Görsel tahta" veya "işaret" anlamına gelen Japonca "kanban" kelimesi, 1950'lerden beri süreç tanımı anlamında kullanılmaktadır. İlk olarak Toyota tarafından tam zamanında üretim için bir çizelgeleme sistemi olarak uygulanmıştır [16].

Başlangıçta, Toyota Üretim Sisteminden (TÜS) kaynaklanan, yalın üretim için bir çizelgeleme sistemi olarak ortaya çıkmıştır. 1940'ların sonlarında Toyota, üretimine "tam

zamanında" üretim sistemini getirmiştir. Kanban sistemindeki yaklaşım bir çekme sistemini temsil eder. Bu durum, üretimin malları üretip piyasaya sürmeye yönelik standart itme uygulamasından ziyade müşteri talebine dayalı olduğu anlamına gelmektedir. Üretimde, kanban sisteminin geliştirilmesi sonucunda yalın üretimin temelleri atılmıştır. Kanban ve yalın üretimin temel amacı, verimlilikten ödün vermeden atık faaliyetlerini en aza indirmektir. Kısaca ana düşünce, daha fazla maliyet yaratmadan müşteri için daha fazla değer yaratmaktır [17].

Kanban sistemi, üretim içerisinde dönüşüm modeli değil, bunun yerine halihazırda kurulmuş süreçleri kesintisiz bir şekilde iyileştirmeye ve sürekli iş birliği ve geri bildirim yoluyla sürekli iyileştirmeye çalışan evrimsel bir değişim yaklaşımı kullanılmaktadır [18]. Temel kanban sistemi şeması Şekil 5'de görülmektedir.



Şekil 5 Temel Kanban Sistemi Şeması [19]

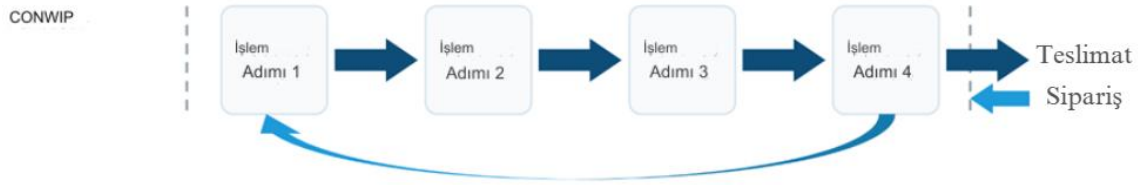
Kanban sistemi temelde 3 işlevi yerine getirmektedir. Bu işlevler;

1. Görünürlük İşlevleri: Kanban kartları, üretim sırasında bilgi ve malzeme akışının sağlanması ile üretim boyunca departmanlar veya hatlar boyunca aktarılmaktadır. Bunun sayesinde üretim aşamalarının hangi aşamada olduğu, yeterli sayıda hammadde/yardımcı maddenin olup olmadığı ayrıca ürünün elde edilme süresinin takibi gibi görünür ölçüde bilgi akışının olmasını sağlamaktadır.
2. Üretim Fonksiyonu: Üretim sırasında bir sonraki aşamadan ayrılan kanban kartları, üretilecek zamanı, miktarı ve parça türlerini gösteren bir üretim kontrol işlevini yerine getirmektedir.
3. Envanter İşlevi: Kanban sayısı aslında envanter miktarını ölçmektedir. Bu nedenle, kanban sayısını kontrol etmek, envanter miktarını kontrol etmeye eşdeğerdir. Başka bir ifadeyle, kanban sayısını artırmak/azaltmak, envanter miktarını artırmak/azaltmak anlamına gelir. Kanban sayısını kontrol etmek, envanter miktarını kontrol etmekten çok daha basittir [20].

2.3.3. CONWIP Sistemi

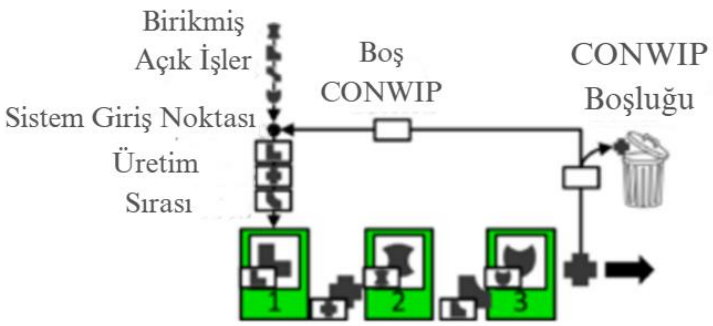
Kanban ve varyasyonları, çekme üretimini oluşturmak için mükemmel araçlardır. Genellikle CONWIP (Constant Work in Progress) veya sürekli iş geliştirme sistemi, kanban sisteminin temellerinin atıldığı Toyota'da B Tipi Kanban olarak adlandırılmaktadır. Üretim sektöründeki birçok şirket bu sistemi bir isim vermeden kullanmaktadır [16].

CONWIP sistemi çalışma yöntemi olarak, kanban kartının belirli bir parça tipine kalıcı olarak atanması dışında kanban sistemine çok benzemektedir. CONWIP, sipariş üzerine üretim içindir ve biten bir iş, sistemden çıktığında kullanılan kartlar boş bırakılır. Geri dönen boş bir CONWIP kartı, bir sonraki işin başlayabileceğinin sinyalini verir. Hangi işe başlanacağını bilmek için, açık işlerin öncelik sırasına göre bir birikim listesine ihtiyaç duyulmaktadır. Geri dönen boş bir CONWIP kartı, biriktirme listesindeki bir sonraki kullanılabilir işe "sistem girişi" olarak bilinen bir işleme eklenmektedir. Burada ki genel amaç, bir iş üretim hattından ayrılırken, yeni bir işin sisteme tanıtılmasıdır [21]. Şekil 6'da CONWIP sisteminin üretim akışı (koyu mavi) ve komut sinyalinin (açık mavi) etkileşimi görülmektedir.



Şekil 6 CONWIP Sisteminin Üretim Akışı Sırasındaki Davranışı [13]

Genel olarak, CONWIP sistemdeki iş sayısını sınırlar. Bir iş ayrıldığında, bir sonrakine başlamak için bir sinyal verilir. Sipariş üzerine üretim için en uygun olan bu yaklaşım, Kanban ile kolayca birleştirilebilir. Şekil 7'de CONWIP sistemi şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 7 CONWIP Sisteminin Şematik Olarak Gösterilmesi [16]

2.3.4. POLCA Sistemi

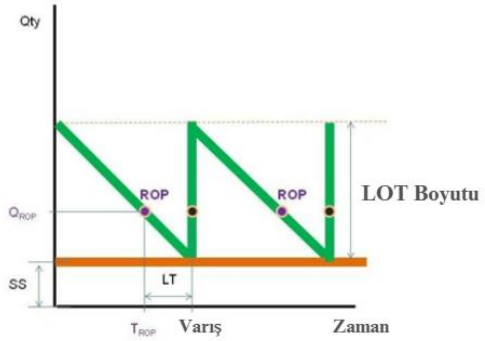
POLCA (Paired-Cell Overlapping Loops of Cards with Authorization) veya "eşleştirilmiş hücrelerin yetkilendirme ile kartların döngüsüne örtüşmesi" anlamını taşımaktadır. Bu sistem, Rajan Suri tarafından 1990 yılında geliştirilmiştir. POLCA sistemi, düşük hacimli yüksek karma üretim için tasarlanmıştır ve daha sonra bu sistem üzerine tasarlanan atölyeler içerisinde kullanılmıştır. POLCA sistemi, CONWIP sistemine bir alternatiftir. Her iki sistem de üretimde kullanılabilme, uygulanma ve sürdürülmesi daha külfetli olsa da POLCA sistemi ürün envanterini kontrol etmede CONWIP sistemine göre daha efektif çalışmaktadır. POLCA aynı zamanda akış hatları için değil, atölyeler ve hücre ağları için tasarlanmıştır [21].



Şekil 8 POLCA Sisteminin Şematik Olarak Gösterilmesi [16]

2.3.5. Yeniden Sipariş Noktası

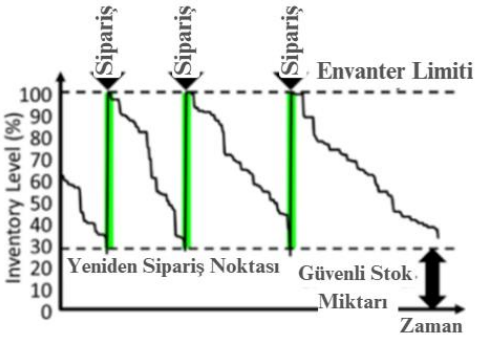
Yeniden sipariş noktası sistemi bir başka adıyla Reorder Point (ROP), bir stok kaleminin stok tükenmesini önlemek için yeni stok sipariş edilmesi gereken minimum stok seviyesini belirtir. Başka bir ifadeyle; yeniden sipariş noktası, bir şirketin siparişlerini karşılamaya devam edebilmesi için stokta olması gereken en düşük SKU birimi sayısıdır. Yeniden sipariş noktası, miktarın zaman içindeki bir fonksiyonudur. Bu nedenle, stok tükenmesini önlemek için stoğu yenilemek için son zaman olarak da görülebilir. Şekil 9'da yeniden sipariş noktası sisteminin örnek fonksiyon grafiği görülmektedir [22].



Şekil 9 Bir Yeniden Sipariş Noktasının Örnek Fonksiyon Grafiği [22]

Yeniden sipariş noktası, daima her bir kalem için ayrı ayrı hesaplanmaktadır. Hesaplama, bir kalemin teslim süresinden, talep veya tüketim oranından uygulanabiliyorsa, emniyet stoğu seviyesinden oluşmaktadır. Bunların tümü dinamik değişkenler olduğu için bir kalemin yeniden sipariş noktası, tedarik zincirindeki değişikliklere, pazar koşullarına, seçilen tedarikçilere vb. unsurlara bağlıdır [22].

Yeniden sipariş noktaları, kalem ve kâğıt veya Excel gibi elektronik tablo programları kullanılarak hesaplanabilmektedir. Bununla birlikte, modern envanter yönetim sistemleri genellikle, stok yenileme sürecinin bölümlerini, otomatik olarak tetikleyen çeşitli derecelerde yerleşik yeniden sipariş noktası işlevlerine sahiptir. Modern çözümler genellikle kısıtlama yönetimi ve diğer gelişmiş tahmin yöntemleriyle birlikte yeniden sipariş noktaları kullanır ve bu da stok tüketimine ilişkin daha derin içgörüler sağlamaktadır [22].



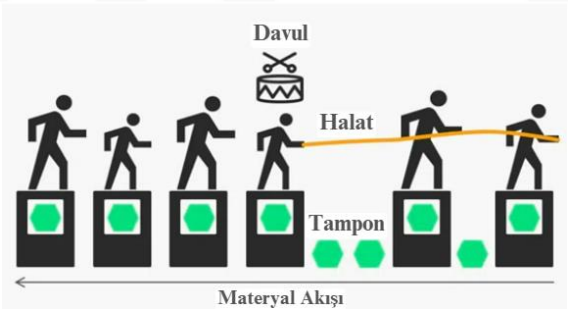
Şekil 10 Yeniden Sipariş Noktasında Zaman İçerisinde Envanter ve Güvenli Stoğun Grafiği [16]

2.3.6. Kısıtlar Teorisi

Kısıtlar teorisi, diğer bir adıyla Drum Buffer Rope (DBR), ilk kez İsrailli fizikçi Eliyahu Goldratt tarafından ortaya atılmıştır. Kısıtlar teorisi, Kanban veya CONWIP sistemine belirli noktalarda benzer ancak bu yöntemlerden birkaç önemli farkı vardır. Kısıtlar teorisi, genellikle parçaların miktarını değil, sistemdeki iş yükünün seviyesini ölçmektedir [16].

Bu sistematik yaklaşım, üretim sistemindeki en zayıf halkayı, sistemin genel etkinliğini en üst düzeye çıkaran süreç değişimine ve bağımlılığa karşı korumaktadır [16].

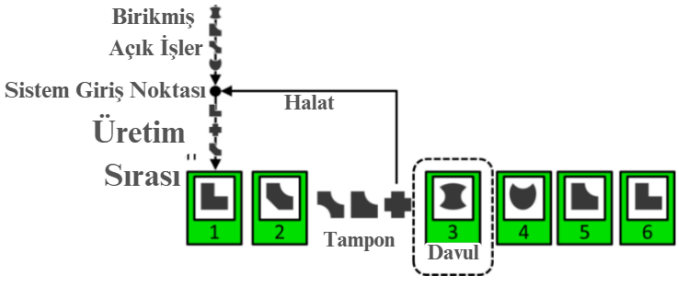
Her üretim süreci, tümü nihai ürüne orantılı bir katkı sağlayan bir dizi bağlantıdan oluşur. Drum Buffer Rope yönteminin temeli budur. Bu teori, bir grup dağcı veya izcinin bir iple birbirine bağlı olarak bir sıra halinde (çekme sistemi) bir dağ sırtını tırmanması düşüncesinden ilham alınarak bulunmuştur [23].



Şekil 11 Kısıtlar Teorisinin Çıkış Fikri [24]

Tamburun ritmi belirlediği ve halatın üretim sürecinde halkaları birbirine bağladığı Drum Buffer Rope/Kısıtlar teorisinin temeli burada yatmaktadır. Bu tambur, üretim sürecinin hızını belirler [24].

Bu teorinin, herhangi bir üretim işletmesinde uygulanmasına örnek olarak; hammadde kıtsa, son ürünün üretim hattından çıkması daha uzun sürer. Bu durumda tambur daha yavaş bir ritme sahip olacak ve diğer ham maddelerin hızını da belirleyecektir. Kesintilerin (zamanında) tespit edilmesi, tamburun daha hızlı çalışmasını sağlayarak üretim sürecinin çıktısını en üst düzeye çıkarabilecektir [24].



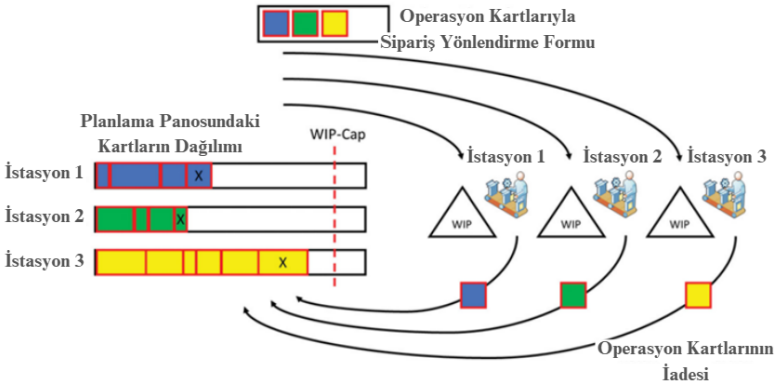
Şekil 12 Kısıtlar Teorisinin Temel Şematik Gösterimi [16]

2.3.7. COBACABANA Sistemi

COBACABANA (Control of Balance by Card Based Navigation), diğer adıyla "Kart Tabanlı Navigasyonla Denge Kontrolü" sistemi; 2009 yılında Martin Land tarafından ortaya atılmış ve 2014 yılında Matthias Thürer tarafından geliştirilmiş bir çekme yöntemidir [25].

COBACABANA, öncelikle siparişlerin üretim bölümüne çıkışını kontrol etmektedir. Ayrıca, siparişleri kabul etmek/reddetmek ve uygun teslimat süresi ödeneklerini sağlamak için üst düzey müşteri sorgulama yönetimi prosedürünü kullanarak bu ilkeleri işler hale getirir. Bu nedenle COBACABANA, müşteri sorgulama yönetimi sırasında kart tabanlı vade tarihi belirlemeleri ve kart tabanlı bir siparişin, onay kontrol sistemi içermesi bakımından benzersizdir. İş atölyelerinde, teslim tarihlerini belirlemek için bu konuda çalışma yapan araştırmacılar birçok kural sunmuştur, ancak bunu sağlayacak kurallar, tipik olarak yazılım desteği gerektirmektedir. COBACABANA, kart tabanlı bir sistem olduğu için yazılım desteği gerektirmemektedir. Bu sebepten dolayı ekstra maliyeti COBACABANA yöntemi önlemektedir [25].

COBACABANA, sınırlı kaynaklara sahip küçük imalathaneler için kart tabanlı potansiyel bir çözüm sunuyor olsa da Land'in (2009) orijinal yaklaşımı, bazı eksiklikler barındırmaktadır. Daha spesifik olarak bu çalışma, vade tarihi tahmin prosedürü de dahil olmak üzere COBACABANA'nın müşteri sorgulama yönetimi aşamasını iyileştirmektedir [26]. Şekil 13'de COBACABANA sisteminin geri bildirim şeması örnek olarak gösterilmektedir.

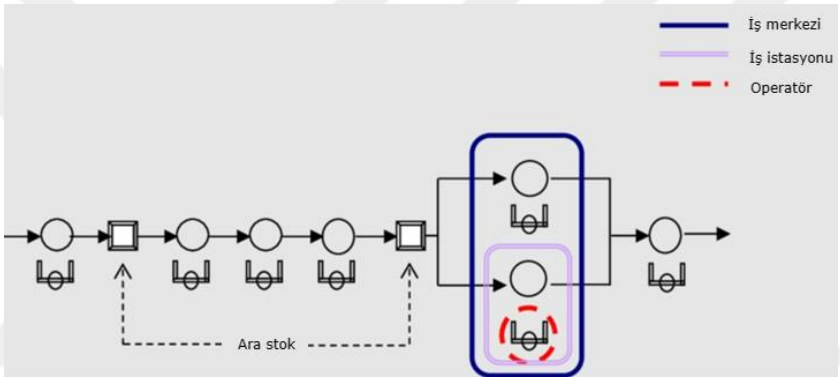


Şekil 13 COBACABANA Geri Bildirim Döngüsünün Şeması [25]

2.4. MONTAJ HATLARI

Farklı endüstriyel sektörlerdeki çeşitli üretim tesisleri, üretim aşamalarının bir tür seri düzenlemesine sahiptir. Çeşitli formlardaki ürünleri oluşturmak için ara ürünler, bir aşamadan diğerine belirli bir sırayla işlenmek üzere aktarılır ve mamul veya yarı mamul olarak sistemden çıkmaktadır. Günümüz teknolojisinde, yazılım destekli kontrol ve yönetim cihazlarının üretime esneklik ve üretim aşamalarının çeşitli işlemlerinin kontrol altında gerçekleştirmesini sağlamaktadır. Bu sayede atölye/fabrikada farklı tipte ürünleri işleyen veya birleştiren bir dizi akıllı iş istasyonu yaratmaktadır [27].

İş istasyonları genel olarak Şekil 14'de şematik bir biçimde gösterildiği gibi, bir veya daha fazla makineden, bir veya daha fazla operatörden (robotlar da dahil olabilir) oluşabilmektedir. Bir akış hattı üzerindeki iş istasyonlarında işlemler tamamlandıktan sonra, ürünler bir sonraki iş istasyonunda devam eden iş istasyonuna aktarılmaktadır. Hat üzerinde ürün akışı sırasında, bazı durumlar da belirli bir işlemin veya bir dizi işlemin birkaç kez tekrarlanmasını gerektirebilmektedir.



Şekil 14 Paralel İş İstasyonlarına Sahip Bir Montaj Hattının Şematik Gösterimi [28]

Montaj hatları, işletmelerin belirlemiş olduğu üretim politikalarına göre tasarlanmaktadır. Bazı işletmeler, montaj hattı üzerinde bulunan iş istasyonlarını, ürünün işlem sırasına göre tasarlamaktadır. Bazıları ise iş istasyonlarındaki işleri gruplar halinde işleyebilmektedir. İşlerin bir istasyondan diğerine transferi genellikle araçlar veya konveyörler aracılığıyla yapılır. Geleneksel yöntemlerle çalışan işletmelerde ise ürün transferleri ortacılar tarafından yapılmaktadır [27].

Geleneksel yöntemler ile tasarlanmış montaj hatları; bitmiş ürün envanterine, hat üzerinde meydana gelen darboğazlara, üründe meydana gelen hatalara vb. daha az dikkat edilen itme tipi montaj hattı sistemler kullanılmaktadır. Bu çekme tipi montaj hattı yöntemi ile çalışan işletmeler, üretim sırasında meydana gelebilecek bir hatayı önleyebilmek adına çok fazla stok yaparak üretim yapmaktadır. Bu üretim anlayışı sonucunda da çok fazla israf ortaya çıkmaktadır. Bu israfın önüne geçebilmek için günümüzde işletmeler, çekme sistemi tabanlı yalın üretim bantları ile üretim yapmaktadır. Aynı zamanda yapay zekâ destekli karar mekanizmalarının yardımıyla, hat üzerinde meydana gelebilecek darboğazlar, ürünlerde meydana gelebilecek hatalar, makinelerde çıkabilecek arızalar, çalışanların performansları, her bir işlemin gerçekleşmesi için gereken hedef süre tayini vb. hat üzerinde ilgili mühendislerin, planlamacıların bilmesi gereken bu bilgiler yeni teknolojilerin sayesinde ilgili yöneticilere bu bilgiler eş zamanlı olarak aktarılmaktadır [29], [30].

Montaj hatlarında en çok aranan performans ölçütleri; ortalama verim, iş istasyonlarındaki ortalama envanter seviyeleri, arıza süresi olasılıkları, darboğaz olasılıkları ve ortalama sistem işleme süresidir. Bu önlemler verimlilik kaybının yaşandığı alanları göstererek bu sistemlerin daha iyi tasarlanmasını sağlayacaktır. Verimlilik kaybı, makinelerin arızalar veya darboğazlar nedeniyle atıl kaldığı ve aşırı stok birikimine neden olan dönemlerde ortaya çıkmaktadır. Montaj hatlarındaki belirsizlik, esas olarak değişken işlem sürelerinden ve daha çok arıza oluşumu ve onarım sürelerinden kaynaklanmaktadır. Rastgelelik, bu sistemleri kontrol etmeyi veya davranışlarını tahmin etmeyi zorlaştırmaktadır. Bu sebepten dolayı, performans modellemesi için algoritma geliştirmenin önemi gün geçtikçe artmaktadır [30].

Montaj hatlarındaki tasarım problemleri, iş yükü dağılımını ve bir dizi iş istasyonu için işleme sürelerine sahip ara stok kapasitelerinin tahsisini içermektedir. Genel olarak tasarım problemlerinin imalat sistemlerinde çözülmesi oldukça zordur. Bunun nedeni, problemlerin kombinatoryal doğası ve kısmen de tasarım problemlerinde yer alan performans ölçütleri için açık türevlenebilir denklemlerin olmamasıdır. Kombinatoryal problemler diğer bir adıyla kesikli problemler, çözüm kümesi ayrık olan optimizasyon problemidir. Kombinatoryal terimi, karar değişkenlerinin kesikli olmasını yani problem çözümünün tamsayıların ya da diğer kesikli nesnelerin bir kümesi veya bir sırası olmasını ifade etmektedir [31].

İş istasyonlarındaki depolama sınırlamaları, engelleme adı verilen bir darboğaz kavramına yol açmaktadır. Atölyedeki yer eksikliği veya sonraki aşamalarda proses içi envanterin aşırı birikmesi, iş istasyonlarında duruşlara neden olmaktadır. Bir istasyonda meydana gelebilecek çeşitli engelleme senaryolarının yanı sıra engelleme sırasında meydana gelen çeşitli olaylar vardır. Engelleme ilkeleri, bir iş istasyonunun aşağı akış ara stoğunu doldurduktan sonra yeni bir işi işlemeye başlayıp başlamamasına bağlı olarak farklılık göstermektedir [27].

Bir iş istasyonunda bir işlem tamamlandığında, devam eden aşağı akış ara stoğu birikebilmektedir. Sonraki işlemlerde eğer stok birikmediyse ve işlenecek işler varsa, iş istasyonu yeni bir işi işlemeye başlar. Bir sonraki ara stok birikmiş olsa bile, iş istasyonu çalışır durumda olduğu için operatör yeni bir işi işlemeye başlayabilecektir. Bu durumda işlem bittiğinde bir sonraki stok dolu ise iş istasyonunda darboğaz/engelleme meydana gelecektir. Bu tür engelleme politikasına "İşleme Sonrası Engelleme" adı verilmektedir. Engelleme, hat üzerinde ilgili prosesteki iş istasyonunda kalır ve bir sonraki ara stokta yer bulunana kadar makineyi boşta tutar. Yani bir sonraki istasyonda işlem bittiğinde engelleme de bitmiş olacaktır [27].

Diğer bir senaryo ise, iş istasyonunun bir sonraki ara stokta yer açılana kadar yeni bir işi işlemeye başlamamasıdır. Bu duruma "İşleme Öncesi Engelleme" adı verilmektedir. İşleme öncesi engelleme sırasında, makineye yeni bir iş konulabileceği unutulmamalıdır. Montaj hatlarında, işleme sonrası engelleme problemiyle karşılaşma olasılığı daha yüksektir [27].

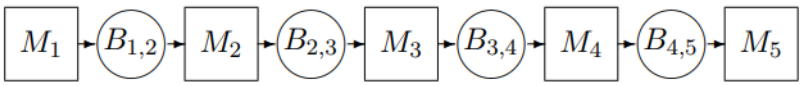
2.4.1. Bir Montaj Hattının Temel Çalışma Mekanizması

Bir montaj hattı; malzeme, iş istasyonları ve stok alanlarından oluşmaktadır. Çalışma alanlarına yönlendirilen malzeme akışı, tamir işlemlerinin olmadığı düşünüldüğünde, her çalışma ve depolama alanına belirli bir sırada, bir kez ziyaret etmektedir. Malzeme akışının

sağlandığı, ilk çalışma alanı ve sistemden çıktığı son çalışma alanı vardır. Geleneksel montaj hattı yöntemlerini kullanan işletmelerde montaj hattı üzerinde işlem gören malzemeler, çalışma alanlarında geçirdiği zamanlar rastgeledir. Bu rastgelelik, rastgele işleme süreleri, rastgele arıza ve onarım olayları veya her ikisinden kaynaklanabilmektedir. Depolama alanları yalnızca sınırlı miktarda malzeme tutabilmektedir [32].

Üretim akış hatları aynı zamanda transfer hatları ve üretim hatları olarak da adlandırılmaktadır. Çalışma alanlarına ya da iş istasyonlarını "makineler" kapsamaktadır. Depolama alanlarına genellikle tampon/stok olarak adlandırılmaktadır. Üretilen ürüne ve üretim yaklaşımına göre değişse de çoğu durumda, malzemeler ayrı parçalardan oluşmaktadır. Her bir malzeme parçası, ayrı makine ve stok sırasına taşınmaktadır. Ancak her bir sistemde belirli noktalarda farklı gecikmeler yaşanabilmektedir [32], [30].

Şekil 15'de, beş makineli bir montaj hattı gösterilmektedir. Burada kareler makineleri, daireler çalışma alanlarında bulunan ara stokları temsil etmektedir. Makineler 1'den K'ya kadar numaralandırılmıştır. Burada K, sistemdeki makine sayısını temsil etmektedir. Montaj hattı üzerinde K-1 kadar ara stok vardır. Mi ve Mi+1 makineleri arasındaki ara stok Bi, i+1'dir. Parçalar sistemin dışından makine M1'e, ardından ara stok B1,2'ye, ardından makine M2'ye, ardından ara stok B2,3'e ve bu şekilde makine MK'ye akar ve ardından sistemden ayrılırlar. Tüm parçaların, hat boyunca tüm makinelerde işlenmesi gerekmektedir.



Şekil 15 5 Makineli Örnek Montaj Hattının Şematik Gösterimi [32]

Tarihsel olarak montaj hattı çalışması, çoğunlukla imalat sistemlerine yönelik olmuştur. Bu nedenle, rastgeleliğin kaynağı olarak makine arızalarına büyük önem verilmektedir. İşletmelerin bu alandaki önceliği, üretim hattı boyunca maksimum malzeme akış hızını hesaplamak olmuştur. Maksimum akış hızı genellikle üretim hızı, verimlilik (bazı modellerde) veya verim olarak adlandırılmaktadır. Bu nedenle teorik olarak, bir makinenin bir işlemi yaptığında ya da malzemenin makine üzerinden geçtiği zaman, o işlemin yapıldığı varsayılmaktadır [33]. Bu modellerde çalışanların, darboğazlardan kaynaklı duruş süreleri veya kasıtlı olarak boş durmaları dikkate alınmamaktadır. Buna ek olarak diğer performans ölçütleri de hattın etkinliğini hesaplamak için çok önemlidir, özellikle ara stoklarda bulunan ortalama malzeme miktarı ve operasyonların ürünü işlemek için ayrılan zamanlar bir hattın dengesini doğrudan etkilemektedir [34].

Makine Mi malzemeyi her işlediğinde, ara stok Bi−1, i'nin seviyesini düşürür ve ara stok Bi, i+1'in seviyesini yükseltir. Bunun anlamı, malzeme makinede işlendiği zaman bir önceki aşamada bulunan ara stoğu azaltır, devamındaki operasyondaki ara stoğu artırdığı anlamına gelmektedir. Öte yandan, Makine Mi başarısız olduğunda ya da bir parçayı işlemesi uzun zaman aldığında, hat üzerindeki diğer makineler normal çalıştığında, ara stok Bi-1, i seviyesi artma eğilimi gösterir ve ara stok Bi, i+1 seviyesi artma eğilimi göstermektedir. Bu durum hat üzerinde devam ederse, ara stok Bi−1, i de bulunan ara stok birikebilir veya ara stok Bi, i+1 boş olabilir. Bu durumda Mi'nin komşularından biri çalışamaz ise, ya Mi−1 boşta

kalmıştır ya da Mi+1'de dar boğaz oluşmuştur demektir. Bu tarz durumlarda üretim azalır çünkü zaman ideal bir şekilde üretim için harcanmamıştır.

Bir montaj hattının, üretim hızı iki şekilde sınırlandırılmaktadır. Bunlar;

1. Verim: En yavaş üretim hızına sahip makineninkinden daha yüksek olamaz. Makineler izole üretim hızlarında çok farklı olduğunda, en yavaş olanlar dışındaki tüm hızlar büyük ölçüde boşa gitmektedir.
2. Ara stokların boş veya dolu olmasına neden olan senkronize olmayan kesintiler aynı zamanda makine kapasitesini de boşa harcar. Ara stoklar, hat üzerindeki makine arızaları ya da malzemelerin işlem süreleri farklı olduğu için boşalır veya birikebilmektedir. Teorik olarak hat üzerinde bulunan tüm makineler, yalnızca işlemleri gerçekleştirirken değil, aynı zamanda arızalanırken ve onarılırken de mükemmel bir şekilde senkronize edilebilseydi, ara stoklar ve malzeme akışı bu durumdan etkilemezdi. Makinelerin boşta kalmasına, bloke olmasına ve dolayısıyla çalışma imkanını kaybetmesine neden olan senkronizasyon eksikliğidir.

Montaj hatlarının başlıca özellikleri ve bu alanda kullanılan terimler Bölüm 2.4.2 altında anlatılmaktadır.

2.4.2. Montaj Hatlarını Kapsayan Temel Kavramlar

2.4.2.1. Senkron/Asenkron Prensibi

Üretim akışı sırasında, montaj hattı sistemlerinin birçoğu senkronize değildir. Yani, makineler operasyonlarını aynı anda başlatmak veya durdurmakla sınırlı değildir. Makineler sabit, eşit çevrim sürelerine sahip olsa bile aralarındaki stokların varlığından dolayı makineler, birbirinden bağımsız olarak çalışmaktadır. Bazı işlemler makine kullanılmadan yapılmaktadır burada makineler yerine insanlar çalışmaktadır [35]. Hat üzerinde meydana gelen belirsiz arızalar ve onarım süreleri, senkronize olmayan çalışma sürelerine yol açmaktadır. Sonuç olarak, asenkron (eş zamansız) sistemler literatürde önemli bir matematiksel model sınıfını oluşturmaktadır. Ancak asenkron sistemleri deterministik çalışma süreleriyle ele almak çok zordur. Bu zorluk genellikle üç yoldan biriyle karşılanır [36]. Bunlar;

1. Asenkron sistemler genellikle üstel, faz tipi veya diğer izlenebilir olasılık dağılımına sahip rastgele çalışma süreleriyle modellenir.
2. Teoride, çalışma sürelerinin deterministik ve eşit kabul edildiği, makinelerin tamirde olmadığı durumlarda aynı anda çalışıp durdukları zaman, işlem gören hat senkron (eşzamanlı) olarak tanımlanmaktadır. Alternatif olarak, bu modellerin ayrık zamana sahip olduğu görülebilir ve zaman aralıklarında olayların ne zaman meydana geldiği önemli değildir; geleneksel olarak, aralıkların başında veya sonunda ortaya çıkmış gibi ele alınırlar.
3. Sürekli üretim sistemlerinde, diğer iki yolla bazı ortak özelliklere sahiptir; her ikisinde de makineler türlü sebeplerden dolayı arızalanabilir ve sonlu stoklar boş veya dolu hale gelebilir ve bu durum hat boyunca yayılabilir. Bunun sonucunda da hattın verimliliği azalabilir.

2.4.2.2. Doymuş/Doymamış Hatlar

Malzemeler, fabrikalara çeşitli şekillerde gelir ve belirli işlemlerden geçerek ürün olarak ayrılmaktadır. Hammaddenin bulunmaması ya da mamul malları çıkarma araçlarının başarısız olması her zaman mümkündür. Bununla birlikte, literatürde neredeyse her zaman ilk makinenin asla boş kalmadığı ve son makinenin asla bloke olmadığı varsayılmaktadır. Bu tür modellere "Doymuş Modeller" denir. Doymuş bir model, bir akış hattındaki en önemli performans sorununu, yani birim zamanda üretilebilecek maksimum parça sayısını ele almak için uygundur. Bu miktar, akış hattının üretim hızı olarak da adlandırılmaktadır [37]. Bununla birlikte, belirli bir girdi süreci veya çıktı süreci altında bir akış hattının davranışı da ilgi çekicidir. Bu nedenle, bu alan üzerinde çalışma yapan bazı araştırmacılar, malzemenin geliş ve gidiş süreçlerini temsil etmek için ilk makinenin ön akışına belirli bir ara stok veya son makinenin aşağı akışıyla verilen ara stoktan malzeme ayrılışlarıyla birlikte ara stok eklerler. Genellikle verilen bu stoklar sonsuzdur, diğerleri ise sonludur. Bu tür modellere doymamış modeller denir. Başka bir yaklaşım ile anlatılacak olursa, modelin ilk makinesinin işlem sürecini temsil ettiğini ve modelin ikinci makinesinde ki işlem süreci, sistemin ilk makinesine karşılık geldiğini bildirmektir [30].

2.4.2.3. Sonlu ve Sıfır Stok Politikasının Hat Üzerindeki Etkisi

İş istasyonları arasındaki tampon/ara stokların işlevi, makineleri ya da iş istasyonlarını ayırmaktır. Bir makine, arıza veya uzun çalışma sürecine bağlı olarak kesintiye maruz kalırsa, malzemenin yukarı akışı, ara stok dolana kadar çalışabilecektir. Malzemenin aşağı akışı ise diğer yönde olan ara stok boşalana kadar çalışmaya devam edebilecektir. İş istasyonları arasındaki stok ne kadar büyük olursa, stoğun birikmesi veya boşalması da uzun süre alacaktır. Aralarında depolama alanı olmayan sıfır stokla çalışan hatlar üzerinde, makine çiftleri ve malzeme akışı konusunda en büyük bağlantıya sahiptir. Sonsuz stok politikası ile çalışan hatlar ise makineler ve malzeme akışı açısından zayıf bir bağlantıya sahiptir. Bunun temel sebeplerinden biri; sonsuz stok ile çalışan bir hat üzerinde bir makinede problem çıktığını varsayarsak, problem çıkan makinenin bir sonraki adımında ara stok bitene kadar operatör bunu fark etmeyecektir. Bu sebepten dolayı hat üzerinde meydana gelebilecek herhangi bir sorun olduğu zaman bunun hat üzerinde hemen fark edilip bu duruma reaksiyon gösterilmesi gerekmektedir. Bu reaksiyonun sağlanabilmesi için de hattın dinamik olması gerekmektedir. Hattın dinamikliğini ise sıfır stok politikası ile çalışan hatlar sağlamaktadır [29], [32].

2.4.2.4. Arızalar

Montaj hattı modellerinde, arızalanabilecek ya da eski olduğundan dolayı arızaya müsait olabilecek makineler bulunmaktadır. Makine üzerinde, arıza meydana geldiğinde, makine herhangi bir malzemeyi işleyemeyecektir. Bu nedenle, yukarı akış stoğu azalmayacaktır ve aşağı akış stoğu da artmayacaktır. Literatürde, arızanın meydana gelebileceği koşullar, arızanın başlamasına kadar geçen süre, arızanın devam ettiği süre vb. hakkında çeşitli varsayımlar dikkate alınmaktadır [30].

Literatürde yapılan çalışmalarda, makinelerin başarısız olabileceği sistemlere "Güvenilir Olmayan Makinelere Sahip Akış Hatları" olarak adlandırılmaktadır. Makinelerin arıza yapmayacağı sistemler de "Güvenilir Makinelerle Akış Hatları" olarak adlandırılmaktadır.

Güvenilir makinelerle akış hatları sisteminde, tüm rastgelelik işlem sürelerinin değişkenliğinden kaynaklanmaktadır. Güvenilir olmayan makinelere sahip akış hatlarında, rastgelelik sadece işlem sürelerinin değişkenliğinden değil aynı zamanda makinelerin arızalarından da kaynaklanmaktadır [30].

Literatürün ve çalışmanın önemli bir odak noktası, çalışma ve çalışmama süresi dağılımları, bir onarım ile bir sonraki arıza arasındaki sürenin ve bir arıza ile onu takip eden onarım arasındaki sürenin olasılık dağılımlarıdır. En yaygın varsayım ve matematiksel olarak en izlenebilir varsayım üsteldir. Teorik uygulamalar her zaman pratikte o kadar uygun değildir. Bu nedenle literatür, bazı sistem sınıfları için üstel olmayan dağılımları ele almanın çeşitli yollarını tanımlamaktadır [37].

2.4.2.5. İşlem/Görev Süresi

Montaj hatları; sabit görev süresi, değişen görev süresi ve stokastik (rastgele) görev süreleri olarak üç gruba ayırılmaktadır. Görev süresinde beklenen varyasyon küçük olduğu durumlarda, örnek olarak; basit görevlerin gerçekleştirildiği makinelere sahip montaj hatlarında, görev süresi deterministik yani süre sabit olarak kabul edilmektedir [38]. Deterministik ortamda görev süreleri sabit bir değişken olarak kabul edilir ve montaj işlemleri sırasında değişmediği varsayılmaktadır. Bu konuda tezin yazıldığı alan üzerinden örnek verilecek olursa; hazır giyim üretiminde kullanılan dikiş makinelerinde işlem yapan operatörler, ara mamulü makineye yerleştirdikten sonra makinenin pedalına bastığı andan itibaren yaptığı işlem süresi sabittir. Ancak işlem süresine sadece makinenin ürünü işlemek için harcamış olduğu sabit zaman dahil değildir. Bu süreye ek olarak operatörün ara mamulü bir önceki ara stoktan ya da bir önceki aşamadan gelen ürünü eline alması, ara mamulü makineye yerleştirmesi, ürünün makinede işlenmesi, işlenen ürünün bir sonraki işlemdeki ara stoğa eklenmesi gibi sürelerin toplamı, bir işlem için harcanan süreye dahil edilmektedir.

Montaj hatlarındaki görev süreleri birçok faktöre bağlı olarak değişebilmektedir. Örneğin; bir hat üzerinde işlem yapılırken, bu işi deneyimli bir çalışan daha hızlı ve hata oranı daha düşük yaparken, deneyimi olmayan bir çalışan aynı işi daha uzun sürelerde ve hata oranı daha yüksek bir şekilde yapmaktadır. Bu durumda hat üzerindeki dengeyi ve düzgün ara mamul akışının sağlanamamasına neden olmaktadır. Bu durumdan dolayı, hat üzerine atanan çalışanların belirli yetkinlik ve deneyiminin olması gerekmektedir. Deneyimi az olan çalışanların, işletme içerisinde eğitim hatları üzerinde el becerisinin geliştirilmesi ve belirli bir yetkinliğe ulaştırılması sağlanmalıdır. Ayrıca, deneyimi az olan çalışanlar, hat üzerinde daha kolay işlerden başlatılıp, daha zor ve karmaşık operasyonlara zaman içerisinde atanmalıdır. Bu sebepten dolayı, görev süresinin azalabilmesi ancak öğrenme etkisiyle mümkündür [39], [40]. Bu tür problemlerde görev süresi sabit olmayıp, çalışanların öğrenme hızına bağlı bir değişken olarak da ele alınmaktadır.

Ayrıca, montaj hatlarında, görev süresinin sabit kalamayacağı birçok belirsizlik vardır. Örneğin, makinelerin arızalanması, operatörlerin yorgunluğu, ekipmanların bakımsızlığı, ara mamullerdeki sorunlar vb. faktörler, görev süresinde değişkenliğe neden olmaktadır [41]. Ayrıca, el işlemelerindeki istikrarsızlıklardan yani çalışma hızlarından, çalışanların motivasyonlarından ve hata yaptıkları zaman duygusal olarak etkilenmelerinden kaynaklı görev süresindeki değişiklikler meydana gelebilmektedir [42]. Görev süresinin bilinmeyen

değişken olarak kabul edildiği stokastik montaj hattı dengeleme problemi birçok araştırmacı, Nima Hamta vb. diğerleri tarafından ele alınmıştır [43], [44]. Literatürde, araştırmacılar belirsiz görev sürelerini temsil etmek için farklı yöntemler kullanmışlardır, bazıları görev süresini stokastik değişken olarak [45] [46], bazıları bulanık değişken olarak [47], [48] veya bağımsız normal dağılan değişken olarak [49] veya diğer bazı dağılım metotları [50], [51] araştırmacılar tarafından kullanılmıştır.

2.4.2.6. Öncelik Diyagramı

Öncelik kuralları, görevlerin montaj hattı üzerinde öncelik değerlerini hesaplamak için kullanılmaktadır. Öncelik diyagramı ile öncelik içeren işlerin tespit edilmesi ile hat üzerindeki yerleşimi, malzeme akışının yönünü ve iş istasyonlarına atanacak iş gücünün belirlenmesi öncelik diyagramından alınan sonuca göre yapılmaktadır [52].

Öncelik diyagramı için gerekli hesaplamalar yapıldıktan sonra, görevler öncelik değerlerine göre sıralanarak ve problemin kısıtları dikkate alınarak uygun bir çözüm oluşturulur. Bu çözüm yolları içerisinde "Maksimizasyon ve Minimizasyon" kuralları kullanılabilmektedir. Maksimizasyon kuralı durumunda, her adımda atanabilir görevler kümesinden en büyük öncelik değerine sahip görev seçilir [52].

Öncelik Diyagramı, süreç akış şemasına belirli açılardan benzemektedir. Her iki yöntemde, ürünün işlenmesi için gerekli olan aşamaları belirli bir sırayla ortaya koymaktadır. İki yöntem arasındaki fark; süreç akış şemasında, bir ürünün sırayla işlenmesi gereken aşamalar ifade edilmektedir. Öncelik diyagramında ise bir ürünün işlenmesi için gereken öncelik sırasına göre üretim aşamalarının sıralandığı bir diyagramdır [53]. Öncelik diyagramında, yapılan ürün veya hizmetin montajındaki önemli ve kritik adımları şekiller ve oklarla açıklamaktadır. Bu yöntemi bir örnek ile ifade edecek olursak; 12 iş istasyonuna sahip bir montaj hattında, A-L görevleri için aşağıdaki verilerin (Tablo 1) görev sürelerinin verildiğini varsayarsak;

Tablo 1 Öncelik Diyagramı için Örnek Görevler ve Süreleri

Görev	Görev Süresi (sn)
A	15
B	23
C	17
D	42
E	15
F	37
G	5
H	12
I	34
J	27
K	18
L	7
Toplam Süre	252

Yeni bir tesis veya hat tasarlanırken ilk akla gelen sorulardan biri; Montaj hattı üzerinde "kaç istasyon gerekli?" sorusudur. Bu sorunun cevabı, "Takt Süresi" ve "Toplam Görev Döngüsü Süresi" olan 2 hesabı kapsamaktadır [53]. Takt süresi, talebi karşılamak için gerekli olan sürenin hesabıdır. Takt süresinin formülü Denklem 1'de yer almaktadır [54].

$$Takt\ Süresi = Mevcut\ Çalışma\ Süresi \div Müşterinin\ Talebi \quad (1)$$

Bu örnekte işletmenin hedefi; 8 saatlik vardiyada, günde 500 adet üretim yapmaktır. Bu nedenle, takt zamanı aşağıdaki gibi olacaktır.

$$Takt\ Süresi = 480\ dk \div 500\ adet\ ürün = 0{,}96\ dk = 57{,}6\ sn \quad (1)$$

Yapılan hesaba göre her iş istasyonu, 500 birimlik pazar talebini karşılamak için en az 57,6 saniyelik bir döngü süresine sahip olmalıdır. Montaj hattında kaç istasyonun gerekli olduğunu bilmek için temel ürün, malzeme listesi ve her operasyonun süresi vb. bazı ayrıntılı bilgilerin bilinmesi gerekmektedir. Önceliğe göre tasarlanacak olan montaj hattını tamamlamak için gerekli 12 operasyonun olduğu tablo 1'de görülmektedir.

Operasyonlar (A-L) olarak etiketlenmiştir ve her biri söz konusu, özel görevle ilişkili farklı döngü sürelerine sahiptir. Bu döngü süreleri, yazılım tabanlı sistemler veya kronometre hesaplamaları kullanılarak elde edilebilmektedir. Gerekli istasyon sayısını hesaplamak için iki temel bilgiye ihtiyaç duyulmaktadır. İstasyon sayısının formülü Denklem 2'de yer almaktadır [54].

$$İstasyon\ Sayısı = Toplam\ Görev\ Çevrim\ Süresi \div Takt\ Süresi \quad (2)$$

$$İstasyon\ Sayısı = 252 \div 57{,}6 = 4{,}4 \approx 5\ istasyon \quad (2)$$

Yapılan hesaplamalar sonucunda, hat üzerinde öncelik sırasına göre 5 iş istasyonu gerektiği saptanmıştır. A-L olarak adlandırılan proseslerin, bu 5 iş istasyonuna atanırken, operasyonların sürelerinin toplamının takt süresini aşmaması gerekmektedir. Birinci istasyon için örnek verecek olursak; A operasyonunun süresi 15 saniyedir. Bu operasyon, birinci iş istasyonuna atandığı zaman (57,6-15=42,16sn) geriye 42,16 saniye kalmaktadır. B operasyonunun süresi 23 saniyedir. Bu operasyon, birinci iş istasyonuna atandığı zaman (42,16-23=19,6sn) geriye 19,6 saniye kalmaktadır. C operasyonunun süresi 17 saniyedir. Bu operasyon, birinci iş istasyonuna atandığı zaman (19,6-17=2,6sn) geriye 2,6 saniye kalmaktadır. Bu 3 istasyonun birinci istasyona ataması yapılır. Takt süresinden geriye 2,6 saniye kalmıştır. D operasyonunun süre 42 saniyedir.

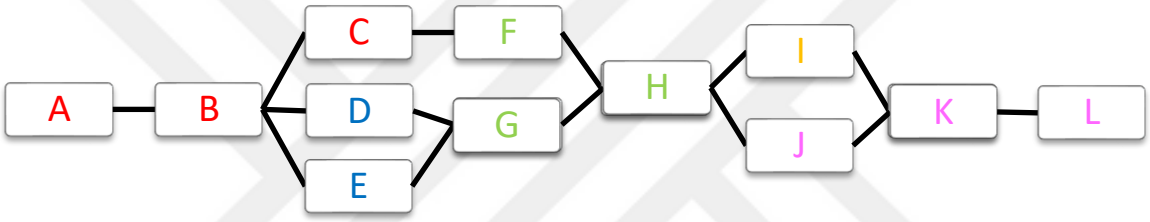
Bu operasyonun 1. istasyona atanması yapılamamaktadır. Bunun sebebi, geriye kalan takt süresinin 2,6 saniye olmasıdır. Bundan dolayı d operasyonu 2. istasyona atanmaktadır. Bu hesaplama diğer 5 istasyon için her bir operasyonun çevrim süresi hesaplanarak yapılmaktadır. Tablo 2'de 5 iş istasyonuna atanan operasyonlar/görevler gösterilmektedir.

Tablo 2 Verilen Örnekte Görevlerin İş İstasyonlarına Atanması

İstasyonlar	Görevler	Atanan Görevler	Görev Zamanı (sn)	Kümülatif Zaman (sn)	Kalan Zaman (sn)
1	A	**A**	15	15	42,6
	B	**B**	23	38	19,6
	C, E	**C**	17	55	2,6
2	D, E	**D**	42	42	15,6

	E	E	15	57	0,6
3	F, G	F	37	37	20,6
	G	G	5	42	15,6
	H	H	12	54	3,6
4	I, J	I	34	34	23,6
5	J	J	27	27	30,6
	K	K	18	45	12,6
	L	L	7	52	5,6

Tablo 2'de görülen, istasyon 4'ün 23,6 saniye boşta kalma süresiyle döngünün altında olduğu görülmektedir. Ancak öncelik kurallarına göre işlem yapıldığında, bulunan en uygun tasarım Tablo 2'deki gibidir. Tablo 2'de atanan görevler kısmında bulunan görev isimleri, istasyonlara göre farklı renklerle ifade edilmiştir. Diyagram 1'de görevlerin, öncelik sırasına göre atandığı görülmektedir. Diyagram 1'de görülen aynı renkli görev isimleri, görevlerin aynı istasyonda olduğu anlamına gelmektedir.



Diyagram 1 Hat Üzerinde Bulunan Görevlerin Öncelik Diyagramı

Diyagram 2'de her istasyonun çevrim süreleri ve istasyonlarda saatte elde edilebilecek üretim adetleri yer almaktadır. Bu örneğe göre montaj hattı kurulacak olursa 4. istasyon diğer istasyonlar ile karşılaştırıldığı zaman daha fazla üretim yapılacağı için bu istasyon çok fazla stok yapacaktır. Hat düzenlemesi içerisinde 4. istasyonda çalışan operatör, stoğu artırmamak için boşta kaldığı sırada hat içerisinde diğer operatörlere yardımcı olabilir ya da hat içerisinde hazırlık işlemi varsa operatör hazırlık işini yapabilir.



Diyagram 2 Beş İstasyonun Çevrim Süreleri ve İstasyon Başına Saatte Üretim Adetleri

2.4.2.7. Darboğaz Oluşumu

Herhangi bir ürünün yapım sürecinde, üretimi yavaşlatan bir aşama veya aşamalar olduğunda imalatta bir darboğaz oluşmaktadır. Üretimde, üretim kısıtlamaları olarak da bilinen bir darboğaz, talepten daha düşük kapasiteye sahip bir çalışma aşamasıdır. Başka bir

deyişle, üretimi yavaşlatan bir problemdir [55]. Darboğazlar, çalışma verimliliğinde büyük engellere neden olabilir. Tüm hat boyunca üretim sürecini geciktirir. Bunun sonucunda geç sevkiyatlara ve müşterilerin hayal kırıklığına uğramasına neden olmaktadır [56].

Darboğaz oluşumuna örnek olarak; üretim sırasında, ürünün kilit parçaları hızlı bir şekilde bir araya getirebilir, ancak parçaların birbirine birleştirildiği aşamalar, önceki aşamalara ayak uyduramayabilir. Sonuç olarak, darboğazın meydana geldiği istasyonda, stok artar ve verimlilik azalır [55]. İşletmeler, bu süreci genişleterek, süreci hızlandırmak için yeni yazılım tabanlı teknolojilere yatırım yaparak veya bu sürece yardımcı olması için daha kalifiye operatör işe alarak ya da montaj hattı dengeleme yöntemlerini kullanarak darboğaz oluşumunu önleyebilmektedir [56].

Bir darboğaz operasyonu, arkasında stok birikimi yaptığı için sonraki operasyonları ve muhtemelen önceki operasyonları tutan operasyondur. Fabrika içerisinde, operatörlik yetersizliği ya da departmanın iş hacminin plansız bir şekilde artırılması sonucunda üretimde darboğazlar oluşturabilir. Bu da hattın verimini ve iş verimliliğini olumsuz etkiler [55]. Darboğazlarda devam eden stokları azaltmanın yolları; ürün için kullanılan yöntemi iyileştirmek, kapasiteyi paylaşmak, ek operatör veya makine kullanmak, iş istasyonu düzenini iyileştirmek, operatör atamasını iyi analiz ederek atamak, hat dengesini geliştirmek vb. yöntemler denenebilmektedir. Darboğaz problemini analiz etmek için zaman etüdü sürecini, Standart dakika değeri (SMV) ölçümünü ve hat üzerinde yapılan dikiş verimliliğinin belirlemesi gerekmektedir [56]. Standart dakika değerinin formülü Denklem 3'de yer almaktadır [57].

$$SMV = (Gözlem\ Süresi \times Derece\ Faktörü) + İzin\ Verilen\ Süre \quad (3)$$

Üretimde meydana gelen darboğazların 2 türü vardır. Bu türler; kısa vadeli ve uzun vadeli darboğazlardır. Kısa vadeli üretim darboğazları, genellikle geçici veya beklenmedik sorunlara neden olur. Örneğin, bir makine parçası bozulursa ve tamir edilmesi gerekiyorsa, bu kısa vadeli bir darboğazdır. Kısa vadeli darboğazların diğer nedenleri aşağıdaki gibi sıralanabilmektedir [58].

1. Operatör yokluğu
2. Bir önceki operasyondan malzeme almada gecikme
3. Yeni bir ürün için yeniden donatılması gereken bir makine
4. Ani veya plansız elektrik kesintisi vb.

Kısa vadeli darboğazların aksine, uzun vadeli darboğazlara genellikle kolayca çözülemeyen kalıcı veya yinelenen sorunlar neden olmaktadır. Uzun vadeli darboğazların, genel üretim süreçleri üzerinde önemli etkileri olabilir. Bazı örnekler aşağıda verilmektedir [58].

1. Denetim süreçleri ve iş talimatları nedeniyle geciken üretim süresi
2. Malzeme takip sistemlerinin düzensizliği nedeniyle izlenebilirlik eksikliği
3. Tutarsızlığa ve yeniden işlemeye yol açan süreçlerin standardizasyon eksikliği
4. Üretimde, ürün kalıplarını belirlemek için gerçek zamanlı verilerin mevcut olmaması vb.

Kısa vadeli darboğazlar münferit olaylar olduğundan, genellikle çözülmesi daha kolaydır. Düzenli takibe veya çözüm ihtiyaçları yoktur. Öte yandan, uzun vadeli darboğazlar daha

karmaşıktır ve stratejik çözümler gerektirir [58]. Darboğaz oluşumunun şematik olarak örneği Şekil 16'da gösterilmektedir.

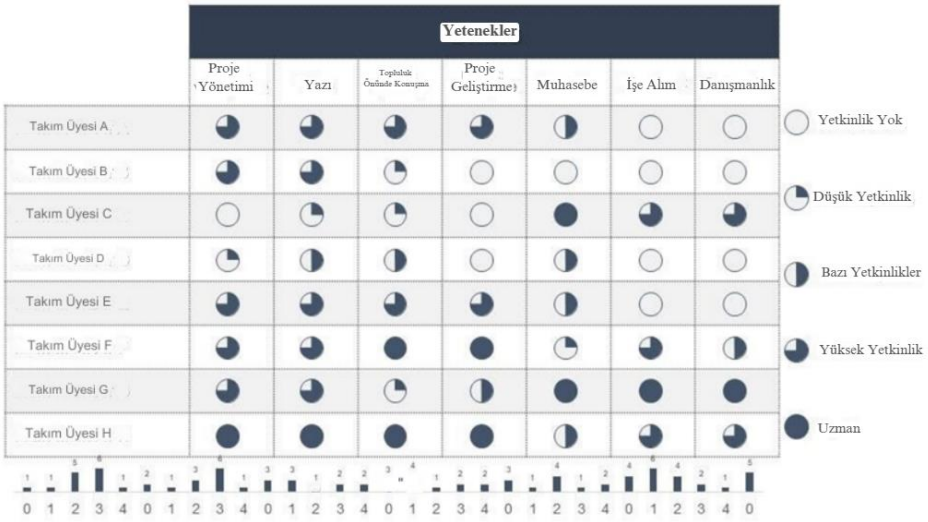


Şekil 16 Darboğaz (Bottleneck) Oluşumunun Şematik Olarak Gösterilmesi [59]

2.4.2.8. Beceri Matrisi

Beceri Matrisi, operatörün çeşitli operasyonlardaki geçmiş performanslarının, gelecekte yapabileceği işlere referans olması için sistematik bir şekilde kaydedildiği bir çizelge veya veri tabanıdır. Burada kaydedilen operatör performansı, verimlilik yüzdesi ya da grafiksel olarak ifade edilmektedir [55]. Beceri matrisi, operatörlerin beceri envanteri olarak da adlandırılmaktadır. Beceri Matrisi, bir kuruluş, grup veya ekip içindeki bireylerin beceri ve yeterliliklerini net bir şekilde görülmesine yardımcı olan görsel bir araçtır. Beceri Matrisi, beceri yönetiminin bir parçasıdır. Beceri yönetiminin temel amacı, insanları ve becerilerini anlamak, geliştirmek, kullanmak ve izlemek için destek sunmaktır [60].

Bu matris, operatörleri iş istasyonlarına atarken ve bir hattı dengelerken çok kullanılan bir yöntemdir. Endüstri mühendisleri/hat denetçileri, bir operasyon için en verimli operatörleri bulmak ve seçmek için minimum zamana ihtiyaç duymaktadır. Ayrıca beceri matrisi, bir operatöre hat üzerinde bulunan operasyonlardan hangisinin verilmesi gerektiği bilgisini vermektedir. Hat üzerinde, bir operatörün bulunmaması durumunda, üretim yetkilisi hatta en uygun çalışanı beceri matrisinden aldığı bilgi ile kolayca atayabilmektedir [60].



Şekil 17 Beceri Matrisinin Örnek Kullanım Şeması [61]

Matris genellikle küçük insan grupları için kullanılmaktadır, ancak matris genişletilebilmektedir. Yukarıda bulunan Şekil 17'de belirli bir proje için gerekli olan belirli becerileri veya bilgi alanlarını göstermektedir [60].

2.4.3. Montaj Hattına Operatör Ataması Üzerine Yapılan Çalışmalar

Literatürde bu alanda yapılan pek çok araştırma ve metodoloji çerçevesinde değerlendirildiğinde, montaj hattı dengeleme üzerine yapılan araştırmaların karmaşık ve problem çözümüne ulaşmak için uzun zaman gerektiren prosesler olduğu görülmektedir. Bu nedenle çağımızın uyumlu olmaya zorunlu hale getirdiği, teknolojik imkanlar sayesinde montaj hattında meydana gelebilecek problemlerin daha doğru, kolay ve hızlı sonuçlara ulaşmayı kolaylaştıran ve çözüm yolları geliştirilirken mali açıdan tasarruf sağlaması, insan kaynaklı hataların minimuma indirgenmesine katkı verecek teknolojik gelişmelerin geliştirilmesi oldukça önemlidir. Çalışmanın bu bölümünde, geçmişten günümüze montaj hattı dengeleme üzerine literatüre katkı sağlamış olan çalışma ve araştırmalar incelenecektir.

Baybars tarafından literatüre tanıtılan montaj hattı dengeleme (1986), iş istasyonlarına öncelik kısıtlamaları sağlayacak şekilde bir dizi görevin (işlem süreleri ve bir dizi öncelik ilişkileriyle karakterize edilen) atanmasından oluşmaktadır [62]. Pastor ve Ferrer yapmış oldukları çalışmada (2009), montaj hattının tasarımını literatürde geniş çapta incelemiştir [63]. Boysen ve ark. çalışmasında (2007), montaj hattına operatör ataması yaparken, çalışanların yaş ve deneyim açasından eşit olmalarını dikkate alarak matematiksel modeller kullanmışlardır [64].

Falkenauer çalışmasında (2005), birçok montaj hattının sıfırdan tasarlanmadığını ve hat tasarlamanın mevcut bir hattın yeniden yapılandırılmasını temsil ettiğini ilk belirtenlerden biridir [65]. Ayrıca Falkenauer çalışmasında, ürün tipleri ve taleplerden, montaj teknolojisinden, mevcut iş gücünden veya üretim hedeflerinden kaynaklanan değişiklikler nedeniyle başlangıç hattının genellikle dengelemek yerine yeniden dengelenmesi gerektiğini de iddia etmiştir. Ancak bu pratik gözlemin aksine, dengeleme probleminin kaynağı kapsamlı bir şekilde incelenmemiştir.

Gamberini ve ark. çalışmasında (2009), montaj hattında tamamlanma maliyetlerini en aza indirmek ve yeni hattın benzerliğini maksimuma çıkarmak amacıyla tek bir manuel montaj hattı için stokastik yeniden dengeleme problemini çözmek için sezgisel algoritmalar önermiştir [66]. Yang ve ark. çalışmalarında (2013), mevsimsel talep değişikliklerine yanıt verebilmek için karma model montajın yeniden dengelenmesi üzerinde çalışmıştır. Yeniden dengeleme, bazı görevleri yerine getirme konusunda yetenekli olduğu düşünülen ancak diğer görevleri gerçekleştirme becerisine sahip olmadığı düşünülen çalışanlar ve ilgili görevleri üzerinden ilerlemiştir. Bu çalışmadaki amaç, istasyon sayısını en aza indirmek, farklı modeller için her istasyondaki iş yükü değişimini en aza indirmek ve tüm operatörlerin becerilerini kendilerine yeniden atanan görevlerle uyumlu hale getirmek için eğitim maliyeti olarak hesaplanan maliyeti yeniden dengelemekti. Bu problemin çözümü için çok amaçlı bir genetik algoritma önerilmiştir [67].

Sancı ve Azizoğlu yürüttükleri çalışmada (2017), iş istasyonu arızaları ve duruşlardan kaynaklanan ürün akışı kesintilerini incelemiş ve literatüre küçük boyutlu problemleri çözmek için karışık tamsayılı doğrusal programlama tabanlı bir algoritma ve dal-sınır algoritması önermiştir [68]. Belassiria ve ark. çalışmasında (2018), tek modelli montaj hattı dengeleme problemini çözmek için hibrit bir genetik algoritma uygulamıştır. Çalışmayı yürüten yazarlar eş zamanlı olarak hat verimliliğini en üst düzeye çıkarmayı ve yeniden

dengeleme maliyetlerini en aza indirmeyi amaçlamıştır [69]. Girit ve Azizoğlu çalışmasında (2021), farklı iş istasyonlarına atanan görevlerin, iş yükü dengeleme ile toplam değiştirme mesafesi arasındaki dengeyi bulmak amacıyla, montaj hattı dengeleme problemini çözmek için kesin ve tabu arama algoritması olmak üzere iki algoritma geliştirmiştir [70].

Ağpak çalışmasında (2010), iş istasyonlarında görev alan operatörlerin ve ekipman konumlarının farklı döngü süre değerlerinin değişmeden kalmasını sağlayacak şekilde, iş istasyonu sayısını en aza indirmek için iki aşamalı bir sezgisel algoritmaya sahip U tipi bir montaj hattı dengeleme problemini çözmüştür [71]. Serin ve ark. çalışmasında (2019), iş istasyonu sayısını ve toplam yeniden dengeleme maliyetlerini en aza indirmek amacıyla U şeklindeki montaj hattındaki problemi, görev süreleriyle çözmek için bir Genetik Algoritma (GA) kullanmıştır. Serin ve ark. çalışmasında, iş gücünde ve beceri mevcudiyetindeki değişiklikler nedeniyle montaj hattının yeniden dengelenmesi gerekebileceğini de ayrıca vurgulamışlardır [72]. Kısa vadeli yeniden dengeleme sorunlarının yanı sıra çalışanların eğitimi ve becerilerinin dikkate alınmasıyla ilgilenen çok az çalışma vardır [73]. Zhang ve ark. (2020), çok amaçlı iki taraflı montaj hattının dengeleme problemini çözmek, verimlilik, yeniden dengeleme maliyeti ve konfigürasyon sonrası yumuşatma arasındaki dengeleri bulmak için bir matematiksel model ve algoritma önermiştir. Ancak söz konusu çalışmada operatörlerin entegrasyonu dikkate alınmadığı görülmüştür [67].

Montaj hattı dengeleme problemlerinde işgücünün dikkate alınması, literatürde ilk kez Miralles ve ark. tarafından yapılan çalışmada (2007) ortaya atılmıştır [74]. Miralles ve arkadaşlarının öncü çalışmasından bu yana (2007), engelli operatörlerin montaj hattı dengeleme ve operatör atama süreçlerine entegrasyonunu; Araújo, Costa ve Miralles gibi araştırmacılar arasında büyük ilgi görmüştür [75]. Sungur ve Yavuz çalışmasında (2015), iş istasyonunda olan mevcut görevlerin, çalışanların nitelik gereksinimlerine ve seviyelerine göre farklılık gösterdiği hiyerarşik operatör atamasıyla montaj hattı dengeleme için bir model sunmuştur [76]. Ayrıca Öksüz ve ark. çalışmasında (2017), U şeklindeki montaj hattı dengeleme problemi ve operatör ataması için farklı niteliklere ve beceri düzeylerine sahip operatörler üzerinde çalışmışlardır [77]. Efe ve ark. yaptıkları çalışmada (2018), yaş ve cinsiyetin fiziksel iş yükü kapasitesi üzerindeki etkisini değerlendirmek için farklı yaş kategorilerini, iş istasyonlarına atayarak analiz etmiştir. Sonuçlar, ortalama yaşın ilerlemesinin istasyon sayısını artırdığını ve bu durumun hat verimliliğinde ve fiziksel iş yükü kapasite kullanım oranında azalmayı tetiklediği sonucuna ulaşmışlardır [78].

Montaj hattı dengeleme hakkında yayınlanmış literatür çalışmaları, genellikle montaj hattını dengelerken yalnızca görevlerin iş istasyonuna atanmasına ya da hat planının değişmesine odaklanmaktadır. Literatürde operatör atamasını, dengeleme sorunuyla birlikte ele alan nadir çalışmalar vardır [79], [80]. Sikora ve ark. çalışmasında (2017), operatörlerin birden fazla istasyonda hareket etmesine ve görevleri yerine getirmesine izin veren gezici operatör montaj hattı dengeleme problemini ele almıştır [81].

Literatürde yer alan çalışmalarda, mevcut montaj planlama metodolojileri genellikle insan faktörlerini ve montaj planlama ile iş gücü planlaması arasındaki etkileşimi yalnızca sınırlı bir şekilde hesaba katmakta olduğu görülmektedir. Bu konuda çalışma yapan Daniel Roesmann ve ark. (2021), geliştirdikleri metodoloji ile insan faktörlerinin montaj planlama

üzerindeki etkisinin modellenmesindeki araştırma boşluğunu gidermektedir. Bu çalışmada insan faktörleri sistematik olarak montaj planlamaya entegre edilmektedir. Bu durum, Jaber ve Bonney'in öğren-unut eğrisi modelinin uyarlanmasıyla yapılmaktadır. Tecrübe, öğrenme ve unutmanın yanı sıra montaj işlemlerinde çalışanın yaşı ve göreve uygunluğu da dikkate alınır. Çalışan atamasının planlama modelinde iki koordinasyon yaklaşımı izlenmektedir. Bir yandan uzun vadeli perspektifle beceriye dayalı montaj planlaması, diğer yandan kısa vadeli perspektifle zamana dayalı montaj planlaması önerilmektedir. Geliştirilen matematiksel model, insan faktörlerine dayalı performansı tahmin ederek, manuel montaj hattında çalışanların işyerlerine atanmasında planlamacılara yardımcı olmaktadır [82].

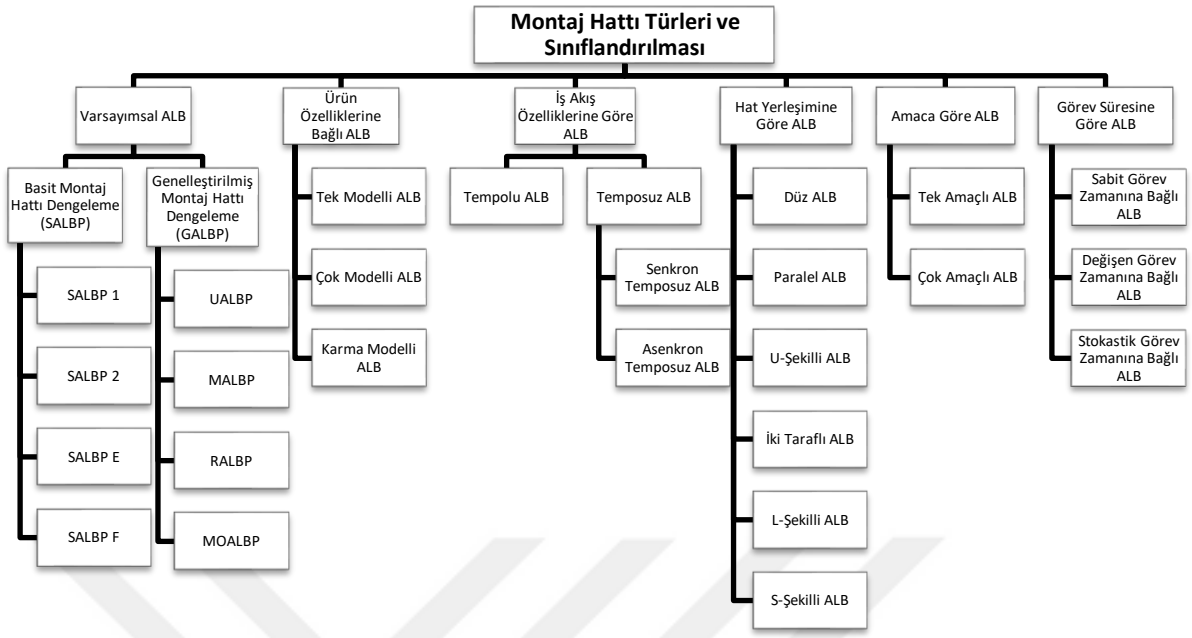
Tablo 3 Montaj Hatlarında Operatör Ataması ve Algoritmalar Üzerine Yapılan Çalışmalar

Yazar(lar) / Yıl	Çalışma	Problemlere geliştirilen çözüm önerileri
Baybars, I. [62] / 1986	Basit montaj hattı dengeleme problemi için kesin algoritmaların incelenmesi.	İşlem süreleri ve bir dizi öncelik ilişkileriyle karakterize edilen görevlerin istasyonlara atanması ile hat dengesinin sağlanması.
Pastor, R; Ferrer, L. [63] / 2009	Basit montaj hattı dengeleme problemini çözmek için geliştirilmiş bir matematik programının kullanılması.	Montaj hattının tasarımının geliştirilerek hat dengelemenin sağlanması.
Boysen, N; Fliedner, M; Scholl, A. [64] / 2007	Montaj hattı dengeleme problemlerinin sınıflandırılması.	Montaj hattı dengeleme problemlerini sınıflandırarak mevcut problemin tespitinin sağlanması.
Falkenauer, E. [65] / 2005	Montaj hatlarının yeniden düzenlenmesiyle hat dengelemenin sağlanması.	Montaj hattı tasarımının baştan sona değiştirmek yerine, yeniden düzenlenmesi ile hattın dengelenmesi ve zaman tasarrufunun sağlanması.
Gamberini, R; Gebennini, E; Grassi, A; Reg, A. [66] / 2009	Stokastik montaj hattı yeniden dengeleme problemini çözen çoklu tek geçişli buluşsal algoritmanın kullanılması.	Sezgisel algoritmaların kullanılmasıyla montaj hattında tamamlama maliyetlerinin azaltılması ve hat benzerliğinin maksimuma çıkartılmasının sağlanması.
Zhang, Y; Hu, X; Wu, C. [67] / 2020	Çok amaçlı, iki taraflı montaj hatlarını alan ve kaynak kısıtlamalarıyla yeniden dengelemek için algoritmaların geliştirilmesi.	Çok amaçlı genetik algoritmalar kullanarak istasyon sayısını en aza indirmenin, farklı modeller için her istasyondaki iş yükü değişimini en aza indirmenin ve tüm operatörlerin becerilerini kendilerine yeniden atanan görevlerle uyumlu hale getirmenin sağlanması.
Sancı, Ece; Azizoğlu, Meral [68] / 2017	Kesin çözüm algoritması kullanılarak montaj hatlarının yeniden dengelenmesi.	İş istasyonu arızaları ve duruşlardan kaynaklanan ürün akışı kesintilerini önlemek için karışık tamsayılı doğrusal programlama tabanlı bir algoritma önerilmiştir.
Belassiria, I; Mazouzi, M; Elfezazi, S; Cherrafi, A; Elmaskaoui, Z. [69] / 2018	Montaj hattının dengelenme problemi için entegre bir model geliştirilmesi.	Tek modelli çalışan bir hatta, hibrit genetik algoritma ile hattın verimliliğini en üst düzeye çıkarma ve dengeleme maliyetlerini en aza indirme amaçlamıştır.
Girit, U; Azizoğlu, M. [70] / 2021	Montaj hatlarını toplam iş yükünü ve toplam değiştirme mesafesi hedefleriyle yeniden dengelemek.	Farklı iş istasyonlarına atanan görevlerin, iş yükü dengeleme ile toplam değiştirme mesafesi arasındaki dengeyi bulmak için kesin ve tabu algoritmaları kullanılmıştır.
Ağpak, K. [71] / 2010	Montaj hatlarının dengelenmesi için görev sırasını bulmaya yönelik bir yaklaşım.	U tipi bir montaj hattında farklı döngü süre değerlerinin değişmeden kalmasını sağlayacak şekilde, iş istasyonu sayısını en aza indirmek için iki aşamalı bir sezgisel algoritma kullanılarak problem çözülmüştür.
Serin, F; Mete, S; Çelik, E. [72] / 2019	Stokastik görev süreleriyle u-tipi montaj hattını dengeleme.	U şeklindeki montaj hattındaki problemi, Genetik Algoritma kullanarak iş istasyonu

		sayısını azaltmak ve dengeleme maaliyetlerini minimize etmek.
Yang, C; Gao, J; Sun, L. [73] / 2013	Karma modelli montaj hattının dengelenmesi için çok amaçlı bir genetik algoritmanın kullanılması.	Çok amaçlı karma modelli bir montaj hattının dengelenmesi ve kısa vadeli dengeleme sorunlarının yanı sıra çalışanların eğitimi ve becerileri dikkate alınmıştır.
Miralles, C; Garcia-Sabater, J P; Andres, C; Cardos, M. [74] / 2007	Engellilere yönelik montaj hattına operatör atanması.	Engelli çalışanların montaj hattına operatör atamasına dahil olması.
Araújo, F. F; Costa, A M; Miralles, C. [75] / 2012	Paralel montaj hatlarında işbirlikçi yaklaşım ile hattın dengelenmesi.	Montaj hattında insan odaklı yaklaşım ile montaj hattının dengelenmesi.
Sungur, B; Yavuz, Y. [76] / 2015	Hiyerarşik operatör atamasıyla montaj hattı dengeleme.	Çalışanların nitelik gereksinimlerine ve seviyelerine göre farklılık gösterdiği hiyerarşik operatör atamasıyla montaj hattı dengeleme için bir model sunmuştur.
Oksuz, M K; Buyukozkan, K; Satoglu, S. I. [77] / 2017	U-şekilli montaj hattında, matematiksel meta-sezgisel model kullanılarak hatta operatör atama.	Farklı niteliklere ve beceri düzeylerine sahip operatörlerin iş istasyonuna atanmasıyla hat dengesinin sağlanması.
Efe, B; Kremer, G. E. O.; Kurt, M. [78] / 2018	Operatör atama ve dengeleme probleminde yaş ve cinsiyete dayalı iş yükü kısıtı problemi.	Montaj hattına atanan çalışanların ortalama yaşının ilerlemesinin istasyon sayısını artırdığını ve bu durumun hat verimliliğinde ve fiziksel iş yükü kapasite kullanım oranında azalmayı tetiklediği sonucuna ulaşmışlardır.
Corominas, A; Pastor, R; Plans, J. [79] / 2008	Montaj hattının vasıflı ve vasıfsız operatörlerle dengelenmesi.	Montaj hattına iş zorluğuna göre vasıflı ve vasıfsız operatörlerin atanması ile hat dengesinin sağlanması.
Fattahi, P; Samouei, P. [80] / 2016	Tek ve karma modelli montaj hattının yeniden dengelenmesi ve operatör atama problemine analitik bir yaklaşım.	Tek ve karma modelli montaj hatlarının kritik operasyonlarına beceri kabiliyeti yüksek operatörlerin atanması ile hat dengesinin sağlanması.
Sikora, C. G. S; Lopes, T. C; Magatão, L. [81] / 2017	Montaj hattının gezici operatörler ile dengelemesi.	Operatörlerin birden fazla istasyonda hareket etmesine ve görevleri yerine getirmesi ile montaj hattı dengelemenin sağlanması.
Gräßlera, Iris; Roesmann, Daniel; Cappello, Chiara; Steffen, Eckhard [82] / 2021	Manuel montaj hattında beceriye dayalı operatör ataması.	Geliştirilen matematiksel model ile insan faktörlerine dayalı performansı tahmin ederek, çalışanların iş istasyonlarına atanarak, montaj hattının dengelenmesini sağlanması.

2.4.4. Montaj Hatları Problemlerinin Sınıflandırılması

Literatürde incelenen montaj hattı araştırma problemleri ve hat türleri; iş akış özellikleri, varsayımsal hat özellikleri, ürün özellikleri, hat yerleşimi, görev süresi ve amaca göre olmak üzere 6 türde incelenmektedir. Diyagram 3'de yukarıda anlatılan montaj hattı türlerinin sınıflandırılması gösterilmektedir. Diyagram 3'de ifade edilen montaj hattı türleri, literatürde bu konu üzerine yapılan çalışmalara yönelik genel bir sınıflandırmadır. Son yıllarda, montaj hattı dengeleme problemlerini çözmeye yönelik yapılan çalışmalarda montaj hattı türü üzerinden gitmek yerine, daha çok karma modeller ve problem çözmeye odaklı yeni yollar geliştirilmektedir. Yeni geliştirilen montaj hattı problemlerine yönelik çözümler aşağıdaki bölümlerde değinildi.



Diyagram 3 Montaj Hattı Türlerinin Genel Olarak Sınıflandırılması [83], [84]

2.4.4.1. Varsayımsal ALB Türleri

Montaj hatları, literatürde farklı sınıflandırma şemaları ile ifade edilmektedir. Bu sınıflandırmalar arasında en bilinenleri; Baybars [85], Ghosh ve Gangnon [86], Erel ve Sarin [83], Becker ve Scholl [87], Boysen ve diğerleri [84] tarafından yapılan araştırmalardır. Montaj hatlarının; farklı türlerde ve sınıflandırmalarda kullanılmasının temel sebebi, montaj hattı üzerinde meydana gelen farklı problemlere en uygun çözüm yolunu bulmaktan gelmektedir. Montaj hattı sınıflandırması yapılırken; hat üzerinde bulunan istasyon sayısı, ürünün karmaşıklığı, hat üzerinde çalışan operatör sayısı, çalışanların iş istasyonuna atanması, operasyonların çevrimiçi döngü süresi, malzeme akış yönü ve işletmenin hızlı üretim anlayışında ya da maliyetleri düşürme odaklı üretim anlayışında olması gibi faktörler montaj hatlarının sınıflandırmasını etkilemektedir.

Diğer sınıflandırma yöntemlerine kıyasla daha ideal bir sınıflandırma yöntemi olarak, montaj hattı problemleri varsayımsal olarak iki sınıfa ayrılmaktadır [85]. Birinci sınıfta, basit montaj hattı dengeleme problemi, global araştırmalarda bu ifade "Simple Assembly Line Balancing Problem" (SALBP) olarak adlandırılmaktadır. İkinci sınıfa ise genelleştirilmiş montaj hattı dengeleme problemi, global araştırmalarda bu ifade "Generalized Assembly Line Balancing Problem" (GALBP) olarak adlandırılmaktadır.

SALBP, montaj hattı üzerinde meydana gelebilecek problemleri kolayca çözülebilir hale getirmek için birçok basitleştirilmiş varsayımı dikkate almaktadır. SALBP, sorunu çok daha basit hale getiren çeşitli teknolojik kısıtlamalar ve ilişkilerle sınırlandırılmıştır. Basit montaj hattı dengeleme probleminde birçok varsayım yer almaktadır. Örneğin; SALBP, istasyonların konveyör yani akan bant boyunca düz bir çizgide sıralandığı ve üzerine tek tip bir ürünün monte edildiği bir seri montaj hattını varsaymaktadır. Görev süresi, ürün talebi

ve diğer girdi parametrelerinin önceden bilindiği varsayılır ve bunlar deterministiktir. Montaj hattının çevrim süresinden daha küçük olduğu varsayılan tüm görev süresi ve görev süresi öncelik kısıtlamalarından bağımsızdır. Ayrıca, görevlerin kurulum süresi sıfır olarak kabul edilir veya görev süresine dahil edilir. İstasyonlardan herhangi birine görevler atanabilir ve tek istasyonda aynı anda birden fazla görev işlenemez. Her görev yalnızca bir istasyona atanır, bir görev istasyonlar arasında bölünemez ve her görev öncelik kısıtlamalarına uymak zorundadır. SALBP'de sadece tek bir hat çalışmaktadır ve ana montaj hattına başka bir montaj hattı bağlanamaz ayrıca montaj hattında tüm istasyonlar eşit kaynaklara yani eşit malzeme akışına sahiptir [88].

SALBP, montaj hattının amaç fonksiyonuna göre dört farklı versiyona ayrılır [87]. SALBP-1 olarak adlandırılan ilk versiyon, montaj hattındaki tüm istasyonların istasyon sürelerinin eşit olduğunu varsayar ve bu yöntemdeki amaç, istasyonların boşta kalma sürelerini en aza indirmek veya montaj hattındaki istasyon sayısını bilinen çevrim süresi değeriyle en aza indirilir [87].

SALBP-1 versiyonu, herhangi bir istasyonda belirli bir döngü süresi aşılmazsa gerçekleştirilebilecek belirli bir çıktı seviyesini varsaymaktadır. Bu çıktı seviyesi göz önüne alındığında, SALBP-1, istasyon sayısını en aza indirmeyi amaçlamaktadır [89].

SALBP-2'de montaj hattında sabit istasyon sayısı ile çevrim süresinin en aza indirilmesi amaçlanmaktadır [87]. Alternatif model SALBP-2'nin iş yükü bölüşümüne ilişkin alternatif görüşü benimsediği ve belirli sayıda istasyon için döngü süresini en aza indirmenin ön planda olduğu bir yaklaşımdır.

SALBP-E olarak adlandırılan üçüncü sürüm, tüm görevlerin görev sürelerinin toplamının döngü süresi ve istasyon sayısının ürününe oranı olan hat verimliliğini, global araştırmalarda "efficiency" (E) olarak adlandırılan değeri maksimize etmeye odaklanır [87].

Dördüncü versiyon SALBP-F, bilinen sayıda istasyon ve montaj hattının çevrim süresi ile uygun çözümü belirlemeye odaklanır [87].

SALBP ilk kez 1955 yılında Salveson tarafından matematiksel olarak formüle edilmiştir [90]. Salveson'un "The Assembly Line Balancing Problem" adlı çalışmasında ifade ettiği, "i ve j" değerinin sırasıyla görevleri ve istasyonu temsil ettiğini ve "m" sayıda istasyon üzerinde gerçekleştirilecek "n1" sayıda görev olduğunu ve "CT" ifadesinin montaj hattındaki çevrim süresini göstermektedir. SALBP-1 yönetimin temel amaç fonksiyonu, istasyon sayısını en aza indirmektir. Salveson tarafından geliştirilen formül Denklem 4'de ifade edilmektedir [87].

$$\min(Z) = \sum_{j=1}^{m} yj \tag{4}$$

SALBP-1, her i görevinin yalnızca bir istasyona atanması, bir istasyondaki görev sürelerinin toplamının çevrim süresi değerini aşmaması ve istasyonlara atanan görevlerin öncelik kısıtlarına uyması şartına tabidir. Yeni bir montaj hattı geliştirmeye ihtiyaç duyulduğunda SALBP-1 hesaplamaları temel olarak alınmaktadır. SALBP-2'nin döngü süresini en aza indirmesi amaçlanır, bu durum formülize edilirse; min(z)= CT şeklinde ifade edilmektedir. Her i görevinin yalnızca bir istasyona atanması, toplam istasyon sayısının sabit olması ve istasyonlara atanan görevlerin aşağıdakileri takip etmesi koşuluna tabidir; öncelik

kısıtlamaları SALBP-E'nin hat verimliliğini maksimize etmesi amaçlanmaktadır. Bu durum Denklem 5'de ifade edilmektedir [87];

$$\min(Z) = \sum_{i=1}^{n} ti/mCT \quad (5)$$

Hat verimliliği kapsamına giren SALBP-E sisteminde, istasyonların atıl kalma sürelerinin en aza indirilmesi öncelik olduğu için doğrudan verimliliği etkilemektedir. Verimlilik ne kadar yüksek olursa, mCT ile tüm görev sürelerinin toplamı arasındaki fark o kadar az olacaktır. Bu durumda, istasyonların çoğunun görev sürelerinin toplamı neredeyse montaj hattının çevrim süresine eşit olacaktır ve istasyonun boşta kalma olasılığı daha az ve dengeli bir hat olacaktır [88].

SALBP, gerçek ortamda verimli sonuçlar verme olasılığını azaltan birçok varsayımı dikkate almaktadır. Bu nedenle araştırmacılar daha gerçekçi problemlerin çözümü için bu varsayımları azaltmaya odaklanmaktadırlar. SALB probleminin bir veya daha fazla varsayımının ortadan kaldırıldığı montaj hattı problemleri, genel montaj hattı dengeleme problemi (GALBP) kategorisi altında yer almaktadır [88].

GALBP'nin daha az varsayımı olduğundan, SALBP'den biraz daha pratik olabilir. Örneğin, montaj bir hattında, seri hat içinde yani her işlemin kontinü bir şekilde arka arkaya devam ettiği istasyonları içermesi şart değildir. Oluşturulan hat, U-biçimli montaj hattı adı verilen bir düzenlemede olabilmektedir. İstasyonların U şeklinde düzenlenmesinde, istasyonun boşta kalma süresi azaltılabilir. Benzer şekilde, ürünün görev süresinin veya talebinin bilindiğini varsaymak da gerçekçi değildir. Gerçek durumlarda, görev süresi ve talep dalgalanmaktadır ayrıca bu değerlerde belirsizlik vardır. Bu nedenle, GALBP kategorisine giren yeni bir montaj hattı dengeleme problemi oluşturmak için SALBP'de dikkate alınan bir veya daha fazla varsayım ortadan kaldırılır ve montaj hattı dengeleme ile ilgili gelecekteki araştırmalarda daha yaygın olarak uygulanır. Bu sebepten, SALBP sistemi hat dengeleme işlemlerinde teorik olarak faydalanılabilecek bir yaklaşımdır. GALBP sistemi ise hat dengeleme işlemlerinde hem teoriden hem de meydana gelebilecek olası problemlerin gözetilebileceği bir yaklaşımdır [88].

GALBP, kendi içerisinde 4 farklı tür olarak sınıflandırılmaktadır. Bunlar; UALBP, MALBP, RALBP, MOALBP'dir. U-hattı montaj hattının, düz bir montaj hattına göre farkı yalnızca öncül görevleri, iş istasyonuna atamanın dışında aynı zamanda, UALBP sisteminde öncül görevler ve ardıl görevleri atamak mümkündür. Bu, istasyonların, aynı döngü süresi boyunca, hattın farklı konumlarındaki iki parçayı aynı anda yönetebilecek şekilde tahsis edilebileceği anlamına gelmektedir. SALB'de olduğu gibi burada da problemler; UABLP-1, UABLP-2 ve UABLP-E sınıflara ayrılarak ifade edilmektedir [91].

MALBP, karma modelli montaj hattı dengeleme problemidir. Bu sorun, aynı ürünün çeşitli modelleri göz önüne alındığında ortaya çıkmaktadır ve bu nedenle, kurulum sürelerinden bağımsız olarak tüm modellerde gerçekleştirilen bir dizi temel görevler vardır. Burada problemler; MABLP-1, MABLP-2 ve MABLP-E sınıflara ayrılarak ifade edilmektedir [91].

RALBP, robotik montaj hattı dengeleme problemidir. Bu tür bir problemde, hattaki görevlerin performansını optimize etmek için görevlerin tahsisi ve her bir iş istasyonuna robotların tahsis edilmesi düşünülmektedir. Bu yöntem, son yıllarda teknolojinin

gelişmesiyle işletmeler tarafından sıkça tercih edilmektedir. Bu yöntem ile alakalı daha ayrıntılı bilgiler, Bölüm 3.4.1'de ifade edilmektedir [91].

MOALBP, çok amaçlı montaj hattı dengeleme problemidir. Bu tür problemlerde, toplam maliyeti veya istasyon sayısını en aza indirmek, hattın verimini en üst düzeye çıkarmak vb. gibi birçok amaç aynı anda dikkate alınmaktadır [91].

Montaj hatlarını dengelemek için yukarıda anlatıldığı gibi SALBP ve GALBP gibi yöntemler ve bunlara bağlı yöntemler geliştirilmiştir. SALBP ve GALBP'ye bağlı alt yöntemler daha detaylı bir şekilde incelenmek üzere, Diyagram 3'de görüldüğü gibi sınıflandırılır. Bu sınıflandırılan bölümler aşağıda sırasıyla detaylı bir şekilde anlatılmaktadır.

2.4.4.2. İş Akış Özelliklerine Göre ALB

Montaj hatları, iş akışı özelliklerine göre iki türe ayrılmaktadır. Bunlardan biri, düzenli bir akış hızına sahip, başka bir tabirle "tempolu" olan montaj hatlarıdır. Diğer akış hattı ise düzenli akış hızına sahip olmayan yani "temposuz" montaj hatlarını içermektedir.

Tempolu montaj hatlarında, tüm istasyonların benzer CT döngü süresine sahip olduğu varsayılır ve her döngü süresinin sonunda her istasyon, görevlerini tamamladıktan sonra ürünleri bir sonraki istasyona taşıdığı varsayılmaktadır. Bu montaj hatlarındaki bazı istasyonlar, kendilerine atanan görevleri CT zamanından önce bitirebilir, ancak yine de bu parçaların beklemesi gerekmektedir. Ayrıca CT zamanı geçmedikçe bitmiş olan parçaların bir sonraki istasyona geçmelerine izin verilmemektedir. Genellikle bu montaj hatlarında, bitmiş parçaları bir istasyondan diğerine aktarmak için istasyonlar arasında hareket eden konveyör gibi taşıyıcı bantlar kullanılmaktadır. Konveyör, periyodik veya sürekli olarak hareket ettirilebilir ve ikinci durumda, sistemin CT'si tarafından belirlenen tek bir sabit hıza sahiptir. Şekil 18'de örnek bir konveyör bant görülmektedir.



Şekil 18 İstasyonlar Arasında Parça Akışını Sağlayan Örnek Bir Konveyör Hattı [92]

$$\max(Z) = \sum_{i=1}^{n} Xij * tij \quad (6)$$

Bu hatlardaki minimum CT değeri, istasyonların maksimum iş yüküne, yani hattaki tüm istasyonlar arasında örnek bir j istasyonunun diğer istasyonlar ile kararlaştırılması ile belirlenmektedir. Denklem 6'daki formülde görüldüğü üzere; hat üzerindeki istasyonlardan biri olarak kabul edilen "j" istasyonunun, montaj hattında üretilmiş olan her "n2" tipi ürün arasındaki belirli bir ürünü ise "i" harfi temsil etmektedir. Formülde "Xij" diye ifade edilen

kısaltma, “j” istasyonunda “i” ürünü için görünüm oranını temsil etmektedir. Formülde “Tij” şeklinde ifade edilen kısaltma, “j” istasyonunda “i” ürününün proses süresidir [93].

Bu sistemlerde, her istasyondaki iş yükünün döngü süresinden önce veya konveyör bir istasyondan diğerine geçmeden önce bitirilmesi istenmektedir. Herhangi bir istasyon için CT'nin iş yükü ile farkı, bir istasyonun görev süresindeki stokastik yani rastlantısal değişimleri telafi etme derecesidir [93].

Düzensiz akış hızına sahip olan temposuz montaj hatlarında, istasyondan iş parçaları, biter bitmez bir istasyondan bir sonraki istasyona taşınmaktadır. Bitmiş parçaların istasyonlardan hareketine göre iki farklı tipte temposuz montaj hattı vardır. Bunlardan biri olan senkron temposuz montaj hatları, bitmiş parçaları tüm istasyonlardan aynı anda aktarır. Bu sistemlerde, tüm istasyonlar bitmiş parçalarını belirli bir süre sonra aynı anda hareket ettirir. Bu nedenle istasyonlar arasında stok yoktur. Montaj hattı üzerinde bulunan iş istasyonlarının, görev süreleri deterministik yani sabit olarak kabul edilirse, tempolu montaj hatlarına benzerler. Bu montaj hatlarında, dengeleme problemini verim tahminiyle eş zamanlı olarak ele almak için bazı araştırmalar yapılmıştır [94].

Düzenli akış hızına sahip olmayan temposuz montaj hattının bir diğer türü olan asenkron montaj hatlarında her istasyon, iş yüküne eşit olan farklı çevrim sürelerine sahip olabilmektedir. Bu sistemlerde bir istasyonda parçalar bittiğinde bir sonraki istasyonun işini bitirmemiş olma ihtimali vardır. Bu durumda görevini tamamlamış olan istasyon, ürün parçasını görevini tamamlamamış olan diğer istasyona aktardığı zaman ara stok meydana gelmektedir. Benzer şekilde, bir istasyon görevini bitirirse, bu istasyonun önündeki istasyonun tüm görevlerini bitirmemiş olması ve bu durumda önceki istasyonun bitmiş parçalarını kendisine gönderene kadar istasyonun atıl kalması ihtimali vardır.

İstasyonlar arasındaki bekleme süresini azaltmak için montaj hatlarında genellikle tampon adı verilen ara stoklar kullanılmaktadır. Tamponlar, yarı mamul parçaları istasyonlar arasında saklamaktadır. Tamponlar, parçaları geçici olarak depolar ve hattın dengelenmesine yardımcı olmaktadır.

Montaj hatlarında meydana gelen ara stoklar teorik olarak şu şekilde ifade edilmektedir; WLj'nin herhangi bir j istasyonunun iş yükünü gösterdiğini varsayalım. Daha sonra herhangi iki ardışık istasyon j ve j+1'de iş yükleri arasındaki fark, bu iki istasyondaki montaj hattında ara stoğun birikmesi ile tıkanma mı yoksa stok yokluğu ve önceki iş istasyonların yavaş işlemesi sonucu açlık mı olacağına karar verebilir. Eğer WLj<WLj+1 olursa, j istasyonundaki parçalar tamamlandıktan sonra, j ve j+1 istasyonu arasındaki “Bpq” tamponuna hareket edeceklerdir. Ancak, bu iki istasyon arasında tıkanma veya stok açlığı olup olmayacağı depolama kapasitesine veya tamponun boyutuna bağlıdır. Denklem 7’deki koşul gerçekleştiği sürece j istasyonu teorik olarak bloke olmayabilmektedir [94].

$$Xj\left(WL_{j+1} - WL_j\right) \leq B_{pq} \tag{7}$$

Yukarıdaki görülen formülde Xj kısaltması, j istasyonundaki üretim oranı anlamına gelmektedir. Bu durum formülde de görüldüğü gibi j ile j+1 istasyonu arasındaki ara stok miktarının maksimum kapasitesi, Bpq değeri aşılmayana kadar j istasyonunun bloke edilmeyeceğini göstermektedir.

Benzer şekilde, eğer WLj>WLj+1 ise, j istasyonundaki kısımlar tamamlandıktan sonra, parçalar bir sonraki ara stoğa geçecektir. WLj istasyonu iş yükü açısından WLj+1 istasyonunda daha fazla olduğu zaman, WLj+1 istasyonunda ara stok birikecektir. Bu denklem, WLj<WLj+1'den küçük olduğu zaman WLj+1 istasyonu atıl kalacaktır. Ayrıca burada WLj+1 istasyonunun atıl kalması, j ve j+1 istasyonu arasındaki tampon düzeyine ve tamponun boyutuna bağlıdır.

Denklem 8'deki koşul gerçekleştiği sürece j+1 istasyonu atıl durumda kalmayacaktır [94];

$$X_{j+1}\left(WL_j - WL_{j+1}\right) \leq B_{pq} - S_{j+1} \quad (8)$$

Yukarıdaki formülde ifade edilen Sj+1, j+1 istasyonunda işlemek için ara stokta depolanan mevcut parçaları temsil etmektedir. Burada, ara stok kapasitesi büyükse j+1 istasyonu atıl durumda kalmaz ve j istasyonundaki parçalar, j+1 istasyonunu beslemek için yeterli olduğu anlamını taşımaktadır.

Ara stokların oluşturdukları tamponlar, yalnızca görev süresindeki dalgalanmaları telafi etmek için önemli değildir. Aynı zamanda bir istasyonun arızalanması veya bir istasyonda belirsiz bir arıza meydana gelmesi durumunda da hattın dengelenmesine yardımcı olmaktadırlar.

Uygun tampon boyutu tasarımı, montaj hatlarında gerekli üretim hızı ile üretim maliyetinin düşürülmesi için önemlidir. Bu gerçeklerden dolayı tampon tahsisi, montaj hattı sistem tasarımcıları için kritik bir optimizasyon problemidir ve tampon boyutlandırma bazı araştırmacılar tarafından incelenmiştir [95], [96], [97].

Tampon boyutlandırma probleminin iki türü vardır. Birinci tip tampon boyutlandırma problemi, montaj hattında hedeflenen üretim hızına ulaşmaya çalışılırken, montaj hattında olan tampon miktarını en aza indirmektir. İkinci tip tampon boyutlandırma problemi, montaj hattında olan tampon miktarını ve hattın çıktı oranını maksimize etmeye odaklanmaktadır [98].

Literatürde, temposuz montaj hattı araştırmaları çoğunlukla ara stok miktarını tahsis etmeye, üretim oranını tahmin etmeye veya hattı dengelemeye odaklanmaktadır. Bu 3 sorunun, amaçları çoğunlukla ayrı ayrı ele alınır ve her üç sorun arasındaki karşılıklı bağımlılık nedeniyle; üç amaç için eşzamanlı bir çözüm arzu edilmektedir [89].

2.4.4.3. Ürün Özelliklerine Bağlı ALB

Montaj hatları, ürün özelliklerine göre tek modeli ALB, karma modelli ALB ve çok modelli ALB olmak üzere üç farklı tipe ayrılmaktadır. Tek modelli montaj hattında, büyük miktarda yalnızca bir tür ürün monte edilmektedir. Tek modelli montaj hattı dengeleme sisteminde, görev süresi ve öncelik kısıtlamaları tek bir öncelik grafiği ile temsil edilmektedir [89].

Tek modelli montaj hattında, tek çeşit ürün olması nedeniyle montaj süreci özelleşmiştir. Ayrıca, tek modelli montaj hatlarında, aynı tekrarlanan işlemlerin görev süreleri diğer modellere kıyasla birbirine daha yakındır. Bu da montaj işlemlerinin verimliliğinde kademeli bir artışa yol açmaktadır. Ayrıca, bu montajlardaki otomasyon diğer çoklu ve karma modelli montaj hatlarına göre daha kolaydır ve bu da tek modelli montaj hatlarında montaj operasyon süresini azaltmaya yardımcı olmaktadır.

Özelleştirilmiş ürünlerdeki son trend nedeniyle, müşterilerin talebini karşılamak için tam zamanında üretim (Just in Time) kullanılmaktadır. Tam zamanında üretim (JIT) ihtiyaç kadar talebi, mükemmel kalite ile kalansız olarak bir an önce üretmek ve istendiği zamanda doğru yere nakletmeyi kapsamaktadır [99]. Tam zamanında üretim anlayışına, tek modelli montaj hatları üretimin daha hızlı olması ve basit üretim anlayışına sahip olduğu için bu yöntem tercih edilmektedir. Ancak, her ürün türü için işletme içerisinde ayrı bir montaj hattı kurulumu çok fazla yatırım ve zaman gerektirmektedir. Bu nedenle, karma model montaj hatları adı verilen bir ürünün farklı çeşitlerini üretebilen tek bir montaj hattı geliştirilmiştir.

Karma modelli bir montaj hattında; aynı anda iki veya daha fazla ürün tipinin üretilebildiği ve çeşitlendirilmiş küçük parti üretimine yatkın olan modellerin çeşitliliğine rağmen fazla stok bulundurmadan, ani talep değişikliklerine hızlı cevap verebilen montaj hattı tipidir. Karma modelli montaj hatlarında, farklı modellerin her biri kendi model görev sürelerini ve öncelik ilişkilerini tanımlayan farklı süreç kısıtlamalarına sahip olabilmektedir. Karma model montaj hatlarındaki öncelik ilişkisi, tüm ürün modellerinin öncelik diyagramlarının birleştirilmesiyle elde edilmektedir [100]. Burada öncelik diyagramlarını birleştirirken bazı dikkat edilmesi gereken noktalar vardır. Bu noktalar;

- Hat üzerindeki tüm modellerin benzer görevleri, benzer istasyonlara atanmalıdır.
- Hatta atanan görevlerin, işlenmesi için istasyonun kapasitesinin eşleştirilmesi gereklidir.

Bu kurallar sayesinde, farklı modellerin farklı görevleri için bir istasyondaki kurulum süresinin azaltılmasına yardımcı olabilmektedir [100].

Literatürde yapılan araştırmalarda, karma model montaj hatlarında iki ana problem olduğunu göstermektedir. Birincisi, görevlerin istasyonlara atanmasıyla ilgilidir. Farklı ürün modellerinin görevlerini, montaj hattının bazı hedeflerini optimize ederek ve aralarındaki öncelik ilişkisini sağlayacak şekilde, görevleri ihlal etmeden istasyonlar arasında dağıtmayı amaçlayan hat dengeleme (LB) yapılmaktadır.

Model sıralama (MS) problemi olarak adlandırılan ikinci problem, ürünün farklı modellerinin istasyonlarda birleştirilme sırasını veya sırasını belirlemeye odaklanır. Bu iki problem literatürde [101], [102], [103] ayrı ayrı incelenmiştir.

Eşzamanlı dengeleme ve sıralamada, farklı modellerin istasyonlardaki sıralamasına göre montaj hattı dengelenmektedir. Belirli bir ürün modelinin üretim talebini karşılamak için her istasyondaki model sırasının aynı olduğu kabul edilmektedir. Bununla birlikte, karma modelli bir montaj hattında, her istasyonun görev süresi değişken olabilir ve her model için görev süresindeki farklılıklar sonucu, istasyonlarda tamamlanmamış ya da tamamlanacak birimlerin üretilmesini etkileyebilmektedir. Bu duruma karşı korunmak için, C. Merengo ve diğerleri [104], yatay ve dikey dengeleme adı verilen montaj hattı dengelemesinin iki yönünü tanıtmışlardır.

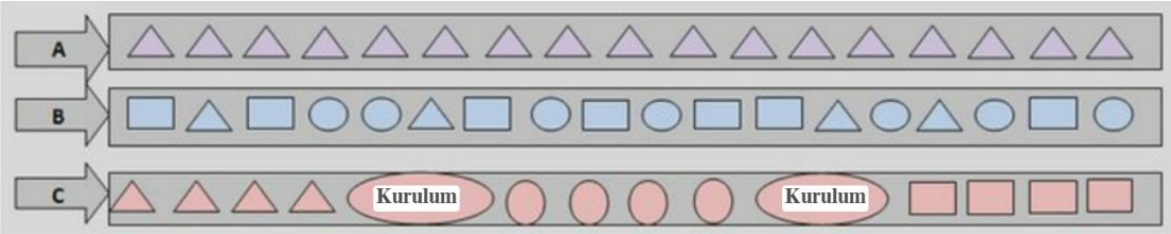
Yatay dengelemenin amacı, farklı modeller için her istasyondaki iş yükünü dengelemektir. Yatay dengeleme, istasyonların iş içeriğini tüm modellerde eşitlemek için önemlidir [89].

Dikey dengelemenin amacı, tüm istasyonlardaki iş yükünü yumuşatmaktır. Bu amaç doğrultusunda, her istasyonun ortalama iş yükü yumuşatılır ve tüm istasyonların genel

güvenlik marjı, farklı istasyonlar arasında eşit olarak dağıtılır. Bu, tüm istasyonlardaki iş yükünün yumuşatılmasına yol açabilir ve farklı istasyonlarda boşta kalma süresinin azaltılmasına yardımcı olabilmektedir [89].

Üçüncü tip montaj hattı, çok modelli montaj hattı adı verilen bir montaj hattında, farklı ürünler ya da aynı ürünün değişik modelleri üretilmektedir. Çoklu modelli montaj hattında, farklı modeller toplu olarak monte edilmektedir. Bu ürünler üretim esnasında partiler halinde üretilmektedir. Bir modelden oluşan bir parti üretildiğinde zaman istasyonların kurulumu, montaj için bir sonraki ürün partisinin gereksinimlerine göre değiştirilmektedir [89].

Aşağıdaki Şekil 19'da ürün özelliklerine bağlı olarak tek modelli (A), karma modelli (B9 ve çok modelli (C) montaj hattı tiplerinin şematik gösterimi verilmektedir. C modelinde "setup" yazılan kısımda, hat üzerinde yeni kurulumların yapıldığı anlamına gelmektedir.



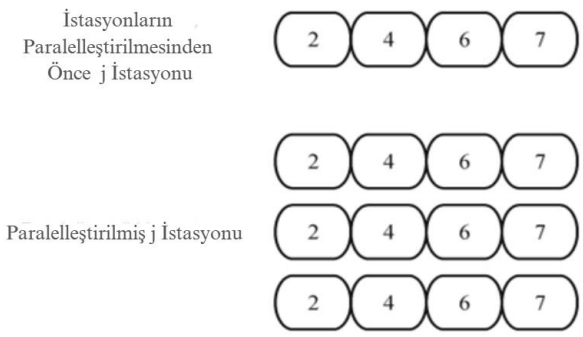
Şekil 19 Ürün Özelliklerine Bağlı Olarak Tek Modelli (A), Karma Modelli (B) ve Çoklu Modelli (C) Montaj Hattı Tipleri [105]

2.4.4.4. Hat Yerleşimine Göre ALB

Hat yerleşimine ve düzenine göre montaj hattı dengeleme yönteminin temelinde, montaj hatları düz hatlar, paralel hatlar, U-şekilli hatlar ve iki taraflı montaj hatları gibi çeşitli türlerde kategorize edilmektedir. Düz montaj hatlarında, istasyonlar konveyörün kenarları boyunca sıralı bir şekilde düzenlenir. Parçalar konveyör aracılığıyla montaj hattının ilk istasyonuna taşınmaktadır. İlk istasyondaki işlem tamamlandıktan sonra parçalar sırasıyla konveyör ile diğer işlemlere geçer ve son istasyondan geçtikten sonra hattan ayrılmaktadır [88].

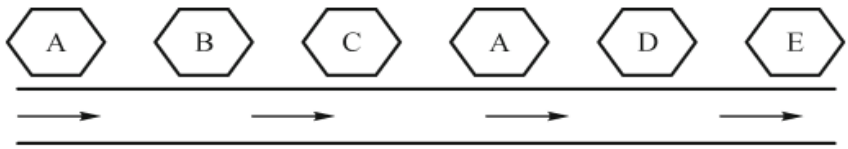
Bu hatlarda çevrim süresi, montaj hattı tempolu ise maksimum iş yüküne sahip istasyonun iş yüküne göre belirlenir. Ancak ara stok, seri olarak istasyonlar arasına yerleştirilebilir. Düz montaj hatlarında, parçaların bir istasyondan diğerine taşınması için geçen süre olan döngü süresi içinde atıl zaman yani boşta kalma süresi dikkate alınmaktadır. Hattın döngü süresini açıklamak için hem istasyonun iş yükü hem de boşta kalma süresi eklenmektedir [88], [106].

Örneğin bir j istasyonu, tüm istasyonlar arasında maksimum iş yüküne sahip olsun ve bir ürünün 2, 4, 6 ve 7. görevlerini işliyor olsun. Hat üzerinde üç paralel j istasyonu yapmak için bu istasyonun iki kopyasının oluşturulduğunu ve aynı görevleri, yani Şekil 20'de gösterildiği gibi 2, 4, 6 ve 7'yi işlediklerini varsayalım. İstasyonların çoğaltılmasının avantajlarından biri onlardan biri meşgulse, önceki istasyonlardan gelen parçalar beklemek zorunda kalmayabilir, ancak paralel istasyonları kullanarak parçaları boşta olan istasyona aktarabilir ve bu sayede hattaki bekleme süresi azaltılabilmektedir. Bekleme süresinin azalmasıyla birlikte ara stok oluşumuna gerek kalmadan hat boyunca akış aksamadan devam etmektedir.



Şekil 20 Örnek "j" İstasyonunun Düz Montaj Hat Hali ve Paralel Montaj Halinin Şematik Gösterimi [88]

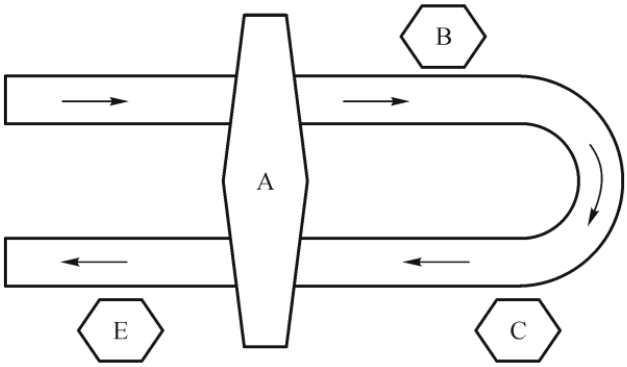
Yerleşim özelliklerine göre bir başka montaj hattı türü de U-biçimli montaj hatlarıdır. Miltenburg ve Wijngaard, istasyonların U-şekilli düzende düzenlendiği U-şekilli montaj hatlarını literatüre tanıtmıştır [107]. U-şeklindeki montaj hattı düzenlemesinin avantajlarından biri, bazı montaj işleri için ürünün gerek duyulan istasyonları tekrar ziyaret edilebilmesidir. Ayrıca, boşta kalan bazı istasyonlar daha fazla görev yapmak için kullanılabilir ve istasyon kullanımının iyileştirilmesine yardımcı olabilmektedir. Örneğin A, B, C, D ve E olmak üzere toplam beş istasyon olduğunu varsayalım. Parçalar ilk olarak, A istasyonundan hareket eder ve sırasıyla B-C-D-E istasyonlarını ziyaret etmektedir.



Şekil 21 Düz Montaj Hattının Şematik Gösterimi [88]

Öncelik kısıtlamaları nedeniyle bazı görevlerin, B ve C istasyonunda montajı yapıldıktan sonra A istasyonunu tekrar ziyaret etmesi gerektiğini varsayalım. Bu durumda, istasyonların düz ya da "I" biçiminde düzenlemesi dikkate alınırsa, Şekil 21'de gösterildiği gibi montaj hattında bir A istasyonuna daha gereksinim olacaktır. Ancak bu durum, ekstra maliyete neden olacaktır.

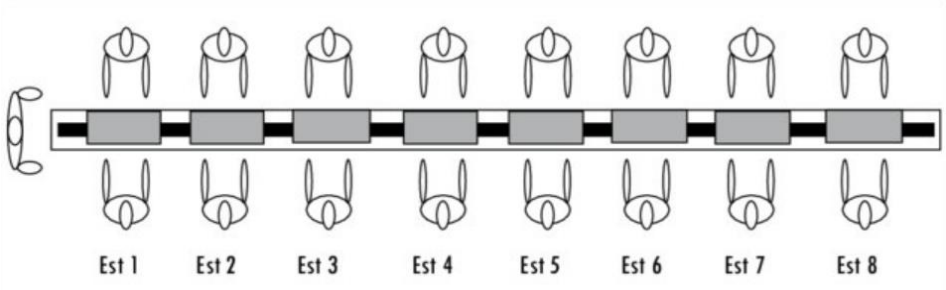
U-şekilli montaj hattı, yalnızca istasyon sayısını azaltmakla kalmaz, aynı zamanda montaj sürecinde boşta kalan bazı istasyonları kullanarak hat verimliliğini artırmak için de yararlıdır. Ayrıca, U-şekilli hatlar, hatta bozulma meydana gelirse tamponların varlığından performans olarak daha iyidir [108]. Bunun nedeni, U-biçimli hatların çapraz istasyon arasında daha büyük tampon boşluklarına sahip olmasıdır. Ayrıca, U-şekilli montaj hatları, operatörlerin boşa giden hareketlerini azaltabilir, üretkenliği ve malzeme taşımayı iyileştirebilir [89].



Şekil 22 U-Şekilli Montaj Hattının Şematik Gösterimi [88]

Yerleşim tasarımlarına dayanan diğer bir montaj hattı türü de iki taraflı montaj hatlarıdır. Bu hatlar; otomobil, kamyon, otobüs ve büyük iş makineleri gibi ağır ve büyük boyutlu ürünlerin montajı için tasarlanmıştır. İki taraflı montaj hatları, montaj hatlarının her iki tarafından parçaları bir araya getirir ve birden fazla operatör veya makine, bir istasyon üzerinde aynı anda bir parça üzerinde birlikte çalışmaktadır [109], [110], [111].

İki taraflı montaj hattı, öncelik kısıtlaması ihlal edilmezse birden fazla görevin aynı anda gerçekleştirilebilmesi avantajına sahiptir. Şekil 23'de iki taraflı montaj hattı şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 23 İki Taraflı Montaj Hattının Şematik Olarak Gösterimi [112]

El İşçiliğinin yapıldığı, montaj hatları genellikle otomatik hatlar yerine bu hatlarda ücret maliyetinin otomasyona göre daha az olduğu düşünülmektedir. Bu sistemlerde, örneğin kol işlerinde, bazı işlerin belirli görevleri yerine getirmek için operatörlerin uzmanlaşması mümkündür. Belirli işlerde uzmanlaşan operatörlerin, diğer görevleri yerine getirirken uzman olduğu görev kadar verimli olmayabilmektedir. Bu durumda, operatörlerle ilgili bazı öncelik kısıtlamaları da olabilmektedir [111].

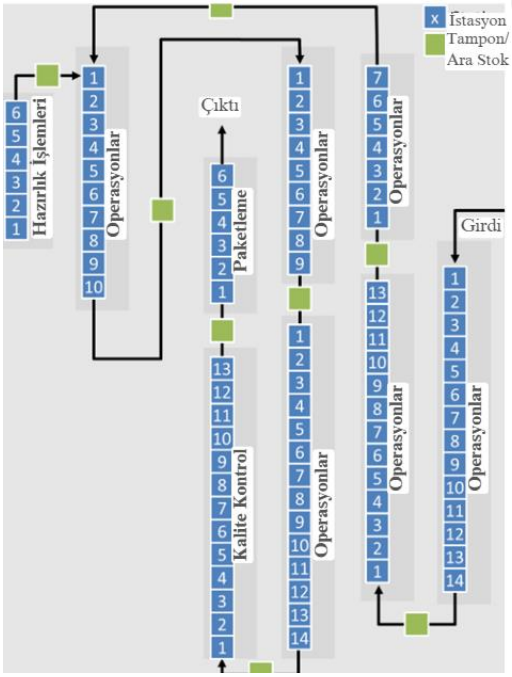
Herhangi bir istasyonda tanımlı bir görevin tamamlanma süresi o istasyonun iş yükünü tanımlamaktadır. Bu tamamlanma süresi, öncelik kısıtlamaları nedeniyle bir istasyonda beklemek zorunda kalabilecek bazı görevlerin bekleme süresini de içermektedir. Diğer bir deyişle, iki taraflı montaj hatlarında bir istasyonun iş yükü, o istasyona atanan görevlerin görev sürelerinden elde edilen ürünün üretim süresidir ve bir istasyondaki üretim süresi hesabı, o istasyondaki görevlerin tüm bekleme sürelerini de içermektedir. Bu, tek taraflı montaj hatlarına kıyasla iki taraflı montaj hattını karmaşık hale getirmektedir [109].

İki taraflı montaj hatlarının diğer montaj hatlarına kıyasla daha karmaşık olmasına sebep olan diğer faktörler; tampon boyutlandırma, tamponların istasyonlar arasında tahsisi ve iki taraflı montaj hatlarında farklı modellerin sıralanması, tampon boyutlandırma ve model sıralama aynı anda düşünülürse dengeleme problemini daha karmaşık hale getirebilir. Ancak, iki taraflı montaj hatları diğer montaj hatlarıyla kıyaslanırsa, fabrika ortamına yani gerçek duruma daha uygun bir şekilde çalışan montaj hattı tipidir [88].

S-şekilli montaj hatları, daha çok işlemin olduğu otomotiv gibi sektörler tarafından sıklıkla tercih edilmektedir. Bu montaj hatları, üründeki işlem sayısına göre yüzlerce metre uzunluğunda olabilir. Bunları düz bir hatta yerleştirmek yalnızca çok uzun bir bina gerektirmekle kalmaz, aynı zamanda lojistik içi malzeme taşımacılığını da oldukça zorlamaktadır. S-şeklindeki bir montaj hattı, bir üretim tesisine çok daha kolay sığabilir ve lojistiğin üstesinden gelmek de çok daha kolaydır [113].

S-şekilli uzun montaj hatlarında, tüm yolu dolaşmak zorunda kalmadan forkliftler ve konveyör bantlar kullanılarak yollarının hatta girip çıkabileceği geçişler ve erişim noktaları oluşturmak gerekmektedir. Hatta meydana gelen istasyonlar arasındaki boşlukların forkliftler ve konveyör geçişleri için yeterince geniş olması gerektiğinden, operatörler genellikle sadece yanlarındaki istasyonlara yönelir ve diğer tarafa geçmezler, ancak bu daha az malzeme gerektiren hatlar için de ürün parçaları istasyonlara yandan teslim edilecek şekilde mümkün olabilmektedir [113], [114].

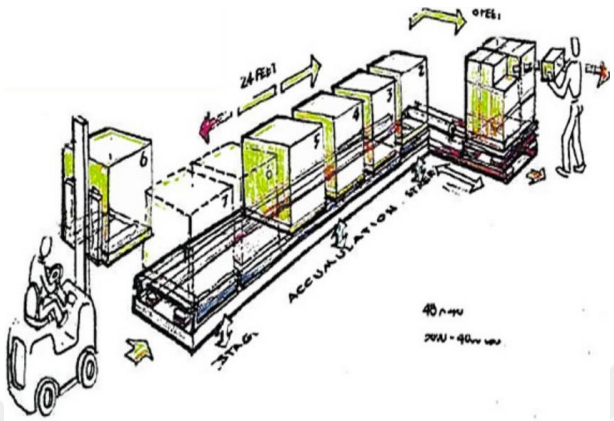
Şekil 24'de örnek bir S-şekilli montaj hattının şematik gösterimi verilmektedir. Görselde mavi renkle belirtilen kutucuklar, iş istasyonlarını temsil etmektedir. Yeşil renkli belirtilen kutucuklar ise ara stoğu temsil eden tampon bölgeleri ifade etmektedir.



Şekil 24 S-şekilli Montaj Hattının Şematik Gösterimi [114]

Çoğu zaman S-şekilli montaj hatları, malzeme akışının dönüşlerinde tamponlarla, genel bir S-şeklinde düzenlenmiş montaj hatları, çoklu düz montaj hattı segmentleri kullanılarak oluşturulur [114].

L-şekilli montaj hatları, genellikle büyük bir tasarımın parçası değildir. Çoğu L-şekilli montaj hattı, tesisteki mevcut alan tarafından L-şeklinde olmaya zorlanmaktadır. Gelen ve giden stoklar birbirine dik açıdaysa bu hat yararlı olabilmektedir. L-şekilli montaj hattı, dönmek için ek bir köşeye sahip olmaları dışında, düz montaj hattına benzemektedir. Sektör içerisinde düz, s-şekilli ve iki taraflı montaj hatları kadar yaygın kullanılmamaktadırlar [115].



Şekil 25 L-Şekilli Montaj Hattının Şematik Gösterimi [115]

2.4.4.5. Amaca Göre ALB

Montaj hatları, optimizasyonları için kullanılan amaç fonksiyonlarına göre iki kategoriye ayrılmaktadır. Bazı montaj hatları, bir amaç fonksiyonuna dayalı olarak optimize edilmekteyken, bazıları aynı anda optimize etmek için birden fazla hedefi dikkate almaktadır. Montaj hatlarının, tek amaçlı optimizasyon problemleri daha yaygındır ve araştırmacıların bu konularda ki ilgi duyduğu optimizasyon alanları aşağıdaki paragrafta yer almaktadır.

Montaj hattı dengeleme problemlerini optimize edebilmek için araştırmacılar tarafından yapılan araştırma alanları; çevrim süresinin minimizasyonu [116], [117] iş istasyonu sayısının minimizasyonu [116], [118] hat verimliliğinin minimizasyonu [119], düzgünlük indeksinin (Smoothness Index) minimizasyonu [118], [120], tasarım maliyetinin en aza indirilmesi [44] ve sistem kullanımı [45] vb. amaçlar üzerine yoğunlaşmaktadır. Düzgünlük indeksinin minimum değeri, mükemmel bir dengeyi gösteren 0 değeridir. Düzgünlük indeksinin (Dİ) küçük olması, modelin mükemmel dengeye daha yakın olduğu anlamına gelmektedir [105].

Çevrim süresinin en aza indirilmesinin amacı, montaj hattındaki parçaların üretim süresini azaltmak için önemlidir ve farklı istasyonlarda boşta kalma süresini azaltmak hattın verimini büyük ölçüde artırmaktadır [105].

Yeni bir montaj hattı tasarlanırken istasyon sayısının en aza indirilmesi, optimizasyon hedefi olarak kullanılmaktadır. İstenilen çıktı üretimi için daha az sayıda istasyon kullanılması, yatırım maliyetinin düşürülmesine yardımcı olmaktadır.

Montaj hatlarında, farklı istasyonların iş yükü tam olarak hattın çevrim süresine eşit değildir. Hattın çevrim süresinden tüm istasyonların iş yükünde değişiklik vardır. Pürüzsüzlük indeksi, her istasyonun iş yükünün döngü süresinden genel farklarını en aza indirerek bu sapmaları azaltmak için kullanılır. Düzgünlük indeksi, Denklem 9'da yer almaktadır [88].

$$\mathrm{SI} = \sqrt{\sum_{j=1}^{m} [CT - t(S_j)]^2} \quad (9)$$

Yukarıda verilen düzgünlük indeksi, hatta bulunan istasyon sayısının minimizasyonu ile tüm istasyonların boşta kalma sürelerini azaltmaya yardımcı olabileceğini ve istasyonların hattın çevrim süresine yakın iş yüküne sahip olabileceğini göstermektedir [88].

Karma modelli montaj hatlarında, modellerin farklı talepleri nedeniyle, her istasyonun her modelden farklı iş yükü katkısı vardır. Bu, belirli modellerin tamamlanmamış birimlerini oluşturabilmektedir [104].

Üreticiler tarafından, montaj hatlarının gerçek ortamda, iki veya daha fazla amaca yönelik optimizasyonun aynı anda gerçekleştirilmesini önemli ölçüde arzu etmektedir. Montaj hatlarının çoğunda bu hedefler birbiriyle çelişmektedir, örneğin bir hedefin optimizasyonu önemli sonuçlar verebilirken, aynı montaj hattının başka bir amacı daha iyi sonuçlar vermeyebilmektedir. Bu sebepten dolayı, hat üzerinde herhangi bir optimizasyon çalışması yapılmadan evvel optimizasyon yapılacak alanın hatta etkisi etraflı bir şekilde incelenmelidir [88].

McMullen ve Tarasewich [45] yapmış olduğu çalışma incelenecek olursa; stokastik montaj hattı dengeleme probleminde, sistem kullanımının, tasarım maliyetinin ve işlerin belirli bir zaman sınırında gerçekleştirilme olasılığının optimizasyonunu ele almaktadır. Bu optimizasyonu gerçekleştirmek için "Karınca Kolonisi" optimizasyon problemine dayalı sezgisel bir prosedür oluşturmuşlardır.

Çoklu amaçların/hedeflerin optimizasyonu için bir bileşik geliştirmiş ve sunulan bileşik fonksiyonlarını optimize ederek problemin tek bir çözümünü elde etmişlerdir. Bununla birlikte, bir bileşik fonksiyonun optimizasyonu, problemin tüm hedeflerinden hangisinin önemli ölçüde optimize edildiğini garanti etmeyebilmektedir. Bunun nedeni, çok amaçlı problemlerin çözümünün, "Pareto Optimal Kümesi" adı verilen bir dizi alternatif değiş tokuş çözümü şeklinde var olmasıdır.

Burçin Çakır ve ark. [44] tarafından yapılan çalışmada, stokastik montaj hattı dengeleme probleminde düzgünlük indeksinin ve tasarım maliyetinin minimizasyonu ele alınmıştır. Pareto optimal çözümlerini elde etmek için tavlama tabanlı simüle edici bir algoritma önermişlerdir.

Karma model montaj hatlarında eşzamanlı dengeleme ve sıralama problemini incelemek için araştırmacılar tarafından yapılan bazı araştırmalar şunlardır; Karabati ve ark. [103], karma model montaj hattını incelemiş ve çevrim süresini en aza indirmek amacıyla eş zamanlı dengeleme ve sıralama problemini ele almıştır. Kim ve ark. [109], karma model ve U-şekilli montaj hattının eşzamanlı dengelenmesi, sıralanması ve iş yükündeki (ADW= Absolute Deviation in Workload) optimize edilmiş mutlak sapma üzerinde çalışmışlardır.

Son zamanlarda, Hwang ve ark. [121], karma model montaj hattının eş zamanlı dengelenmesini ve sıralanmasını sunmuş ve hat verimliliğinin maksimize edilmesini ve iş yükü varyansının minimizasyonunu amaç olarak kabul etmiştir. Literatürden, dengeleme, tampon boyutlandırma ve model sıralama hedeflerini içeren çok amaçlı montaj hatlarının

gelecekteki araştırmalar için eş zamanlı olarak değerlendirilmesi sektörler ve araştırmacılar tarafından hala arzu edilmektedir.

2.4.4.6. Görev Süresine Göre ALB

Montaj hattı dengeleme, görev süresi özellikleri açısından; sabit görev süresi, değişen görev süresi ve stokastik görev süreleri olmak üzere üç gruba ayrılmaktadır. Görev süresinde beklenen varyasyon küçük olduğunda yani basit görevlerin gerçekleştirildiği, kalibrasyonu iyi olan makinelere sahip montaj hatlarında, görev süresi deterministik olarak kabul edilmektedir [122]. Deterministik ortamda görev süreleri sabit bir değişken olarak kabul edilir ve montaj işlemleri sırasında değişmediği varsayılmaktadır. Deterministik olarak kabul edilen ortamlarda, makinelerde meydana gelebilecek olası arızalar göz ardı edilmektedir.

Bu görev süresi varsayımı, montaj hatlarını çözmeyi kolaylaştırmaktadır fakat bu durumun mümkün olabilmesi için üreticiler tamamen otomasyon sistemlerine geçmesi gerekmektedir. Üretim içerisinde otomasyon yerine insan gücü çalıştığı zaman deterministik olarak kabul edilen sabit görev süresi yerini sabit olmayan yani değişen görev süresine bırakmaktadır. Bu durumun birçok sebebi vardır. Örnek verilecek olursa; insan gücüne bir iş verildiğinde, o işi çalışanlar kendi becerilerine ve deneyimlerine dayalı olarak belirli bir süre içinde yapabilmektedir. Tanımlı olan iş üzerinde çalışanlar arasında daha çok deneyime sahip olan bir çalışan daha hızlı ve doğru işi yapabiliyorken, deneyimi az olan çalışan işi daha yavaş ve sorunlu yapabilmektedir. Buna ek olarak çalışanın psikolojisi, yaşadığı hayat şartları, anlık olarak duygu değişimleri, çalışma arkadaşları ve yöneticisi ile yaşadıkları sorunlar bile çalışanın performansını etkilemektedir. Yapılan araştırmalara göre çalışanların, görev süresindeki sistematik azalma, öğrenme etkisi ve deneyim kazanması ile mümkündür [123].

Bu tür problemlerde görev süresi sabit olmayıp, çalışanların öğrenme hızına bağlı bir değişken olarak ele alınmaktadır. Montaj hatlarında, görev süresinin sadece insanlardan kaynaklı sabit kalamayacağı düşüncesi doğru değildir. Bu duruma örnek olarak; makinelerin belirsiz arızası, düzensiz planlama, bakımsız ekipman ve hammaddedeki kusur vb. görev süresinde değişkenliğe neden olmaktadır [88].

Görev süresinin bilinmeyen değişken olarak kabul edildiği stokastik montaj hattı dengeleme problemi birçok araştırmacı [44], [45] ve Nima Hamta ve diğerleri [43], tarafından ele alınmıştır. Literatürde, araştırmacılar belirsiz görev sürelerini temsil etmek için farklı yöntemler kullanmıştır. Bazıları görev süresini stokastik değişken [45], [46], bazıları bulanık değişken [48], [124], bazıları bağımsız normal dağılan değişken [49] veya bazı araştırmacılar farklı dağılımlar [51] içerisinde bu konuyu ele almıştır.

Xu ve Xiao [125], karma model montaj hattını belirsiz görev süresiyle dengelemek için sağlam optimizasyon yöntemini literatüre tanıtmışlardır. Belirsiz değişkenleri temsil etmek için senaryo planlama yaklaşımı geliştirmişlerdir. Bu kriterler, belirsiz görev süresi varlığında montaj hatlarının olası kötü senaryolarında, düşük performans riskine karşı korunmak için önemlidir. Sağlam optimizasyon hedefleri, montaj hattı dengeleme probleminde daha gerçekçi hale getirmek için azaltılmış sayıda varsayımla gelecekteki araştırmalar için geliştirilmeye açık bir alandır.

2.4.5. Modern ALB Yöntemleri

Teknolojinin hızla gelişmesi ve bazı montaj hattı dengeleme problemlerine daha iyi çözüm yolları geliştirilebilmesi için birçok farklı sektör bu alana yönlenmiştir. Son yıllarda bu alanda en çok tercih edilen yöntemler; Robotik sistemler ve yazılım tabanlı algoritmalardır. Bu yöntemler aşağıdaki bölümlerde detaylı bir şeklide incelenmektedir.

2.4.5.1. Robotik Montaj Hatları

Montaj işlemleri manuel, otomatik veya yarı otomatik sistemlerle gerçekleştirilebilir. Sürekli değişen tüketici talepleri nedeniyle ve aynı zamanda pazarda hayatta kalmak ve rekabet gücünü korumak için üreticiler, otomasyonu devreye alarak esneklik ve çevikliği artırmaya, maliyeti düşürmeye ve tavizsiz kalite ile geliştirilmiş üretkenliği ve verimliliğe yol açan üretim stratejilerini izlemek zorundadır. Sonuç olarak, akıllı fabrika konseptini geliştirmek için robotlar ve çeşitli otomatik ekipman türleri tercih edilmektedir. Katma değerli ve nispeten daha karmaşık işlemlerde, robotların kullanıldığı montaj hattına "Robotik Montaj Hattı" diğer bir adıyla "Robotic Assembly Line" (RAL) adı verilir [126].

Montaj hatlarında, gerçekçi kısıtlamaların otomatik üretim sürecine dahil edildiği basit ALBP'nin bir uzantısı olan robotik ALBP (RALBP), ilk olarak Rubinovitz ve Bukchin (1991) tarafından literatüre sunulmuştur [127].

Endüstriyel nesnelerin interneti (IIOT), bulut bilgi işlem (CC) ve yapay zekâ (AI) aracılığıyla robotik iş istasyonlarında verilerin toplanmasını ve analiz edilmesini sağlamaktadır. Akıllı fabrikalar, üretim sistemini gerçek zamanlı (Real Time) olarak optimize etmek için bu verileri otonom karar alma süreçlerinde kullanmaktadır.



Şekil 26 Otomotiv Endüstrisinde Örnek Bir Robotik Montaj Hattı (RAL) [128]

Farklı robotlar tarafından gerçekleştirilen belirli bir operasyonun görev süresi, kullanılan robotun performans kabiliyetine bağlı olarak değişebilmektedir. Bu nedenle, RALBP optimize edilirken iki alt sorunun yanıtlanması gerekmektedir [126]. Bunlar;

1. Görevden iş istasyonuna atama,
2. Robottan iş istasyonuna atamadır.

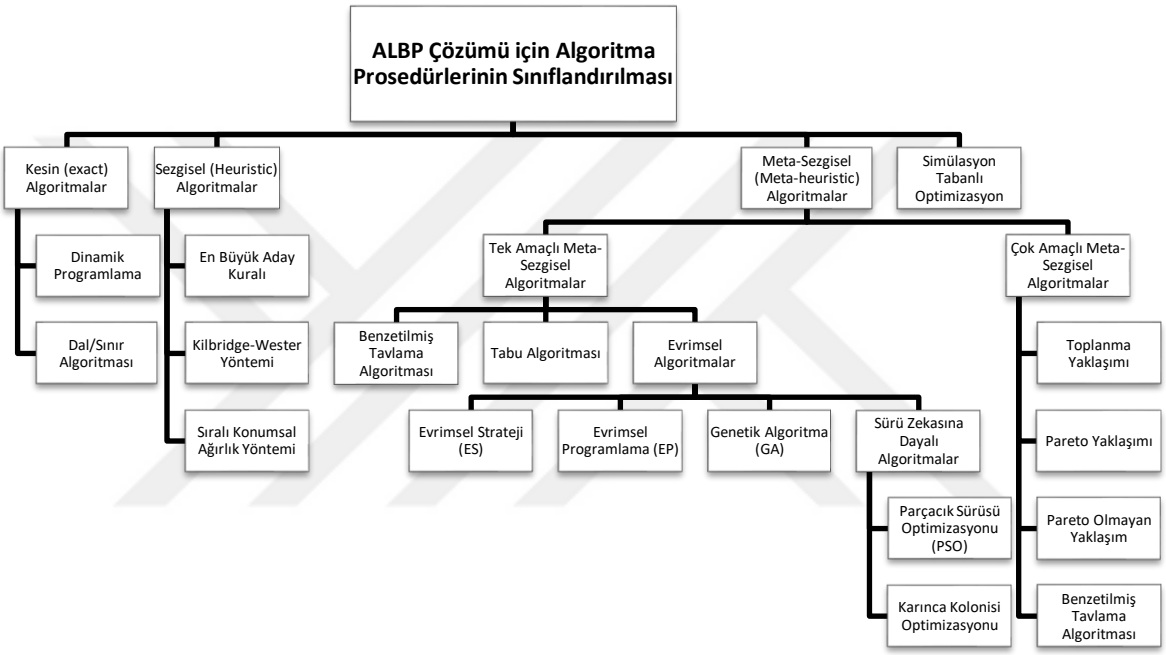
RALBP'de ele alınan esnek üretim sistemi, çeşitli tiplerde sınırsız sayıda genel amaçlı robottan oluşmaktadır. Çoğu farklı tipte olan bu robotlardan bazıları, tek bir bitmiş ürünü etkili bir şekilde üretmek için seçilir ve bir montaj hattına kurulur. Ancak, her robot tipinin kapasitesi aynı olmadığı için üretim planına göre en uygun robotlar seçilmelidir [126], [129].

2.4.5.2. Yazılım Tabanlı Algoritmalar

Montaj hattı dengeleme problemlerini, optimize etmek için başlıca üç yöntem vardır. Bu üç yöntem sırasıyla; kesin (exact) yöntemler, sezgisel (heuristic) yöntemler ve meta-sezgisel (meta-heuristic) yöntemler olmak üzere sınıflanmaktadır.

Algoritmalar, bilgisayar dili olan kodlar kullanılarak elde edilmektedir. Algoritmalarda hedeflenen optimizasyon işlemi, algoritmaları oluşturan kodların daha az yer kaplayacağı ve mevcut durumu daha hızlı iyileştirmesini sağlaması hedeflenmektedir [130].

Montaj hattı dengeleme problemlerinin çözümü için algoritma prosedürlerinin sınıflandırılması Şekil 27'de ifade edilmektedir.



Şekil 27 Montaj Hatlarında Kullanılan Algoritmaların Sınıflandırılması [130]

2.4.5.2.1. Kesin Algoritmalar

Tamsayılı doğrusal programlama modelleri, tasarımcıların ve karar vericilerin farklı montaj sistemlerini daha iyi anlamalarını kolaylaştırabilecek montaj hattı dengeleme problemlerini resmi olarak tanımlamak için kullanılmıştır. Literatürde montaj hattı dengeleme problemlerini önlemek için kabul edilen "kesin yöntemler", dinamik programlama ve dal-sınır prosedürlerine dayanmaktadır [131].

Dinamik Programlama (DP) prosedürleri temel olarak problemi daha küçük alt problemlere bölerek çok aşamalı bir karar sürecine dönüştürür ve bu problemler yinelemeli olarak çözülür, daha sonra alt problemlerin optimal çözümleri, orijinal problemin optimal çözümünü oluşturmak için kullanılmaktadır [131].

Dal ve sınır prosedürü (B&B), uygulanabilir çözümlerin alt kümelerini keşfederek en uygun çözümü bulan bir numaralandırma tekniğidir. Bu prosedürde, problemin çözüm uzayı dallandırılarak alt bölgeler oluşturulur. Farklı arama stratejileri kullanılarak, her bir alt bölge

içindeki optimum çözümün alt veya üst sınırlarını bulmak için yinelemeli olarak bir sınırlama işlemi kullanılır [131].

Johnson yapmış olduğu çalışmada [132], SALB Tip 1 problemini çözmek için bir dal-sınır algoritması olan FABLE'ı literatüre tanıtmıştır. FABLE, fizibiliteyi hızlı bir şekilde gerçekleştirecek şekilde tasarlanmış mantığa sahip bir derinlik öncelikli arama algoritmasıdır. Bu yöntemde, ilk iş istasyonundan başlayarak, mevcut iş istasyonuna atanabilir bir görev eklenerek alt problemler oluşturulmaktadır. Böyle bir görev yoksa, yeni bir iş istasyonu oluşturulmaktadır. Yeni bir iş istasyonu oluşturulduğunda, atanabilir görevler arasında en küçük dizine sahip görev, ilk olarak atanmaktadır. Görevler her zaman görevin atanabileceği en eski iş istasyonuna atandığından, iş istasyonları ilk iş istasyonundan son iş istasyonuna doğru ileri yönde doldurulmaktadır [133].

2.4.5.2.2. Sezgisel Algoritmalar

Sezgisel algoritma yöntemi, montaj hattı dengeleme yöntemleri olarak adlandırılabilecek ilk yöntemlerden biri olarak, 1961'de Helgeson ve Birnie [134] tarafından yapılan çalışmalar sonucu literatüre tanıtılmıştır. Bu yöntem, sıralanmış konumsal ağırlık tekniği (Ranked Positional Weighting Technique-RPW) olarak adlandırılmaktadır ve bu yöntem, iş istasyonlarına atanacak öğeleri sezgisel algoritmalar aracılığıyla öncelik ilişkisine göre seçmeyi içermektedir.

Öncelik kuralına dayalı yöntemler, atanabilir görevlerin sıralanmış bir listesini oluşturmaktadır. Bir görev, tüm öncülleri zaten atanmışsa ve süresi artı mevcut iş istasyonu süresi döngü süresini aşmıyorsa atanabilmektedir. Ardından, aşağıdaki iki stratejiden biri dikkate alınarak görevler seçilir ve iş istasyonlarına atanmaktadır [134].

Herhangi bir çalışanın konum ağırlığı ve iş istasyonlarının çevrim süreleri, onu takip etmesi gereken tüm elemanların/işlerin zamanlarının toplamına eşittir. Bu nedenle, hiçbir elemanın takip etmesi gereken bir elemandan daha büyük bir konum ağırlığına sahip olması mümkün değildir. Öğeler, azalan konumsal ağırlık sırasına göre atanmaktadır. Bu nedenle öncelik kısıtlamaları ihlal edilemez. Optimal bir çözüm, bu yöntemde garanti edilmez, ancak yöntem son derece basittir ve bilgisayar çözümü için kolayca programlanabilmektedir [134].

En Büyük Aday Kuralı (Largest Candidate Rule-LCR), önceden izin verilen değeri aşmayan her bir istasyon değerine göre azalan bir düzende, istasyon süresi ve çalışma öğelerine göre düzenlenecek iş öğelerini kapsamaktadır [135]. Bu yöntemde, görevler çevrim sürelerine göre azalan şekilde sıralanmaktadır. Ardından her bir görev için öncelikli görevler belirlenmektedir. Burada, görev listesinin en üstündeki görev ile başlanır ve atanmamış ilk uygun görev ilgili istasyona atanmaktadır. Görev atandığı zaman, önceliği olan diğer tüm görevlerin öncelikli görevler listesinden çıkartılır. Bir görevin uygun olabilmesi için ya öncelikli görevlerinin olmaması ya da tüm öncelikli görevlerin tamamlanmış olması gerekmektedir. Bir görevin bir istasyona atanabilmesi için, görevin süresi ile o istasyona atanmış görevlerin toplam süresinin, çevrim süresini aşmaması gerekir. Eğer aşarsa atama işlemi yapılmadan diğer göreve geçilir. Duruma görev listesinde atanabilecek, uygun görev yok ise hat içerisinde yeni bir iş istasyonu oluşturulmaktadır [136], [135].

COMSOAL (Montaj Hatları İçin İşlemleri Sıralama Bilgisayar Yöntemi), orijinal olarak montaj hattı dengeleme sorununa bir çözüm yaklaşımı olarak bildirilen bir bilgisayar buluşsal yöntemidir [137], [138].

2.4.5.2.3. Meta-Sezgisel (Meta-Heuristic) Algoritmalar

Meta-sezgisel terimi ilk olarak; Glover ve Lagune [139] tarafından yapılan çalışmalar sonucu, literatüre tanıtılmıştır. Bu prosedürler, bir başlangıç çözümü bulmak için yapıcı yöntemlere ve gelişmiş bir komşu çözüme geçmek için yerel arama algoritmalarına dayanır [131].

Meta-sezgisel olarak adlandırılan yeni bir optimizasyon yöntemleri sınıfının ortaya çıkışı, optimizasyon alanında büyük bir devrime işaret etmektedir. Bu yöntemler, tüm kombinatoryal problem tiplerine uygulanabilir ve sürekli problemlere de uyarlanabilmektedir. Araştırmacıların, genellikle makul bir hesaplama süresiyle, elde edilen çözümün optimalliğini garanti etmeden iyi bir çözüm bulmasına olanak tanımaktadır [140].

Bir optimizasyon problemi genellikle bir araştırma alanı ve bir amaç fonksiyonu ile tanımlanır. Bu optimizasyonun amacı daha iyi bir çözüm bulmaktır. Oluşturulan probleme göre, amaç fonksiyonunun minimumu veya maksimumu aranır. Bununla birlikte, bir optimizasyon problemi bazen bir dizi eşitlik ve/veya eşitsizlik kısıtlamasına sahip olabilir [140].

Meta-sezgisel yöntemi, optimizasyon problemlerinin çözümüne yönelik bir stokastik algoritmalar ailesidir. En önemli avantajları, algoritmalarında önemli değişiklikler olmaksızın çok sayıda soruna uyarlanabilir olmalarıdır. Minimum bilgi ile bir sorunu optimize etme kapasiteleri zayıftır çünkü bu algoritmalar bulunan en iyi çözümün optimalliği için herhangi bir garanti veremez. Bununla birlikte, araştırmacıların bakış açısına göre, bu durum bir dezavantaj olarak görülmemektedir [140].

2.4.5.2.4. Simülasyon Tabanlı Optimizasyon

Simülasyon tabanlı optimizasyon yöntemi, karmaşık sistemleri analiz etmek için birçok farklı sektörde yaygın olarak kullanılan bir paradigmadır. Simülasyon tekniği, incelenmekte olan mevcut ya da yeni inşa edilecek bir sistemin basitleştirilmiş temsilini ortaya koymaktadır [141]. Bu yöntem ile mevcut sistemin geliştirilmesi üzerine sistem tasarımı, maliyet-fayda analizi, tasarımın hedefe uyumluluğu, geliştirilecek sistemin kapasitesi, montaj hattı üzerinde sistem sayısı ve çalışan gereksinimi analizi, sistemin zayıf ve güçlü yönleri vb. gibi alanları kapsamaktadır. Bu alanlar, doğrudan üretime etkisi olan parametrelerin en iyi sonucu verene kadar tekrarlı bir şekilde simüle edilerek mevcut sistemin geliştirilmesini amaçlamaktadır [142].

Simülasyon tabanlı optimizasyon yöntemi, geliştirilmesi hedeflenen sistemin ilgili performans ölçütlerinin ve öngörülerinin sağlanması amacıyla karmaşık bir modelin basitleştirilmiş bir temsilini ortaya koymaktadır. Modelleme ve simülasyon tabanlı optimizasyon yöntemi, hazır giyim sektöründe dikiş montaj hatlarını incelemek ve analiz etmek için potansiyel araçlardır [143].

Simülasyon tabanlı optimizasyon, olasılıksal veya deterministik bir sistem modelinde bir dizi senaryo üretmek ve ardından en iyi çözümü elde etmek için bu senaryolara çizelgeleme kararları ve agresif arama yaklaşımları uygulayarak en iyi alternatif çözümü seçmek için

kullanılan bir tasarım yaklaşımıdır. Simülasyon tabanlı optimizasyon yöntemi, simülasyon ve optimizasyon/metasezgisel tekniklerin kullanıldığı hibrit bir yaklaşımdır [144].

Simülasyon tabanlı optimizasyon alanında, birçok araştırma yapılmıştır. Bu araştırmalarda simülasyon tabanlı optimizasyon kullanarak bir dizi sistemin performansı iyileştirmiştir. Bu çalışmalara örnek olarak; Dang ve Phan [145], simülasyon tabanlı uyarlanabilir geniş komşu arama buluşsal yöntemini kullanarak ayakkabı üretimi için bir montaj hattı tasarlamıştır. Juan [146], Simülasyon tabanlı optimizasyon kullanarak imalat endüstrisinde üretim planlaması üzerine bir çalışma yürütmüştür. Yegulet ve arkadaşları [147] tarafından yapılan bir çalışmada, Simülasyon tabanlı optimizasyon kullanarak üretim hattının konfigürasyonu iyileştirilmiştir. Alvandi ve arkadaşları [148], çok ürünlü/çok makineli üretim sistemlerinde klasik üretim planlamasının kalıtsal karmaşıklığının üstesinden gelmek ve birkaç üretim hedefini aynı anda optimize etmek için metasezgisel yönteme dayalı entegre bir simülasyon optimizasyon çerçevesi geliştirmişlerdir.

2.4.6. Makine Öğrenimi Yöntemi

Makine öğrenimi yöntemi; bilgi teknolojisi, istatistik, olasılık, yapay zeka, psikoloji, nörobiyoloji ve diğer birçok disiplinde sunulan geniş bir alanı temsil etmektedir. Makine öğrenimi yöntemi ile problemler; seçilen bir veri setinin, bir temsili olan bir model oluşturarak çözülebilmektedir. Makine öğrenimi yöntemi günümüzde, bilgisayarlara insan beynini taklit etmeyi öğretmekten daha ileri bir alan haline gelmiş ve istatistik alanını, öğrenme süreçlerinin temel istatistiksel hesaplama teorilerini üreten geniş bir disipline getirmiştir [149].

Makine öğrenimi yöntemi, bilgisayarın ya da makinelerin, bir işi yaparken aynı insanlar gibi olumsuz bir sonuç karşısında deneyimleyerek aynı hatayı, algoritmalar oluşturularak yapmamasını sağlayan bir sistemi kapsamaktadır. Bu yöntemde öğrenme, istatistiksel düzenlilikleri veya diğer veri modellerini bulma sürecidir. Makine öğrenimi algoritmaları, insanlar gibi görevleri deneyimleyerek öğrenmeye yönelik insan yaklaşımı esas alınarak oluşturulmuştur. Makine öğrenimi yönteminde, bilgisayarın bir görevi gerçekleştirebilmesi için çok büyük verilere ihtiyacı vardır. Bu verileri de depolayacak geniş hafızaya sahip olması gerektiği anlamını da taşımaktadır. Bu büyük veriler literatürdeki bir diğer adıyla "Big Data" olarak adlandırılmaktadır [150].

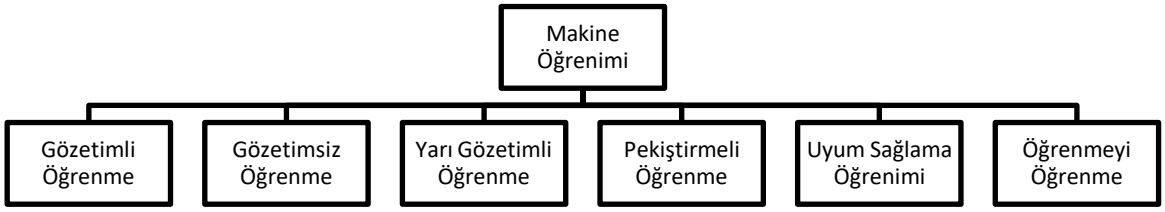
Günümüzde, büyük veri alanında yeni bilgi işlem teknolojilerinin geliştirilmesi ile makine öğrenimi yöntemi geçmişe kıyasla daha da gelişmiştir ve araştırmacılara göre makine öğrenimi yöntemi, yapay zeka ve bilgi işlem teknolojilerinin daha da gelişeceği ön görüsünde bulunarak önümüzdeki yıllarda gelişmeye açık bir alan olduğunu vurgulamaktadırlar [150]. Her geçen gün bu alanda yapılan yenilikler sayesinde, makine öğrenimi algoritmalarının çoğu güncellenmekte ve geliştirilmektedir. Makine öğrenimindeki son gelişme, sonuçları çok daha hızlı hesaplayan çeşitli karmaşık matematiksel hesaplamaları büyük bir veriye otomatik olarak uygulama yeteneği haline gelmiştir [151].

Makine öğrenimi yönteminde, uyarlanabilir programlama günümüzde çok kullanılan bir tekniktir. Uygulamaların kodlama kalıplarını tanıyabildiği, deneyimlerden öğrenebildiği, verilerden yeni bilgiler soyutlayabildiği veya işleme ve çıktılarının doğruluğunu ve verimliliğini optimize edebildiği makine öğreniminde sıkça kullanılmaktadır. Ayrıca, çeşitli

uygulama alanlarında bulunan çok boyutlu verilerle çalışmak için makine öğrenimi teknikleri de kullanmaktadır [151]. Dolayısıyla, algoritmaların istenen sonucuna göre, makine öğrenimi yönteminde kullanılan algoritmalar aşağıda gruplar halinde anlatılmaktadır:

1) Gözetimli öğrenme: Gözetimli öğrenme, etiketli veri kümelerinin kullanımıyla tanımlanan bir makine öğrenimi yaklaşımıdır. Bu veri kümeleri, algoritmaları verileri sınıflandırmak veya sonuçları doğru bir şekilde tahmin etmek için eğitmek veya "denetlemek" için tasarlanmıştır. Etiketli giriş ve çıkışları kullanan model, doğruluğunu ölçebilir ve zamanla öğrenebilmektedir [152].
2) Gözetimsiz Öğrenme: Gözetimsiz öğrenme, etiketlenmemiş veri kümelerini analiz etmek ve kümelemek için makine öğrenimi algoritmalarını kullanır. Bu algoritmalar, insan müdahalesine gerek kalmadan verilerdeki gizli kalıpları keşfetmektedir. Bu nedenle, gözetimsiz öğrenme olarak adlandırılmaktadır [152].
3) Yarı Gözetimli Öğrenme: Yarı gözetimli öğrenme hem etiketli hem de etiketsiz veriler içeren bir eğitim veri kümesinin kullandığı bir algoritmadır. Özellikle verilerden ilgili özellikleri ayıklamak zor olduğunda ve yüksek miktarda veri kullanıldığı zaman tercih edilen bir algoritmadır [152].
4) Pekiştirmeli Öğrenme: Pekiştirmeli öğrenme, istenen davranışları ödüllendirmeye ve/veya istenmeyenleri cezalandırmaya dayanan bir makine öğrenimi yöntemidir. Genel olarak, bir pekiştirmeli öğrenme ajanı çevresini algılayabilir ve yorumlayabilir, harekete geçebilir ve deneme yanılma yoluyla öğrenebilmektedir [153].
5) Uyum Sağlama Öğrenimi: Gözetimli öğrenmeye benzemektedir ancak açıkça bir işlev oluşturamazdır. Bunun yerine, eğitim girdilerine, eğitim çıktılarına ve yeni girdilere dayalı olarak yeni çıktıları tahmin etmeye çalışan bir algoritmadır [151].
6) Öğrenmeyi Öğrenme: Algoritmaların önceki deneyimlerine dayalı olarak kendi tümevarımsal sezgi/eğilimleri ile öğrenerek görev yaptığı bir algoritmadır [151].

Makine öğrenimi yönteminde kullanılan algoritmalar, Şekil 28'de gösterilmektedir.



Şekil 28 Makine Öğrenimi Yönteminde Kullanılan Algoritmalar

Yukarıda sınıflandırılan makine öğrenimi algoritma gruplarının yanı sıra, makine öğrenimi temel olarak gözetimli ve gözetimsiz öğrenme olmak üzere iki genel gruba ayrılırlar [149].

Gözetimli algoritmalarda sınıflar önceden belirlenmektedir. Bu sınıflar, insanlar tarafından tanımlanan sonlu bir küme şeklinde oluşturulur, bu da pratikte belirli bir veri bölümünün bu sınıflandırmalarla etiketleneceği anlamına gelmektedir. Makine öğrenimi algoritmasının görevi, kalıpları bulmak ve matematiksel modeller oluşturmaktır. Bu modeller daha sonra,

verilerin kendisindeki varyans ölçümleriyle ilişkili olarak tahmin kapasitesine dayalı olarak değerlendirilmektedir [149].

İki ana gözetimli model arasında fark model bazlı farklılardır. Bu modeller; sınıflandırma modelleri (sınıflandırıcılar) ve regresyon modelleridir. Regresyon modelleri, girdi uzayını gerçek değer alanına eşlemekteyken, sınıflandırıcılar giriş uzayını önceden tanımlanmış sınıflara eşlemektedir. Sınıflandırıcıları temsil etmek için birçok alternatif vardır. Örneğin; destek vektör makineleri, karar ağaçları, olasılık özetleri, cebirsel fonksiyon, vb. gibi yöntemler kullanılmaktadır [149].

Regresyon ve olasılık tahmini ile birlikte, sınıflandırma en çok kullanılan modellerden biridir ve muhtemelen en büyük pratik kullanıma sahiptir. Tekniğin hem "Veri Madenciliği" hem de uygulamalarında diğer alanlarda büyük etkisi olduğundan, sınıflandırmadaki ilerlemenin potansiyel faydaları çok fazladır [149].

Günümüzde gözetimsiz öğrenme algoritmalarında sınıflandırmalar kullanılmamaktadır. Gözetimsiz öğrenmenin ana görevi, sınıflandırma etiketlerini otomatik olarak geliştirmektir. Bu algoritmalar, kategorize edilip edilemeyeceklerini belirlemek ve bir grup oluşturup oluşturamayacaklarını belirlemek için veri parçaları arasındaki benzerliği araştırılmaktadır. Bu gruplar sözde kümeler olarak adlandırılır ve kümeleme makine öğrenimi tekniklerinin tüm ailesini temsil etmektedir [149].

Bu gözetimsiz sınıflandırmada makine, kümelerin nasıl gruplandırıldığını bilmez ve bu alan halen gelişime açık bir alandır. Bu nedenle, küme analizi hakkında yapılan birçok makale ve araştırmalar bu alanın geliştirilmesi açısından çok umut vericidir [149]. Günümüzde, gözetimsiz öğrenme algoritmalarında en çok K-araçları yöntemi tercih edilmektedir. K-araçları yöntemi, kümeleme problemini çözen en basit gözetimsiz öğrenme algoritmalarından biridir. Prosedür, belirli sayıda küme aracılığıyla belirli bir veri kümesini sınıflandırmanın basit ve kolay bir yolunu izlemektedir [154].

2.4.7. İş Sürelerinin Belirlenmesi

Bir montaj hattı, birden çok iş istasyonundan oluşmaktadır. Bu iş istasyonlarında, yapılan çalışmalar birbirine yakın sürelerde gerçekleşmelidir. İş istasyonlarında, gerçekleşen iş süreleri birbirine yakın olduğu zaman, teorik olarak hat dengesi sağlanmaktadır [155].

Montaj hattı dengeleme içerisinde birçok dinamik vardır. Örnek olarak; bir montaj hattında ortalama her iş 20 sn olduğu varsayılsın. Bu işler yaklaşık 20 sn içerisinde, gerçekleştiği zaman hat üzerinde üretimi engelleyecek stok birikimi ya da bir iş istasyonuna malzeme akışını kesecek bir akış olmayacaktır. Bu durumda hat denge içerisinde işliyor olacaktır. Bu işler 20 sn yerine 30 sn sürmüş olsaydı hat üzerinde yine denge mümkün olacaktı ancak günlük planlanan ürün adetinde düşüş gerçekleşecektir.

Yukarıda verilen örnekte olduğu gibi montaj hattı dengesi ile günlük üretim adedi hedefi paralel olarak ilerlemelidir. Bunun da gerçekleşebilmesi için montaj hattı üzerinde gerçekleşecek her bir iş için ne kadar zaman geçmesi gerektiği doğru olarak saptanmalıdır. [155].

Operasyon sürelerinin doğru bir şekilde tespit edilmesinin yanı sıra, çalışılan işlerin operasyon süreleri işletme içerisinde standartlaştırılmalıdır. Bu durum, işletmelerin daha

çabuk aksiyon almasına katkı sağlamaktadır. Aynı zamanda, yeni bir hat kurulumu yapıldığında, hattın seri üretime geçmeden önce operasyon sürelerinin belirlenmesi gerekmektedir [156].

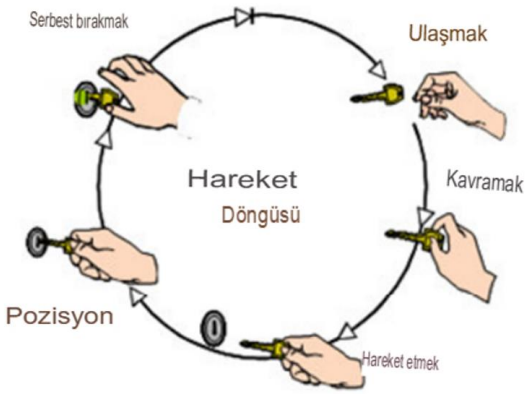
İş sürelerini belirlemek için genel olarak 4 farklı yaklaşım bulunmaktadır. Bunlar; gsd, kronometre yöntemi, refa ve algoritma bazlı yaklaşımlardır. Aşağıdaki bölümlerde bu yaklaşımlar ile ilgili bilgiler ifade edilmektedir.

2.4.7.1. Kronometre Yardımıyla İş Sürelerinin Belirlenmesi

İş sürelerinin ölçülmesi, standart koşullar altında gerçekleştirilen belirli bir iş veya aşamalarının tamamlanma süresi ve derecesi kaydedilerek iş/operatör bazlı veri toplanmaktadır. İş süresi verilerinin ağırlıklı ortalaması alınarak diğer operatörlerin ürünü tamamlama süreleri üzerinden analiz edilir ve iş için harcanması gereken süreye ulaşılmaktadır [155].

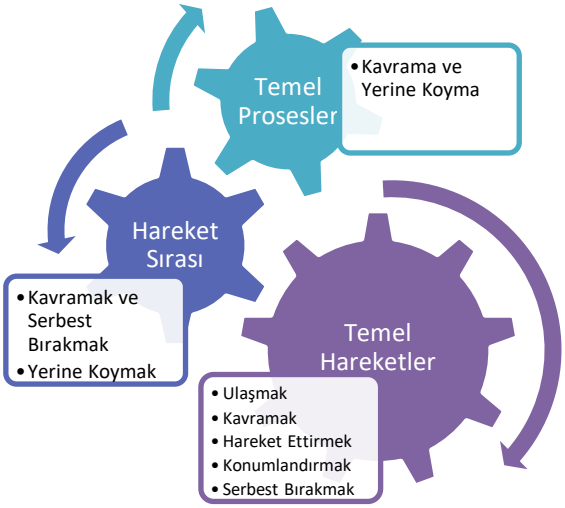
Kronometre ile iş sürelerinin ölçümü metodolojisi, belirli bir işi gerçekleştirmek için gereken hareket dizilerini temel hareketler halinde yapılandırmak ve belirli bir standardizasyon oluşturmak için kullanılan bir yöntemdir. Burada her bir temel harekete, kompozisyonunu etkileyen faktörlerin bir fonksiyonu olarak yapılan gözlemler sonucunda önceden belirlenmiş standart bir zamanın değeri atanmaktadır. Kronometre ile iş sürelerinin ölçümü; çalışma yöntemlerinin ve ürünlerinin yapılandırılması, sürelerin belirlenmesi, uygulanan yöntemin eğitim için bir dokümantasyon biçimi olarak tanımlanması için uygulanmaktadır [156].

İş sürelerinin ölçümü beş temel harekete dayanmaktadır. Bu hareketler; materyale ulaşmak, kavramak, hareket ettirmek, konumlandırmak ve serbest bırakmak olarak sınıflanmaktadır. Bu temel hareketler Şekil 29'da görülmektedir. Tanımlı olan bu hareketlerin 80% ila 85%'i doğrudan insan kaynaklı işlemler sonucu oluşmaktadır. Bundan dolayı, bir operasyonun süresi çalışandan çalışana değişiklik göstermektedir. İşletmelerin, elde ettiği datalar sonucu bir operasyonun ya da işin tamamlanabilmesi için geçen optimum süreyi bulması ile tanımlı olan operasyona hedef süre konulmasını amaçlamaktadır [156], [157].



Şekil 29 Süre Ölçülürken Dikkat Edilmesi Gereken Beş Temel Hareket [157]

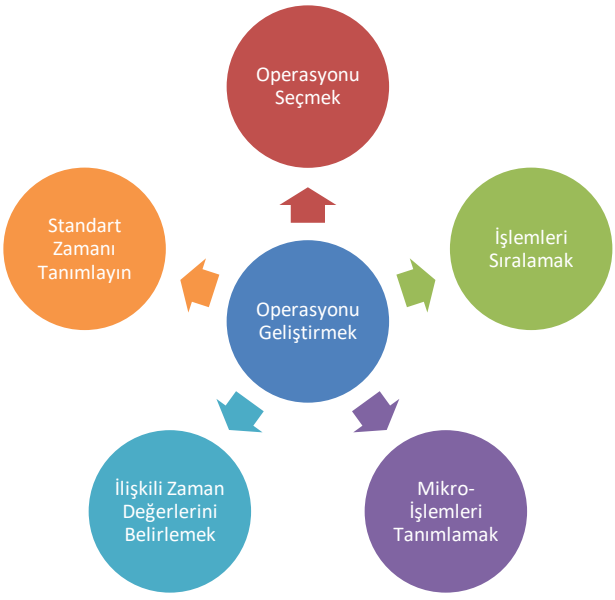
Bu metodolojide uygulanan bazı hareketler aşağıdaki şemada; temel hareketler, hareket sırası ve temel prosesler olarak 3 sınıfa ayrılmaktadır.



Şekil 30 Beş Temel Hareket Verilerinin Gruplandırılması [158]

Bu temel hareketlerin yanı sıra, hareketleri tanımlamak için bazı eylemler kullanılmaktadır. Bu eylemler; basınç uygulamak, ayırmak, döndürmek, vücut hareketleri ve görsel işlevler olarak sınıflanmaktadır. Vücut hareketleri olarak adlandırılan sınıfa; ayak hareketleri, bacak hareketleri, yanal adım, vücut dönüşü, yürüme, eğilme, bükülmüş pozisyondan çıkma, alçaltma, alçaltılmış pozisyondan çıkma, diz çökme, diz çökme pozisyonunu tek diz üzerinde bırakma, oturma gibi vücut pozisyonlarından oluşmaktadır [156], [158], [158].

Sugai'ye göre, iş sürelerinin ölçümü çalışmasının uygulama süreci, sürekli iyileştirme süreci olarak düşünülmeli ve bir iş istasyonunda uygulanması için altı aşamaya ve bir bütün olarak bir şirkette uygulanması için dört aşamada uygulanması gerektiği sırasıyla Şekil 31 ve 32'de ifade edilmektedir [159].



Şekil 31 Kronometre Uygulamasının Sürekli İyileştirme Süreci [159]



Şekil 32 Bir İşletmede İş Sürelerinin Ölçülmesi Uygulamasında Sürekli İyileştirme Süreci [159]

2.4.7.2. GSD Yöntemi

GSD yöntemi, diğer bir adıyla "General Sewing Data" olarak bilinen operasyon sürelerini standardize etmek için kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem, "Methods Workshop Limited" işletmesi tarafından 1978 yılında ilk kez tasarlanmış ve MTM çekirdek verisi kullanılarak "GSD Limited" işletmesi tarafından geliştirilmiştir [160].

GSD yöntemi, dikilmiş ürünler endüstrileri için yöntem analizi ve zaman standartlarının belirlenmesi için kullanılan bir tekniktir [161].

GSD yöntemi, tutarlı, doğru ve anlaşılması kolay, iletişim kurması kolay, yöntem analizi ve zaman standartları belirleme tekniği sağlamak için MTM çekirdek verileri kullanılarak geliştirilmiştir. Özellikle dikilmiş ürünler endüstrileri için tasarlanmış ve bu endüstrilerde geliştirilmiştir [161].

GSD metodu; üretim yöntemlerini, sürelerini ve maliyetlerini ölçmek için bilimsel, etik ve denetlenebilir bir yaklaşım sağlamaktadır. Bu yöntem, bir ürünü oluşturan her bir bileşen için Uluslararası Standart Zamanı doğru ve tutarlı bir şekilde belirlemek için kullanılmaktadır. GSD yöntemi, üretim sürecindeki her adımı veya işlemi belirleme ve ölçme yeteneği sağlamaktadır [162].

GSD yöntemi, uygulama ve anlama kolaylığı için basit alma ve koyma (Get & Put) kodlarına sahip 36 kategoride 7 veri öğesinden oluşmaktadır. Her verinin sabit bir TMU değeri vardır. Sistem içinde dikiş kodu türetme sistemi ve makine süresinin hesaplanmasını kolaylaştırmak için dikiş formülleri de kullanılmaktadır. GSD yönteminin kullanım alanları aşağıda sırasıyla açıklanmaktadır;

1. Farklı işleri gerçekleştirmek için gerekli zamanı bulmak,
2. Yöntemleri değiştirmek ve geliştirmek,
3. İş başlamadan önce yöntemleri değiştirmek ve geliştirmek,
4. Operatörlerin maliyetlerini tahmin etmek,
5. Kronometrelerle ölçülemeyen kısa hareketlerin sürelerini bulmak,
6. Tekrarlayan işler için kullanılmaktadır [161].

GSD yönteminin avantajları ve dezavantajları aşağıda sıralanmaktadır;

Avantajları:

1. Kronometre zaman etüdü yöntemi ile elde edilen yanlış verileri ortadan kaldırır.
2. Bu yöntem kısa döngülü ve tekrarı yüksek operasyonlar için en uygun yöntemdir.
3. Ürünlerin süreleri standardize edildiği için üretim sırasında sürekli takip etmeye gerek bırakmaz.

4. Derecelendirme ortadan kaldırılabilir.
5. Kronometre zaman etüdü yöntemi verilerine kıyasla tutarlı ölçümler üretir.
6. Zaman çalışması yöntemine kıyasla daha az maliyetlidir.
7. Bu yöntem kullanılarak diğer yöntemler karşılaştırılabilir [161].

Dezavantajları:

1. Bu yöntem ile sadece manuel işlemler yapılabilir
2. Bazı işlemlerde zamanı ölçmek için kronometre yönteminin kullanılması gerekmektedir [161].

2.4.7.3. Refa Yöntemi

Refa yöntemi, literatürde "Reichsausschuss für Arbeitszetermittlung" olarak bilinen aynı zamanda "Devlet İş Zamanları Belirleme Komisyonu" olarak da adlandırılan, iş sürelerinin doğru bir şekilde belirlenmesi ve üretimin iyileştirilmesini amaçlayan bir yöntemdir [163].

Günümüzde Refa yöntemi olarak adlandırılan bu yöntem aslında kurumun adıdır. Bu sistemin kapsamı, devlete bağlı olan tüm kurum ve kuruluşların iş etüdünü kapsayacak şekilde genişletilmiştir. İkinci Dünya savaşı sonrasında Almanya'nın bölünmesinden sonra refa kurumu revizyona giderek, 1951 yılında iş etütleri birliği adında federasyon düzeyinde faaliyet göstermiştir [164].

Refa 1929 yılında, tüm operasyonları kapsayan zaman etüdü için yönergeler yayınladı ve rasyonalizasyon yönüne daha fazla yer vermiştir. Bunun sonucunda, kurumsal ve hiyerarşik olarak tanımlanmış olan zaman kaydı, parça başı belirleme ve parça başı ücretlerin hesaplanmasını uyumlu hale getirilmiş, temel işler için zaman standartları belirlenmiş ve iş dağılımı, ofis ve atölyedeki tüm iş süreçlerinin zaman kontrolünü hesaplanabilir ve doğrulanabilir hale getirilmiştir [165].

Refa kurumunun kullanmış olduğu standart zaman ölçüm metodunun mantığı Şekil 33'de görülmektedir.



Şekil 33 Refa Standart Zaman Ölçümü Yönteminin Temel Mekanizması

Refa yönteminde, bir işin tamamlanması için gereken süre belirlenirken hesaplamak için Denklem 10'da yer alan formül kullanılmaktadır. Burada; te: öngörülen zaman, tg: temel zaman, ter: dinlenme zamanı, tv: dağılım zamanıdır [164].

$$(te = tg + ter + \text{tv}) \tag{10}$$

2.4.7.4. Algoritma Bazlı İş Sürelerinin Belirlenmesi

Tekstil, torna ve döküm gibi emek yoğun olan endüstrilerde, iş sürelerinin kronometre gibi analog araçlarla ölçüldüğü ve her operatörün dinamik zaman aralıkları içerisinde operasyonu gerçekleştirmesi birçok soruna sebep olmaktadır [166]. Analog araçlar üzerinden toplanılan iş süreleri, kısıtlı veri içermesi ve ölçümün doğruluk değerinin düşük olması nedeniyle iş sürelerinin doğru tespit edilmesi güçleşmektedir. İş sürelerinin doğru tespit edilmemesi, montaj hattında dar boğazlara, stok problemlerine ve gerçek dışı üretim hedeflerinin koyulması gibi problemlerle sonuçlanmaktadır [167]. Bu alan üzerine yapılan araştırmalar, zaman serilerinin büyük boyutlu dijital veri setleri üzerinden sınıflandırılmasını ve uygun algoritmalar kullanılarak veri madenciliği yapılmasını önermektedir.

Montaj hattında yer alan operasyonların süreleri, makine ve teçhizatlara entegre edilebilen nesnelerin interneti (IoT) sınıfına giren çevrimiçi sensörler yardımıyla ölçülebilmektedir [168]. İş süreleri verileri diğer bir ifadeyle zaman serileri, bulut içerisinde depolanır ve büyük veri elde edilmektedir. Büyük veride yer alan iş süresi değerleri bazı algoritmalar ile analiz edilip, doğru iş süresi aralığına ulaşılmaktadır. Kullanılan algoritmalar 5 kategori altında incelenmektedir.

2.4.7.4.1. Metrik Sınıflandırma

Bu sınıflandırma içerisinde bulunan algoritmalar, iş sürelerinin belirlenmesi için en az iki zaman serisi grubunun ve bir vektörün bulunduğu tüm seri gruplarının kullanılmasıyla iş sürelerinde gerçekleşen zaman aralıkları ölçülmektedir [169]. Bu alanda elastik mesafe ölçüm yöntemleri kullanılarak, zaman serileri arasında meydana gelebilecek minör boyutlu hata içeren zaman aralıklarının, telafi edilmesi üzerine odaklanılmaktadır [170]. Bu sınıflandırma yöntemi, genellikle spektograf alanında tercih edilmektedir. Metrik sınıflandırma alanında DTW, WDTW, TWE, MSM, CID, DD_{DTW} ve DTD_C algoritma modelleri kullanılmaktadır.

2.4.7.4.2. Aralıklı Sınıflandırma

Bu sınıflandırma yönteminde, toplanılan zaman serisi verilerinin tamamının aralıklara bölünmesi yerine, serilerin bir ya da daha fazla aralığı seçilmektedir. Bu alanda kullanılan algoritmalar, veri gruplarını analiz ederken, öznitelik içeren veriler üzerinden çıktılar sağlanmaktadır [171]. Bu alan üzerinde birden fazla aralık seçilerek veya ayırt edici özet ölçütler özellik olarak kullanılarak daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Bu sınıflandırma yöntemi, elektrik cihazları ve hareket yakalama alanında tercih edilmektedir [172]. Aralıklı sınıflandırma alanında TSF, TSBF ve LPS algoritma modelleri kullanılmaktadır.

2.4.7.4.3. Şekil Tabanlı Sınıflandırma

Şekil tabanlı algoritmalar zaman serisi verilerinin tamamı yerine, şekil tabanlı semboller kullanılarak zaman serilerindeki özniteliklerin, çıktı olarak elde edildiği bir yöntemdir [173]. Burada, serileri diğer zaman aralıklarından (sınıflardan) ayıran bir şekil tanımlanır ve şekillerin seri içerisindeki tekrar etme durumu ölçülerek, en çok tekrar eden şekil aralığı iş süresi olarak belirlenmektedir. Bu sınıflandırma yöntemi, EKG gibi tıp alanında ve elektrikli cihazlarda tercih edilmektedir [174]. Şekil tabanlı sınıflandırma alanında FS, ST ve LS algoritma modelleri kullanılmaktadır.

2.4.7.4.4. Sözlük Tabanlı Sınıflandırma

Sözlük tabanlı algoritmalarda iş sürelerini oluşturan zaman aralıkları, tekrarlama sıklığı ile ayırt edilmektedir [175]. Sözlük tabanlı algoritmalar, yinelenen kalıpların frekans sayılarını oluşturur, ardından elde edilen histogramlara dayalı sınıflandırıcılar oluşturmaktadır. Bu sınıflandırma yöntemi, elektrik cihazları, EKG, görüntü okuma, hareket yakalama gibi alanlarda kullanılmaktadır [176]. Sözlük tabanlı sınıflandırma alanında BOP, SAXVSM ve BOSS algoritma modelleri kullanılmaktadır.

2.4.7.4.5. Hibrit Sınıflandırma

Hibrit sınıflandırma; metrik, aralıklı, şekil ve sözlük tabanlı zaman serisi sınıflandırma yaklaşımlarının iki veya daha fazlası tek bir sınıflandırıcı altında birleştirildiği bir model yaklaşımıdır [177]. Bu sınıflandırma yöntemi; sensör okuma, simüle etme, EKG ve hareket yakalama gibi alanlarda kullanılmaktadır. Hibrit sınıflandırma alanında en fazla COTE, EE ve DTW_F (DTWSAX) sınıflandırma algoritmaları tercih edilmektedir [170].

Hibrit sınıflandırma modelleri genellikle sensörlerden elde edilen farklı zaman serisi gruplarını analiz etmek için kullanılan ve diğer model yaklaşımlarına göre daha doğru sonuçların alındığı bir yaklaşımdır. Tablo 4'de problem tipine göre zaman sınıflandırıcı modellerin performansları görülmektedir.

Tablo 4 Zaman Sınıflandırma Modellerinin Problem Tipine Göre Performansları

Problem	COTE (%)	EE (%)	Sözlük (%)	Aralık (%)	Şekilcik (%)	Metrik (%)
Görüntü Okuma	20,69	**24,14**	17,24	0	17,24	20,69
Sensör Okuma	**38,89**	16,67	0	5,56	22,22	16,67
Hareket Yakalama	**35,71**	14,29	21,43	14,29	14,29	0
Spektograf	0	0	0	0	0	**100**
Elektrik Cihazları	0	0	33,33	16,67	**50**	0
EKG	33,33	0	16,67	0	**50**	0
Simüle Etme	**40**	20	20	0	20	0

Tablo 4'de yer alan model performansları incelendiğinde sensör okuma, hareket yakalama ve simüle etme alanlarında en iyi performansı hibrit modeller sergilemiştir. Metrik sınıflandırma modelleri spektograf alanında, şekil tabanlı sınıflandırma modelleri elektrik cihazları ve EKG ölçümlerinde iyi performans sergilemiştir.

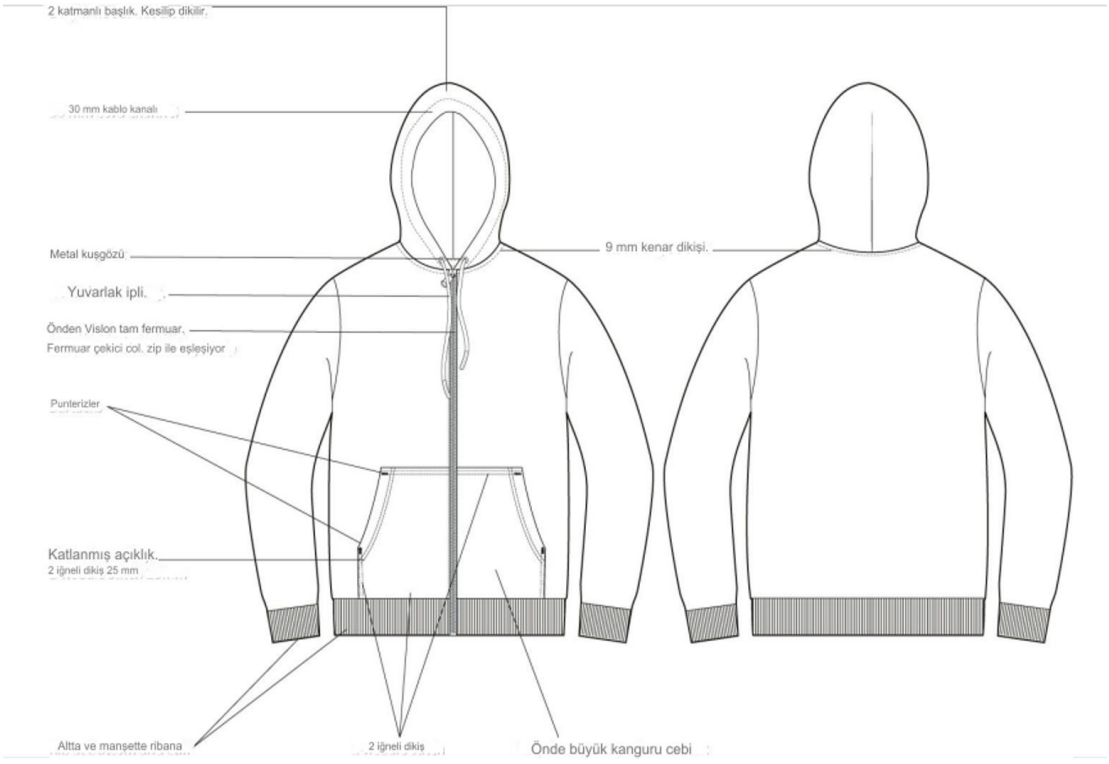
3. DENEYSEL ÇALIŞMA

3.1. Malzeme

Bu bölümde, çalışmanın gerçekleştirildiği montaj hattında üretilen kapüşonlu sweatshirt ürünü, hat üzerinde kullanılan dikiş makineleri, kullanılan yazılım ve dijital panolar hakkında bilgiler ifade edilmektedir.

3.1.1. Kapüşonlu Sweatshirt Ürünü

Çalışma, L beden kapüşonlu sweatshirt ürünü baz alınarak yapıldı. Sweatshirt ürününün, kapüşon kısmı 2 katlıdır ve bu katmanlar kumaşın kesilip dikilmesi ile oluşmaktadır. Kapüşon kısmının uç bölgesinde içeriden 30 mm kapüşon kordon kanalı mevcuttur. Kapüşon kordonu, kapüşonun ön yaka ortasında sağ ve solda yer alan 2 adet metal kuşgözü içerisinden geçmektedir. Ürünün ana bedeninin, ön ortasında "Vislon" kemik fermuar kullanıldı. Bu fermuar tipi, polyasetal hammaddesinin fermuar şeridine enjekte edilmesiyle elde edilmektedir. Üründe kullanılan Vislon fermuar, YKK işletmesinden tedarik edilmektedir. Ana bedenin ön alt kısmında fermuarın sol ve sağ tarafında 2 adet kanguru cebi bulunmaktadır. Kanguru cebinin yan ve üst kısmı çift iğneli dikiş makinesi ile dikildi. Kanguru cebinin ağız kısmı 25 mm aralık bırakılarak çift iğneli dikiş makinesi ile dikildi. Cep ağzının alt ve üst kısmında birer tane punteriz dikişi bulunmaktadır. Kapüşonun etek kısmı ve kol manşetinde ribana kumaş kullanılmaktadır. Kapüşonlu sweatshirt ürününün model teknik çizimi Şekil 34'de görülmektedir.

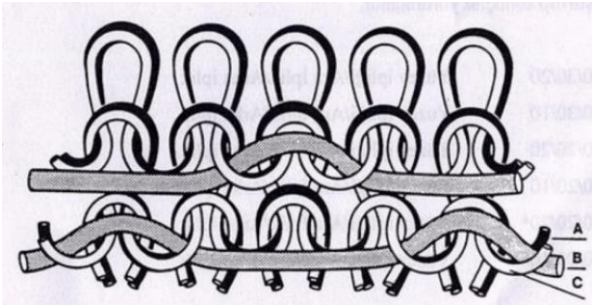


Şekil 34 Kapüşonlu Sweatshirt Ürünün Teknik Çizimi

Kapüşonlu sweatshirt ürününün, kapüşon ve ana bedeninde üç iplik desenli örme kumaş kullanıldı. Üç iplik kumaşın içeriği 65% pamuk, 35% polyesterdir. Kapüşonun etek ve manşet bölümünde kullanılan ribana desen örgülü kumaşın içeriği 70% pamuk, 30% polyesterdir. Üç iplik kumaş, şardonlama işlemi görmüştür ve kumaşın gramajı 320 g/m^2'dir.

Üç iplik örme kumaşında Ne 30/70/10 numaralı iplikler kullanıldı. Bu numaralandırma sisteminde kullanılan sayılar sırasıyla ön iplik, ara iplik ve arka iplik numaralarını ifade etmektedir.

Şekil 35'de üç iplik kumaşın örgü yapısı görülmektedir. Görselde A, B ve C harfleri sırasıyla; ara iplik, arka iplik ve ön iplik olarak adlandırıldı.



Şekil 35 Üç İplik Örgü Yapısı

Çalışmasının gerçekleştirildiği, kapüşonlu sweatshirt ürününün ön ve arka görünümü Şekil 36'da yer almaktadır.



Şekil 36 Çalışmada İncelenen Ürünün Görseli

3.1.2. Dikiş Makineleri

Çalışmanın yapıldığı montaj hattındaki ürün toplam 37 operasyonda tamamlanmaktadır. Burada montaj hattından bağımsız bir şekilde hazırlık işlemleri, iplik temizleme ya da biye kesme gibi el işçilikleri, yan işler, ütü ve paketleme ile birlikte toplam 12 operasyon bulunmaktadır. Montaj hattından bağımsız olarak tanımlanan bu operasyonlar montaj hattından ayrı bir çalışma alanında yapılmaktadır. Yan ve el işçilikleri dışında kalan, aynı zamanda montaj hattı üzerinde ana operasyonlar olarak tanımlanan, toplam 25 makine işi bulunmaktadır. Hat üzerinde bulunan 25 makine işini 23 makineci gerçekleştirmektedir.

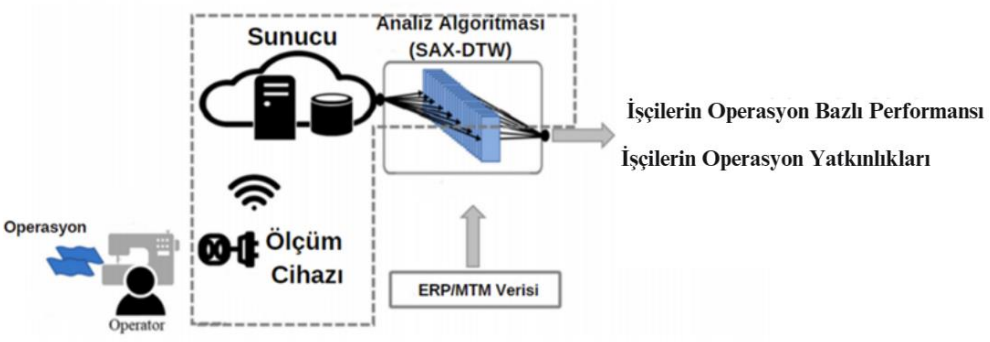
Hat üzerinde; 10 Juki düz dikiş makinesi, 9 Juki overlok dikiş makinesi, 3 Brother reçme dikiş makinesi, 1 Yuki kuş gözü dikiş makinesi, 1 Brother punteriz dikiş makinesi olmak üzere toplam 24 makine bulunmaktadır.

3.1.3. Yazılım

Bu çalışma, Promar Tekstil işletmesinde belirlenmiş bir montaj hattında yapıldı. Montaj hattında bulunan, dikiş makinelerinin baş kısmında bulunan iğne milinin üzerine hareket sensörü entegre edildi. Kullanılan hareket sensörü sayesinde, kumaşa iğnenin girip çıkma süresi ile operatörlerin vardiya boyunca kaç adet ürün diktiğini algoritma tahmin edebilmektedir. Bu yöntem, operatörlerin günlük çalışma süresi üzerinden kaç adet ürün diktiğini ve boş duruşlarını tespit ederek operatörlerin çalışma performansını analiz etmesini sağlamaktadır. Bu yöntemin en önemli avantajı, operatörlerin çalışma süreleri içerisinde operasyonlara yeterliliğini ve operasyonel bazda ürün/zaman performansını en uygun olan çalışanı belirlemesidir. Tespit edilen operasyonel bazda performansı yakın olan çalışanların iş istasyonuna atanması ile hat dengesinin sağlanması amaçlanmaktadır.

Bu çalışmada, elde edilen verileri analiz etmek için DTW (Dynamic Time Warping/Dinamik Zaman Çarpıtma) ve SAX (Symbolic Aggregate Approximation/Sembolik Toplam Yaklaşımı) hibrit yazılım modeli kullanıldı. Yazılımda, her bir çalışanın tanımlı olduğu operasyondaki süreler, buluta kaydedilmektedir. Ardından hat üzerinde bulunan iş istasyonlarına yapılacak olan operatör ataması için veri analizi yapılarak, çalışanların operasyon bazlı verimlilikleri göz önünde bulundurularak operatör ataması gerçekleştirilmektedir.

Analiz aşamasında ERP/MTM verileri hem çalışma sahası içerisinden hem de kayıtlı yazılım içerisinde değerlendirilmeye dahil edilmektedir. Bu sistemde ERP/MTM verileri, hareket sensörünün tespit ettiği operatör verilerinin desteklenmesi için kullanılmaktadır. Bu verilerin desteklenmesi ile herhangi bir iş istasyonuna atanacak olan operatörün olası adaylar arasında en iyi olmasının yanı sıra ERP/MTM verileri kullanılarak, DTW-SAX yazılımının tespit ettiği operasyon süreleriyle kıyaslama yapılmasını sağlamaktadır. Bu nedenlerden dolayı ERP/MTM verilerinin bir kontrol mekanizması olarak kullanıldığı söylenebilmektedir.



Şekil 37 Üretim Sahasından Veri Toplama ve Çalışanların Performansının Analiz Edilmesi

Şekil 37'de görüldüğü üzere sunucuda depolanan büyük boyutlu veriler, DTW yazılımı vasıtasıyla veri madenciliği yapılmaktadır. DTW yazılımı, büyük boyutlu veriler üzerinden veri madenciliği yaparak büyük veride bulunan "anlam ifade etmeyen" verileri ayıklayarak büyük veriyi daraltmaktadır. Bu işlemin yapılmasının nedeni, anlamlı veri grupları üzerinden analiz yapılmasının doğru çıktılar verme olasılığının daha yüksek olmasıdır. Burada DTW yazılımının, büyük veriden çıkardığı "anlamsız" olarak adlandırılan verilere örnek olarak; operatör çalıştığı esnada model değişimine gidildiğinde veya aynı ürünün

farklı bedenine geçiş yapıldığı zaman alınan verilerde farklılıklar olmaktadır. Bu gibi durumlarda, DTW yazılımı önceki verilerden farklı sonuçları üst üste gördüğünde, ilk alınan 15-20 iş süresinin ağırlıklı ortalamasını alarak operatörün farklı bir bedene ya da modele geçtiğini tahmin etmektedir. Burada ilk alınan 15-20 veri, değerlendirilmeye dahil edilmeyip yazılım tarafından silinmektedir. Örneğin; operatörün molaya çıktığı, herhangi bir sebepten iş yapmadığı ve makinenin bakımı vb. esnasındaki duruşlar yazılım tarafından ayıklanmaktadır.

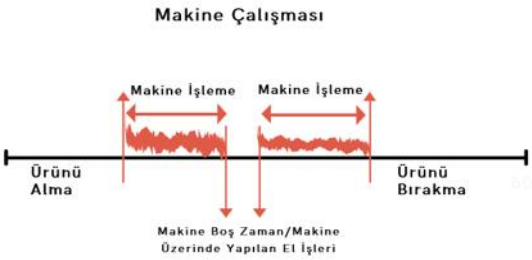
Montaj hattı üzerinde tanımlı olan her bir operasyondan hareket sensörü vasıtasıyla toplanılan ve ardından DTW ile aykırı değerlerin cezalandırılmasından sonra veri setinden doğru aralığı bulmak için SAX yazılım kullanılmaktadır. Burada veri seti üzerinde bulunan her bir ayrı zaman aralığına (operasyon süresi) farklı bir sembol/şekilcik atanmaktadır. Bu atanan şekilcikler ile bir histogram grafiği oluşturulur ve seri üzerinde zaman aralıklarının tekrarlaması ile atanan şekilciklerin grafikte değeri yükselmektedir. Serinin analizi sonucunda en fazla tekrarı alan şekilciğin, zaman aralığı operatörün operasyon süresini/performansını belirtmektedir. SAX yazılımının kullanılmasıyla, anormallik algılama, kümeleme ve gelecek tahmini gibi işlemler gerçekleştirmektedir.

Anormallik algılamada, zaman serisi verileriyle garip veya anormal kalıpları bulmak için benzerlik araması kullanılmaktadır. Yeni bir zaman serisini bir referans zaman serisi üzerinden karşılaştırarak bir anormallik önerebilecek varyasyonlar bulmak mümkündür. Bu referans verileri, ERP/MTM verileri ile desteklenmektedir.

Hareket sensörleri sayesinde, operatörün çalışma esnasında ne kadar duruş yaptığı, malzemeyi eline alıp makineye yerleştirirken ve dikmiş olduğu ürünü alıp makinenin diğer tarafına iletirken harcamış olduğu süre analiz edilerek detaylı iş etüdü yapılmaktadır.

Bu etüt sırasında elde edilen detaylı veriler ile operasyonların, iş yeri düzeninin incelenmesi ve gerekli değişikliklerin yapılması mümkün olmaktadır. Böylece, çalışanın işini yaparken hangi noktalarda gereksiz işlem yaptığı, hangi işlemlerin birleştirilmesi ya da değiştirilmesi gerektiği tespit edilebilmektedir. Örneğin yerleşme düzeninde çalışan solak ise ve malzeme akışı sağ taraftan geliyorsa bu çalışan için ekstra süre kaybı anlamına gelmektedir. Bu tarz durumlarda ya malzeme akış yönü değiştirilir ya da iş istasyonunun çalışana göre doğru bir noktada pozisyon olması sağlanabilmektedir. Şekil 38'deki çalışma çizelgesinde, operatörlerin makine üzerinde etkin çalıştığı anlar kırmızı renkle ifade edildi ve belirtilen süre temsilidir. Çizelgede, el işi olarak adlandırılan bölümler, operatörün malzemeyi alıp makineye yerleştirme ve dikimi bitmiş ürünün makineden alınma durumunu ifade etmektedir.





Şekil 38 Operatörün Makineyi Etkin Çalıştırma Çizelgesi

3.1.4. Dijital Pano

Hareket sensörü vasıtasıyla operatörlerin çalışma esnasındaki verileri eş zamanlı olarak dijital sayaç olarak işlev gören panolara aktarılmaktadır. Dijital panoların üzerinde; operatörlerin kişisel bilgileri, üretim miktarları, hedefleri, duruşları ve verimleri bulunmaktadır. Her bir operatör kendi üzerine tanımlı olduğu karta sahiptir. Bu kartların panolara okutulması sırasında, Şekil 39'da görüldüğü gibi çalışan hakkındaki vardiyalık veriler pano üzerine aktarılmaktadır.

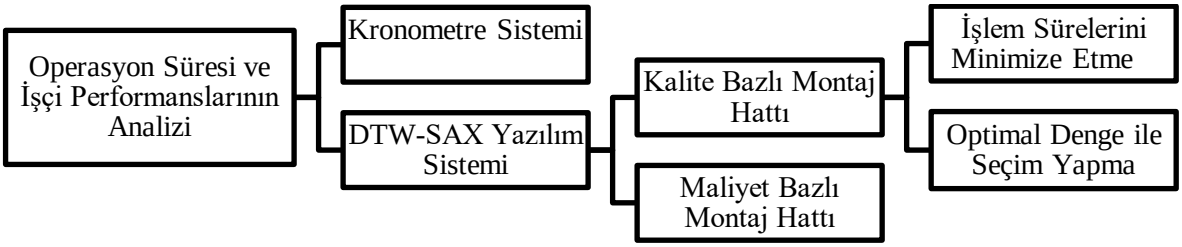


Şekil 39 Her İş İstasyonunda Bulunan Dijital Pano

Hareket sensörlerindeki veri akışı Wi-Fi ile yapılmaktadır. Çalışma esnasında internet kesilirse, veri akışı anlık olarak kesilmektedir. Ancak operatör verileri, iş istasyonunda bulunan dijital panolara kaydedilmektedir. İnternet bağlantısı tekrar sağlandığında zaman dijital panolara kaydedilen veriler yeniden sisteme aktarılmaktadır.

3.2. Yöntem

Bu çalışma, Promar Tekstil işletmesinde kapüşonlu sweatshirt üretimi yapılan montaj hattında gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, makine öğrenimi yöntemi (DTW-SAX yazılımı) kullanılarak montaj hattı dengelenmiş ve işletmenin önceden kullandığı kronometre sistemi ile arasında kıyaslama yapıldı. Kıyaslanan 2 sistem, Şekil 40'de ifade edilmektedir.



Şekil 40 A İşletmesinde Süre, Performans ve Hat Kurulumu Analiz Yöntemleri

Kronometre sisteminde, operasyonu gerçekleştiren operatörlerin süreleri belirli sıklıklarda 10-15 tekrar yapılarak mühendisler tarafından tespit edilmektedir. Tespit edilen sürelere, tolerans payı (10%) eklenerek operasyon sürelerine ulaşılmaktadır.

DTW-SAX yazılımında, operasyonu gerçekleştiren operatörlerin süreleri çalışma boyunca, dikiş makinesine entegre edilmiş hareket sensörü vasıtasıyla takip edilmektedir. Burada yazılım, operatörün kumaşı alma-bırakma, makine üzerinde işleme ve makinede geçen boş sürelerini ayrı ayrı gruplandırarak süreleri ve operatörün performansını tespit etmektedir. DTW-SAX yazılımında, kalite ve maliyet bazlı olmak üzere 2 farklı montaj hattı kurulumu bulunmaktadır. İşletme, kâr marjı yüksek veya üst segment ürünler için kalite bazlı montaj hattını seçmektedir. Kalite bazlı montaj hatları da işlem sürelerini minimize etme ve optimal denge ile seçim yapma olmak üzere 2 farklı kurulum içermektedir. İşlem sürelerini minimize etme seçeneğinde, hat üzerine işletmedeki en yüksek performans gösteren operatörler atanmaktadır. Optimal denge ile seçim yapma seçeneğinde, hat üzerine performansı yüksek aynı zamanda diğer operatörlere yakın operatörler atanmaktadır. İşletme kâr marjı düşük ve alt-orta segment ürünler için maliyet bazlı montaj hattını seçmektedir. Yazılımda, 2 farklı hat kurulumu mümkün olduğu için işletme tüm çalışanlarından verim alabilmektedir.

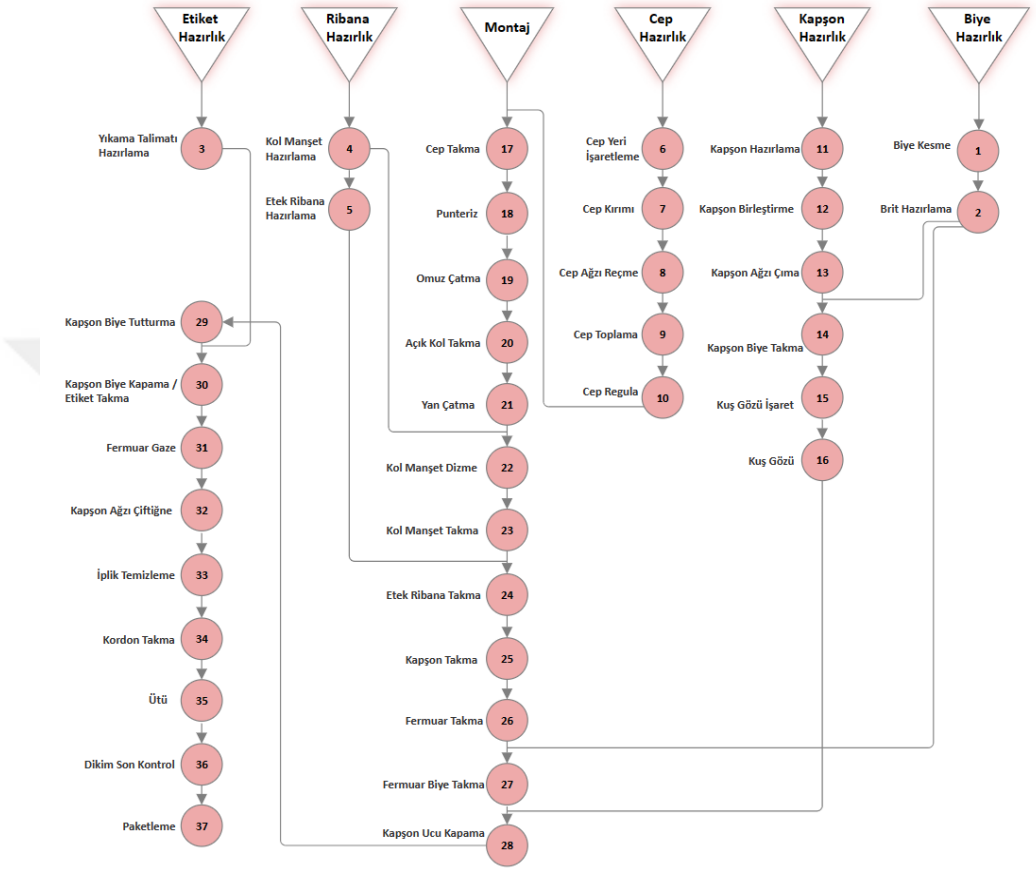
Kalite ve maliyet bazlı montaj hatlarında dengenin sağlanabilmesi için benzer performans sergileyen operatörler yazılım tarafından seçilerek hatta atanmaktadır. Burada, kalite bazlı hatlarda performansı yüksek çalışanlar görev aldığı için daha fazla ürün çıktısı ve hata sayısı az çıkarken, maliyet bazlı hatlarda düşük performans gösteren operatörler görev aldığından dolayı daha az ürün çıktısı ve hata sayısı daha yüksek elde edilir.

DTW-SAX yazılımının kullanıldığı sistemde, montaj hattı dengelemesi için ilk adım olarak operasyon süreleri ve operatör performansları analizi edilir. Ardından yazılım sistemi, montaj hattının yerleşimini ve malzeme akış yönünü belirler. Montaj hattı kurulumu yapıldıktan sonra hat üzerine operatör atması yapılır ve ortak operasyonlar belirlenir.

Yazılım hattın dengesine, en uzun sürede gerçekleşen operasyonun süresiyle hat üzerinde çevrim süresinin oranlanmasıyla ulaşılır. Burada operatörlerin performans değerleri de çevrim süresi baz alınarak ölçülmektedir.

Çalışmanın gerçekleştirildiği montaj hattında yapılan üründe; 25 makine işi, 12 el işçiliği ve yan işler ile toplam 37 operasyondan oluşmaktadır. Kapüşonlu sweatshirt ürününün ilk operasyondan son operasyona kadar dikim hattında toplam 31 operatör çalışmaktadır. Promar Tekstil işletmesinde, günlük net çalışma süresi 480 dakikadır. Çalışmada yapılan hesaplamalar net süre üzerinden yapıldı.

Kapüşonlu sweatshirt ürününün iş akışında, operasyonların sırası daireler içerisinde sayılar ile ifade edilmektedir. Burada ilk operasyon 1 rakamı ile başlayıp, 37 sayılı operasyon ile bitmektedir. Bu iş akışında ek olarak, malzeme akış yönüde belirtilmektedir. Malzeme akış yönüne örnek olarak; biye hazırlık işlemi tamamlandıktan sonra biyeler, kapüşon biye ve fermuar biye takma operasyonuna beslenmektedir. Üretim işlem akışı, bu çalışmada kıyaslanan her 2 sistemde de operasyon sırası aynıdır.

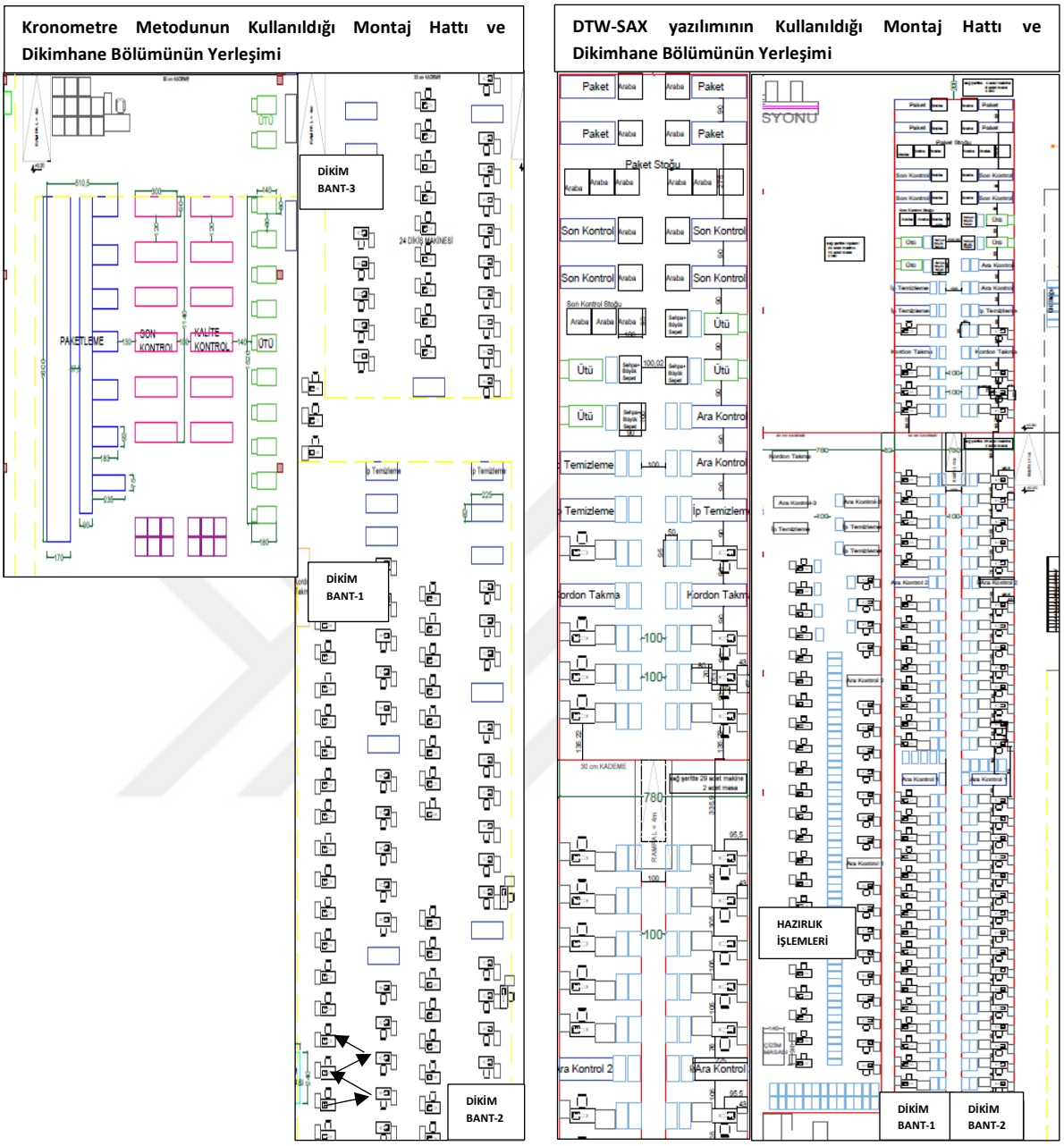


Şekil 41 Kapüşonlu Sweatshirt Ürününün İş Akış Diyagramı

Kronometre metodunun kullanıldığı sistemde "Z tipi" paralel montaj hattı yerleşimi kullanıldı. Bu sistemde işlemden geçen ürünler, taşıma amaçlı kullanılan ürün arabalarına yüklendikten sonra Z şeklinde ilerlemektedir. DTW-SAX yazılımının kullanıldığı sistemde, operatörlerin süreleri ve performanslarının ölçülmesinin yanı sıra hattın yerleşiminin ve malzeme akış yönünün nasıl olması gerektiğini de tespit etmektedir. Yazılım montaj hattına yaptığı operatör ve makine atamalarını değerlendirerek, I tipi montaj hattını önerdi. I tipi montaj hattı yerleşiminde, ürün taşıma arabaları düz bir şekilde hattı takip ederek ilerledi.

Kronometre metodunun kullanıldığı sistemde, ütü-kalite kontrol ve paketleme bölümleri montaj hattından uzak bir alanda konumlandırıldığı için üretim aşamaları tamamlanmış ürünlerin ütü-kalite kontrol ve paketleme bölümüne transfer edilmesinin zaman sarfiyatını artırdığı gözlemlenmiştir. Yazılımın kullanıldığı sistemde, ütü-kalite kontrol ve paketleme bölümü, montaj hattına yakın bir alanda konumlandırıldığı için hattan çıkan tamamlanmış ürünler doğrudan bu operasyonlarda işlem görerek harcanan zaman sarfiyatı önlendi.

Burada montaj hattının, kronometre sistemi ve yazılımının kullanıldığı sistem Şekil 42'de yer almaktadır.



Şekil 42 Promar Tekstil İşletmesinin 2 Ayrı Sistemde Dikimhane ve Montaj Hatlarının Yerleşimi

3.3. Kronometre Metodunun Kullanıldığı Sistem

Bu sistemde, operasyonlara hedef süre ataması, montaj hattının dengelenmesi, hattın verimliliği, montaj hattında bulunan iş istasyonlarına operatör atama işlemini, bir vardiyada montaj hattından çıkacak ürün sayısının hedeflenmesi ve çevrim süresi işletme bünyesinde çalışan mühendisler tarafından yapılmaktadır.

Kronometre metodunun kullanıldığı sistemde, operasyonların sıralaması, belirlenen hedef süreler ve operasyonların gerçekleşme süreleri hakkında veriler Tablo 5'de yer almaktadır. Burada, her bir operasyon süresine 10% tolerans (dinlenme payı) eklendi.

Tablo 5 İncelenen Ürünün Eski Sistemdeki Operasyon Verileri

Aşamalar	Sıra	Operasyonlar	Makine	Hedef Süre (sn)	Gerçekleşen Süre (sn)	Süre Bazlı Verimlilik (%)
Ribana ve Diğer İşler	1	Biye Kesme	El İşçiliği	6	9	65
	2	Brit Hazırlama	Düz Dikiş	8	18	44
	3	Yıkama Talimatı Hazırlama	Düz Dikiş	18	22	82
	4	Kol Manşet Hazırlama	Düz Dikiş	36	56	64
	5	Etek Ribana Hazırlama	Düz Dikiş	18	30	60
Cep Hazırlık	6	Cep Yeri İşaretleme	El İşçiliği	18	28	63
	7	Cep Kırımı	Ütü	28	40	71
	8	Cep Ağzı Reçme	Reçme	15	25	61
	9	Cep Toplama	El İşçiliği	6	10	60
	10	Cep Regula	Overlok	12	18	65
Kapüşon Hazırlık	11	Kapüşon Hazırlama	Overlok	30	56	53
	12	Kapüşon Birleştirme	Overlok	18	34	53
	13	Kapüşon Ağzı Çıma	Düz Dikiş	18	29	61
	14	Kapüşon Biye Takma	Reçme	15	27	55
	15	Kuş Gözü İşaret	Kuş Gözü	15	31	49
Montaj İşlemleri	16	Kuş Gözü	Kuş Gözü	22	44	49
	17	Cep Takma	Düz Dikiş	40	54	73
	18	Punteriz	Punteriz	39	62	63
	19	Omuz Çatma	Overlok	24	43	56
	20	Açık Kol Takma	Overlok	28	50	56
	21	Yan Çatma	Overlok	51	65	79
	22	Kol Manşet Dizme	El İşçiliği	6	11	57
	23	Kol Manşet Takma	Overlok	42	56	75
	24	Etek Ribana Takma	Overlok	45	57	79
	25	Kapüşon Takma	Overlok	66	99	66
	26	Fermuar Takma	Düz Dikiş	90	112	80
	27	Fermuar Biye Takma	Reçme	30	39	78
	28	Kapüşon Ucu Kapama	Düz Dikiş	39	60	65
	29	Kapüşon Biye Tutturma	Düz Dikiş	40	49	82
	30	Kapüşon Biye Kapama/Etiket Takma	Düz Dikiş	60	81	74
	31	Fermuar Gaze	Düz Dikiş	60	83	72
	32	Kapüşon Ağzı Çift İğne	Düz Dikiş	32	39	82
Dikim Sonu Yapılan İşler	33	İplik Temizleme	El İşçiliği	75	110	68
	34	Kordon Takma	El İşçiliği	18	30	60
	35	Ütü	Ütü	37	54	68
	36	Dikim Son Kontrol	El İşçiliği	72	98	73
	37	Paketleme	El İşçiliği	31	48	64
		Toplam Süre		1208	1777	68

Yukarıda yer alan Tablo 5'de, kronometre metoduyla çalışılan sistemden alınan operasyon verileri görülmektedir. Burada her bir operasyon kronometre metodu kullanılarak, ilgili operasyonda en deneyimli çalışanın operasyon süresi baz alınmaktadır. Seçilen çalışan, ilgili operasyonu makine ya da el işini belirli bir sayıda tekrarladığı esnada yapılan tekrarların süreleri, mühendisler tarafından kronometre tutulmaktadır. Burada kronometre ile süre tayin edilirken, operasyonu gerçekleştiren çalışanın her bir hareketi ayrı ayrı incelenmektedir. Süreler belirlendikten sonra çalışanın operasyonu yaparken yaptığı hareketler videoya alınarak kaydedilir. Bu işlem ile operasyonun ilgili hareketleri ve harcanan süre standartlaştırılmış olmakta ve işletmenin veri bankasında depolanmaktadır.

Geleneksel metot olarak tanımlanan bu yöntem, günümüzde birçok işletme tarafından kullanılmaktadır. Her yöntemin avantaj ve dezavantaj yönleri olduğu gibi bu yönteminde negatif yönleri bulunmaktadır. Burada işletmeyi olumsuz olarak etkileyecek nokta ise hedef sürelerin doğru bir şekilde tayin edilememesi olasılığıdır. Yukarıda anlatıldığı gibi işletmeler genellikle en tecrübeli çalışan üzerinden bu süreyi tayin etmektedir. Belirlenen hedef süreleri, tecrübesi az olan çalışanların gerçekleştirebilmesi mümkün değildir. Bu sebeple, günlük üretim hedefleri hesaplanırken, bu hedef süre baz alınırsa, montaj hattından hedeflenen ürün adedi ile karşılaşamama olasılığı yüksek olacaktır. İşletmeler, hedef üretim adetlerini tutturamadığı takdirde, siparişlerin müşterilere teslim süreci uzayacak ve bu durumdan negatif etkilenebilecektir.

Bu çalışmada operatörlerin performansının analiz edildiği veriler, makinenin iğne milinde bulunan hareket sensörü üzerinden alındığı için hat dengeleme ve hatta operatör ataması, makinelerin bulunduğu iş istasyonları üzerinden yapılacaktır. Tablo 6'da makine işleri sırasıyla yer almaktadır. Burada aynı renkle ifade edilen operasyonlar, ortak operasyon olarak görev almaktadır.

Tablo 6 Montaj Hattı Üzerinde Yapılan Makine İşlerinin Hedef ve Gerçekleşen Süreleri

Sıra	Operasyonlar	Kişi	Makine	Hedef Süre	Gerçekleşen Süre	Süre Bazlı Verimlilik (%)
1	Kol Manşet Hazırlama	1	Düz Dikiş	36	56	64
2	Etek Ribana	0,5	Düz Dikiş	18	30	60
3	Cep Ağzı Reçme	0,5	Reçme	15	25	60
4	Cep Regula	0,5	Overlok	12	22	55
5	Cep Takma	1	Düz Dikiş	40	54	74
6	Punteriz	1	Punteriz	39	60	65
7	Kapüşon Hazırlık	1	Overlok	30	56	54
8	Kapüşon Birleştirme	0,5	Overlok	18	34	53
9	Kapüşon Ağzı Çıma	0,5	Düz Dikiş	18	29	62
10	Kapüşon Biye Takma	0,5	Reçme	15	27	56
11	Kuş Gözü İşaret	0,5	Kuş Gözü	15	31	48
12	Kuş Gözü	0,5		22	36	61
13	Omuz Çatma	1	Overlok	24	43	56
14	Açık Kol Takma	1	Overlok	28	50	56
15	Yan Çatma	1	Overlok	51	65	78
16	Kol Manşet Takma	1	Overlok	42	56	75
17	Etek Ribana Takma	1	Overlok	45	57	79
18	Kapüşon Takma	1,5	Overlok	66	99	67
19	Fermuar Takma	2	Düz Dikiş	90	112	80
20	Fermuar Biye Takma	1	Reçme	30	47	64
21	Kapüşon Ucu Kapama	1	Düz Dikiş	39	60	65
22	Kapüşon Biye Tutturma	1	Düz Dikiş	40	49	82
23	Kapüşon Biye Kapama-Etiket	1	Düz Dikiş	60	71	85
24	Fermuar Gaze	1,5	Düz Dikiş	60	83	72
25	Kapüşon Ağzı Çift İğne	1	Düz Dikiş	32	47	68
	Toplam	**23**		**885**	**1299**	**68**

Promar Tekstil işletmesi, kronometre metodu sisteminde çalıştığı süreçte, operasyon hedef sürelerini etüt uzmanlarının yaptığı ölçümler ile belirlemiştir. Tablo 6'da çalışmanın yapıldığı montaj hattında ürünün, makine işlemlerinden geçen operasyonlarının hedef süreleri ve gerçekleşen süreler verildi. Tablo 6'da verilen montaj hattında toplam 23 makineci olduğu görülmektedir.

Tablo 6'daki verilere göre, montaj hattında tanımlı olan operasyonların gerçekleştirme süresinin, hedef sürenin oldukça üzerinde olduğu görülmektedir. Hat üzerinde tanımlı olan 25 makine işinin hedef sürelerinin toplamı 885 sn iken, bu operasyonların gerçekleşme süresi 1299 sn'yi almaktadır. Buradan hedef sürenin doğru tayin edilmediği anlaşılmaktadır. Bu iki farklı değere göre vardiyalık ve saatlik üretim hedefi hesabı yapılacak olursa;

Promar Tekstil işletmesinde, net çalışma süresi 28800 saniyedir ve yapılan hesaplamalar bu süre üzerinden yapıldı. Vardiya ve saatlik üretim adetleri Denklem 11 ve 12'de yer alan eşitlikler üzerinden hesaplandı [178]. Bulanan değerler, Tablo 7'de özetlenmiştir.

$$\text{Vardiyalık Ürün Adeti} = \frac{\text{Vardiya Süresi} \times \text{Hat Üzerinde Çalışan Operatör Sayısı}}{\text{Operasyonların Toplam Süresi}} \quad (11)$$

$$\text{Saatlik Ürün Adeti} = \frac{\text{Vardiyalık Hesaplanan Ürün Adeti}}{\text{Çalışma Süresi}} \quad (12)$$

Gerçekleşen süre üzerinden yapılan vardiya ve saatlik üretim adeti hedefi;

$$Vardiyalık\ \text{Ürün}\ Adeti = \frac{28800 \times 23}{1299} = 510\ adet \quad (11)$$

$$\text{Saatlik Ürün Adeti} = \frac{510}{8} = 63\ adet \quad (12)$$

Tablo 7 Gerçekleşen Süre Üzerinden Vardiya/Saatlik Üretim Adeti Kıyaslaması

Hedefler	**Hedef Süre Üzerinden Hesaplanan Ürün Adeti**	**Gerçekleşen Süre Üzerinden Hesaplanan Ürün Adeti**
Vardiyalık Hedef	748 adet	510 adet
Saatlik Hedef	93 adet	63 adet

Tablo 7'de görüldüğü gibi gerçekleşen süre üzerinden yapılan günlük/vardiyalık üretim adeti hesaplandığı zaman, montaj hattından vardiyalık 510 adet ürün çıkacağı sonucuna ulaşıldı. Burada işletme vardiyalık üretim adetini belirlerken, gerçekleşen süreler üzerinden belirlemektedir. Bunun sebebi, hedef süreler ve gerçekleşen süreler arasındaki süre farkının fazla olmasıdır. Tablo 6'de yer alan hedef sürelerde operasyonların gerçekleştirmesi durumunda, montaj hattından vardiyalık 748 adet ürün çıkması beklenir. Ancak, gerçekleşen süreler üzerinden vardiya üretim miktarı 510 olması beklenmektedir.

Gerçekleşen süre üzerinden hesaplanan vardiyalık üretim adeti 510 olarak hesaplandı, ancak gerçekte montaj hattından vardiyalık 425 ürün çıkmaktadır. Montaj hattından çıkan ürün adetinin, hedef süreden düşük çıkması operasyonların çevrim süresine bağlı bir durumdur. Eğer operasyonlar üzerinde gerçekleşen süre, çevrim süresinden yüksek ise bu durum, montaj hattından çıkacak ürün adetini düşürmektedir. Bu sebepten dolayı, çevrim süresinin altında olan bazı operasyonlarda çalışan operatörler çevrim süresini aşan operasyonlara yardım ederek, montaj hattının dengesini sağlamaktadır.

Aynı zamanda, montaj hattında dar boğaz oluşumu, makine arızası, ürünlerde hata gerçekleşmesi ya da operatörler üzerinden çıkabilecek herhangi bir problem, üretim miktarını etkileyebilmektedir.

Tablo 6'da yer alan 25 makine işine ek olarak 12 yan ve el işçilikleri ile birlikte hat üzerinde toplam 37 operasyon bulunmaktadır. Bu çalışmada, yan / el işçilikleri çevrim süresinin altında olduğu ve operasyonlarında makine kullanmadıklarından dolayı sistem üzerinden veri alınamadığı için montaj hattı dengeleme çalışmasına dahil edilmemiştir. Buna göre ürünün çevrim süresi Denklem 13'de yer alan eşitlik ile ifade edilmektedir [179].

$$İncelenen\ \text{Ürünün}\ Ç.S = \frac{Vardiya\ Süresi\ (sn)}{Montaj\ Hattından\ Çıkan\ \text{Ürün}\ Adeti} = \frac{28800}{510} = 56{,}48\ sn = 0{,}94\ dk \quad (13)$$

Montaj hattında bulunan, hazırlık işlemleri tamamlandıktan ve mevcut iş istasyonlarına malzeme beslendikten sonra her 56,48 saniyede bir kapüşonlu sweatshirt ürününün montaj hattından üretildiği hesaplandı.

3.3.1. Kronometre Metodu ile Montaj Hattı Dengeleme

Montaj hattından çıkacak ürün adeti, iş istasyonlarında tanımlı olan operasyonların işlem sürelerine bağlıdır. Tablo 8'de montaj hattı üzerinde faaliyet gösteren makine işlerinin; işlem süreleri, operasyon başına düşen operatör sayıları ve operasyon adetleri yer almaktadır.

Aşağıdaki Tablo 8'de, aynı renkler ile ifade edilen operasyonlar aynı operatörün yaptığı veya yardım ettiği operasyonları kapsamaktadır. Burada, kırmızı renk ile ifade edilen etek ribana operasyonunun çalışanı, kendi işini tamamladıktan sonra fermuar gaze operasyonu çalışanına yardım etmektedir. Sarı renk ile belirtilen, cep ağzı reçme ve cep regula işlemi aynı operatör tarafından gerçekleştirilmektedir. Mavi renk ile ifade edilen, kapüşon birleştirme operasyonunun çalışanı, kendi işini tamamladıktan sonra kapüşon takma operasyonu çalışanına yardım etmektedir. Yeşil renk ile ifade edilen, kapüşon ağzı çıma ve kapüşon biye takma işlemi aynı operatör tarafından gerçekleştirilmektedir. Mor renk ile belirtilen, kuş gözü işaretleme ve kuş gözü işlemi aynı operatör tarafından gerçekleştirilmektedir.

Tablo 8'de, yukarıdaki paragrafta ifade edildiği gibi hat üzerinde kendi işini tamamlayıp, başka bir operasyona yardıma giden çalışanlar ya da 2 ayrı operasyonu yapan operatörler bulunmaktadır. Burada 2 ayrı operasyonu tek başına yapan operatörlerin, operasyon bazında operatör sayısı yarım (0,5) olarak değerlendirmeye alındı. Örneğin; cep ağzı reçme ve cep regula işlemini gerçekleştiren operatör, cep regula işleminde yarım (0,5), cep ağzı reçme işleminde de yarım (0,5) operatör olarak hesaplamaya dahil edildi.

Başka bir durum olarak, 2 ayrı operasyonu yapan ve kendi işini tamamlayıp diğer operasyona yardıma giden operatörler de vardır. Burada kendi işini tamamladığı operasyonun operatör sayısı yarım (0,5), yardıma gittiği operasyonda 1,5 operatör olarak değerlendirilmektedir. Bu duruma örnek olarak; kapüşon birleştirme operasyonunu gerçekleştiren çalışan, hedef üretim adetini tamamladıktan sonra kapüşon takma operasyonunu yapan operatöre yardım etmektedir. Burada kapüşon birleştirme operasyonunu yarım (0,5) operatör, kapüşon takma operasyonu da 1,5 operatör olarak değerlendirilmektedir.

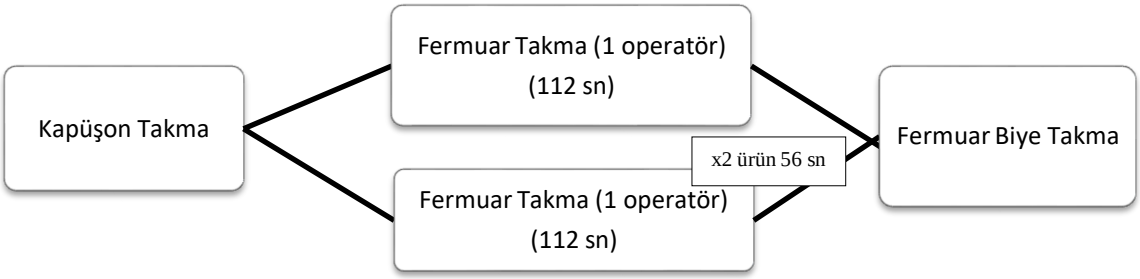
Tablo 8 Kronometre Metodu Üzerinden Belirlenen Süreler Üzerinden Hat Dengeleme İşlemi

Sıra	Operasyon	Gerçekleşen Süre (sn)	Operatör sayısı	Operatör Başına Düşen O.S.	Ç.S. Arasındaki Süre Farkı	Operasyon Adeti
1	Kol Manşet Hazırlama	56	1	56	0	570
2	Etek Ribana Hazırlama	30	0,5	60	-4	550
3	Cep Ağzı Reçme	25	0,5	50	6	480
4	Cep Regula	22	0,5	44	12	700
5	Cep Takma	54	1	54	2	552
6	Punteriz	60	1	60	-4	476
7	Omuz Çatma	43	1	43	13	484
8	Açık Kol Takma	50	1	50	6	484
9	Yan Çatma	65	1	65	-9	450
10	Fermuar Takma	112	2	56	0	440
11	Fermuar Biye Takma	47	1	47	9	452
12	Fermuar Gaze	83	1,5	55	1	445
13	Kapüşon Hazırlık	56	1	56	0	482
14	Kapüşon Birleştirme	34	0,5	68	-12	582
15	Kapüşon Ağzı Çıma	29	0,5	58	-2	482
16	Kapüşon Biye Takma	27	0,5	54	2	482
17	Kuş Gözü İşaret	31	0,5	62	-6	445
18	Kuş Gözü	36	0,5	72	-16	445
19	Kapüşon Takma	99	1,5	66	-10	440
20	Kapüşon Ucu Kapama	60	1	60	-4	440
21	Kapüşon Biye Tutturma	52	1	52	7	440
22	Kapüşon Biye Kapama-Etiket	68	1	68	-12	425
23	Kapüşon Ağzı Çift İğne	47	1	47	9	425
24	Etek Ribana Takma	57	1	57	-1	425
25	Kol Manşet Takma	56	1	56	0	425

Promar Tekstil işletmesinde gerçekleşen süreler üzerinde hedeflediği, vardiyalık ürün adeti 510 adet olarak hesaplandı. Toplam net çalışma süresi, hedeflenen ürün adetine oranlandığında, 1 ürün için 56,48 sn çevrim süresine ulaşıldı. Çevrim süresi, 3-dikim montaj hattından her 56,48 sn'de bir adet ürün çıkması gerektiği anlamına gelmektedir. Bu sebepten dolayı operasyon sürelerinin, çevrim süresini aşmaması istenmektedir. Tablo 8'de gerçekleşen sürelere bakıldığında, bazı operasyonların çevrim süresini aştığı görülmektedir.

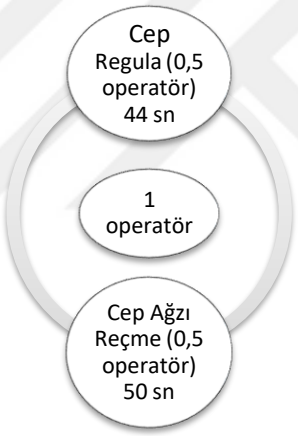
Bu durumda işletme bünyesinde çalışan mühendisler, çevrim süresinden düşük olan operasyonlarda çalışan operatörleri, vardiyalık üretim hedeflerini tamamladıktan sonra operatörlerin, beceri ve makine yatkınlıklarını hesaba katarak, çevrim süresini aşan operasyonlara yardım etmeleri için görevlendirmektedirler. Çevrim süresi odaklı, operatörlerin görev dağılımı yapılması ile montaj hattı dengesi sağlandı.

Tablo 8'de operatör başına düşen operasyon süreleri ile gerçekleşen süreler arasında farklar görülmektedir. Bunun olmasının sebebi, tanımlı olan operasyonda yarım, bir buçuk ya da iki çalışanın olmasından kaynaklıdır.



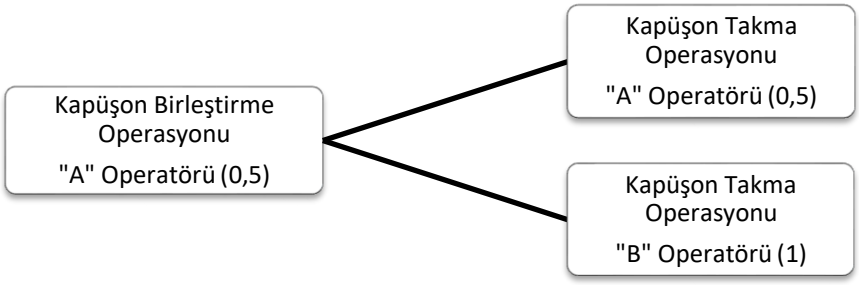
Şekil 43 Fermuar Takma Operasyonunun Operatör Başına Düşen Operasyon Süresi

Fermuar takma operasyonunun gerçekleşme süresi toplam 112 saniyedir. Bu süre çevrim süresinin iki katı olduğu için bu operasyona yardımcı operatör atamak yerine, ikinci operatör atandı. Bu sebepten dolayı Tablo 8'de ifade edildiği gibi fermuar takma operasyonunda iki operatör görev almaktadır. Fermuar takma operasyonunda 2 operatörün görev almasıyla birlikte, bu operasyondan iki kat fazla ürün çıkması beklenmektedir. Bu durumda operasyonun gerçekleşme süresi yarıya düşmektedir.



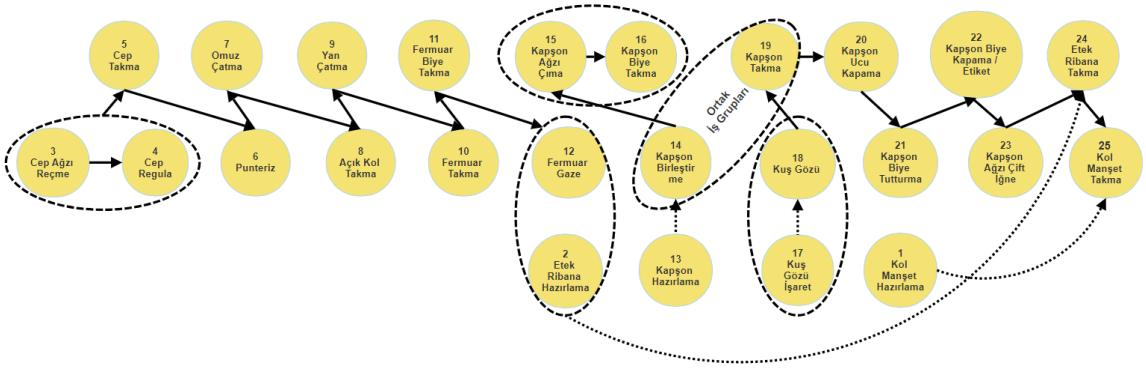
Şekil 44 Cep Regula ve Cep Ağzı Reçme Operasyonlarının Operatör Başına Düşen Operasyon Süresi

Cep regula ve cep ağzı reçme operasyonu aynı operatör tarafından yapılmaktadır. Bu iki operasyonun tamamlanma süresi, hesaplanan çevrim süresinin yarısından daha düşük olduğu için hat dengesinin sağlanabilmesi için aynı operatör tarafından yapılmaktadır. Burada, fermuar takma operasyonunun tam tersi durumu mevcuttur. Fermuar takma operasyonunun tamamlanma süresi çevrim süresini 2 kat aştığı için ikinci bir operatör atanırken, bu iki operasyonun çevrim süresi düşük olduğunda dolayı iki operasyonu aynı operatör gerçekleştirmektedir. İki ayrı operasyonda görev alan operatör, operasyonlarda yarım (0,5) operatör olarak değerlendirilmektedir. Burada, operatör başına düşen operasyon süresi iki katına çıkmaktadır. Bu sebepten, cep regula işlemi 22 sn'den 44 sn'ye, cep ağzı reçme işlemi 25 sn'den 50 sn'ye çıktı.



Şekil 45 Kapüşon Birleştirme ve Kapüşon Takma Operasyonlarının Operatör Başına Düşen Operasyon Süresi

Kapüşon birleştirme işlemini tamamlayan "A" operatörü, çevrim süresini aşan kapüşon takma operasyonuna yardıma etmektedir. Burada kapüşon birleştirme işlemi 2 ayrı işte görevli olduğu için kapüşon birleştirme operasyonunda yarım (0,5) ve kapüşon takma operasyonunda yarım (0,5) operatör olarak değerlendirilmektedir. Kapüşon takma operasyonu, A ve B operatörü ile birlikte 1,5 operatör olarak hesaplamalara dahil edilmiştir. Montaj hattı üzerinde kalan diğer operasyonlarda çalışan operatör sayıları 1 operatör üzerinden hesaplamalara dahil edildi.



Şekil 46 Kronometre Yönteminin Uygulandığı Montaj Hattında, Makine İş İstasyonlarının Yerleşimi, İş ve Malzeme Akış Yönü

Kapüşonlu sweatshirt ürününün, montaj hattındaki proseslerin mevcut yerleşimi ve hat üzerindeki iş ve malzeme akış yönü yer almaktadır. Burada, dairler içinde operasyonların sıralamasını belirten sayılar ve operasyon isimleri yer almaktadır. Görselde malzeme akış yönü oklarla, operatörlerin ortak yaptığı operasyonlar kesikli elipslerle ve hazırlık işlerinin montaj hattındaki ilgili operasyonlara beslenmesi kesikli oklar ile ifade edilmiştir. Burada elips şeklinde görülen 5 adet ortak iş istasyonu, toplamda ise 20 iş istasyonu bulunmaktadır.

Çalışmasının yapıldığı montaj hattında, kapüşonlu sweatshirt ürününün hat üzerinde tanımlı olan her bir operasyondan geçerek nihai ürün formuna ulaşmaktadır. Montaj hattından çıkacak nihai ürün, hat üzerindeki her bir operasyona bağlıdır. Bu nedenle montaj hattından, 25 makine operasyonundan en düşük tamamlanan operasyon sayısı kadar ürün çıkması beklenmektedir.

Promar Tekstil işletmesi, vardiyalık ürün hedefini gerçekleşen süreler üzerinden yapmaktadır. Gerçekleşen süreler baz alındığı zaman vardiyalık 510 adet, saatlik 63 adet ürünün montaj hattından çıkması hedeflenmektedir. Tablo 8'de, montaj hattında tamamlanan

en düşük operasyon miktarının 425 adet olduğu görülmektedir. Bu değerlere göre hedeflenen adetin tamamlanma oranı, aşağıdaki denklemde görüldüğü üzere 83,3% oranında çıktı. Hedef adetin tamamlanma oranı denklem 14'de ifade edilmektedir [179].

$$Hedef\ Adetin\ Tamamlanma\ Oranı = \frac{Vardiyada\ Gerçekleşen\ Ürün\ Adeti}{Vardiyada\ Hedeflenen\ Ürün\ Adeti} \quad (14)$$

$$H.A.T.O = \frac{425}{510} = 83{,}3\% \quad (14)$$

Yukarıdaki denklemde, montaj hattında vardiyalık çıkan ürün adetiyle, çıkması hedeflenen ürün adetinin orantısıyla ulaşıldı. Bu sonuç, montaj hattından çıkması hedeflenen ürün miktarına ne kadar yaklaşıldığını ifade etmektedir.

Montaj hattında hedeflenen vardiyalık ürün adetinin 510 olması için tanımlı olan her bir operasyonun, hesaplanan çevrim süresini (56,48 sn) aşmaması gerekmektedir. Operasyonların tamamlanma süreleri birbirinden farklı olduğu için çevrim süresinin ya altında ya da üstünde kalmaktadır. Bu durumda doğrudan montaj hattından çıkacak ürün adetini etkilemektedir. Bu etkiyi minimize etmek için gerçekleşen operasyon süreleri üzerinden iş istasyonlarına atamalar yapılmaktadır. Operasyon süresi çevrim süresinden düşük olan işler, kendi işlerini tamamladıktan sonra çevrim süresinin aşıldığı operasyonlara atanmaktadır. Bu durum Tablo 8'de operatör sayısı üzerinden ifade edildi. Burada asıl amaç, operasyonlar arasındaki süre farkının çevrim süresi baz alınarak birbirlerine yaklaştırılmasıdır. Operasyon süre değerleri, birbirine ne kadar yaklaşırsa montaj hattı da o kadar dengelenmiş ve hattan çıkan ürün adeti de artmış olacaktır.

Tablo 8'de operatör başına düşen operasyon sürelerinin, çevrim süresi ile farkı incelendiğinde süreyi en çok aşan (-16 sn) kuş gözü operasyonu arkasından, kapüşon birleştirme (-12 sn) ve kapüşon biye kapama/etiket (-12 sn) operasyonları takip etmektedir. Tablo 8'deki operasyon süreleri ve çevrim süresi arasındaki fark değerleri incelenirken, yarım (0,5) olarak çalışan operatörlerin negatif süre farkları çok büyük bir önem arz etmemektedir. Çünkü yarım (0,5) çalışan operatörler kendi operasyonlarını tamamladıktan sonra diğer tanımlı operasyonlara yardım etmektedir. Burada en çok çevrim süresini aşan operasyonun kuş gözü olmuştur. Kuş gözü operasyonunda da yarım operatör çalışmaktadır ancak kuş gözü operasyonu gerçekleştiren operatör ile kuş gözü işaret operasyonunu aynı operatör gerçekleştirmektedir. Başka bir operasyona yardıma gitmediği, kendi tanımlı operasyonu gerçekleştirdiğinden dolayı en çok çevrim süresini aşan operasyon olarak kuş gözü operasyonu seçilmiştir. Hat dengeleme oranının hesaplanması Denklem 15'de yer alan eşitlik üzerinden yapılmaktadır [180].

$$Hat\ Dengeleme\ Oranı = \frac{Çevrim\ Süresi}{Max\ Operasyon\ Süresi} \quad (15)$$

$$Hat\ dengeleme\ Oranı = \frac{56{,}48}{72} = 78{,}4\% \quad (15)$$

Burada, montaj hattı üzerinde yer alan tanımlı makine operasyonlarını gerçekleştiren operatörlerin süreleri üzerinden hat dengeleme oranı yukarıdaki denklemde 78,4% olarak hesaplandı.

3.4. DTW-SAX Yazılımının Kullanıldığı Sistem

Bu sistemde, operasyonlara hedef süre ataması, montaj hattının kurulumu, hattın verimliliği, operatörlerin performansı, montaj hattında bulunan iş istasyonlarına operatör atamasını, bir vardiyada montaj hattından çıkacak ürün sayısının hedeflenmesi ve çevrim süresi yazılım tarafından yapılmaktadır.

DTW-SAX yazılımının kullanıldığı sistemde, operasyonların sıralaması, belirlenen hedef süreler ve operasyonların gerçekleşme süreleri hakkında veriler Tablo 9'da yer almaktadır.

Tablo 9 DTW-SAX Yazılımının Tespit Ettiği Operasyon Süreleri ve Hedef Süreler

Sıra	Operasyonlar	Kişi	Makine	Hedef Süre	Gerçekleşen Süre	Süre Bazlı Verimlilik (%)
1	Kol Manşet Hazırlama	1	Düz Dikiş	36	37,5	96
2	Etek Ribana Hazırlama	0,5	Düz Dikiş	18	23,6	76
3	Cep Ağzı Reçme	0,5	Reçme	15	19,9	75
4	Cep Regula	0,5	Overlok	12	13,9	86
5	Cep Takma	1	Düz Dikiş	40	45,9	87
6	Punteriz	1	Punteriz	39	38,6	101
7	Omuz Çatma	0,75	Overlok	24	30,9	77
8	Açık Kol Takma	0,75	Overlok	28	30,8	91
9	Yan Çatma	1	Overlok	51	47,2	108
10	Fermuar Takma	2,25	Düz Dikiş	90	93,3	96
11	Fermuar Biye Takma	1	Reçme	30	31,3	96
12	Fermuar Gaze	1,5	Düz Dikiş	60	61,0	98
13	Kapüşon Hazırlık	0,75	Overlok	30	31,2	96
14	Kapüşon Birleştirme	0,5	Overlok	18	21,3	85
15	Kapüşon Ağzı Çıma	0,5	Düz Dikiş	18	20,2	89
16	Kapüşon Biye Takma	0,5	Reçme	15	18,5	81
17	Kuş Gözü İşaret	0,5	Kuş Gözü	15	16,6	90
18	Kuş Gözü	0,5		22	23,5	94
19	Kapüşon Takma	1,5	Overlok	66	68,6	96
20	Kapüşon Ucu Kapama	1	Düz Dikiş	39	36,9	106
21	Kapüşon Biye Tutturma	1	Düz Dikiş	40	39,7	101
22	Kapüşon Biye Kapama-Etiket	1,5	Düz Dikiş	60	61,1	98
23	Kapüşon Ağzı Çift İğne	1	Düz Dikiş	32	34,9	92
24	Etek Ribana Takma	1	Overlok	45	47,2	95
25	Kol Manşet Takma	1	Overlok	42	42,6	99
	Toplam	**23**		**885**	**936,2**	**68**

Çalışmanın gerçekleştirildiği montaj hattında kapüşonlu sweatshirt ürününün tamamlanması için faaliyet gösteren makine işleri yer almaktadır. Tablo 6'da incelenen kronometre sistemi ile aynı makine işleri bulunmaktadır. Tablo 9'da operasyon hedef sürelerinin, kronometre sistemindeki hedef sürelerdir. Ancak bazı operasyonlarda bu hedef sürelerin, operasyonların gerçekleşme sürelerinin üzerinde olduğu görülmektedir. Bu durumda kronometre

metodunun uygulandığı sistemde, hedef sürelerin doğru tespit edilemediği anlamına gelmektedir.

DTW-SAX yazılımının kullanıldığı sistemde, önceden montaj hattında çalışılan kronometre metodundan elde edilen hedef süreler vardiyalık hedef üretim için baz alınmaktadır. Ancak hedef süreler, doğru tespit edilememiş ise vardiyalık üretim adetleri operasyonun gerçekleşme süreleri üzerinden yapılmaktadır.

Hat üzerinde tanımlı olan 25 makine işinin hedef sürelerinin toplamı 885 sn iken, bu operasyonların gerçekleşme süresi 936,3 sn'yi almaktadır. Buradan, önceki sistemde hedef sürelerin doğru tayin edilmediği anlaşılmaktadır. Bu iki farklı değere göre vardiyalık ve saatlik üretim hedefi hesabı yapılacak olursa;

Promar Tekstil işletmesinde, vardiya ve saatlik üretim miktarı aşağıda yer alan Denklem 11 ve 12 üzerinden hesaplandı. Bulanan değerler, Tablo 10'da özetlendi.

$$Vardiyalık\ Ürün\ Adeti = \frac{Vardiya\ Süresi \times Hat\ Üzerinde\ Çalışan\ İşçi\ Sayısı}{Operasyonların\ Toplam\ Süresi} \quad (11)$$

$$Saatlik\ Ürün\ Adeti = \frac{Vardiyalık\ Hesaplanan\ Ürün\ Adeti}{Çalışma\ Süresi} \quad (12)$$

Gerçekleşen süreler üzerinden yapılan vardiya ve saatlik üretim adeti hedefi;

$$Vardiyalık\ Ürün\ Adeti = \frac{28800 \times 23}{936{,}2} = 708\ adet \quad (11)$$

$$Saatlik\ Ürün\ Adeti = \frac{707}{8} = 88\ adet \quad (12)$$

Tablo 10 Gerçekleşen Süreler ve Hedef Süreler Üzerinden Gerçekleşmesi Planlanan Üretim Adetleri

Hedefler	**Hedef Süre Üzerinden Hesaplanan Ürün Adeti**	**Gerçekleşen Süre Üzerinden Hesaplanan Ürün Adeti**
Vardiyalık Hedef	748 adet	708 adet
Saatlik Hedef	93 adet	88 adet

Tablo 10'da gerçekleşen süre üzerinden yapılan günlük/vardiyalık üretim adeti hesaplandığı zaman, montaj hattından vardiyalık 708 adet ürün çıkacağı sonucuna ulaşıldı. İşletme vardiyalık üretim adetini belirlerken, gerçekleşen süreler üzerinden belirlemektedir. Bunun sebebi, hedef süreler ve gerçekleşen süreler arasındaki süre farkının fazla olmasıdır. Operatörler operasyonları, Tablo 9'da yer alan hedef sürelerde gerçekleştirselerdi, montaj hattından vardiyalık 748 adet ürün çıkacağı hesaplandı.

Tablo 9'da yer alan 25 makine işine ek olarak 12 yan ve el işçilikleri ile birlikte hat üzerinde toplam 37 operasyon bulunmaktadır. Bu çalışmada, yan/el işçilikleri çevrim süresinin altında olduğu ve operasyonlarında makine kullanmadıklarından dolayı sistem üzerinden veri alınamadığı için montaj hattı dengeleme çalışmasına dahil edilmemiştir. Buna göre ürünün çevrim süresi Denklem 13'e göre;

$$İncelenen\ Ürünün\ Ç.S = \frac{Vardiya\ Süresi\ (sn)}{Montaj\ Hattından\ Çıkan\ Ürün\ Adeti} = \frac{28800}{708} = 40{,}7\ sn = 0{,}67\ dk \quad (13)$$

Montaj hattında bulunan, hazırlık işlemleri tamamlandıktan ve mevcut iş istasyonlarına malzeme beslendikten sonra her 40,7 saniyede bir kapüşonlu sweatshirt'ün montaj hattında üretildiği hesaplandı.

3.4.1. DTW-SAX Metodu ile Montaj Hattı Dengeleme

Montaj hattından çıkacak ürün adeti, iş istasyonlarında tanımlı olan operasyonların işlem sürelerine bağlıdır. Tablo 11'de montaj hattı üzerinde faaliyet gösteren makine işlerinin; işlem süreleri, operasyon başına düşen operatör sayıları ve operasyon adetleri bulunmaktadır. Aynı renkler ile ifade edilen operasyonlar aynı operatörün yaptığı veya yardım ettiği operasyonları kapsamaktadır.

DTW-SAX yazılımının kullanıldığı sistemde ortak işlere ek olarak, omuz çatma ve açık kol takma operasyonlarını gerçekleştiren operatörler, çevrim süresini aşan kapüşon biye kapama-etiket operasyonuna yardım etmektedirler. Bu operasyonda, omuz çatma ve açık kol takma operasyonlarını gerçekleştiren çalışanlar tanımlı oldukları operasyonda 0,75 operatör olarak hesaplamalara dahil edilirken, bu operatörlerin yardıma gittikleri kapüşon biye kapama-etiket operasyonu 1,5 operatör olarak değerlendirilmiştir. Aynı şekilde kapüşon hazırlık operasyonunu gerçekleştiren çalışan işini bitirdikten sonra fermuar takma operasyonuna yardım etmektedir.

Yukarıda ifade edilen ortak işlerin, operasyon başına düşen operatör sayısı belirlenirken operasyon sürelerinin çevrim süresine oranı baz alınmaktadır. Bu hesaplama aşağıdaki denklemde yer almaktadır. Diğer operasyonlardaki operatör paylaşımları da bu hesaplamalar Denklem 16 üzerinden yapılmaktadır.

$$Operasyon\ Başına\ Düşen\ İşçi\ Sayısı = \frac{Operasyonun\ Gerçekleşme\ Süresi}{Çevrim\ Süresi} \quad (16)$$

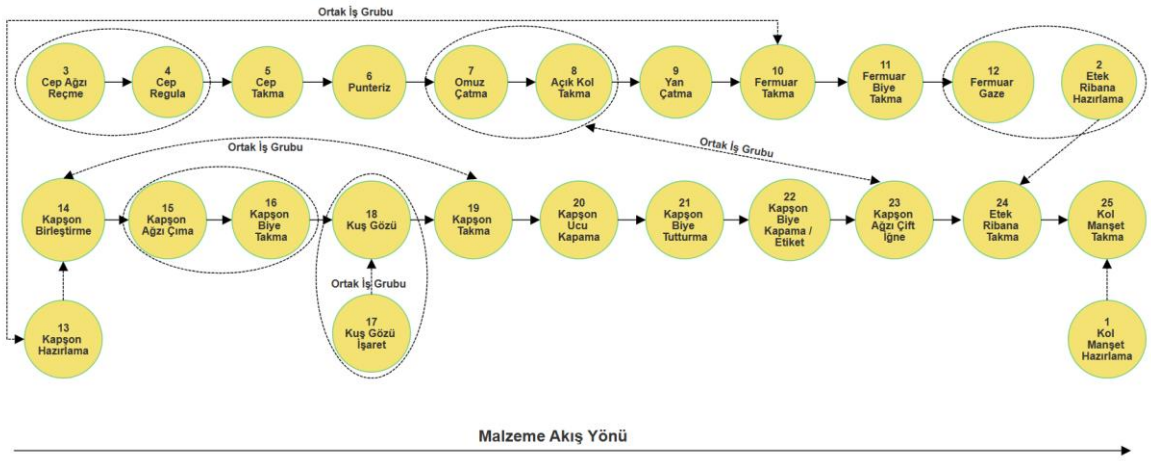
$$Omuz\ Çatma\ Operasyona\ Düşen\ İşçi\ Sayısı = \frac{30,9}{40,7} = 0,75\ işçi \quad (16)$$

$$Kapşon\ Biye\ Kapama/Etiket\ Operasyona\ Düşen\ İşçi\ Sayısı = \frac{61,1}{40,7} = 1,5\ işçi \quad (16)$$

Tablo 11 DTW-SAX Yazılımı Kullanılarak Hatta Atanan Operatörlerin Operasyon Süreleri, Operatör Sayıları ve Operasyon Adetleri

Sıra	Operasyon	Gerçekleşen Süre (sn)	Operatör Sayısı	Operatör Başına Düşen O.S.	Ç.S. Arasındaki Süre Farkı	Operasyon Adeti
1	Kol Manşet Hazırlama	37,5	1	37,5	3	727
2	Etek Ribana Hazırlama	23,6	0,5	47,2	-6	624
3	Cep Ağzı Reçme	19,9	0,5	33,2	8	710
4	Cep Regula	13,9	0,5	34,8	6	715
5	Cep Takma	45,9	1	45,9	-5	633
6	Punteriz	38,6	1	38,6	2	691
7	Omuz Çatma	30,9	0,75	41,2	0	688
8	Açık Kol Takma	30,8	0,75	41,1	0	685
9	Yan Çatma	47,2	1	47,2	-6	629
10	Fermuar Takma	93,3	2,25	41,5	-1	626
11	Fermuar Biye Takma	31,3	1	31,3	9	626
12	Fermuar Gaze	61,0	1,5	40,7	0	638
13	Kapüşon Hazırlık	31,2	0,75	41,6	-1	681
14	Kapüşon Birleştirme	21,3	0,5	42,6	-2	655
15	Kapüşon Ağzı Çıma	20,2	0,5	40,4	0	655
16	Kapüşon Biye Takma	18,5	0,5	37,0	4	655
17	Kuş Gözü İşaret	16,6	0,5	41,5	-1	638
18	Kuş Gözü	23,5	0,5	39,2	2	638
19	Kapüşon Takma	68,6	1,5	45,7	-5	624
20	Kapüşon Ucu Kapama	36,9	1	36,9	4	649
21	Kapüşon Biye Tutturma	39,7	1	39,7	1	649
22	Kapüşon Biye Kapama-Etiket	61,1	1,5	40,7	0	649
23	Kapüşon Ağzı Çift İğne	34,9	1	34,9	6	649
24	Etek Ribana Takma	47,2	1	47,2	-6	624
25	Kol Manşet Takma	42,6	1	42,6	-2	642

Çalışmasının yapıldığı montaj hattında, kapüşonlu sweatshirt ürünün tamamlanması için gerçekleştirilen operasyonlar, gerçekleşen süreler, operatör sayısı ve operasyon adetleri Tablo 11'de yer almaktadır. Burada, operasyonları gerçekleştiren operatörlerin performansı, DTW-SAX yazılımı tarafından analiz edilerek, performansı uygun olan çalışanlar operasyona atandı. Bu sebepten dolayı, kronometre metodunun uygulandığı sistem ile DTW-SAX yazılımının uygulandığı sistem arasında operasyon süreleri açısından büyük farklar bulunmaktadır. Bu farklar ve sistem kıyası, Bölüm 4'de "Analiz ve Bulgular" kısmında daha detaylı bir şekilde ele alınacaktır.



Şekil 47 DTW-SAX Yazılımının Kullanıldığı Montaj Hattında, Makine İş İstasyonlarının Yerleşimi, İş ve Malzeme Akış Yönü

Ürünün, montaj hattındaki proseslerin mevcut yerleşimi ve hat üzerindeki iş ve malzeme akış yönü yer almaktadır. Malzeme akış yönü oklarla, operatörlerin ortak yaptığı operasyonlar kesikli elipsler ve kesikli iki uçlu oklarla ve hazırlık işlerinin montaj hattındaki ilgili operasyonlara beslenmesi tek uçlu kesikli oklar ile ifade edilmiştir. Burada elips ve iki uçlu kesikli oklarla görülen 7 adet ortak iş istasyonu, toplamda ise 18 iş istasyonu bulunmaktadır.

Promar Tekstil işletmesinde, vardiyalık ürün hedefini gerçekleşen süreler üzerinden yapmaktadır. Gerçekleşen süreler baz alındığı zaman vardiyalık 708 adet, saatlik 88 adet ürünün montaj hattından çıkması hedeflenmektedir. Tablo 11'de montaj hattında tamamlanan en düşük operasyon miktarının 624 adet olduğu görülmektedir. Bu değerlere göre hedeflenen adetin tamamlanma oranı, Denklem 14'de görüldüğü üzere 88,1% oranında çıktı.

$$Hedef\ Adetin\ Tamamlanma\ Oranı = \frac{Vardiyada\ Gerçekleşen\ Ürün\ Adeti}{Vardiyada\ Hedeflenen\ Ürün\ Adeti} \quad (14)$$

$$H.A.T.O = \frac{624}{708} = 88{,}1\%$$

Yukarıdaki denklemde, montaj hattında vardiyalık çıkan ürün adetiyle, çıkması hedeflenen ürün adetinin orantısıyla ulaşıldı. Bu sonuç, montaj hattından çıkması hedeflenen ürün miktarına ne kadar yaklaşıldığını ifade etmektedir.

Montaj hattında hedeflenen vardiyalık ürün adetinin, vardiya sonunda 708 adet çıktı alabilmesi için tanımlı olan her bir operasyonun, çevrim süresini (40,7 sn) aşmaması gerekmektedir. Operasyonların tamamlanma süreleri birbirinden farklı olduğu için çevrim süresinin altında ya da üstünde kalmaktadır. Bu durum, doğrudan montaj hattından çıkacak ürün adetini etkilemektedir. Bu etkiyi minimize etmek için gerçekleşen operasyon süreleri üzerinden (Tablo 11) iş istasyonlarına atamalar yapılmaktadır. Operasyon süresi çevrim süresinden düşük olan işler, kendi işlerini tamamladıktan sonra çevrim süresinin aşıldığı operasyonlara atanmaktadır.

Tablo 11'de operatör başına düşen operasyon sürelerinin, çevrim süresi ile farkı incelendiğinde süreyi en çok aşan (-6 sn) etek ribana, yan çatma ve etek ribana hazırlama

operasyonlarının ardından, kapüşon takma ve cep takma (-5 sn) operasyonları takip etmektedir. Tablo 11'deki operasyon süreleri ve çevrim süresi arasındaki fark değerleri incelenirken, yarım (0,5) olarak çalışan operatörlerin negatif süre farkları çok büyük bir önem arz etmemektedir. Çünkü yarım (0,5) çalışan operatörler kendi operasyonlarını tamamladıktan sonra diğer tanımlı operasyonlara yardım etmektedir. Burada en çok çevrim süresini aşan operasyonun etek ribana ve yan çatma işlemleri olmuştur. Hat dengeleme oranı Denklem 15'deki eşitlik baz alınarak hesaplandı.

$$Hat\ Dengeleme\ Oranı = \frac{Çevrim\ Süresi}{Max\ Operasyon\ Süresi} \tag{15}$$

$$Hat\ dengeleme\ Oranı = \frac{40,7}{47,2} = 86,2\%$$

Burada, montaj hattı üzerinde yer alan tanımlı makine operasyonlarını gerçekleştiren operatörlerin süreleri üzerinden hat dengeleme oranı yukarıdaki denklemde 86,2% olarak hesaplandı.

4. ANALİZ VE BULGULAR

Bu bölümde, Promar Tekstil işletmesinde montaj hattında üretilen kapüşonlu sweatshirt ürününün üretiminde, "Kronometre Metodu ile Montaj Hattı Dengeleme" ve "DTW-SAX Yazılımı ile Montaj Hattı Dengeleme" olarak 2 farklı sistemden elde edilen veriler üzerinden kıyaslama yapıldı. İki sistem arasında; operasyonların gerçekleşme süreleri, operatörlerin operasyon performansları, vardiyalık ve saatlik ürün adetleri, operatörlerin yaptığı ortak operasyonlar, çevrim süresi, hedef adetin tamamlanma oranı ve hat dengeleme oranı hakkında kıyaslamalar yapıldı.

4.1. DTW-SAX Yazılımı ile Operatör Performanslarının Ölçülmesi

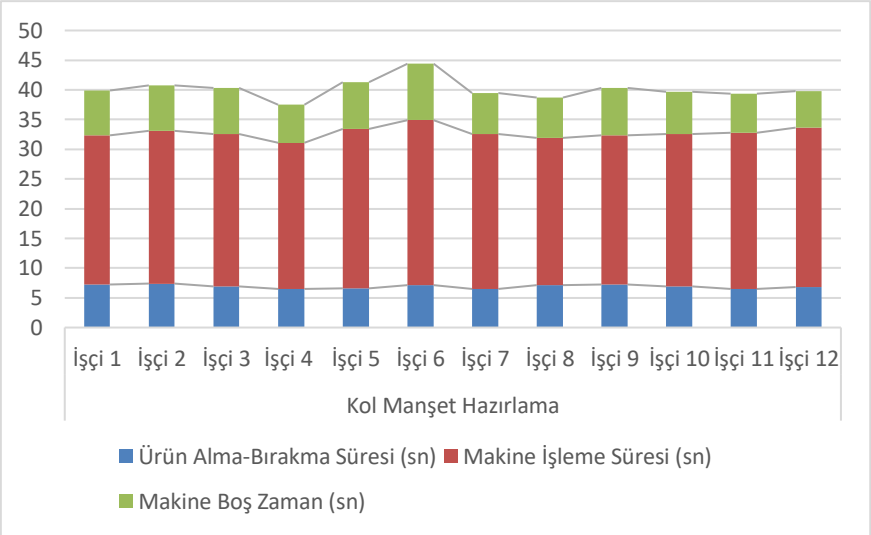
Kronometre metodunda, operatörlerin gerçekleştirdiği operasyon süreleri Tablo 8'de yer almaktadır. Promar Tekstil işletmesinde mevcut kullandığı DTW-SAX yazılımıyla her bir operasyonu gerçekleştiren operatörlerin operasyon süreleri, hareket sensörü vasıtasıyla toplanıp, algoritmalar ile performansları ölçülmektedir. Ardından, montaj hattında çalışanların operatörlerin performanslarına uygun olan çalışanlar tespit edilir ve hat üzerinde ki iş istasyonlarına ataması yapılmaktadır. İncelenen montaj hattında 25 makine operasyonu bulunmaktadır. Hat üzerinde 25 makine operasyonunda faaliyet gösteren operatörlerin performansları aşağıdaki bölümlerde sırasıyla yer almaktadır.

4.1.1. Kol Manşet Hazırlama Operasyonu

Kol manşet hazırlama operasyonunu en hızlı gerçekleştiren operatörün "Operatör 4" olduğu görülmektedir. Bundan dolayı, DTW-SAX yazılımının uygulandığı montaj hattında kol manşet hazırlama operasyonuna Operatör 4 atandı.

Tablo 12 Kol Manşet Hazırlama Operasyonunun Operatörler Bazında Gerçekleştirilen Süreleri

Operasyon Adı	Operatör No	Ürün Alma-Bırakma Süresi (sn)	Makine İşleme Süresi (sn)	Makine Boş Zaman (sn)	Toplam Operasyon Süresi (sn)
Kol Manşet Hazırlama	Operatör 1	7,2	25,2	7,5	39,9
	Operatör 2	7,4	25,7	7,7	40,8
	Operatör 3	6,9	25,7	7,7	40,3
	Operatör 4	6,5	24,6	6,4	37,5
	Operatör 5	6,6	26,8	7,9	41,3
	Operatör 6	7,1	27,8	9,5	44,4
	Operatör 7	6,5	26,1	6,9	39,5
	Operatör 8	7,1	24,8	6,8	38,7
	Operatör 9	7,2	25,2	7,9	40,3
	Operatör 10	6,9	25,7	7,1	39,7
	Operatör 11	6,5	26,3	6,6	39,4
	Operatör 12	6,8	26,8	6,2	39,8



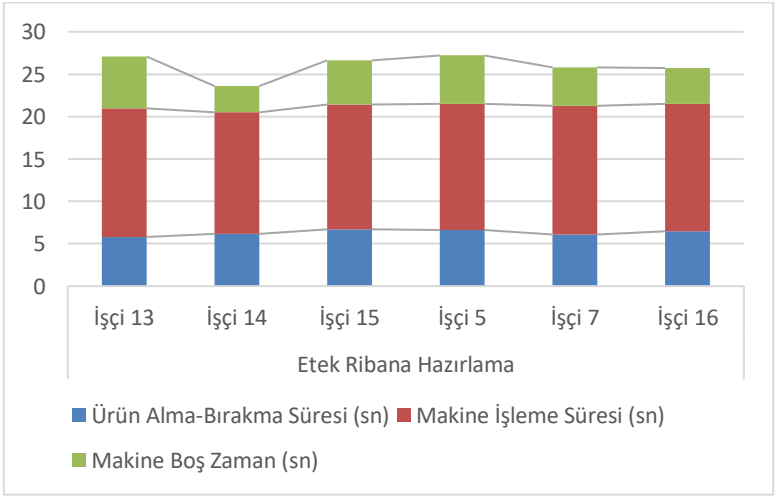
Grafik 1 Kol Manşet Hazırlama Operasyonunu Gerçekleştiren Operatörlerin Performansları

4.1.2. Etek Ribana Hazırlama

Etek ribana hazırlama operasyonunu en hızlı gerçekleştiren operatörün "Operatör 14" olduğu görülmektedir. Bundan dolayı, DTW-SAX yazılımının uygulandığı montaj hattında kol manşet hazırlama operasyonuna Operatör 14 atandı.

Tablo 13 Etek Ribana Hazırlama Operasyonunun Operatörler Bazında Gerçekleştirilen Süreleri

Operasyon Adı	Operatör No	Ürün Alma-Bırakma Süresi (sn)	Makine İşleme Süresi (sn)	Makine Boş Zaman (sn)	Toplam Operasyon Süresi (sn)
Etek Ribana Hazırlama	Operatör 13	5,8	15,2	6,1	27,1
	Operatör 14	6,2	14,3	3,1	23,6
	Operatör 15	6,7	14,7	5,2	26,6
	Operatör 5	6,6	14,9	5,7	27,2
	Operatör 7	6,1	15,2	4,5	25,8
	Operatör 16	6,5	15,0	4,2	25,7



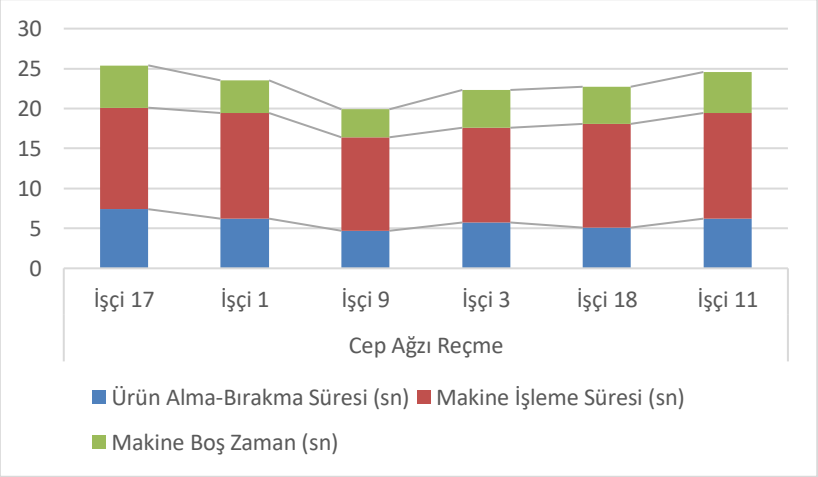
Grafik 2 Etek Ribana Hazırlama Operasyonunu Gerçekleştiren Operatörlerin Performansları

4.1.3. Cep Ağzı Reçme

Cep ağzı reçme operasyonunu en hızlı gerçekleştiren operatörün "Operatör 9" olduğu görülmektedir. Bundan dolayı, DTW-SAX yazılımının uygulandığı montaj hattında cep ağzı reçme operasyonuna Operatör 9 atandı.

Tablo 14 Cep Ağzı Reçme Operasyonunun Operatörler Bazında Gerçekleştirilen Süreleri

Operasyon Adı	Operatör No	Ürün Alma-Bırakma Süresi (sn)	Makine İşleme Süresi (sn)	Makine Boş Zaman (sn)	Toplam Operasyon Süresi (sn)
Cep Ağzı Reçme	Operatör 17	7,4	12,7	5,3	25,4
	Operatör 1	6,2	13,2	4,1	23,5
	Operatör 9	4,7	11,7	3,5	19,9
	Operatör 3	5,7	11,9	4,7	22,3
	Operatör 18	5,1	13,0	4,6	22,7
	Operatör 11	6,2	13,2	5,2	24,6



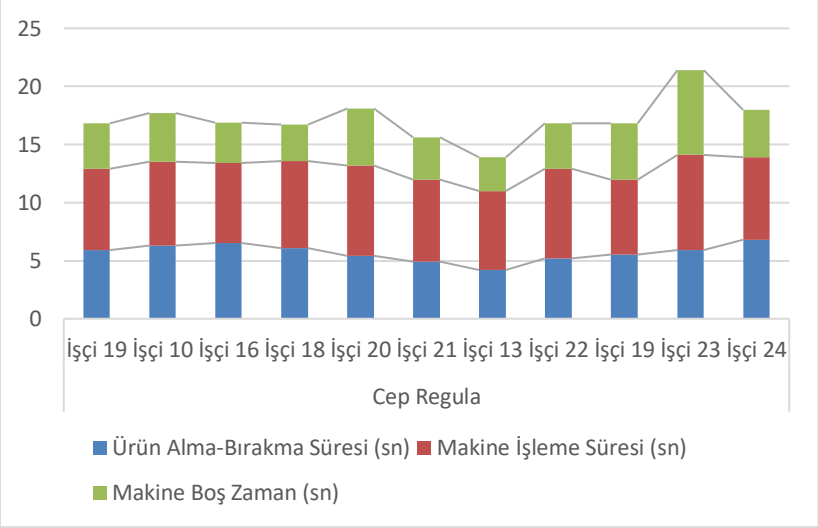
Grafik 3 Cep Ağzı Reçme Operasyonunu Gerçekleştiren Operatörlerin Performansları

4.1.4. Cep Regula

Cep regula operasyonunu en hızlı gerçekleştiren operatörün "Operatör 13" olduğu görülmektedir. Bundan dolayı, DTW-SAX yazılımının uygulandığı montaj hattında cep ağzı reçme operasyonuna Operatör 13 atandı.

Tablo 15 Cep Regula Operasyonunun Operatörler Bazında Gerçekleştirilen Süreleri

Operasyon Adı	Operatör No	Ürün Alma-Bırakma Süresi (sn)	Makine İşleme Süresi (sn)	Makine Boş Zaman (sn)	Toplam Operasyon Süresi (sn)
Cep Regula	Operatör 19	5,9	7,0	3,9	16,8
	Operatör 10	6,3	7,2	4,2	17,7
	Operatör 16	6,5	6,9	3,5	16,9
	Operatör 18	6,1	7,5	3,1	16,7
	Operatör 20	5,4	7,8	4,9	18,1
	Operatör 21	4,9	7,1	3,6	15,6
	Operatör 13	4,2	6,8	2,9	13,9
	Operatör 22	5,2	7,7	3,9	16,8
	Operatör 19	5,5	6,5	4,8	16,8
	Operatör 23	5,9	8,2	7,3	21,4
	Operatör 24	6,8	7,1	4,1	18,0



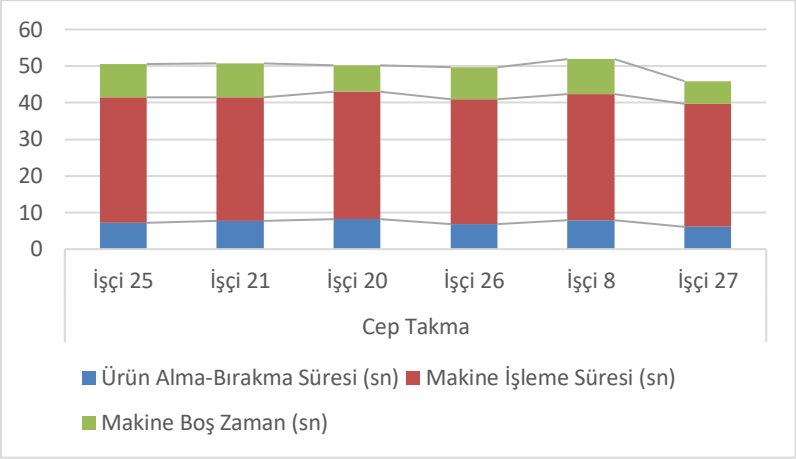
Grafik 4 Cep Regula Operasyonunu Gerçekleştiren Operatörlerin Performansları

4.1.5. Cep Takma

Cep takma operasyonunu en hızlı gerçekleştiren operatörün "Operatör 27" olduğu görülmektedir. Bundan dolayı, DTW-SAX yazılımının uygulandığı montaj hattında cep takma operasyonuna Operatör 27 atandı.

Tablo 16 Cep Takma Operasyonunun Operatörler Bazında Gerçekleştirilen Süreleri

Operasyon Adı	Operatör No	Ürün Alma-Bırakma Süresi (sn)	Makine İşleme Süresi (sn)	Makine Boş Zaman (sn)	Toplam Operasyon Süresi (sn)
Cep Takma	Operatör 25	7,2	34,2	9,2	50,6
	Operatör 21	7,7	33,7	9,3	50,7
	Operatör 20	8,2	34,8	7,2	50,2
	Operatör 8	7,9	34,5	9,5	51,9
	Operatör 27	6,1	33,6	6,2	45,9



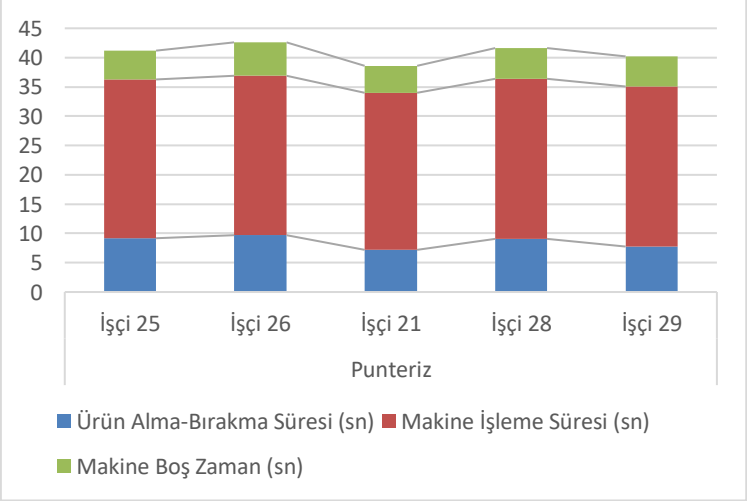
Grafik 5 Cep Takma Operasyonunu Gerçekleştiren Operatörlerin Performansları

4.1.6. Punteriz

Punteriz operasyonunu en hızlı gerçekleştiren operatörün "Operatör 21" olduğu görülmektedir. Bundan dolayı, DTW-SAX yazılımının uygulandığı montaj hattında punteriz operasyonuna Operatör 21 atandı.

Tablo 17 Punteriz Operasyonunun Operatörler Bazında Gerçekleştirilen Süreleri

Operasyon Adı	Operatör No	Ürün Alma-Bırakma Süresi (sn)	Makine İşleme Süresi (sn)	Makine Boş Zaman (sn)	Toplam Operasyon Süresi (sn)
Punteriz	Operatör 25	9,2	27,1	4,9	41,2
	Operatör 26	9,7	27,2	5,7	42,6
	Operatör 21	7,2	26,8	4,6	38,6
	Operatör 28	9,1	27,3	5,2	41,6
	Operatör 29	7,8	27,3	5,1	40,2



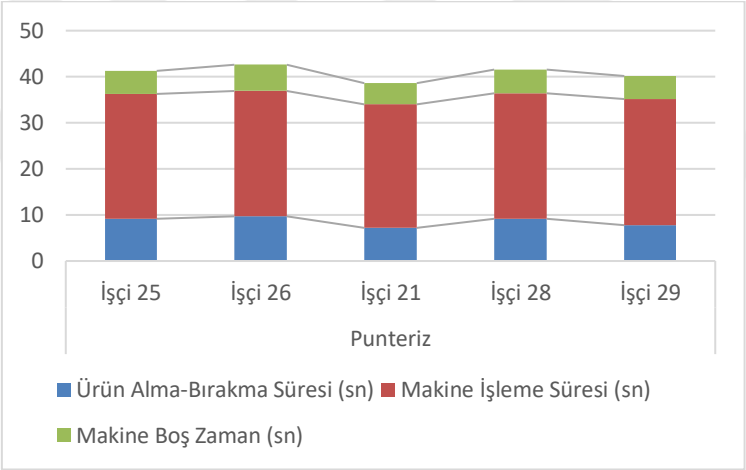
Grafik 6 Punteriz Operasyonunu Gerçekleştiren Operatörlerin Performansları

4.1.7. Omuz Çatma

Omuz çatma operasyonunu en hızlı gerçekleştiren operatörün "Operatör 29" olduğu görülmektedir. Bundan dolayı, DTW-SAX yazılımının uygulandığı montaj hattında omuz çatma operasyonuna Operatör 29 atandı.

Tablo 18 Omuz Çatma Operasyonunun Operatörler Bazında Gerçekleştirilen Süreleri

Operasyon Adı	Operatör No	Ürün Alma-Bırakma Süresi (sn)	Makine İşleme Süresi (sn)	Makine Boş Zaman (sn)	Toplam Operasyon Süresi (sn)
Omuz Çatma	Operatör 2	7,8	18,6	8,9	35,3
	Operatör 8	8,2	18,8	12,5	39,5
	Operatör 19	7,6	18,7	9,6	35,9
	Operatör 26	6,9	18,4	10,9	36,2
	Operatör 27	6,8	18,1	7,5	32,4
	Operatör 28	8,8	18,5	7,1	34,4
	Operatör 29	6,5	17,9	6,6	31,0
	Operatör 11	7,3	18,2	7,2	32,7
	Operatör 16	6,9	18,3	6,8	32,0



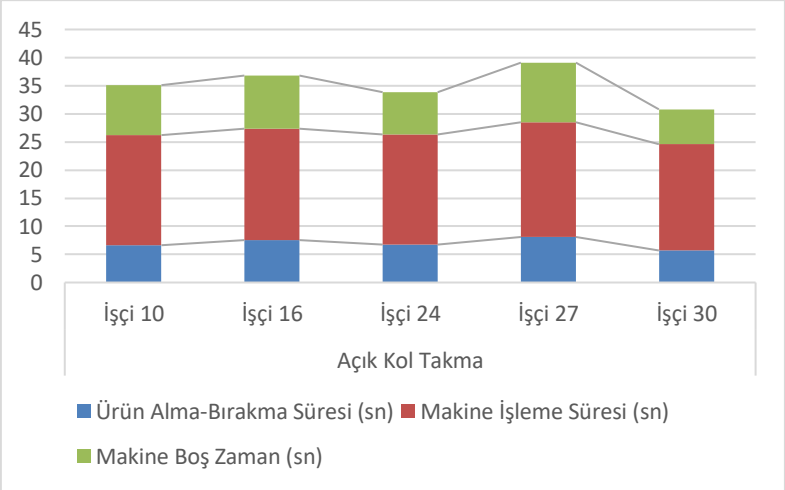
Grafik 7 Omuz Çatma Operasyonunu Gerçekleştiren Operatörlerin Performansları

4.1.8. Açık Kol Takma

Açık kol takma operasyonunu en hızlı gerçekleştiren operatörün "Operatör 30" olduğu görülmektedir. Bundan dolayı, DTW-SAX yazılımının uygulandığı montaj hattında açık kol takma operasyonuna Operatör 30 atandı.

Tablo 19 Açık Kol Takma Operasyonunun Operatörler Bazında Gerçekleştirilen Süreleri

Operasyon Adı	Operatör No	Ürün Alma-Bırakma Süresi (sn)	Makine İşleme Süresi (sn)	Makine Boş Zaman (sn)	Toplam Operasyon Süresi (sn)
Açık Kol Takma	Operatör 10	6,6	19,6	8,9	35,1
	Operatör 24	6,8	19,5	7,5	33,8
	Operatör 27	8,1	20,4	10,6	39,1
	Operatör 30	5,7	18,9	6,2	30,8



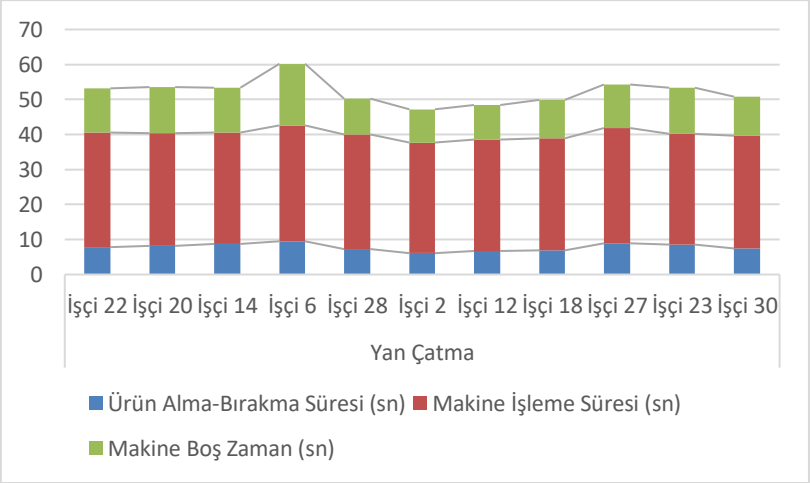
Grafik 8 Açık Kol Takma Operasyonunu Gerçekleştiren Operatörlerin Performansları

4.1.9. Yan Çatma

Yan çatma operasyonunu en hızlı gerçekleştiren operatörün "Operatör 2" olduğu görülmektedir. Bundan dolayı, DTW-SAX yazılımının uygulandığı montaj hattında yan çatma operasyonuna Operatör 2 atandı.

Tablo 20 Yan Çatma Operasyonunun Operatörler Bazında Gerçekleştirilen Süreleri

Operasyon Adı	Operatör No	Ürün Alma-Bırakma Süresi (sn)	Makine İşleme Süresi (sn)	Makine Boş Zaman (sn)	Toplam Operasyon Süresi (sn)
Yan Çatma	Operatör 22	7,9	32,7	12,6	53,2
	Operatör 20	8,2	32,2	13,2	53,6
	Operatör 14	8,8	31,8	12,8	53,4
	Operatör 6	9,5	33,1	17,6	60,2
	Operatör 28	7,2	32,8	10,3	50,3
	Operatör 2	6,1	31,6	9,5	47,2
	Operatör 12	6,7	31,9	9,8	48,4
	Operatör 18	6,9	32,0	10,9	49,8
	Operatör 27	8,9	32,9	12,5	54,3
	Operatör 23	8,5	31,7	13,1	53,3
	Operatör 30	7,5	32,1	11,2	50,8



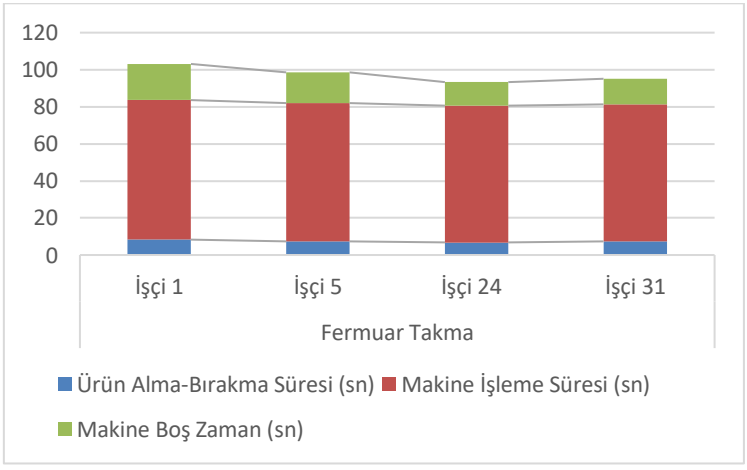
Grafik 9 Yan Çatma Operasyonunu Gerçekleştiren Operatörlerin Performansları

4.1.10. Fermuar Takma

Fermuar takma operasyonunu en hızlı gerçekleştiren operatörün "Operatör 24" olduğu görülmektedir. Bundan dolayı, DTW-SAX yazılımının uygulandığı montaj hattında fermuar takma operasyonuna Operatör 24 atandı.

Tablo 21 Fermuar Takma Operasyonunun Operatörler Bazında Gerçekleştirilen Süreleri

Operasyon Adı	Operatör No	Ürün Alma-Bırakma Süresi (sn)	Makine İşleme Süresi (sn)	Makine Boş Zaman (sn)	Toplam Operasyon Süresi (sn)
Fermuar Takma	Operatör 1	8,3	75,3	19,5	103,1
	Operatör 5	7,4	74,7	16,6	98,7
	Operatör 24	6,8	73,8	12,7	93,3
	Operatör 31	7,2	74,1	13,8	95,1



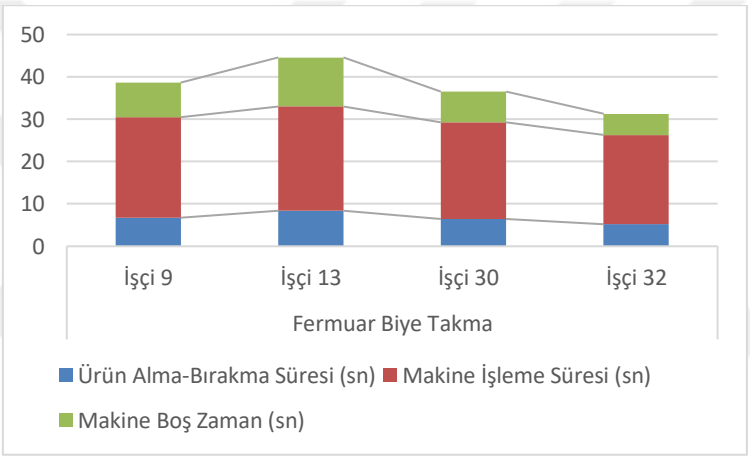
Grafik 10 Fermuar Takma Çatma Operasyonunu Gerçekleştiren Operatörlerin Performansları

4.1.11. Fermuar Biye Takma

Fermuar biye takma operasyonunu en hızlı gerçekleştiren operatörün "Operatör 32" olduğu görülmektedir. Bundan dolayı, DTW-SAX yazılımının uygulandığı montaj hattında fermuar biye takma operasyonuna Operatör 32 atandı.

Tablo 22 Fermuar Biye Takma Operasyonunun Operatörler Bazında Gerçekleştirilen Süreleri

Operasyon Adı	Operatör No	Ürün Alma-Bırakma Süresi (sn)	Makine İşleme Süresi (sn)	Makine Boş Zaman (sn)	Toplam Operasyon Süresi (sn)
Fermuar Biye Takma	Operatör 9	6,8	23,7	8,1	38,6
	Operatör 13	8,4	24,6	11,6	44,6
	Operatör 30	6,5	22,8	7,2	36,5
	Operatör 32	5,2	21,1	5,0	31,3



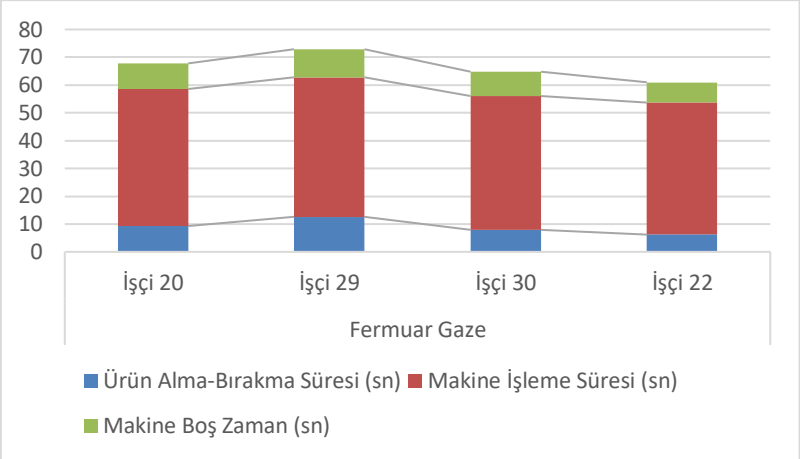
Grafik 11 Fermuar Biye Takma Çatma Operasyonunu Gerçekleştiren Operatörlerin Performansları

4.1.12. Fermuar Gaze

Fermuar gaze operasyonunu en hızlı gerçekleştiren operatörün "Operatör 22" olduğu görülmektedir. Bundan dolayı, DTW-SAX yazılımının uygulandığı montaj hattında fermuar gaze operasyonuna Operatör 22 atandı.

Tablo 23 Fermuar Gaze Operasyonunun Operatörler Bazında Gerçekleştirilen Süreleri

Operasyon Adı	Operatör No	Ürün Alma-Bırakma Süresi (sn)	Makine İşleme Süresi (sn)	Makine Boş Zaman (sn)	Toplam Operasyon Süresi (sn)
Fermuar Gaze	Operatör 20	9,3	49,4	9,2	67,9
	Operatör 29	12,6	50,2	10,1	72,9
	Operatör 30	7,8	48,3	8,6	64,7
	Operatör 22	6,2	47,5	7,3	61



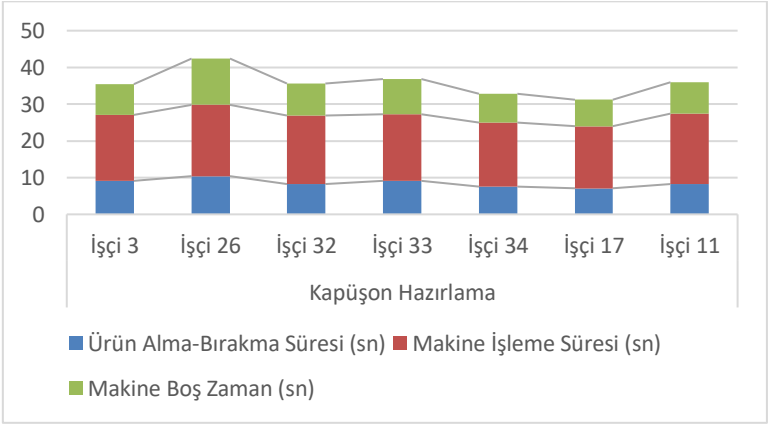
Grafik 12 Fermuar Gaze Operasyonunu Gerçekleştiren Operatörlerin Performansları

4.1.13. Kapüşon Hazırlama

Kapüşon hazırlama operasyonunu en hızlı gerçekleştiren operatörün "Operatör 17" olduğu görülmektedir. Bundan dolayı, DTW-SAX yazılımının uygulandığı montaj hattında kapüşon hazırlama operasyonuna Operatör 17 atandı.

Tablo 24 Kapüşon Hazırlama Operasyonunun Operatörler Bazında Gerçekleştirilen Süreleri

Operasyon Adı	Operatör No	Ürün Alma-Bırakma Süresi (sn)	Makine İşleme Süresi (sn)	Makine Boş Zaman (sn)	Toplam Operasyon Süresi (sn)
Kapüşon Hazırlama	Operatör 3	9,2	17,8	8,5	35,5
	Operatör 26	10,4	19,4	12,6	42,4
	Operatör 32	8,2	18,7	8,8	35,7
	Operatör 33	9,1	18,1	9,7	36,9
	Operatör 34	7,5	17,4	7,9	32,8
	Operatör 17	7,1	16,9	7,2	31,2
	Operatör 11	8,2	19,2	8,5	35,9



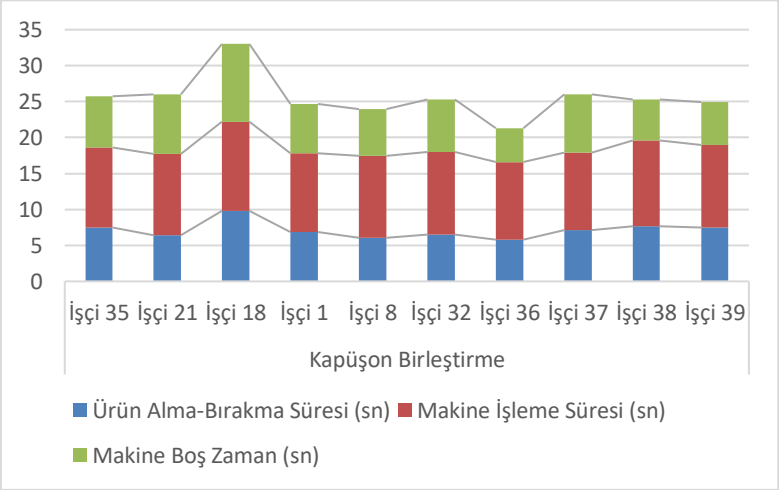
Grafik 13 Kapüşon Hazırlama Operasyonunu Gerçekleştiren Operatörlerin Performansları

4.1.14. Kapüşon Birleştirme

Kapüşon birleştirme operasyonunu en hızlı gerçekleştiren operatörün "Operatör 36" olduğu görülmektedir. Bundan dolayı, DTW-SAX yazılımının uygulandığı montaj hattında kapüşon birleştirme operasyonuna Operatör 36 atandı.

Tablo 25 Kapüşon Birleştirme Operasyonunun Operatörler Bazında Gerçekleştirilen Süreleri

Operasyon Adı	Operatör No	Ürün Alma-Bırakma Süresi (sn)	Makine İşleme Süresi (sn)	Makine Boş Zaman (sn)	Toplam Operasyon Süresi (sn)
Kapüşon Birleştirme	Operatör 35	7,5	11,1	7,1	25,7
	Operatör 21	6,4	11,3	8,3	26,0
	Operatör 18	9,8	12,4	10,8	33,0
	Operatör 1	6,9	10,9	6,9	24,7
	Operatör 8	6,1	11,4	6,5	24,0
	Operatör 32	6,5	11,5	7,3	25,3
	Operatör 36	5,8	10,8	4,7	21,3
	Operatör 37	7,1	10,8	8,1	26,0
	Operatör 38	7,7	11,9	5,7	25,3
	Operatör 39	7,5	11,5	5,9	24,9



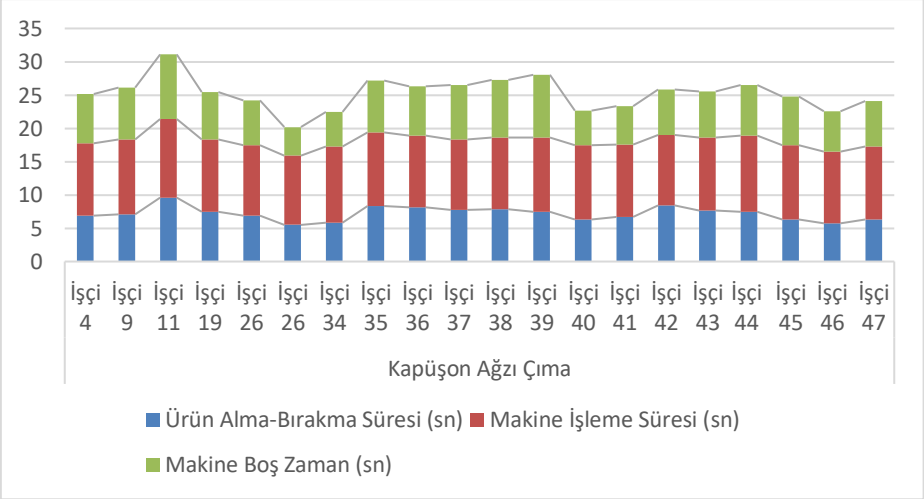
Grafik 14 Kapüşon Birleştirme Operasyonunu Gerçekleştiren Operatörlerin Performansları

4.1.15. Kapüşon Ağzı Çıma

Kapüşon ağzı çıma operasyonunu en hızlı gerçekleştiren operatörün "Operatör 26" olduğu görülmektedir. Bundan dolayı, DTW-SAX yazılımının uygulandığı montaj hattında kapüşon ağzı çıma operasyonuna Operatör 26 atandı.

Tablo 26 Kapüşon Ağzı Çıma Operasyonunun Operatörler Bazında Gerçekleştirilen Süreleri

Operasyon Adı	Operatör No	Ürün Alma-Bırakma Süresi (sn)	Makine İşleme Süresi (sn)	Makine Boş Zaman (sn)	Toplam Operasyon Süresi (sn)
Kapüşon Ağzı Çıma	Operatör 4	6,9	10,9	7,4	25,2
	Operatör 9	7,1	11,2	7,8	26,1
	Operatör 11	9,6	11,8	9,7	31,1
	Operatör 19	7,5	10,8	7,1	25,4
	Operatör 26	6,9	10,6	6,7	24,2
	Operatör 26	5,5	10,4	4,3	20,2
	Operatör 34	5,8	11,5	5,2	22,5
	Operatör 35	8,3	11,1	7,8	27,2
	Operatör 36	8,1	10,8	7,4	26,3
	Operatör 37	7,8	10,5	8,2	26,5
	Operatör 38	7,9	10,7	8,7	27,3
	Operatör 39	7,5	11,1	9,4	28,0
	Operatör 40	6,3	11,2	5,2	22,7
	Operatör 41	6,7	10,9	5,7	23,3
	Operatör 42	8,4	10,6	6,8	25,8
	Operatör 43	7,7	10,9	6,9	25,5
	Operatör 44	7,5	11,4	7,6	26,5
	Operatör 45	6,3	11,2	7,3	24,8
	Operatör 46	5,7	10,8	6,1	22,6
	Operatör 47	6,3	11,0	6,8	24,1



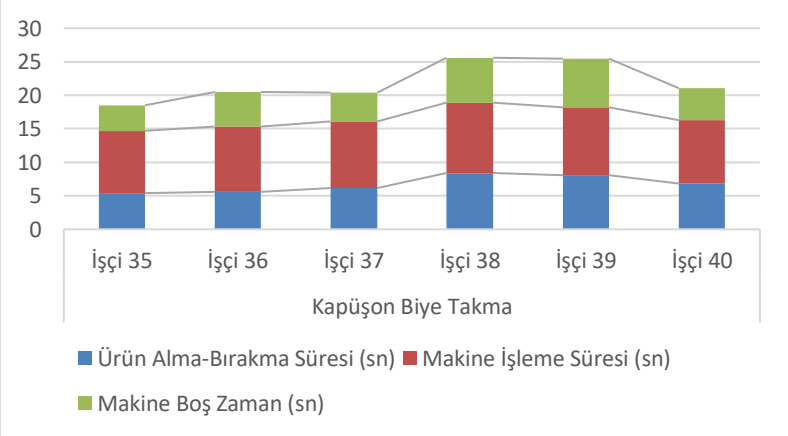
Grafik 15 Kapüşon Ağzı Çıma Operasyonunu Gerçekleştiren Operatörlerin Performansları

4.1.16. Kapüşon Biye Takma

Kapüşon biye takma operasyonunu en hızlı gerçekleştiren operatörün "Operatör 35" olduğu görülmektedir. Bundan dolayı, DTW-SAX yazılımının uygulandığı montaj hattında kapüşon biye takma operasyonuna Operatör 35 atandı.

Tablo 27 Kapüşon Biye Takma Operasyonunun Operatörler Bazında Gerçekleştirilen Süreleri

Operasyon Adı	Operatör No	Ürün Alma-Bırakma Süresi (sn)	Makine İşleme Süresi (sn)	Makine Boş Zaman (sn)	Toplam Operasyon Süresi (sn)
Kapüşon Biye Takma	Operatör 35	5,4	9,3	3,8	18,5
	Operatör 36	5,6	9,7	5,2	20,5
	Operatör 37	6,2	9,9	4,3	20,4
	Operatör 38	8,4	10,5	6,7	25,6
	Operatör 39	8,1	10,1	7,3	25,5
	Operatör 40	6,8	9,5	4,8	21,1



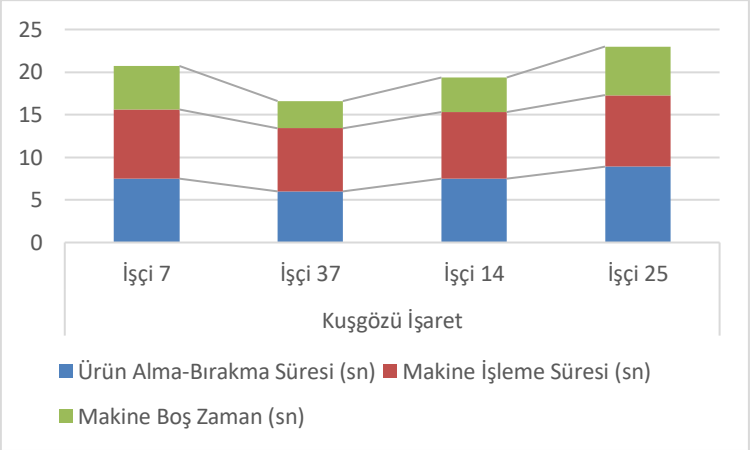
Grafik 16 Kapüşon Biye Takma Operasyonunu Gerçekleştiren Operatörlerin Performansları

4.1.17. Kuşgözü İşaret

Kuşgözü işaret operasyonunu en hızlı gerçekleştiren operatörün "Operatör 37" olduğu görülmektedir. Bundan dolayı, DTW-SAX yazılımının uygulandığı montaj hattında kuşgözü işaret operasyonuna Operatör 37 atandı.

Tablo 28 Kuşgözü İşaret Operasyonunun Operatörler Bazında Gerçekleştirilen Süreleri

Operasyon Adı	Operatör No	Ürün Alma-Bırakma Süresi (sn)	Makine İşleme Süresi (sn)	Makine Boş Zaman (sn)	Toplam Operasyon Süresi (sn)
Kuşgözü İşaret	Operatör 7	7,5	8,1	5,1	20,7
	Operatör 37	6,0	7,4	3,2	16,6
	Operatör 14	7,5	7,8	4,1	19,4
	Operatör 25	8,9	8,4	5,7	23,0



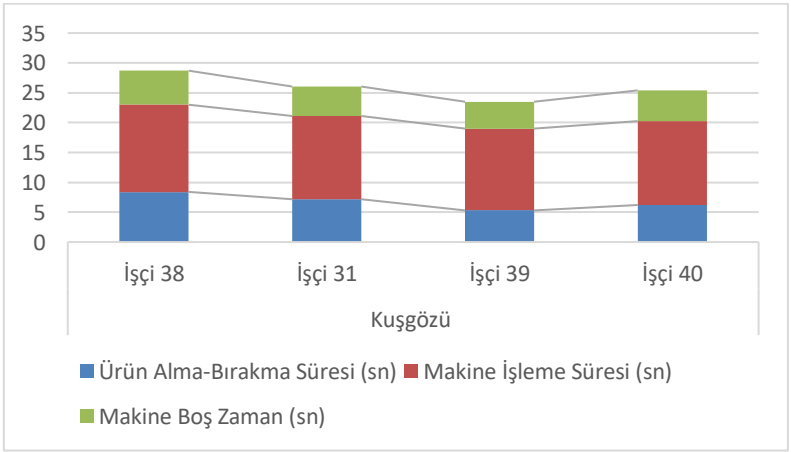
Grafik 17 Kuşgözü İşaret Operasyonunu Gerçekleştiren Operatörlerin Performansları

4.1.18. Kuşgözü

Kuşgözü operasyonunu en hızlı gerçekleştiren operatörün "Operatör 39" olduğu görülmektedir. Bundan dolayı, DTW-SAX yazılımının uygulandığı montaj hattında kuşgözü operasyonuna Operatör 39 atandı.

Tablo 29 Kuşgözü Operasyonunun Operatörler Bazında Gerçekleştirilen Süreleri

Operasyon Adı	Operatör No	Ürün Alma-Bırakma Süresi (sn)	Makine İşleme Süresi (sn)	Makine Boş Zaman (sn)	Toplam Operasyon Süresi (sn)
Kuşgözü	Operatör 38	8,4	14,6	5,7	28,7
	Operatör 31	7,2	13,9	4,9	26,0
	Operatör 39	5,3	13,7	4,5	23,5
	Operatör 40	6,2	14,1	5,1	25,4



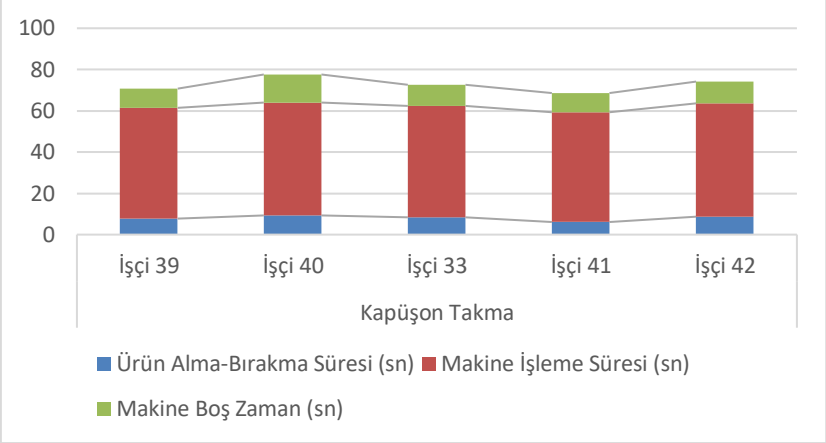
Grafik 18 Kuşgözü Operasyonunu Gerçekleştiren Operatörlerin Performansları

4.1.19. Kapüşon Takma

Kapüşon takma operasyonunu en hızlı gerçekleştiren operatörün "Operatör 41" olduğu görülmektedir. Bundan dolayı, DTW-SAX yazılımının uygulandığı montaj hattında kapüşon takma operasyonuna Operatör 41 atandı.

Tablo 30 Kapüşon Takma Operasyonunun Operatörler Bazında Gerçekleştirilen Süreleri

Operasyon Adı	Operatör No	Ürün Alma-Bırakma Süresi (sn)	Makine İşleme Süresi (sn)	Makine Boş Zaman (sn)	Toplam Operasyon Süresi (sn)
Kapüşon Takma	Operatör 39	7,8	53,5	9,5	70,8
	Operatör 40	9,3	54,7	13,6	77,6
	Operatör 33	8,5	53,9	10,3	72,7
	Operatör 41	6,1	53,2	9,3	68,6
	Operatör 42	8,7	54,8	10,8	74,3



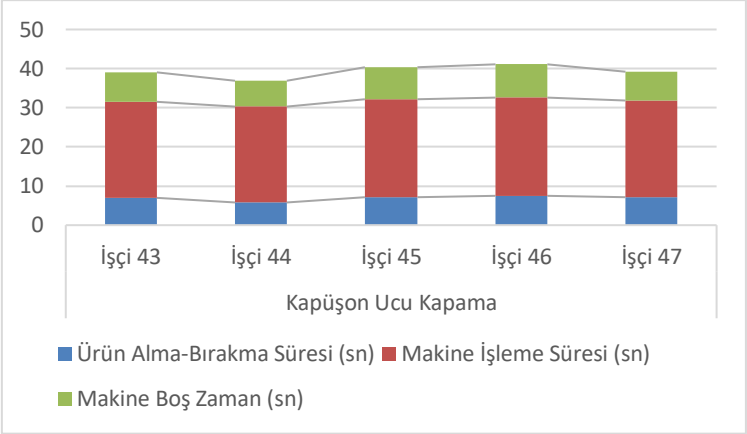
Grafik 19 Kapüşon Takma Operasyonunu Gerçekleştiren Operatörlerin Performansları

4.1.20. Kapüşon Ucu Kapama

Kapüşon ucu kapama operasyonunu en hızlı gerçekleştiren operatörün "Operatör 44" olduğu görülmektedir. Bundan dolayı, DTW-SAX yazılımının uygulandığı montaj hattında kapüşon ucu kapama operasyonuna Operatör 44 atandı.

Tablo 31 Kapüşon Ucu Kapama Operasyonunun Operatörler Bazında Gerçekleştirilen Süreleri

Operasyon Adı	Operatör No	Ürün Alma-Bırakma Süresi (sn)	Makine İşleme Süresi (sn)	Makine Boş Zaman (sn)	Toplam Operasyon Süresi (sn)
Kapüşon Ucu Kapama	Operatör 43	6,9	24,7	7,5	39,1
	Operatör 44	5,8	24,5	6,6	36,9
	Operatör 45	7,2	24,9	8,3	40,4
	Operatör 46	7,5	25,1	8,5	41,1
	Operatör 47	7,1	24,8	7,3	39,2



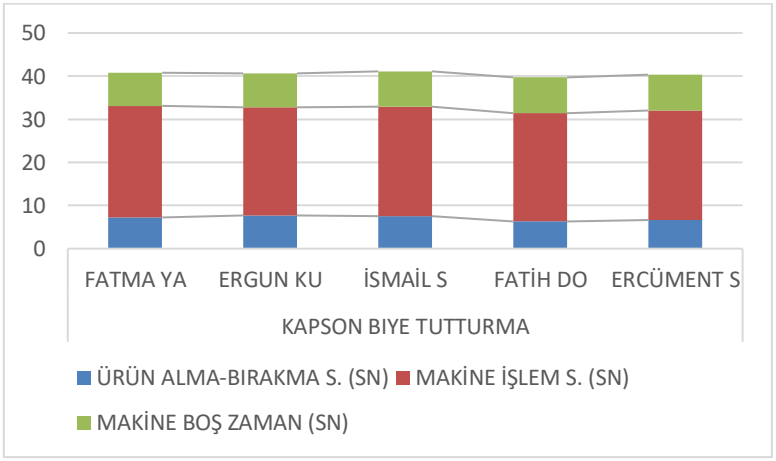
Grafik 20 Kapüşon Ucu Kapama Operasyonunu Gerçekleştiren Operatörlerin Performansları

4.1.21. Kapüşon Biye Tutturma

Kapüşon biye tutturma operasyonunu en hızlı gerçekleştiren operatörün "Operatör 44" olduğu görülmektedir. Bundan dolayı, DTW-SAX yazılımının uygulandığı montaj hattında kapüşon biye tutturma operasyonuna Operatör 44 atanmıştır.

Tablo 32 Kapüşon Biye Tutturma Operasyonunun Operatörler Bazında Gerçekleştirilen Süreleri

Operasyon Adı	Operatör No	Ürün Alma-Bırakma Süresi (sn)	Makine İşleme Süresi (sn)	Makine Boş Zaman (sn)	Toplam Operasyon Süresi (sn)
Kapüşon Biye Tutturma	Operatör 37	7,3	25,8	7,7	40,8
	Operatör 40	7,7	25,1	7,9	40,7
	Operatör 42	7,5	25,4	8,2	41,1
	Operatör 33	6,3	25,1	8,3	39,7
	Operatör 45	6,7	25,3	8,4	40,4



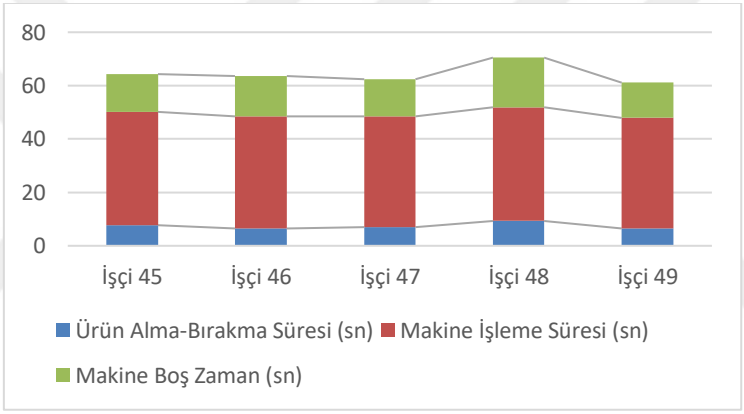
Grafik 21 Kapüşon Biye Tutturma Operasyonunu Gerçekleştiren Operatörlerin Performansları

4.1.22. Kapüşon Biye Kapama-Etiket

Kapüşon biye kapama-etiket operasyonunu en hızlı gerçekleştiren operatörün "Operatör 49" olduğu görülmektedir. Bundan dolayı, DTW-SAX yazılımının uygulandığı montaj hattında kapüşon biye kapama-etiket operasyonuna Operatör 49 atandı.

Tablo 33 Kapüşon Biye Kapama-Etiket Operasyonunun Operatörler Bazında Gerçekleştirilen Süreleri

Operasyon Adı	Operatör No	Ürün Alma-Bırakma Süresi (sn)	Makine İşleme Süresi (sn)	Makine Boş Zaman (sn)	Toplam Operasyon Süresi (sn)
Kapüşon Biye Kapama-Etiket	Operatör 45	7,8	42,3	14,2	64,3
	Operatör 46	6,5	42,1	14,9	63,5
	Operatör 47	7,1	41,5	13,8	62,4
	Operatör 48	9,3	42,6	18,6	70,5
	Operatör 49	6,5	41,4	13,2	61,1



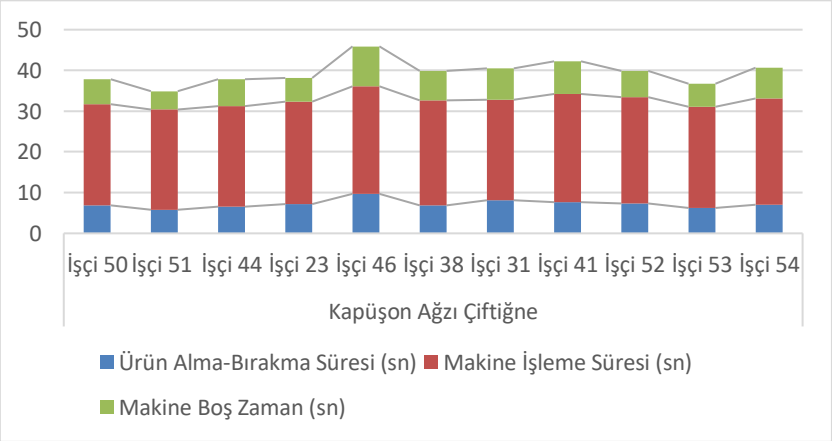
Grafik 22 Kapüşon Biye Tutturma Operasyonunu Gerçekleştiren Operatörlerin Performansları

4.1.23. Kapüşon Ağzı Çiftiğne

Kapüşon ağzı çiftiğne operasyonunu en hızlı gerçekleştiren operatörün "Operatör 51" olduğu görülmektedir. Bundan dolayı, DTW-SAX yazılımının uygulandığı montaj hattında kapüşon ağzı çiftiğne operasyonuna Operatör 51 atandı.

Tablo 34 Kapüşon Ağzı Çiftiğne Operasyonunun Operatörler Bazında Gerçekleştirilen Süreleri

Operasyon Adı	Operatör No	Ürün Alma-Bırakma Süresi (sn)	Makine İşleme Süresi (sn)	Makine Boş Zaman (sn)	Toplam Operasyon Süresi (sn)
Kapüşon Ağzı Çiftiğne	Operatör 50	6,8	24,9	6,2	37,9
	Operatör 51	5,8	24,6	4,5	34,9
	Operatör 44	6,5	24,8	6,5	37,8
	Operatör 23	7,2	25,2	5,7	38,1
	Operatör 46	9,7	26,4	9,8	45,9
	Operatör 38	6,9	25,8	7,2	39,9
	Operatör 31	8,1	24,7	7,7	40,5
	Operatör 41	7,7	26,5	8,1	42,3
	Operatör 52	7,4	26,1	6,3	39,8
	Operatör 53	6,2	24,9	5,6	36,7
	Operatör 54	7,1	26,0	7,5	40,6



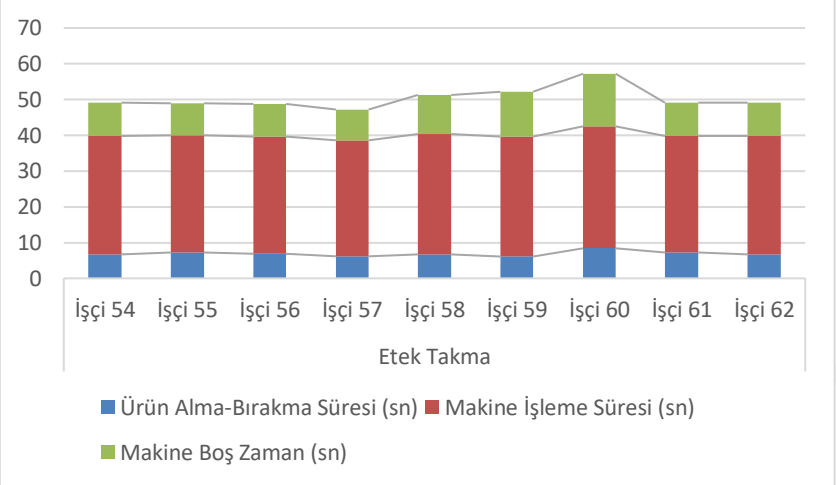
Grafik 23 Kapüşon Ağzı Çiftiğne Operasyonunu Gerçekleştiren Operatörlerin Performansları

4.1.24. Etek Takma

Etek takma operasyonunu en hızlı gerçekleştiren operatörün "Operatör 57" olduğu görülmektedir. Bundan dolayı, DTW-SAX yazılımının uygulandığı montaj hattında etek takma operasyonuna Operatör 57 atandı.

Tablo 35 Etek Takma Operasyonunun Operatörler Bazında Gerçekleştirilen Süreleri

Operasyon Adı	Operatör No	Ürün Alma-Bırakma Süresi (sn)	Makine İşleme Süresi (sn)	Makine Boş Zaman (sn)	Toplam Operasyon Süresi (sn)
Etek Takma	Operatör 54	6,7	33,2	9,3	49,2
	Operatör 55	7,2	32,8	8,9	48,9
	Operatör 56	6,8	32,9	9,1	48,8
	Operatör 57	6,2	32,4	8,6	47,2
	Operatör 58	6,7	33,7	10,8	51,2
	Operatör 59	6,1	33,6	12,5	52,2
	Operatör 60	8,4	34,1	14,7	57,2
	Operatör 61	7,3	32,5	9,3	49,1
	Operatör 62	6,7	33,2	9,3	49,2



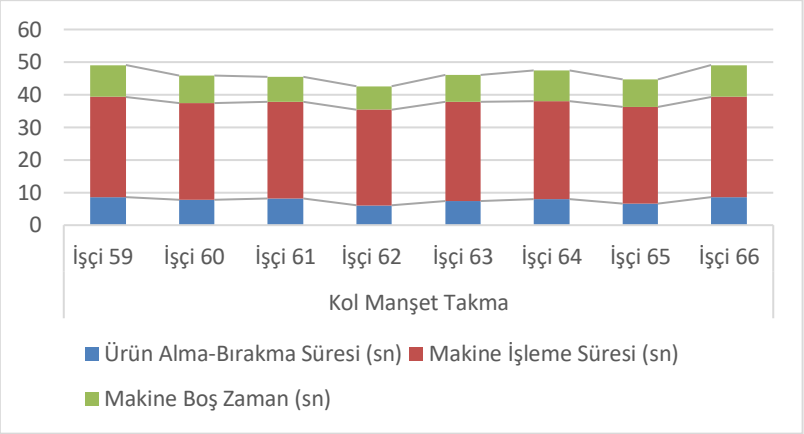
Grafik 24 Etek Takma Operasyonunu Gerçekleştiren Operatörlerin Performansları

4.1.25. Kol Manşet Takma

Kol manşet takma operasyonunu en hızlı gerçekleştiren operatörün "Operatör 62" olduğu görülmektedir. Bundan dolayı, DTW-SAX yazılımının uygulandığı montaj hattında kol manşet takma operasyonuna Operatör 62 atandı.

Tablo 36 Kol Manşet Takma Operasyonunun Operatörler Bazında Gerçekleştirilen Süreleri

Operasyon Adı	Operatör No	Ürün Alma-Bırakma Süresi (sn)	Makine İşleme Süresi (sn)	Makine Boş Zaman (sn)	Toplam Operasyon Süresi (sn)
Kol Manşet Takma	Operatör 59	8,6	30,7	9,8	49,1
	Operatör 60	7,8	29,6	8,5	45,9
	Operatör 61	8,1	29,8	7,6	45,5
	Operatör 62	6,1	29,3	7,2	42,6
	Operatör 63	7,3	30,5	8,2	46
	Operatör 64	7,9	30,2	9,4	47,5
	Operatör 65	6,7	29,6	8,3	44,6
	Operatör 66	8,6	30,7	9,8	49,1



Grafik 25 Kol Manşet Takma Operasyonunu Gerçekleştiren Operatörlerin Performansları

4.2. Operasyonların Gerçekleşme Süreleri

Çalışmanın yapıldığı montaj hattındaki ürünün tamamlanması için gereken her bir makine operasyonunun, kronometre ve DTW-SAX yazılımının kullanıldığı 2 ayrı sistemde tespit edilen süreler Tablo 37'de yer almaktadır. DTW-SAX yazılımının kullanıldığı sistemden alınan veriler, operatörlerin işlem süreleri üzerinden seçildi. Burada iş istasyonlarına atama yapılırken, birbirine yakın performans sergileyen operatörler seçildi. Kronometre sisteminde operasyon sürelerinin toplamı 1299 sn olarak ölçülmüşken, DTW-SAX yazılımında operasyon sürelerinin toplamı 936,2 sn olarak ölçülmüştür. Burada DTW-SAX yazılımında toplam operasyon süresinin kronometre sistemine kıyasla 27,93% oranla azaldığı görülmektedir.

Tablo 37 Kronometre ve DTW-SAX yazılımının Kullanıldığı Sistemde Tespit Edilen Operasyon Süreleri

Operasyonlar	**Gerçekleşen Süre (sn)**		**Süre Farkı (sn)**
	Kronometre Sistemi	DTW-SAX Algoritması Sistemi	
Kol Manşet Hazırlama	56	37,5	18,5
Etek Ribana Hazırlama	30	23,6	6,4
Cep Ağzı Reçme	25	19,9	5,1
Cep Regula	22	13,9	8,1
Cep Takma	54	45,9	8,1
Punteriz	60	38,6	21,4
Omuz Çatma	43	30,9	12,1
Açık Kol Takma	50	30,8	19,2
Yan Çatma	65	47,2	17,8
Fermuar Takma	112	93,3	18,7
Fermuar Biye Takma	47	31,3	15,7
Fermuar Gaze	83	61,0	22
Kapüşon Hazırlık	56	31,2	24,8
Kapüşon Birleştirme	34	21,3	12,7
Kapüşon Ağzı Çıma	29	20,2	8,8
Kapüşon Biye Takma	27	18,5	8,5
Kuş Gözü İşaret	31	16,6	14,4
Kuş Gözü	36	23,5	12,5
Kapüşon Takma	99	68,6	30,4
Kapüşon Ucu Kapama	60	36,9	23,1
Kapüşon Biye Tutturma	52	39,7	12,3
Kapüşon Biye Kapama-Etiket	68	61,1	6,9
Kapüşon Ağzı Çift İğne	47	34,9	12,1
Etek Ribana Takma	57	47,2	9,8
Kol Manşet Takma	56	42,6	13,4
Toplam Süre (sn)	1299	936,2	362,8

4.3. İki Sistem Arasında Operasyon Bazlı Üretim Miktarı

Bu çalışmada kapüşonlu sweatshirt ürününün, kronometre ve DTW-SAX sistemi ile üretimi sırasında montaj hattından, bir vardiyada çıktı alınan üretim adetleri Tablo 38'de görülmektedir. Tablo 38'de veriler incelendiğinde, DTW-SAX yazılımının kullanıldığı montaj hattından, kronometre sisteminin kullanıldığından ortalama 38% daha fazla ürün aldığı gözlemlenmiştir. Cep regula operasyonunda en az artış oranı gözlemleniştir, bunun sebebi ise cep regula operasyonunun üretim hedefini sağlamasından kaynaklıdır.

Tablo 38 Operasyonların 2 Ayrı Sistemde Gerçekleşen Üretim Adeti Kıyası

Operasyonlar	**Kronometre Sisteminde Ü.** A	**DTW-SAX Yazılımında Ü.** A	**Artış Oranı %**
Kol Manşet Hazırlama	570	727	27,5
Etek Ribana Hazırlama	550	624	13,5
Cep Ağzı Reçme	480	710	47,9
Cep Regula	700	715	2,1
Cep Takma	552	633	14,7
Punteriz	476	691	45,2
Omuz Çatma	484	688	42,1
Açık Kol Takma	484	685	41,5
Yan Çatma	450	629	39,8
Fermuar Takma	440	626	42,3
Fermuar Biye Takma	452	626	38,5
Fermuar Gaze	445	638	43,4
Kapüşon Hazırlık	482	681	41,3
Kapüşon Birleştirme	582	655	12,5
Kapüşon Ağzı Çıma	482	655	35,9
Kapüşon Biye Takma	482	655	35,9
Kuş Gözü İşaret	445	638	43,4
Kuş Gözü	445	638	43,4
Kapüşon Takma	440	624	41,8
Kapüşon Ucu Kapama	440	649	47,5
Kapüşon Biye Tutturma	440	649	47,5
Kapüşon Biye Kapama-Etiket	425	649	52,7
Kapüşon Ağzı Çift İğne	425	649	52,7
Etek Ribana Takma	425	624	46,8
Kol Manşet Takma	425	642	51,1

4.4. İki Sistem Arasında Vardiya Üretim Miktarı

Bu çalışmada kapüşonlu sweatshirt ürününün, üretimi sırasında kronometre ve DTW-SAX sistemi ile analiz edilen operatör performansları üzerinden montaj hattına atanan çalışanların 1 ürün üzerinde harcanan çalışma süresi Tablo 39'da yer almaktadır. İki sistem arasında net vardiya süresi ve operatör sayıları aynı kaldı. Vardiya üretim miktarı, 1 ürün için hesaplanan çalışma süresinin, operatör bazında toplam vardiya süresine oranlanmasıyla hesaplanan bir değerdir. Bu durum, aşağıdaki denklemde ifade edilmektedir. Tablo 39'da görülen ürün adeti, montaj hattından çıkması hedeflenen üretim adetidir.

$$\text{Hedeflenen Vardiya Ürün Adeti} = \frac{\text{Vardiya Süresi} \times \text{Operatör Sayısı}}{1\ \text{Ürün İçin Harcanan T.Ç.S.}}$$

DTW-SAX sistemi ile birlikte performansı birbirine uyumlu olan çalışanların montaj hattına atanması sonucu, kronometre metodunda hedeflenen vardiyalık ürün adetine kıyasla 38,8% oranında artış yaşandı.

Tablo 39 2 Ayrı Sistem Arasında Hedeflenen Vardiya Ürün Adeti

Sistem	Vardiya Süresi (sn)	Operatör Sayısı	1 Ürün İçin Harcanan T.Ç.S. (sn)	Hedeflenen Vardiya Ürün Adeti	Saatlik Ürün Adeti
Kronometre	28800	23	1299	510	63,7
DTW-SAX	28800	23	936,2	708	88,5

4.4.1. Kronometre Sisteminde Hedef Ürünün Tamamlanma Oranı

Tablo 39'da ifade edildiği gibi kronometre sisteminin kullanıldığı dönemde vardiyalık ürün hedefini, gerçekleşen toplam operasyon süreleri üzerinden hesaplandığı görülmektedir. Burada vardiyalık 510 ve saatlik 63,7 ürünün montaj hattından çıkması hedeflendiği ifade edilmiştir. Tablo 38'de montaj hattında tamamlanan en düşük operasyon miktarının 425 ürün olduğu görülmektedir. Bu değerlere göre hedef üretimin tamamlanma oranı, Denklem 14'de görüldüğü üzere 83,3% oranında çıktı.

$$Hedef\ Adetin\ Tamamlanma\ Oranı = \frac{Vardiyada\ Gerçekleşen\ Ürün\ Adeti}{Vardiyada\ Hedeflenen\ Ürün\ Adeti} \quad (14)$$

$$H.A.T.O = \frac{425}{510} = 83{,}3\% \quad (14)$$

4.4.2. DTW-SAX Yazılımında Hedef Ürünün Tamamlanma Oranı

Tablo 39'da ifade edildiği gibi mevcut sistem olan DTW-SAX'ın kullanıldığı dönemde vardiyalık ürün hedefini, gerçekleşen toplam operasyon süreleri üzerinden hesaplandığı görülmektedir. Burada vardiyalık 708 ve saatlik 88,5 ürünün montaj hattından çıkması hedeflendiği ifade edilmiştir. Tablo 38'de, montaj hattında tamamlanan en düşük operasyon miktarının 624 olduğu görülmektedir. Bu değerlere göre hedef üretimin tamamlanma oranı, aşağıdaki denklemde görüldüğü üzere 88,1% oranında çıktı.

$$Hedef\ Adetin\ Tamamlanma\ Oranı = \frac{Vardiyada\ Gerçekleşen\ Ürün\ Adeti}{Vardiyada\ Hedeflenen\ Ürün\ Adeti} \quad (14)$$

$$H.A.T.O = \frac{624}{708} = 88{,}1\% \quad (14)$$

Tablo 40'daki değerler incelendiğinde, DTW-SAX yazılımında gerçekleşen üretim miktarı, kronometre sistemindekine kıyasla 46,8% oranda artış gözlemlenmiştir.

Tablo 40 Kronometre ve DTW-SAX yazılımının Hedef Adetinin Tamamlanma Oranı (%)

Sistem	Gerçekleşen Üretim Adetleri	Hedeflenen Üretim Adetleri	Hedef Adetin Tamamlanma Oranı (%)
Kronometre	425	510	83,3
DTW-SAX	624	708	88,1

4.5. Çevrim Süresi

Ürünün çevrim süresi; vardiya süresinin, hedeflenen ürün adetine oranlanmasıyla hesaplanmaktadır. Tablo 41'de incelenen iki ayrı sistemin çevrim süreleri yer almaktadır. Burada ulaşılan çevrim süresi, montaj hattından ne kadar sürede ürünün çıktığını ifade etmektedir. Hat üzerindeki operasyonların çevrim süresini aşmaması hedeflenmektedir. Denklem 13'de çevrim süresi formülize edildi.

$$İncelenen\ Ürünün\ Ç.S = \frac{Vardiya\ Süresi\ (sn)}{Hedeflenen\ Vardiya\ Ürün\ Adeti} \quad (13)$$

Tablo 41 2 Ayrı Sistem Arasındaki Çevrim Süresi Kıyası

Sistem	Vardiya Süresi (sn)	Hedeflenen Vardiya Ürün Adeti	Çevrim Süresi (sn)
Kronometre	28800	510	56,48
DTW-SAX	28800	708	40,7

Tablo 41'de veriler incelendiğinde DTW-SAX yazılımında, kronometre sistemine göre çevrim süresinde 28% oranında bir düşüş yaşandı.

4.5.1. Çevrim Sürelerinin Kronometre Sisteminde Değerlendirilmesi

Bölüm 5.6.1'de kronometre sisteminde, montaj hattı üzerindeki iş istasyonlarında yapılan ortak operasyonlar ve operatör başına düşen operasyon sürelerinin nasıl hesaplandığı ifade edildi. Bu durum Tablo 42'de ayrıntılı olarak görülmektedir.

Tablo 42'de aynı renk ile gösterilen operasyonlar, aynı operatörler tarafından yapılmaktadır. Buradaki değerler incelendiğinde kuş gözü operasyonunun, hesaplanan çevrim sürenin 16 sn üzerinde olduğu, omuz çatma operasyonunun ise 13 sn altında olduğu sonucuna ulaşıldı. Bu durum, montaj hattında operatör başına düşen operasyon sürelerinin, çevrim süresi baz alınacak şekilde çalışanların, iş istasyonlarına atanmadığını ve uygun planlamanın yapılmadığını göstermektedir. Kronometre sisteminde 5 tane ortak operasyon yer almaktadır.

Tablo 42 Kronometre Sisteminde Operatör Başına Düşen Sürelerin Çevrim Süresine Kıyası

Operasyon	Gerçekleşen Süre (sn)	Operatör sayısı	Operatör Başına Düşen O.S.	Ç.S. Arasındaki Süre Farkı
Kol Manşet Hazırlama	56	1	56	0
Etek Ribana Hazırlama	30	0,5	60	-4
Cep Ağzı Reçme	25	0,5	50	6
Cep Regula	22	0,5	44	12
Cep Takma	54	1	54	2
Punteriz	60	1	60	-4
Omuz Çatma	43	1	43	13
Açık Kol Takma	50	1	50	6
Yan Çatma	65	1	65	-9
Fermuar Takma	112	2	56	0
Fermuar Biye Takma	47	1	47	9
Fermuar Gaze	83	1,5	55	1
Kapüşon Hazırlık	56	1	56	0
Kapüşon Birleştirme	34	0,5	68	-12
Kapüşon Ağzı Çıma	29	0,5	58	-2
Kapüşon Biye Takma	27	0,5	54	2
Kuş Gözü İşaret	31	0,5	62	-6
Kuş Gözü	36	0,5	72	-16
Kapüşon Takma	99	1,5	66	-10
Kapüşon Ucu Kapama	60	1	60	-4
Kapüşon Biye Tutturma	52	1	52	7
Kapüşon Biye Kapama-Etiket	68	1	68	-12
Kapüşon Ağzı Çift İğne	47	1	47	9
Etek Ribana Takma	57	1	57	-1
Kol Manşet Takma	56	1	56	0

4.5.2. Çevrim Sürelerinin DTW-SAX Yazılımında Değerlendirilmesi

Bölüm 5.7.1'de DTW-SAX yazılımında, montaj hattı üzerindeki iş istasyonlarında yapılan ortak operasyonlar ve operatör başına düşen operasyon sürelerinin nasıl hesaplandığı ifade edildi. Bu durum Tablo 43'de ayrıntılı olarak görülmektedir.

Tablo 43'de aynı renk ile gösterilen operasyonlar, aynı operatörler tarafından yapılmaktadır. Buradaki değerler incelendiğinde etek ribana hazırlama operasyonunun, hesaplanan çevrim sürenin 6 sn üzerinde olduğu, cep ağzı reçme operasyonunun ise 8 sn altında olduğu sonuca ulaşıldı. Bu durum, montaj hattında operatör başına düşen operasyon sürelerinin, çevrim süresi baz alınacak şekilde çalışanların, iş istasyonlarına atanmadığını ve uygun planlamanın yapılmadığını göstermektedir. DTW-SAX yazılımında 7 tane ortak operasyon yer almaktadır.

Tablo 43 DTW-SAX Yazılımında Operatör Başına Düşen Sürelerin Çevrim Süresine Kıyası

Operasyon	Gerçekleşen Süre (sn)	Operatör Sayısı	Operatör Başına Düşen O.S.	Ç.S. Arasındaki Süre Farkı
Kol Manşet Hazırlama	37,5	1	37,5	3
Etek Ribana Hazırlama	23,6	0,5	47,2	-6
Cep Ağzı Reçme	19,9	0,5	33,2	8
Cep Regula	13,9	0,5	34,8	6
Cep Takma	45,9	1	45,9	-5
Punteriz	38,6	1	38,6	2
Omuz Çatma	30,9	0,75	41,2	0
Açık Kol Takma	30,8	0,75	41,1	0
Yan Çatma	47,2	1	47,2	-6
Fermuar Takma	93,3	2,25	41,5	-1
Fermuar Biye Takma	31,3	1	31,3	9
Fermuar Gaze	61,0	1,5	40,7	0
Kapüşon Hazırlık	31,2	0,75	41,6	-1
Kapüşon Birleştirme	21,3	0,5	42,6	-2
Kapüşon Ağzı Çıma	20,2	0,5	40,4	0
Kapüşon Biye Takma	18,5	0,5	37,0	4
Kuş Gözü İşaret	16,6	0,5	41,5	-1
Kuş Gözü	23,5	0,5	39,2	2
Kapüşon Takma	68,6	1,5	45,7	-5
Kapüşon Ucu Kapama	36,9	1	36,9	4
Kapüşon Biye Tutturma	39,7	1	39,7	1
Kapüşon Biye Kapama-Etiket	61,1	1,5	40,7	0
Kapüşon Ağzı Çift İğne	34,9	1	34,9	6
Etek Ribana Takma	47,2	1	47,2	-6
Kol Manşet Takma	42,6	1	42,6	-2

4.5.3. İdeal Sistemde Operasyon Başına Düşen Operatör Sayıları

Kronometre sisteminde hat üzerinde tanımlı olan operasyonların, operatörler tarafından tamamlanma süreleri kronometre aracılığıyla belirli tekrarlar ile ölçülerek operasyonların tamamlanma süreleri belirlenmektedir. Çevrim süreleri, planlanan üretim adetleri, ortak operasyonların belirlenmesi gibi işlemler bu süreler üzerinden yapılmaktadır.

DTW-SAX yazılımının kullanıldığı sistemde, operasyon süreleri dikiş makinelerine yerleştirilen hareket sensörü yardımıyla ölçülmektedir. Ölçülen süreler, DTW-SAX yazılımı ile analiz edilerek her bir çalışanın operasyon performansı ölçülür ve montaj hattında bulunan iş istasyonlarına operatör ataması yapılmaktadır.

Promar Tekstil işletmesinde yapılan bu çalışmada gözlemlenen iki farklı sistemde de montaj hattında bulunan iş istasyonlarına mühendisler tarafından operatör ataması yapılmaktadır. Kronometre sisteminde operasyon süreleri, operatör performansları ve ortak operasyonlar mühendisler tarafından analiz edilip, montaj hattına operatör ataması yapılmaktaydı. DTW-SAX yazılımında ise operasyon süreleri ve operatör performansları sistem tarafından elde

edilmekteyken, ortak operasyonlar ve operatör ataması mühendisler tarafından yapılmaktadır.

İdeal olarak tanımlanan sistemde; operasyon sürelerinin ve operatör performanslarının yazılımlar ile tespit edilmesinin yanı sıra ortak operasyonların ve montaj hattına operatör ataman işleminin de yazılım yardımı ile yapılması hedeflenmektedir.

DTW-SAX yazılım sistemi, Promar Tekstil işletmesinde yaklaşık 1 yıldır faaliyet göstermektedir. Promar Tekstil işletmesinde montaj hattındaki görev dağılımının ve yönetiminin tamamen DTW-SAX yazılımı tarafından yapılabilmesi için bazı aşamalardan geçmesi gerekmektedir. Bu aşamalar, Serkon Bilişim tarafından da paketler halinde işletmede faaliyet göstermektedir. İlk aşama, operatörlerin performans değerlerinin ve üretim adetlerinin ölçülmesini, ikinci aşama ortak operasyonların belirlenmesini, üçüncü aşama ise montaj hattına hedeflenen üretim adeti baz alınarak iş istasyonlarına, sistem tarafından operatör atanmasını içermektedir.

Mevcut durumda, Promar Tekstil İşletmesinde ilk aşama tamamlanmış bulunmaktadır. Yakın zaman içerisinde işletmede, toplanılan veriler ile ortak çalışma gruplarının yani operatörlerin kendi operasyonu dışında yardıma gittiği operasyonların ve iş istasyonlarına atanması da sistem tarafından yapılması ile ikinci ve üçüncü aşamaya geçilecektir. Operatörlerin yaptığı ortak operasyonlar, operatörlerin yardıma gideceği operasyonlardaki becerileri baz alınarak ataması yapılmaktadır. Montaj hattı üzerinde çalışan operatörler kendi operasyonlarındaki ürünleri tamamladıktan sonra hat üzerinde çevrim süresinden yüksek olan işlere, operasyon becerisi yüksek olan çalışanlar atanmaktadır.

Bu işlemler ile hem montaj hattının dengelenmesinin sağlanması hem de hat üzerinden alınabilecek en yüksek verimin alınması amaçlanmaktadır. Burada işletme bünyesinde çalışan mühendislerin görevi ise operasyon sürelerini ölçmek ve analiz etmek yerine, kullanılan sistemin kontrolü ve takibinin sağlanmasını içermek olacaktır.

Promar Tekstil hedeflediği ve ideal sistem olarak adlandırılan montaj hattına; çevrim süresi, üretim adeti ve operatör performansı baz alınarak operatör atama durumu Tablo 44'de örnek durum olarak ifade edilmektedir.

Tablo 44 İdeal Sistemde Operasyon Başına Düşen Operatör Sayıları ve Ç.S. Arasındaki Süre Farkı

Sıra	Operasyon	Gerçekleşen Süre (sn)	Operatör Sayısı	Operatör Başına Düşen O.S.	Ç.S. Arasındaki Süre Farkı
1	Kol Manşet Hazırlama	37,5	0,92	40,7	0,0
2	Etek Ribana Hazırlama	23,6	0,58	40,7	0,0
3	Cep Ağzı Reçme	19,9	0,49	40,7	0,0
4	Cep Regula	13,9	0,34	40,7	0,0
5	Cep Takma	45,9	1,13	40,7	0,0
6	Punteriz	38,6	0,95	40,7	0,0
7	Omuz Çatma	30,9	0,76	40,7	0,0
8	Açık Kol Takma	30,8	0,76	40,7	0,0
9	Yan Çatma	47,2	1,16	40,7	0,0
10	Fermuar Takma	93,3	2,29	40,7	0,0
11	Fermuar Biye Takma	31,3	0,77	40,7	0,0
12	Fermuar Gaze	61	1,50	40,7	0,0
13	Kapüşon Hazırlık	31,2	0,77	40,7	0,0
14	Kapüşon Birleştirme	21,3	0,52	40,7	0,0
15	Kapüşon Ağzı Çıma	20,2	0,50	40,7	0,0
16	Kapüşon Biye Takma	18,5	0,45	40,7	0,0
17	Kuş Gözü İşaret	16,6	0,41	40,7	0,0
18	Kuş Gözü	23,5	0,58	40,7	0,0
19	Kapüşon Takma	68,6	1,69	40,7	0,0
20	Kapüşon Ucu Kapama	36,9	0,91	40,7	0,0
21	Kapüşon Biye Tutturma	39,7	0,98	40,7	0,0
22	Kapüşon Biye Kapama-Etiket	61,1	1,50	40,7	0,0
23	Kapüşon Ağzı Çift İğne	34,9	0,86	40,7	0,0
24	Etek Ribana Takma	47,2	1,16	40,7	0,0
25	Kol Manşet Takma	42,6	1,05	40,7	0,0

4.6. Hat Dengeleme Oranı

Faaliyet gösteren bir montaj hattının, denge sağlayabilmesi için hat üzerinde mevcut operasyon sürelerinin birbirine yakın olmasının yanı sıra hedeflenen üretim adetine ulaşabilmesi için de operasyon sürelerinin, çevrim süresine yakın olması istenmektedir. Bir montaj hattının dengesine ulaşabilmek için çevrim süresinin, en uzun süren operasyon süresine oranlanmasıyla ulaşılmaktadır. Bu durum Denklem 15'de formülize edildi.

$$Hat\ Dengeleme\ Oranı = \frac{Çevrim\ Süresi}{Max\ Operasyon\ Süresi} \quad (15)$$

Tablo 45'de kronometre sisteminde hat dengeleme oranı 78,4% hesaplanmışken, DTW-SAX yazılımının kullanıldığı sistemde hat dengeleme oranı 86,2% olarak hesaplandı.

Tablo 45 İki Ayrı Sistemde Hesaplanan Hat Dengeleme Oranı

Sistem	Çevrim Süresi	Maks. Üretim Süresi	Hat Dengeleme Oranı
Kronometre	56,48	72	78,4%
DTW-SAX	40,7	47,2	86,2%

4.7. Yazılım Sisteminin İşletmeye Kârı

Çalışmada gerçekleştirilen kapüşonlu sweatshirt ürününün birim maliyeti 8.5$'dır. Kronometre sisteminde vardiyada toplam 425 ürün, DTW-SAX yazılımı sisteminde toplam 624 ürün elde edilmektedir. Promar Tekstil işletmesi, kapüşonlu sweatshirt ürününü 25% kâr marjı ile satmaktadır.

Tablo 46 Yazılım Sisteminin İşletmeye Vardiya Başına Sağladığı Kâr

Sistem	Birim Maliyet	Vardiya Birim Kâr	Satış Maliyet 25%	Vardiya Satış Kâr
Kronometre	3612.5$	1691.5$	4515.6$	2114.4$
DTW-SAX	5304$		6630$	

Tablo 46'da görüldüğü üzere, DTW-SAX yazılımı vardiya başına ürünün birim maliyeti açısından işletmeye 1691.5$, satış maliyeti açısından 2114.4$ kâr sağlamaktadır.

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Kronometre sisteminde toplam operasyon süresi 1299 sn olarak ölçülmüşken, DTW-SAX yazılımında toplam süre 936,2 sn olarak ölçüldü. Burada DTW-SAX yazılımı ile birlikte toplam operasyon süresinde 27,93% oranında bir düşüş yaşandı.

Kronometre ve DTW-SAX yazılımında gerçekleşen operasyonel bazlı üretim adetleri incelendiğinde, DTW-SAX yazılımında operasyonel bazlı üretim adetlerinin, kronometre sistemine kıyasla ortalama 38% daha fazla ürün elde edildiği görülmektedir.

Vardiyalık hedeflenen üretim miktarı, kronometre sisteminde hedeflenen ürün 510 olarak hesaplanmışken, DTW-SAX yazılımı kullanıldığında bu değer 708 olarak hesaplandı. Bu sonuca göre DTW-SAX yazılımında vardiyada hedeflenen üretim miktarı, kronometre sistemine kıyasla 38,8% oranında artış göstermiştir. Kronometre sisteminin kullanıldığı montaj hattında, bir vardiyada 425 ürün elde edilmektedir. Bu değer, kronometre sisteminde hedeflenen vardiyalık ürün miktarı ile kıyaslandığında 83,3% oranında hedef adetin tamamladığı sonucuna ulaşılmaktadır. DTW-SAX yazılımının kullanıldığı montaj hattında, bir vardiyada 624 ürün elde edilmektedir. Bu değer, hedeflenen vardiyalık ürün miktarı ile kıyaslandığında 88,1% oranında hedef adetin tamamlandığı sonucuna ulaşılmaktadır. DTW-SAX yazılımında, vardiya başına elde edilen toplam üretim miktarı kronometre sistemiyle kıyaslandığında 46,8% oranında daha fazla ürün çıktısı alındığı görülmektedir

Çevrim süreleri, kronometre sisteminde 56,48 sn olarak hesaplanmışken, DTW-SAX yazılımı kullanıldığında 40,7 sn olarak hesaplandı. Tablo 41'de ifade edildiği gibi DTW-SAX yazılımında, kronometre sistemine göre 28% oranında bir düşüş yaşandığı gözlemlenmiştir.

Kronometre sistemi kullanıldığında montaj hattı üzerinde 5 ortak operasyon bulunmaktadır. Bu ortak operasyonlar montaj hattı üzerinde çevrim süresinin altında olan operasyonların, çevrim süresini aşan operasyonlara yardıma gitmesini kapsamaktadır. DTW-SAX yazılımında toplam 7 ortak operasyon bulunmaktadır. Kronometre sisteminde, çevrim süresini 16 sn ile aşan kuşgözü operasyonu, DTW-SAX yazılımında, çevrim süresini 6 sn ile aşan etek ribana hazırlama operasyonu bulunmaktadır.

Operasyonel bazda çevrim süresi fark değerleri kıyaslandığında DTW-SAX yazılımındaki fark değerinin, kronometre sistemine göre daha düşük olduğu görülmektedir. Bu duruma, montaj hattına performansı birbirine uyumlu operatörlerin atanması ve ortak operasyon sayısının artışı ile operasyon sürelerinin çevrim süresine yaklaşmasına sebep olmuştur.

Hat dengeleme oranı kronometre sisteminde 78,4% olarak, DTW-SAX yazılımının kullanıldığı sistemde 86,2% olduğu hesaplandı. Bu sonuca göre DTW-SAX yazılımında montaj hattının daha dengeli bir şekilde üretim faaliyeti gösterdiği sonucuna ulaşıldı.

İşletmeler hat dengeleme çalışmalarını yaparken, belirli hedefler ve önceliklere göre karar vermek için bu kriterlere uygun karar almalarına destek olacak yazılımlar kullanabilmektedirler. Tez kapsamında montaj hattı üzerinde kullanılan yazılımın içeriğinde hattın kurulumunda kalite, maliyet gibi önceliklere karar verilmesini sağlayan seçenekler sunması önemli bir avantaj olarak dikkat çekmektedir. Bu seçimin yazılım kullanmadan

yapılması zaman alan ve üzerinde farklı kombinasyonların değerlendirilip karar verilmesi gereken bir süreç olması nedeniyle birtakım zorluklar içermektedir.

Birçok açıdan DTW-SAX yazılımının kullanıldığı sistem, kronometrenin kullanıldığı sisteme üstünlük göstermiştir. Bu durum DTW-SAX yazılımının, sistem içerisinde eksiklerinin olmadığı anlamına gelmemektedir. DTW-SAX yazılımı, montaj hattı üzerinde el işi yapan operatörlerin performanslarını ölçememesi eksiklik olarak görülmektedir. Aynı zamanda, ERP verilerinin olmadığı ilk defa çalışılan ürünlerden elde edilen operasyon sürelerinin tutarlılığının sağlanamaması durumuyla karşılaşılabilmektedir. Bu durum, operatörlerin inisiyatifinde (motivasyon, operasyonu tanıma süresi ve tecrübesizlik vb.) olan operasyon süresinin farkında olmadan gerçekçi değerlere ulaşılıp ulaşılmaması ölçülmelidir.

DTW-SAX yazılımı vardiya başına ürünün birim maliyeti açısından işletmeye 1691.5$, satış maliyeti açısından 2114.4$ kâr sağlamaktadır. Yazılım kullanılarak ortak iş gruplarının artırılmasıyla hat üzerinde çalışan operatör sayısı azaltılabilir. Bu durum, maliyet açısından firmaya pozitif katkı sağlar. İşletme bünyesinde performansı düşük olan operatörlerin gelişimi için operasyon bazlı eğitim programları hazırlanabilir. Operatörlerin daha yüksek performans sergilemeleri için prim sistemi oluşturulabilir.

KAYNAKÇA

[1] S. H. Eryürük, Bir Konfeksiyon İşletmesinde Montaj Hattı Dengeleme, İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, 2005.

[2] M. Padariya, Introduction of Production and Operation Management, Ahmedabad, Hindistan: Gujarat Technological University, 2018.

[3] E. S. Buffa, Modern Production Management, New York: Wiley, 1973.

[4] C. M. a. H.-H. A. Giannantonio, «Reflections on the Relevance of the Principles of Scientific Management 100 Years Later,» *Journal of Business & Management,* cilt 17, no. 1, pp. 7-10, 2011.

[5] M. a. W. M. Witzel, «Culture, Management Theory and Paradigm Shift,» *Journal of General Management,* cilt 40, no. 3, pp. 55-69, 2015.

[6] S. M. Sarojrani P., Lectures notes Production and Operation Management, Hindistan: VSSUT Burla, 2010.

[7] A. K. M. Ullas Chandra Das, Production and Operation Management, Vani Vihar, Bhubaneswar: Excel Books Private Limited, 2019.

[8] M. Aisha, «Kasneb,» Masomo Msingi Publishers, 12 6 2017. [Çevrimiçi]. Available: https://masomomsingi.com/batch-production/.

[9] K. Bakhrankova, «Decision Support System for Continuous Production,» *Industrial Management & Data Systems,* cilt 110, no. 4, pp. 591-610, 2010.

[10] W. M. a. T. F. N. Carol J. McNair, Beyond the Bottom Line: Measuring World Class Performance, ABD: Dow Jones-Irwin, 1989.

[11] C. M. Ignatio Madanhire, From Traditional to Modern Manufacturing System: Case Study, Zimbabwe: University of Zimbabwe, 2009.

[12] M. H. Hrvoje Perčević, «Movement From Traditional to Modern Cost Accounting Methods in Manufacturing Companies,» %1 içinde *International Conference on Luca Pacioli in Accounting History'de ve 3rd Balkans and Middle East Countries Conference on Accounting and Accounting History*, Hırvatistan, 2013.

[13] Grooflisha, Artist, *Diagram Showing Push, Pull, and CONWIP Systems in Supply Chain Management.*. [Art]. Own work, 2021.

[14] Lean Enterprise Institute, Inc., «Lean Enterprise Instıtute,» [Çevrimiçi]. Available: https://www.lean.org/lexicon-terms/pull-production/. [Erişildi: 2023 2 2].

[15] Toyota Management System, «Ineak,» 1 5 2020. [Çevrimiçi]. Available: https://www.ineak.com/pull-systems-kanban-lean-techniques/. [Erişildi: 2 2 2023].

[16] C. Roser, «Planet Lean,» 5 2021. [Çevrimiçi]. Available: https://planet-lean.com/pull-system-tools/. [Erişildi: 2 2 2023].

[17] S. G. S. S. S. G. C. Bhim, «Lean Implementation and Its Benefits to Production Industry,» *International Journal of Lean Six Sigma,* cilt 1, no. 2, pp. 157-168, 2010.

[18] V. Kumar ve A. Malakooti , «JIT Based Quality Management: Concepts and Implications in Indian Context,» *Journal of Engineering Science and Technology,* cilt 2, no. 7, pp. 40-50, 2010.

[19] A. Tsigkas, Artist, *Kanban Pull System.* [Art]. 5th World Conference on Mass Customization and Personialization, 2009.

[20] A. K. Chun-Che Huang, «Overview of Kanban systems,» *International Journal of Computer Integrated Manufacturing,* cilt 9, no. 3, pp. 169-189, 2010.

[21] M. M. M. Chechaklou, Yalın Üretimde CONWIP Kontrol Sistemi ve Bir Uygulaması, İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü, 2010.

[22] M. Turovski, «MRP easy,» 23 1 2023. [Çevrimiçi]. Available: https://manufacturing-software-blog.mrpeasy.com/what-is-reorder-point-and-reorder-point-formula/. [Erişildi: 4 2 2023].

[23] P. Mulder, «Toolshero,» 17 6 2018. [Çevrimiçi]. Available: https://www.toolshero.com/quality-management/drum-buffer-rope/. [Erişildi: 2023 2 4].

[24] S. C. B. J. J. H. &. G. L. R. Gardiner, «Drum-Buffer-Rope and Buffer Management: Impact on Production Management Study and Practices,» *International Journal of Operations & Production Management,* cilt 13, no. 6, pp. 68-78, 1993.

[25] L. M. &. L. P. Marcello Braglia, «COBACABANA: A Real Industrial Application in A Job Shop System,» *Production Planning & Control,* cilt 7, no. 3, pp. 1061-1077, 2020.

[26] J. Riezebos, «Design of POLCA Material Control Systems,» *International Journal of Production Research,,* cilt 48, no. 5, pp. 1455-1477, 2010.

[27] T. Altıok, Performance Analysis of Manufacturing Systems, USA: Springer , 1996.

[28] L. Tiacci, Artist, *An Assembly Line with Parallel Workstations.* [Art]. Researchgate, 2012.

[29] Y. C. R. G. a. D. S. Hong, «The Analysis of a Production Line with Unreliable Machines and Random Processing Times,» *llE Transactions,* cilt 24, pp. 77-83, 1992.

[30] S. a. I. S. Gershwin, « Modeling and Analysis of Three-Stage Transfer Lines with Unreliable Machines and Finite Buffers,» *Operations Research,* cilt 31, pp. 354-380, 1983.

[31] Yöneylem Araştırma, «Kombinatoryal Optimizasyon,» İstanbul, 2014.

[32] Y. D. Stanley B. Gershwin, Manufacturing Flow Line Systems: A Review of Models and Analytical Results, Cambridge: Laboratory for Manufacturing and Productivity Massachusetts Institute of Technology, 1992.

[33] B. a. A. P. Sastry, «Analysis of a Two Station Flow-Line with Machine Processing Subject to Inspection and Rework,» *Opsearch,* cilt 25, no. 2, pp. 89-97, 1988.

[34] S. a. M. E. J. Yeralan, «A General Model of a Production Line with Intermediate Buffer and Station Breakdown,» *IIE Trans,* cilt 19, pp. 130-139, 1987.

[35] M. B., «A Note on the Reversibility and Duality of some Tandem Blocking Queueing Systems,» *Management Science,* cilt 32, pp. 1648-1650, 1986.

[36] R. Onvural, «A Survey of Closed Queueing Networks with Finite Buffers,» *ACM Computing Surveys,* cilt 22, no. 2, pp. 83-121, 1990.

[37] H.-S. Lau, «A Directly-Coupled Two-Stage Unpaced Line,» *IIE Transactions,* cilt 18, pp. 304-312, 1986.

[38] J. R. V. A., «Branch and Bound Algorithm for Assembly Line Balancing Problems with Formulation Irregularities,» *Management Science,* cilt 29, no. 11, p. 1309–1324, 1983.

[39] B. T. O., «Choice of Assembly Line Design Under Task Learning,» *International Journal of Production Research,* cilt 25, no. 4, pp. 513-524, 1978.

[40] C. A. K., «Line Balancing with Task Learning Effects,» *IIE Transactions,* cilt 20, no. 2, pp. 186-193, 1988.

[41] S. D., «An Efficient Heuristic for Solving Stochastic Assembly Line Balancing Problems,» *Computers & Industrial Engineering,* cilt 18, no. 3, pp. 285-295, 1990.

[42] M. G. E. Pike R, «The Bowl Phenomenon in Unpaced Lines,» *International Journal of Production Research,* cilt 32, no. 3, pp. 483-499, 1994.

[43] N. Hamta, G. Fatemi, F. Jolai ve S. Akbarpour, «A Hybrid PSO Algorithm for A Multi-Objective Assembly Line Balancing Problem with Flexible Operation Times, Sequence-Dependent Setup Times and Learning Effect,» *International Journal of Production Economics,* cilt 141, no. 1, pp. 99-111, 2013.

[44] A. F. D. B. Cakir B, «Multi-Objective Optimization of A Stochastic Assembly Line Balancing: A Hybrid Simulated Annealing Algorithm,» *Computers & Industrial Engineering,* cilt 60, no. 3, pp. 376-384, 2011.

[45] T. P. McMullen P R, «Using Ant Techniques to Solve the Assembly Line Balancing Problem,» *IIE Transactions,* cilt 35, no. 7, pp. 605-607, 2003.

[46] L. J. O. K. e. a. Zhao X, «Modeling and Analysis of A Mixed Model Assembly Line with Stochastic Operation Times,» *Naval Research Logistics,* cilt 54, no. 6, pp. 681-691, 2007.

[47] H. N. V., «A Heuristic Solution for Fuzzy Mixed-Model Line Balancing Problem,» *European Journal of Operational Research,* cilt 168, no. 3, pp. 798-910, 2006.

[48] X. T. Xu W, «Mixed Model Assembly Line Balancing Problem with Fuzzy Operation Times and Drifting Operations,» %1 içinde *Proceeding of Winter Simulation Conference (WSC 2008)*, Miami, FL, USA, 2008.

[49] Y. H. H. Moodie C L, «A Heuristic Method of Assembly Line Balancing for Assumptions of Constant or Variable Work Element Times,» *Journal of Industrial Engineering*, cilt 16, pp. 23-29, 1965.

[50] K. E. P. C., «Computational Experience with A Stochastic Assembly Line Balancing Algorithm,» *Computers & Operations Research,* cilt 6, no. 2, pp. 79-86, 1979.

[51] L. K. H. Nkasu M M, «A Stochastic Approach to Assembly Line Balancing,» *International Journal of Production Research,* cilt 33, no. 4, p. 975–991, 1995.

[52] C. O. Alena Otto, «How to Design Effective Priority Rules: Example of Simple Assembly Line Balancing,» *Computers & Industrial Engineering,* no. 69, pp. 43-52, 2014.

[53] B. Harrington, The Balancing Act: An Example of Line Balancing, Boston: Simul8 Whitepaper, 2018.

[54] Dönüşüm Danışmanlık, «Dönüşüm Danışmanlık,» 4 12 2019. [Çevrimiçi]. Available: https://www.donusumdanismanlik.com/takt-time-nedir-nasil-hesaplanir/. [Erişildi: 13 5 2024].

[55] L. T. Prisca, «Reduction of Sewing Bottleneck Problem by Using Assembly Line Balancing,» *International Journal of Engineering Research And Management (IJERM),* cilt 8, no. 3, pp. 11-16, 2021.

[56] Sydle, «Sydle,» 9 6 2022. [Çevrimiçi]. Available: https://www.sydle.com/blog/bottleneck-in-manufacturing-61aa121f5448461cf9143d8d/. [Erişildi: 13 2 2023].

[57] Vlsı Technology, «Studocu,» 18 7 2020. [Çevrimiçi]. Available: https://www.studocu.com/row/document/fareast-international-university/vlsi-technology/standard-minute-value-formula/70589520. [Erişildi: 13 5 2024].

[58] Ossian, «DATAMYTE,» 18 8 2022. [Çevrimiçi]. Available: https://datamyte.com/bottleneck-in-manufacturing/. [Erişildi: 2023 2 13].

[59] C. Roser, Artist, *Example illustration of a bottleneck in a manufacturing material flow.* [Art]. AllAboutLean.com, 2013.

[60] Viar, «Rewo,» 2022. [Çevrimiçi]. Available: https://www.rewo.io/skills-matrix-for-manufacturing/. [Erişildi: 19 2 2023].

[61] Z. Aktualisiert, Artist, *Was ist eine Kompetenzmatrix und wie erstellt man sie.* [Art]. Zavvy, 2022.

[62] I. Baybars, «A Survey of Exact Algorithms for the Simple Assembly Line Balancing Problem,» *Management Science,* cilt 32, no. 8, pp. 909-932, 1986.

[63] R. Pastor ve L. Ferrer, «An Improved Mathematical Program to Solve the Simple Assembly Line Balancing Problem,» *International Journal of Production Research,* cilt 47, no. 11, pp. 2943-2959, 2009.

[64] N. Boysen, M. Fliedner ve A. Scholl, «A Classification of Assembly Line Balancing Problems,» *European Journal of Operational Research,* cilt 183, no. 2, pp. 674-693, 2007.

[65] E. Falkenauer, «Line Balancing in the Real World,» %1 içinde *In Proceedings of the International Conference on Product Lifecycle Management PLM*, Switzerland, Inderscience Enterprises, 2005, pp. 360-370.

[66] R. Gamberini, E. Gebennini, A. Grassi ve A. Reg, «A Multiple Single-Pass Heuristic Algorithm Solving the Stochastic Assembly Line Rebalancing Problem,» *International Journal of Production Research,* cilt 47, no. 8, p. 2141–2164, 2009.

[67] Y. Zhang, X. Hu ve C. Wu, «Improved Imperialist Competitive Algorithms for Rebalancing Multi-Objective Two-Sided Assembly Lines with Space and Resource Constraints,» *International Journal of Production Research,* cilt 58, no. 12, pp. 3589-3617, 2020.

[68] E. Sancı ve M. Azizoğlu, «Rebalancing the Assembly Lines: Exact Solution Approaches,» *International Journal of Production Research,* cilt 55, no. 20, p. 5991–6010, 2017.

[69] I. Belassiria, M. Mazouzi, S. Elfezazi, A. Cherrafi ve Z. Elmaskaoui, «An Integrated Model for Assembly Line Rebalancing Problem,» *International Journal of Production Research,* cilt 56, no. 16, p. 5324–5344, 2018.

[70] U. Girit ve M. Azizoğlu, «Rebalancing the Assembly Lines with Total Squared Workload and Total Replacement Distance Objectives,» *International Journal of Production Research,* cilt 59, no. 22, pp. 6702-6720, 2021.

[71] K. Ağpak, «An Approach to Find Task Sequence for Re-balancing of Assembly Lines,» *Assembly Automation,* cilt 30, no. 4, pp. 378-387, 2010.

[72] F. Serin, S. Mete ve E. Çelik, «An Efficient Algorithm for U-Type Assembly Line Re-balancing Problem with Stochastic Task Times,» *Assembly Automation,* cilt 39, no. 4, pp. 581-595, 2019.

[73] C. Yang, J. Gao ve L. Sun, «A Multi-Objective Genetic Algorithm for Mixed-Model Assembly Line Rebalancing,» *Computers & Industrial Engineering,* cilt 65, no. 1, pp. 109-116, 2013.

[74] C. Miralles, J. P. Garcia-Sabater, C. Andres ve M. Cardos, «Advantages of Assembly Lines in Sheltered Work Centres for Disabled A Case Study,» *International Journal of Production Economics,* cilt 110, no. 1-2, pp. 187-197, 2007.

[75] F. F. Araújo, A. M. Costa ve C. Miralles, «Two Extensions for The ALWABP: Parallel Stations and Collaborative Approach,» *International Journal of Production Economics,* cilt 140, no. 1, pp. 483-495, 2012.

[76] B. Sungur ve Y. Yavuz, «Assembly Line Balancing with Hierarchical Worker Assignment,» *Journal of Manufacturing Systems,* cilt 37, pp. 290-298, 2015.

[77] M. K. Oksuz, K. Buyukozkan ve S. I. Satoglu, «U-shaped Assembly Line Worker Assignment and Balancing Problem: A Mathematical Model and Two Meta-Heuristic,» *Computers & Industrial Engineering,* cilt 112, pp. 246-263, 2017.

[78] B. Efe, G. E. O. Kremer ve M. Kurt, «Age and Gender Based Workload Constraint for Assembly Line Worker Assignment and Balancing Problem in A Textile Firm,» *International Journal of Instrrial Engineering,* cilt 25, no. 1, pp. 1-17, 2018.

[79] A. Corominas, R. Pastor ve J. Plans, «Balancing Assembly Line with Skilled and Unskilled Workers,» *Omega,* cilt 36, no. 6, pp. 1126-1132, 2008.

[80] P. Fattahi ve P. Samouei, «An analytical approach for single and mixed-model assembly line rebalancing and worker assignment problem,» *Journal of Industrial and Systems Engineering* , cilt 9, no. 1, pp. 79-91, 2016.

[81] C. G. S. Sikora, T. C. Lopes ve L. Magatão, «Traveling Worker Assembly Line (Re)balancing Problem: Model, Reduction Techniques, and Real Case Studies,» *European Journal of Operational Research,* cilt 259, no. 3, pp. 949-971, 2017.

[82] I. Gräßlera, D. Roesmann, C. Cappello ve E. Steffen, «Skill-Based Worker Assignment in A Manual Assembly Line,» %1 içinde *31st CIRP Design Conference 2021*, Paderborn, Germany, 2021.

[83] E. E ve S. S, «A Survey of The Assembly Line Balancing Procedures,» *Production Planning and Control,* cilt 9, no. 5, pp. 414-434, 1998.

[84] B. N, S. A ve F. M, «Assembly Line Balancing: Which Model to Use When?,» *International Journal of Production Economics,* cilt 111, no. 2, p. 509–528, 2008.

[85] B. I., «A Survey of Exact Algorithms for The Simple Assembly Line Balancing Problem,» *Management Science,* cilt 32, no. 8, p. 909–932, 1986.

[86] G. R ve G. S, «A Comprehensive Literature Review and Analysis of The Design, Balancing and Scheduling of Assembly Systems,» *International Journal of Production Research,* cilt 27, no. 4, pp. 637-670, 1989.

[87] S. A ve B. C, «State of the Art Exact and Heuristic Solution Procedures for Simple Assembly Line Balancing,» *European Journal of Operational Research,* cilt 168, no. 3, p. 666–693, 2006.

[88] U. Saif ve B. Wang, «A Survey on Assembly Lines and Its Types,» *Higher Education Press and Springe,* cilt 9, no. 2, pp. 95-105, 2014.

[89] N. Boysena, P. Schulze ve A. Scholl, «Assembly Line Balancing: What happened in the Last Fifteen Years?,» *European Journal of Operational Research,* pp. 797-814, 2022.

[90] M. E. Salveson, «The Assembly Line Balancing Problem,» *Journal of Industrial Engineering,* cilt 6, no. 3, pp. 18-25, 1955.

[91] A. Fernández Pérez, Adaptation of Some Assembly Line Balancing Heuristics to a Mixed-Model Case, Ghent: Ghent University, 2012.

[92] A. Helbert, Artist, *Kauçuk Bantlı Konveyör.* [Art]. Utku Konveyör Makina Turz. İnş. San. ve Tic. Ltd. Şti., 2017.

[93] Springer, «Chapter 5 Networks with Congestion,» 12 9 2020. [Çevrimiçi]. Available: https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-3-662-04197-0_20?pdf=chapter+toc. [Erişildi: 5 13 2024].

[94] T. L. Urban ve W. C. Chiang , «An Optimal Piecewise-Linear Program for The U-Line Balancing Problem with Stochastic Task Times,» *European Journal of Operational Research,* cilt 168, no. 3, pp. 109-120, 2006.

[95] A. Altiparmak , A. Bugak ve B. Dengiz, «Optimization of Buffer Sizes in Assembly Systems Using Intelligent Techniques,» %1 içinde *In Proceedings of Winter Simulation Conference,* San Diego, USA, 2002.

[96] K. D'Souza ve S. Khator, «System Reconfiguration to Avoid Deadlocks in Automated Manufacturing Systems,» *Computers & Industrial Engineering,* cilt 32, no. 2, pp. 445-465, 1997.

[97] M. Hamada, H. Martz , E. Berg ve A. Koehler, «Optimizing the Product-Based Avaibility of A Buffered Industrial Process,» *Reliability Engineering & System Safety,* cilt 91, no. 9, pp. 1039-1048, 2006.

[98] S. Gershwin ve J. Schor, «Efficient Algorithms for Buffer Space Allocation,» *Annals of Operations Research,* cilt 93, no. 4, pp. 117-144, 2000.

[99] Wikipedia, «Vikipedi,» 28 Mart 2022. [Çevrimiçi]. Available: https://tr.wikipedia.org/wiki/Tam_Zaman%C4%B1nda. [Erişildi: 9 Mart 2023].

[100] N. Thomopoulos, «Mixed Model Line Balancing with Smoothed Station Assignments,» *Management Science,* cilt 16, no. 9, pp. 593-603, 1970.

[101] A. Simaria ve P. Vilarinho, «A Genetic Algorithm Based Approach to The Mixed Model Assembly Line Balancing Problem of Type II,» *Computers & Industrial Engineering,* cilt 47, no. 4, pp. 391-407, 2004.

[102] S. Mansouri, «A Multi-Objective Genetic Algorithm for Mixed-Model Sequencing on JIT Assembly Lines,» *European Journal of Operational Research,* cilt 167, no. 3, p. 696–716, 2005.

[103] S. Karabati ve S. Sayin, «Assembly Line Balancing in A Mixed-Model Sequencing Environment with Synchronous Transfers,» *European Journal of Operational Research,* cilt 149, no. 2, p. 417–429, 2003.

[104] C. Merengo, F. Nava ve A. Pozzetti, «Balancing and Sequencing Manual Mixed-Model Assembly Lines,» *International Journal of Production Research,* cilt 37, no. 12, pp. 2835-2860, 1999.

[105] A. Scholl ve C. Becker, Artists, *Assembly Lines for Single and Multiple Products.* [Art]. 2003.

[106] P. Pinto , D. Dannenbring ve et al, «A Branch and Bound Algorithm for Assembly Line Balancing with Paralleling,» *International Journal of Production Research,* cilt 13, no. 2, pp. 183-196, 1975.

[107] J. Miltenburg ve J. Wijngaard, «U-Line Balancing Problem,» *Management Science,* cilt 40, no. 10, p. 1378–1388, 1994.

[108] J. Miltenburg, «The Effect of Breakdowns on U-Shaped Production Lines,» *International Journal of Production Research,* cilt 38, no. 2, pp. 353-364, 2000.

[109] Y. Kim ve J. Kim, «A Co-evolutionary Algorithm for Balancing and Sequencing in Mixed Model Assembly Lines,» *Applied Intelligence,* cilt 13, no. 3, pp. 247-258, 2000.

[110] J. Bartholdi, «Balancing Two-Sided Assembly Lines: A Case Study,» *International Journal of Production Research,* cilt 31, no. 10, pp. 2447-2461, 1993.

[111] A. Agnetis , A. Ciancimino ve M. Lucertini, «Balancing Flexible Lines for Car Components Assembly,» *International Journal of Production Research,* cilt 33, no. 2, pp. 333-350, 1995.

[112] O. Rubiano, Artist, *Two-Sided Assembly Line.* [Art]. Ingenieria y Universidad, 2009.

[113] T. Fujimoto, Evolution of Manufacturing Systems at Toyota, Tokyo: Productivity Press, 2001.

[114] Y. Monden, Toyota Production System: An Integrated Approach to Just-In-Time, Tokyo: Productivity Press, 2011.

[115] Sailrail Automated Systems Inc., «Sailrail,» [Çevrimiçi]. Available: https://sailrail.com/l-shape. [Erişildi: 14 Mart 2023].

[116] M. Chica, Ó. Cordón ve S. Damas, «An Advanced Multiobjective Genetic Algorithm Design for The Time and Space Assembly Line Balancing Problem,» *Computers & Industrial Engineering,* cilt 61, no. 1, pp. 103-117, 2011.

[117] N. Hamta, G. Fatemi ve F. Jolai, «A Hybrid PSO Algorithm for A Multi-Objective Assembly Line Balancing Problem with Flexible Operation Times, Sequence-Dependent Setup Times and Learning Effect,» *International Journal of Production Economics,* cilt 141, no. 1, p. 99–111, 2013.

[118] S. Ponnambalam ve Aravindan P, «A Multi-Objective Genetic Algorithm for Solving Assembly Line Balancing Problem,» *International Journal of Advanced Manufacturing Technology,* cilt 16, no. 5, pp. 341-352, 2000.

[119] N. Wei ve I. Chao, «A Solution Procedure for Type E-Simple Assembly Line Balancing Problem,» *Computers & Industrial Engineering,* cilt 61, no. 3, pp. 824-830, 2011.

[120] A. Nourmohammadi ve M. Zandieh, «Assembly Line Balancing by A New Multi-Objective Differential Evolution Algorithm Based on TOPSIS,» *International Journal of Production Research,* cilt 49, no. 10, pp. 2833-2855, 2011.

[121] R. Hwang, H. Katayama ve M. Gen, «U-Shaped Assembly Line Balancing Problem with Genetic Algorithm,» *International Journal of Production Research,* cilt 46, no. 16, p. 4637–4649, 2018.

[122] R. Johnson, «A Branch and Bound Algorithm for Assembly Line Balancing Problems with Formulation Irregularities,» *Management Science,* cilt 29, no. 11, pp. 1309-1324, 1983.

[123] A. Chakravarty , «Line Balancing with Task Learning Effects,» *IEE Transactions,* cilt 20, no. 2, pp. 186-193, 1988.

[124] N. Hop , «A Heuristic Solution for Fuzzy Mixed-Model Line Balancing Problem,» *European Journal of Operational Research,* cilt 168, no. 3, pp. 798-810, 2006.

[125] W. Xu ve T. Xiao, «Strategic Robust Mixed Model Assembly Line Balancing Based on Scenario Planning,» *Tsinghua Science and Technology,* cilt 16, no. 3, pp. 308-314, 2011.

[126] P. Chutima, «A Comprehensive Review of Robotic Assembly Line Balancing Problem,» *Journal of Intelligent Manufacturing,* cilt 33, no. 2, pp. 1-34, 2020.

[127] J. Rubinovitz ve J. Bukchin, Design and Balancing of Robotic Assembly Lines, Pittsburgh: P.A, 1991.

[128] F. Rollison, Artist, *Industry 4.0 and The Digital Transformation of The Automotive Industry.* [Art]. Fred Rollison Photography, 2014.

[129] Z. Li, N. Dey, A. Ashour ve Q. Tang, «Discrete Cuckoo Search Algorithms for Two-Sided Robotic Assembly Line Balancing Problem,» *Neural Computing and Applications,* cilt 30, no. 9, p. 2685–2696, 2018.

[130] K. Ergün, Kombinatoryal Optimizasyon, Balıkesir: Balıkesir Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Endüstri, 2015.

[131] V. Pachghare ve R. Dalu, «Assembly Line Balancing – A Review,» *International Journal of Science and Research (IJSR),* cilt 3, no. 3, pp. 807-811, 2014.

[132] R. Johnson, «Optimally Balancing Large Assembly Lines with "Fable",» *Manage Sci,* cilt 34, no. 2, pp. 240-253, 1988.

[133] S. Liu, K. Ng ve H. Ong, «Branch-and-Bound Algorithms for Simple Assembly Line Balancing Problem,» *International Journal of Advanced Manufacturing Technology,* cilt 17, no. 36, pp. 169-177, 2008.

[134] W. Helgeson ve D. Birnie, «Assembly Line Balancing Using the Ranked Positional Weighting Technique,» *Journal of Industrial Engineering,* cilt 12, pp. 394-398, 1961.

[135] V. P. Jaganathan, «Line Balancing Using Largest Candidate Rule Algorithm in A Garment Industry:A Case Study,» *Lean Thinking* , cilt 5, no. 1, pp. 1-11, 2014.

[136] İ. Küçükkoç, Montaj Hattı Tasarımı ve Analizi Ders Notları, Balıkesir: Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, 2016.

[137] A. Arcus, «COMSOAL: A Computer Method of Sequencing Operations for Assembly Lines,» *International Journal of Production Research,* cilt 4, pp. 259-277, 1966.

[138] G. DePuya ve G. Whitehouse, «Applying the COMSOAL Computer Heuristic to The Constrained Resource Allocation Problem,» *Computers & Industrial Engineering,* cilt 38, pp. 423-422, 2000.

[139] F. Glover ve M. Laguna, Tabu Search In Modern Heuristics for Combinatorial Problems, Blackwell Scientific Publishing, 1993.

[140] B. Jarraya ve A. Bouri, «Metaheuristic Optimization Backgrounds: A Literature Review,» *International Journal of Contemporary Business Studies,* cilt 3, no. 12, pp. 31-42, 2012.

[141] A. Yemane ve T. Meraha, «Productivity Improvement through Line Balancing by Using Simulation Modeling (Case study Almeda Garment Factory),» *Journal of Optimization in Industrial Engineering,* cilt 13, no. 1, pp. 153-165, 2020.

[142] D. Kelton, Simulation with Arena, Boston: Mc Graw Hill, 2006.

[143] S. Bahadir, Assembly Line Balancing in Garment Production by Simulation, İstanbul: Theory and Practice, 2011.

[144] S. Amaran, N. Sahinidis, B. Sharda ve S. Bury, «Simulation Optimization: A Review of Algorithms and Applications,» *Ann Oper Res.*, cilt 2, no. 40, pp. 351-380, 2016.

[145] Q. Dang ve K. Pham, «Design of A Footwear Assembly Line Using Simulation-Based ALNS,» *Procedia CIRP*, cilt 4, no. 1, pp. 596-601, 2016.

[146] E. Juan, Simulation-Based Optimization for Production Planning: Integrating Meta-Heuristics, Simulation and Exact Techniques toAddress the Uncertainty and Complexity of Manufacturing Systems, Manchester: Alliance Manchester Business School, 2016.

[147] M. Yegul, F. Erenay ve M. Yavuz, «Improving Configuration of Complex Production Lines via Simulation-Based Optimization,» *ComputInd Eng*, cilt 10, no. 9, pp. 295-312, 2017.

[148] S. Alvandi, W. Li ve S. Kara, «An Integrated Simulation Optimisation Decision Support Tool for Multi-Product Production Systems,» *Modern Applied Science*, cilt 11, no. 6, pp. 56-71, 2017.

[149] V. Nasteski, An Overview of The Supervised Machine Learning Methods, Bitola, Macedonia: Faculty of Information and Communication Technologies, 2017.

[150] A. Talwar ve Y. Kumar, «Machine Learning: An Artificial Intelligence Methodology,» *International Journal of Engineering and Computer Science*, cilt 2, no. 4, pp. 3400-3404, 2013.

[151] C. Rich ve N. Alexandru, «An Empirical Comparison of Supervised Learning Algorithms,» %1 içinde *In Proceeding ICML '06 Proceedings of The 23rd International Conference on Machine Learning*, Pittsburgh, Pennsylvania, USA, 2006.

[152] J. Delu, «IBM,» IBM Cloud, 12 3 2021. [Çevrimiçi]. Available: https://www.ibm.com/cloud/blog/supervised-vs-unsupervised-learning#:~:text=Supervised%20learning%20is%20a%20machine,accuracy%20and%20learn%20over%20time.. [Erişildi: 5 7 2023].

[153] J. M. Carew, «Tech Target,» 12 2 2023. [Çevrimiçi]. Available: https://www.techtarget.com/searchenterpriseai/definition/reinforcement-learning#:~:text=Reinforcement%20learning%20is%20a%20machine,learn%20through%20trial%20and%20error.. [Erişildi: 5 7 2023].

[154] B. Mahesh, «Machine Learning Algorithms-A Review,» *International Journal of Science and Research (IJSR)*, cilt 9, no. 1, pp. 381-386, 2020.

[155] M. İşler, M. Küçük ve M. Güner, Konfeksiyon Üretiminde Bir Operasyon İçin İki Farklı Yöntem İle İş Ölçümü Uygulaması, Karabük: ISITES, 2014.

[156] Brasil Association, MTM, "Notes on the Basic MTM Method", São Paulo: Brasil Association, 2005.

[157] mtm.org, «MTM Association,“MTM Association",» 14 2 2009. [Çevrimiçi]. Available: http://www.mtm.org/Ticon.ppt. [Erişildi: 4 6 2023].

[158] L. Denis ve C. João, Analysis of the Methods Time Measurement (MTM) Methodology through its Application in Manufacturing Companies, Brazil : Universidade Federal de Santa Catarina, 2017.

[159] M. Sugai, Evaluation on The Use of MTM (Methods-Time Measurement) in A Metal-Machanical Company, Portuguese: Universidade Estadual de Campinas, 2003.

[160] S. Özhan, Örme Konfeksiyon Sektöründe Gsd Yöntemi Yardımıyla Üretim Öncesi Sürelerin Belirlenmesi Ve Bant Dengelemesinin Yapılması, İstanbul: İTÜ-FBE Tekstil Mühendisliği, 1999.

[161] wordpress, «Textile Library,» 1 8 2018. [Çevrimiçi]. Available: https://textilelibrary.wordpress.com/2018/08/01/an-introduction-to-gsd-general-sewing-data/. [Erişildi: 15 6 2023].

[162] M. HASAN, Application of Motion Study in Garments Production, Dhaka, Bangladesh: Daffodil International University, 2012.

[163] H. Kutlak, İ. Düzdar ve İ. Uygur, «Otomotiv Sektöründe Çok Modelli Bir Montaj Hattının Mevcut Durum Analizi,» *Journal of Advanced Technology Sciences*, cilt 6, no. 1, pp. 23-32, 2017.

[164] S. Aksuoğlu ve A. Yıldız, «İşgören Verimliliğinin Zaman Etüdüyle Ölçümünde REFA Uygulaması: Bir Kamu Kurumu Örneği,» *Journal of Business Research-Turk*, cilt 14, no. 1, pp. 370-388, 2022.

[165] S. A. Von, Die Entwicklungsgeschichte der Stoppuhr und ihre Verwendung als Rationalisierungsinstrument, Germany: Technikgeschichte Bd, 2007.

[166] E. Keogh ve S. Kasetty, «On the Need for Time Series Data Mining Benchmarks: A Survey and Empirical Demonstration,» *Data Mining and Knowledge Discovery*, cilt 7, no. 4, pp. 349-471, 2003.

[167] J. Faouzi, «Time Series Classification: A Review of Algorithms and Implementations,» %1 içinde *Sorbonne Universit´e Brain Institute*, Paris, 2022.

[168] L. T. Prisca, «Reduction of Sewing Bottleneck Problem by Using Assembly Line Balancing,» *International Journal of Engineering Research And Management (IJERM)*, cilt 8, no. 3, pp. 2349-2058, 2021.

[169] H. Ding, G. Trajcevski, P. Scheuermann ve W. Xiaoyue, «Querying and Mining of Time Series Data: Experimental Comparison of Representations and Distance Measures,» *Proceedings of the VLDB Endowment,*, cilt 1, no. 2, p. 2008, 1542-1552.

[170] A. Bagnall, A. Bostrom, J. Large ve J. Lines, The Great Time Series Classification Bake Off: A Review and Experimental Evaluation of Recently Proposed Algorithms, Norwich, Norfolk: Data Mining and Knowledge Discovery,, 2017.

[171] G. Batista, E. Keogh, O. Tataw ve V. D. Souza, «CID: An Efficient Complexity-Invariant Distance Measure for Time Series,» *Data Mining and Knowledge Discovery,* cilt 29, no. 3, pp. 634-669, 2014.

[172] J. Lines ve G. Oastler, TS-QUAD: A Smaller Elastic Ensemble For Time Series Classification With No Reduction In Accuracy, Norwich: United Kingdom: University of East Anglia, 2016.

[173] L. Ye ve E. Keogh, «Time Series Shapelets: A Novel Technique That Allows Accurate, Interpretable and Fast Classification,» *Data Mining and Knowledge Discovery,* cilt 22, no. 2, p. 149–182, 2011.

[174] A. Mueen, E. Keogh ve N. Young, «Logical-Shapelets: An Expressive Primitive for Time Series Classification,» %1 içinde *Knowledge Discovery and Data Mining Proceedings of The 17th ACM SIGKDD*, Berlin, 2011.

[175] E. Yemini, T. Jucikas, L. Grundy, A. Brown ve W. Schafer, «A Database of Caenorhabditis Elegans Behavioral Phenotypes,» *Nat Methods,* cilt 10, no. 9, pp. 877-879, 2013.

[176] J. Lin, R. Khade ve Y. Li, «Rotation-Invariant Similarity in Time Series Using Bag-of-Patterns Representation,» *Journal of Intelligent Information Systems,* cilt 39, no. 2, p. 287–315, 2012.

[177] J. Lines, S. Taylor ve A. Bagnall, «Time Series Classification with HIVE-COTE: The Hierarchical Vote Collective of Transformation-Based Ensembles,» *ACM Transactions on Knowledge Discovery from Data*, cilt 52, no. 2, pp. 1-35, 2018.

[178] Hitit Üniversitesi, «hitit.edu,» [Çevrimiçi]. Available: https://web.hitit.edu.tr/dosyalar/materyaller/omurdemirer-hititedutr_27903_15122019_1A8L.pdf. [Erişildi: 13 5 2024].

[179] yalinenstitu, «Yalin Enstitü,» 2016 7 21. [Çevrimiçi]. Available: https://www.lean.org.tr/cevrim-suresi-cycle-time-nedir/. [Erişildi: 13 5 2024].

[180] Corning Data Experience Matters , «Corning Data,» [Çevrimiçi]. Available: https://corningdata.com/what-is-production-line-balancing/. [Erişildi: 13 5 2024].

ÖZGEÇMİŞ

Canberk Elmalı, Marmara Üniversitesi Tekstil Mühendisliği Bölümü'nden 2020 yılında mezun oldu. Lisanstan sonra, Tekstil Mühendisi olarak hazır giyim sektöründe faaliyet gösteren firmaların tedarik planlama ve kalite departmanlarında çalıştı. Halen Marmara Üniversitesi Tekstil Mühendisliği Bölümünde yüksek lisans yapmakta. 11 Nisan 2022 tarihinden itibaren Marmara Üniversitesi Tekstil Mühendisliği Bölümü'nde Araştırma Görevli olarak çalışmakta ve kariyerine akademisyen olarak devam etmekte. Araştırma alanları arasında; montaj hattı dengeleme, makine öğrenmesi, kalite kontrol, endüstri 4.0, yalın üretim, verimlilik, istatistiksel proses kontrol ve hazır giyim yer almaktadır.