



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

BEYAZ EŞYA ÜRETİMİNDE MONTAJ
HATTI DENGELEME VE OPTİMİZASYONU:
ÇAMAŞIR MAKİNESİ ÖRNEĞİ

Bengü ÖZSUBAŞI PEK

YÜKSEK LİSANS UYGULAMA PROJESİ

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Aralık-2025
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

YÜKSEK LİSANS UYGULAMA PROJESİ

BEYAZ EŞYA ÜRETİMİNDE MONTAJ HATTI DENGELEME VE OPTİMİZASYONU: ÇAMAŞIR MAKİNESİ ÖRNEĞİ

Bengü ÖZSUBAŞI PEK

**Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Doç. Dr. Ahmet SARUCAN

20 Aralık 2025, 28 Sayfa

Jüri

**Prof. Dr. Saadettin Erhan KESEN
Doç. Dr. Ahmet SARUCAN
Dr. Öğr. Üyesi Ece ÇETİN YAĞMUR**

Üretim sistemlerinde montaj hattı dengeleme, iş istasyonlarının verimli çalışması ve üretim süresinin optimize edilmesi açısından kritik bir öneme sahiptir. Bu projede, beyaz eşya sektörüne yönelik olarak, çamaşır makinesi montaj hattı örneği üzerinden performans analizi ve iyileştirme çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Çalışmada, üretim süreci Tambur Ünitesi ve Gövde Ünitesi'nin ayrı makinelerde hazırlanması ile başlamış; bu parçalar Montaj Presinde birleştirilmiş ve ardından Elektrik Donanımı Montaj İstasyonu ile Fonksiyon Testi İstasyonundan geçirilerek nihai ürün oluşturulmuştur. Hatalı ürünler ayıklanmış, hatasız ürünler depoya sevk edilmiştir.

Sistem, ARENA simülasyon yazılımı kullanılarak modellenmiş ve makinelerin işlem süreleri, istasyonlar arası kuyruklar ve vardiya düzeni dikkate alınarak performans ölçütleri hesaplanmıştır. Analizlerde makinelerin kullanım oranları, kuyrukta bekleme süreleri, depoya sevk edilen ürün sayısı ve ürünlerin sistemde geçirdiği ortalama süreler incelenmiştir.

Simülasyon sonuçları, mevcut hattın darboğazlarını ortaya koymuş ve bu darboğazları gidermeye yönelik alternatif bir sistem önerisi geliştirilmiştir. Önerilen modelin uygulanmasıyla, üretim hattının verimliliğinde anlamlı bir iyileşme sağlandığı gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Beyaz Eşya Üretimi, Çamaşır Makinesi, Montaj Hattı Dengeleme, Optimizasyon, Performans Analizi, Simülasyon, Veri Analizi

ABSTRACT

MS PROJECT

ASSEMBLY LINE BALANCING AND OPTIMIZATION IN WHITE GOODS PRODUCTION: THE CASE OF WASHING MACHINE

Bengü ÖZSUBAŞI PEK

**Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Industrial Engineering**

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Ahmet SARUCAN

20 December 2025, 28 Pages

Jury

**Prof. Dr. Saadettin Erhan KESEN
Assoc. Prof. Dr. Ahmet SARUCAN
Dr. Lecturer Ece ÇETİN YAĞMUR**

Assembly line balancing in production systems is of critical importance for the efficient operation of workstations and the optimization of production time. In this project, performance analysis and improvement studies were conducted on a washing machine assembly line as a case study within the white goods sector.

In the study, the production process began with the preparation of the Drum Unit and the Body Unit at separate machines. These components were then assembled on the Assembly Press and subsequently processed through the Electrical Components Assembly Station and the Function Test Station to produce the final product. Defective units were removed, and fault-free products were sent to storage.

The system was modeled using ARENA simulation software, and performance metrics were calculated considering machine processing times, queues between stations, and shift schedules. The analysis included machine utilization rates, average waiting times in queues, the number of units sent to storage, and the average time products spent in the system.

Simulation results revealed the bottlenecks in the existing line and an alternative system was proposed to address these issues. Implementation of the proposed model demonstrated a significant improvement in the efficiency of the production line.

Keywords: Assembly Line Balancing, Data Analysis, Optimization, Performance Analysis, Simulation, Washing Machine, White Goods Production

ÖNSÖZ

Akademik yetkinliklerimi geliştirmek amacıyla yürüttüğüm yüksek lisans sürecim, veri analizi ve simülasyon-optimizasyon alanlarındaki ilğimle birleşerek bu akademik çalışmanın temelini oluşturmuştur. Teorik altyapının pratik uygulamalarla bütünleştiğı ve somut çıktıların elde edildiğı bu süreç, akademik birikimime değerli katkılar sağlamıştır.

Tezin planlanmasından sonuçlanmasına kadar geçen süreçte, akademik desteğini ve rehberliğini benden esirgemeyen danışmanım Doç. Dr. Ahmet SARUCAN'a teşekkürlerimi bir borç bilirim. Ayrıca manevi destekleriyle her zaman yanımda olan aileme ve sevgili eşim Yavuz Selim PEK'e içtenlikle teşekkür ederim.

Bengü ÖZSUBAŞI PEK
KONYA-2025

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
1. GİRİŞ	1
1.1. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı.....	1
1.2. Araştırma Yöntemi	2
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
2.1. Literatüre Katkı.....	4
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	6
3.1 Üretim Sisteminin Ana Bileşenleri	6
3.2 Problemin Tanımı ve Mevcut Sistemin Akışı.....	6
3.3. Simülasyon Yöntemi.....	8
3.3.1. Simülasyon Yönteminin Kullanılmasının Gerekçelendirilmesi	8
3.3.2. Ayrık Olaylı Simülasyon	8
3.4. ARENA Yazılımı ve Modelin Oluşturulması.....	9
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	13
4.1. Girdilerin Analizi	13
4.1.1. Parça Varış Sürelerinin Dağılımları.....	13
4.1.2 İşlem Sürelerinin Dağılımları	13
4.2. Mevcut Sistemin Performans Analizi	14
4.2.1. Kaynak Kullanım Oranları ve Darboğaz Tespiti	14
4.3. Hat Dengeleme Senaryoları ve Sonuçların Karşılaştırılması	15
4.3.1. Hat Dengeleme Stratejisi	15
4.4. Performans Kriteri İçin Güven Aralığının Belirlenmesi ve Gerekli Deneme Sayısının Hesaplanması	16
4.4.1 Mevcut Durum için Montaj Pres Makinesinde Kuyrukta Bekleme Süresine Göre Gerekli Deneme Sayısının Hesaplanması.....	16
4.4.1 Hat Dengeleme Sonrası için Montaj Pres Makinesinde Kuyrukta Bekleme Süresine Göre Gerekli Deneme Sayısının Hesaplanması	17
4.5 Mevcut Sistem ve Dengelenmiş Hat Sisteminin Karşılaştırılması	17
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	19
5.1 Sonuçlar	19
5.2 Öneriler	19

KAYNAKLAR	21
------------------------	-----------

1. GİRİŞ

Endüstriyel üretim süreçlerinde verimlilik ve etkin zaman yönetimi, işletmelerin rekabet gücünü belirleyen en önemli unsurlardan biridir. Özellikle beyaz eşya gibi seri üretimin yoğun olduğu sektörlerde, üretim hattının düzgün planlanması, makinelerin verimli kullanımı ve iş istasyonları arasındaki iş yükünün dengelenmesi kritik bir rol oynamaktadır. Montaj hattı dengeleme, bu noktada, üretim süresini kısaltmak, darboğazları azaltmak ve maliyetleri düşürmek için etkili bir yöntem olarak öne çıkmaktadır.

Bu çalışmada, beyaz eşya sektörüne odaklanarak, çamaşır makinesi üretim hattı üzerinden montaj hattı dengeleme ve optimizasyon süreci ele alınmıştır. Çalışma kapsamında, hattın performansını daha iyi anlayabilmek için veri analizi ve simülasyon teknikleri kullanılmış; mevcut sistemin güçlü ve zayıf yönleri ortaya konmuş, ardından iyileştirme önerileri geliştirilmiştir. Amaç, iş istasyonlarının kullanım oranlarını artırmak, üretim süresini optimize etmek ve genel olarak hattın verimliliğini yükseltmektir.

Tezin ilerleyen bölümlerinde ilk olarak literatür taraması ile montaj hattı dengeleme, simülasyon ve optimizasyon konularında yapılan güncel çalışmalar incelenmiştir. Daha sonra, çamaşır makinesi montaj hattı modellenmiş ve ARENA simülasyon yazılımı kullanılarak performans analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bulgular doğrultusunda, darboğazları giderici ve hattın etkinliğini artırıcı iyileştirme senaryoları geliştirilmiş ve mevcut sistem ile karşılaştırmalar yapılmıştır.

Bu çalışma, akademik literatüre katkı sağlamanın yanı sıra, beyaz eşya üretiminde montaj hattı dengeleme ve optimizasyon uygulamaları için pratik bir rehber niteliği taşımaktadır. Ayrıca süreç boyunca elde edilen deneyimler, üretim hattı tasarımı ve verimlilik artırma çalışmalarına ilham verecek niteliktedir.

1.1. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Bu çalışmanın temel amacı, beyaz eşya üretiminde, özellikle çamaşır makinesi montaj hattında, iş istasyonlarının verimli kullanımını sağlamak, darboğazları belirlemek ve hattın genel performansını artırmak için simülasyon ve optimizasyon tekniklerini uygulamaktır. Üretim süreçlerinde hat dengeleme hem üretim süresini kısaltmak hem de maliyetleri düşürmek açısından kritik öneme sahiptir. Bu bağlamda çalışma hem teorik hem de uygulamalı bir yaklaşım sunmayı hedeflemektedir.

Çalışmanın kapsamı şu şekilde belirlenmiştir:

1. Çamaşır makinesi üretim hattının modellenmesi ve iş istasyonlarının iş yüklerinin belirlenmesi.
2. Hattın performansının simülasyon yöntemleri ile analiz edilmesi; makinelerin kullanım oranları, kuyrukta bekleme süreleri ve ürünlerin hattaki ortalama süreleri gibi performans ölçütlerinin incelenmesi.
3. Mevcut hattın darboğazlarının belirlenmesi ve bu darboğazları gidermeye yönelik optimizasyon önerilerinin geliştirilmesi.
4. Önerilen sistem ile mevcut sistemin karşılaştırılarak iyileştirmenin etkinliğinin değerlendirilmesi.

Bu kapsamda, çalışma hem akademik literatüre katkı sağlamayı hem de beyaz eşya üretiminde montaj hattı tasarımı ve verimlilik artırma çalışmalarında uygulanabilir bilgiler sunmayı amaçlamaktadır.

1.2 Araştırma Yöntemi

Bu çalışmada, çamaşır makinesi üretim hattının performansını değerlendirmek ve iyileştirme önerileri geliştirmek amacıyla simülasyon ve optimizasyon yöntemleri kullanılmıştır. Öncelikle üretim hattındaki iş istasyonları ve süreçler modellenmiş; her bir istasyonun işlem süresi, kapasitesi ve iş yükü belirlenmiştir. Ardından, sistemin performansını anlamak için ARENA simülasyon yazılımı kullanılarak mevcut hattın çalışması bilgisayar ortamında canlandırılmıştır.

Simülasyon sonuçları, makinelerin kullanım oranları, kuyrukta bekleme süreleri ve ürünlerin sistemde geçirdiği süreler gibi performans ölçütlerini ortaya koymuştur. Mevcut sistemde belirlenen darboğazlar ve verimsizlikler doğrultusunda, iş istasyonlarının iş yüklerini dengelemeye yönelik alternatif senaryolar ve optimizasyon önerileri geliştirilmiştir. Son aşamada, önerilen sistem ile mevcut sistem karşılaştırılmış ve yapılan iyileştirmenin etkinliği değerlendirilmiştir.

Bu yöntem hem analitik hem de uygulamalı bir yaklaşım sunarak, üretim hattı dengeleme ve verimlilik artırma sürecini sistematik bir şekilde incelemeyi mümkün kılmıştır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Montaj hattı dengeleme ve üretim hattı optimizasyonu, özellikle beyaz eşya ve ev aletleri üretiminde üretim verimliliğinin artırılması, darboğazların giderilmesi ve iş istasyonlarının etkin kullanımının sağlanması açısından kritik bir araştırma alanı olarak kabul edilmektedir. Literatürde hem Türkiye hem de uluslararası çalışmalar, bu konuyu farklı yöntem ve yaklaşımlarla ele almış, simülasyon ve optimizasyon tekniklerini kullanarak hem teorik hem de uygulamalı sonuçlar ortaya koymuştur. Aşağıda, ilgili makaleler özetlenmiştir:

Akyol (2023), çalışmasında endüstriyel buzdolabı üretim hattında montaj hattı dengeleme ve işgücü atama problemleri ele alınmıştır. Tam sayılı doğrusal matematiksel model kullanılarak işlerin ve iş istasyonlarının optimal dağılımı belirlenmiş ve çözümlenmiştir. Sonuçlar, hattın çevrim süresinin belirgin şekilde azalmasını ve hattın etkinliğinin önemli ölçüde artmasını göstermiştir.

Arslankaya (2022), beyaz eşya üretim hattında iş yüklerinin dengesiz dağılımını incelemiş ve farklı sezgisel ve analitik yöntemler kullanarak hattın dengeleme düzeyini iyileştirmeye odaklanmıştır. İş istasyonları arasındaki iş yükü dağılımının optimize edilmesi sağlanmıştır.

Canbazoglu ve Kahya (2023) tarafından yapılan çalışmada, montaj hattı dengeleme problemi, klasik verimlilik ölçütlerinin yanı sıra ergonomik risk faktörlerini de içerecek şekilde incelenmiştir. Üretim hatlarındaki iş istasyonlarının sadece hız bazında değil, aynı zamanda işçi sağlığı üzerindeki fiziksel yüke göre de tasarlanması gerektiği ele alınmıştır.

Ergüt (2019), akademik çalışmasında montaj hattı üretim sistemini modellemiş ve simülasyon sonuçları kullanılarak hattın performansı detaylı biçimde analiz edilmiştir. Analiz, iş istasyonlarındaki darboğazları ve hattın genel performansını içermektedir.

Eryürük, Kalaoğlu ve Baskak (2014), yaptıkları çalışma ile bir konfeksiyon işletmesinde etek üretim hattının verimliliğini artırmak amacıyla montaj hattı dengelemesi yapmıştır. Konum ağırlıklı yöntem kullanılarak istasyonlara atamalar yapılmış ve hat etkinliği analiz edilmiştir.

Kaymaz ve Çavdur (2022), çalışmalarında yeniden işleme istasyonlarının paralel görevler için kullanımını hem matematiksel programlama hem de simülasyon

yöntemleri ile analiz eden çalışma, üretim hattının performansını iyileştirmeye yönelik çözüm önerileri sunmaktadır.

Kılınççı (2023), kaynak ve sıra bağımlı hazırlık süreleri dikkate alınarak genetik algoritmalarla çözüm önerileri geliştirilmiştir. Çalışma, montaj hattı dengeleme problemlerine dair yapay zekâ tabanlı yaklaşımları analiz etmeyi hedefler.

Kuğu, Yolcan ve Köse (2023), kondenser üretim hattında Arena16.1 simülasyon yazılımı kullanılarak hat dengeleme çalışması yapılmıştır. Simülasyon sonuçları, üretim hattının performansını analiz etmek ve darboğazları tespit etmek için kullanılmıştır.

Scholl ve Becker (2006), çalışmada montaj hattı dengeleme problemleri ve çözüm yöntemleri detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Makale, literatürdeki farklı modellerin ve çözüm yöntemlerinin sistematik bir özetini sunmaktadır.

Şahin ve Kahya (2018), çalışmada hedef programlama modeli ile ergonomik montaj hattı dengeleme problemi ele alarak çevrim süresini minimize etmiş ve ergonomik riskleri azaltmıştır.

Yetkin ve Kahya (2021), bulaşık makinesi üreten montaj hattında ergonomik dengeleme problemi ele alınmış, çok kriterli karar verme yöntemleri kullanılarak çözüm önerileri geliştirilmiştir.

2.1. Literatüre Katkı

Mevcut literatür incelendiğinde, montaj hattı dengeleme ve optimizasyon çalışmalarının hem Türkiye hem de uluslararası düzeyde birçok sektöre uygulanmış olduğu görülmektedir. Çalışmalar genel olarak üç ana alana odaklanmaktadır: simülasyon tabanlı performans analizi, matematiksel programlama ve optimizasyon yöntemleri ve ergonomi ve işçi sağlığı kriterleri ile dengeleme. Bununla birlikte, beyaz eşya sektöründe, özellikle çamaşır makinesi üretim hattı özelinde uygulamalı ve kapsamlı bir çalışma sayısı sınırlıdır.

Bu çalışmada, çamaşır makinesi üretim hattı simülasyon ve optimizasyon teknikleri kullanılarak detaylı bir şekilde modellenmiş, mevcut hattın darboğazları tespit edilmiş ve alternatif bir dengeleme senaryosu geliştirilmiştir. Bu sayede hem hattın performansı artırılmış hem de iş istasyonlarının etkin kullanımı sağlanmıştır. Ayrıca, çalışmanın sonucunda elde edilen bulgular, literatürdeki farklı sektörlerdeki dengeleme yöntemleri ile karşılaştırılabilir nitelikte olup, uygulamalı bir örnek sunarak alanın bilgi birikimine katkı sağlamaktadır.

Özetle, bu proje literatüre şu açılardan katkıda bulunmaktadır:

1. Beyaz eşya üretimi özelinde, çamaşır makinesi montaj hattının uygulamalı simülasyon ve optimizasyon modeli ile incelenmesi.
2. Montaj hattı darboğazlarının belirlenmesi ve verimliliğin artırılmasına yönelik öneriler geliştirilmesi.
3. Literatürde sınırlı sayıda bulunan uygulamalı örnek çalışmalara yeni bir referans sağlanması.
4. Hem akademik hem de endüstriyel uygulamalara yönelik, genel kullanılabilir bir metodoloji sunulması.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1 Üretim Sisteminin Ana Bileşenleri

Beyaz eşya sektörü, Türk sanayisinde teknoloji üreten ve ülke ekonomisine oldukça katkı sağlayan bir imalat sektörüdür. Beyaz eşya sektöründe ve özellikle seri üretim yapan işletmelerde üretim montaj hattı dengeleme çalışması iş istasyonlarında en çok karşılaşılan problemdir (Özdemir ve diğ., 2010). Çamaşır makinesi; mekanik, elektronik ve yapısal birçok bileşenin bir araya getirilmesiyle oluşan karmaşık bir elektromekanik üründür. Bu çalışmada simülasyon modeline konu olan üretim süreci, iki ana bileşenin imalatı ve birleştirilmesine odaklanmaktadır: Gövde ünitesi ve Tambur ünitesi.

Literatürde "kabinet" veya "şasi" olarak da adlandırılan Gövde, makinenin dış iskeletini oluşturan yapısal parçadır. Gövdenin temel işlevi; motor, kazan, süspansiyon sistemleri ve elektronik kartlar gibi tüm iç bileşenleri taşımak, korumak ve makinenin yapısal bütünlüğünü sağlamaktır (Ali ve diğ., 2019). Bu çalışmada Gövde Ünitesi, Sac Kesim ve Büküm Makinesi'nde üretilmektedir.

Tambur ise, "kazan" olarak bilinen sabit su haznesinin içinde yer alan, çamaşırların fiziksel olarak yerleştirildiği, delikli paslanmaz çelikten imal edilmiş döner silindirdir (Ali ve diğ., 2019). Yıkama ve sıkma işlemleri bu parçanın dönme hareketi ile sağlanmaktadır. Çalışmada bu parça, Metal Şekillendirme Makinesi'nde üretilmektedir.

Bu çalışmanın devamında, bu iki kritik bileşenin üretim ve montaj hattındaki akışları detaylıca incelenmiştir.

3.2 Problemin Tanımı ve Mevcut Sistemin Akışı

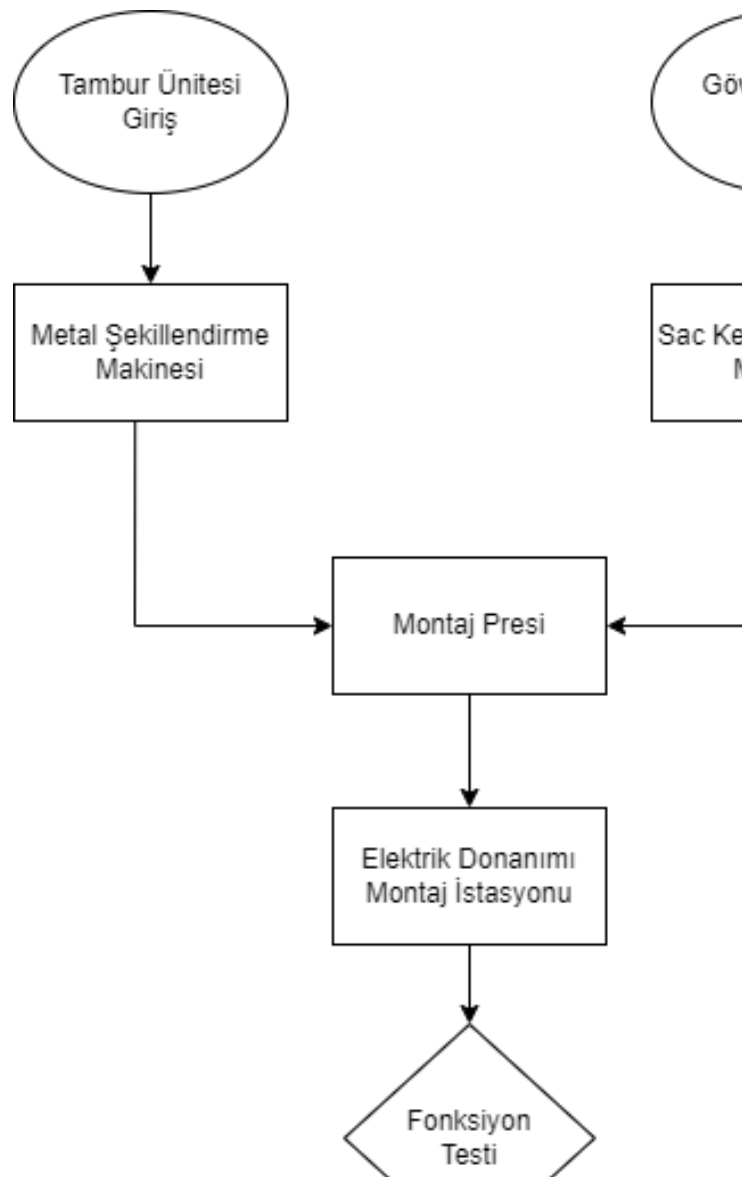
Bu çalışmada ele alınan üretim sistemi, bir çamaşır makinesi montaj hattını modellenmesi hedeflenmiştir. Ele aldığımız montaj hattında, iki temel bileşen olan Tambur ünitesi ve Gövde ünitesinin işlenmesi ve birleştirilmesi üzerine işlem gerçekleştirilmektedir.

Üretim akışı boyunca Gövde ünitesi ve Tambur ünitesi birbirinden farklı ve paralel istasyonlarda işlenmesi ile başlamaktadır. Tambur ünitesi, Metal Şekillendirme Makine'ne yönlendirilmektedir. Gövde ünitesi ise Sac Kesim ve Büküm Makinesi'ne alınmaktadır. Operasyonları ayrı ayrı tamamlanan bu iki yarı-mamul, hattın bir sonraki aşaması olan Montaj Presi istasyonunda bir araya getirilir. Bu birleştirme işleminin

sonucunda çamaşır makinesi ana konstrüksiyonu olarak adlandırılan ana gövde oluşturulmaktadır.

Elde edilen bu ana konstrüksiyon, daha sonra Elektrik Donanımı Montaj İstasyonu'na gönderilmektedir. Bu istasyonda ise, gerekli olan motor, kablo ve diğerk elektronik aksamların montajı yapılarak ürün fonksiyonel olarak tamamlanmaktadır.

Son olarak, montajı biten nihai ürün, kalite kontrol amacıyla "Fonksiyon Testi İstasyonu'na gönderilmektedir. Bu testin sonucuna göre bir karar verilir: standartları karşılayan hatasız ürünler depoya sevk edilirken, testten geçemeyen veya kusurlu bulunan ürünler "hurda" olarak sistemden çıkarılır (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Mevcut Sistemin Akışı

3.3. Simülasyon Yöntemi

Karmaşık üretim sistemlerinde, süreçlerdeki değişkenliklerin ve bileşenler arasındaki etkileşimlerin sadece analitik yöntemlerle hesaplanması genellikle zordur. Bu nedenle, gerçek sistem üzerinde maliyetli ve riskli denemeler yapmak yerine, sistemin bilgisayar ortamında sanal bir kopyasının oluşturulması, yani simülasyon yöntemi tercih edilmiştir. Sistem simülasyonu gerçek sistem üzerinde değişiklik yapılmasının mümkün olmadığı ya da oldukça maliyetli olduğu durumlarda kullanılan bir yöntemdir (Canbulut ve diğ., 2022).

3.3.1. Simülasyon Yönteminin Kullanılmasının Gerekçelendirilmesi

Bu çalışmada simülasyon yönteminin kullanılmasının temel gerekçeleri şunlardır:

Sistemi Bozmadan Deneme Yapabilme: Mevcut üretim hattını durdurmadan, önerilecek iyileştirme senaryolarının sanal ortamda güvenle test edilebilmesi.

Zamanı Etkin Kullanma: Gerçek hayatta haftalarca sürececek üretim verilerinin bilgisayar ortamında çok kısa sürede analiz edilebilmesi.

Değişkenliği Modelleme: İşlem sürelerindeki ve parça varışlarındaki rastgeleliği (stokastik yapıyı) modele dahil ederek gerçeğe en yakın sonuçların elde edilebilmesi.

3.3.2. Ayrık Olaylı Simülasyon

Bu çalışmada, simülasyon tekniğinin özel bir türü olan Ayrık Olaylı Simülasyon yaklaşımı benimsenmiştir. Ayrık olaylı simülasyon; sistem durumunun sürekli olarak değil, olayların meydana geldiği belirli zaman noktalarında değiştiği dinamik sistemlerin modellenmesinde kullanılan en uygun yaklaşımlardan biridir (Zengin, 2004). Bu yaklaşımın seçilmesindeki temel etkenler şunlardır:

Varlıkların Niteliği: İncelenen sistemdeki iş parçaları (Tambur ve Gövde), sürekli bir akış değil, tek tek sayılabilen ve ayırt edilebilen "ayrık" birimlerdir.

Durum Değişimi: Sistem durumu (kuyruk uzunluğu, makine meşguliyeti vb.) sürekli olarak değil, sadece bir parça sisteme girdiğinde veya bir işlem tamamlandığında olay anlarında değişmektedir.

Bu amaçlar doğrultusunda, modelleme aracı olarak ARENA simülasyon yazılımı kullanılmıştır. ARENA, süreçleri akış diyagramları mantığıyla modellemeye imkân tanıyan ve ayrık olaylı simülasyon çalışmaları için yaygın olarak tercih edilen bir araçtır.

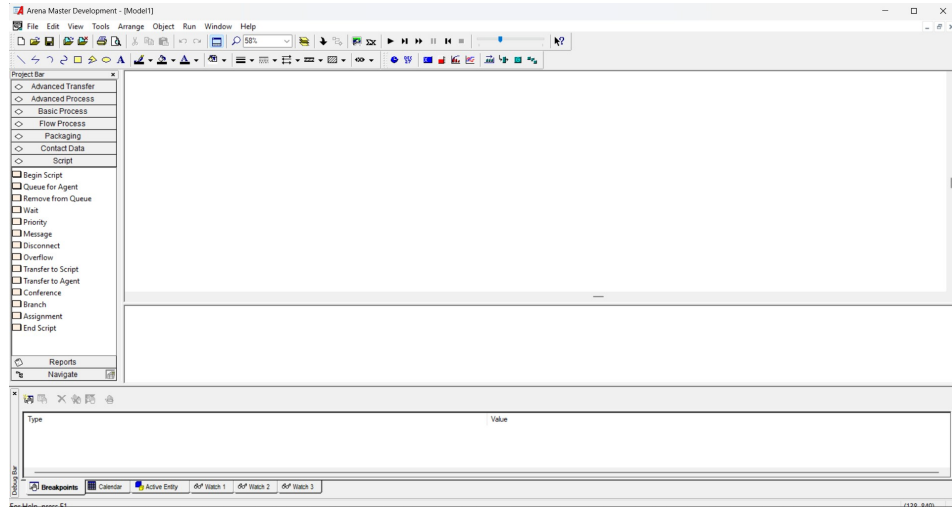
3.4. ARENA Yazılımı ve Modelin Oluşturulması

Arena simülasyon programı, her sistemi tam doğru bir biçimde sanal olarak temsil edebilen animasyonlu simülasyon modelleri oluşturulmasını sağlayan bir paket programdır (Karaca, 2015).

Arena simülasyon programı ile şu senaryolar gerçekleştirilebilir (Karaca, 2015);

- I. Malzeme taşıma sistemlerini de içeren her türlü üretim sisteminin detaylı analizi,
- II. Müşteri yönetimi sistemleri ve karmaşık müşteri hizmetlerinin analizi,
- III. Lojistik ve taşımacılık gibi faaliyetleri de içeren global tedarik zincirlerinin analizi,
- IV. Maliyet, çıkan ürün miktarı, çevrim zamanı anahtar ölçütlerle sistem performans tahmini yapmak,
- V. Süreçlerdeki darboğazları tespit etmek,
- VI. İş gücü, ekipman ve malzeme ihtiyaç planlaması yapmak

Arena Simülasyon Programı ekranı aşağıdaki şekilde gösterilmiştir (Şekil 3.2)



Şekil 3.2. Arena Simülasyon Programı

Modelin oluşturulması aşamasında, sistemdeki gerçek akışı temsil etmek üzere ARENA'nın "Basic Process" panelinde yer alan temel modüller şu amaçlarla kullanılmıştır (Karaca, 2015):

- **Create (Oluşturma) Modülü:** Sistemin başlangıç noktası olan Tambur ve Gövde ünitelerinin akışa girişlerini ve varışlar arası süre dağılımlarını tanımlamak için kullanılmıştır (Şekil 3.3).



Şekil 3.3. Create Modülü Simgesi

- **Process (İşlem) Modülü:** Metal Şekillendirme, Sac Kesim-Büküm, Montaj Presi ve Elektrik Montajı gibi istasyonlardaki işlem sürelerini ve kaynak kullanımlarını modellemek için yapılandırılmıştır (Şekil 3.4).



Şekil 3.4. Process Modülü Simgesi

- **Decide (Karar) Modülü:** Fonksiyon Testi İstasyonu sonrasında ürünlerin kalite durumuna göre "sağlam" veya "hatalı" olarak ayrıştırılması işlemindeki olasılıksal dallanmayı sağlamak için kullanılmıştır (Şekil 3.5).



Şekil 3.5. Decide Modülü Simgesi

- **Assign (Atama):** Sisteme giren varlıkların türünü (Tambur veya Gövde) tanımlamak, işlem sürelerini belirlemek ve sistemde geçirilen süreyi hesaplayabilmek amacıyla varış zamanını (TNOW) bir özellik (attribute) olarak kaydetmek için kullanılmıştır (Şekil 3.6).



Şekil 3.6. Assign Modülü Simgesi

- **Batch (Partileme/Birleştirme):** Tambur ve Gövde ünitelerinin "Montaj Presi" istasyonunda fiziksel olarak birleşerek tek bir "Ana Konstrüksiyon" haline gelmesini modellemek için kullanılmıştır (Şekil 3.7).



Şekil 3.7. Batch Modülü Simgesi

- **Record (Kayıt):** Simülasyon çalışması boyunca sistem performansını ölçmek amacıyla, üretilen toplam ürün sayısı ve sistemde geçirilen süre gibi istatistiksel verileri toplamak için kullanılmıştır (Şekil 3.8).



Şekil 3.8. Batch Modülü Simgesi

- **Dispose (Sonlandırma) Modülü:** Süreci tamamlayarak depoya sevk edilen veya hurdaya ayrılarak sistemden çıkan ürünlerin bitiş noktasını temsil etmek için kullanılmıştır (Şekil 3.9).



Şekil 3.9. Dispose Modülü Simgesi

3.5. Model Verileri ve Girdileri

Bu çalışmada, üretim sisteminin stokastik (rastgele ve değişken) doğasını modele yansıtabilmek amacıyla, parça varışları ve işlem süreleri için deterministik değerler yerine istatistiksel dağılımlar kullanılmıştır.

3.5.1. Parça Varış Süreleri

Modelin iki ana girişi olan 'Tambur' ve 'Gövde' ünitelerinin sisteme gelişleri, birbirinden bağımsız stokastik süreçler olarak ele alınmıştır. Varışların rastgele bir doğaya sahip olduğu varsayımıyla, gelişler arası süreler için Üstel (Exponential) dağılım tercih edilmiştir. Tambur Ünitesi ortalama 5 dakika, Gövde ünitesi ortalama 7 dakika olarak belirlenmiştir.

3.4.2. İşlem Süreleri

İstasyonlardaki operasyon süreleri, gerçek hayattaki zaman değişkenliğini temsil etmek üzere aşağıda belirtilen istatistiksel dağılımlarla tanımlanmıştır:

Metal Şekillendirme Makinesi: İşlem sürelerinin belirli bir ortalama etrafında yoğunlaştığı varsayılarak Normal (6, 1.1) dağılımı kullanılmıştır.

Sac Kesim ve Büküm Makinesi: Sürelerin belirli bir aralıkta rastgele değiştiği kabul edilerek Düzgün (Uniform) (5, 10) dağılımı atanmıştır.

Montaj Presi: Bu istasyon için Normal (9, 0.7) dağılımı uygun görülmüştür.

Elektrik Donanımı Montaj İstasyonu: İşlem süresi Düzgün (8, 12) dağılımı ile modellenmiştir.

Fonksiyon Testi İstasyonu: En iyimser, en olası ve en kötümser sürelerin dikkate alındığı Üçgen (Triangular) (7, 8, 9) dağılımı kullanılmıştır.

3.5. Deney Tasarımı ve Performans Ölçütleri

Simülasyon modelinin kurulmasının ardından, sistemin performansını istatistiksel olarak güvenilir bir şekilde analiz edebilmek için deney tasarımı parametreleri belirlenmiştir. Analizler, ARENA simülasyon yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

3.5.1. Simülasyon Çalıştırma Koşulları

Sistem simülasyonun çalışma parametreleri şu şekilde ayarlanmıştır:

Replikasyon (Tekrar) Sayısı: İstatistiksel güvenilirliği sağlamak amacıyla sistem 10 kez simüle edilmiştir.

Simülasyon Süresi: Her bir replikasyonun uzunluğu 8 hafta olarak belirlenmiştir.

Isınma Süresi (Warm-up Period): Sistemin rejime girmesi ve istatistiklerin sağlıklı toplanabilmesi için 7.500 dakikalık bir ısınma süresi tanımlanmıştır.

Sistem Sıfırlama: Her denemenin (replikasyonun) başlangıcında sistem istatistikleri sıfırlanarak deneyler birbirinden bağımsız hale getirilmiştir.

Vardiya Düzeni: Sistem haftada 5 gün, günde 8 saatlik iki vardiya düzeninde çalıştırılmıştır.

3.5.2. Performans Ölçütleri

Mevcut sistemin darboğazlarını tespit etmek ve iyileştirme önerilerini değerlendirmek için aşağıdaki temel performans ölçütleri izlenmiştir:

Makine Kullanım Oranları (Utilization): İstasyonların doluluk oranları.

Kuyruk Bekleme Süreleri: Parçaların işlem görmeden önce kuyrukta geçirdikleri ortalama süreler.

Üretim Miktarı: Tambur ve Gövde ünitelerinin montajı tamamlanarak test sürecini başarıyla geçen ve depoya sevk edilen nihai ürün sayısı.

Sistemde Geçen Süre: Sağlam ürünlerin hammadde girişinden depoya varışına kadar sistemde geçirdiği ortalama süre.

Yapılan analizlerde, sonuçların güvenilirliğini test etmek amacıyla performans kriterleri için %95 güvenlik düzeyinde değerlendirme yapılmıştır.

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Bu bölümde, önceki bölümlerde detaylandırılan metodoloji ve kurulan ARENA simülasyon modeli doğrultusunda elde edilen bulgular sunulmuştur. Çalışma kapsamında öncelikle modelin güvenilirliğini sağlamak adına girdi verilerinin analizi gerçekleştirilmiş, ardından mevcut sistemin performans ölçütleri (kuyruk süreleri, kaynak kullanım oranları, üretim miktarları) incelenmiştir. Simülasyon sonuçlarına dayalı olarak sistemdeki darboğaz noktaları tespit edilmiş ve bu darboğazların giderilmesine yönelik geliştirilen iyileştirme senaryosunun sonuçları, mevcut durum ile karşılaştırmalı olarak tartışılmıştır.

4.1. Girdilerin Analizi

Bu çalışmada, modelin stokastik doğasını yansıtmak amacıyla, sistem girdileri için teorik istatistiksel dağılımlar kullanılmıştır.

4.1.1. Parça Varış Sürelerinin Dağılımları

Modelin iki ana girişi olan 'Tambur' ve 'Gövde' ünitelerinin sisteme gelişleri, birbirinden bağımsız stokastik süreçler olarak ele alınmıştır. Modeldeki Create modülleri, sisteme olan varışları tanımlamak için oluşturulmuştur. Varışların bağımsız ve rastgele bir doğaya sahip olduğu varsayımıyla, gelişler arası süreyi belirlemek amacıyla istatistiksel olarak üstel dağılım tercih edilmiştir.

Tambur ünitesinin varışları arası süre ortalama 5 dakika, Gövde ünitesinin varışları arası süre ise ortalama 7 dakika olarak belirlenmiştir.

4.1.2 İşlem Sürelerinin Dağılımları

Modeldeki kaynakların (makinelerin) operasyon süreleri, gerçek hayattaki değişkenliği yansıtmak üzere farklı istatistiksel dağılımlarla tanımlanmıştır. İşlem süreleri şu şekilde modellenmiştir (Şekil 4.1):

Metal Şekillendirme Makinesi: Görev süresinin belirli bir ortalama etrafında toplandığı varsayılarak Normal (6, 1.1) dağılımı kullanılmıştır. Normal dağılım, istatistikte en yaygın kullanılan sürekli olasılık dağılımlarından biridir ve genellikle "Gauss dağılımı" olarak da bilinir (Armaneri, 2005).

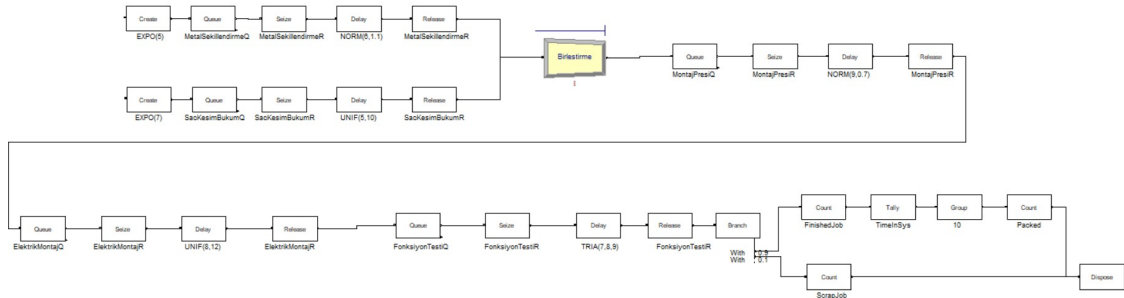
Sac Kesim ve Büküm Makinesi: İşlem süresinin bilinen bir minimum ve maksimum aralıkta rastgele değiştiği kabulüyle Düzgün (5, 10) dağılımı kullanılmıştır.

Montaj Presi: Bu istasyon için de Normal (9, 0.7) dağılımı uygun görülmüştür.

Elektrik Donanımı Montaj İstasyonu: İşlem süresi yine Düzgün (8, 12) dağılımı ile modellenmiştir.

Fonksiyon Testi İstasyonu: Operasyona dair en iyimser (minimum) ve en kötümser (maksimum) sürelerin bilindiği durumlarda tercih edilen Üçgen (7, 8, 9) dağılımı kullanılmıştır. Üçgen dağılım, belirli bir minimum, maksimum ve mod arasındaki değerleri modellemek için kullanılan sürekli bir olasılık dağılımıdır (Armaneri, 2005).

Kapasite Bilgisi: Mevcut durum analizinde tüm makinelerin kapasitesi 1 adet olarak tanımlanmıştır.



Şekil 4.1. ARENA- Mevcut Sistem

4.2. Mevcut Sistemin Performans Analizi

Simülasyon modeli, sistemin kararlı duruma ulaşmasını sağlamak amacıyla 7.500 dakikalık ısınma süresi (warm-up period) ve toplam 38.400 dakikalık (8 hafta, 8 saat, 2 vardiya) replikasyon uzunluğu ile 10 tekrar üzerinden çalıştırılmıştır. Mevcut sistemin performansına dair elde edilen bulgular aşağıda detaylandırılmıştır.

4.2.1. Kaynak Kullanım Oranları ve Darboğaz Tespiti

Simülasyon sonuçları incelendiğinde, sistemin genel performansını doğrudan etkileyen kritik darboğazlar tespit edilmiştir. Çizelge 4.1’de mevcut durumdaki kaynak kullanım oranları özetlenmiştir.

Çizelge 4.1. Mevcut Sistem Kaynak Kullanım Oranları (Ortalama)

Kaynak Adı	Kullanım Oranı	Durum Analizi
Montaj Presi	1.00 (%100)	Kritik Darboğaz
Elektrik Montaj	0.998 (%99,8)	Kritik Sınır
Fonksiyon Testi	0.80 (%80)	Kabul Edilebilir
Metal Şekillendirme	0.79 (%79)	Kabul Edilebilir
Sac Kesim Büküm	0.75 (%75)	Kabul Edilebilir

Analiz sonuçlarına göre, Montaj Presi istasyonunun kullanım oranı 1.00 (%100) seviyesine ulaşmıştır. Bu durum, istasyonun gelen talebi karşılamakta tamamen yetersiz kaldığını ve sistemin bu noktada tıkanıldığını göstermektedir. Benzer şekilde Elektrik

Montaj istasyonu da %99,8 kullanım oranı ile çalışarak doygunluk noktasına ulaşmış ve ikinci bir darboğaz oluşturmuştur.

Bu kapasite yetersizlikleri, sistem içi stokların aşırı artmasına ve kuyruk sürelerinin kabul edilemez seviyelere çıkmasına neden olmuştur. Simülasyon çıktılarından elde edilen MontajPresiQ.WaitingTime değeri incelendiğinde, parçaların bu istasyonda işlem görebilmek için ortalama 1.000 saatin üzerinde (yaklaşık 900 - 1300 dakika aralığında değişen) sürelerde kuyrukta beklediği görülmüştür. Bu durum, toplam sistemde geçen sürenin (TimeInSys) ortalama 1.200 dakika seviyelerine çıkmasına neden olarak üretim akış hızını (throughput rate) ciddi oranda düşürmüştür.

4.3. Hat Dengeleme Senaryoları ve Sonuçların Karşılaştırılması

Mevcut sistem analizinde tespit edilen darboğazların giderilmesi ve sistem performansının artırılması amacıyla kademeli bir hat dengeleme stratejisi izlenmiştir.

4.3.1. Hat Dengeleme Stratejisi

Sistemin akışını engelleyen temel kısıtlar göz önüne alınarak aşağıdaki düzenlemeler senaryoya dahil edilmiştir:

Kapasite Artırımı: Kullanım oranları %100 ve %99,8 olan Montaj Presi ve Elektrik Montaj istasyonlarının kaynak kapasiteleri 1'den 2'ye çıkarılmıştır. Bu hamle ile birikmiş kuyrukların eritilmesi ve akışın sürekliliğinin sağlanması hedeflenmiştir.

Metot Etüdü ve Kaizen Uygulaması: Kapasite artırımları sonucunda sistemin akış hızının artacağı ve iş yükünün sonraki istasyonlara kayacağı yani darboğazın yer değiştirmesi öngörülmüştür. Yapılan analizlerde, artan akışın Fonksiyon Testi istasyonunda kullanım oranını %93 seviyelerine (riskli bölge) çekeceği tespit edilmiştir.

Bu noktada, yüksek maliyetin önüne geçmek için ek bir makine yatırımı yapmak yerine; Metot Etüdü ve Operatör Eğitimi çalışmaları yapıldığı varsayılmıştır.

Ergonomik düzenlemeler ve standart iş talimatları sayesinde, Fonksiyon Testi işlem sürelerinde (varyasyon korunarak) %10 oranında standart zaman iyileşmesi (Kaizen) sağlanmıştır. Böylece işlem süresi dağılımı TRIA(7, 8, 9) yerine TRIA(6.3, 7.2, 8.1) olarak yenilenmiştir.

4.3.2. İyileştirilmiş Sistemin Performansı ve Karşılaştırmalı Analiz

Uygulanan iyileştirme senaryosu sonucunda sistem performansında radikal iyileşmeler gözlemlenmiştir. Çizelge 4.2'de mevcut durum ile iyileştirilmiş durumun temel performans göstergeleri karşılaştırılmıştır.

Çizelge 4.2. Mevcut ve İyileştirilmiş Sistem Performans Karşılaştırması (Ortalama)

Performans Ölçütü	Mevcut Durum	İyileştirilmiş Durum	Değişim (%)
Toplam Üretim	2.788 Adet	3.260 Adet	+%16,9 Artış
Sistemde Geçen Süre (TimeInSys)	1.200 Dakika	37.3 Dakika	-%96,8 İyileşme
Montaj Presi Kuyruk Süresi	1.100 Dakika	0.001 Dakika	Kuyruk Yok Edildi
Elektrik Montaj Kuyruk Süresi	5.3 Dakika	0.02 Dakika	Kuyruk Yok Edildi

4.4. Performans Kriteri İçin Güven Aralığının Belirlenmesi ve Gerekli Deneme Sayısının Hesaplanması

Bu çalışmada, sistemdeki darboğaz istasyonların kuyrukta bekleme süreleri için güven aralığı ve gerekli deneme sayısı hesaplanarak, simülasyon modelinin doğruluğu ve güvenilirliği istatistiksel olarak kanıtlanmak istenmiştir. Hesaplamalar, simülasyon literatüründe yaygın olarak kabul gören %95 güvenlik düzeyi (α) ve %0.05 göreceli hassasiyet (β) parametreleri kullanılarak yapılmıştır.

Gerekli örneklem sayısı (n^*) aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanmıştır:

$$n^* = \left[\frac{Z_{1-\alpha/2}}{\bar{x} \cdot \beta} \right]^2$$

Burada:

- $Z_{1-\alpha/2}$: Standart normal dağılım değeri (%95 güven aralığı için 1.645)
- s : Standart sapma
- X : Ortalama süre
- B : Göreceli hassasiyet (0.05)

4.4.1 Mevcut Durum için Montaj Pres Makinesinde Kuyrukta Bekleme Süresine Göre Gerekli Deneme Sayısının Hesaplanması

Analiz için Montaj Presi Makinesinde kuyrukta bekleme süresi değişkeni seçilmiş ve ön pilot çalışma olarak gerçekleştirilen 10 replikasyonun sonuçları değerlendirilmiştir (Çizelge 4.3).

Çizelge 4.3. Montaj Pres Makinesinde Kuyrukta Bekleme Süreleri (10 Deneme)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
881.81	1315.8	996.75	947.65	1275.4	1022.0	968.03	1178.2	1003.4	1134.3

- Standart Sapma : 145.74
- Genel Ortalama: 1111,5 dakika

- Göreli hassasiyet: 0.05

Yapılan analiz sonucunda, darboğaz istasyonu olan Montaj Presi Makinesinde bekleme sürelerinin istatistiksel olarak %5 hata payı ile tahmin edilebilmesi için gereken minimum replikasyon sayısı 21 olarak bulunmuştur. Ancak, simülasyon literatüründe kabul edilebilir hata payı üst sınırı genellikle %10 olarak değerlendirilmektedir. Hata payı hedefi %10 olarak yenilendiğinde, gerekli replikasyon sayısı 6'ya inmektedir. Gerçekleştirilen 10 replikasyon, %10 hata payı için gereken asgari tekrar sayısının üzerindedir ve hesaplanan gerçekleşen hata payı yaklaşık %7.07'dir. Bu değer, mevcut sistemin darboğaz tespitinin güvenilir bir şekilde yapılması için istatistiksel olarak yeterli ve güvenli bir aralıktadır.

4.4.1 Hat Dengeleme Sonrası için Montaj Pres Makinesinde Kuyrukta Bekleme Süresine Göre Gerekli Deneme Sayısının Hesaplanması

Bu analizde, darboğazın giderilmesi amacıyla yapılan hat dengeleme sonrasında Montaj Presi istasyonundaki kuyruk bekleme süreleri incelenmiştir (Çizelge 4.4).

Çizelge 4.4. Montaj Pres Makinesinde Kuyrukta Bekleme Süreleri (10 Deneme)									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0.00079	0.00091	0.00096	0.00121	0.00162	0.00072	0.00077	0.00081	0.00097	0.00089

Bekleme süresi "0" kabul edilebilecek kadar düşüktür. Bu nedenle %5 gibi çok hassas bir göreli hata oranı yerine mevcut 10 replikasyon ile sırada bekleme olmadığını görmek mümkündür. Dolayısıyla 10 deneme yeterli kabul edilmiştir.

4.5 Mevcut Sistem ve Dengelenmiş Hat Sisteminin Karşılaştırılması

Bu çalışmada, sistem performansını değerlendirmek amacıyla belirlenen anahtar performans göstergesi (KPI) olan Montaj Presi Kuyruğunda Ortalama Bekleme Süresi (*MontajPresiQ.WaitingTime*), mevcut durum)ve dengelenmiş hat senaryoları için istatistiksel olarak analiz edilmiştir (Çizelge 4.5).

Çizelge 4.5. Mevcut Sistem ve Dengelenmiş Hat Sisteminin Karşılaştırılması				
Replikasyon	Mevcut Sistem (dk)	Dengelenmiş Hat (dk)	Fark (dk)	İyileşme Oranı (%)
1	881.81	0.0008	881.81	%100
2	1315.80	0.0009	1315.80	%100
3	996.75	0.0010	996.75	%100
4	947.65	0.0012	947.65	%100
5	1275.40	0.0016	1275.40	%100
6	1022.00	0.0007	1022.00	%100
7	968.03	0.0008	968.03	%100
8	1178.20	0.0008	1178.20	%100

9	1003.40	0.0010	1003.40	%100
10	1134.30	0.0009	1134.30	%100
Ortalama	1072.33	0.0010	1072.33	%100

Güven aralığı hesaplamasında kullanılan formül aşağıda sunulmuştur:

$$\text{Güven Aralığı (C.I)} = \bar{x} \pm t_{\alpha/2, n-1} \cdot (s/\sqrt{n})$$

Burada;

- \bar{x} : Örneklem ortalaması,
- s: Örneklem standart sapması,
- n: Replikasyon sayısı (10),
- $t_{\alpha/2, n-1}$: n-1 serbestlik derecesi ve α anlamlılık düzeyindeki kritik t-değeri 2.262 ifade etmektedir.

Her iki senaryo için elde edilen güven aralıkları Çizelge 4.6'da özetlenmiştir.

Çizelge 4.6: Hesaplanan Güven Aralıkları

Senaryo	Ortalama	Standart Sapma	Hata Payı (\pm)	%95 Güven Aralığı (dk)
Dengeleme Öncesi	1072.33	145.79	104.30	[968.03 , 1176.63]
Dengeleme Sonrası	0.0010	0.0003	0.0002	[0.0008 , 0.0012]

Analiz sonuçları incelendiğinde, iki senaryoya ait güven aralıklarının örtüşmediği görülmektedir. Dengeleme öncesi güven aralığının alt sınırı, dengeleme sonrası üst sınırdan oldukça yüksektir. Bu durum, önerilen hat dengeleme iyileştirmesinin Montaj Presi istasyonundaki kuyruk bekleme sürelerini azaltmada %95 güven düzeyinde istatistiksel olarak anlamlı bir fark yarattığını ve darboğaz problemini etkin bir şekilde çözdüğünü kanıtlamaktadır.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu bölümde, beyaz eşya sektöründe faaliyet gösteren bir işletmenin çamaşır makinesi montaj hattı için geliştirilen ARENA simülasyon modelinden elde edilen bulgular sunulmuştur. Çalışma kapsamında; sistemin mevcut performans metrikleri analiz edilmiş, darboğaz noktaları belirlenmiş ve geliştirilen hat dengeleme senaryosunun etkinliği istatistiksel yöntemlerle doğrulanmıştır.

5.1 Sonuçlar

Çalışma kapsamında geliştirilen simülasyon modeli ve önerilen iyileştirme senaryoları neticesinde elde edilen temel sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

Darboğaz Yönetimi ve Akış Sürekliliği: Montaj Presi ve Elektrik Montaj istasyonlarında gerçekleştirilen kapasite artırımı, bu kaynakların kullanım oranlarını sırasıyla %52 ve %58 seviyelerine çekmiştir. Kaynaklarda oluşan bu planlı atıl kapasite, üretim hattındaki tıkanıklıkları tamamen gidermiş ve kuyrukta bekleme sürelerini ihmal edilebilir düzeye indirerek kesintisiz bir akış sağlamıştır.

Katma Değersiz Sürelerin Eliminasyonu: Sistemin etkinliğini gösteren en kritik parametrelerden biri olan "Sistemde Geçen Ortalama Süre" (Lead Time), mevcut durumdaki 1111,5 dakika seviyesinden 37,4 dakikaya düşürülmüştür. Bu dramatik iyileşme, üretim sürecindeki katma değer yaratmayan bekleme sürelerinin (Non-Value Added Time) başarılı bir şekilde elimine edildiğini ve Yalın Üretim hedeflerine yaklaşıldığını kanıtlamaktadır.

Maliyet-Etkin Dengeleme: Fonksiyon Testi istasyonunda uygulanan Kaizen stratejisi ile sağlanan %10'luk süreç iyileştirmesi, artan üretim hızına rağmen bu istasyonun kullanım oranını %83-84 bandında (Güvenli Çalışma Bölgesi) tutmayı başarmıştır. Bu stratejik yaklaşım sayesinde, işletme üçüncü bir makine yatırım maliyetinden kurtarılmış ve sistem dengesi ek maliyet yaratmadan korunmuştur.

Üretim Artışı ve Optimizasyon: Önerilen sistem tasarımı ile toplam üretim çıktısı artırılmıştır. Sonuç olarak, teslimat süreleri minimize edilmiş ve sistemdeki darboğazlar, yatırım maliyeti ile verimlilik artışı arasındaki denge gözetilerek optimum seviyede yönetilmiştir.

5.2 Öneriler

Elde edilen bulgular ve analiz sonuçları doğrultusunda, işletme yönetimine ve gelecek çalışmalara yönelik öneriler şunlardır:

Yatırım Kararının Uygulanması: Simülasyon sonuçları, Montaj Presi ve Elektrik Montaj istasyonlarına yapılacak ikinci makine yatırımının, üretim miktarındaki artış ve

stok maliyetlerindeki düşüş ile kısa sürede kendini amorti edeceğini göstermektedir. İşletmenin bu kapasite artışını ivedilikle planlaması önerilmektedir.

Sürekli İyileştirme (Kaizen) Kültürü: Modelde, Fonksiyon Testi istasyonunda %10'luk bir süre iyileştirmesi varsayılmıştır. Bu hedefin gerçekleşmesi için operatörlere yönelik ergonomi eğitimlerinin verilmesi, standart iş talimatlarının güncellenmesi ve test süreçlerindeki gereksiz hareketlerin elimine edilmesi gerekmektedir. Aksi takdirde, darboğazın bu istasyona kayma riski bulunmaktadır.

Dinamik Simülasyon Kullanımı: Üretim hatlarında yapılacak fiziksel değişikliklerin maliyeti yüksektir. İşletmenin, gelecekte yapacağı hat dengeleme veya yeni ürün devreye alma süreçlerinde, bu çalışmada kullanılan ARENA tabanlı simülasyon modelini bir karar destek aracı olarak kullanması, olası riskleri önceden görmesini sağlayacaktır.

Esnek İşgücü Planlaması: Önerilen sistemde makine kapasiteleri artırıldığında, operatör verimliliğini korumak adına çok yönlü çalışan yapısına geçilmesi ve operatörlerin iş yüküne göre istasyonlar arası rotasyonu değerlendirilmelidir.

KAYNAKLAR

- Akyol, Ş. D. (2023). Tip-2 Montaj Hattı Dengeleme ve İşgücü Atama Problemi için Doğrusal Programlama Yaklaşımı: Bir Vaka Çalışması. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 25(73), 121-129.
- Ali, A., Yadav, K. S., Yadav, A., & Kumar, L. (2019). Mechanical washing machine. International Journal of Research in Engineering, Science and Management, 2(6), 76-80.
- Armaneri, Ö. (2005). Bir Montaj Hattı Üretim Sisteminde Optimal İşgücü Dağılımının Arena Process Analyzer (PAN) Ve Optquest Kullanılarak Belirlenmesi.
- Arslankaya, S., & Aydın, M. (2022). Sıralı-Ters Sıralı Pozisyon Ağırlığı Yöntemleri ve Tamsayı Programlama ile Montaj Hattı Dengeleme. Endüstri Mühendisliği, 33(2), 322-345.
- Becker, C., & Scholl, A. (2006). A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing. European journal of operational research, 168(3), 694-715.
- Canbazoğlu, S.G. & Kahya, E. (2023). Ergonomik montaj hattı dengeleme probleminin farklı risk faktörleri için modellenmesi ve çözümü. Endüstri Mühendisliği / Journal of Industrial Engineering, 34(3), 433-457.
- Canbulut, G., Vural, N. B., & Kavak, G. (2022). Simülasyon Destekli Tesis Tasarımı: Bir İmalat Sisteminde Uygulanması. Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 27(2), 647-662.
- Ergüt, Ö. (2019). Üretim sistemlerinde bir simülasyon uygulaması. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 3(2), 244-258.
- Eryürük, S., Kalaoğlu, F., & Baskak, M. (2014). Etek Üretimi Yapan Bir Konfeksiyon İşletmesinde Montaj Hattı Dengeleme Çalışması. Tekstil ve Mühendis, 21(96), 19-26.
- Karaca, T. K. (2015). Ayrık olay simülasyonu yöntemi kullanarak üretim süreci değerlendirme ve iyileştirme olay: Etisan (Master's thesis, İstanbul Arel Üniversitesi).
- Kaymaz, E., & Çavdur, F. (2022). Montaj hattı dengelemede yeniden işleme istasyonlarının paralel görevler için kullanımının matematiksel programlama ve simülasyon ile analizi. Politeknik Dergisi, 1-1.
- Kılınççı, Ö. (2023). Kaynak ve sıra bağımlı hazırlık süreli montaj hattı dengeleme problemi (KMHDP). Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 38(1), 557-570.
- Kuğu, S. Yolcan, O. O., & Köse, R. (2023). Kondenser üretim hattında Arena16. 1 destekli hat dengeleme çalışması yapılması. Politeknik Dergisi, 1-1.

- Özdemir, H., Ersöz T., Uysal A.O., & Ersöz, F. (2010). Montaj Hattı Analizi ve Dengeleme Çalışması: Beyaz Eşya Sektörü Benzetim Uygulaması, Makine Mühendisleri Odası Endüstri Mühendisliği Dergisi, 21, (25-38).
- Şahin, B. N., & Kahya, E. (2018). Hedef programlama modeli ile ergonomik kısıtlar altında montaj hattı dengelemesi. Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 6, 188-196.
- Yetkin, B. N., & Kahya, E. (2021). Ergonomik montaj hattı dengeleme problemine farklı çok kriterli karar verme yöntemlerinin uygulanması. Endüstri Mühendisliği, 32(2), 217-234.
- Zengin, A. (2004). Dağıtık Simülasyon Sistemleri için Yeni Bir Yönlendirme Algoritması ve Yygulaması (Doctoral dissertation, Sakarya Üniversitesi (Turkey)).