



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



KAYNAK KISITLI MONTAJ HATTI
DENGELEME PROBLEMİ VE BİR
İŞLETMEDE UYGULAMASI
Mehmet CEYLAN
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Mayıs-2024
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Mehmet CEYLAN tarafından hazırlanan “Kaynak Kısıtlı Montaj Hattı Dengeleme Problemi ve Bir İşletme Uygulaması” adlı tez çalışması 06/05/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. Yakup Kara
(Konya Teknik Üniversitesi)

.....

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Seda HEZER
(Konya Teknik Üniversitesi)

.....

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Kemal ALAYKIRAN
(Konya Teknik Üniversitesi)

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Mevlüt UYAN
Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Mehmet CEYLAN

Tarih: 06.05.2024

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KAYNAK KISITLI MONTAJ HATTI Dengeleme Problemi ve Bir İşletmede Uygulaması

Mehmet CEYLAN

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

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Seda HEZER

2024, 44 Sayfa

**Jüri
Dr. Öğr. Üyesi Seda HEZER
Prof. Dr. Yakup KARA
Dr. Öğr. Üyesi Kemal ALAYKIRAN**

Bir montaj hattı, birbirine konveyör bir sistem ile bağlı sıralı iş istasyonlarından oluşmaktadır. Parçalar birleştirilerek son ürüne dönüştürülmektedirler. Uygulanan görevlerin, aralarındaki öncelik ilişkileri dikkate alınarak, belirli kısıtlar ve varsayımlar altında ve belirli bir performans ölçütünü en iyileyecek şekilde istasyonlara atanması problemine Montaj Hattı Dengeleme Problemi adı verilmektedir. İlgili problemde, performans ölçütü olarak genellikle iş istasyonlarının ve/veya çevrim süresinin minimize edilmesi olmak üzere iki amaca yönelik çalışmalar yapılmaktadır. Fakat son yıllarda yapılan çalışmalarda montaj hatlarının verimini, etkinliğini ve kaynaklardan yararlanma oranını arttırmak için kullanılan kaynak (işçi, makine, ekipman, enerji vs.) sayısının veya maliyetinin minimize edilmesine odaklanıldığı gözlemlenmiştir. Bu probleme Kaynak Kısıtlı Montaj Hattı Dengeleme Problemi adı verilmektedir. Bu çalışma kapsamında, ilgili problem endüstriyel mutfak ekipmanları üreten bir işletmede uygulanmıştır. Uygulamada, kaynak kullanım maliyeti ve istasyon kullanım maliyetini minimize etmek amacıyla 4 farklı ürünün 19 farklı kaynak çeşidi kullanılarak, tek hatta birbirinden bağımsız olarak dengelenmesi gerçekleştirilmiştir. Corominas ve diğ. (2011) tarafından geliştirilen matematiksel model, işletmedeki probleme uyarlanmıştır. Önerilen çözüm ile mevcut durumda kullanılan 2 hat, tek hatta düşürülmüştür. Her bir ürün için toplam maliyetlerde en az %49 oranında iyileşme elde edilmiştir. Kullanılan toplam ekipman sayısı 46 adetten 31 adete, çalışan sayısı 4'ten 2'ye düşürülmüştür. Bu çalışma, kaynak kısıtlı montaj hattı dengeleme probleminin bir gerçek hayat problemine uyarlanarak oldukça iyi sonuçlar elde edilmesi bakımından önemlidir.

Anahtar kelimeler: Kaynak kısıtlı montaj hattı dengeleme, maliyet, matematiksel model, montaj hattı dengeleme

ABSTRACT
MS THESIS
RESOURCE-CONSTRAINED ASSEMBLY LINE BALANCING PROBLEM
AND AN APPLICATION IN AN ASSEMBLY LINE

Mehmet CEYLAN

**Konya Technical University
Institute of Postgraduate Education
Department of Industrial Engineering**

Consultant: Dr. Seda HEZER

2024, 44 Pages

Jury
Asst. Prof. Dr. Seda HEZER
Prof. Dr. Yakup KARA
Asst. Prof. Dr. Kemal ALAYKIRAN

An assembly line consists of sequential workstations connected by a conveyor system. Parts are combined to transform them into the final product. The problem of assigning tasks to stations, considering the precedence relationships between them, under certain constraints and assumptions, and in a way that optimizes a specific performance criterion, is called the Assembly Line Balancing Problem. In assembly line balancing problem literature, the performance measure is usually minimizing the number of workstations and/or the cycle time. However, in recent studies, it has been observed that the focus is on minimizing the number or cost of resources (workers, machines, equipment, energy, etc.) used to increase the efficiency, effectiveness, and resource utilization rate of assembly lines. This problem is called the Resource Constrained Assembly Line Balancing Problem. In this study, the relevant problem has been applied in a company that produces industrial kitchen equipment. In the application, 4 different products were balanced independently on a single line using 19 different resource types to minimize the resource utilization cost and station utilization cost. The mathematical model developed by Corominas et al. (2011) has been adapted to the problem in the company. With the proposed solution, the 2 lines used in the current situation have been reduced to a single line. For each product, at least a 49% improvement in total costs has been achieved. The total number of equipment used has been reduced from 46 to 31, and the number of employees has been reduced from 4 to 2. This study is important in terms of adapting the resource constrained assembly line balancing problem to a real-life problem and obtaining quite good results.

Keywords: Assembly line balancing, cost, mathematical model, resource constrained assembly line balancing

ÖNSÖZ

Çalışmamın başından itibaren engin bilgi ve tecrübeleri ile bana destek olan, yoğun çalışma dönemlerinde kıymetli zamanını büyük bir sabırla bana ayıran pek kıymetli danışman hocam Dr. Seda Hezer'e, yüksek lisans sürecim boyunca maddi desteklerinden dolayı TÜBİTAK'a, bu süreçte bana her zaman güvenen ve desteğini hiç esirgemeyen eşim Merve Zeynep Ceylan'a ve aileme sonsuz teşekkür ederim.

Mehmet CEYLAN

KONYA/2024

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	viii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	8
3.1. Materyal	9
3.1.1. Montaj Hatları ve Sınıflandırılması	9
3.1.2. Montaj Hattı Dengeleme Problemi	10
3.1.3. Çok Modelli Kaynak Kısıtlı Montaj Hattı Dengeleme Problemi	12
3.1.4. Uygulamanın Yapıldığı İşletmenin ve Montaj Hatlarının Tanıtımı	15
3.2. Yöntem.....	20
4.ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	24
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	30
KAYNAKLAR	312
EKLER	356

SİMGELER VE KISALTMALAR

Kısaltmalar

MHD	: Montaj hattı dengeleme
KKMHD	: Kaynak kısıtlı montaj hattı dengeleme
HYM	: Hamur yoğurma makinesi
TKM	: Tulumba ve köfte şekillendirme makinesi
MM	: Mikser makinesi
SHM	: Spiral hamur yoğurma makinesi
HGA	: Hibrit genetik algoritma
GKKMHD	: Genel kaynak kısıtlı montaj hattı dengeleme
KP	: Kısıt programlama
NSGA	: Baskın Olmayan Sıralama Genetik Algoritması
U-KKMHD	: Kaynak kısıtlı U-şekilli montaj hattı dengeleme problemi
BMHD	: Basit montaj hattı dengeleme
GMHD	: Geleneksel montaj hattı dengeleme
MILP	: Karma tamsayı doğrusal programlama
RBC-I	: Sıralamaya dayalı geçiş türü I
RBC-II	: Sıralamaya dayalı geçiş türü II

1. GİRİŞ

Günümüzde sanayinin artan rekabet süreci, işletmelerin üretim süreçlerini, hizmetlerini ve kaynaklarını daha etkin ve verimli kullanmasını zorunlu hale getirmiştir. Bu nedenle üretim sürecindeki maliyetlerinin önemi artmış ve maliyetlerini düşürülmesi için işletmeler, birtakım iyileştirmeler yapma ihtiyacı hissetmişlerdir. İlgili iyileştirmelerden biri etkin montaj hatlarının tasarımı ve kurulmasıdır. Montaj hatları, seri üretim sistemlerinin en önemli bileşenleridir. Yüksek hacimli ürünleri hızlı ve maliyet etkin bir şekilde üretmek zorunda olan üreticiler için geliştirilmiş işgücü verimliliği, montaj hatlarının temel önemini oluşturmaktadır. Bir montaj hattı, sınırlı bir süre içinde (çevrim süresi) bir grup montaj operasyonunun (görevlerin) gerçekleştirildiği birkaç ardışık iş istasyonundan oluşmaktadır (Kara ve diğ., 2010). Montaj hatlarındaki israfların belirlenmesi ve yok edilmesi, işletmelere ciddi anlamda maliyet avantajı sağlamaktadır (Akyol, 2023).

Montaj hatlarının kurulumunda ve değişken ihtiyaçlara göre üretim hızının tekrar ayarlanmasında ortaya çıkan en önemli problem, montaj hattı dengeleme (MHD) problemidir. MHD problemi, montaj hattında yerine getirilecek görevlerin, öncelik ilişkileri ve çevrim süresi gibi probleme özgü kısıtlar sağlanmak şartıyla bir eniyileme kriterine bağlı kalınarak istasyonlara atanması problemidir (Atasagun, 2010).

Literatürde basit montaj hattı dengeleme (BMHD) probleminin 2 temel amacı mevcuttur: İstasyon sayısını ve/veya çevrim süresini en aza indirmek. BHMD problemlerinde, kaynaklar (ekipman, makine, enerji vs.) tek veya sınırsız olarak varsayılmaktadır (Barutçuoğlu, 2009). Fakat gerçek hayatta her görev, görevlerin zorluğuna, karmaşıklığına ve teknik gereksinimlerine bağlı olarak farklı kaynak türlerine ihtiyaç duyabilir. Bu nedenle hat dengeleme yapılırken görev ve bu görevlere ait kaynakların etkin bir şekilde kullanılması gerekmektedir (Alakaş ve diğ., 2023). Bu durum literatürde kaynak kısıtlı montaj hattı dengeleme (KKMHD) problemi olarak ifade edilmektedir. KKMHD problemi, ihtiyaç duyulan kaynakların, bir performans ölçütüne göre, belirli kısıtları ve varsayımları sağlayacak şekilde, ilgili istasyonlara ve görevlere atanmasıdır (Pekin, 2006). Bu çalışmada endüstriyel mutfak ekipmanları üreten bir işletmede en çok üretilen ürünlerin özellikleri dikkate alınarak çok modellenli, düz KKMHD problemi dikkate alınmıştır. İşletmede, farklı modeldeki ürünlerin imalatının, küçük partiler halinde düz bir montaj hattında gerçekleştirilmesi ilişkin probleme odaklanılmıştır. Toplam hat maliyetini minimize etmenin amaçlandığı problemin çözümü için Corominas ve diğ.

(2011) tarafından önerilen matematiksel modelden yararlanılmış, ilgili model işletmedeki duruma uyarlanmıştır.

Çalışmanın ikinci kısmında KKMHD problemi ile ilgili literatürde yer alan çalışmalar incelenmiştir. Üçüncü bölümde KKMHD problemine ait deneyde kullanılan test problemlerine ait bilgilere yer verilmiştir. Dördüncü bölümde ele alınan test problemlerinin çözümüne ait deney sonuçları değerlendirilmiştir. Son bölümde ise araştırma sonuçlarının genel bir değerlendirmesi yapılarak, gelecekte yapılabilecek çalışmalara yönelik öneriler sunulmuştur.



2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

MHD problemi için ilk matematiksel model Salveson (1955) tarafından tanımlanmıştır ve bugüne kadar MHD probleminin farklı türleri için çok sayıda çalışma yapılmıştır (Mete, 2013). İlgili problemlerden biri de KKMHD problemidir. MHD probleminin özel bir hali olan KKMHD problemi ile ilgili literatürdeki ilk çalışma Ağpak ve Gökçen (2005) tarafından yapılmıştır. Çalışmalarında geleneksel montaj hattı dengeleme problemine yeni bir yaklaşım sunmuşlardır. Önerilen yaklaşımın amacı, minimum istasyon ve kaynak sayısı ile montaj hattının dengesini kurmaktır. Bu çalışmadan günümüze kadar KKMHD problemi ile ilgili literatürde birçok akademik çalışma yapılmıştır.

Pekin ve Azizoğlu (2008) çalışmalarında, ekipman seçim kararları ile bir MHD problemi için kesin bir algoritma geliştirmiştir. Toplam ekipman maliyetini ve iş istasyonu sayısını minimize etmek olmak üzere iki amaca odaklanmışlardır. Her problem için bir dizi etkin çözüm önermeyi ve en iyi çözümün seçimini karar vericinin tercihlerine bırakmayı amaçlamışlardır. Bazı baskınlık kuralları ve güçlü alt sınırlar ile etkinliği artırılmış bir dal ve sınır algoritması geliştirmiştir. Bunun yanında, ilk üst sınır olarak modifiye edilmiş sıralı konumsal ağırlık sezgisel yöntemi kullanmışlardır. Önerilen prosedürün etkinliği, belirli parametre değerlerinin değiştirilmesinin etkilerinin araştırıldığı hesaplamalı analiz ile göstermiştir. Algoritmanın 25 görev ve 5 ekipmana kadar problem örneklerini çözebildiğini göstermişlerdir.

Kao ve diğ. (2010) çalışmalarında, işleme görevlerinde makineler ve işçiler gibi farklı türdeki kaynakların gerekli olduğu kaynak kısıtlı tip-I montaj hattı dengeleme problemini ele almışlardır. KKMHD problemi tip-I'in amacı, yalnızca ihtiyaç duyulan iş istasyonu sayısını değil, aynı zamanda gerekli kaynak türlerinin sayısını da en aza indirmektir. KKMHD problemi-I için en uygun çözümü bulmak için en kısa yol algoritması önermiştir. Önerilen algoritmanın etkinliğini göstermek için açıklayıcı bir örnek de vermiştir.

Corominas ve diğ. (2011) çalışmalarında, genel kaynak kısıtlı montaj hattı dengeleme (GKKMHD) problemini, Ağpak ve Gökçen (2005) tarafından önerilen KKMHD probleminin bir genellemesi olarak sunmuştur. Bu genelleme teorik problemin uygulanabilirliğini genişletmekte ve endüstriyel gerçekliğe yaklaştırmaktadır. GKKMHD problemindeki temel yenilik, görevleri işlemek için basit veya çoklu, alternatif ve/veya eşzamanlı kaynak gereksinimlerini dikkate almasıdır. Bunun yanında, istasyonun varlığının ve kaynakların maliyeti dikkate alınır ve her türden kaynak birimi sayısına

sınırlamalar getirilir. GKKMHD problemi matematiksel programlama yoluyla modellenmiş ve endüstriyel ortamda kabul edilebilir araçlar ve hesaplama süreleri dikkate alınarak tam olarak çözmüştür. Bu geniş hesaplama deneyin sonuçları sunmuştur: küçük ve orta ölçekli örneklerde kesin çözüm elde etmişlerdir; Yalnızca bir örnek istisnası dışında, 60 göreve kadar tüm örnekleri çözümlenmişlerdir. Bu boyut, literatürde ele alınan gerçek endüstriyel problemlerle karşılaştırılabilir düzeydedir.

Kao ve diğ. (2011) çalışmalarında, optimum çözümü bulmak için 0-1 tamsayılı programlama modeli geliştiren Ağpak ve Gökçen tarafından sunulan KKMHD incelemişlerdir. Ancak bu model büyük ölçekli sorunların çözümünde yetersiz olduğu için yaygın olarak kullanılan sıralanmış konumsal ağırlık kuralına dayanan basit, etkili bir buluşsal yöntem önermişlerdir. Ağpak ve Gökçen tarafından verilen örneği, örnekleme için kullanmışlar ve önerilen sezgiselin etkinliğini göstermek için literatürden seçilen örnek problemlerin sayısal sonuçlarını vermişlerdir.

Barutçuoğlu ve Azizoğlu (2011) çalışmalarında, esnek montaj hattı tasarımı problemini incelemişlerdir. Görev sürelerinin ve ekipman maliyetlerinin, tüm görevler için daha ucuz ekipmanın daha az görev süresi vermemesi anlamında ilişkili olduğunu varsaymışlardır. Çevrim süresi ve iş istasyonu sayısı göz önüne alındığında, toplam ekipman maliyetini en aza indiren iş istasyonlarına görev ve ekipmanların atanmasını bulmayı hedeflemişlerdir. Aynı görev süreleriyle problemin özel bir durumunu incelemişlerdir. Genel durum için, güçlü alt sınırlar ve azaltma mekanizmaları kullanan bir dal ve sınır algoritması geliştirmişlerdir. Dal ve sınır algoritmamızın performansını rastgele oluşturulmuş test problemleri üzerinde test etmişlerdir. Deneylerin sonuçları, büyük boyutlu problem örneklerini makul zamanlarda çözebildiğimizi ortaya koymuştur.

Mete ve Ağpak (2013) çalışmalarında, otobüs, kamyon ve otomobil gibi büyük boyutlu ürünlerin üretilmesinde kullanılan çift taraflı montaj hatlarını ele almışlardır. Büyük boyutlu ürünler üretildiğinde, bazen belirli bir makine veya bu makineyi kullanacak kalifiye bir personel ihtiyacı doğmaktadır. Bu durum aynı zamanda kaynak kısıtı sorununu da ortaya çıkarmaktadır. Bu nedenle çalışmalarında, literatür modellerine dayalı olarak genelleştirilmiş kaynak kısıtlı iki taraflı montaj hattı dengeleme problemi için bir matematiksel model sunmuşlardır ve çok amaçlı durum için hesaplama analiz gerçekleştirmişlerdir. Önerilen model, üç amaç fonksiyonu (istasyon sayısı, pozisyon sayısı ve kaynak maliyeti minimizasyonu) dikkate alınarak bilinen birkaç test problemi üzerinde çalıştırmışlar ve analiz etmişlerdir.

Kara ve diğ. (2014) çalışmalarında, MHD'ye ergonomi ve kaynak kısıtlamalarını dahil etmişlerdir. Bu amaçla matematiksel bir model önermişlerdir. Önerdikleri modelde, psikolojik baskı, fiziksel zorlama, işçi becerileri, çoklu işçi, ekipman, çalışma duruşları ve aydınlatma seviyesi ile ilgili kısıtlar altında toplam hat maliyeti minimize edilmiştir. Modeli, bazı örnekler kullanarak açıklamış ve doğrulamışlardır.

Ogan ve Azizoglu (2015) çalışmalarında, her görevde belirli bir ekipman setinin kullandığı ve her bir ekipmanın maliyetinin olduğu U şeklinde bir MHD problemi ele almışlardır. Problem, toplam ekipman maliyetini minimize edecek şekilde görevleri ekipmanları ile birlikte iş istasyonlarına atamaktır. Problemi, küçük boyutlu örnekleri çözebilen bir karma tamsayılı doğrusal programlama modeli olarak formüle etmişlerdir. Etkin öncelik ilişkileri ve alt sınırlar kullanan bir dal ve sınır algoritması önermişlerdir. Algoritmanın orta büyüklükteki problem örneklerini makul zamanlarda çözebildiğini görmüşlerdir.

Jusop ve Rashid (2016) çalışmalarında, tek bir model için kaynak kısıtlamalı Tip-E probleminin MHD'sini incelemişlerdir. Çalışmalarında, üç amaç fonksiyonu dikkate almışlardır; iş istasyonu sayısını, çevrim süresini ve kaynak sayısını en aza indirmektedir. Sorunu optimize etmek için Elitist Baskın Olmayan Sıralama Genetik Algoritması (NSGA-II) önermişlerdir. Optimizasyon algoritmasını test etmek için altı kıyaslama problemi kullanmışlar ve sonuçlar çok amaçlı genetik algoritma (MOGA) ve hibrit genetik algoritma (HGA) ile karşılaştırmışlardır. Hesaplamalı testten, NSGA-II'nin arama alanını keşfetme yeteneğine sahip olduğu, daha iyi çözüm doğruluğuna sahip olduğu ve aynı zamanda eşit aralıklı bir çözüme sahip olduğunu bulmuşlardır. Gelecekte, algoritmanın performansını artırmak için çözüm doğruluğunu artıracak bir araştırma önermişlerdir.

Kenger (2017) çalışmasında, kaynağa bağlı hazırlık süreleri ile montaj hattı dengeleme problemi analiz etmiştir. Problemi çözmek ve birkaç küçük boyutlu test problemini çalıştırmak için bir matematiksel model sunmuş. Büyük boyutlu test problemleri için COMSOAL'a dayalı sezgisel bir yaklaşım kullanmıştır.

Quyen ve diğ. (2017), çalışmalarında bir ayakkabı üretim tesisinin dikiş hattındaki KKMHD problemini çözmek için bir HGA geliştirmeyi amaçlamışlardır. Ayakkabı imalatında en kritik süreç olan dikim; delme, düzeltme, ayakkabı bağcığı takma gibi bir dizi işlemden oluşmaktadır. Dikiş hattındaki KKMHD, yalnızca ürün montajının öncelik kısıtlamalarını değil aynı zamanda operatörler ve ekipman gibi kaynak kısıtlamalarını da dikkate almaktadır. Çalışmalarında, dikiş hattındaki kaynakları optimize etmek için iki

aşama içeren yeni bir HGA önermişlerdir. Sonuçlar, önerilen HGA'nın diğer algoritmalara göre daha iyi sonuçlar elde edebileceğini göstermiştir.

Kamaruddin ve Rashid (2017) çalışmalarında, makineyi ve çalışanı en aza indirmek için kaynak kısıtlamalarına sahip bir MHD sunmuşlardır. Optimizasyon amacıyla iki yeni geçişli genetik algoritma tanıtmışlardır. Önerilen geçişler, sıralamaya dayalı geçiş türü I ve II (RBC-I ve RBC-II) olarak bilinen montaj sırası sıralamasına dayanmaktadır. Bu geçişleri, 17 kıyaslama problemi kullanılarak popüler kombinatoriyal geçişlere karşı test etmişlerdir. Hesaplamalı deney sonuçlarında, yeniden üretim sürecindeki sapma ve rehberlik arasındaki denge nedeniyle RBC-II'nin daha iyi bir genel performansa sahip olduğunu göstermişlerdir.

Chen ve diğ. (2018) çalışmalarında, çok insanlı iş istasyonlarında KKMHD problemi için karma tamsayılı programlama modeli önermişlerdir. Amaç, görevlerin, operatörlerin, makinelerin ve kaynakların en uygun şekilde atanmasını sağlamak için iş istasyonu, operatör ve kaynak sayısını en aza indirmektir. Çözüm verimliliğini artırmak için uygulanabilir dengeleme çözümleri oluşturma prosedürünü ve genetik algoritmayı birleştiren hibrit bir sezgisel yaklaşım geliştirmişlerdir. Bir otomobil fabrikası örneğinde, geleneksel planlama yöntemi önerilen yaklaşımla karşılaştırmışlardır. Çalışmalarında, çözüm kalitesi, üretim verimliliği ve atamalar açısından sonuçları analiz etmişler. Çalışmalarındaki bulguları, imalat endüstrisinde görevlerin, iş istasyonlarının ve operatörlerin tahsisinde karar verme için referans olarak kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

Pereira (2018) çalışmasında, tekstil endüstrisinde bulunan ve kaynak gereksinimleri dikkate alınarak birden fazla ürün türü için hattın dengelenmesi gereken bir hat dengeleme problemini incelemiştir. Sorunu çözmek için klasik hat dengeleme yöntemlerini Dağıtım Tahmin Algoritması ile birleştiren hibrit bir yöntem önermiştir. Hesaplamalı deneyler, yeni prosedürün, literatürden türetilen bir kıyaslama setini kullanarak ve aynı zamanda bu araştırma çalışmasını başlatan üreticiden alınan verileri kullanarak karşılaştırdığında en son teknolojiye göre geliştiğini göstermiştir.

Alakaş ve diğ. (2019) çalışmalarında, KKMHD problemini çözmek için ilk kez belirli bir istasyon sayısı için çevrim süresini ve kaynak kullanımını en aza indiren çok amaçlı bir model modellemişlerdir. Görevler için alternatif ve genel kaynak türleri ve ikiden fazla kaynak türü gereksinimlerini de dikkate almışlardır. Bu problemlerin optimal çözümlerini bulmak için bir kısıt programlama (KP) modeli geliştirmiş ve çözmüşlerdir.

Önerdikleri modeller, modelin etkinliğini göstermek amacıyla örnek senaryolarla test etmişlerdir.

Söylemez (2020) çalışmasında, kaynak paylaşımı ile KKMHD problemini ele almıştır. Ardışık istasyonlarda kaynak paylaşımına izin veren KKMHD problemi için matematiksel bir model geliştirmiştir. Değerlendirmeye aldığı problem, istasyonlar arasında kaynak paylaşımı ile düz hat, tek model, kaynak kısıtlı, MHD problemidir. Kullandığı matematiksel model ile genel kaynak atama ve kaynak paylaşımı durumu için sonuçlar elde etmiştir. Orta ve büyük boyutlu problemlerde kullandığı matematiksel model ile istenen sürede beklenen sonuçlara ulaşamamış. Bu nedenle meta-sezgisel yöntemlerden biri olan simüle edilmiş tavlama algoritması uygulamıştır.

Alakaş (2021) çalışmasında, GKMMHD problemini belirli sayıda istasyon için çevrim süresini ve kaynak kullanımını en aza indirecek şekilde ele almıştır. Birleştirici normal formu temel alan yeni KP modelleri önermektedir. Çalışmasında, KP modellerini literatürdeki veri setinden oluşturulan problem örnekleriyle test etmiştir. Deneysel sonuçlar, KP'nin GKMMHD problemini çözmek için verimli ve etkili bir modelleme tekniği olduğunu göstermiş. Son olarak alternatif amaç fonksiyonlarına ilişkin önerilerde bulunmuştur.

Jin ve diğ. (2021) çalışmalarında, sınırlı kaynaklara sahip montaj hattı, olası tüm senaryolarda iyi performansa sahip olacak şekilde dengelemişlerdir. Önerdikleri model, karar vericilerin seçilen seçimden sonraki pişmanlığı en aza indirmesine ve değişkenliğin neden olduğu yüksek maliyete karşı önlem almasına olanak tanımaktadır. Tasarım/metodoloji/yaklaşım görev zamanlarının aralık verilerini içeren genelleştirilmiş KKMHD problemi modellemişler ve amaç, olası tüm senaryolar arasındaki maksimum pişmanlığı en aza indirecek şekilde görev ve kaynakların iş istasyonlarına atanmasını bulmaktır. Sorunu doğru bir şekilde çözmek için pişmanlık değerlendirmesi, kesin bir çözüm yöntemi ve geliştirilmiş bir meta-sezgisel algoritma olan Balina Optimizasyon Algoritması önermişler ve analiz etmişlerdir.

Michels ve Costa (2022) çalışmalarında, sınırlı sayıda istasyon ve kaynak göz önüne alındığında, kaynak kısıtlı montaj hatlarında çevrim süresini en aza indirmek için karma tamsayılı doğrusal programlama (MILP) modellerini önermişlerdir. Görevler için ayrılmış ve alternatif kaynak türleri farklı senaryolarda dikkate almışlardır. Önerilen MILP modelleri mevcut bir veri setine uygulamışlar ve sonuçlar bir KP modeliyle karşılaştırıldığında yeni optimal çözümler elde etmişlerdir. Ayrıca, mevcut olanın

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Materyal

3.1.1. Montaj Hatları ve Sınıflandırılması

Montaj hatları, ürünlerin işlendiği ardışık iş istasyonlarından oluşur. İş istasyonları, ürünler üzerinde belirli görevlerin (işlemlerin) gerçekleştirildiği yerler olarak tanımlanır. Ürünler, her istasyonda, ardışık olarak tamamlanan üniteler arasındaki zaman aralığı olan çevrim süresi boyunca kalır. Hat tasarlanırken yapılacak görevlerin listesi, her görevi gerçekleştirmek için gereken süreler ve aralarındaki öncelik ilişkileri analiz edilir. Bu analize dayalı olarak görevler istasyonlara gruplandırılırken, genel olarak belirli bir çevrim süresi için iş istasyonlarının sayısının en aza indirilmesi veya belirli bir iş istasyonu sayısı için çevrim süresinin en aza indirilmesi hedefleri dikkate alınır (Ağpak ve Gökçen, 2005).

Montaj hatları günümüzdeki haliyle ilk defa 1913 yılında Ford Motor Fabrikaları'nda uygulamaya alınmıştır (Akın, 2015). 1950'li yıllardan itibaren seri üretimin olduğu otomotiv sektöründe montaj hatları kullanılmaya başlanmıştır. Günümüzde montaj hatları, çeşitli sektörlerde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Seçme, 2014).

Montaj hatları genel olarak, ürün çeşitliliğine, yerleşimine, hattın hızına, görev süresine ve hedeflenen performans ölçütüne göre beş şekilde sınıflandırılmaktadırlar.

Ürün çeşitliliğine göre; tek, çok ve karışık modellenli olmak üzere üçe ayrılmaktadırlar. Tek tip bir ürünün veya modelin üretildiği hatlar tek modellenli montaj hatlarıdır (Saçlı ve diğ., 2011). Çok modellenli hatlar, bir ürünün farklı modelleri veya çeşitli ürünlerin partiler halinde ve farklı zamanlarda üretildiği montaj hatlarıdır. Bir ürünün üretimi tamamen bittikten sonra başka bir modelin üretimine geçilir. İlk ürünün üretimi tamamlandıktan sonra diğer ürün modelinin üretilmesi için montaj hattında hattın yeniden düzenlenmesi, istasyonlardaki kişilere yeniden iş dağıtımı yapılması gerekmektedir (Hıdımoğlu, 2019). Karma modellenli montaj hatları, aynı hat üzerinde birden fazla ürünün karışık sıra ile üretiminin yapıldığı hatlardır (Mete, 2013).

Hattın şekline göre; montaj hatları genellikle düz ve U-tipi olmak üzere iki şekilde tasarlanabilir. Hat düz bir çizgi üzerine yerleştirilmişse düz montaj hattı olarak adlandırılır. U-tipi montaj hatlarının en önemli özelliği ise hattın giriş ve çıkış

noktalarının aynı olmasıdır. Günümüzde U-tipi montaj hatları daha yaygın hale gelmeye başlamıştır (Atasagun, 2010).

Hattın Hızına Göre Montaj Hatları; gecikmeli ve gecikmesiz olmak üzere ikiye ayrılır. Gecikmesiz montaj hattında, her iş istasyonunda tüm görevlerin tamamlanması için belirli bir çevrim süresi vardır. Bu tip montaj hatlarında, her iş istasyonu için çevrim süresi sabit olduğundan, ürün bir sonraki istasyona sabit bir hızla gelir. Gecikmeli montaj hattında, tüm iş istasyonları için çevrim süresi sabit değildir (Mete, 2013).

Görev Süresine Göre Montaj Hatları; deterministik, stokastik ve dinamik süre olmak üzere üçe ayrılır. Deterministik görev süreli hatlarda, görev süreleri belirli ve deterministiktir (Atasagun, 2016). Stokastik görev süreli hatlar, üretilen ürünün iş istasyonlarında geçirdiği sürenin hat boyunca belirsiz olduğu durumlardır (Hıdımoğlu, 2019). Dinamik görev süreli hatlar, öğrenme etkileri veya üretim sürecinin ardışık iyileştirmeleri nedeniyle sistematik azalmalar mümkündür (Supçiller,2010).

Performans Ölçütüne Göre Montaj Hatları; Tip-1, Tip-2, Tip-E, Tip-F olmak üzere belirlenmektedir. Tip-1 MHD probleminin amacı, belirli bir çevrim süresi içinde hatta açılan istasyon sayısını minimize etmektir. Tip-2 MHD probleminin amacı belirli bir istasyon sayısı için hattın çevrim süresini en aza indirmektir (Atasagun, 2010). Tip-F MHD probleminde, iş istasyonu sayısı ve çevrim süresi kombinasyonu için uygun bir hat belirlemeyi amaçlanır. Tip-E MHD probleminde, aynı anda hem çevrim süresi hem de iş istasyonu sayısının minimizasyonu amaçlanır (Küçükkoç ve Zhang, 2015).

3.1.2. Montaj Hattı Dengeleme Problemi

MHD problemi, montaj hattında yapılacak görevlerin, birbirleri arasındaki öncelik ilişkileri gözетerek, belirli bir çevrim süresi içerisinde ve istenen performans ölçütünü en iyileyecek şekilde istasyonlara atanması problemidir (Kara ve diğ., 2014). Bu performans ölçütü, montaj hattında kullanılan işçi/istasyon sayısını en aza indirmek ya da hattın çevrim süresini en aza indirmektir (Atasagun, 2010).

Montaj hattı dengeleme probleminin basit hali aşağıda anlatılmıştır.

BMHD problemleri, görevlerin öncelik ilişkilerini, çevrim süresini ve atama kısıtlarını da dikkate alarak istasyonlara atanmasıyla ilgilenmektedir. Fakat günümüz şartlarında, sadece BMHD kullanmak ve uygulamak yeterli değildir. Örnek olarak, gerçek hayatta işçinin yeteneği ve tecrübesine göre görev süreleri değişirken literatürde süreler sabit ve her işçi aynı kabul edilir (Sarioğlu, 2021). BMHD probleminin kısıtlarına

ve varsayımlarına eklenen ilave kısıtlar ve varsayımlarla problem geleneksel montaj hattı dengeleme (GMHD) problemi olarak adlandırılmaktadır (Doğan, 2015). BMHD probleminin temel kısıtları aşağıda verilmiştir.

- *Görevler arasındaki öncelik ilişkileri kısıtı*: Bir görevin bir istasyona atanabilmesi için o görevden önce yapılması gereken tüm görevlerin tamamlanması ve bu görevlerin daha önceki veya ilgili görevle aynı istasyona atanmış olması gerekmektedir.
- *Görevlerin atama kısıtları*: Montaj için her görev herhangi bir istasyona atanmak zorundadır. Tüm görevler kesinlikle tamamlanmalıdır. Bir görev sadece bir istasyona atanabilir.
- *Çevrim süresi kısıtı*: Her bir istasyonun belirlenen çevrim süresi içinde tamamlanması gerekmektedir. Bir istasyonun toplam süresi, belirlenen çevrim süresinden fazla olamaz (Yıldız, 2015).

Düz BMHD probleminin matematiksel modeline ait kısaltmalar, Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Matematiksel modelde kullanılan kısaltmalar

Kısaltma	Kısaltma Açıklaması
<i>İndisler</i>	:
i, r, s	: Görev indisi
j	: İstasyon indisi
<i>Parametreler</i>	:
C	: Çevrim süresi
M_{max}	: Maksimum istasyon sayısı
N	: Toplam görev sayısı
t_i	: i görevinin tamamlanma süresi
S	: Öncelik ilişkileri kümesi
$(r, s) \in S$	: Bir öncelik ilişkisi; r görevi s görevinin komşu öncülüdür
<i>Karar Değişkenleri</i>	:
k_{ij}	: 1, i görevi j istasyonuna atanmış ise; 0, aksi halde

Düz BMHD probleminin Talbot ve Patterson (1984) tarafından önerilen tamsayılı programlama modeline ait amaç fonksiyonu, kısıtlar ve kısıtların açıklamaları aşağıda verilmiştir:

$$\text{Minimize } \sum_{j=1}^{m_{max}} jk_{nj} \quad (3.1)$$

$$\sum_{j=1}^{m_{max}} k_{ij} = 1 \quad \forall i \quad (3.2)$$

$$\sum_{i=1}^n t_i k_{ij} \leq C \quad \forall j \quad (3.3)$$

$$\sum_{j=1}^{m_{max}} j(k_{rj} - k_{sj}) \leq 0 \quad \forall (r, s) \in S \quad (3.4)$$

$$k_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i, \forall j \quad (3.5)$$

Problemin amaç fonksiyonu (3.1), toplam istasyon sayısının minimize etmektir. (3.2) numaralı kısıt, her bir görevin bir istasyona atanmasını ve bir kere atanmasını sağlamaktadır. (3.3) numaralı kısıt, açılan bir istasyondaki görevlerin görev sürelerinin toplamının çevrim süresini geçmemesini sağlamaktadır. (3.4) numaralı kısıt, öncelik ilişkileri kısıtıdır. Bir görev için kendinden önce yapılması gereken bir görev varsa ya öncülüyle aynı istasyona ya da kendinden önce yapılması gereken işin atandığı istasyondan sonraki bir istasyona atanmasını sağlamaktadır. (3.5) numaralı kısıt ise bir görev herhangi bir istasyona atanırsa 1 atanmazsa 0 değerini alacağını ifade eder (Atasagun, 2010).

3.1.3. Çok Modelli Kaynak Kısıtlı Montaj Hattı Dengeleme Problemi

Geleneksel montaj hatlarında her iş istasyonunda tek bir kaynağın (malzeme, ekipman vb.) bulunduğu ve bütün kaynakların aynı olduğu varsayılır (Barutçuoğlu, 2009). Fakat bir iş istasyonu, bir üründe çeşitli görevlerin yapılması için bir araya gelen işgücünün ve kaynakların (malzeme, ekipman vb.) koleksiyonu olarak düşünülmelidir (Kara ve diğ., 2014). İşgücü, kaynaklar ve görevler arasındaki etkileşimlere dayalı olarak montaj hatlarının endüstriyel koşullarının dikkate alınarak, görev atamaları ve kaynak atamalarının eş zamanlı olarak yapıldığı problem KKMHD problemidir. KKMHD problemi ile ilgili ilk çalışma Ağpak ve Gökçen (2005)'e aittir.

Çalışmalarında, ekipmanların ve görevlerin iş istasyonlarına eş zamanlı olarak atanmasıyla ilgili bir endüstriyel KKMHD problemini sunmuşlardır. Amaç fonksiyonunu, 'montaj hattının dengesini minimum istasyon ve kaynak sayısı ile

sağlamak' olarak tanımlamışlardır. Her görev, yalnızca kaynak A veya kaynak B ($A \vee B$) tarafından işlenebilir veya her ikisi tarafından da ($A \wedge B$) işlenebilir. Bu amaçla, 0-1 tamsayılı programlama modelleri geliştirilmiştir. Corominas ve diğ. (2011) KKMHD problemini genelleştirerek, aşağıdaki özellikleri dikkate alan GKKMHD problemini tanımlamışlardır. Bu çalışmada, Corominas ve diğ. (2011)'in ortaya koyduğu kısıtlar ve varsayımlar dikkate alınarak, gerçek hayata uyarlanmıştır. Corominas ve diğ. (2011) çalışmalarında, Ağpak ve Gökçen (2005)'den farklı olarak bir görevi işlemek için gereken kaynakların bir türden birden fazla kaynak olabileceğini belirtmişlerdir. Aynı anda birden fazla kaynak türü (A^4B^3C) veya alternatif ve/veya eşzamanlı kaynakların kombinasyonları ($(3A \vee 2B \vee C)$, $(A \wedge B) \vee (2C \wedge D)$, $(A \vee B) \wedge (2C \vee D)$ vb.) olabilir (3A: görevin yapılması için 3 birim A kaynağı gereklidir anlamına gelmektedir). Her çeşit kaynak için, kaynak sayısı üst sınırı bulunmaktadır. Amaç toplam kaynak toplam istasyon ve ekipman maliyetini minimize etmektir.

KKMHD problemi, düz, karışık veya çok modellenli ürünler için uygulanmaktadır. Bu çalışmada çok modellenli KKMHD problemi ele alınmıştır. Karışık modellenli ve çok modellenli montaj hatları arasındaki temel fark, üretilen birimler arasındaki değişkenliktir. Karışık modellenli montaj hattında, çeşitli varyasyonlara sahip tek bir ürün (model) üretilir. Model arasındaki değişkenlik hat dengelemesi sırasında dikkate alınmalıdır, modeller olası iş yükünü en aza indirmek için belirli bir sırayla planlanır. Örneğin, aynı arabanın farklı modellerinin (örneğin, tavanı olan / olmayan) üretildiği otomotiv montaj hattı karışık modellenli montaj hattına örnek olarak verilebilir. Çok modellenli montaj hattında ise modeller arasındaki farklar daha belirgin olup hattın parti üretimine dayanmasına neden olmaktadır. Örneğin, farklı kıyafetlerin tek bir hat üzerinde üretildiği hatlar çok modellenli montaj hatlarına örnektir. Çok modellenli montaj hatlarında her ürün, aynı ya da farklı çevrim süresine göre, birbirinden bağımsız dengelenir. Fakat bu durumda, ürünlerin ortak görev sayısı, ekipman sayısı vb. kriterleri önem kazanmaktadır. Eğer ürünlerin görev sayıları birbirine yakınsa, öncelik ilişkileri benzerse ve ortak görev sayıları fazla ise ve/veya ortak ekipman kullanan görev sayısı fazla ise, ortak görevler her dengelemede aynı istasyonlara atanabilir. Aksi durumda, ise tamamen görev sayısı ve ortak görevden bağımsız olarak ürünler dengelenir (Baskak, 1998).

Çalışma kapsamında, Corominas ve diğ. (2011)'in geliştirdiği matematiksel modelden yararlanılmıştır. İlgili modelde kullanılan kısaltmalar Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Matematiksel modelde kullanılan kısaltmalar

Kısaltma	Kısaltma Açıklaması
<i>İndisler</i> :	
i	: Görev indisi
j	: İstasyon indisi
r	: Kaynak çeşidi indisi
q	: Kaynak sayısı indisi
<i>Kümeler</i> :	
I	: Görevler kümesi, $i = 1, 2, \dots, N$
J	: İstasyonlar kümesi, $j = 1, \dots, M_{max}$
R	: Kaynak çeşidi kümesi, $r = 1, 2, \dots, NR$
P	: Ürün modelleri kümesi, $p = 1, 2, \dots, NP$
<i>Parametreler</i> :	
N	: Görev Sayısı
t_i	: i görevinin işlem süresi
E_i	: i görevinin atanabileceği ilk istasyon
L_i	: i görevinin atanabileceği son istasyon
$\alpha_{rpi}(q)$	: i görevinin p cümlesi için r tipindeki kaynak birimlerinin sayısı
W_j	: j istasyona atanabilecek görevler dizisi
K_{rj}	: j istasyonunda r kaynak türü ile gerçekleştirilen görevler kümesi
MW_j	: j istasyonuna atanacak maksimum görev sayısı
NM_r	: r kaynak çeşidinin maksimum sayısı
CE_j	: j istasyon sayısını bir birim artırmanın maliyeti
CR_r	: r kaynağından bir birim kullanmanın maliyeti
PR	: Görevler arasındaki öncelik ilişkisi
CT	: Çevrim süresi
M_{max}	: Maksimum istasyon sayısı
<i>Karar Değişkenleri</i> :	
x_{ij}	: i görevi j istasyonuna atanırsa 1, aksi halde 0
y_j	: j istasyonu açılırsa 1; aksi halde 0
v_{rqj}	: r kaynağı j istasyonuna q sayıda atanırsa 1, aksi halde 0

Ele alınan 0-1 tamsayılı programlama modeline ilişkin amaç fonksiyonu, kısıtlar ve kısıtların açıklamaları aşağıda verilmiştir.

$$\text{Min} \sum_{j=1}^{M_{max}} CE_j \cdot y_j + \sum_{j=1}^{m_{max}} \sum_{\forall r | K_{rj} \neq \emptyset} CR_r \cdot \sum_{q=1}^{MR_j} v_{rqj} \quad (3.6)$$

$$\sum_{j=E_i}^{L_i} X_{ij} = 1 \quad i = 1, \dots, N \quad (3.7)$$

$$\sum_{i \in W_j} t_i \cdot x_{ij} \leq CT \quad j = 1, \dots, m_{max} \quad (3.8)$$

$$\sum_{i \in W_j} x_{ij} - MW_j \cdot y_j \leq 0 \quad j = m_{min} + 1, \dots, m_{max} \quad (3.9)$$

$$\sum_{j=E_i}^{L_i} j \cdot X_{ij} \leq \sum_{j=E_k}^{L_k} j \cdot x_{kj} \quad \forall (i, k) \in PR \quad (3.10)$$

$$\sum_{\forall j|K_r, j \neq \emptyset} \sum_{q=1}^{MR_{rj}} v_{rqj} \leq NM_r \quad r = 1, \dots, R \quad (3.11)$$

$$x_{ij} \leq \sum_{r|\alpha_{rpi}>0} V_{r, \alpha_{rpi}, j} \quad p = 1, \dots, C_i, j \in [E_i \dots L_i] \quad (3.12)$$

$$\forall i, q, j \leq V_{i, q-1, j} \quad p=1, \dots, C_i: \forall r|\alpha_{rpi}>1 : 2 \leq q \leq \alpha_{rpi}: j \in [E_i \dots L_i] \quad (3.13)$$

Problemin amaç fonksiyonu (3.6), istasyon açma maliyeti ile kaynakların kullanma maliyetinin toplamalarının en aza indirilmesidir. (3.7) numaralı kısıt, her bir görevin sadece bir istasyona atanmasını sağlamaktadır. (3.8) numaralı kısıt, çevrim süresi kısıtıdır. İstasyona ait görevlerin sürelerinin toplamı çevrim süresini geçemez. (3.9) numaralı kısıt, istasyona atanacak maksimum görev sayısı toplam atanacak görev sayısından büyük veya eşit olmalı. (3.10) numaralı kısıt, öncelik kısıtıdır. Bir görev için kendinden önce yapılması gereken bir görev varsa ya öncülüyle aynı istasyona ya da kendinden önce yapılması gereken işin atandığı istasyondan sonraki bir istasyona atanmasını sağlamaktadır. (3.11) numaralı kısıt, atanan kaynakların sayılarının toplamı toplam kaynak sayısını geçmemesini sağlamaktadır. (3.12) ve (3.13) numaralı kısıtlar, i görevi eğer j istasyonuna atanırsa, i görevinin her r kaynağının ihtiyaç duyulan sayıda (α_{rpi}), j istasyonuna atanmasını sağlamaktadır.

3.1.4. Uygulamanın Yapıldığı İşletmenin ve Montaj Hatlarının Tanıtımı

1983 yılında sadece hazırlık ekipmanları üreterek, sektöre giriş yapan işletme, endüstriyel mutfak sektöründe paslanmaz çelikten oluşan; hazırlık, kafeterya, bulaşikhane, pişirme, soğutma ekipmanları, teşhir ürünleri, raflar, gastronom evyeler, medikal ekipmanlar, özel projeler, askeriye ve sivil toplum kuruluşları tarafından kullanılan sahra mutfak ve mobil mutfakların imalatını yapmaktadır. 50.000 m²'si kapalı, 7.000 m²'si açık olmak üzere, toplamda 57.000 m² alanda faaliyet gösteren işletme, 3.000'in üzerinde farklı ürünü aynı çatı altında üretmektedir.

Çalışma kapsamında, işletmedeki dört farklı ürüne ait montaj hattı ele alınmıştır. İlgili ürünler; hamur yoğurma makinesi, spiral hamur yoğurma makinesi, mikser makinesi, tulumba ve köfte şekillendirme makinesidir.

İşletmede, uygulama için hamur yoğurma, spiral hamur yoğurma, tulumba ve köfte şekillendirme ve mikser makinesi olmak üzere 4 farklı ürünün üretimine odaklanılmıştır. Bu ürünler 2 farklı hatta 4 işçi tarafından üretilmektedirler. Bir hatta hamur yoğurma ile spiral hamur yoğurma makinesi, diğer hatta tulumba ve köfte şekillendirme makinesi ile mikser makinesi üretilmektedir. Her hat 4 istasyondan oluşmaktadır. Ürünlerde bazı montaj görevleri aynı ekipman/ekipmanlar kullanılarak yerine getirilmektedir. Hatlarda görevlerin istasyonlara atanmalarında, ortak (aynı) ekipman kullanan görevler aynı istasyonlara atanabilecekken, mevcut durumda “ortak ekipman” durumu dikkate alınmamıştır. Ürünlerin hem iki ayrı hatta üretilmeleri hem de ortak ekipman kriterine dikkat edilmemesi, işçilerin birbirlerini aynı ekipmanlar için beklemelerine neden olmaktadır. Bu sorunlar, kullanılan ekipman sayısının ve buna bağlı olarak maliyetinin artmasına, hatlar arasında ekipmanların beklenmesinden ve taşınmasından kaynaklanan zaman ve maliyet israfına neden olmaktadır. Hatlarda ürünler eş zamanlı olarak monte edilmemektedirler. Taleplerin durumuna ve teslim edilme tarihlerine göre, 4 işçi öncelikle bir hattaki ürünlerin montajını yapmakta, daha sonra aynı işçiler diğer hattaki ürünlerin montajını gerçekleştirmektedirler. Bir hattaki iki üründen birinin belirlenen parti miktarı kadar ürün üretilmeden diğer ürünün üretimi yapılmamaktadır. Bu durumda, 2 farklı hattın kullanımının gereklilik durumu sorgulanmıştır. 2 farklı hattın kullanılmasının nedeni üretim için gerekli olan kaynakların, hatların kurulması aşamasında hatların arkasına yerleştirilen raflarda depolanmasıdır. Hatların ve arkalarına yerleştirilmiş rafların konumu incelendiğinde, mevcut yerleşimin zorunlu koşullardan kaynaklanmadığı değiştirilebileceği gözlemlenmiştir. İşletmede üretim planı açık ve net değildir. Bütün ürünlerin üretimi 10 ila 20 iş günü arasında değişkenlik göstermektedir. İşletmede, 19 adet ekipman mevcut olup, bu ekipmanların birçoğu ilgili dört ürünün montajında kullanılmaktadır. Ürünler üretilirken ekipmanlar hatlar arasında taşınmaktadır. İlgili ürünlerin Şekil 3.1’de fotoğraf görüntüleri verilmiştir.



a) Hamur yoğurma makinesinin görseli



b) Spiral hamur yoğurma makinesinin görseli



c) Tulumba ve köfte şekillendirme makinesinin görseli

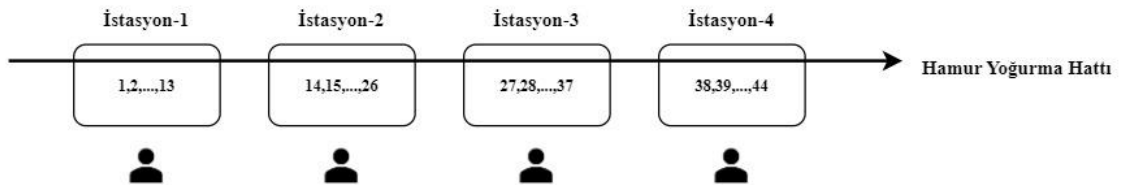


d) Mikser makinesinin görseli

Şekil 3.1. Montajı yapılan dört ürüne ilişkin fotoğraf görüntüleri

Uygulamanın yapıldığı, hamur yoğurma makinesi, tulumba ve köfte şekillendirme makinesi, spiral hamur yoğurma makinesi ve mikser makinesinin montajına ilişkin veriler aşağıda sırasıyla açıklanmıştır.

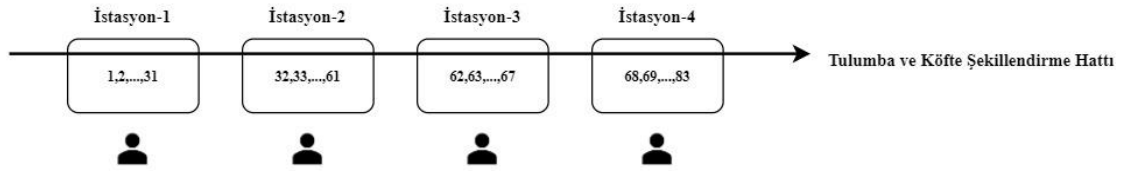
Hamur yoğurma makinesi (HYM): Bu makinenin montajı, 44 adet görev ve 14 adet ekipman kullanılarak yapılmaktadır. *HYM*'nin aylık ortalama talebi 32 adet olup bir ürünün toplam görev süresi yaklaşık 6037 sn (100,5 dk)'dır. Çevrim süresi 1800 sn (30 dk)'dır. Mevcut üretim hattı Şekil 3.2'de verilmiştir.



Şekil 3.2. Hamur yoğurma makinesinin üretim hattı görseli

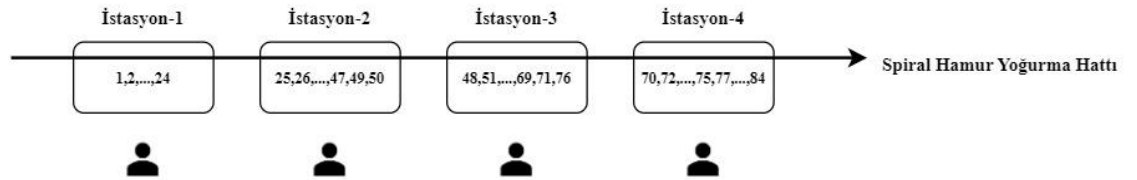
Tulumba ve Köfte Şekillendirme Makinesi (TKM): Bu makinenin montajı, 83 adet görev ve 13 adet ekipman kullanılarak yapılmaktadır. *TKM*'nin aylık ortalama talebi 16

adet olup bir ürünün toplam görev süresi yaklaşık 12096 sn (201,5 dk)'dır. Çevrim süresi 3600 sn (60 dk)'dır. Üretim hattı Şekil 3.3'de verilmiştir.



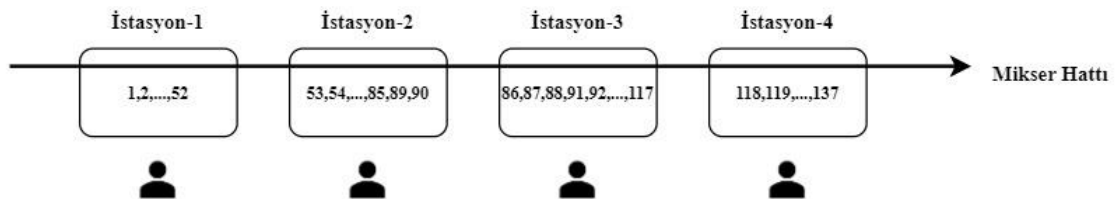
Şekil 3.3. Tulumba ve köfte şekillendirme makinesinin üretim hattı görseli

Spiral hamur yoğurma makinesi (SHM): Bu makinenin montajı, 84 adet görev ve 17 adet ekipman kullanılarak yapılmaktadır. SHM'nin aylık ortalama talebi 20 adet olup bir ürünün toplam görev süresi yaklaşık 9991 sn (166,5 dk)'dır. Çevrim süresi 2700 sn (45 dk)'dır. Üretim hattı Şekil 3.4'de verilmiştir.



Şekil 3.4. Spiral hamur yoğurma makinesinin üretim hattı görseli

Mikser makinesi (MM): Bu makinenin montajı, 137 adet görev ve 18 adet ekipman kullanılarak yapılmaktadır. MM'nin aylık ortalama talebi 24 adet olup bir ürünün toplam görev süresi yaklaşık 13321 sn (222 dk)'dır. Çevrim süresi 3600 sn (60 dk)'dır. Üretim hattı Şekil 3.5'de verilmiştir.



Şekil 3.5. Mikser makinesinin üretim hattı görseli

Yukarıda verilen bilgiler Çizelge 3.3'de özetlenmiş olup dört üründen her biri için öncelik ilişkileri, görev süreleri ve üretimlerinde kullanılan ekipman çeşitleri ve sayıları EK-1, EK-2, EK-3 ve EK-4'de Öncelik İlişkileri, Görev Süreleri ve Ekipman Bilgileri bölümünde verilmiştir.

Çizelge 3.3. Dört ürüne ilişkin verilerin özeti

Ürünler	Görev Sayısı	Ekipman Çeşidi Sayısı	Talep Miktarı (Adet /Aylık)	Toplam Görev Süresi (sn)	Çevrim süresi (sn)
HYM	44	14	32	6037	1800
TKM	83	13	16	12096	3600
SHM	84	17	20	9991	2700
MM	137	18	24	13321	3600

İşletmede, mevcut olan 19 adet ekipman çeşidinin her biri işletmede sınırlı sayıda mevcuttur. Bir ekipman çeşidinin bir biriminin aylık kullanım maliyeti her ürün için aynıdır. Ekipman çeşidi sayısı, her ekipmanın maliyeti ve ürünlerde kullanılan ekipmanlar Çizelge 3.4’de verilmiştir.

Çizelge 3.4. İşletmede mevcut olan ekipmanlar, sayıları ve kullanma maliyetleri

Ekipman Numaraları	Ekipman İsimleri	Ekipman miktarları	Ekipman Maliyetleri	Kullanılan Ekipmanlar			
				HYM	TKM	SHM	MK
1	Şarjlı Matkap	4	44,26	✓	✓	✓	✓
2	Vızvız	2	67,98	✓	-	-	✓
3	Çekiç	4	0,43	✓	✓	✓	✓
4	Havalı tabanca	2	4,79	✓	✓	✓	✓
5	17 numara anahtar	4	0,91	✓	✓	✓	✓
6	Tornavida	3	0,69	✓	-	✓	✓
7	13 numara anahtar	4	0,38	✓	✓	✓	✓
8	Flex	1	56,48	✓	✓	✓	✓
9	Segman Pensesi	1	1,86	✓	✓	✓	✓
10	Kontrol kalemi	2	0,48	✓	-	✓	✓
11	Klemens tornavida	2	0,53	✓	-	✓	✓
12	Kablo sıkma pensesi	2	1,60	✓	✓	✓	✓
13	Mop makinesi	1	97,39	✓	✓	✓	✓
14	6 numara alyan	4	0,32	-	✓	✓	✓
15	Elektrikli matkap	3	47,57	-	✓	✓	✓
16	Saplama kaynak makinası	1	768,03	-	-	✓	✓
17	Maket bıçağı	4	0,13	-	✓	✓	✓
18	Kaynak makinesi	1	489,70	✓	-	✓	✓
19	Silikon tabancası	1	0,86	-	✓	-	-

Mevcut durum incelendiğinde, 4 adet ürünün çok modellenli montaj hattı dengeleme kriterlerine bağlı olarak 1 hatta üretilmesi, her ürün için aynı ekipmanı kullanan görevlerin mümkün olduğunca aynı istasyonlara atanmaları planlanmış ve önerilmiştir. Önerilen bu yerleşimle sağlanacak avantajlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- 2 hat yerine 1 hattın kullanılması ile alandan tasarruf edilebilecektir.
- İhtiyaç duyulan istasyon sayısı azalabilecektir.
- Kaynakların ve malzemelerin taşınması kolay olabilecektir.

- İşçilerin birbirlerini beklemelerinden kaynaklanan zaman israfı ortadan kalkacaktır.
- Maliyetlerden tasarruf elde edilebilecektir.
- Üretim planlama ve kontrol net, tanımlı ve kolay uygulanabilecektir.

3.2. Yöntem

Çalışma kapsamında, çok modelli bir montaj hattının, ekipman kısıtları dikkate alınarak dengelenmesi için, Corominas ve diğ. (2011)'in geliştirdiği matematiksel modelden yararlanılmış, ilgili modele ek kısıtlar eklenerek, problem gerçek hayata uyarlanmıştır. Problemin amacı, toplam iş istasyonu ve ekipman maliyetini minimize etmektir. Montaj görevlerinde alternatif kaynak kullanımı yoktur. Yani her göreve ilişkin ekipman/ekipmanların eş zamanlı kullanımı söz konusudur. Uygulamanın yapıldığı işletmede, ürün çeşidi sayısı fazladır. İlgili ürünler arasındaki görev sayıları, görevlerin özellikleri, öncelik ilişkileri ve kullanılan ekipmanlar incelendiğinde, aralarındaki benzerlik oranının, aynı zamanda ürünler arasında ortak ekipmana sahip görevlerin de az olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca ekipmanların hafif ve kolay taşınabilir oldukları gözlemlenmiştir. Bu durumlar incelendiğinde, ortak görevlerin ve/veya ekipmanların her ürün için aynı istasyona/istasyonlara atanması varsayımının makul olmayacağı sonucuna varılmıştır. Bu nedenle her ürün birbirinden tamamen bağımsız dengelenirken, ortak ekipman kullanan görevlerin aynı istasyonlara atanması varsayımı, her ürün için diğer ürünlerden bağımsız olarak ele alınmıştır. Bütün modellerin bir hatta, aynı çevrim süresine göre partiler halinde üretilmesi planlanmaktadır. Bir ürün bittikten sonra diğer ürünün üretimine geçilmektedir. Her ürün arasında hazırlık süreci gerçekleşmektedir. Yukarıda da belirtildiği gibi, işletmedeki ekipmanların hafif ve kolay taşınır olması hazırlık sürecinin uzun sürmemesine neden olmaktadır. Problemin diğer varsayımları aşağıda verilmiştir:

- Ürünler arası hazırlık süreleri dikkate alınmıştır.
- Her bir ürünün görevleri arasındaki öncelik ilişkileri bilinmektedir.
- Her bir ürünün görev süreleri deterministiktir ve önceden bilinmektedir.
- Her operatör, her görevi yapabilmektedir.
- İstasyonlar arası ara stoğa izin verilmemektedir.
- İstasyonlar arası taşıma süreleri dikkate alınmamıştır.

Çalışmada kullanılan matematiksel modelde kullanılan kısaltmalar, Çizelge 3.5’de verilmiştir (Corominas ve diğ., 2011).

Çizelge 3.5. Matematiksel modelde kullanılan kısaltmalar

Kısaltma	Kısaltma Açıklaması
<i>İndisler</i>	:
<i>i</i>	: Görev indisi
<i>j</i>	: İstasyon indisi
<i>r</i>	: Kaynak çeşidi indisi
<i>q</i>	: Kaynak sayısı indisi
<i>Kümeler</i>	:
<i>I</i>	: Görevler kümesi, $i = 1, 2, \dots, N$
<i>J</i>	: İstasyonlar kümesi, $j = 1, \dots, M_{max}$
<i>R</i>	: Kaynak çeşidi kümesi, $r = 1, 2, \dots, NR$
<i>P</i>	: Ürün modelleri kümesi, $p = 1, 2, \dots, NP$
<i>Parametreler</i>	:
<i>N</i>	: Görev sayısı
<i>M_{max}</i>	: Maksimum istasyon sayısı
<i>NR</i>	: Kaynak çeşidi sayısı
<i>NP</i>	: Model sayısı
<i>NM_r</i>	: <i>r</i> kaynak çeşidinin maksimum sayısı
<i>MR_{rj}</i>	: Herhangi bir <i>i</i> görevinin <i>j</i> 'ye atanabileceği <i>r</i> kaynak çeşidinin maksimum sayısı $q = 1, \dots, MR_{rj}$
<i>α_{ri}</i>	: <i>i</i> görevinde kullanılan <i>r</i> kaynak çeşidinin sayısı $r = 1, 2, \dots, NR; i = 1, 2, \dots, N$
<i>t_{ip}</i>	: <i>p</i> modelinin <i>i</i> görevinin tamamlanma zamanı
<i>CT</i>	: Çevrim süresi
<i>S</i>	: Öncelik ilişkileri kümesi
<i>(r, s) ∈ S</i>	: Bir öncelik ilişkisi; <i>r</i> görevi <i>s</i> görevinden önce tamamlanmak zorundadır
<i>CE_j</i>	: <i>j</i> iş istasyonunu aylık kullanmanın maliyeti (işçi + sabit maliyetler)
<i>CR_r</i>	: <i>r</i> kaynağını aylık olarak kullanmanın maliyeti
<i>Karar Değişkenleri</i>	:
<i>x_{ij}</i>	: <i>i</i> görevi <i>j</i> istasyonuna atanırsa 1, aksi halde 0
<i>y_j</i>	: <i>j</i> istasyonu açılırsa 1; aksi halde 0
<i>v_{irqj}</i>	: <i>i</i> görevinin <i>r</i> kaynağı <i>j</i> istasyonuna <i>q</i> sayıda atanırsa 1, aksi halde 0
<i>w_{rqj}</i>	: <i>r</i> kaynağı <i>j</i> istasyonuna <i>q</i> sayıda atanırsa 1, aksi halde 0

Ele alınan 0-1 tamsayılı programlama modeline ilişkin amaç fonksiyonu, kısıtlar ve kısıtların açıklamaları aşağıda verilmiştir.

$$\text{Min} \sum_{j=1}^{M_{max}} CE_j \cdot y_j + \sum_{j=1}^{M_{max}} \sum_{r=1}^{NM_r} CR_r \cdot \sum_{q=1}^{MR_{rj}} w_{rqj} \quad (3.14)$$

$$\sum_{j=1}^{M_{max}} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in I \quad (3.15)$$

$$\sum_{i=1}^N t_{ip} \cdot x_{ij} \leq CT \quad \forall j \in J; \forall p \in P \quad (3.16)$$

$$\sum_{j=1}^{M_{max}} j \cdot x_{rj} \leq \sum_{j=1}^{M_{max}} j \cdot x_{sj} \quad \forall (i, k) \in S \quad (3.17)$$

$$\sum_{j=1}^{M_{max}} \sum_{q=1}^{MR_j} w_{rqj} \leq NM_r \quad \forall r \in R \quad (3.18)$$

$$x_{ij} \leq v_{irqj} \quad \forall i \in I; \forall j \in J; \forall r \in R; \forall q \in MR_{rj} \quad (3.19)$$

$$\sum_{i=1}^N v_{irqj} - MW \cdot w_{rqj} \leq 0 \quad \forall j \in J; \forall r \in R; \forall q \in MR_{rj} \quad (3.20)$$

$$v_{irqj} \leq v_{i,r,q-1,j} \quad \forall r | \alpha_{ri} > 1; 2 \leq q \leq \alpha_{ri}; \forall j \in J \quad (3.21)$$

$$w_{rqj} \leq w_{r,q-1,j} \quad \forall r | \alpha_{ri} > 1; 2 \leq q \leq \alpha_{ri}; \forall j \in J \quad (3.22)$$

$$x_{ij}, y_j, v_{irqj}, w_{rqj} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I; \forall j \in J; \forall r \in R; \forall q \in MR_{rj} \quad (3.23)$$

(3.14) numaralı denklem, matematiksel modelin amaç fonksiyonudur. Toplam hat maliyetini minimize etmektedir. Fonksiyonun ilk kısmı toplam istasyon maliyetini, ikinci kısım ise toplam ekipman maliyetini ifade etmektedir. (3.15) numaralı kısıt atama kısıtıdır ve bir görevin en fazla bir istasyona atanabileceğini göstermektedir. (3.16) numaralı kısıt çevrim süresi kısıtıdır ve bir istasyona atanan görev zamanlarının toplamının çevrim süresinin aşmamasını sağlamaktadır. (3.17) numaralı kısıt ile görevler arasındaki öncelik ilişkileri sağlanmaktadır. (3.18) numaralı kısıt istasyonlara atanabilecek toplam r kaynak sayısının, mevcut r kaynağı sayısını aşmamasını garanti etmektedir. (3.19) ve (3.20) numaralı kısıtlar, i görevi eğer j istasyonuna atanırsa, i görevinin her r kaynağının ihtiyaç duyulan sayıda (α_{ri}), j istasyonuna atanmasını sağlamaktadır. (3.21) ve (3.22) numaralı kısıtlar, v_{irqj} değişkeninin (0-1) ikili değişkenlerinin değerinde tutarlılık sağlar ve simettrileri ortadan kaldırır. (3.23) numaralı kısıt ise karar değişkenlerinin 0 ya da 1 değerini almalarını garanti etmektedir.

Corominas ve diğ. (2011) tarafından önerilen model üzerinde yapılan değişiklikler aşağıda özetlenmiştir:

- (3.16) kısıtında görev süreleri ürün modeline göre değişmektedir. Bu nedenle t_i parametresi t_{ip} olarak güncellenmiştir.

- (3.11) kısıtında yer alan, bir r kaynağının j istasyonuna atanabileceği maksimum sayısı (MR_{rj}) kriteri dikkate alınmamıştır. (3.18) kısıtında sadece, her kaynağın hattaki bütün istasyonlardaki toplam sayısı için üst sınır toplam sayısı (NM_r) kullanılmıştır.
- Modelde hangi göreve hangi kaynak/kaynaklardan, kaç adet kullanılacağını kesin olarak tanımlanabilmesi için atanabilmesi için v_{rqj} karar değişkeni, v_{irqj} olarak güncellenmiştir.
- Modelde, amaç fonksiyonunda ekipman maliyetlerini belirlemek amacıyla, v_{irqj} kullanıldığı takdirde, bir istasyonda kullanılan ortak ekipmanın sayısının, o ekipmanı kullanan görevlerin sayısına eşit ya da daha büyük olduğu gözlemlenmiştir. Örneğin bir istasyona 1 ve 2 numaralı görevlerin atandığını ve her ikisinin de 3.tip kaynaktan 1 adet kullandığını varsayalım. Bu istasyonda 1 adet 3.tip kaynağın kullanılması yeterli olacaktır. Bu durumu, ifade etmek için amaç fonksiyonunda v_{irqj} , bu istasyona 3.tip kaynaktan 2 adet atanmış varsayılacak ve ekipman maliyeti yanlış hesaplanacaktır. Bu nedenle aynı istasyona, hangi ekipmandan kaç adet atandığının ve ekipman maliyetlerinin doğru hesaplanabilmesi için w_{rqj} karar değişkeni eklenmiştir. Buna bağlı olarak (3.18), (3.20) ve (3.21) kısıtları modele eklenerek, amaç fonksiyonunda v_{irqj} yerine w_{rqj} karar değişkeni kullanılmıştır.

4.ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Bu bölümde önerilen doğrusal programlama modeli ile çözülen problemin sonuçları değerlendirilecektir. Çalışma kapsamında önerilen matematiksel model GAMS 24.3 ara yüzünde kodlanarak, sonuçlar CPLEX çözücü ile elde edilmiştir. Bütün koşumlarda çözücünün varsayılan parametre seviyeleri kullanılmıştır.

İşletmede ayda 20 işgünü tek vardiya çalışılmaktadır. Bir iş günü yemek ve çay molaları dışında 9 saatlik çalışma zamanından oluşmaktadır. Ürünler arasındaki toplam hazırlık zamanı yaklaşık 30 dk'dır. Dolayısıyla net çalışma zamanı 30.600 sn/gün ve 612.000 sn/ay olarak elde edilmiştir. Dört ürün için, işletmenin geçmiş yıllardaki aylık satış miktarları incelenerek, HYM, TKM, SHM ve MM'nin ortalama talep miktarları sırasıyla 32, 16, 20 ve 24 adet/ay olarak hesaplanmıştır. Her ürünün bir adetinin toplam görev süresi sırasıyla, 6037, 12096, 9991 ve 13321 sn'dir. Çevrim süresi, fiili toplam görev süresinin bütün ürünlerin toplam talebine bölünmesiyle elde edilmiştir ve 8052 sn'dir. Fakat toplam talep hesaplanırken HYM'nin talep miktarı 32 yerine 16 alınarak toplam talep hesaplanmıştır. Çünkü, yapılan ön analizler sonucunda, HYM'nin istasyon sayısı 1 adetken, diğer ürünlerin istasyon sayısı 2 adettir. 1 istasyon için toplam hat maliyeti daha az olmasına rağmen, bütün ürünler tek hat üzerinde dengeleneceği için, 1 istasyon olması durumunda, hattaki ikinci istasyon HYM'nin üretimi boyunca boş kalacaktır. Bu durum, dolaylı olarak fazladan istasyon açma maliyetine katlanılmasına ve yararlanma oranının azalmasıyla kaynak israfına neden olacaktır. Bu nedenle, HYM ürünü için de geçerli istasyon sayısı 2 istasyon olarak kabul edilmiştir. Bu doğrultuda her 8052 sn'de bir, iki adet HYM ürünü üretilmektedir. Başka bir deyişle, HYM'nin çevrim zamanı 4026 sn'dir. Elde edilen optimal çözümler Çizelge 4.1, 4.2, 4.3, 4.4 ve 4.5'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. 4 Ürün için Elde Edilen Optimal Hat Maliyetleri

Ürünler	İstasyon sayısı	Toplam Maliyet
HYM	2	58.858,20
TKM	2	58.355,77
SHM	2	59.565,50
MM	2	59.720,71

Çizelge 4.2. HYM'nin görev ve ekipman atamalarına ilişkin sonuçlar

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

Çizelge 4.3. TKM'nin görev ve ekipman atamalarına ilişkin sonuçlar

İstasyon	Atanan Görevler	Atanan Ekipmanlar
1	1,3,5,6,11,13,14,15,18,19,20,22,23, 24,25,26,27,28,29,30,31,32,33,34,35 36,37,38,40,41,44,45,46,47,53,54,55,56, 57,58,59,60,61,62,63,64,65,66,67,68,70	1,3,4,5(2),7, 8,9,12,13,14, 15(2),17,19
2	2,4,7,8,9,10,12,16,17,21,39,42,43, 48,49,50,51,52,69,71,72,73,74,75, 76,77,78,79,80,81,82,83	1,3,4, 7,14, 17,19

Çizelge 4.4. SHM'nin görev ve ekipman atamalarına ilişkin sonuçlar

İstasyon	Atanan Görevler	Atanan Ekipmanlar
1	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18, 19,21,22,23,24,25,28,29,30,31,32,33, 34,35,36,37,38,39,40,41,42,43,44,45,46,47, 48,49,50,51,52,53,54,55,56,57,59,60,61,62, 63,64,65,66,67,68,69,70,71,72,73,74,76	1,3,4, 5(2),6,8, 9,10,11,12, 13,14,15(2), 16,17
2	20,26,27,58,75,77,78,79,80,81,82,83,84	3,5,7,17,18

Çizelge 4.5. MM'nin görev ve ekipman atamalarına ilişkin sonuçlar

İstasyon	Atanan Görevler	Atanan Ekipmanlar
1	1,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19, 20,21,22,23,24,25,26,27,28,29,30,31,32,33,34, 35,36,37,38,39,40,41,42,43,44,45,46,47,48,49, 50,51,52,54,53,59,60,61,62,63,64,65,66,67,69,70, 72,76,77,78,79,80,81,82,83,84,85,86,87,88,89, 90,96,97,98,99,100,103,104,105,106,107,108, 109,110,118,119,121,122	1,2,3, 4,5,6, 7,8,9, 11,12,13, 14,15(2), 16,17
2	2,55,56,57,58,68,71,73,74,75,91,92,93,94, 95,101,102,111,112,113,114,115,116,117, 120,123,124,125,126,127,128,129, 130,131,132,133,134,135,136,137	1(2),3, 10,11, 17,18

Çizelge 4.2, 4.3, 4.4 ve 4.5 incelendiğinde, istasyon sayısı HYM, TKM, SHM ve MM için 2 olarak elde edilmiştir. Her istasyona hangi görevlerin ve ekipmanların atandığı ilgili sütunlarda verilmiştir. Bazı ekipmanların yanında yer alan parantez içindeki rakamlar ekipman sayısını belirtmektedir. Önerilen yerleşim maliyetler, istasyonlar ve kullanılan ekipman sayısı bakımından mevcut durumla karşılaştırılmıştır ve sonuçlar Çizelge 4.6 ve 4.7'de verilmiştir.

Çizelge 4.6. Mevcut ve Önerilen Durumun İstasyon Sayısı ve Maliyetler Bakımından Karşılaştırılması

Ürünler	İstasyon Sayısı		Toplam Maliyet (TL)		İyileşme Oranı %		İyileşme Oranı (Toplam maliyet)
	Mevcut	Önerilen	Mevcut	Önerilen	İst.mal	Ek.mal	%
HYM	4	2	116.909,93	58.858,20	%50	%6	%50
TKM	4	2	116.800,61	58.355,77	%50	%56	%50
SHM	4	2	118.059,73	59.565,50	%50	%24	%50
MM	4	2	118.132,81	59.720,71	%50	%19	%49

Çizelge 4.7. Mevcut ve Önerilen Durumun Ekipman Sayısı Bakımından Karşılaştırılması

Ekipman Numaraları	Ekipman İsimleri	Ekipman miktarları	Atanan Ekipman Miktarları			
			HYM	TKM	SHM	MK
1	Şarjlı Matkap	4	3	2	1	3
2	Vızvız	2	1	-	-	1
3	Çekiç	4	2	2	2	2
4	Havalı tabanca	2	1	2	1	1
5	17 numara anahtar	4	2	2	3	1
6	Tornavida	3	1	-	1	1
7	13 numara anahtar	4	2	2	1	1
8	Flex	1	1	1	1	1
9	Segman Pensesi	1	1	1	1	1
10	Kontrol kalemi	2	2	-	1	1
11	Klemens tornavida	2	1	-	1	2
12	Kablo sıkma pensesi	2	1	1	1	1
13	Mop makinesi	1	1	1	1	1
14	6 numara alyan	4	-	2	1	1
15	Elektrikli matkap	3	-	2	2	2
16	Saplama kaynak makinesi	1	-	-	1	1
17	Maket bıçağı	4	-	2	2	2
18	Kaynak makinesi	1	1	-	1	1
19	Silikon tabancası	1	-	1	-	-

Çizelge 4.6 ve Çizelge 4.7 incelendiğinde elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir:

- Toplam hat maliyeti bakımından, her ürün için en az %49 iyileşme sağlandığı gözlemlenmiştir. Karşılaştırmada, sadece toplam hat maliyeti bakımından değil aynı zamanda istasyon ve ekipman maliyetleri ayrı ayrı ele alınarak da iyileşme oranı değerlendirilmiştir. Buna göre her iki maliyet için de her üründe mevcut duruma göre en az %6 iyileşme olduğu sonucuna varılmıştır.
- Her ürün için toplam istasyon sayısının, dolayısıyla işçi sayısının da azaldığı görülmektedir.
- Her ürün için kullanılan her ekipman çeşidinin kullanım adetinin, mevcut durumdaki sayıya eşit ya da bu sayıdan küçük olduğu gözlemlenmektedir. Böylece ekipman sayısından tasarruf edilmiştir. Toplamda kullanılan ekipman sayısı 46'dan 31'e düşürülmüştür.

- Çizelge 4.6 ve 4.7’de verilen bütün verilere göre, istasyonlar, ekipman sayısı ve dolayısıyla maliyetler bakımından tasarruf edilmesinin en temel nedeni her ürün için, ortak ekipmana sahip görevlerin aynı istasyonlara atanmasıdır.

Önerilen yerleşimin uygulanması ile ulaşılması düşünülen diğer önemli iyileştirmeler aşağıda sıralanmıştır:

- Ortak ekipmanları beklemelerden kaynaklanan gereksiz zamanlar ve taşımalar ortadan kalkabilecektir.
- Tek hattın kullanılmasıyla, iki hattın yerleşiminden ve arkalarında yer alan raflardan kaynaklanan fazla alan kullanımı ortadan kaldırılarak, alandan tasarruf edilebilecektir.
- Üretim planı net ve tanımlı hale gelebilecektir.
- Mevcut durumda, her ürünün montajında 4 işçi kullanılırken, önerilen durumda 2 işçi kullanılmaktadır. Böylece diğer işçiler, işletmede farklı işlerde değerlendirilebilecek, işçilerden yaralanma oranı arttırılabilecektir.

Çalışma kapsamında, çevrim süresinin toplam maliyet üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çevrim süreleri ilk önce, her ürünün toplam görev süresi ve talep miktarına göre fiili çalışma süresi içindeki oranlarına göre hesaplanmıştır. Bu durumda, ilgili oranlar HYM, TKM, SHM ve MM için sırasıyla %21, %22, %22 ve %35’dir. Bu paylara göre belirlenen çevrim süreleri 4016, 6732, 8415 ve 8925 sn’dir. Daha sonra, her ürünün talep miktarına göre, fiili süre içindeki payına göre çevrim süreleri hesaplanmıştır. İlgili oranlar HYM, TKM, SHM ve MM için sırasıyla %35, %17, %22 ve %26’dır. Bu oranlara göre belirlenen çevrim süreleri 6694, 6503, 6630 ve 6732 sn’dir. 4016 sn’den daha düşük çevrim sürelerinin de etkisini gözlemlemek için, senaryo analizine 3500, 3000, 2500, 2000, 1500 sn değerleri de eklenmiştir. Önerilen yerleşim için seçilen 8052 sn dışında, 10 farklı çevrim süresi belirlenmiştir. Ancak, 20 işgününü aşan çevrim süreleri dikkate alınmamıştır (8415 ve 8924 sn). Ayrıca, HYM için ilave olarak 4026 sn için de problem çözülmüştür. Sonuç olarak, HYM ürünü için 12 farklı diğer ürünler için 11 farklı çevrim süresinin toplam maliyet üzerindeki etkileri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar Çizelge 4.8, 4.9, 4.10 ve 4.11’de verilmiştir.

Çizelge 4.8. Farklı Çevrim Sürelerinin HYM İçin Optimal Sonuçları

Çevrim süresi	İstasyon Sayısı	Toplam Maliyet	İyileşme Oranı
1500	5	145.865,70	-%25
2000	4	116.859,16	%0
2500	3	87.859,16	%25
3000	3	87.858,68	%25
3500	2	58.858,73	%50
4016	2	58.858,20	%50
4026	2	58.858,20	%50
6503	1	29.812,65	%74
6630	1	29.812,65	%74
6694	1	29.812,65	%74
6732	1	29.812,65	%74
8052	1	29.812,65	%74

Çizelge 4.9. Farklı Çevrim Sürelerinin TKM İçin Optimal Sonuçları

Çevrim süresi	İstasyon Sayısı	Toplam Maliyet	İyileşme Oranı
1500	-	-	-
2000	-	-	-
2500	-	-	-
3000	6	174.450,49	-%49
3500	4	116.405,32	%0
4016	4	116.404,94	%0
6503	2	58.404,51	%50
6630	2	58.404,25	%50
6694	2	58.360,68	%50
6732	2	58.360,68	%50
8052	2	58.355,77	%50

Çizelge 4.10. Farklı Çevrim Sürelerinin SHM İçin Optimal Sonuçları

Çevrim süresi	İstasyon Sayısı	Toplam Maliyet	İyileşme Oranı
1500	-	-	-
2000	-	-	-
2500	5	146.664,73	-%24
3000	4	117.663,13	%0
3500	4	88.711,50	%25
4016	3	88.621,38	%25
6503	2	59.617,16	%50
6630	2	59.617,16	%50
6694	2	59.616,04	%50
6732	2	59.616,04	%50
8052	2	59.565,50	%50

Çizelge 4.11. Farklı Çevrim Sürelerinin MM İçin Optimal Sonuçları

Çevrim süresi	İstasyon Sayısı	Toplam Maliyet	İyileşme Oranı
1500	-	-	-
2000	-	-	-
2500	-	-	-
3000	5	146.770,89	-%24
3500	4	117.771	%0
4016	4	117.770,19	%0
6503	3	88.720,71	%25
6630	3	88.720,71	%25
6694	3	88.720,71	%25
6732	3	88.720,71	%25
8052	2	59.720,71	%49

Çizelge 4.8, 4.9, 4.10 ve 4.11 incelendiğinde, HYM için 12 farklı, TKM için 8 farklı çevrim süresi, SHM için 9 farklı ve MM için 8 farklı çevrim süresi için optimal sonuçlar elde edilmiştir. TKM için 3, SHM için 2 ve MM için 3 farklı çevrim süresi için hiçbir çözüme ulaşılamamıştır. Bunun nedeni çevrim süresinin azalması ile istasyon sayısının artması ve mevcut ekipman sayılarının ihtiyacı karşılamamasıdır. Bütün optimal sonuçların tamamında, çevrim süresi arttıkça maliyetin azaldığı, çevrim süresi azaldıkça maliyetin arttığı gözlemlenmektedir. Bu sonuçlar aynı zamanda, toplam hat maliyeti bakımından, önerilen çevrim süresinin ve buna bağlı olarak önerilen yerleşimin diğer çevrim sürelerine göre daha uygun olduğunu göstermektedir. HYM haricinde, diğer ürünlerde en az maliyet 8052 sn'de elde edilmektedir. HYM ürünüde ise 6503 sn'den sonra toplam maliyetin en az olduğu ve değişmediği gözlemlenmiştir. Dört ürün düşünüldüğünde, çevrim süreleri ve istasyon sayılarının aynı olması hattın daha verimli ve etkin kullanılmasını sağlayacaktır. Bu nedenle, önerilen yerleşimde, daha önce de açıklandığı gibi HYM için de çevrim süresi 8052 sn olarak seçilmiştir.

Çalışmada yapılan bir başka analiz mevcut durumda olduğu gibi, her ürün için istasyon sayısının sabit ve aynı olduğu durumda sonuçların nasıl etkilendiğinin incelenmesidir. Bu durumda, matematiksel model, çevrim süresinin minimize edilmesi amaçlanarak yeniden çözülmüştür. Her ürün için istasyon sayısı 4 ve çevrim süresinin alt ve üst sınır değerleri, 1000 ve 8052 sn olarak alınmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 4.12'de verilmiştir.

Çizelge 4.12. Her Ürün için İstasyon Sayısı 4 Alındığında Elde edilen Sonuçlar

Ürünler	Çevrim süresi	Toplam Maliyet		
		Mevcut	Yeni Çözüm	İyileşme Oranı
HYM	1550	116.909,93	116.909,93	%0
TKM	3146	116.800,61	116.451,19	%0
SHM	2501	118.059,73	117.709,90	%0
MM	3370	118.132,81	117.819,10	%0

Çizelge 4.12 incelendiğinde, her ürün için istasyon sayısı sabitken, çevrim sürelerinin farklı olduğu gözlemlenmektedir. Toplam maliyet bakımından iyileşme oranlarının sıfır ya da sıfıra yakın olduğu görülmektedir. Bu durum, istasyon sayısının sabit alınmasının maliyetler üzerinde olumlu anlamda önemli bir etkisinin olmadığını göstermektedir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, Konya’da faaliyet gösteren ve mutfak ekipmanları üreten bir işletmede KKMHD problemi ele alınmıştır. Corominas ve diğ. (2011) tarafından geliştirilen matematiksel model gerçek hayata uyarlanmıştır.

Uygulama kapsamında, kullanılan istasyon ve ekipman sayısında tasarruf sağlanmıştır. Mevcut duruma göre istasyon maliyetinde en az %49, ekipman kullanma maliyetinde en az %6 iyileşme oranı elde edilmiştir. Bunun yanında, problemin çözümünde farklı çevrim sürelerine ve istasyon sayısına göre senaryo analizleri yapılmıştır. Bütün optimal sonuçların tamamında, çevrim süresi arttıkça maliyetin azaldığı, çevrim süresi azaldıkça maliyetin arttığı gözlemlenmiştir. İstasyon sayısı mevcut durumda olduğu gibi, 4 adet alındığında, toplam maliyet bakımından iyileşme oranlarının sıfır ya da sıfıra yakın olduğu görülmüştür. Bu sonuçlar aynı zamanda, toplam hat maliyeti bakımından, önerilen çevrim süresinin ve buna bağlı olarak önerilen yerleşimin diğer çevrim sürelerine göre daha uygun olduğunu göstermiştir.

Gelecekte yapılacak çalışmalar için matematiksel model birkaç yönde genişletilebilir:

- Çok modellenli ürünlerin optimum sırası belirlenebilir, ürünler daha küçük partiler halinde üretilerek, ürünlerin üretiminde seviyelendirme yapılabilir.
- Toplam hat maliyetinin minimize edilmesinin yanı sıra istasyonlar arasındaki iş yüklerinin dengelenmesi de hedeflenerek, çözüm için çok amaçlı optimizasyon yöntemleri kullanılabilir.
- Problem, karışık modellenli olarak ele alınabilir.
- Talep, kapasite ve görev sürelerindeki belirsizliklerin ele alınarak, pratik uygulamalar kolaylaştırılabilir.
- Kaynak kullanımını en aza indirebilmek ve/veya işçi hatalarının neden olduğu fire oranlarını azaltmak, işçi kazalarını önlemek için Endüstri 4.0’ın önemli bileşenlerinden robot ve cobotlar dikkate alınabilir.

KAYNAKLAR

- Ağpak, K., ve Gökçen, H., 2005, Assembly line balancing: Two Resource Constrained Cases, *International Journal Production Economics*, 96, 129-140.
- Akyol, A., 2023, Çok Sayıda Düz Montaj Hattının Bütünleşik Dengelenmesi: Otomatik Kapı Sistemleri Üretiminde Bir Uygulama, Yüksek Lisans Tezi, *Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, Konya.
- Alakaş, H.M., Pınarbaşı, M., Yüzükırmızı, M., 2019, Constraint programming model for resource-constrained assembly line balancing problem, *Soft Computing*, 24, 5367–5375.
- Alakaş, H.M., 2021, General Resource-Constrained Assembly Line Balancing Problem: Conjunction Normal Form Based Constraint Programming Models, *Soft Computing* 25, 6101-6111.
- Alakaş, H.M., Pınarbaşı, M., 2023, Balancing of cost-oriented U-type general resource-constrained assembly line: new constraint programming models, *Soft Computing*, 27, 18667–18680.
- Akın, N.G., 2015, Kanepe Montaj Hattının Dengelenmesi ve Benzetim Yöntemi İle Sınanması, *Çankırı Karatekin Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 5, 95-120.
- Altunay, H., Özmutlu, H.C. ve Özmutlu, S., 2017, Paralel Görev Atamalı Montaj Hattı Dengeleme Problemi İçin Yeni Bir Matematiksel Model Önerisi, *C.Ü. İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 18, 15-33.
- Atahan, A., Kapuağası, M., Koç, N.Ü., Gençosman, B. ve İnkaya, T., 2018, Bir Otomasyon Teknolojileri Üreticisinde Standart Zaman Hesaplama Ve Montaj Hattı Dengeleme Yazılımı Geliştirilmesi, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 23, 263-284.
- Atasagun, Y., 2010, Bakteriyel Besin Arama Optimizasyonu Algoritması İle Montaj Hattı Dengeleme, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya.
- Atasagun, Y., 2016, Tam Zamanında Üretim Ortamlarında Çok Sayıda U-Tipi Hattın Bütünleşik Dengelenmesi İçin Yeni Modeller Ve Çözüm Yaklaşımları, Doktora Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya.
- Barutçuoğlu, Ş., Azizoğlu, M., 2011, Flexible Assembly Line Design Problem With Fixed Number Of Workstations, *International Journal of Production Research*, 49, 3691-3714.
- Baskak, M., 1998, Çok modelli/ürünlü montaj hatların dengelenmesi için yeni bir model ve çözüm yöntemi, Doktora Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.

- Chen, Y.Y., Cheng, C.Y., Li, J.Y., 2018, Resource-Constrained Assembly Line Balancing Problems With Multi-Manned Workstations, *Journal of Manufacturing Systems*, 48, 107–119.
- Corominas, A., Ferrer, L., ve Pastor, R., 2011, Assembly Line Balancing: General Resource-Constrained Case, *International Journal of Production Research*, 49(12), 3527–3542.
- Derya, Tusan, 2012, Maliyet Tabanlı Paralel Montaj Hattı Dengeleme Problemleri: Yeni Modeller, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara.
- Doğan, A., 2015, Savunma Sanayiinde Bulanık İşlem Zamanlı Geleneksel Montaj Hattı Dengeleme Çalışması, Yüksek Lisans Tezi, *Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kırıkkale.
- Hıdımoğlu, M.B., 2019, Montaj Hattında Kapasite Dengeleme Ve Verimlilik Analizi, Yüksek Lisans Tezi, *Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Gökçen, H., Ağpak, K., Ergun, O., 2002, Servis Sistemlerinde Hat Dengeleme, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 8 (1), 123-130.
- Jin, W., He, Z., Qiong, W., 2022, Robust optimization of resource-constrained assembly line balancing problems with uncertain operation times, *Engineering Computations*, 39(3), 813-836.
- Jusop, M., ve Rashid, M.F.F.A., 2016, Optimisation of Assembly Line Balancing Type-E with Resource Constraints using NSGA-II, *Key Engineering Materials*, 701:195-199.
- Kamaruddin, N.H., Rashid, M.F.F.A., 2017, Assembly line balancing with resource constraints using new rank-based crossovers, *Journal of Physics: Conference Series*, 908, 012059.
- Kao, H-H., Yeh, D-H., Wang, Y-H., Hung, J-C., 2010, An Optimal Algorithm For Type-I Assembly Line Balancing Problem With Resource Constraint, *African Journal of Business Management*, 4(10), 2051-2058.
- Kao, H-H., Yeh, D-H., Wang, Y-H., 2011, Resource constrained assembly line balancing problem solved with ranked positional weight rule, *Review of Economics & Finance*, 1, 71–80.
- Kara, Y., Gökçen, H., Atasagun, Y., 2010, Balancing parallel assembly lines with precise and fuzzy goals, *International Journal of Production Research*, 1685-1703.
- Kara, Y., Atasagun, Y., Hezer, S., Gökçen, H., Hezer, S., Demirel, N., 2014, An Integrated Model To Incorporate Ergonomics And Resource Restrictions Into Assembly Line Balancing, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 997-1007.

- Kenger, Ö.N., 2017, Assembly Line Balancing Problem With Resource And Sequence Dependent Setup Times, Yüksek Lisans Tezi, *Gaziantep Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Gaziantep.
- Küçükkoç, İ., Zhang, D.Z., 2015, Type-E parallel two-sided assembly line balancing problem: Mathematical model and ant colony optimisation based approach with optimised parameters, *Computers & Industrial Engineering*, 56-69.
- Mete, S., 2013, Kaynak Kısıtlı Çift-Taraflı Montaj Hattı Dengeleme Problemi, Yüksek Lisans Tezi, *Gaziantep Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Gaziantep.
- Mete, S. ve Ağpak, K., 2013, Çok Amaçlı Genelleştirilmiş Kaynak Kısıtlı Çift Taraflı Montaj Hattı Dengeleme Problemi Ve Hesaplama Analizi, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 28(3), 567-576.
- Michels, A.S., ve Costa, A.M., 2022, Mixed-integer linear programming models for the type-II resource-constrained assembly line balancing problem, *Assembly Automation*, 42(5), 585-594.
- Ogan, D., ve Azizoğlu, M., 2015, A Branch And Bound Method For The Line Balancing Problem In U-Shaped Assembly Lines With Equipment Requirements, *Journal Of Manufacturing Systems*, 36, 46-54.
- Özdemir R.G., Ayağ, Z. ve Çakır, D., 2004, Hazırlık sürelerinin azaltılması için bir hat dengeleme modeli, *XXIV Ulusal Kongresi*, 15-18.
- Özkıran, A. ve Düşünür, H., 2011, Otomotiv Sektöründeki Bir İşletmede Montaj Hattının Analizi Ve Dengeleme Çalışması, *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Endüstri Mühendisliği Bölümü*, İzmir.
- Pekin, N., ve Azizoğlu, M., 2008, Bi criteria flexible assembly line design problem with equipment decisions, *International Journal of Production Research*, 46(22), 6323-6343.
- Pereira, J., 2018, Modelling and solving a cost-oriented resource constrained multi-model assembly line balancing problem, *International Journal of Production Research*, 56(11), 3994-4016.
- Polat, O., 2008, Montaj Hattı İşçi Atama Ve Dengeleme Problemlerinin Genetik Algoritmalarla Çözülmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Denizli.
- Quyen, N.T.P., Chen, J.C., ve Yang, C.L., 2017, Hybrid genetic algorithm to solve resource constraint assembly line balancing problem in footwear manufacturing, *Soft Computing*, 21, 6279-6295.
- Saçlı, C., Tekin M. ve Doğan, Z., 2011, Çok Modelli Montaj Hattı Dengeleme İçin Paket Program Ve Mobilya Endüstrisinde Bir Uygulama, *XI. Üretim Araştırmaları Sempozyumu*.

- Sarioğlu, A., 2021, Maliyet Tabanlı Montaj Hattı Dengeleme Ve İşçi Atama Problemleri İçin Yeni Matematiksel Modeller, Yüksek Lisans Tezi, *Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara.
- Seçme, G., 2014, Stokastik Paralel Montaj Hattı Dengeleme Problemine Üst Sezgisel Yaklaşım, Doktora Tezi, *Erciyes Üniversitesi*, Kayseri.
- Söylemez, İ., Kaynak Paylaşımlı Kaynak Kısıtlı Montaj Hattı Dengeleme Problemi İçin Bir Çözüm Yaklaşımı, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara.
- Supçiller, A.A., 2010, A Novel Line Balancing Problem: Complex Constrained Assembly Line Balancing, Doktora Tezi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir.
- Üstün, S., 2005, Bir Üretim Atölyesinde Darboğaz Problemlerinin Benzetimle Analizi, Yüksek Lisans Tezi, *KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü*, Trabzon.
- Yıldız, Y., 2015, Sıra Bağımlı Teslim Zamanlı Öğrenme Etkili Basit Montaj Hattı Dengeleme Problemi, Yüksek Lisans Tezi, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kayseri.

EKLER**EK-1 HYM'nin montajına ilişkin görev tanımları, öncüller ve kullanılan ekipmanlar**

Görev Sırası	Görev tanımı	Görev Süresi (sn)	Öncüller	Ekipman numaraları
1	Gövdenin delinmesi	35		1
2	Gövdenin kılavuzlarının çekilmesi	80	1	1
3	Rulman yerinin çapağını alma	55		2
4	Gövdeye rulman çakma	71	3	3
5	Kasnak ve flanşın redüktöre montajı	99		3-4
6	Kovan milinin birbirine montajı	86		1-3
7	Gövdeye Menteşe mili montajı	86	4	4
8	Redüktörün gövdeye montajı	140	5,6,7	4
9	Motora kablo girişi	258		1
10	Motor tablasının motora montajı	230	9	4
11	Motorun gövdeye montajı	173	8	
12	Motoru gövdeye sabitleme (montaj)	122	10,11	4
13	Baltanın gövdeye montajı	67	12	8
14	Kazan kovanı birbirine montajı	198	13	3-4-9
15	Kazanın gövdeye montajı	82	14	4-5
16	Kablunun kesilip hazırlanması	116		12
17	Göstergelerin pano sacına takılması	93		11
18	Pano sacının gövdeye montajı	95	2,17	1
19	Elektrik kablosunun gövdeye montajı	146	16	11
20	Elektrik testinin yapılması	78	15,18,19	10
21	Balta ayarının yapılması	123	20	
22	Kapak kolu hazırlanması	48		
23	Kapak kolunun taşlanması ve gövdeye montajı	54	21,22	7-13
24	Kapak kolu ayarı	79	23	5(2)-7
25	Kapağın hazırlanması	186		13
26	Kapağın gövdeye montajı	166	24,25	7
27	Kapak kolu ve sacının kaynatılması	185	26	18
28	Malzemeyi boyama	109	27	
29	Kapak kolunun montajı	80	28	
30	Kapağın delinmesi	133		1
31	Kapak içine sac konularak montaj edilmesi	310	30,29	1-7
32	Sensörün hazırlanması ve montajı	61	31	
33	Mil ayarının yapılması	153	31	5
34	Sensör ayarı	186	32,33	7
35	Makine içerisindeki kabloların klipslenmesi	83	34	3-6
36	Menteşe mili ayarlanması	56	31	5(2),7
37	Arka kapakların gövdeye montajı	91	35,36	1(2)
38	Kazan ve kapağın silinmesi	150	37	-
39	Gövdeyi silme	117	37	-
40	Makinenin etiketlerini yapıştırma	224	38,39	-
41	Makinenin rotuşünün yapılması	37	40	-

EK-1 (Devam)

Görev Sırası	Görev tanımı	Görev Süresi (sn)	Öncüller	Ekipman numaraları
42	Kalite kontrol yapılması	155	41	-
43	Elektrik kablosuna etiket yapıştırma ve kabloların kliplenmesi	60	42	10
44	Ürünün paketlenmesi	881	43	3

EK-2 TKM'nin montajına ilişkin görev tanımları, öncüller ve kullanılan ekipmanlar

Görev Sırası	Görev tanımı	Görev Süresi(sn)	Öncüller	Ekipman numaraları
1	Üst tablanın gövdeye montajı	180	-	4-5(2)
2	Ayak lastiği ve kol lastiğinin gövdeye montajı	77	1	3
3	Redüktörün gövdeye montajı	103	1	
4	Redüktörün bantlarının soyulması	59	-	17
5	Hareket somunun (sarı somun) temizlenmesi	179	-	4-8
6	U sacının hazırlanması	56	-	5
7	U sacının sarı somun montajı	101	6	1
8	Kızağın kılavuzlarının çekilmesi	43	-	1
9	Hareket somunun kızağa montajı	26	5,7,8	
10	Denge koluyla stop kolunun kızağa bağlanması	129	9	4
11	Kızağın redüktöre montajı	8	3,4,10	
12	Haznenin kapağının sökülmesi	16	-	14
13	Haznenin gövdeye montajı	119	11,12	
14	Balığın hazneye tutturulması	29	11	7
15	Haznenin bantının soyulması	22		17
16	Hazne, redüktörün ayarlanıp sıkılması	187	13	4
17	Köprünün kılavuzlarının çekilmesi	20	-	1
18	Köprünün üst şaseye bağlanması	72	14,17	7
19	Rakorun üst şaseye takılması	34	1	5
20	Şasenin ve haznenin kılavuzluğun çekilmesi	159	13	15
21	Hazne kapak contasının silikonlarının takılması	84	13	19
22	Kapak somunu ve yıldız pul somunun taşlanması	413	-	8
23	Kapak somunu ve yıldız pul somunun moplanması	132	22	13
24	Kapak potunun hazneye montajı	29	20,21	14
25	Kapak somunun hazneye montajı	35	23,24	14
26	Pistonun temizlenmesi	132	-	15-8
27	Pistonun moplanması	52	26	13
28	Pistonun itici millerinin takılması	79	27	4
29	Pistonun millerinin sıkılması	73	28	4
30	Pistonun oringlenmesi	42	27	
31	Pistonun hazneye montajı ve balığın hazneye sıkılması	219	15,16,18,25,29,30	5-7
32	Çevirme kesme milinin dişlilerinin takılması (kamanın taşlanması dahil)	327	31	8
33	Vites kolunun hazırlanması	236	-	5
34	Dişlinin bantının soyulması yerine vites kolunun takılması	66	32,33	17
35	Devir dişlisinin kamasının taşlanması	41	34	8
36	Devir dişlisinin gövdeye montaj denemesi	71	35	
37	Devir dişlinin gövdeye montajı	40	36	
38	Vites kolunun gövdeye montajı	46	37	9
39	Dirseğin bantının soyulması	99	-	17
40	Haznenin dirsek yerinin delinmesi	188	31,39	15(2)
41	Dirsek somunun moplanması	54	-	13
42	Dirsek somunun hazneye montajı	28	40,41	

EK-2 (Devam)

Görev Sırası	Görev tanımı	Görev Süresi(sn)	Öncüller	Ekipman numaraları
43	Yıldız pul somunun dirseğe takılması	17	42	
44	Tel kesme yatağının moplanması	87	-	13
45	Tel kesme alüminyumun delinmesi	315	44	15
46	Tel kesme alüminyumunun yan deliklerinin hazırlanması	70	45	15
47	Tel kesme alüminyumun kılavuzunun çekilmesi	40	46	15
48	Tel kesme alüminyumunun vidalarının takılması	71	47	1
49	Tel kesme alüminyumunun yan vidalarının takılması	39	48	1
50	Vidalarının çapraz sıkılması	30	49	1
51	Tel kesme yatağının yerine takılması ve muhafazasının montesi	233	38,43,50	4-7
52	Tel kesme yatağının tellere montajı	195	51	1
53	Motora motor tablası takılması	206	-	4-7
54	Motora kasnak takılması	57	53	3
55	Motor tablasının kılavuzunun tazelenmesi	24	53	4
56	Gerdirme vidasının takılması	20	54,55	7
57	Motor milinin ve kayışının gövdeye takılması	33	38,56	3-7
58	Kayışın gerdirilmesi ve dengelenmesi	181	57	3-7
59	Muhafaza sacının takılması	70	58	14-1
60	Köprünün işaretlenmesi ve delinmesi	103	59	15
61	Havşa açma	28	60	15
62	Elektrik kablosunun hazırlanması	667	-	12
63	Şalterin hazırlanması	864	62	1-12
64	Şalterin gövdeye bağlanması	331	63	4
65	Buat kutusunun delinip işaretlenip gövdeye montajı	467	61,64	15
66	Motora kablo girişi	365	65	1-12
67	Motor kablosunun elektrik kablosuna montajı	418	66	1-12
68	Kablo ucu açma ve deneme	256	67	12
69	Buat kutusunun kapatılması	53	52,67	1
70	Stop kolunun delinip kılavuzunun çekilmesi	212	68	15
71	Makineye hava tutulması	25	70	4
72	Stop koluna vida takılması ve pistonun ölçülmesi	90	71	7
73	Makinenin denenmesi devam	312	72,69	
74	Kalite kontrol	477	73	
75	Ürünün silinmesi	328	74	
76	Etiket yapıştırma	316	75	
77	Boya rötuşu	209	76	
78	Kablo kesilmesi ve yedek parça hazırlığı	212	77	17
79	Ürünü paletin üzerine koyma	28	78	
80	Şerit çekme	171	79	17
81	Streçleme	139	80	
82	Paketleme	170	81	3
83	Dış etiketleme	62	82	

EK-3 SHM'nin montajına ilişkin görev tanımları, öncüller ve kullanılan ekipmanlar

Görev Sırası	Görev tanımı	Görev Süresi(sn)	Öncüller	Ekipman numaraları
1	Badem yataklarının gövdeye montajı	140		14
2	Gövdenin yatırılması	16	1	
3	Alt ve üst kovanın toplanması	144		3-9
4	Alt kovanın gövdeye montajı	104	2,3	4
5	Kazanın vidalarının sökülmesi	33		4
6	Kazan platininin gövdeye montajı	45	4,5	3
7	Segmanın kazan platinine montajı	18	6	9
8	Kazanın gövdeye montajı	104	7	4
9	Alt kasnağın orta mile montajı	75	2	3
10	Kazan kasnağının gövdeye montajı	71	8	4
11	Kasnaklara kayışların montajı	128	10,9	6
12	Kayışların gerdirilmesi ve alt bademin sıkılması	120	11	4-5
13	Gövdenin kaldırılması	15	12,9	
14	Gövdenin iç kılavuzlarının çekilmesi	138		4
15	Motor tablasının gövdeye tutturulması	85	14,13	
16	Motora kablo girişi	281		1
17	Motora kasnağın çakılması	88		3
18	Motorun gövdeye montajı	87	15,16,17	4-11
19	Balta milinin üst kovana çakılması ve segman atılması	124		3-9
20	Üst gerdirme vidasını gövdeye tutturma	14		
21	Baltanın ayarı	366	19,20	3-4
22	Baltanın taşlanması	106	21	8
23	Baltanın moplanması	85	22	13
24	Baltanın mile sabitlenmesi	94	23	4
25	Baltanın ayarlanıp gövdeye montajı	254	24	
26	Ön baltanın soyulması	50		17
27	Ön baltanın gövdeye montajı	110	25,26	5
28	Triger kasnağının gövdeye montajı	127	25	3
29	Triger kayışının triger kasnağına montajı ve gerdirme	245	28,18	5
30	Orta mil üst kasnağının gövdeye montajı	20	29	3
31	V kayışlarının gövdeye montajı	216	30	6
32	Üst badem yatağının gerdirilmesi ve sabitlenmesi	70	31	4-5
33	Dayama yerlerinin delinmesi	27		15
34	Dayama yerlerine kılavuz çekilmesi	108	33	15
35	Sensör yerine kılavuz çekilmesi	59		15
36	Menteşe mili ve dayama vidasının taşlanması	60		8
37	Dayama vidalarını gövdeye montajı	149	34,35,36	5
38	Menteşe milinin gövdeye tutturulması	73		
39	Mika bağlama sacının delinmesi	70		15
40	Mika bağlama sacına kılavuz çekilmesi	105	39	15
41	Mika bağlama saclarının soyulması	36	40	17
42	Mika bağlama saclarının moplanması	110	41	13
43	Mika bağlama destek saclarının moplanması	96		13
44	Mika bağlama saclarının gövdeye montajı	250	32,37,38,4 2	5(2)
45	Mika kapağının kazana konup işaretlenmesi	99	44	
46	Mika kapağının delinmesi	110	45	15
47	Mika kapağına hava tutma	9	46	
48	Mika kapağının mika bağlama sacına montajı	221	43,47	1-14

EK-3 (Devam)

Görev Sırası	Görev tanımı	Görev Süresi(sn)	Öncüller	Ekipman numaraları
49	Acil stop etiketinin gövdeye montajı	25		
50	Acil stop deliğinin (macundan) temizlenmesi	25		1
51	Pano sacının soyulması	45		17
52	Pano sacının vidasının çakılması	102	51	16
53	Pano sacına etiket yapıştırma	35	52	
54	Start stop kablolarına uç basma	345		12
55	Sensör hazırlama	27		12
56	Zaman rölesine kılavuz çekilmesi	13		1
57	Zaman rölesinin pano sacına montajı	59	53,56	1
58	Start stop düğmelerinin pano sacına montajı	62	53	5
59	Şalterin pano sacına montajı	68	53	1
60	Gövdeye elektrik tesisatı montajı	596	48,49,50,5 5,57,59	
61	Mıknatıs yatağı pulunu soyup bükme	50		3
62	Mıknatıs yatağı pulunun mika sacına montajı	15	60,61	
63	Arka kapağa rakor montajı	39		
64	Elektrik kablosunu rakordan geçirip ucunu açma	98	62,63	12
65	Elektrik kablosunu deneme panosuna bağlama	54	64	10
66	Elektrik deneme ve mıknatıs ayarı	177	61,65	10
67	Elektrik grubunun gövdeye sabitlenmesi	74	66	1
68	Üst gri kapağın hazırlanması	75		8
69	Pano sacının üst gri kapağa montajı	159	66,68	1
70	İç kabloları toplama	319	67,69	6
71	Arka sac yerinin delinip kılavuz çekilmesi	134		15(2)
72	Arka sacın gövdeye montajı	98	70,71	1
73	Üst gri kapağın delinmesi ve kılavuz çekilmesi	261	70	15(2)
74	Üst kapağı sabitleme	107	69,73	1-15
75	Mıknatısı yerine sabitleme	113	74	7-18
76	Şalterin ucunun kesilmesi	17		8
77	Zaman rölesini ve şalteri panoya yapıştırma	126	75,76	3
78	Makinenin silinmesi	387	72,77	
79	Gövdeye etiketlerin yapıştırılması	302	78	
80	Gövdeye rötuş işlemi	83	78	
81	Kalite kontrol	188	79,8	
82	Koli yapma	100		
83	Koli etiketleme	156	82	
84	Ürünün paketlenmesi	302	81,83	3-17

EK-4 MM'nin montajında kullanılan ekipman ve maliyetleri

Görev Sırası	Görev tanımı	Görev Süresi(sn)	Öncüller	Ekipman numaraları
1	Gövde ayakların takılması	84	-	3-5
2	Ayak üst kapaklarının gövdeye montajı	120	1	
3	Gövdenin delinmesi	25	1	15
4	Gövdenin kılavuzlarının çekilmesi (üst)	98	3	15
5	Gövdenin kılavuzlarının çekilmesi (orta)	120	3	15
6	Gövdenin kılavuzlarının çekilmesi (arka)	78	3	15
7	Kızakların taşlanması	64	-	13
8	Kızakların moplanması	57	7	13
9	Kızakların gövdeye montajı	267	8	1-7
10	Kaldırma kolu yatak plastiğinin gövdeye montajı	22	5	15(2)
11	Kaldırma kolu milinin kesilmesi ve taşlanması	17	10	8
12	Kaldırma kolu ek platininin hazırlanması	169	-	4-8
13	Kazan dayama sacına kılavuz çekilmesi	9	-	15
14	Kazan dayama sacına poliüretan yayının montajı	54	13	7
15	Badem yataklı rulmanın gövdeye montajı	40	5	4
16	Kazan dayama sacına delik açılması	80	14	15
17	Kazan dayama sacının gövdeye montajı	48	16	
18	Kaldırma kolunun gövdeye montajı	23	15,11	7
19	Badem yataklı rulmanın sıkılması	19	17,18	4-5
20	Kaldırma kolu ek platinin gövdeye montajı	54	12,18	7
21	Geniş arabanın gresörlüklerinin montajı	93	9	14
22	Geniş arabanın kızağa montajı	45	21	
23	Geniş arabaya kazan tablasının montajı	158	22	4
24	Kazan tablasına kılavuz çekilmesi	17	23	15(2)
25	Kazan tablasının gövdeye montajı	27	6,24	4
26	Döküm şanzımanın taşlanması	55		8
27	Döküm şanzımanın temizlenmesi	53	26	2
28	Döküm şanzımanına kovan montajı (vidalama)	89	27	4
29	Döküm şanzımana rulman montajı	23	19,28	3
30	Döküm şanzımanın gövdeye montajı	93	4,29	4
31	Sepet plastiğinin dayama setsuku vidasının montajı	25	30	14
32	Sepet kilit plastiğinin hazırlanması	116	31	1
33	Dış kilit plastiğinin hazırlanması	172		11
34	Sepet kilit plastiğinin gövdeye montajı	81	32	
35	Gövdeye dış kilit plastik yerinin işaretlenmesi	31	33	3
36	Gövdenin dış kilit plastiğin delinmesi	63	35	15
37	Dış kilit plastiğinin gövdeye montajı	108	34,36	1
38	Alüminyum şanzımanın temizlenmesi	59		17
39	Gresörlüklerin delinmesi	15		15
40	Gresörlüklere kılavuz çekilmesi	13	39	15

EK-4 (Devam)

Görev Sırası	Görev tanımı	Görev Süresi(sn)	Öncüller	Ekipman numaraları
41	Alüminyum şanzımana gresörlük montajı	15	25,38,40	1
42	Şanzıman rulmanının hazırlanması	108	38	6
43	Şanzımana rulman çakılması	27	42	3
44	Çırpma miline pimin takılması	35		3
45	Çırpma milinin şanzımanın montajı	60	43,44	3
46	Çırpma miline tekrar pim montajı	39	45	3
47	Şanzımana diğer rulmanın çakılması	26	46	3
48	Sarı dişlinin temizlenmesi	40		1
49	Sarı dişlinin gövdeye montajı	40	47,48	3
50	Segmanın rulmana montajı	15	42	9
51	Şanzımana ana mil ve rulman montajı	62	50,49	3
52	Döküm şanzımanın greslenmesi	88	29,42	
53	Alüminyum şanzımanın gövdeye montajı	130	37,41,51,52	3
54	Sensörün hazırlanması	68		12
55	Sepet kilit plastiğinin delinmesi	33	54	1(2)
56	Sepet kilit plastiğinin mıknaş montajı	22	55	
57	Sepet kilit plastiğine çemberin montajı	79		1
58	Sepetin takılması	45	56,57	
59	Alüminyum şanzımana üst kasnak montajı	57	53	3
60	Kama ve somunun takılması	53	59	3-4
61	Tel yatağı üst sacının moplanması	61		13
62	Tel yatağı üst saclarının soyulması	62	61	17
63	Tel yatağı üst sacının çırpma teline montajı	213	46,62	1
64	Yaprak bağlama alüminyumunun çırpma teline montajı	130	63	4
65	Kazan pimlerinin taşlanıp yerine montelenmesi	42	25	8
66	Kazanın kazan tablasına konup ayarlanması	69	65	3
67	Kaldırma kolu milinin kazan tablasına sıkılması	74	20,66	5
68	Pistonun kazan tablasına montajı	45	66	
69	Çırpma tellerinin kazana göre ayarlanması	217	64,66	
70	Kol ayarının yapılması	57	69	4
71	Kazan arka sacının kazan tablasına montelenmesi	147	70,68,67	1
72	Sepet arka sacının moplanması	74		13
73	Sepet arka sacının kulaklarının bükülmesi	30	72	3
74	Sepet arka sacının gövdeye montelenmesi	72	73	1
75	Sepetin ayarının kontrol edilmesi	77	58,74,60	
76	Motorun kutudan çıkarılması	26		
77	Motor tablasının motora montajı	106	76	4
78	Motora kasnak montajı	31	77	3
79	Gerdirme vidasının tabla sacına montajı	51		
80	Motora kablo girişinin yapılması	629	77	1
81	Motor ayaklarının sökülmesi	30	80	4
82	Gerdirme kovanın hazırlanması	247		3

EK-4 (Devam)

Görev Sırası	Görev tanımı	Görev Süresi(sn)	Öncüller	Ekipman numaraları
83	Motorun gövdeye konulması	28	79,81,82	
84	Gerdirmе kovanın gövdeye konulması	19	83	
85	Gerdirmе kovanı için doğru kayış seçimi	173		
86	Gerdirmе kovanı ile kasnak arasına kayış gerdirmе	172	85	4
87	Motor tablasının gövdeye montajı	86	84,86	4
88	Motor kayışı gerdirmе	159	78,87	4
89	Elektrik panosunun vidalarının kesilmesi	47		8
90	Elektrik panosunun gövdeye montajı	79	78,89	1
91	Sviçin hazırlanması	70		1
92	Sviçin gövdeye montajı (kabloların takılması)	169	81,90,91	1
93	Panonun silinmesi	28	89	
94	Üst kapağın işaretlenmesi	59	2	
95	Üst kapağın delinmesi	49	94	1
96	Üst kapağın pano yerinin kesilmesi	67		8
97	Pano sacının işaretlenip vida çakılması	123		16
98	Gövdeye pano sacının yerine vida çakılması	60	97	16
99	Pano sacının soyulması	41		
100	Panoya etiketın yapıştirılması	59	98,99	
101	Zaman saatine kılavuz çekilmesi	22		1
102	Zaman saatinin pano sacına montajı	52	101	1
103	Start-stop düğmelerinin pano sacına takılması	59	100	5
104	Şalterin panoya montajı	97	100	1
105	Şalterin boyunun kısaltılması	21		8
106	Şalterin panoya düğmelerinin takılması	89	104	3
107	Elektrik kablosu hazırlama	355		12
108	Start-stop kablolarının klemense takılması (üst pano için)	79	105,107	11-12
109	Start-stop soketlerinin düğmelere geçirilmesi	35	106,108	
110	Elektrik panosuna ana kablonun kesilip hazırlanması	225	90	12
111	Elektrik tesisatının montajı	379	110	11
112	Arka saca rakor takılması	18	71	
113	Kablonun rakordan geçirilip elektrik panosuna montajı	114	111,112	11
114	Zaman saati, şalter, star stop düğmelerinin soketlerinin elektrik tesisatına takılması	277	92,93,102,103,109,113	11
115	Elektriğin denenmesi	149	95,88,114	10
116	Panonun üst kapağa montajı	239	75,96,115	1
117	Kabloların cırtlanması	165	116	
118	Balta moplama	109		13
119	Balta bağlama alüminyumunun baltaya montajı	64	118	4
120	Çırpma telinin puntalanması ve temizlenmesi	256		1-18
121	Yaprağa yaprak bağlama alüminyumunun montajı	60		4
122	Yaprağın delinmesi ve kılavuz çekilmesi	33	121	15(2)
123	Yaprağa setsuku atılması	18	122	1

EK-4 (Devam)

Görev Sırası	Görev tanımı	Görev Süresi(sn)	Öncüller	Ekipman numaraları
124	Aparatların denenmesi	248	119,123,120	
125	Baltanın denenmesi	61	124	
126	Üst kapağın gövdeye (start-stoplara) montajı	86	125,117	1
127	Arka kapağın gövdeye montajı	215	113	1
128	Ürünün silinmesi ve temizlenmesi	326	126,127	
129	Sepet ve kazanın silinmesi	225		
130	Etiketlerin yapıştırılması	375	128,129	
131	Kablo kesme	20	130	17
132	Son kalite kontrol	620	130	
133	Aparatların kazanın içerisine yerleştirilmesi	41	131,132	
134	Ürünü sandığa yerleştirme	71	133	
135	Şerit çekme	122	134	17
136	Ürünün streçlenmesi	68	135	
137	Sandıklama	283	136	3