T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ
SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
ÜRETİM VE TEDARİK ZİNCİRİ YÖNETİMİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MONTAJ HATTI DENGELEME: ENDÜSTRİYEL BİR UYGULAMA

Ömer ERDOĞAN
2501221161

TEZ DANIŞMANI
Dr. Öğr. Üyesi Halit Alper TAYALI

İSTANBUL – 2025

ÖZ

MONTAJ HATTI DENGELEME: ENDÜSTRİYEL BİR UYGULAMA

ÖMER ERDOĞAN

Bu tez çalışmasında, endüstriyel tip fan üreten bir işletmenin çok aşamalı montaj hattında, üretim ve süreç verimliliğini artırmak ve planlama etkinliğini iyileştirmek amacıyla ele alınan hat dengeleme problemi kapsamında uygulanan yöntemler incelenmiştir. Çalışmanın temel amacı, pratik iyileştirme adımları ile literatürdeki analitik hat dengeleme modellerini birleştirerek, yapılan çalışmanın bilimsel doğrulamasını yapmak ve en etkin üretim yapısını ortaya koymaktır. Çalışmada, iki ana aşamadan oluşan bütüncül bir metodoloji izlemiştir. İlk aşamada, dağınık haldeki işlem merkezlerinin hatta yeniden konumlandırılması gibi yapılan çeşitli tasarruf odaklı pratik iyileştirmeler incelenmiştir. İşlem merkezlerinde yapılan zaman etütleri ve incelenen iş yüklerine göre beş ana istasyonda birleştirilmesi, çevrim süresinin hesaplanması ve bu üretim yapısına uygun dengeli bir iş gücü dağılımının sağlanması incelenmiştir. Tezin özgün yönünü oluşturan ikinci aşamada ise, bu pratik uygulamanın sonuçları, bilimsel bir hat dengeleme metodolojisi ile test edilmiştir. Bu doğrultuda, hat dengeleme algoritmaları aracılığıyla kullanılan standart işlem süreleri ile teorik minimum istasyon sayısı hesaplanmış, farklı görevlerin farklı istasyonlara atanması ile verimlilikteki değişim incelenmiştir. Sonuç olarak, pratik uygulama yöntemleri ile ortaya çıkan hat yapısının verimliliği ile analitik yöntemlerle geliştirilen teorik verimlilikler karşılaştırılmıştır. Endüstriyel işletmelerdeki deneyimsel iyileştirmeleri bilimsel metotlarla doğrulamak için metodolojik bir çerçeve sunan bu çalışma, montaj hatlarında sürdürülebilir verimlilik artışı için uygulanabilir bir örnek teşkil etmektedir.

Anahtar Kelimeler: Hat dengeleme, zaman etüdü, tesis yerleşimi, verimlilik, çevrim süresi

ABSTRACT

ASSEMBLY LINE BALANCING: AN INDUSTRIAL APPLICATION

ÖMER ERDOĞAN

In this thesis study, the methods applied within the scope of an assembly line balancing problem are examined in a multi-stage assembly line of a company producing industrial-type fans, with the aim of increasing production and process efficiency and improving planning effectiveness. The main purpose of the study is to combine practical improvement steps with analytical line balancing models from the literature, thereby providing scientific validation of the work conducted and revealing the most effective production structure.

A holistic methodology consisting of two main stages was followed. In the first stage, various cost-saving, practice-oriented improvements were examined, such as the relocation of dispersed process centers along the line. Based on time studies conducted at process centers and the analyzed workloads, five main stations were consolidated, the cycle time was calculated, and a balanced workforce distribution suitable for this production structure was ensured.

In the second stage, which constitutes the original contribution of this thesis, the results of these practical applications were tested through a scientific line balancing methodology. Accordingly, standard operation times used in line balancing algorithms were applied to calculate the theoretical minimum number of stations, and efficiency variations were examined by assigning different tasks to different stations.

As a result, the efficiency of the line structure emerging from practical application methods was compared with the theoretical efficiencies developed through analytical methods. Offering a methodological framework to validate experiential improvements in industrial enterprises with scientific methods, this study constitutes a practical example for achieving sustainable efficiency increases in assembly lines.

Keywords: Line balancing, time study, facility layout, efficiency, cycle time

ÖNSÖZ

Yüksek lisans tezimin yazımı süresince bilgi ve deneyimleriyle bana yol gösteren, çalışmam boyunca değerli katkıları ve akademik desteği ile yönlendiren saygıdeğer hocam, tez danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Halit Alper TAYALI'ya en içten teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca Yüksek Lisans eğitimim boyunca tüm bildiklerini sınırsızca aktaran Üretim ve Tedarik Zinciri Yönetimi Ana Bilim Dalı'ndaki tüm hocalarıma ayrı ayrı teşekkür eder saygılarımı sunarım.

Bu çalışmanın uygulama kısmında bana destek sağlayan ve üretim ortamında uygulama ve gözlemlerimi gerçekleştirmeme imkân tanıyan firma yetkililerine ve saha personeline, göstermiş oldukları iş birliği ve anlayış için teşekkür ederim.

Hayatım boyunca bana koşulsuz sevgi ve destek sunan, her daim yanımda olan beni ben yapan sevgili annem ve babama, lisans eğitimim sonrasındaki tüm akademik gelişimimde bana en büyük destek ve güç kaynağım olan sevgili eşim Sevgi Erdoğan'a ve her zaman yanımda olduklarını hissettiren, var olma sebeplerim, varlıklarıyla bana gurur ve mutluluk veren sevgili çocuklarım Ezgi, Barış ve Ege'ye minnettarım. Onların sabrı, sevgisi ve desteği bu sürecin en kıymetli motivasyon kaynağı olmuştur.

Emek, katkı ve desteğini esirgemeyen tüm akademik ve teknik çevreme teşekkürü bir borç bilirim.

Ömer ERDOĞAN

İstanbul, 2025

İÇİNDEKİLER

ÖZ ..... **ii**
ABSTRACT ..... **iii**
ÖNSÖZ ..... **iv**
TABLOLAR LİSTESİ ..... **vii**
ŞEKİLLER LİSTESİ ..... **viii**
KISALTMALAR LİSTESİ ..... **ix**
GİRİŞ **1**

BİRİNCİ BÖLÜM

LİTERATÜR TARAMASI

1.1. Üretim **3**
1.2. Üretim Tipleri **5**
1.2.1. Sürekli Üretim 5
1.2.2. Kesikli Üretim 6
1.2.3. Proje Tipi Üretim 7
1.3. Montaj Hattı ve Tipleri **7**
1.4. Montaj Hattı Dengeleme **9**
1.4.1. Hat Dengelemenin Temel Unsurları 10
1.4.2. Hat Dengelemenin Amacı 12
1.4.3. Hat Dengelemeyi Etkileyen Temel Etmenler Ve Kısıtlar 13
1.4.4. Hat Dengeleme Algoritmaları 14
1.4.4.1. Konum Ağırlıklı Dengeleme (Rpw - Ranked Positional Weight) 14
1.4.4.2. Aşamalı Sıralamayla Çözüm 16
1.4.4.3. Öncelik Diyagramıyla Çözüm 16
1.4.4.4. LTT (Largest Task Time) Algoritması ile Çözüm 18

İKİNCİ BÖLÜM

UYGULAMA

2.1. Mevcut Üretimin Yerleşim Planlaması ve Hat Dengelemesi (Faz 1) **21**
2.2. LTT ve RPW Algoritmaları ile Çalışmanın Analitik Doğrulanması (Faz 2) **30**
2.2.1. LTT Longest Task Time (En Uzun Görev Süresi) Algoritması ile Çalışmanın Doğrulanması 30
2.2.2. RPW Ranked Positional Weight (Sıralı Konumsal Ağırlık) Algoritması ile Çalışmanın Doğrulanması 31

2.3. Montaj Hattı Dengeleme Problemlerinde R Betiğinin Kullanılarak Çalışmanın Doğrulanması (FAZ 3) 33
2.3.1. Öncül İlişkilerinin Ağ Yapısına Dönüştürülmesi 39
2.3.2. Atama Döngülerinin Başlatılması ve Yürütülmesi 40
2.3.3. İç Döngü: LTT Kuralının Adım Adım Uygulanması 40
SONUÇ 45
KAYNAKÇA 48
EKLER 51

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 2.1: Ürün Ağacı.....24
Tablo 2.2: Yarı Mamül Ve Ürün Hareket Akışı.....25
Tablo 2.3: İşlem Adımları İşlem Süreleri.....26
Tablo 2.4: Saha Çalışması İstasyon İşlem Adımları ve İşlem Süreleri 28
Tablo 2.5: Saha Çalışması Montaj Hattı Verimlilik Formülasyonu.....28

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1: Genel Bir Üretim Sistemi (Tekin, Mahmut – Üretim Yönetimi Cilt I , 11. Baskı 2016)....4
Şekil 1.2: Bisiklet Montaj Hattı Öncelik Diyagramı....17
Şekil 1.3: Hat Dengeleme İstasyon Gruplamaları Tablosu -Bülent Kobu, 2006 17
Şekil 2.1: Otopark Duman Tahliye Sistemi 21
Şekil 2.2: Montaj Hattı Yerleşim Planı 22
Şekil 2.3: Revize Montaj Hattı Yerleşim Planı 23
Şekil 2.4: İşlem Adımları Ortalama Süreleri....26
Şekil 2.5: Saha Çalışması Öncelik Diyagramı 27
Şekil 2.6: Hat Dengeleme Sonrası İstasyon Zamanları 29
Şekil 2.7: Hat Dengeleme Öncesi – Sonrası Çevrim Süresi....29
Şekil 2.8: R Betiği ile LTT Algoritmasının Hattın Dengelenmesi Çözümü 43

KISALTMALAR LİSTESİ

Jetfan **:** Otopark yangın duman tahliye fanı

GİRİŞ

Günümüz rekabetçi sanayi ortamında üretim faktörlerinin etkin kullanımı ve süreç verimliliği, işletmelerin sürdürülebilirliği açısından kritik öneme sahiptir. Özellikle çok aşamalı montaj hatlarında iş akışının dengesizliği; taşıma, bekleme ve montaj sürelerinde kayıplara yol açarak üretim performansını olumsuz yönde etkilemektedir. Ayrıca bu durum üretim planlama verimliliğini de olumsuz etkilemekte, endüstri kuruluşlarının sevkiyat sadakatine uymalarını engellemektedir. Bu bağlamda hat dengeleme çalışmaları hem üretim süreçlerinin sadeleştirilip yalınlaştırılması hem de kaynak kullanımının optimizasyonu ile toplam faktör verimliliği artışı açısından stratejik bir araç olarak öne çıkmaktadır.

Ne var ki, işletmeler bu stratejik yaklaşımlar yerine sorunu genellikle daha fazla malzeme stoğu tutmak, üretim alanını genişletmek ve ek iş gücü istihdam etmek gibi kısa vadeli ve maliyet artırıcı yöntemlerle çözme eğilimindedir. Bu tür geçici ve yüzeysel çözümler, işletme maliyetlerini yükselterek sermaye yeterliliğini azaltmakta ve nihayetinde firmaların rekabet gücünü zayıflatmaktadır. Oysa endüstriyel kalkınma, özellikle mühendislik temelli ve teknoloji yoğun üretim yapan firmaların verimlilik odaklı rekabet gücünün artırılmasına bağlıdır. Bu bağlamda hazırlanan bu çalışma, söz konusu probleme bilimsel bir çözüm sunarak endüstriyel işletmeciliğin gelişimine katkı sağlamayı amaçlamaktadır.

Bu tez çalışmasında, söz konusu üretim problemi bağlamında, bir montaj hattı dengeleme uygulaması gerçekleştirilmiştir. Uygulama, endüstriyel havalandırma sistemleri sektöründe faaliyet gösteren bir işletmenin “jetfan” montaj hattında yapılmıştır. Yasal zorunluluklar [1] nedeni ile oluşan artan piyasa talebini karşılamak için üretim hattının kapasite kullanım oranını artırmak amacıyla yürütülen çalışmanın ilk aşamasında, fabrikanın ve üretim hattının farklı noktalarında dağınık halde bulunan 31 işlem merkezi, fiziksel yerleşim planına uygun şekilde yeniden konumlandırılmıştır. Bu aşamada ürünün katettiği toplam mesafenin azaltılması ve operasyonların montaj sırası ile uyumlu hale getirilmesi hedeflenmiştir. Esasen bu düzenleme, fiziksel olarak ayrı ve birbirlerinden uzak olan iş merkezlerinin montaj akışına göre konumlandırılarak tek bir hat gibi yerleştirilmesi ve işlem sürelerinin dengelenmesi temel ilkesine dayanmaktadır. Ayrıca her işlem merkezi civarında bulundurulan ön hazırlıklı hızlı besleme arabaları ile işlem merkezleri arasındaki

[1] Otopark Yönetmeliği, 22.02.2018 Sayı:30340.

malzeme akışı hızlandırılmıştır. Depo yönetimi tarafından bir önceki gün hazırlanan bu arabalar, ilgili üretim planı ve iş emrinin gerektirdiği tüm malzemeyi bulundurmaktadır.

Çalışmanın ikinci aşamasında tüm merkezlerdeki ilgili operatör, makine ve ekipmanlarla gerçekleştirilen operasyonlara ilişkin zaman ölçümü çalışmaları yapılmıştır. Bu ölçümler neticesinde standart sapmalar da dikkate alınarak her bir işlem için standart süreler belirlenmiştir. Zaman etüdünü takip eden üçüncü aşamada ise elde edilen veriler ışığında iş yükleri birbirine benzeyen işlem merkezleri beş ana istasyonda birleştirilmiş; beklenen sipariş adetleri baz alınarak çalışmaya temel teşkil edecek olan çevrim süresi hesaplanmış, bu çevrim süresine uygun olarak her bir istasyonda görev alacak optimum işgören sayısı belirlenerek dengeli bir iş gücü dağılımı sağlanmıştır. Tüm bu adımların neticesinde, üretim akışının hızlandığı, iş gücü verimliliğinin arttığı ve süreçlerin yalınlaştığı bir hat dengeleme modeli başarıyla oluşturulmuş ve hayata geçirilmiştir.

Üretim hattında yapılan bu pratik ve deneme-yanılma temelli iyileştirmelerden sonra çalışmanın bu noktasından sonraki asıl özgün adımı ise, bu pratik uygulama sonuçlarını, literatürde yer alan bilimsel bir hat dengeleme metodolojisi ile test etmek ve karşılaştırmaktır. Bu amaçla, zaman etütleriyle elde edilen standart süreler kullanılarak öncelikle teorik minimum iş istasyonu sayısı hesaplanmıştır. Ardından, çeşitli hat dengeleme algoritmaları aracılığıyla görevler bu teorik istasyonlara yeniden atanmıştır. Nihai olarak, analitik yöntemle elde edilen bu teorik modelin sonuçları ile mevcut durumda oluşturulan beş istasyonlu yapının verimliliği karşılaştırılarak en etkin çözüm ortaya konulmuştur.

Amaç ve Kapsam

Bu çalışma, dağınık yerleşim planı ve dengesiz iş yükü nedeniyle düşük verimlilikte çalışan bir jetfan montaj hattını ele almaktadır. Amaç, hat dengeleme ve yerleşim iyileştirmeleri yoluyla üretim süreçlerini daha verimli hale getirmektir.

Kapsam olarak, mevcut üretim hattı; fiziksel yerleşim, işlem süreleri ve iş yükü açısından analiz edilmiştir. Zaman etüdü verileri kullanılarak hem istasyon yerleşimi yeniden tasarlanmış hem de iş gücü dağılımı optimize edilmiştir. Sonuçta, üretim sürelerini kısaltan ve kaynak kullanımını iyileştiren, benzer montaj hatları için de uygulanabilir bir yol haritası geliştirilmiştir.

BİRİNCİ BÖLÜM

LİTERATÜR TARAMASI

Günümüzde üretim süreçlerinin verimli, esnek ve tam anında işlemesi, işletmelerin sürdürülebilirliği açısından kritik bir gerekliliktir. Özellikle montaj hatlarında iş istasyonları arasındaki dengesizlik; üretim süresinin uzaması ve verimin düşmesiyle kaynak israfına sebep olmaktadır. Bu nedenle hat dengeleme çalışmaları, üretim performansını artırma ve planlamayı iyileştirme açısından önemli bir araç haline gelmiştir.

Süreç tasarımı, kontrolü ve iyileştirmesi, süreç verimliliğini artırmada temel mekanizmalar olup bunların etkinliği, rekabet yoğunluğuna bağlı olarak farklılık gösterebilmektedir (Hernaus vd., 2012). Birçok veri ve bilgiye ihtiyaç duyan operasyon yöneticileri için malzeme ihtiyaç planlaması, kapasite planlama, zaman etüdü, üretim çizelgeleme gibi çok çeşitli teknikler arz ile talebi eşleştirmekte kullanılmaktadır (Tayalı, 2021). Etkisiz işgücü planlamasından kaynaklı zaman kayıpları ve yerleşim sorunlarından kaynaklanan üretim hattı dengesizlikleri üretim sürelerini uzatarak üretim planlarının öngörülebilirliğini zayıflatmakta, tedarik zincirinin rekabet gücünü azaltmaktadır. Bu çalışmada incelenen problem, sektörel olarak artan ve süreklilik arz eden yüksek talebe yetişememekten çıkmış ve mevcut koşullar kapasite planlaması ve artırımını gerektirmiştir.

1.1. Üretim

Üretim, bilinen anlamıyla, bir girdi üzerinde piyasa değerini artıran geliştirme yapmak, fayda ya da girdi veya ara ürünleri nihai satılabilir ve girdilerden daha değerli bir ürüne dönüştürme sürecidir (Ellwoods, 1992). Başka bir ifadeyle Üretim, emek, sermaye, malzeme, enerji ve bilgiden oluşan girdilerin, belirli bir süreç içinde planlı olarak mal ve/veya hizmet niteliğindeki çıktılara dönüştürülmesi ve bu dönüşümün müşteri/değer yaratma amacıyla yürütülmesidir. (Heizer, J., Render, B. & Munson, C. (2017). *Operations Management: Sustainability and Supply Chain Management*. 12th ed. Pearson, Boston.). İnsanın yaşamı için doğanın verdikleri yeterli ise aslında bir üretim faaliyetinden bahsedemeyiz. Örneğin ilkel toplumlarda insanlar doğanın kendilerine verdikleri ile yaşam düzenlerini kurdukları için bir üretim

faaliyetinden bahsedilemez. Üretim kavramı uygarlık ile paralel oluşmuş ve gelişmiş bir olgudur. (Kobu, Bülent Üretim Yönetimi 2006 - 13.Baskı, Beta Yayıncılık)

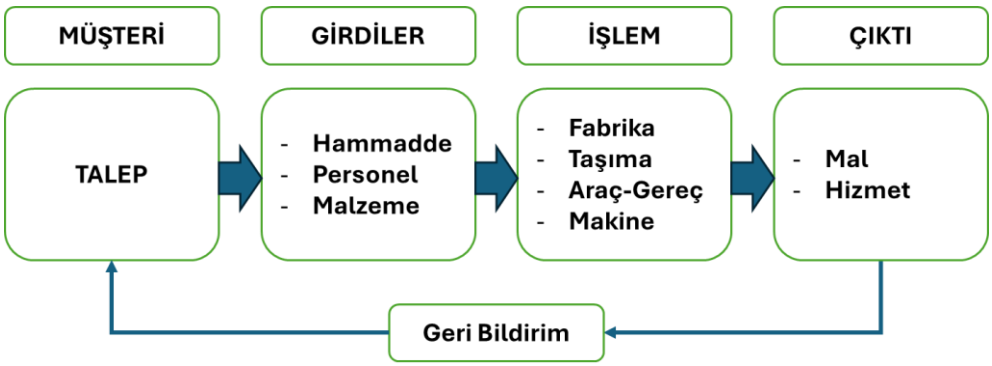
Üretim sistemleri, girdilerin işgücü, malzeme, enerji, bilgi, çıktıların ise planlanmış mal ve hizmetler bütündür. (Top, Aykut, Yılmaz, Erdal - Üretim Yönetimi 5. Baskı 2022). Satış, lojistik, depolama, ulaştırma ve dağıtım gibi hizmet sunan yapılar da, girdilerin fiziksel ya da kimyasal özelliklerinde doğrudan bir değişiklik meydana getirmeseler bile kullanıcısına değer kattığı için, üretim sistemlerinin bir bileşeni olarak kabul edilir.

Sonuçta üretim sistemi mal veya hizmet üretebilmek için insan, hammadde, makine gibi kaynakların bir araya getirilerek ahenkli bir şekilde çalışması olarak özetlenebilir. (Top, Aykut, Yılmaz, Erdal - Üretim Yönetimi 5. Baskı 2022).

Üretimin sonunda bir ürün elde edilir. Bu bir mal veya hizmet olabilir. Bununla birlikte üretimin gerçekleşebilmesi için girdilerin ve kaynakların uygun biçimde bir araya getirilmesi ve etkin şekilde kullanılması gerekmektedir. (Mordoğan, M.Ali, Üstüntaş, Nalan – Üretim Yönetimi, 2017)

Talebin sınırsız, buna karşılık kaynakların kısıtlı oluşu; teknolojik gelişmeler, üretim sistemlerinin giderek karmaşıklaşması ve verimliliğin zorunlu hale gelmesi gibi unsurlar, “üretimi yönetme” olgusunu üretim kaynaklarının önemli bir bileşeni haline getirmiştir.

Her üretim sisteminin temel amaçlarına ulaşabilmesi için uyması gereken ortak nokta, mevcut kaynakların etkin ve verimli biçimde kullanılmasıdır. Literatürde üretim kaynakları ya da faktörleri farklı şekillerde sınıflandırılmakla birlikte, genellikle dört ana grupta incelenmektedir: hammadde, işgücü, yönetim ve finansman.



Şekil 1.1: Genel Bir Üretim Sistemi (Tekin, Mahmut – Üretim Yönetimi Cilt I , 11. Baskı 2016)

Temel olarak bütün üretim sistemleri, sahip olunan kaynakların mal ya da hizmete dönüştürülmesini sağlayan iş süreçlerini içerir. Bu süreçlerin tasarımı, planlanması, yönetimi ve denetimi, üretim sürecinin temel bileşenlerini oluşturur.

Bir üretim sürecinde başlıca kaynaklar; hammadde, işgücü, sermaye ve işletme yönetimidir. Üretim süreci içerisinde bu girdiler, belirli aşamalardan geçerek ürüne dönüşür. Yönetim, bu faaliyetlerin yürütülmesini ve koordinasyonunu sağlayarak sürecin verimli ve etkin çalışmasını sağlar. Yönetimin ana amacı; sahip olunan hammadde, makine ve işgücü gibi kaynakları, istenen kalite ve zamanda, mümkün olan en düşük maliyetle bir araya getirmektir. Yani, miktar, kalite, zaman ve maliyet parametrelerinin en uygun şekilde dengelenmesi hedeflenir. (Tekin, Mahmut – Üretim Yönetimi Cilt I , 11. Baskı 2016)

1.2. Üretim Tipleri

Literatürde üretim tipleri için pek çok farklı sınıflandırma bulunmakla birlikte, işletmelerin üretim faaliyetlerini pazar talebi ve ürün stratejilerine göre şekillendirdiği sistemler, bu çalışma kapsamında sürekli (seri), kesikli ve proje olarak üç ana başlık altında derlenmektedir.

1.2.1. Sürekli Üretim

Sürekli üretim sistemlerinde, üretim iş akışı ürün durmadan, kesintili olmayan bir şekilde ilerler ve yüksek parti büyüklüğü-düşük ürün çeşidi şeklindedir. Sürekli üretim sisteminin sürdürülebilir çalışması için aynı ürüne yüksek miktarda ve sürekli talep olması gerekir. Başka bir deyişle, üretilen ürünlerin pazarda sürekli talep bulabilmesi önemlidir. Çünkü sürekli üretim sistemlerinde birbirlerine entegre çalışan, özel tasarım, özel amaçlı, yüksek maliyetli makine hatları kullanılır; yatırım maliyetleri yüksektir ve süreç tamamen ürüne özel tasarlanır. Bu nedenle, model değiştirme esnekliği düşük olduğu için, talepte meydana salınımlar ciddi verim kayıplarına ve maliyet artışlarına sebep olur. (Kobu, B. 2006)

Bu tip üretim sistemlerinde ürün çeşitliliği düşük, parti büyüklüğü yüksektir. Bu nedenle ürün nispeten daha standart olup çalışanların gerek ürüne gerekse işlemlere dönük uzmanlaşma seviyesi yüksektir. Birim maliyetler, diğer üretim sistemlerine göre düşüktür; ayrıca üretim planlama uygulaması daha kritik ve sonuca etkisi yüksektir.

Sürekli üretimde girdiler işlem akışının girişinden üretim işlemine alınır, çeşitli işlemlerden geçirilir ve sonunda mamül haline getirilerek sistemden çıkar. İşlem birimlerinin konumsal yerleşimi, ürünün üretim süreç akışına göre düzenlenir. İşlem sırasına uygun şekilde dizilen bu birimler bir üretim hattını oluşturur. Dolayısıyla transfer hatları ve montaj hatları, üretimin özelliklerine bağlı olarak bu grupta değerlendirilir. (Kobu, B. 2006)

Sistemdeki işlem birimlerinin işletme içindeki yerleşimi ürünün göreceği süreç akışına göre yapılır. Ürünün göreceği işlemlerin sırasına göre dizilen işlem birimleri bir üretim hattı oluştururlar. Bu nedenle ve üretimin özelliklerine göre transfer ve montaj hatları bu grubun içinde yer alırlar.

1.2.2. Kesikli Üretim

Kesikli üretim sistemleri genellikle talebe göre çalışır ve ürün değişkenliği, seri üretime göre daha fazladır. Bu nedenle üretimde çoğunlukla genel amaçlı alet, cihaz, tezgâh ve makineler kullanılır. Ancak hat dengelenmemiş ise işlem adımlarının kapasite ve işlem süresi farklılıkları, süreçte beklemelere ve ara stoklara sebep olur; hazırlık ve geçiş süreleri de üretim hızını önemli ölçüde düşürür.

Bu üretim sisteminde sipariş partileri plana ve sipariş teslim tarihine göre imal edildiği için, üretim planlama, sipariş tipi üretime göre daha kolaydır. Ancak kesikli üretim sisteminin iki ana sorunu vardır. En verimli üretim için en uygun parti büyüklüğünün belirlenmesi ve üretimin planlanması, iş yüklerinin düzenlenmesi.

Zamanla verimlilik kaygılarıyla ürün değişkenliğinin azalması, parti büyüklüklerinin artması ile kesikli üretimle sürekli üretim arasındaki farklar azalır. Talepler, yüksek miktarlar ve süreklilik içermeye başladığında sistem seri üretime yaklaşırken; küçük partiler ve değişken talep yoğunluğunda sistem kesikli tip üretime kayar. Dolayısıyla kesikli üretim sistemlerini sınıflandırırken kesin sınırlar çizmek zordur.

Kesikli üretim sistemlerinde verimliliği artırmak için gruplama yaklaşımı geliştirilmiştir. Gruplama yaklaşımda tasarım aşamasında, ürünlerde ortak parçalar geliştirilir, üretim tekil partiler olarak değil benzer ürün grupları birleştirilerek planlanır. Benzer geometride veya ortak parçalar aynı üretim partisinde toplanır. Bu metotla farklı ürünlere ait aynı veya benzer parça ailesine yönelik işlemler birlikte gerçekleştirilir, üretim hızı artırılır, fireler ve atıklar azalır. Özellikle Ürün Geliştirme

Yönetimi yazılımlarının geliştirilmesi ile yaygınlaşmış, üretim sistemleri için hibrit bir yöntem haline gelmiştir. (Evans, JR, Anderson, D., Sweeney, D., Williams, T., 1997)

1.2.3. Proje Tipi Üretim

Meredith ve Mantel'e göre proje tipi üretim, tekil siparişler alan, genellikle büyük geometrili, çok montaj parçalı ve karmaşık ürünlerin üretiminde kullanılan bir yapıdır. Bu tip üretimde ürünler sipariş bazlı geliştirilir, ürünler ve akışlar standart değildir ve her proje farklı kaynak, zaman ve maliyet ile yönetilir. Tekli veya az miktarda üretilecek, genellikle büyük boyutlu ürünlerin üretiminde kullanılan üretim tipidir. Sipariş üzerine üretim ve genellikle özel ürünlerin üretimi için kullanılır. Kesikli üretimde olduğu gibi genel kullanıma uygun üretim makinaları kullanılır. Bununla birlikte farklı işlem adımlarında çalışabilen çoklu yetkinliğe sahip işgücü kullanımı arzu edilir. (Meredith, J. R., & Mantel, S. J. - 2014)

Bu tip bir üretim sisteminde projelerin planlanması, en kısa sürede ve en düşük maliyetle ürün gerçekleştirilmesi ana amaçtır. Ayrıca eldeki kaynakların (işgücü, donanım/yazılım, para, hammadde vb.) verimli kullanılması önemli bir konudur. (Mordoğan M.A., Üstüntaş N. 2017)

1.3. Montaj Hattı ve Tipleri

Montaj hattı, ürünün ve üretimin ardışık aşamalarının önceden belirlenmiş ard arda iş istasyonlarında yapıldığı, ardışık parçaların eklenmesiyle nihai ürünün ortaya çıktığı, makineler ve işçilerin birlikte çalıştığı üretim sistemidir. Bu yapıda en kritik sorunlardan biri montaj hattı dengeleme problemidir. Montaj Hattı Dengeleme, görevlerin belirlenmiş ardışık istasyona dağıtılması sırasında boşta kalma zamanlarını en aza indirerek çevrim süresini en uygun hale getirmeyi amaçlar.

Başka bir deyişle Montaj hattı, ürünlerin adım adım işlenip birleştirildiği, birbirine bağlı iş istasyonlarından oluşan ve her bir istasyonda belirli iş öğelerinin gerçekleştirildiği üretim sistemidir. (Salveson, 1955)

Bu tür hatlarda malzemeler genellikle işçi yardımıyla hatta aktarılır ve parçalar üzerindeki işlemler ardışık bir akış içinde tamamlanır. İş akışının düzenlenmesi, birimlerin hatta geçirdiği sürenin azalmasına ve işgücü ihtiyacının düşmesine katkı sağlar. Montaj hatlarının temelinde standartlaştırılmış ve birbirinin

yerine kullanılabilen ortak parçaların bulunması vardır. Bu nedenle üretimde kullanılan yarı mamul ve parçaların belirli doğruluk, tolerans, hassasiyet ve kalite standartlarını karşılamaları zorunludur. Aksi takdirde hattın hızı ve verimliliği çok düzecektir.

Başka bir bakış açısıyla; seri şekilde sıralanan istasyonlardan oluşan akış hatlarında, eğer istasyonlarda daha fazla sayıda makine bulunuyorsa buna transfer hattı, daha çeşitli araçlarla donatılmış işçilerin görev aldığı hatlara ise montaj hattı denir. Bu sistemde malzemelerin işgücüyle hattın başından sonuna kadar ilerlemesi, işlemlerin öncelik ilişkilerine göre birleştirilmesi ve aşama aşama tamamlanarak son istasyonda nihai ürün haline gelmesi söz konusudur (Baybars, 1986).

Montaj hatları, kesikli - seri üretim akış hatlarının özel bir türü olarak endüstride çok önemli bir yer tutar. Ürünün ve iş emrinin küçük alt parçalara bölünmesi ve bu parçaların farklı işlem adımları arasında dağıtılması, sistemin hızlı, verimli ve aynı zamanda esnek çözümler sunmasını sağlar. Tarihte ilk kez 1913 yılında Ford Motor fabrikalarında kullanılan montaj hattı yaklaşımı (Model T), özellikle motor, otomobil, beyaz eşya ve ev aletleri gibi büyük ölçekli ürünlerin seri üretiminde yaygınlaşmıştır.

Bir montaj hattının tasarımında ölçek ve ekonomik kriterler belirleyicidir. Bu noktada, özellikle tesislerin kapasite ve kullanım düzeyi kritik bir değerlendirme konusudur. Montaja dayalı bir üretim yapısında, öncelikle yerleşim konusunda bir seçim yapılması gerekir. Bunlar, akış hattı, sistem ya da süreç yerleşimi olabilir. Burada ekipman kullanım süreleri ile insan işçilik sürelerini eşleştirmek doğru bir yaklaşımdır. (Uzmen, 1990).

Montaj hatlarında çalışacak işgücü maliyetleri, özel amaçlı tezgâhlarda görev yapan işçilere kıyasla daha düşüktür. Ayrıca bu çalışanların eğitim ihtiyaçları daha sınırlı olduğundan, işe alım ve iş değişimi süreçlerinde fazla zorluk yaşanmaz (Acar ve diğ., 1986).

Montaj hatları, istasyonlardaki işlemlerin ve bu istasyonlar arasındaki bağlantıların otomasyon seviyesine göre otomatik ya da yarı otomatik olarak sınıflandırılabilir. Ayrıca, üretimdeki model çeşitliliği de montaj hatlarının farklı türlere ayrılmasına olanak tanır.

Tek Modelli Hatlar: Bu tip montaj hatları, yalnızca tek bir ürün ya da modelin üretiminde yaygındır. Tasarımları nispeten basit olduğundan kurulumu ve işletilmesi kolaydır; ancak ürün değişkenliğine esnek değildir.

Çok Modelli Hatlar: Bu tip hatlarda, birden fazla ürün çeşidi veya aynı ürünün iki versiyonu, partiler halinde üretilir. Her bir model, hat üzerinde kendi üretim partisini oluşturur. Çok modelli montaj hatları; eğer üretim partileri büyük ölçekliyse tek modelli montaj hatlarına, küçük partiler söz konusuysa karışık modelli montaj hatlarına yakınlaşır.

Karışık Modelli Hatlar: Karışık modelli montaj hatları, bir ürünün farklı modellerinin ya da birbirine benzer birden fazla ürünün aynı anda ve karışık biçimde üretildiği hatlardır. Bu sistemde, teorik olarak büyük miktarlarda bitmiş ürün stokuna ihtiyaç duyulmaz. Çok modelli hatların aksine, üretim süreci doğrudan tüketici taleplerine yanıt verecek şekilde sürekli işler.

Bununla birlikte, karışık modelli montaj hatlarının en önemli zorlukları modellerin farklı özelliklerinden kaynaklanır. Çeşitli iş parçalarının üretime girmesi, iş akışlarının eşit dağılmamasına, bazı istasyonlarda boş bekleme sürelerinin oluşmasına ve yarı bitmiş ürün stoklarının artmasına yol açabilir. Bu nedenle bu tür hatlarda hem tasarım hem de operasyon süreçleri oldukça karmaşık hale gelir.

Genel olarak üretim hatlarının yerleşiminde ürünün montaj sırasına uygun ve doğrusal akışlar önerilir. Bunun başlıca nedeni; doğrusal hatların daha basit ve sistematik olmaları, yerleşim açısından kolaylık sağlamaları, istasyonların bantlarla birleştirilebilmesine olanak sağlaması ve maliyetleri düşürmeleridir. Ayrıca, dönüşlerde oluşabilecek transfer güçlüklerini ortadan kaldırmaları da doğrusal yerleşimi avantajlı kılar. (Kobu, B. 2006)

1.4. Montaj Hattı Dengeleme

Üretim sürecinde ürünler genellikle az sayıda ana parçadan onlar da birçok alt parçadan oluşur. Örneğin, Jetfan, farklı mekanik ve elektronik bileşenlerin monte edilmesiyle elde edilir.

Sanayileşme ile birlikte, sistem yaklaşımı metodu geliştirilmiş, ürünün küçük parçalara bölünmesi ve bu parçaların birleşimlerinin farklı işçiler tarafından gerçekleştirilmesi yaklaşımı, üretimin daha hızlı, seri ve düşük maliyetle

yapılabileceği fikrini gündeme getirmiştir. Bu bakış açısı ile üretim; çeşitli iş istasyonlarının bulunduğu belirli bir hat üzerinden montajın adım adım yapılması ile başlanmıştır. Malzemeler, akış hattı boyunca işçi ve/veya makineler yardımıyla aktarılır; parçalar üzerindeki işlemler de öncelik sırası ve işlem süresi gibi kısıtlar dikkate alınarak istasyonlara dağıtılır. Böylece, ardışık biçimde düzenlenmiş işlemlerden oluşan üretim sistemi "montaj hattı" olarak adlandırılır. Hat üzerindeki işçiler, kendilerine tanımlanan işlemleri, ürün haline gelecek yarı mamuller yanlarından geçerken yerine getirir. Sonuçta, hatta giren parçalar ve yarı ürünler hattın sonunda tamamlanmış ürün olarak çıkar. (Tekin, M. 2016)

Montaj hattı tasarlanırken dikkat edilen temel kavramlardan biri de, iş istasyonları arasındaki işlem sürelerinin dengelenmesidir. Buradaki amaç, hattın verimliliğini en üst düzeye çıkarmak için, işlemlerin istasyonlara dağıtılırken aralarda minimum boşta süre olmasıdır. Özellikle işlem sayısının fazla ve üretim hızının yüksek olduğu durumlarda, iş istasyonları arasındaki süre farklılıklarını en aza indirmek stratejik bir konudur. Bu optimizasyon bir Montaj Hattı Dengeleme konusudur.

Montaj hattı dengeleme, montaj parçalarının istasyonlara atama sürecidir. Amaç, kayıp süreleri azaltmak, hattın kapasitesini artırmak ve üretimi daha planlı hale getirmektir. Bu nedenle hat dengeleme konusu, üretim hızının yükseltilmesi, etkin planlama yapılması ve hattın verimliliği açısından büyük önem taşır. (Kobu, B. 2006)

Günümüzde kaliteli, verimli ve hızlı üretim yapabilmek, ancak hat dengeleme çalışmalarının başarılı bir şekilde yapılabilmesine bağlıdır. Rekabetin yoğunlaştığı ortamda, üretim hatlarının optimize edilmesi ve değişken talebe uyum sağlayacak esneklik kazandırılması için bilgisayar destekli simülasyon teknikleri yoğun biçimde kullanılmaktadır.

Son dönemlerde geliştirilen bilgisayar destekli üretim makineleri, tezgâhlar ve montaj araçlarının kullanılması, daha verimli üretim yapılmasına olanak verir.

1.4.1. Hat Dengelemenin Temel Unsurları

Montaj hattının dengelenmesini doğrudan etkileyen bazı etkenler vardır. Bunlar aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

a.) İş Öğesi (Work Element):

Üretim süreci, çeşitli eylem ve iş parçacıklarından oluşur. İş öğesi, toplam iş yükünün mantıksal olarak ayrılmış en küçük parçası olarak tanımlanır. Bir veya birden fazla iş parçacığının birleşiminden oluşabilir. Örneğin bir parçaya beş delik açılması gerektiğinde, teorik olarak her delik için ayrı iş öğesi tanımı yapılabilir. Ancak hat dengeleme açısından mantıklı olan, bu işlemi tek bir grup olarak ele almak ve beş deliği açmayı bir iş öğesi kabul etmektir. Eğer bu işlem otomatik bir tezgâhta tek seferde yapılıyorsa, bu durumda "beş delik açma" işlemi tek bir iş öğesi sayılır.

b.) İş İstasyonu (Workstation):

Montaj hattı üzerinde işçilerin kendilerine tanımlanan görevleri yerine getirdiği alandır. Her iş istasyonunda bir işçi, gerekli araçlarla belirli iş öğelerini gerçekleştirir. Genel olarak iş istasyonu, bir montajcının çalıştığı ve işlemleri yaptığı yer olarak düşünülür (Wee ve Magazine, 1982). Montaj hattı tasarımında istasyon sayısı en az bir olmak zorundadır ve bu sayı, dengeleme çalışmalarında hesaplanan asgari değerlerin altına inmemelidir.

c.) Toplam İş Süresi:

Bir ürünün montajı için gerekli olan toplam süreyi ifade eder. Başka bir deyişle, montaj hattında yapılması gereken tüm iş öğelerinin standart sürelerinin toplamıdır.

d.) İş İstasyonu İşlem Süresi:

Bir istasyonda yapılacak işlem adımlarının süreleri toplamıdır. İstasyona gelen parçanın işlenmeye başladığı andan, o istasyondaki son işlemin bitimine kadar geçen süredir (De Jong, 1957). İş istasyonu İşlem süresi, paralel istasyon bulunmadığı durumda, hattaki en uzun işlem adımının süresinden küçük, hattın çevrim süresinden ise büyük olamaz. Örneğin toplam 30 işlem adımından oluşan bir montaj hattında bir iş istasyonunu oluşturan işlem adımları B1, B2, B3, B4 ise bu 4 işlem adımının işlem sürelerinin toplamı bu iş istasyonunun işlem süresinin verir.

e.) Çevrim Süresi ("Cycle Time"):

Çevrim süresi, montaj hattında bir ürünün bir iş istasyonunda geçirebileceği en uzun süre olarak tanımlanır. Diğer bir ifadeyle, bir işçinin istasyondaki görevlerini

tamamlaması için ihtiyaç duyduğu maksimum süredir. Çevrim süresinin belirlenmesinde temel ölçüt, istenen üretim hızıdır. Bir istasyonda ardışık işlemler arasında belirli bir geçiş süresi bulunur. Ayrıca tüm işler tamamlanmış olsa bile çevrim süresi tamamen dolmamış olabilir. Bu nedenle çevrim süresi üç alt bileşene ayrılır:

- Üretken iş süresi
- Üretken olmayan iş süresi
- Atıl süre (Wild, 1979, s.47).. (Kobu, B. 2006)

1.4.2. Hat Dengelemenin Amacı

Montaj hatları, modern üretim sistemlerinin en önemli modellerinden biridir. Temel olarak, ardışık biçimde birbirine bağlı işlem ve iş istasyonlarından oluşurlar. Girdiler hattın başından veya aradaki istasyonlardan giriş yapar, işlemden geçtikten sonra montaj sırasına uygun olarak istasyondan istasyona aktarılır ve son aşamada bitmiş ürün olarak hattı terk eder.

Transfer hatları veya diğer bir deyişle otomasyon hatları, üretim sistemlerinde kullanılan tam otomatik akış hatlarıdır. Birbiriyle transfer donanımları (konveyörler, otomatik taşıyıcılar vb.) aracılığıyla bağlanan otomatik üretim makinelerinden oluşurlar. Parçalar hattın başından girer, her istasyonda belirli bir işlemden geçer ve hattın sonunda bitmiş ürün olarak çıkar. Sistemde bekleme ya da ara stok birikmez. Makinelerin hızı birbirine uyumludur ancak hız farkları oluştuğunda da bir sonraki makine bunu bilir ve bekler. Groover, M. P. (2015)

Montaj hatlarından farklı olarak transfer hatları, insan gücüne çok az ihtiyaç duyar; malzemenin hat boyunca ilerletilmesi ve parçaların işlenmesi büyük ölçüde makineler tarafından yapılır. Bu nedenle işçilik maliyetleri düşerken, yüksek hızda, standart ve büyük hacimli üretim sağlanır. Bir montaj hattı tasarlanırken ulaşılması hedeflenen amaçlar şu şekilde özetlenebilir:

1. Malzemelerin düzenli ve kesintisiz akışını sağlamak,
2. İnsan gücü ve makine kapasitelerinden maksimum düzeyde yararlanmak,
3. İşlemleri en kısa sürede tamamlamak,
4. Atıl süreleri en aza indirmek,
5. Hattaki iş istasyonu sayısını mümkün olduğunca düşük tutmak,

6. Boş süreleri iş istasyonları arasında dengeli dağıtmak,
7. Genel üretim maliyetlerini en düşük seviyeye indirmek.

Ancak montaj hattı dengelemenin amaçları arasında zaman zaman çelişkiler olabilir. Örneğin maliyeti düşürmek için işçi sayısını azaltmak, aynı zamanda atıl süreleri artırabilir. Bu nedenle dengelemede asıl amaç, söz konusu çelişkiler gözetilerek tüm kısıtları optimize etmektir. Bu noktada özellikle işgücü maliyeti ve hattın karmaşıklığı da önemli etkenlerdir. (Chase, R., Aquilano, L., Jacobs, F. 1998)

İşgücü yükünü dengelemek için uygulanabilecek bazı yöntemler şunlardır:

- Otomatik işlem süresi uzun olan birden fazla makineye tek bir işçi atanabilir,
- İşlem süreleri kısa olan görevler tek bir işçiye verilebilir,
- İşçinin iş yükü artırılabilir,
- İşçiler, çalışma hızları dikkate alınarak hattın farklı istasyonlarına yerleştirilebilir.

1.4.3. Hat Dengelemeyi Etkileyen Temel Etmenler Ve Kısıtlar

Montaj hattı dengelemesinde dikkate alınması gereken temel unsurlar birkaç başlık altında toplanabilir:

a.) Ürünün teknik detayları ve işlemler arasındaki bağımlılıklar,
b.) Uygulanan yöntem:
c.) Aynı makinenin birden fazla istasyonda kullanılması durumunda, bazı iş istasyonlarının ardışık yerleştirilmesi zorunlu hale gelebilir.

Montaj hatlarında dikkate alınması gereken iki temel kısıt vardır: çevrim süresi ve öncelik ilişkileri.

a.) Çevrim Süresi (Cycle Time): Çevrim süresi; üretim hedefi, brüt çalışma süresi ve tolerans yüzdesi birlikte dikkate alınarak belirlenir. Tolerans yüzdesi, kontrol edilemeyen nedenlerle yaşanan kayıplar ile planlı duruş sürelerinin, brüt çalışma süresine oranıdır. Çevrim süresi, bir ürünün

herhangi bir iş istasyonunda işlem görebileceği en uzun süreyi ifade eder. Bir istasyona atanan iş öğelerinin toplam süresi bu değeri aşamaz.

b.) **Öncelik İlişkileri (Precedence Relations):** Montaj sürecinde bazı iş öğeleri, ancak kendinden önce gelen belirli işlerin tamamlanmasından sonra başlayabilir. Bu nedenle iş öğelerinin istasyonlara atanması sırasında, öncelik ilişkilerine kesinlikle uyulması gerekir.

Temel kısıtların dışında, dikkate alınması gereken bazı yan kısıtlar da vardır:

a) Konum Kısıtı: İşçilerin konumları ile montajı yapılan parçanın bant üzerindeki konumu arasındaki uyumu ifade eder.

b) Sabit Donanım Kısıtı: Test araçları, makineler veya tezgâhlar gibi sabit ekipmanlar değiştirilemez ve bu donanımların bulunduğu noktalar sabit istasyonlar oluşturur. Bu durum iş öğelerinin farklı istasyonlara kaydırılabilme esnekliğini sınırlar.

c) İstasyon Yükü: Bazı durumlarda istasyonların yükünün çevrim süresinin %100'ünden daha az olması tercih edilir. Özellikle hattın başındaki istasyonlarda bu uygulama, olası aksaklıkların tüm hattı olumsuz etkilemesini önlemek için önemlidir.

1.4.4. Hat Dengeleme Algoritmaları

1.4.4.1. Konum Ağırlıklı Dengeleme (Rpw - Ranked Positional Weight)

1960'lı yılların başında Helgeson ve Birnie tarafından General Electric Company'de geliştirilen bu yaklaşım, hat dengelemede kullanılan sezgisel (heuristic) yöntemlerden biridir. Optimal çözümü garanti etmese de, diğer birçok yönteme göre daha hızlı ve pratik çözümler sunabilmesi nedeniyle literatürde yaygın olarak tercih edilmektedir (Helgeson ve Birnie, 1961).

Yöntemin temelinde, her iş öğesine bir konum ağırlığı verilmesi vardır. Bu ağırlık, ilgili iş öğesinin süresi ile onu takip eden iş öğelerinin sürelerinin toplamı üzerinden hesaplanır. Amaç, konum ağırlığı daha yüksek olan iş öğelerine atamada öncelik tanımaktır.

Yöntemin adımları şu şekilde özetlenebilir:

1. Her iş öğesi için konum ağırlıkları belirlenir (konum ağırlığı = iş öğesinin kendi süresi + ondan sonra gelen tüm işlerin sürelerinin toplamı).
2. İş öğeleri, konum ağırlıkları büyükten küçüğe doğru sıralanır.
3. İş öğelerinin iş istasyonlarına atanması sürecine geçilir. Bu aşamada en yüksek konum ağırlıklı iş öğeleri önce yerleştirilir:

a) En büyük konum ağırlıklı iş öğesi ilk istasyona atanır.
b) İstasyondaki kullanılmamış süre, çevrim süresinden atanan iş sürelerinin çıkarılmasıyla hesaplanır.
c) Kalan iş öğeleri içinden, en yüksek konum ağırlıklı olan seçilir ve istasyona atanması denenir.
d) Bu işlem, aşağıdaki iki koşuldan biri gerçekleşinceye kadar devam eder:
i. Tüm iş öğeleri atanmıştır.
ii. Hem öncelik koşullarına hem de kalan süre koşullarına uyan başka iş öğesi kalmamıştır.
e) Atanamayan en yüksek konum ağırlıklı iş öğesi, bir sonraki istasyona aktarılır ve yukarıdaki adımlar tekrar edilir.
f) Atama işlemleri, hiçbir iş öğesi kalmayıncaya dek sürdürülür.

Bu işlemler sonunda montaj hattı için bir dengeleme çözümü elde edilmiş olur. Çözümün geçerliliği ve daha iyi alternatifler bulunabilmesi için ters yönde bir kontrol uygulanabilir. Bu teknikte hattın sonundan başlanır, kurallar tersine işletilerek ters konum ağırlıkları hesaplanır ve elde edilen çözüm ilk çözümle karşılaştırılır. Daha uygun olan çözüm seçilerek uygulanır.

Uygulamada tercih edilmesinin başlıca nedeni, iş öğelerinin hem kendi sürelerinin hem de kendisine bağlı öğelerin toplam sürelerinin yüksek olduğu durumlarda, bu işlere daha erken öncelik verilmesini sağlamasıdır. Helgeson ve Birnie yöntemi, pratikliği nedeniyle yalnızca sanayide değil, aynı zamanda araştırmacılar için de yeni dengeleme tekniklerinin geliştirilmesinde yol gösterici olmuştur.

1.4.4.2. Aşamalı Sıralamayla Çözüm

1956 yılında Jackson tarafından geliştirilen bu yöntem, hat dengeleme problemini ele alış biçimiyle dikkat çeker. Yöntem, çözüm süreci ilerledikçe küçük değerli alternatiflerin sistematik biçimde elenmesi esasına dayanır (Jackson, 1956).

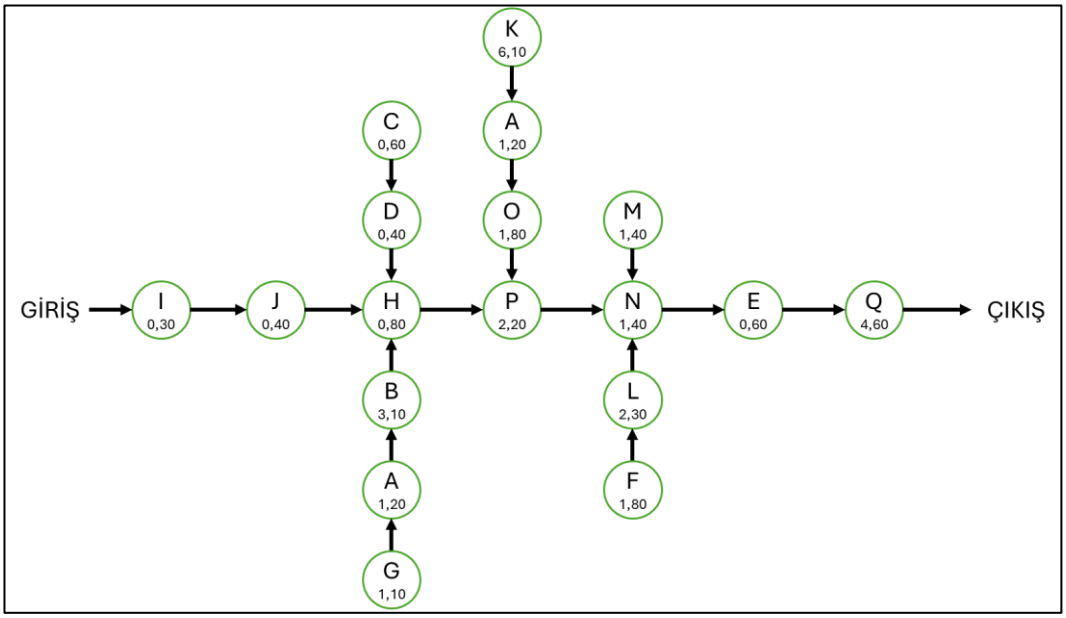
Yöntemin temel yaklaşımı; çevrim süresinin aşılmaması, öncelik ilişkilerinin korunması ve tüm iş öğelerinin oluşturabileceği olası kombinasyonların aşamalı olarak belirlenmesidir. Daha sonra çözüm sürecini kolaylaştırmak amacıyla bazı sadeleştirmeler yapılabilir.

1.4.4.3. Öncelik Diyagramıyla Çözüm

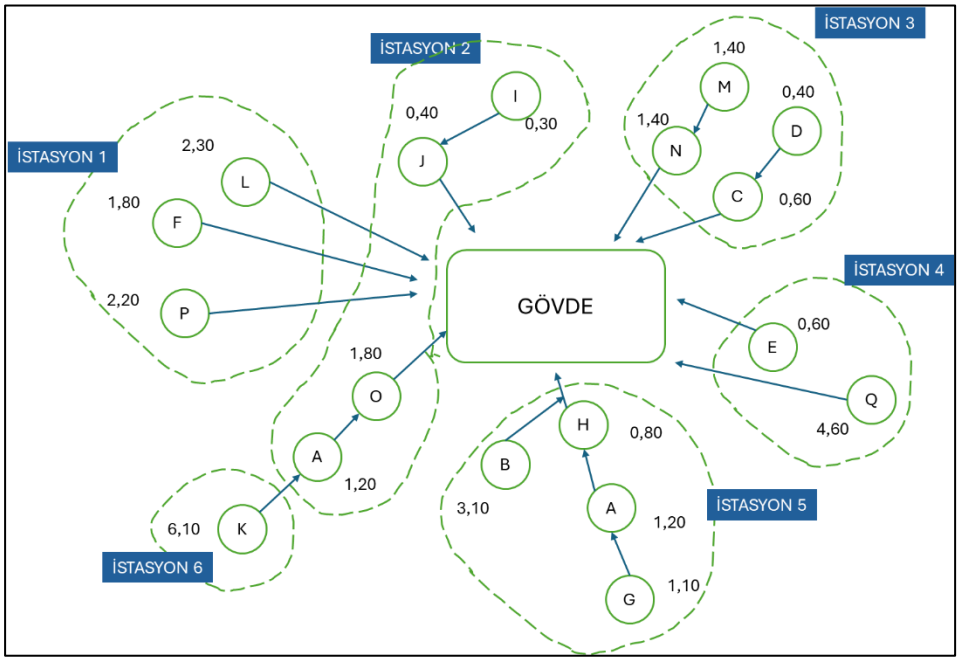
1963 yılında Hoffman tarafından geliştirilen bu yaklaşımda, öncelik diyagramı temel çözüm aracı olarak kullanılır. Yöntem, çoğu durumda en uygun çözüme ulaşmayı sağlayan hat dengeleme tekniklerinden biri olarak kabul edilmektedir (Hoffman, 1963).

Montaj sürecinin teknik özellikleri nedeniyle bazı iş öğelerinin belirli bir sırayla yapılması zorunludur. Bu zorunluluklar “öncelik ilişkileri” başlığı altında toplanır (Sniedovich, 1981). Öncelik ilişkilerinin gösterilmesinde en yaygın kullanılan yöntem ise grafiksel temsildir. Hat dengeleme çalışmalarında bu grafikler, teknolojik öncelik diyagramı (technological precedence network) olarak adlandırılır.

Diyagramda, iki iş öğesi arasındaki ok işareti, okun çıkış noktasında yer alan öğenin, uç kısmındaki öğeden önce yapılması gerektiğini gösterir. Çemberlerin içine yazılan rakamlar iş öğelerinin numaralarını, sağ üst köşede verilen değerler ise ilgili iş öğesinin süresini belirtir. Şekilde bir montaj hattı için hazırlanmış örnek bir teknolojik öncelik diyagramı sunulmaktadır.



Şekil 1.2: Bisiklet Montaj Hattı Öncelik Diyagramı



Şekil 1.3: Hat Dengeleme İstasyon Gruplamaları Tablosu -Bülent Kobu, 2006

İş istasyonu, montaj hattında belirli bir iş adımının gerçekleştirildiği noktadır. Her iş istasyonuna, işlemin tamamı ya da bir kısmı atanır; bu istasyon, ilgili görevi tamamlamak için gerekli iş gücü, makineler ve materyallerle donatılmıştır. (Islam, M. S., Ali, S. M., & Kabir, G. (2018). Üretim hattında iş istasyonu, belirli bir görevin bir çalışan tarafından yerine getirildiği alanı ifade eder. Bir hattın toplam üretim hızı, istasyonlar arasındaki en yavaş sürece bağlıdır. Bu yavaşlık, hattın genel kapasitesini belirleyen kritik nokta olup, literatürde darboğaz işlemi olarak adlandırılır (Prof. Dr. Aykut Top, Üretim Yönetimi, 2022).

1.4.4.4. LTT (Largest Task Time) Algoritması ile Çözüm

Montaj hattı dengeleme problemi (Assembly Line Balancing Problem – ALBP), üretim hatlarının verimliliğini artırmak için görevlerin istasyonlara uygun biçimde atanmasını amaçlayan temel bir üretim planlama konusudur. Bu problemde farklı sezgisel (heuristic) ve matematiksel yöntemler geliştirilmiş olup, Largest Task Time (LTT) algoritması en bilinen klasik sezgisel yaklaşımlardan biridir.

LTT algoritmasının temel prensibi, henüz atanması gereken işler arasından süre açısından en uzun olan görevi öncelikli olarak seçmek ve bu görevi mevcut istasyona, çevrim süresi (cycle time) sınırını aşmadan yerleştirmektir. Eğer seçilen görev mevcut istasyona sığmazsa yeni bir istasyon açılır ve süreç aynı şekilde devam eder. Bu yaklaşım, montaj hattındaki darboğazları azaltmayı ve üretim hattının daha dengeli kullanılmasını hedefler.

Literatürde LTT yöntemi, montaj hattı dengelemede kullanılan diğer sezgisel yöntemlerle (ör. Ranked Positional Weight – RPW algoritması) karşılaştırılmıştır. Araştırmalar, LTT algoritmasının özellikle görev sürelerinin yüksek varyansa sahip olduğu durumlarda daha etkin sonuçlar verebildiğini göstermektedir (Helgeson & Birnie, 1961; Scholl, 1999). Bununla birlikte, LTT'nin deterministik yapısı nedeniyle her zaman optimal çözümü garanti etmediği ve daha çok pratik, hızlı çözümler elde etmede kullanıldığı vurgulanmaktadır.

Çeşitli çalışmalar, LTT algoritmasının farklı varyantlarını ve kombinasyonlarını önermiştir. Örneğin, görevlerin öncül ilişkilerini dikkate alan genişletilmiş versiyonlar, veya LTT'nin meta-sezgisel yöntemler (Genetik Algoritmalar, Tavlama Benzetimi vb.) ile entegre edilmesi literatürde sıkça görülmektedir (Baybars, 1986; Becker & Scholl, 2006). Bu geliştirmeler, LTT'nin tek

başına basit bir yöntem olmasına rağmen, daha karmaşık optimizasyon teknikleri için başlangıç çözümü sağlamada güçlü bir araç olduğunu ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, LTT algoritması montaj hattı dengeleme probleminde hızlı uygulanabilirliği, kolay anlaşılabilirliği ve tatmin edici çözüm kalitesi sayesinde literatürde önemli bir yer edinmiştir. Ancak modern çalışmalarda, genellikle diğer sezgisel veya meta-sezgisel yöntemlerle birlikte hibrit bir şekilde kullanıldığı dikkat çekmektedir.

İKİNCİ BÖLÜM

UYGULAMA

Çalışma, Jetfan üreten bir firmada üç fazdan oluşan bir iyileştirme planı oluşturulmuştur.

Birinci fazda, mevcut hali ile üretimin ve fabrikanın birbirinden uzak farklı noktalarında bulunan çalışma alanları bir araya getirilerek bir hat şeklinde yerleştirilmek suretiyle yeniden yerleşim düzenlemesi yapılmış, sonrasında 31 işlem adımından oluşan bu montaj süreci için mekanik ve mühendislik yaklaşımları ile önceliklendirme diyagramı yoluyla işlemlerin sıralaması yapılmıştır. Sonrasında hat dengeleme yöntemi ile 31 montaj işlemi 5 iş istasyonuna toplanmıştır. Çalışmanın metrikleri arasında başlangıçta kabul edilen talep miktarına uygun olarak çevrim süresi hesaplanmış ve montaj işlem adımları deneme-yanılma ile iş istasyonlarına dağıtılırken çevrim süresine en uygun ve en az atıl zaman oluşturacak şekilde gruplanmıştır. Bu pratik yöntemle bir verimlilik ve denge gecikmesi seviyesine ulaşılmıştır.

İkinci fazda LTT (Largest Task Time) ve RPW (Ranked Positional Weight) algoritmaları ile yapılan saha uygulamasının doğrulaması yapılmış, her bir algoritmaya göre hesaplamalar yapılarak yeni iş istasyonu sayıları, her istasyon için işlem adım sıralamaları, toplam iş istasyonu işlem süreleri ve boşta kalma süreleri hesaplanmıştır. Buna göre LTT ve RPW algoritmaları ile yapılan hat dengeleme sonuçlarına göre hattın verimliliği ve denge gecikmesi oranları hesaplanmıştır. İkinci fazda yapılan hesaplamalar sonucunda LTT algoritması daha verimli çıkmıştır.

Üçüncü fazda R Programlama dili kullanılarak LTT (Largest Task Time) algoritması için kodlama yapılarak, manuel hesaplamalarla yapılan hat dengelemesi sonuçları, bilgisayar destekli hesaplamalı hat dengeleme algoritması oluşturularak doğrulanmıştır. Aynı zamanda oluşturulan R programı benzeri farklı hat dengeleme problemlerinde kullanılabilecek bir algoritma oluşturmuştur. R Programın çalıştırılması neticesinde manuel yapılan LTT (Largest Task Time) algoritma hesaplamalarını doğrulamıştır. Böylece hazırlanan kodun doğruluğu da gözlemlenmiştir.

2.1. Mevcut Üretimin Yerleşim Planlaması ve Hat Dengelemesi (Faz 1)

Çalışmanın odağındaki jetfanlar; otoparklarda olası bir yangın durumunda duman dedektörleri tarafından tetiklenerek devreye giren bütünleşik fan sistemleridir. Bu sistemler, dumanı kademeli olarak bir fandan diğerine aktaran ve nihayetinde kapalı ortamdan dışarıya tahliye eden seri bağlı fan dizilerinden oluşur (Şekil 4) Dünyada sürekli artan talebe paralel olarak endüstriyel fan ve üfleyici pazarının 2025-2034 döneminde yıllık ortalama %4,3, toplamda da %54,7 büyüyeceği öngörülmektedir (Global Market Insight – 2025). Türkiye'de ise *22.02.2018 tarih ve* 30340 sayı ile yayınlanan Otopark Yönetmeliği ile gelen 2.000 m2'nin üzerindeki otoparklarda zorunluluk ile talepte hızlı ve ciddi bir artış olmuştur.

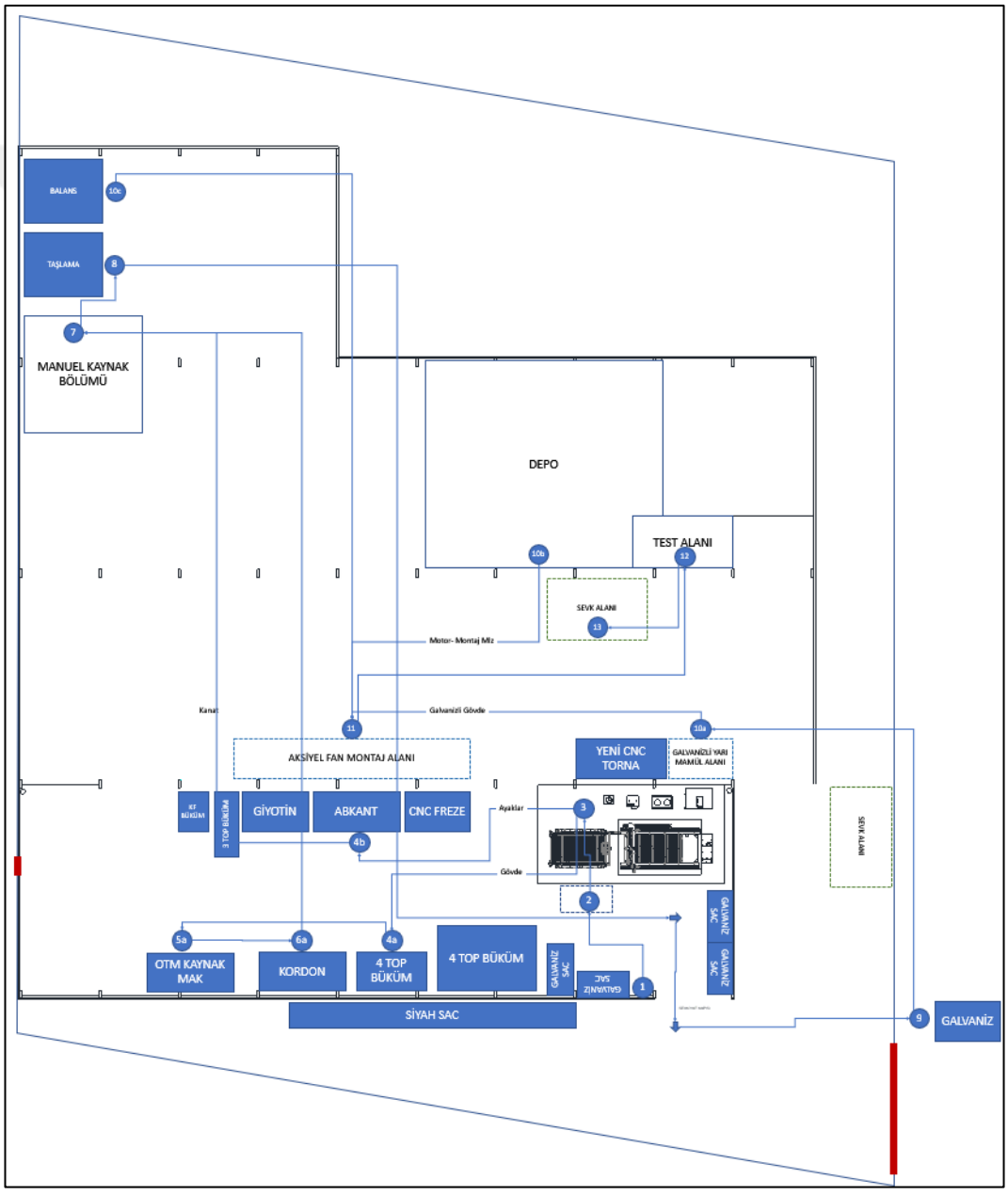


Şekil 2.1: Otopark Duman Tahliye Sistemi

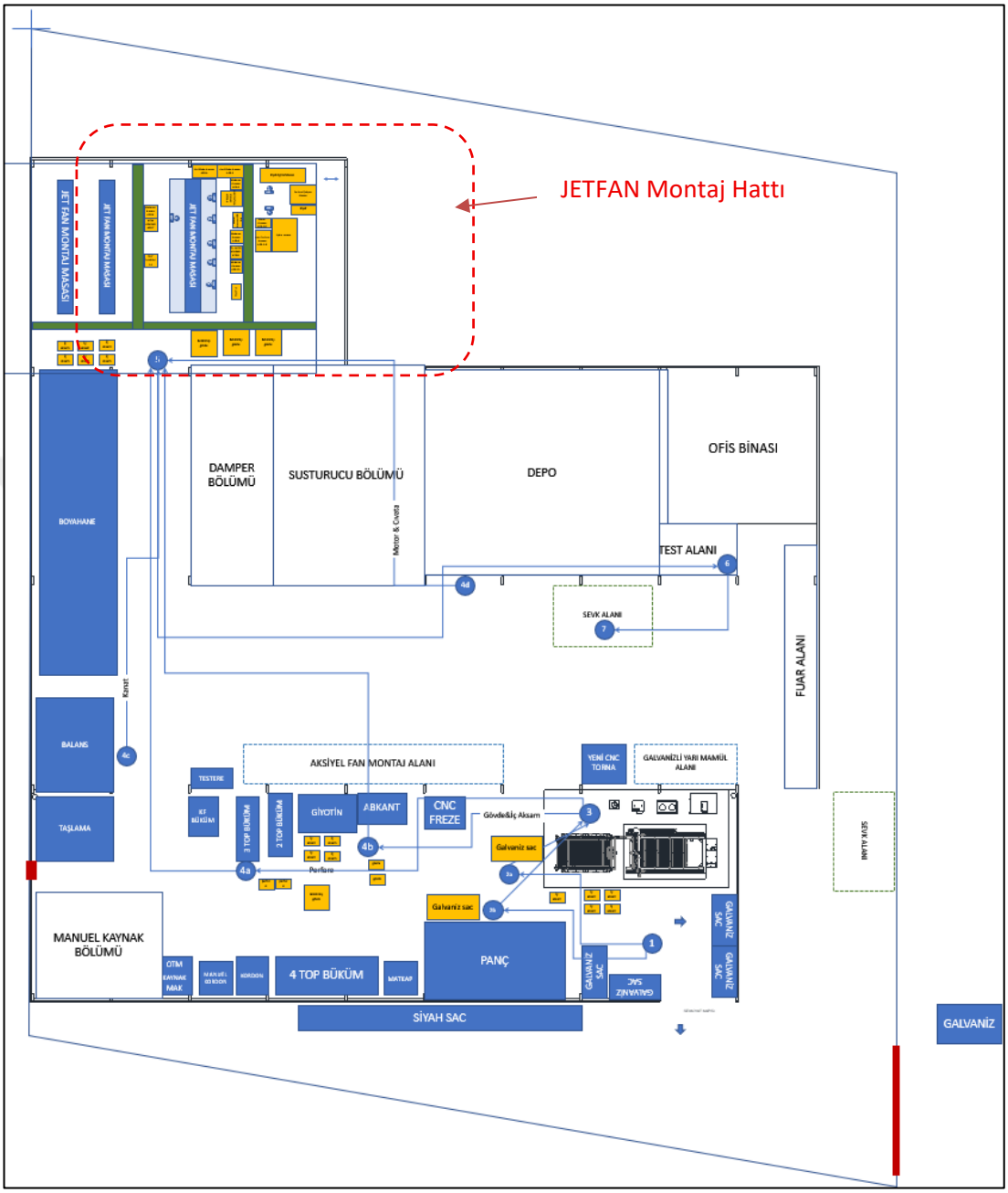
Artan talep karşısında kapasite, jetfan üreten işletmenin büyümesinin önündeki en büyük engel haline gelmişti. Yatırım yapmadan verimliliği artırmayı hedefleyen işletmenin fonksiyon bazlı fabrika yerleşimi, jetfan montajına özgü akışla uyumsuz olup bu durum yarı mamul taşıma mesafelerinin uzamasına, ara stokların birikmesine ve dolayısıyla verimliliğin düşmesine yol açmaktaydı. Üretim hızını yükseltme ihtiyacı doğunca, bu yapısal sorunu çözmek için bilimsel bir yaklaşım olan hat dengeleme yönteminin uygulanmasına karar verilmiştir.

Çalışmanın ilk aşamasında, fabrikanın mevcut yerleşim planı ölçekli olarak hazırlanmış, ürün akışındaki işlem merkezlerinin konumları tanımlanmış, ilgili değişken ve parametreler dijital ortamda kaydedilmiştir (Şekil 5). Bu analiz, yarı mamullerin montaj süresince katettiği toplam mesafenin hesaplanması için bir temel oluşturmaktadır. Ardından, malzeme ve iş gücü akışını aksatan dağınık yapıdaki işlem merkezleri, ürünün montaj sırasına uygun şekilde fiziksel olarak yeniden düzenlenmiştir (Şekil 6). Üretim alanındaki gereksiz taşımalar, hareketler ve ara stokları ortadan kaldıran yeni fabrika yerleşimi ile üretim süreci daha akıcı, sade ve

düzenli bir hale gelmiştir. Bu yeni yerleşim, her işlem merkezinin civarına yerleştirilen ve ilgili iş emrinin gerektirdiği tüm malzemeyi bulunduran hızlı besleme arabaları ile desteklenmiş; işlem merkezleri arasındaki malzeme akışı hızlandırılmış, bekleme süreleri ile stok birikimleri azaltılarak sorumlu operatörlerin görevlerine odaklanması sağlanmıştır.



Şekil 2.2: Montaj Hattı Yerleşim Planı

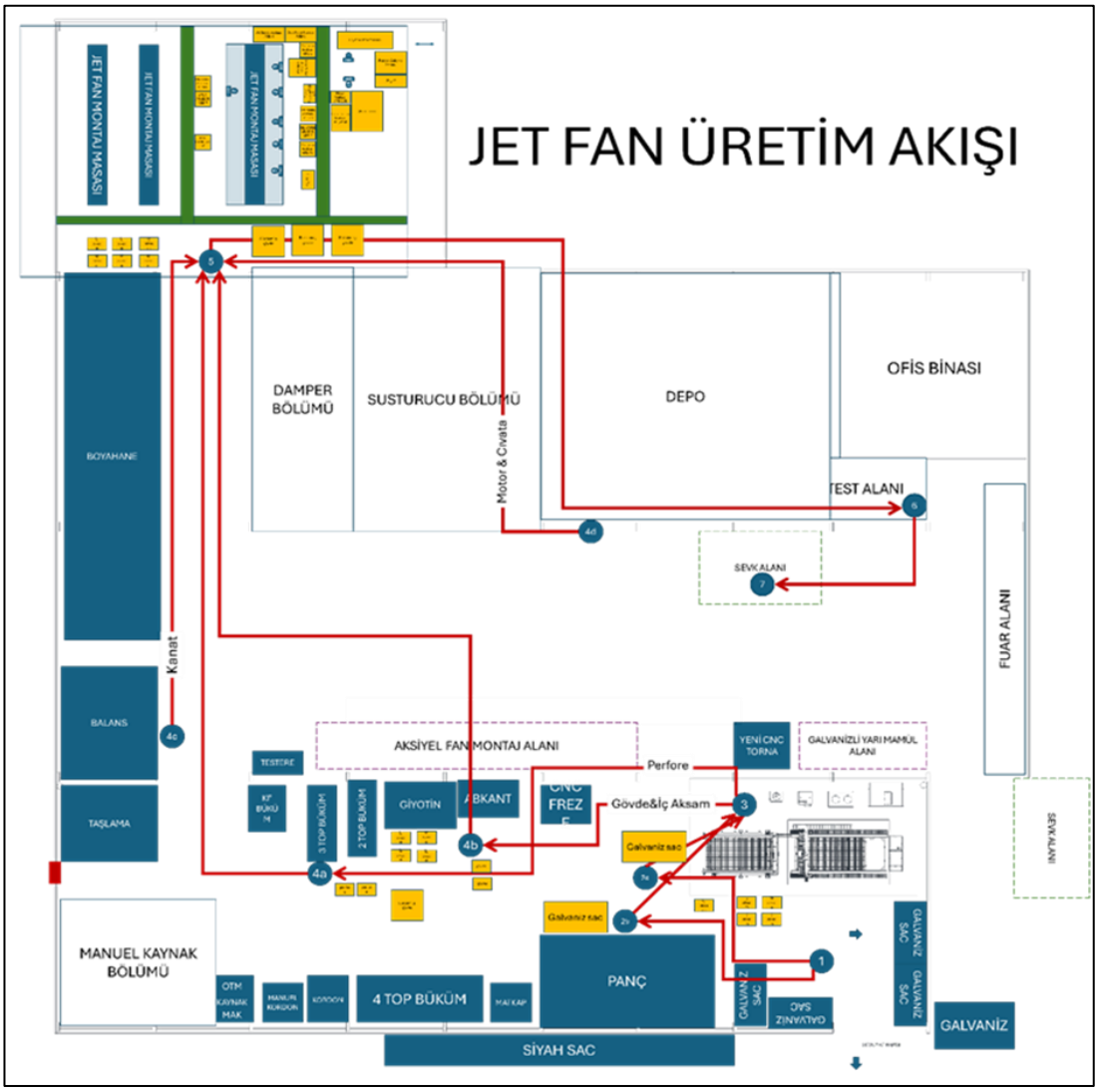


Şekil 2.3: Revize Montaj Hattı Yerleşim Planı

Tablo 2.1: Ürün Ağacı

JETFAN ÜRÜN AĞACI			
SIRA	PARÇA NUMARASI	MİKTAR	KULLANILDIĞI YER
1	AIR-JF315-101	1	Sac Aksam /Alt Gövde
2	AIR-JF315-102	1	Sac Aksam / Üst Gövde
3	AIR-JF315-103 X 2	2	Sac Aksam/Yönlendirici
4	AIR-JF315-104 X 2	2	Sac Aksam/Yönlendirici
5	AIR-JF315-105	1	Sac Aksam/Yönlendirici
6	AIR-JF315-106	1	Sac Aksam/Yönlendirici
7	AIR-JF315-107 X 2	2	Sac Aksam/Yönlendirici
8	AIR-JF315-108 X 2	2	Sac Aksam / Kızak
9	AIR-JF315-109	1	Sac Aksam/Buat
10	AIR-JF315-110	1	Sac Aksam/Buat Kapağı
11	AIR-JF315-111 X 2	2	Sac Aksam/Ayna
12	AIR-JF315-112 X 2	2	Sac Aksam/ Yarım ay
13	AIR-JF315-113 X 2	2	Sac Aksam/ Yarım ay montaj parçası
14	AIR-JF315-114 (80)	1	Sac Aksam/Motor Kaidesi
15	AIR-JF315-115 X 2	2	Sac Aksam/Askı Ayağı
16	AIR-JF315-116 X 4	4	Sac Aksam/Askı Ayağı
17	AIR-JF315-117	1	Sac Aksam/Perfore
18	4 MM POP PERÇİN	20	Alt Üst Gövde Montajı
19	4 MM POP PERÇİN	4	Askı Üst
20	4 MM POP PERÇİN	32	Ayna
21	4 MM POP PERÇİN	10	Yönlendirici
22	4 MM POP PERÇİN	4	perfore birleştirme
23	4 MM POP PERÇİN	8	Etiket
24	4 MM POP PERÇİN	14	Yarım Ay gövde montajı
25	4 MM POP PERÇİN	6	Yarım Ay Bükümlü Parça
26	4.8X16 MM TRPEZ VİDA	2	Motor Kızak
27	4.8X16 MM TRPEZ VİDA	6	Tel Kafes
28	M6 PERÇİN SOMUN	16	Askı Yan
29	M6 PERÇİN SOMUN	2	Motor Kızak
30	M6 PERÇİN SOMUN	4	Buat
32	M6 PERÇİN SOMUN	2	Yönlendirici
33	M6X15 CIVATA	16	Askı
34	M6X15 CIVATA	2	Motor Kızak
35	M6X15 CIVATA	4	Buat
36	M6X15 CIVATA	2	Yönlendirici
37	M8X30 CIVATA	4	Motor
38	M8 SOMUN	4	Motor
39	3,9X16 AKILLI VİDA	4	Yönlendirici
40	4.8X16 MM AKILLI VİDA	2	KLEMENS
41	M6X50 CIVATA	8	Kanat
42	M6 SOMUN	8	Kanat
43	KNT1	8	Kanat
44	GBK8	2	Kanat
45	İnşaat Teli	1	Elyaf Bağlama
46	PİRİNÇ PG 21	1	Alt gövde
47	PİRİNÇ KÖR TAPA PG 16	1	Alt Gövde
48	PORSELEN KLEMENS NO:2	1	BUAT
49	M4*2,5 KABLO PABUCU	7	Elektrik

Hat dengeleme analizi kapsamında karşılanamayan talebi karşılamak ve hat kapasitesini artırmak amacıyla öncelikle jetfan ürün ağacı derlenmiştir (Tablo 1).



Tablo 2.2: Yarı Mamül Ve Ürün Hareket Akışı

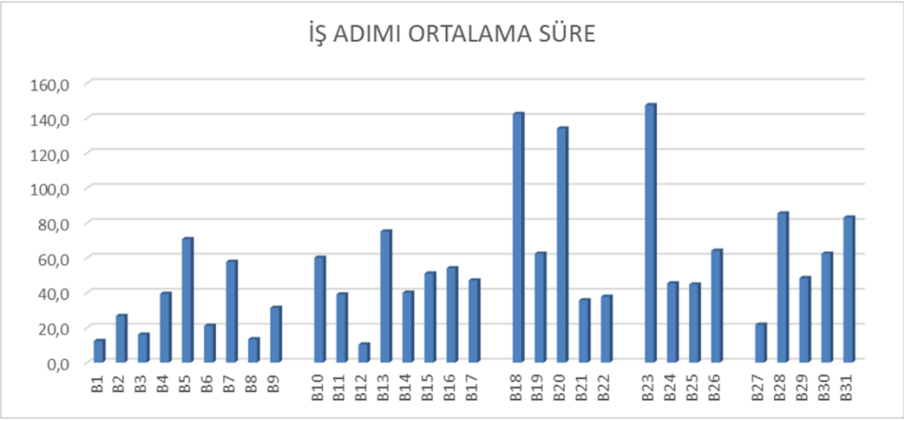
İşlem merkezlerindeki görevlerin ne kadar sürdüğünü netleştirmek amacıyla, mevcut üretim düzeni ve iş akışı değiştirilmeksizin her bir işlem adımında tüm çalışanların görev süreleri kronometre kullanılarak en az üçer kez doğrudan gözlem yöntemi ile ölçülmüştür. Her bir görevin standart süresini belirlemek için, elde edilen ölçümlerin normal dağılım sergilediği varsayımı altında görev ölçümlerinin ortalamasına ölçümlerin 1.65 standart sapması eklenmiştir. Böylelikle gelecekteki

işlemlerin %95 olasılık ile tamamlanacağı standart ortalama süreler hesaplanmıştır (Mood, 1950).

Zaman etüdü ile elde edilen bilgiler Tablo 2 de aktarılmaktadır.

Tablo 2.3: İşlem Adımları İşlem Süreleri

İŞLEM NO.	MONTAJ ADIMLARI	SÜRE	SÜRE	SÜRE	ORT. SÜRE	Std Sapma
B1	JF ALT KAPAĞI MASAYA ALMA	11	15	11	12,3	2,3
B2	GÖVDEYE RAKOR TAKMAK	16	36	28	26,7	10,1
B3	BUATA KLEMENS BAĞLAMA	11	18	19	16,0	4,4
B4	BUATI GÖVDEYE BAĞLAMA	40	37	41	39,3	2,1
B5	ALT GÖVDEYE YARIM AY BAĞLAMA	93	52	67	70,7	20,7
B6	PERFOREYİ ALT GÖVDEYE BAĞLAMA	20	24	19	21,0	2,6
B7	ÜST YARIM AY BAĞLAMA	85	30	58	57,7	27,5
B8	ÜST KAPAĞI MASAYA ALMA	10	16	14	13,3	3,1
B9	ELYAF TRAŞLAMAK	30	35	29	31,3	3,2
B10	GÖVDE BİRLEŞTİRMEK	55	60	65	60,0	5,0
B11	ÜST KAPAĞA PERÇİN SOMUN ATMAK	36	39	42	39,0	3,0
B12	AYNANIN MASAYA GETİRİLMESİ	10	11	10	10,3	0,6
B13	AYNA BİRLEŞTİRMEK	75	70	80	75,0	5,0
B14	ŞAPKA MONTAJI	21	51	48	40,0	16,5
B15	KIZAK YATAKLARINI BAĞLAMA	27	67	59	51,0	21,2
B16	MOTORU GÖVDEYE MONTAJLAMAK	39	65	58	54,0	13,5
B17	ASKI AYAK MONTAJI	47	45	49	47,0	2,0
B18	KABLO SIYIRMAK	135	150	142	142,3	7,5
B19	KABLO PABUCU TAKMAK	42	77	68	62,3	18,2
B20	ELEKTRİK BAĞLANTISI	115	138	149	134,0	17,3
B21	TEL KAFES MONTAJI	33	37	37	35,7	2,3
B22	ETİKET TAKILMASI	34	37	42	37,7	4,0
B23	YÖNLENDİRİCİ YAPIMI	92	189	161	147,3	49,9
B24	YÖNLENDİRİCİNİN GÖVDEYE MONTAJI	37	55	44	45,3	9,1
B25	TEST	41	48	45	44,7	3,5
B26	BUAT KAPAĞI KAPATMAK	62	71	59	64,0	6,2
B27	PALETE İNDİRME	32	15	18	21,7	9,1
B28	PALETE BAĞ ATMA	85	80	91	85,3	5,5
B29	PAT PAT SARMA	53	41	51	48,3	6,4
B30	STREÇ SARMA	75	50	62	62,3	12,5
B31	SEVK ALANINA TAŞIMA	81	75	93	83,0	9,2



Şekil 2.4: İşlem Adımları Ortalama Süreleri

Toplanan veri, Günlük talep olan 16 adet üzerinden toplanmıştır; çevrim süresine ulaşmak için işlem merkezlerindeki toplam süre 16'ya bölünmüştür. Bu parça akışı ile ilgili bir durum olup ölçümler buna göre yeniden yapılmalıdır. Üretim hattına uygun iş gücü planlaması yapılmış, iş merkezlerinde operasyonları yürüten operatör sayıları yeniden belirlenmiş, üretim süreleri kısaltılarak kaynakların daha verimli kullanılması sağlanmıştır. Buna göre aşağıdaki temel verilere ulaşılmıştır.

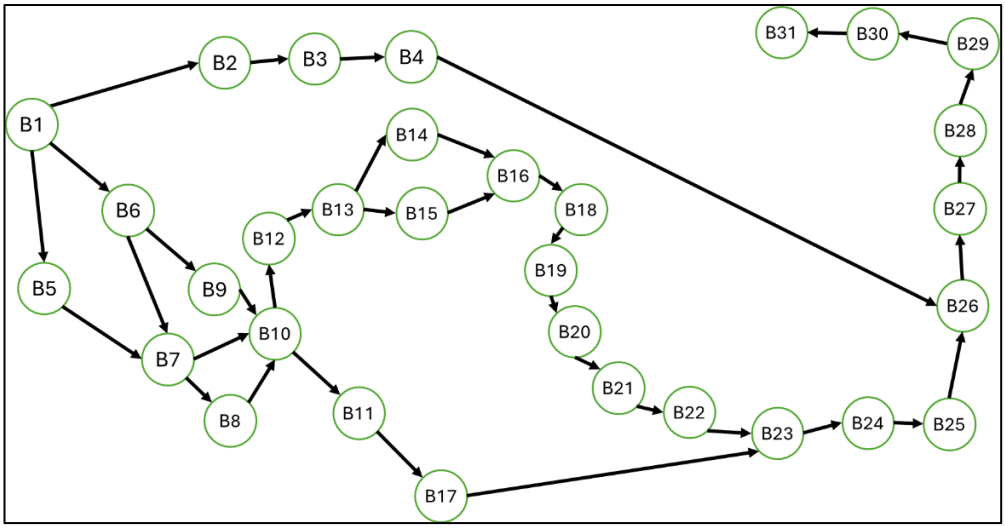
Vardiya başına üretim Süresi: S=600 dk,

Q=16 → Cycle Time (CT) = S / Q = 37.5 dk/birim

Toplam iş içeriği $\sum ti$ = 142.7dk

Maks. tek görev süresi: 15.4 dk (B23)

Montaj adımlarının işlem adımı süreleri belirlendikten sonra ürünün montaj gereklilikleri, teknik kısıtlar dikkate alınarak 31 işlem adımdan oluşan montaj hattındaki görevlerin aralarındaki öncelik ilişkileri tanımlanmıştır.



Şekil 2.5: Saha Çalışması Öncelik Diyagramı

Bu amaçla, zaman etütleriyle elde edilen standart süreler kullanılarak öncelikle teorik minimum iş istasyonu sayısı hesaplanmıştır. Ardından, çeşitli hat dengeleme algoritmaları aracılığıyla görevler bu teorik istasyonlara yeniden atanmıştır. (Kobu B, 2006)

Tablo 2.4: Saha Çalışması İstasyon İşlem Adımları ve İşlem Süreleri

- Toplam 5 istasyon. CT=37,5dk
- İstasyon 1: B1, B2 ,B3, B4, B5, B6, B7, B8, B9 → 27,5 dk (boş: 10dk)
- İstasyon 2: B10, B11, B12, B13, B14, B15, B16, B17 → 31.7 dk (boş: 5,8)
- İstasyon 3: B18, B19, B20, B21, B22 → 31.9 dk (boş: 5.6)
- İstasyon 4: B23, B24, B25, B26,→ 27,4 dk (boş: 10.1)
- İstasyon 5: B27, B28, B29, B30, B31 → 24,1dk (boş: 13.4)

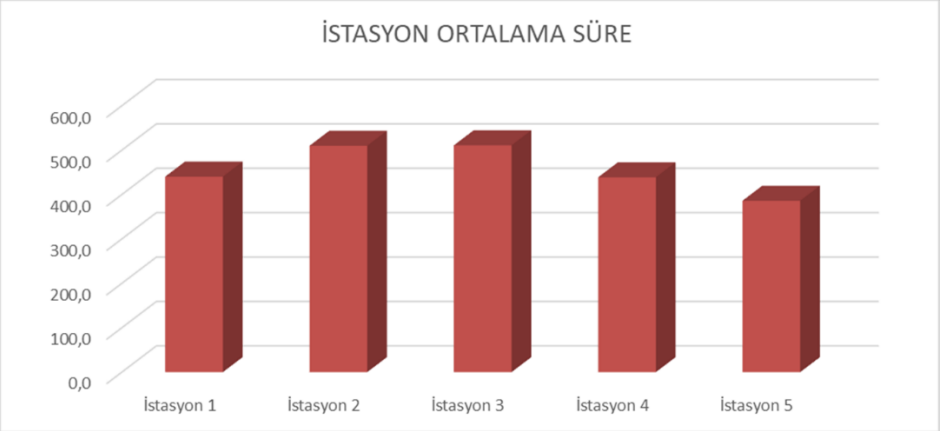
Günlük talep, montaj işlem sırası ve ölçülen işlem sürelerine göre tüm görevleri eş anlı çalışabilecek istasyonlara atamak amacıyla takribi bir çevrim süresi 540 dakika olarak hesaplanmıştır. Her çevrim süresinde bir adet jetfan üretilebilecek dengeli bir yapı oluşturulmuş, alan kullanımı iyileştirilmiş, işlem merkezleri arasındaki taşıma ve hareket ihtiyacı azaltılmıştır. Kısa süreli veya birbirini tamamlayan görevleri aynı istasyonlarda birleştiren yeni yapıda önceki çevrim süresi olan 1200 dakikaya göre %55'e yakın bir iyileştirme sağlanmıştır.

Nihai olarak, analitik yöntemle elde edilen bu teorik modelin sonuçları ile mevcut durumda oluşturulan beş istasyonlu yapının verimliliği karşılaştırılarak en etkin çözüm ortaya konulmuştur.

Hat dengeleme çalışması ile elde edilen verimlilik;

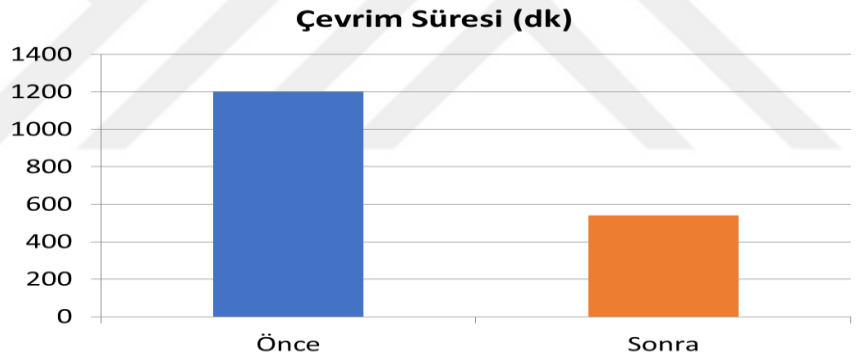
Tablo 2.5: Saha Çalışması Montaj Hattı Verimlilik Formülasyonu

Verimlilik: $E = \frac{\sum ti}{N_{min} \times CT} = \frac{142.7}{5 \times 37.5} = 76.11\%$ | Denge Gecikmesi: $BD = 23.89\%$



Şekil 2.6: Hat Dengeleme Sonrası İstasyon Zamanları

Kısıt istasyonların, kısıt olmayan istasyonlarla birleştirilmesi ile montaj 31 montaj işleminden oluşan üretimin çevrim süresi %55 oranında iyileştirildi.



Şekil 2.7: Hat Dengeleme Öncesi – Sonrası Çevrim Süresi

2.2. LTT ve RPW Algoritmaları ile Çalışmanın Analitik Doğrulanması (Faz 2)

2.2.1. LTT Longest Task Time (En Uzun Görev Süresi) Algoritması ile Çalışmanın Doğrulanması

Bu aşamada LTT Algoritmasına uygun olarak çalışma hesaplanmıştır. LTT Algoritması gereği işlem adımları şu şekilde olmalıdır;

- Temel Mantığı
    - Amaç: Görevleri iş istasyonlarına yerleştirirken çevrim süresini aşmadan dengeyi sağlamaktır.
    - Mantık: Öncelik ilişkilerine uymak koşuluyla en uzun süren görevlerden başlayarak atama yapılır.
- İşleyiş
    - Veri Hazırlığı
        - Görev süreleri ve öncüllük ilişkileri belirlenir.
        - Çevrim süresi hesaplanır (ör. günlük talep ve vardiya süresine göre)
    - Görev Seçimi
        - Henüz atanacak görevler arasında en uzun süreli görev seçilir,
        - Eğer birden fazla görev eşitse, öncelik ilişkilerine bakılır.
    - İstasyon Ataması
        - Seçilen görev, mevcut istasyondaki kalan süreyi aşmıyorsa oraya eklenir,
        - Aşıyorsa, yeni bir istasyon açılır ve görev oraya atanır.
    - Tekrar
        - Tüm görevler atanana kadar 2–3. adımlar tekrarlanır.

LTT Algoritmasının sonucu olarak aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

Vardiya/üretim Süresi: S=600 dk,

Q=16 → Cycle Time (CT) = S / Q = 37.5 dk/birim

Toplam iş içeriği $\sum ti$ = 142.7dk

İstasyon alt sınırı: Nmin=⌈142.7/37.5⌉=4

Maks. tek görev süresi: 15.4 dk (B23)

Toplam 4 istasyon (teorik alt sınıra eşit). CT=37,5dk

İstasyon 1: B5, B9, B6, B7, B8, B10, B11, B17, B1, B2, B3, B12 → 35.8 dk (boş: 1.7)

İstasyon 2: B13, B15, B14, B16, B18, B19 → 36.8 dk (boş: 0.7)

İstasyon 3: B20, B4, B21, B22, B23 → 34.0 dk (boş: 3.5)

İstasyon 4: B24, B25, B26, B27, B28, B29, B30, B31 → 36.1 dk (boş: 1.4)

Algoritma hesaplamaları sonucu görülmüştür ki LTT algoritması yapılan saha çalışmasından 1 istasyon daha az sayıda istasyon ile çözümleyebilmektedir.

Buna göre verimlilik oranı şu şekilde oluşmuştur.

$$\text{Verimlilik } E = \frac{\sum ti}{N_{\min} \times \text{CT}} = \frac{142.7}{4 \times 37.5} = 95.13\% \mid \text{Denge Gecikmesi: BD} = 4.87\%$$

2.2.2. RPW Ranked Positional Weight (Sıralı Konumsal Ağırlık) Algoritması ile Çalışmanın Doğrulanması.

- RPW, Montaj hattı dengeleme problemlerinde kullanılan klasik bir sezgisel yöntemdir.
- 1961'de Helgeson ve Birnie tarafından geliştirilmiştir.
- Temel Mantığı

- Her görevin pozisyonel ağırlığı hesaplanır:
- Görevin kendi işlem süresi ondan sonra gelen tüm görevlerin işlem sürelerinin toplamıdır,
- Daha sonra bu ağırlıklara göre görevler sıralanır (en yüksekten en düşüğe).
- Görevler çevrim süresi sınırı gözetilerek iş istasyonlarına atanır.

- RPW, hattın dengeleme verimliliğini artırmak için görevlerin öncelik ilişkilerini dikkate alır.
- Özellikle karmaşık öncüllük ilişkilerinde, uzun vadeli etkileri görüp doğru sıralama yapmaya yardımcı olur.

RPW algoritmasının *(Helgeson ve Birnie 1961)* sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Toplam 5 istasyon. CT=37,5dk. İstasyonlar RPW algoritmasında sıralandığında 4 istasyonluk alt sınıra yerleşemedi, 5 istasyon alındı.
- İstasyon 1: B9, B6, B7, B8, B10, B12, B13, B11, B21, B17, B22 → 34.0 dk
- İstasyon 2: B23, B5, B15, B1, B14, B2 → 36.8 dk
- İstasyon 3: B24, B3, B25, B16, B4, B26, B18, B27 → 33.6 dk
- İstasyon 4: B28, B19, B29, B30, B20 → 32.0 dk
- İstasyon 5: B31 → 6.3 dk

Algoritma hesaplamaları sonucunda hattın dengelemesinin RPW metodu ile 5 istasyonda çözülebilmektedir. Böylece verimlilik aşağıdaki gibi olmuştur.

Verimlilik: $E = \frac{\sum ti}{N_{min} \times CT} = \frac{142.7}{5 \times 37.5} = 76.11\%$ | Denge Gecikmesi: $BD = 23.89\%$

Böylelikle iki algoritma arasında bir karşılaştırma yapılması imkanı oluşmuştur. Buna göre;

LTT (Longest Task Time) algoritması

Verimlilik $E = \frac{\sum ti}{N_{min} \times CT} = \frac{142.7}{4 \times 37.5} = 95.13\%$ | Denge Gecikmesi: BD= 4.87%

RPW (Ranked Positional Weight) algoritması

Verimlilik: $E = \frac{\sum ti}{N_{min} \times CT} = \frac{142.7}{5 \times 37.5} = 76.11\%$ | Denge Gecikmesi: BD= 23.89%

Her iki algoritmanın manuel hesaplamalar ile yapılan analizlerinde LTT algoritmasının daha verimli sonuç verdiği anlaşılmıştır. Bu nedenle R betiği ile yapılacak çalışmada LTT algoritmasının kullanılmasına karar verilmiştir.

2.3. Montaj Hattı Dengeleme Problemlerinde R Betiğinin Kullanılarak Çalışmanın Doğrulanması (FAZ 3)

R Betiği: Montaj Hattı Dengeleme Probleminde Farklı Algoritmaların Uygulanması

Bu bölümde, montaj hattı dengeleme problemini çözmek üzere geliştirilen R betiğinin teknik analizi sunulmaktadır. Betik, adım adım ilerleyen bir analiz gerçekleştirir: İlk olarak, görevler, bu görevlerin süreleri (dakika) ve aralarındaki öncül ilişkiler bir veri çerçevesinde tanımlanır. Ardından, üretim hedeflerine (talep ve süre) göre çevrim süresi ve teorik minimum istasyon sayısı gibi temel metrikler hesaplanır. Betik, bu altyapıyı kullanarak en uzun görev süresi (“longest task time”, LTT) deneme-yanılma yöntemiyle görevleri iş istasyonlarına atar. Son aşamada ise, elde edilen atama sonuçlarını ve hattın verimlilik analizini konsola yazdırarak raporlar ve görevlerin atandıkları istasyonlara göre renklendirildiği bir öncül diyagramı ile çözümü görselleştirir.

```
library(igraph) # Gerekli kutuphaneler

library(dplyr)

# --- 1. Veri Tanimlamasi ---

hat_verisi <- data.frame(

  Gorev = c(    "B1", "B2", "B3", "B4", "B5", "B6", "B7", "B8", "B9", "B10",

    "B11", "B12", "B13", "B14", "B15", "B16", "B17", "B18", "B19", "B20",
```

```
          "B21", "B22", "B23", "B24", "B25", "B26", "B27", "B28", "B29", "B30", "B31"  ),
        Sure = c(    1.1, 2.9, 1.5, 2.7, 7.0, 1.6, 7.0, 1.2, 2.4, 4.4,
          2.8, 0.7, 5.3, 4.6, 5.8, 5.1, 3.2, 9.8, 6.2, 10.5,
          2.5, 2.9, 15.4, 4.0, 3.2, 4.8, 2.5, 6.0, 3.8, 5.5, 6.3  ),
        Oncul_Gorevler = c(      "B5, B6", "B1", "B2", "B3", NA, "B9", "B6", "B7", NA,
"B7, B8",
          "B10", "B10", "B12", "B13", "B13", "B14, B15", "B11", "B16", "B18", "B19",
          "B13", "B21", "B22, B17", "B23", "B24", "B4, B25", "B26", "B27", "B28", "B29",
"B30" ))
      # --- 2. Uretim Parametreleri ---
      mevcut_uretim_suresi <- 600
      gunluk_talep <- 16
      # --- 3. Temel Metriklerin Hesaplanmasi ---
      toplam_gorev_suresi <- sum(hat_verisi$Sure)
      cevrim_suresi <- mevcut_uretim_suresi / gunluk_talep
      teorik_min_istasyon <- ceiling(toplam_gorev_suresi / cevrim_suresi)
      # --- 4. Gorev Atamasi (En Uzun Gorev Suresi - LTT ataması) ---
      edge_list <- data.frame(from = character(), to = character())
      for (i in 1:nrow(hat_verisi)) {
        if (!is.na(hat_verisi$Oncul_Gorevler[i])) {
          predecessors <- unlist(strsplit(hat_verisi$Oncul_Gorevler[i], ",\\s*"))
          for (p in predecessors) {
            edge_list <- rbind(edge_list, data.frame(from = p, to = hat_verisi$Gorev[i]))
} }}
      g <- graph_from_data_frame(edge_list, directed = TRUE, vertices =
hat_verisi$Gorev)
      atanmamis_gorevler <- hat_verisi$Gorev
```

```
istasyonlar <- list()
istasyon_no <- 1
# === DIS DONGU ===
while (length(atanmamis_gorevler) > 0) {
  mevcut_istasyon_suresi <- 0
  mevcut_istasyon_gorevleri <- c()
  adaylar_bulundu <- TRUE
  # === IC DONGU ===
  while (adaylar_bulundu) {
    tum_atanmis_gorevler <- c(unlist(sapply(istasyonlar, `[[`, "gorevler")), mevcut_istasyon_gorevleri)
    sapply_sonucu <- sapply(atanmamis_gorevler, function(task) {
      preds <- neighbors(g, task, mode = "in")$name
      all(preds %in% tum_atanmis_gorevler)    })
    sapply_sonucu_vektor <- unlist(sapply_sonucu)
    atanabilir_gorevler <- names(sapply_sonucu_vektor[sapply_sonucu_vektor])
    if (length(atanabilir_gorevler) == 0) {
      adaylar_bulundu <- FALSE
      next    }
    uygun_gorevler_df <- hat_verisi[hat_verisi$Gorev %in% atanabilir_gorevler, ]
    uygun_gorevler_df <- uygun_gorevler_df[uygun_gorevler_df$Sure <= (cevrim_suresi - mevcut_istasyon_suresi), ]
    if (nrow(uygun_gorevler_df) == 0) {
      adaylar_bulundu <- FALSE
      next    }
    en_uzun_gorev <- uygun_gorevler_df[which.max(uygun_gorevler_df$Sure), "Gorev"]
```

```
      mevcut_istasyon_gorevleri <- c(mevcut_istasyon_gorevleri, en_uzun_gorev)
      mevcut_istasyon_suresi <- mevcut_istasyon_suresi + hat_verisi$Sure[hat_verisi$Gorev == en_uzun_gorev]
      atanmamis_gorevler <- atanmamis_gorevler[atanmamis_gorevler != en_uzun_gorev]}
     istasyonlar[[istasyon_no]] <- list(
      gorevler = mevcut_istasyon_gorevleri,
      toplam_sure = mevcut_istasyon_suresi)
     istasyon_no <- istasyon_no + 1}
    # --- 5. Sonuclarin Sunulmasi ---
    for (i in 1:length(istasyonlar)) {
    # --- 6. Verimlilik Degerlendirmesi ---
    gerceklesen_istasyon_sayisi <- length(istasyonlar)
    hat_verimliligi <- (toplam_gorev_suresi / (gerceklesen_istasyon_sayisi * cevrim_suresi)) * 100
    denge_gecikmesi <- 100 - hat_verimliligi
    # --- 7. GORSELLESTIRME: ONCELIK DIYAGRAMI ---
    renk_paleti <- rainbow(length(istasyonlar))
    gorev_renkleri <- rep(NA, length(V(g)))
    names(gorev_renkleri) <- V(g)$name
    for (i in 1:length(istasyonlar)) {
     istasyondaki_gorevler <- istasyonlar[[i]]$gorevler
     gorev_renkleri[istasyondaki_gorevler] <- renk_paleti[i]}
    plot(g,
      vertex.color = gorev_renkleri,
      vertex.label.color = "black",
      vertex.size = 22,
```

```
    edge.arrow.size = 0.8,
    edge.width = 1.5,
    main = "Istasyonlara Gore Renklendirilmis Oncelik Diyagrami")
legend("topleft",
    legend = paste("Istasyon", 1:length(istasyonlar)),
    fill = renk_paleti,
    bty = "n",
    cex = 0.8)
# --- 7. GORSELLESTIRME: ONCELIK DIYAGRAMI
```

Bölüm 1: Kütüphanelerin Yüklenmesi ve Veri Yapısının Tanımlanması

Analizin başlangıcında, gerekli R kütüphaneleri yüklenir ve problemin temel verileri yapılandırılır.

```
# Gerekli kütüphaneler
library(igraph)
library(dplyr)
```

- library(igraph): Görevler arasındaki öncül ilişkilerini bir ağ yapısı olarak modellemek ve bu yapıyı görselleştirmek için kullanılan igraph paketini R oturumuna yükler.
- library(dplyr): Veri manipülasyonu işlemleri için geniş bir fonksiyon seti sunan dplyr paketini yükler. Bu betikte özellikle veri filtreleme adımlarında potansiyel olarak kullanılır.

```
# --- 1. Veri Tanımlaması ---
hat_verisi <- data.frame(
  Gorev = c(...),
  Sure = c(...),
  Oncul_Gorevler = c(...))
```

- hat_verisi <- data.frame(...): Problemin tüm girdilerini içeren hat_verisi adında bir **veri çerçevesi** (“data frame”) oluşturur. Bu yapı, verileri düzenli bir tablo formatında saklar.
    - Gorev: Her bir montaj operasyonunu temsil eden benzersiz görev kimliklerini içeren bir karakter vektörüdür.
    - Sure: Her bir görevin tamamlanması için gereken süreyi dakika cinsinden belirten sayısal bir vektördür.
    - Oncul_Gorevler: Her bir görevin başlayabilmesi için tamamlanması gereken öncül görevleri tanımlayan bir karakter vektörüdür. NA değeri, görevin bir öncülü olmadığını gösterir.

Bölüm 2: Üretim Parametreleri ve Temel Metriklerin Hesaplanması

Bu bölümde, üretim hedeflerine dayalı olarak hattın temel performans metrikleri hesaplanır.

```
# --- 2. Üretim Parametreleri ---
mevcut_uretim_suresi <- 600
gunluk_talep <- 16
```

- mevcut_uretim_suresi <- 600: Bir üretim periyodu (örneğin bir vardiya) için mevcut olan toplam çalışma süresini dakika cinsinden tanımlar.
- gunluk_talep <- 16: Bu periyot içinde üretilmesi hedeflenen birim (ürün) sayısını tanımlar.

```
# --- 3. Temel Metriklerin Hesaplanması ---
toplam_gorev_suresi <- sum(hat_verisi$Sure)
cevrim_suresi <- mevcut_uretim_suresi / gunluk_talep
teorik_min_istasyon <- ceiling(toplam_gorev_suresi / cevrim_suresi)
```

- toplam_gorev_suresi: Bir birim ürünün üzerindeki toplam iş yükünü (Σt) bulmak için tüm görev sürelerini toplar.

- cevrim_suresi: Hattın ritmini ya da bir başka ifade ile hızını belirleyen çevrim süresini hesaplar. Bu, bir ürünün herhangi bir istasyonda geçirebileceği maksimum süredir.
- teorik_min_istasyon: Hattın %100 verimlilikle çalışması durumunda ihtiyaç duyulacak minimum istasyon sayısını hesaplar. ceiling() fonksiyonu, sonucun her zaman yukarıya yuvarlanmasını sağlar, çünkü istasyon sayısı bir tam sayı olmalıdır. Hesaplama sonucunda ortaya çıkan en küçük bir ondalık kısım bile, tamamlanması gereken bir iş parçasını temsil eder ve bu iş parçasının atanabileceği bir istasyona ihtiyaç vardır.

Bölüm 3: Görev Atama Algoritması (LTT Ataması)

Betiğin bu ana bölümü, LTT atamasını adım adım uygulayarak görevleri istasyonlara atar.

2.3.1. Öncül İlişkilerinin Ağ Yapısına Dönüştürülmesi

Atama algoritmasının öncül kurallarını verimli bir şekilde kontrol edebilmesi için, tablosal veri bir ağ grafiğine dönüştürülür.

```
edge_list <- data.frame(from = character(), to = character())

for (i in 1:nrow(hat_verisi)) { ... }

g <- graph_from_data_frame(edge_list, directed = TRUE, vertices = hat_verisi$Gorev)
```

- Bu for döngüsü, hat_verisi veri çerçevesindeki her bir görevi inceler, Oncul_Gorevler sütunundaki metni ayrıştırır ve her bir öncül-artçıl ilişkisini edge_list adlı veri çerçevesine bir kenar (edge) olarak ekler.
- g <- graph_from_data_frame(...): Oluşturulan kenar listesinden igraph nesnesi olan g'yi yaratır. directed = TRUE parametresi, ilişkilerin yönlü olduğunu (örneğin, B1'den B2'ye) belirtir ki bu öncülük ilişkileri için zorunludur.

2.3.2. Atama Döngülerinin Başlatılması ve Yürütülmesi

Atama süreci, tüm görevler atanana kadar devam eden iç içe geçmiş iki while döngüsü ile yönetilir.

```
atanmamis_gorevler <- hat_verisi$Gorev

istasyonlar <- list()

istasyon_no <- 1

# === DIS DONGU ===

while (length(atanmamis_gorevler) > 0) {

 # ... (yeni istasyon hazirlanir)

 # === IC DONGU ===

 while (adaylar_bulundu) {

  # ... (mevcut istasyon doldurulur)  }}
```

- atanmamis_gorevler: Henüz bir istasyona atanmamış görevlerin listesini tutar.
- istasyonlar: Tamamlanan her istasyonun görev ve süre bilgilerinin saklanacağı ana listedir.
- istasyon_no: İstasyonları numaralandırmak için kullanılan bir sayaçtır.
- **Dış while Döngüsü**: Bu döngü, atanmamış görev kaldığı sürece çalışır. Her bir tekrarı, yeni bir iş istasyonunun oluşturulması ve doldurulması anlamına gelir.
- **İç while Döngüsü**: Bu döngü, mevcut istasyona atanabilecek (hem öncül hem de süre kısıtını sağlayan) bir görev bulunduğu sürece çalışır. Amacı, mevcut istasyonu mümkün olduğunca verimli bir şekilde doldurmaktır.

2.3.3. İç Döngü: LTT Kuralının Adım Adım Uygulanması

Her bir istasyon doldurulurken, LTT ataması üç temel adımda uygulanır:

```
# ADIM A: Atanabilir Gorevleri Bul (Oncul Kontrolu)
tum_atanmis_gorevler <- c(unlist(sapply(istasyonlar, `[[`, "gorevler")), mevcut_istasyon_gorevleri)
atanabilir_gorevler <- ... # Öncül koşulu sağlayan görevler bulunur.
# ADIM B: Istasyona Sigan Gorevleri Filtrele
uygun_gorevler_df <- ... # Süresi istasyonun kalan süresine sığan görevler filtrelenir.
# ADIM C: En Uzun Gorevi Sec (LTT Kurali)
en_uzun_gorev <- uygun_gorevler_df[which.max(uygun_gorevler_df$Sure), "Gorev"]
# ADIM D: Gorevi Ata # ... (görev istasyona eklenir, süre güncellenir, atanmamışlar listesinden çıkarılır)
```

1. **Öncül Kısıtının Kontrolü**: atanmamis_gorevler listesindeki her görev için, tüm öncüllerinin daha önceki istasyonlara veya mevcut istasyonun içine zaten atanıp atanmadığı kontrol edilir. Bu koşulu sağlayan görevler "atanabilir" olarak işaretlenir.
2. **Zaman Kısıtının Kontrolü**: "Atanabilir" görevler arasından, görev süresi mevcut istasyonun kalan süresinden (cevrim_suresi - mevcut_istasyon_suresi) küçük veya eşit olanlar seçilir. Bu görevler "uygun" adaylardır.
3. **LTT Kuralının Uygulanması ve Atama**: "Uygun" adaylar içinden, süresi en uzun olan görev which.max() fonksiyonu ile seçilir. Bu, LTT atamasının temel mantığıdır. Seçilen görev mevcut istasyona atanır, istasyon süresi güncellenir ve görev atanmamis_gorevler listesinden kaldırılır.

Bölüm 4: Sonuçların ve Performans Metriklerinin Raporlanması

Atama işlemi tamamlandıktan sonra, elde edilen çözümün detayları ve genel hat performansı konsola yazdırılır.

```
# --- 5. Sonuclarin Sunulmasi ---
for (i in 1:length(istasyonlar)) { ... }
```

- Bu for döngüsü, oluşturulan her bir istasyonun detaylarını (atandığı görevler, toplam istasyon süresi ve boş zamanı) formatlı bir şekilde ekrana basar.

```
# --- 6. Verimlilik Degerlendirmesi ---

gerceklesen_istasyon_sayisi <- length(istasyonlar)

hat_verimliligi <- (toplam_gorev_suresi / (gerceklesen_istasyon_sayisi * cevrim_suresi)) * 100

denge_gecikmesi <- 100 - hat_verimliligi
```

- gerceklesen_istasyon_sayisi: LTT ataması sonucunda oluşturulan toplam istasyon sayısını verir.
- hat_verimliligi: Elde edilen dengeleme çözümünün verimliliğini hesaplar.
- denge_gecikmesi: Hattaki toplam boş zamanın yüzdesini ifade eder.

Bölüm 5: Görselleştirme: İstasyon Atamalı Öncül Diyagramı

Son olarak, elde edilen çözümün daha kolay yorumlanabilmesi için görevlerin atandıkları istasyonlara göre renklendirildiği bir öncül diyagramı çizilir.

```
renk_paleti <- rainbow(length(istasyonlar))

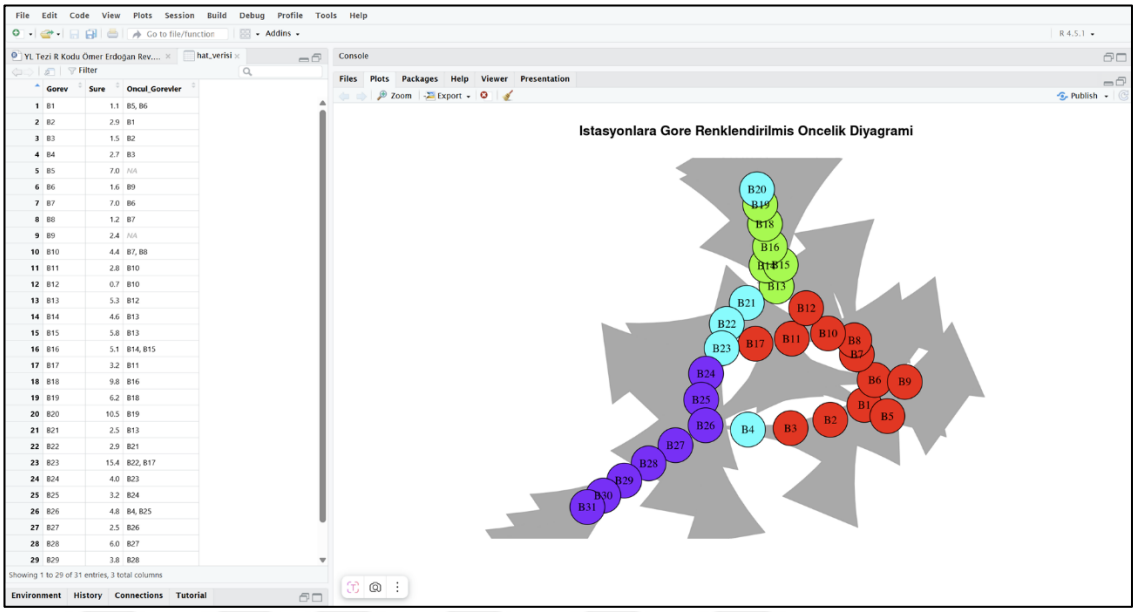
# ... (her göreve istasyonuna göre bir renk atanır)

plot(g,  vertex.color = gorev_renkleri,  ...)

legend("topleft", ...)
```

- renk_paleti: Her bir istasyon için farklı bir renk içeren bir palet oluşturur.
- for döngüsü, her bir göreve, atandığı istasyonun rengini atar.
- plot(g, ...): igraph nesnesini kullanarak öncül diyagramını çizer. vertex.color parametresi, düğümlerin (görevlerin) atanan renklere göre boyanmasını sağlar.
- legend(...): Grafiğin üzerine, hangi rengin hangi istasyonu temsil ettiğini gösteren bir açıklama kutusu ekler. Bu, görsel analizi kolaylaştırır.

Sonuç olarak LTT algoritmasının R Betiği ile yapılan analizinde de manuel LTT analizi ile benzer sonuç elde edilmiştir.



Şekil 2.8: R Betiği ile LTT Algoritmasının Hattın Dengelenmesi Çözümü

Programın çıktısı olarak alınan sonuçlarda hat dengeleme metrikleri;

- Vardiya/üretim Süresi: S=600 dk,
- Q=16 → Cycle Time (CT) = S / Q = 37.5 dk/birim
- Toplam iş içeriği $\sum ti$ = 142.7dk
- İstasyon alt sınırı: N_{min}=[142.7/37.5]=4
- Maks. tek görev süresi: 15.4 dk (B23)

Çıkmaktadır. İstasyon tanımlamaları ise aşağıdaki gibi olmaktadır.

- Toplam 4 istasyon (teorik alt sınıra eşit). CT=37,5dk
- İstasyon 1 (Kırmızı): B5, B9, B6, B7, B8, B10, B11, B17, B1, B2, B3, B12 → 35.8 dk (boş: 1.7dk)
- İstasyon 2 (Yeşil) : B13, B15, B14, B16, B18, B19 → 36.8 dk (boş: 0.7dk)
- İstasyon 3 (Mavi) : B20, B4, B21, B22, B23 → 34.0 dk (boş: 3.5dk)
- İstasyon 4 (Mor): B24, B25, B26, B27, B28, B29, B30, B31 → 36.1 dk (boş: 1.4dk)

R Betiği ile yapılan analiz çıktısı olarak verimlilik hesaplamaları aşağıdaki gibi olmaktadır.

Verimlilik $E = \frac{\sum ti}{N_{min} \times CT} = \frac{142.7}{4 \times 37.5} = 95.13\%$ | Denge Gecikmesi: $BD = 4.87\%$

SONUÇ

Bu çalışma, Türkiye'de endüstriyel fan üretimi yapan bir işletmenin otopark duman tahliye fanı montaj hattında karşılaşılan verimsizlikleri gidermek amacıyla yürütülmüştür. Çalışmanın başlangıcındaki durumda, 31 istasyondan oluşan üretim hattının dağınık yerleşimi ve dengesiz iş yükü dağılımı; malzeme taşıma sürelerini uzatmakta, üretim akışını aksatmakta ve kaynak israfına yol açmaktaydı. Bu durum, üretim planlarının öngörülebilirliğini azaltarak işletmenin toplam faktör verimliliğini olumsuz etkilemekteydi.

Çalışmanın temel amacı, yatırım maliyetine katlanmadan hat dengesizliklerini ortadan kaldırmak, süreçleri yalınlaştırmak ve üretim kapasitesini artırmak, yapılan pratik çalışmanın bilimsel algoritmalarla desteklenmesini ve geliştirilmesini sağlamaktı. Bu hedefe ulaşmak amacıyla, yalın üretim prensiplerine dayalı dört temel aşamadan oluşan sistematik bir hat dengeleme metodolojisi uygulanmıştır:

1. Hat yapısının yeniden düzenlenmesi: Dağınık istasyonlar, ürün montaj akışına uygun şekilde fiziksel olarak yeniden konumlandırılmıştır.
2. Zaman etüdü ve istasyon birleştirmeleri: Her bir operasyon için zaman etütleri yapılarak standart süreler belirlenmiş ve benzer operasyonlar birleştirilmiştir.
3. Çevrim süresinin hesaplanması: Günlük 16 adetlik talep hedefi baz alınarak hattın yeni çevrim süresi hesaplanmıştır.
4. İşgücü planlaması: Yeni çevrim süresine ve istasyonlardaki iş yüklerine göre operatör sayıları yeniden belirlenerek dengeli bir iş gücü dağılımı sağlanmıştır.

Uygulanan bu metodoloji sonucunda, üretim hattının performansında ölçülebilir ve önemli iyileşmeler elde edilmiştir. Elde edilen temel kazanımlar aşağıdaki gibidir:

- İşlem merkezi sayısının azaltılması: Başlangıçta 31 olan işlem merkezi sayısı, yapılan birleştirmeler ve yeniden düzenlemelerle 5 istasyon altında birleştirilmiştir. Böylelikle alan kullanımını iyileştirilerek malzeme akışı yalınlaştırılmıştır.
- Üretim kapasitesinin artırılması: Çevrim süresinde sağlanan %55'lik kısalma sayesinde, hattın günlük üretim kapasitesi %122 oranında

artırılmıştır. Çalışma öncesi 24 kişilik bir ekiple günde 9 adet fan üretilebilirken, iyileştirmeler sonrası hatta aynı ekiple günde 20 adet fan üretilebilir hale gelinmiştir.

- İş gücü verimliliğinin iyileştirilmesi: İş gücü planlaması sonucunda üretim bantları modüler hale getirilmiştir. Örneğin, önceki kapasite olan günde yaklaşık 10 adet fan üretimi, 24 kişi yerine 12 kişilik iki ekiple gerçekleştirilebilir hale gelmiş, bu da benzer kapasitede %47 oranında işgücü tasarrufu potansiyeli yaratmıştır.

Bu nicel sonuçların yanı sıra, çalışma işletmeye operasyonel ve stratejik düzeyde önemli nitel kazanımlar da sunmuştur. İş yükünün istasyonlar arasında dengelenmesi, çalışan beklemelerini ve yarı mamul yığılmalarını ortadan kaldırmıştır. Bu durum, hem operatörler arasındaki iş yükü farkını azaltarak iş tatminini ve güvenliğini artırmış hem de üretim planlarının gerçekleştirilme oranını yükseltmiştir.

Yapılan çalışmanın kazanımlarının bilimsel algoritmalarla desteklenmesi için önce iki ayrı algoritma (LTT ve RPW Algoritmaları) ile hat dengelemesi hesaplanmış ve yapılan saha çalışmasının geliştirilme potansiyeli olduğu bulunmuştur.

Ayrıca Yapılan manuel hesaplamalar R Programlama dili ile LTT Algoritması yardımı ile bilgisayara yeniden hesaplatılmış, Manuel LTT algoritması ile benzer sonuçlar elde edilmiştir. Bu çalışma aynı zamanda montaj hattı dengeleme problemlerine esnek, evrensel ve sürdürülebilir bir çözüm fırsatı oluşturmuştur.

Bu çalışmada elde edilen kazanımların sürdürülebilirliğini sağlamak ve sürekli iyileştirme kültürünü yerleştirmek amacıyla aşağıdaki adımların atılması tavsiye edilmektedir:

- Sürekli zaman etüdü: Üretim süreçlerindeki standart sürelerin doğruluğunu korumak ve olası sapmaları erken tespit etmek için zaman etütlerinin periyodik olarak tekrarlanması kritik öneme sahiptir.
- Yalın üretim araçlarının yaygınlaştırılması: Kanban sistemleri, 5S uygulamaları ve görsel yönetim panoları gibi farklı ve çeşitli yalın üretim araçlarının tüm üretim süreçlerine entegre edilmesi, operasyonel verimliliği daha da artıracaktır.

- Dijital performans takibi: İş istasyonu performanslarının ve çevrim süresi sapmalarının dijital sistemlerle anlık olarak izlenmesi, veri odaklı karar vermeyi destekleyerek planlama doğruluğunu yükseltecektir.
- Çok yönlü iş gücü gelişimi: Operatörlere farklı istasyonlarda çalışabilme yetkinliği kazandırılması, üretim hattının esnekliğini artıracak ve işletmenin pazardaki talep değişkenliğine daha hızlı uyum sağlamasını sağlayacaktır.

Sonuç olarak bu çalışma, montaj yoğun üretim hatlarında uygulanan hat dengeleme yöntemlerinin, yalnızca fiziksel yerleşimi iyileştirmekle kalmayıp aynı zamanda kaynak yönetimi, planlama etkinliği ve genel üretkenlik üzerinde ne denli kritik bir etkiye sahip olduğunu somut verilerle ortaya koymuştur. Elde edilen bulgular, benzer operasyonel zorluklarla karşılaşan üretim işletmeleri için uygulanabilir ve yol gösterici bir model niteliği taşımaktadır.

KAYNAKÇA

Baybars, I. (1986). **A survey of exact algorithms for the simple assembly line balancing problem.** Management Science,

Baykasoğlu, A., Dereli, T., ve Şahin, G. (2006). **Üretim Yönetimi: Sistematik Yaklaşım.** İstanbul: Literatür Yayıncılık .

Chase, R. Jacobs, R. & Aquilano N. (2004). **Operations Management for Competitive Advantage.** McGraw Hill

Chase, R., Aquilano, L., & Jacobs, F. (1998). **Production and Operations Management** (8. Ed.).

Eren, E. (2013). **Üretim ve Operasyon Yönetimi.** İstanbul, Beta Yayınları.

Evans, J. D. Anderson, Sweeney, D. & Williams, T. A. (1990). **Applied Production and Operations Management.** West Publishing Company

Evans, JR, Anderson, D., Sweeney, D., & Williams, T., (1997). **Applied Production & Operations Management,** 3rd Ed. West Publishing Company.

Groover, M. P. (2015). **Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing** (4th ed.).

Groover, M. P. (2015). **Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing.** Pearson Education.

Heizer, J., Render, B. & Munson, C. (2017). **Operations Management: Sustainability and Supply Chain Management.** 12th ed. Pearson, Boston.

Hernaus, T., Pejić Bach, M., & Bosilj Vukšić, V. (2012). Influence of strategic approach to BPM on financial and non-financial performance. **Baltic Journal of Management,** 7(4), 376-396.

Kobu, B. (2006). **Üretim Yönetimi,** 13. Baskı, İstanbul, Beta Yayınları.

Maynard, H. B., & Zandin, K. B. (2001). **Maynard's Industrial Engineering Handbook.** McGraw-Hill.

Meredith, J. R., & Mantel, S. J. (2014). **Project Management: A Managerial Approach** (9th ed.).

Mood, A. M. (1950). **Introduction to the Theory of Statistics.**

Mordoğan, M. A. ve Üstüntaş, N. (2017). **Üretim Yönetimi,** İstanbul, Lisans Yayınları.

Mutlu, M. M., ve Hacırüstemoğlu, R. (2017). **Yalın Üretim Sistemleri ve Uygulama Örnekleri.** İstanbul, Beta Yayınları.

Salvendy, G. (2001). **Handbook of Industrial Engineering: Technology and Operations Management.** John Wiley & Sons.

Salveson, M. E. (1955). **The assembly line balancing problem.** Journal of Industrial Engineering.

Stevenson, W. J. (2020). **Operations Management** (14th Ed.). McGraw-Hill Education.

Tayalı, H. A. (2023). **Introduction to Mathematical Models in Operations Planning.** CRC Press.

Tekin, M. (2016). **Üretim Yönetimi.** Cilt I , 11. Baskı.Konya, Günay Ofset.

Tekin, M. (2016). **Üretim Yönetimi.** Cilt-1, 11. Baskı. Konya, İş Bankası Yayınları.

Top, A., ve Yılmaz, E. (2022). **Üretim Yönetimi.** 5. Baskı. İstanbul, İdeal Kültür Yayıncılık.

Wild, R. (2002). **Operations Management.** Thomson Learning.

Womack, J. P., & Jones, D. T. (2003). **Lean Thinking: Banish Waste and Create Wealth in Your Corporation.** Free Press.

EKLER

Ek-1 : R Betiği ile yazılan LTT tabanlı Hat Dengeleme Algoritması

```
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------
# --- BETIK ACIKLAMASI ---
# Bu R betigi, bir montaj hatti dengeleme problemi icin tam bir analiz gerceklestirir:
# 1. Gorevler, sureleri (dakika) ve oncul iliskileri bir veri cercevesinde tanimlanir.
# 2. Uretim hedeflerine (talep ve sure) gore cevrim suresi ve teorik minimum istasyon
#    sayisi gibi temel metrikler hesaplanir.
# 3. 'En Uzun Gorev Suresi' (LTT) ataması yontemi kullanilarak gorevler istasyonlara atanir.
# 4. Atama sonuclari ve hattin verimlilik analizi konsola yazdirilir.
# 5. Son olarak, gorevlerin istasyonlara gore renklendirildigi bir oncul diyagrami cizilir.
# --- ACIKLAMA SONU ---

install.packages("igraph")
install.packages("dplyr")
# Gerekli kutuphaneler
library(igraph)
library(dplyr)

# --- 1. Veri Tanimlamasi ---
hat_verisi <- data.frame(
  Gorev = c(
    "B1", "B2", "B3", "B4", "B5", "B6", "B7", "B8", "B9", "B10",
    "B11", "B12", "B13", "B14", "B15", "B16", "B17", "B18", "B19", "B20",
    "B21", "B22", "B23", "B24", "B25", "B26", "B27", "B28", "B29", "B30", "B31"
  ),
  Sure = c(
    1.1, 2.9, 1.5, 2.7, 7.0, 1.6, 7.0, 1.2, 2.4, 4.4,
    2.8, 0.7, 5.3, 4.6, 5.8, 5.1, 3.2, 9.8, 6.2, 10.5,
    2.5, 2.9, 15.4, 4.0, 3.2, 4.8, 2.5, 6.0, 3.8, 5.5, 6.3
```

```
  ),
  Oncul_Gorevler = c(
    "B5, B6", "B1", "B2", "B3", NA, "B9", "B6", "B7", NA, "B7, B8",
    "B10", "B10", "B12", "B13", "B13", "B14, B15", "B11", "B16", "B18", "B19",
    "B13", "B21", "B22, B17", "B23", "B24", "B4, B25", "B26", "B27", "B28", "B29",
"B30"
  )
)

# --- 2. Uretim Parametreleri ---
mevcut_uretim_suresi <- 600
gunluk_talep <- 16

# --- 3. Temel Metriklerin Hesaplanmasi ---
toplam_gorev_suresi <- sum(hat_verisi$Sure)
cevrim_suresi <- mevcut_uretim_suresi / gunluk_talep
teorik_min_istasyon <- ceiling(toplam_gorev_suresi / cevrim_suresi)
cat("--- Temel Hesaplamalar ---\n")
cat("Toplam Gorev Suresi (N#t):", toplam_gorev_suresi, "dakika\n")
cat("Cevrim Suresi (C):", cevrim_suresi, "dakika/birim\n")
cat("Teorik Minimum Istasyon Sayisi (N_min):", teorik_min_istasyon, "istasyon\n\n")

# --- 4. Gorev Atamasi (En Uzun Gorev Suresi - LTT ataması) ---
# Oncul iliskilerini bir cizge (graph) yapisina donusturuyoruz.
edge_list <- data.frame(from = character(), to = character())
for (i in 1:nrow(hat_verisi)) {
  if (!is.na(hat_verisi$Oncul_Gorevler[i])) {
    predecessors <- unlist(strsplit(hat_verisi$Oncul_Gorevler[i], ",\\s*"))
    for (p in predecessors) {
      edge_list <- rbind(edge_list, data.frame(from = p, to = hat_verisi$Gorev[i]))
    }
  }
}
g <- graph_from_data_frame(edge_list, directed = TRUE, vertices =
hat_verisi$Gorev)
```

```
atanmamis_gorevler <- hat_verisi$Gorev
istasyonlar <- list()
istasyon_no <- 1

# === DIS DONGU ===
# Bu dongu, atanmamis hicbir gorev kalmayana kadar doner. Her donus bir istasyon olusturur.
while (length(atanmamis_gorevler) > 0) {
  mevcut_istasyon_suresi <- 0
  mevcut_istasyon_gorevleri <- c()
  adaylar_bulundu <- TRUE

  # === IC DONGU ===
  # Bu dongu, mevcut istasyona eklenebilecek baska uygun gorev kalmayana kadar doner.
  while (adaylar_bulundu) {
    # ADIM A: Atanabilir Gorevleri Bul (Oncul Kontrolu)
    # Oncul kontrolu yapilirken, sadece onceki istasyonlara degil,
    # mevcut istasyonun ICINE o an atanmis gorevlere de bakilmasi gerekir.
    # Bu yuzden tum atanmis gorevleri tek bir gecici listede birlestiriyoruz.
    tum_atanmis_gorevler <- c(unlist(sapply(istasyonlar, `[[`, "gorevler")), mevcut_istasyon_gorevleri)
    # Henuz atanmamis gorevler listesindeki her bir gorev icin oncul sartini kontrol et.
    sapply_sonucu <- sapply(atanmamis_gorevler, function(task) {
      # 'neighbors' fonksiyonu ile gorevin onculerini (kendisine gelen oklar) bul.
      preds <- neighbors(g, task, mode = "in")$name
      # 'all' fonksiyonu ile bu onculerin hepsinin 'tum_atanmis_gorevler' listesinde olup olmadigini kontrol et.
      all(preds %in% tum_atanmis_gorevler)
    })
    sapply_sonucu_vektor <- unlist(sapply_sonucu)
    # Sadece oncul sarti saglanan (degeri TRUE olan) gorevleri sec.
    atanabilir_gorevler <- names(sapply_sonucu_vektor[sapply_sonucu_vektor])
    # Eger oncul sarti saglanan hic gorev yoksa, bu istasyona baska gorev eklenemez. Ic donguyu kir.
    if (length(atanabilir_gorevler) == 0) {
```

```
            adaylar_bulundu <- FALSE
            next
          }
          # ADIM B: Istasyona Sigan Gorevleri Filtrele
          # Atanabilir gorevler arasindan, suresi istasyonun kalan suresine siganlari sec.
          uygun_gorevler_df <- hat_verisi[hat_verisi$Gorev %in% atanabilir_gorevler, ]
          uygun_gorevler_df <- uygun_gorevler_df[uygun_gorevler_df$Sure <= (cevrim_suresi - mevcut_istasyon_suresi), ]
          # Eger istasyona sigan hicbir gorev yoksa, bu istasyon dolmus demektir. Ic donguyu kir.
          if (nrow(uygun_gorevler_df) == 0) {
            adaylar_bulundu <- FALSE
            next
          }
          # ADIM C: En Uzun Gorevi Sec (LTT Kurali)
          # Istasyona sigan gorevler arasindan en uzun sureye sahip olani 'which.max' ile bul.
          en_uzun_gorev <- uygun_gorevler_df[which.max(uygun_gorevler_df$Sure), "Gorev"]
          # ADIM D: Gorevi Ata
          # Secilen gorevi mevcut istasyonun gorev listesine ekle.
          mevcut_istasyon_gorevleri <- c(mevcut_istasyon_gorevleri, en_uzun_gorev)
          # Istasyonun toplam suresini guncelle.
          mevcut_istasyon_suresi <- mevcut_istasyon_suresi + hat_verisi$Sure[hat_verisi$Gorev == en_uzun_gorev]
          # Atanan gorevi, genel 'atanmamis_gorevler' listesinden cikar.
          atanmamis_gorevler <- atanmamis_gorevler[atanmamis_gorevler != en_uzun_gorev]
        }
        # Doldurulan istasyonu, ana 'istasyonlar' listesine ekle.
        istasyonlar[[istasyon_no]] <- list(
          gorevler = mevcut_istasyon_gorevleri,
          toplam_sure = mevcut_istasyon_suresi
        )
        # Bir sonraki istasyon icin sayaci bir artir.
        istasyon_no <- istasyon_no + 1
```

```
}

# --- 5. Sonuclarin Sunulmasi ---
cat("--- Istasyonlara Gorev Atamasi Sonuclari ---\n")
for (i in 1:length(istasyonlar)) {
  cat(sprintf("Istasyon %d:\n", i))
  cat("  Atanan Gorevler:", paste(istasyonlar[[i]]$gorevler, collapse = ", "), "\n")
  cat(sprintf("  Istasyon Suresi: %.1f dakika\n", istasyonlar[[i]]$toplam_sure))
  cat(sprintf("  Bos Zaman: %.1f dakika\n\n", cevrim_suresi - istasyonlar[[i]]$toplam_sure))
}

# --- 6. Verimlilik Degerlendirmesi ---
gerceklesen_istasyon_sayisi <- length(istasyonlar)
hat_verimliligi <- (toplam_gorev_suresi / (gerceklesen_istasyon_sayisi * cevrim_suresi)) * 100
denge_gecikmesi <- 100 - hat_verimliligi

cat("--- Sonuc ve Verimlilik Degerlendirmesi ---\n")
cat("Gerceklesen Istasyon Sayisi:", gerceklesen_istasyon_sayisi, "\n")
cat(sprintf("Hat Verimliligi: %.2f%%\n", hat_verimliligi))
cat(sprintf("Denge Gecikmesi: %.2f%%\n", denge_gecikmesi))

# --- 7. GORSELLESTIRME: ONCELIK DIYAGRAMI ---
cat("\n--- Oncelik Diyagrami Ciziliyor... ---\n")
renk_paleti <- rainbow(length(istasyonlar))
gorev_renkleri <- rep(NA, length(V(g)))
names(gorev_renkleri) <- V(g)$name
for (i in 1:length(istasyonlar)) {
  istasyondaki_gorevler <- istasyonlar[[i]]$gorevler
  gorev_renkleri[istasyondaki_gorevler] <- renk_paleti[i]
}
plot(g,
  vertex.color = gorev_renkleri,
  vertex.label.color = "black",
```

```
  vertex.size = 22,
  edge.arrow.size = 0.8,
  edge.width = 1.5,
  main = "Istasyonlara Gore Renklendirilmis Oncelik Diyagrami"
)
legend("topleft",
  legend = paste("Istasyon", 1:length(istasyonlar)),
  fill = renk_paleti,
  bty = "n",
  cex = 0.8
)
# --- 8. GORSELLESTIRME: ONCELIK DIYAGRAMI
```