

# TEKNİK BALANS FİRMASINDA ÜRETİM HATTI TASARIMI VE DİNAMİK KONTROLÜ

Ayşe DOĞAN, Ayşe Melis GÖKKAN, Ceren YENİ\*, Aslıgül BÖRÜHAN, Yazgül YURĞUN, Murat FADİLOĞLU, Sinem ÖZKAN

Yaşar Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, İzmir

dgnayse5@gmail.com, meliisgokkan@gmail.com, cerenyeni@gmail.com, asligulboruhan@gmail.com, yazgul2107@gmail.com, murat.fadiloglu@yasar.edu.tr, sinem.ozkan@yasar.edu.tr

Geliş Tarihi: 24.10.2016; Kabul Ediliş Tarihi: 21.12.2016

## ÖZ

Bu çalışmanın amacı, artan müşteri talebini karşılayabilmek için dört farklı balans makinası modelini üretebilecek bir hat tasarımı yapmaktır. Bu doğrultuda, firmadaki işleyiş ile üretim sürecinin tam olarak anlaşılabilmesi amacıyla gözlem ve analizler yapılmış, üretim hattında bulunacak olan ürünlerin operasyon tanımı ve işlem süreleri için ayrıntılı bir zaman etüdü çalışması gerçekleştirilmiştir. Ardından, hattın bulunacağı bölgenin belirlenebilmesi için operasyon ilişkilerine bakılarak oluşturulan yerleşim planı firmaya onaylatılmıştır. Daha sonra da istasyon sayısının belirlenmesi ve hattın dengelenmesi için tüm modellerin operasyonlarının, belirlenen istasyon sayısına göre atanmasını sağlayacak olan matematiksel modeller oluşturulmuştur. Öncelikle, problemin çözümüne yönelik sezgisel bir yöntem geliştirilmiş ve optimizasyon programı kullanılarak matematiksel modelin çözümleri ile benzerlik gösterdiği ispatlanmıştır. Metodun gerçek hayata uygulanabilirliği simülasyon modeli oluşturularak test edilmiştir. Hattın verimli bir şekilde çalışabilmesi için ise en iyi ürün sıralama yöntemi oluşturulmuştur. Geliştirilen karar destek sistemi sayesinde günlük en iyi üretim planı elde edilerek en kısa sürede en fazla ürün üretilmesi sağlanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Hat dengeleme, karışık model, kapasite artırımı, ürün sıralama

## DESIGN AND DYNAMIC CONTROL OF PRODUCTION LINE AT TEKNİK BALANS COMPANY ABSTRACT

The purpose of the study is designing a production line that can produce four different models of balancing machines to keep with the increasing customer demand. To be able to fully understand the company's operational processes, observations and analyses have been made, detailed time study has been performed for operation descriptions and processing times of the products. In order to determine the area where the line will be located, a new layout has been generated by observing relations between consecutive operations and confirmed by the company. For determining the number of stations and balancing the line, mathematical models have been generated. First, the problem was solved by a heuristic method and then optimization software was used to solve the mathematical models optimally and results between two solutions were proved to be similar. Applicability of the method in real life was tested by a simulation model. For the line to function efficiently, best product sequencing is generated. Through a decision support system, best daily production plan was obtained and maximum throughput was reached with the minimum cycle time.

**Keywords:** Line balancing, mixed model, capacity increase, product sequencing

\* İletişim yazarı

36. Yöneylem Araştırması ve Endüstri Mühendisliği Ulusal Kongresi Öğrenci Proje Yarışması'nda ikincilik ödülü kazanan çalışmanın ilgili öğretim üyelerinin katkılarıyla düzenlenmiş halini EM Dergisi yayın politikası doğrultusunda yayımlıyoruz.

## 1. GİRİŞ

Bu çalışma, otomotiv servis ekipmanları ve endüstriyel balans makinaları üreten Teknik Balans Makina ve Sanayi A.Ş. ile birlikte yürütülmüştür. Artan müşteri talebini karşılayabilmek amacıyla dört farklı balans makinası modelini üretebilecek bir hat tasarlanması amaçlanmıştır. Proje başlangıcında firma ile yapılan toplantılar sonucunda, yürütülecek olan projenin firma düzeyinde verimliliğin ve üretimin artmasını sağlayacağı ön görülmüştür. Gerekli incelemeler yapıldıktan ve semptomlar belirlendikten sonra uygun çözüm önerisi için gerekli literatür araştırmaları yapılmıştır. Ancak, araştırmalar sonucunda görülmüştür ki firmanın üretim sistemi ve ihtiyaçları ile birebir eşleşen herhangi bir çalışma bulunmamaktadır. Bunun için proje, karışık modelli seri üretim hatları tasarımında, modeller arasındaki üretim süresi varyasyonuna çözüm olarak ara stok tutmayı önermesi açısından öncül niteliktedir. Projenin başarıyla hayata geçirilmesi için izlenen adımlar şu şekildedir; firmadaki işleyiş ile üretim sürecinin tam olarak anlaşılabilmesi amacıyla gözlem ve analizler yapılmış, hatta bulunacak olan ürünlerin operasyon tanımı ve işlem süreleri için ayrıntılı bir zaman etüdü çalışması gerçekleştirilmiştir. Ardından, hattın bulunacağı bölgenin belirlenebilmesi için operasyon ilişkilerine bakılarak oluşturulan yerleşim planı firmaya onaylatılmıştır. Çalışmalar sırasında üretimde belirgin verimsizlik ve kapasite sorunları görülmüştür. Ayrıntılı bir literatür araştırmasının ardından öncelikle, üretim hattının kurulması için istasyon sayısının belirlenmesi gerektiği sonucuna ulaşılmıştır. İkinci aşamada ise hattın dengelenmesi için tüm modellerin operasyonlarının, belirlenen istasyon sayısına göre atanması gerekmektedir. İşlerin dengeli bir şekilde atanması için Kilbridge-Wester Algoritması ve son atama ayarlarını yapmak için LINGO optimizasyon programı kullanılmıştır. Bu sonuçlara göre, hattın fiziksel ve ergonomik tasarımı yapıp firma tarafından onaylandıktan sonra mekaniği ve otomasyonu için çalışmalara başlanmıştır. Tasarlanan yapının uygulanabilirliğini test etmek için Arena Simülasyon Programı kullanılmış ve önerilen tasarımla istenilen kapasiteye erişilebileceği sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca simülasyon programında geliştirilen model yardımıyla farklı ürün sıralama politikaları deneyerek, en fazla ürünü en kısa sürede üretebilecek ve işçi kapasitesinden en iyi şekilde

yararlanılmasını sağlayacak politika seçilmiştir. Daha sonra, her istasyon ve her model için özel olarak Standard İş Tanımı Formları hazırlanmıştır. Çözümün etkin bir biçimde uygulanabilmesi için şirketin istekleri ile hattın çalışma biçimine uygun Microsoft Excel tabanlı bir Karar Destek Sistemi geliştirilmiştir. Karar Destek Sistemi firmaya günlük planı en uygun şekilde yapma ve takip etme imkânı sağlamıştır.

## 2. GENEL SİSTEM ANALİZİ

1978 yılında İzmir’de kurulan Teknik Balans Makina Sanayi A.Ş. otomotiv servis ekipmanları ve endüstriyel balans makinaları üretmektedir. Firma bünyesinde, imalat ve montaj, bilgisayar yazılımı, araştırma-geliştirme, kalite güvence, satış ve pazarlama ve ihracat olmak üzere altı adet bölüm barındırmaktadır. Şirketin genel işleyişi şu şekildedir; pazarlama uzmanı ürünlerin satışını gerçekleştirir, daha sonra bu satış şirketin sistemine düşer ve finans departmanı müşterinin meşruluğunu kontrol eder. Daha sonra talep, üretim planlama departmanına gönderilir. Burada hazırlanan üretim planına göre üretilen ürünün müşteriye sevkiyatı yapılır. Teknik Balans, kuruluşundan günümüze kadar sürekli gelişip büyüme ve ürün yelpazesini geliştirmektedir. Otomotiv servis ve garaj ekipmanları konusunda dünyaca bilinen Amerikan markası John Bean’ın altı yıldır Türkiye ve bazı Türkiye ülkelerindeki tek distribütörüdür. Aynı zamanda ünlü bir İtalyan markası olan Space’in de 12 yıldır Türkiye temsilcisidir. Yakın zamanda uluslararası pazarda da faaliyet göstermeye başlayan firma, ürünlerini 35 farklı ülkeye ihraç etmektedir.

## 3. PROBLEMİN BELİRLENMESİ

Firma genelindeki problemin belirlenmesi için mevcut durumdaki sistemin detaylı analizi yapılarak semptomlar belirlenmiştir.

### 3.1 Mevcut Sistem Analizi

Mevcut sistemde fabrikada hiçbir üretim hattı bulunmamaktadır. Tüm işlemler birbirlerine uzak belirli bölgelerde manuel olarak gerçekleştirilmektedir. Üretim planı, çalışanların tecrübelerine dayanılarak herhangi bir matematiksel yöntem kullanılmadan gerçekleştirilmektedir. Verimsiz bir şekilde oluşan üretim planından

dolayı gelen müşteri taleplerini karşılamakta gecikmeler olmakta, hatta bazen karşılanamamakta ve bu da müşteri kayıplarına sebep olmaktadır.

### 3.2 Sistemde Gözlenen Semptomlar

Yapılan gözlemler sonucunda fabrikada üretkenliğin azalmasına neden olacak birçok problemin olduğu tespit edilmiştir. Aşağıdaki semptomlar ise ana nedenler olarak kabul edilmiştir.

#### 3.2.1 Yerleşim Planı Problemleri

Makinelerin ve donanımların konumu açısından tesisin düzeni zayıf tasarlanmıştır. Birbirini takip eden iki operasyon arası uzaklık fazladır. Bu nedenle, ürün taşıma süresi gerekenden daha yüksektir. Bu durum göz önüne alındığında, yerleşim planı tüm operasyonları ve ürünün akışını etkilemektedir. Uygun yerleşim planının olması bu nedenle önem taşımaktadır.

#### 3.2.2 Çalışma Alanının Karışıklığı

Fabrikadaki çalışma alanlarının sağlıklı bir ortam olarak görülmesi zordur. Bitmiş ürünleri depolamak için yeterli depo alanı yoktur. Çalışma alanları çok kalabalık ve düzensizdir. Dolaplar ve raflar çok dağınık olduğu için operasyonlarda kullanılacak malzemelerin aranması çok vakit kaybına sebep olmaktadır.

#### 3.2.3 Malzeme Taşıma Ekipmanları Eksikliği

Yeterli malzeme taşıma ekipmanları olmadığından, çalışanlar çoğu zaman ürünleri hareket ettirmek ve taşımak için kas güçlerini kullanmaktadır. Bu sorun iki önemli şekilde kendini göstermektedir. Ürünü sürüklemek hem ürünlere zarar verebilir hem de çalışanların kaslarına onarılamayacak zararlar verebilir. Bu durum çalışanları ve şirketi zor duruma sokmaktadır.

#### 3.2.4 Çalışanlara Bağlı Problemler

Önceki operasyonlarda işçiler tarafından yapılan hatalardan dolayı, bundan sonraki işlemler problemin belirlenip çözülmesine ve yanlış kısımlar düzeltilene kadar geçen sürede gecikmiş olacaktır. Ayrıca operasyonlar arası dengenin olmadığı düşünüldüğünde, bu durum bazı çalışanların boşta kalmasına ve boş zamanlarını verimsiz geçirmelerine neden olmaktadır.

### 3.3 Problem Tanımı

Teknik Balans, artmakta olan müşteri talebini kapasite problemlerinden dolayı zamanında karşılayamamaktadır. Özellikle, fabrikada üretilen ve dört modeli olan sabit balans makinaları yüksek talebe sahiptir. Gizlilik açısından modeller Model 1, Model 2, Model 3, Model 4 şeklinde adlandırılacaktır. Bu modellerin operasyon detayları çok fazla, üretilme süreleri uzun ve süreler arasındaki varyasyon çok fazladır. Ayrıca fabrikadaki üretim alanı çok düzensiz olduğundan ve stok tutulmadığından ürünlerin siparişlerinde gecikmeler olmaktadır. Bu gecikmeler de müşteri kayıplarına neden olmaktadır. Bu problemleri çözmek amacıyla, bir üretim hattı tasarımı yapılması kararlaştırılmıştır. Bu karar doğrultusunda firmadaki işleyiş ile üretim sürecinin tam olarak anlaşılabilmesi için tedarikçiden hammaddenin gelmesiyle başlayan üretim aşamaları teker teker analiz edilmiştir. Hattın verimli çalışması için dikkat edilmesi gereken hat dengeleme probleminde amaç; işçilerin boş zamanını azaltmak, çevrim zamanını ve iş istasyonlarını en aza indirmek, düzenli materyal akışını sağlamak, insan gücü ve makine kapasitesinin maksimum düzeyde kullanılmasını sağlamak ve üretim maliyetini düşürmektir. Hat dengeleme probleminin yanı sıra oluşan bir diğer problem ise ürünlerin üretim hattına giriş sırasıdır. Sıralama problemlerinde amaç; ürün geçişleri arasında süre varyasyonundan doğacak etkiyi en aza indirmek ve sıralamayı en kısa sürede en fazla ürün üretilen şekilde yapmaktır.

## 4. LİTERATÜR TARAMASI

Montaj hatları günümüzdeki anlamıyla literatürde ilk kez 1913 yılında Ford Motor Fabrikaları'nda kullanılmıştır. Gelişen endüstri ve üretim miktarının artmasıyla beraber montaj hatlarının dengelenmesi problemi ortaya çıkmıştır. İlk çalışmalar tek ürünli montaj hattı dengeleme problemi üzerine yoğunlaşmıştır. Tüketicilerin tercih ve beklentilerindeki değişime bağlı olarak üretilen ürünlerin çeşidinin artması ile birlikte, bir ürünün değişik modelleri veya üretim süreçleri benzerlikler gösteren farklı ürünlerin aynı montaj hatlarında üretimini sağlayabilen daha esnek üretim sistemleri de kullanılmaya başlanmıştır. Böylece, tek ürünli hatların yerini karma modellenli üretim hatları almış ve bu hatlarla ilgili denge-

leme problemleri üzerinde çalışmalar başlamıştır. Karma model montaj hattı dengeleme problemleri ile öncelikle, verilen çevrim süresinde iş istasyonu sayısının en küçüklenmesi ve daha sonra ise iş istasyonları arasındaki iş yükünün dengelenmesi hedeflenmiştir (Mendes ve arkadaşları, 2005). Bu amaçla, işlerin montaj hattına yerleştirilmesi, hattın dengesi ve işlerin sıralanmasına dayalı hat dengeleme yaklaşımları geliştirilmiştir.

Montaj Hattı Dengeleme; atıl zamanlarını en küçüklemek için, birbirini izleyen görevlerin çeşitli teknikler kullanılarak mümkün olduğunca eşit zamanlı iş istasyonları şeklinde gruplandırılmasıdır. Bu sistemde kullanılan bazı tanımlar şu şekildedir:

- *İş İstasyonu:* Montaj hattı üzerinde verilen bir işin, işçi ya da işçiler tarafından yapıldığı alandır.
- *İş İstasyonu Süresi:* Bir iş istasyonunda tamamlanması gerekli olan iş öğelerinin standart süreleri toplamıdır.
- *Toplam İş Süresi:* Montaj hattı üzerinde üretilecek bir ürünün montajı için gerekli olan süre veya işi oluşturan tüm iş öğelerinin standart süreleri toplamıdır.
- *Çevrim Süresi:* Montaj hattında, ürünün bir istasyonda kalabileceği en büyük süre veya bir iş istasyonundaki işçinin o istasyonda yapılması gerekli işleri tamamlaması için gerekli süredir.

## 4. PROBLEM FORMÜLASYONU

### 4.1 Kısıtlar ve Varsayımlar

Problemin çözümü için oluşturulan montaj hattı dengeleme matematiksel modellerinde üç temel kısıt vardır:

- Her iş tam olarak 1 istasyona atanmalıdır.
- İşlerin arasındaki öncelik ilişkileri sağlanmalıdır.
- Hiçbir istasyonun çevrim zamanı, model için belirlenen çevrim zamanını aşmamalıdır.

Modeller oluşturulurken kabul edilen varsayımlar şu şekildedir:

- Operasyonların süreleri deterministiktir.
- İlk istasyon hiçbir zaman aç kalmamaktadır, sonsuz kaynak vardır.

### 4.2 Matematiksel Model

Bu bölümde, kurulacak olan hattın istasyon sayı-

sının belirlenmesi için ve hattın dengelenmesi için iki tane matematiksel model oluşturulmuştur (Bricker ve Juang, 1993).

Oluşturulan modellerden ilki, Tip 1 Montaj Hattı Dengeleme Problemini temsil etmektedir ve istasyon sayısının en küçüklenmesi amaçlanmıştır. İkinci model ise Tip 2 Montaj Hattı Dengeleme Problemini temsil etmektedir ve her model için çevrim zamanının en küçüklenmesi amaçlanmıştır.

#### Parametreler:

$N$  = Problemdaki işlerin toplam sayısı

$S$  = Toplam istasyon sayısı

$PR_k$  =  $k$  işinin öncülleri olan işlerin kümesi  $k=1, \dots, N$

$D_k$  =  $k$  işinin performans süresi,  $k=1, \dots, N$

#### Karar Değişkenleri:

$V_{ks} = 1$  eğer  $k$  işi istasyonlara atandıysa 0, aksi halde

$A_s = 1$  eğer  $s$  istasyonu kullanılıyorsa 0, aksi halde

#### Amaç Fonksiyonu:

$$\text{Min } \sum_{s=1}^S A_s \quad (1)$$

#### Kısıtlar:

$$\sum_{s=1}^S V_{ks} = 1; \forall k = 1, \dots, N \quad (2)$$

$$\sum_{s=1}^S s \cdot V_{ls} \leq \sum_{s=1}^S s \cdot V_{ks}; \forall k = 1, \dots, N \text{ ve } l \in PR_k \quad (3)$$

$$\sum_{k=1}^N D_k \cdot V_{ks} \leq A_s \cdot \text{ÇevrimSüresi}; \forall s = 1, \dots, S \quad (4)$$

$$V_{ks} \in \{0,1\}; A_s \in \{0,1\}$$

Yukarıda gösterilen modelde Tip 1 problemi ele alınmış, çevrim süresi verilerek (1) numaralı amaç fonksiyonu ile istasyon sayısı en küçüklenmiştir. Model, ikili değişkene sahiptir ve değerleri (5) numaralı kısıtla sağlanmıştır.  $V_{ks}$ ; eğer  $k$  işi  $s$  istasyonuna atanıyorsa bir, diğer durumlarda sıfıra eşittir. Diğer değişken olan  $A_s$ ; eğer  $s$  istasyonu kullanılıyorsa bir, diğer durumlarda sıfıra eşittir. Modelde üç temel kısıt vardır. İlk kısıt, (2) numaralı atama kısıtı olmak üzere, her işin tam olarak bir istasyona atanması gerektiğini temsil eder. İkinci kısıt, (3) numaralı öncelik kısıtı olmak üzere, işlerin arasındaki öncelik ilişkilerinin sağlanması gerektiğini belirtmektedir. Üçüncü kısıt, (4) numaralı çevrim zamanı kısıtı olmak üzere, her istasyonun toplam çevrim

zamanının model için belirlenen çevrim zamanı aşamayacağını belirtir.

#### Parametreler:

$N$  = Problemdaki işlerin toplam sayısı

$S$  = Toplam istasyon sayısı

$P_{Rk} = k$  işinin öncülleri olan işlerin kümesi  $k=1, \dots, N$

$D_k = k$  işinin performans süresi,  $k=1, \dots, N$

#### Karar Değişkenleri:

$V_{ks} = 1$  eğer  $k$  işi istasyonlara atandı ise; 0 aksi halde

#### Amaç Fonksiyonu:

Min Çevrim Süresi (1)

#### Kısıtlar:

$$\sum_{s=1}^S V_{ks} = 1 \quad \forall k = 1, \dots, N \quad (2)$$

$$\sum_{s=1}^S s \cdot V_{ls} \leq \sum_{s=1}^S s \cdot V_{ks} \quad \forall k = 1, \dots, N \text{ ve } l \in PR_k \quad (3)$$

$$\sum_{k=1}^N D_k \cdot V_{ks} \leq \text{Çevrim Süresi} \quad \forall s = 1, \dots, S \quad (4)$$

$$V_{ks} \in \{0,1\} \quad (5)$$

Yukarıda gösterilen modelde ise Tip 2 problemi ele alınmış, istasyon sayısı verilerek çevrim süresi en küçüklenmiştir. İkinci modeldeki kısıtlar ilki ile aynı prensiplere sahiptir. Sadece (1) numaralı amaç fonksiyonu ve (4) numaralı çevrim zamanı kısıtında farklılıklar bulunmaktadır. (4) numaralı kısıtta istasyon sayısı sisteme parametre olarak verildiği için ikili değişken ile çevrim zamanı çarpılmamıştır.

## 5. PROBLEMİN ÇÖZÜMÜ VE KULLANILAN YÖNTEMLER

### 5.1 Sezgisel Yöntem

Üretim hattı dengeleme problemlerinin karmaşık ve çözüm uzaylarının büyük oluşu, bu tür problemlerin çözümünde sezgisel tekniklerin diğer tekniklere göre daha fazla kullanılmasına neden olmuştur. Üretim hattını kurabilmek için hem istasyon sayısını hem de kullanılacak dört farklı ürün için çevrim zamanını tespit etmek amacıyla iki aşamalı sezgisel metod kullanılmıştır.

**Birinci Aşama:** İstasyon sayısını belirlemek amacıyla fabrika ile yapılan çeşitli görüşmeler sonucunda, sipariş miktarlarına bağlı olarak en hızlı ürün olan Model

1'den günde 14 adet üretilmesi gerektiğine karar verilmiştir. Fabrikada çalışma süresi sekiz saattir. Ayrıca, iki mola ve öğle yemeğinin toplamda bir saat olduğu hesaplanmıştır. Toplam çalışma süresinden bu bir saatlik kayıp çıkarılınca, kullanılabilir çalışma saati yedi saat olarak bulunmuştur. Bu süre, istenen hedef olan 14'e bölününce, bir ürünün üretilmesi için gereken süre, yani takt zamanı  $7/14 = 0.5$  saat bulunmaktadır. Bu sonuca göre, her 30 dakikada bir ürün üretilmelidir. İstasyon sayısı en hızlı ürün olan Model 1'e göre belirlendiğinden, yapılan zaman etütleri sonucunda, bu ürünün toplam süresi 134 dakika olarak hesaplanmış ve 30 dakikaya bölündükten sonra istasyon sayısı beş olarak bulunmuştur.

**İkinci Aşama:** İstasyon sayısı belirlendikten sonra, hattaki diğer ürünler için de çevrim zamanı hesaplanmıştır. Bu hesaplama yapılırken bütün ürünler için toplam üretim süresi, istasyon sayısı olan beşe bölünmüştür. Daha sonra, her ürün için operasyonların istasyonlara atanması aşamasına geçilmiştir (Das ve arkadaşları 2013). Bunu yapabilmek için Kilbridge–Wester Algoritması kullanılmıştır (Kilbridge ve Wester, 1961). Bu algoritmaya göre, yapılan bütün işler öncelik sıraları göz önüne alınarak düzenlenmiş ve her istasyon çevrim zamanına ulaşana kadar atamalar yapılmıştır. İşlerin süresi çevrim zamanını aştığında diğer istasyona geçilmiştir. Ayrıca, tüm bu atamalar yapılırken, işler ön tarafta ve arka tarafta yapılabilecek işler olmak üzere gruplandırılmış ve çalışanlar ona göre hatta konumlandırılmıştır.

### 5.2 Matematiksel Programlama Yöntemi

Kullanılan sezgisel yöntemi doğrulamak ve optimal bir sonuca ulaşabilmek için LINGO optimizasyon programı kullanılmıştır. 4.2 Matematiksel Model kısmında belirlenen modellere göre, kısıtlar LINGO optimizasyon diline uygun yazılmış ve program çalıştırılmıştır. Montaj Hattı Dengeleme Problemi Tip 1 için istasyon sayısı en küçüklenmiş ve sonucun kullanılan sezgisel yöntemle aynı olduğu gözlemlenmiştir. Montaj Hattı Dengeleme Problemi Tip 2 için ise çevrim zamanı en küçüklenmiş ve her model için optimal çevrim zamanları bulunmuştur.

LINGO optimizasyon programı kullanılarak elde edilen veriler şu şekildedir: Montaj Hattı Dengeleme Problemi Tip 1 için istasyon sayısı en küçüklenmiş olup istasyon sayısı beş bulunmuştur. Montaj Hattı Dengeleme Problemi Tip 2 için çevrim zamanı en küçüklenmiş

ve Model 1 için 23,75 dakika, Model 2 için 25,64 dakika, Model 3 için 31,65 dakika ve son olarak da en uzun süreli ürün olan Model 4 için 41,77 dakika bulunmuştur. Bulunan optimal sonuçlar kullanılan sezgisel yöntem ile oldukça benzerdir.

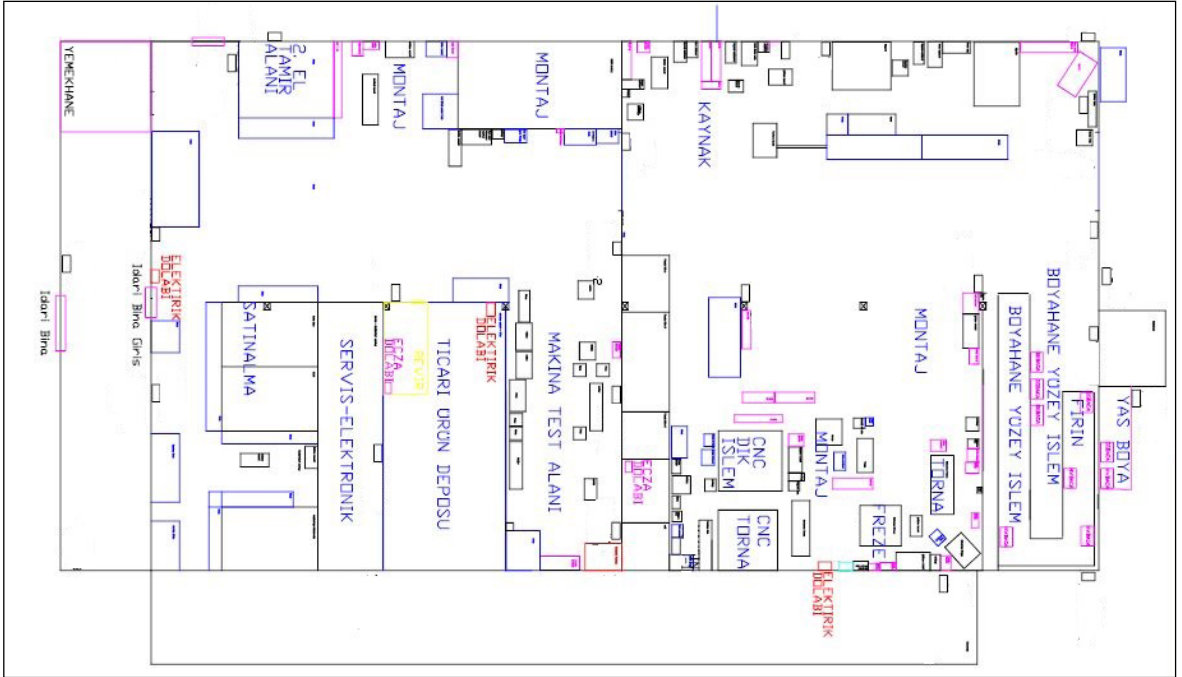
### 5.3 Modeller Arası Varyasyon Etkisinin Azaltılması

Her model için detaylı zaman etüdü çalışması yapıldıktan ve LINGO optimizasyon programı yardımıyla optimal çevrim zamanları elde edildikten sonra, üretim hattında çalışan işçiler %100 verimle çalışmayacağından, firmayla görüşülüp işçilere verilecek tolerans payı belirlenmiş ve buna bağlı olarak her ürünün çevrim süresi bu tolerans payı eklenerek hesaplanmıştır. Bu süreler; Model 1 için 27 dakika, Model 2 için 28 dakika, Model 3 için 35 dakika ve Model 4 için 46 dakikadır. Çevrim sürelerine bakıldığında, en uzun süreli ürün ile en kısa süreli ürün arasında neredeyse iki kat fark olduğu görülmektedir. Üretimin herhangi bir aşamasında bu iki model arka arkaya geldiğinde, istasyonlar arasında aç kalma veya tıkama durumlarının oluşacağı ön görülebilmektedir. Bu durumda oluşacak zararı azaltmak ve üretimin devamlılığını sağlayabilmek için belirli istasyonlardan sonra ara stok tutma çözümü ortaya atılmıştır. Hatta

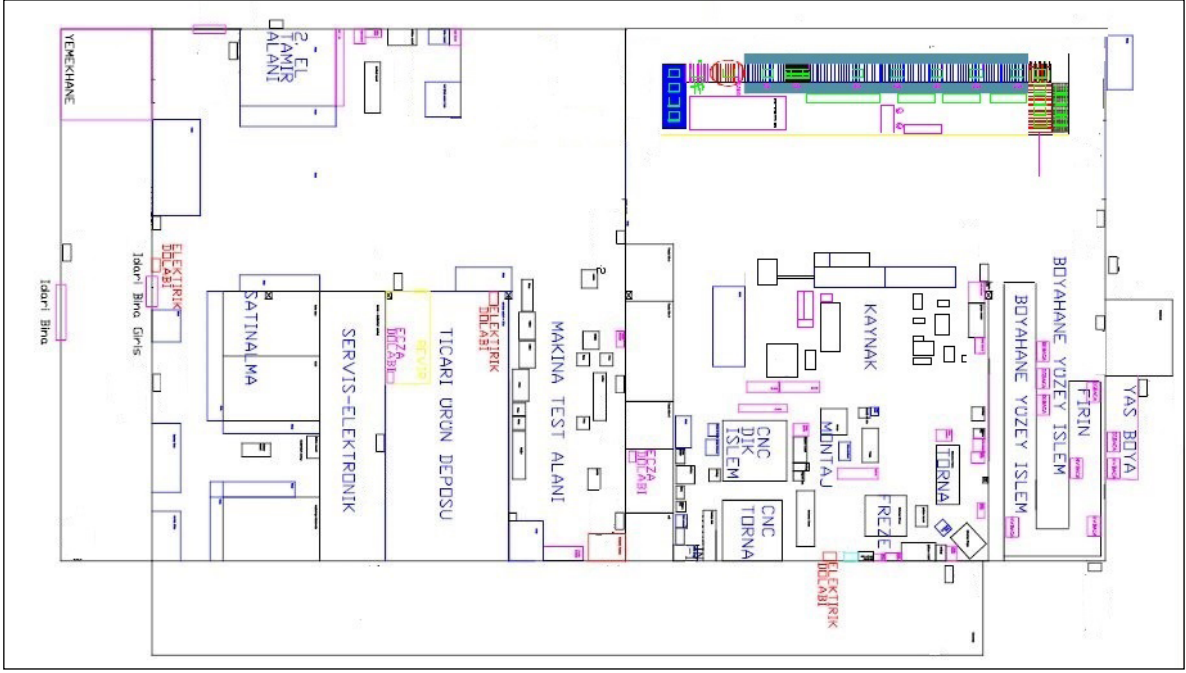
bulunacak olan beş istasyondan 2 ve 4. istasyonlardan sonra her biri iki ürün kapasiteli iki tane ara stok alanı tasarlanmıştır. En yavaş model ile en hızlı model arasındaki farkın neredeyse iki kat olmasından dolayı, belirlenen ara stokların kapasitesinin iki olması kararı daha sonra Arena simülasyon programı ile doğrulanmıştır. Bu ara stokun kullanımının anlatılabilmesi için örnek bir senaryo geliştirilmiştir. Senaryo şu şekildedir: 2. istasyondaki işçinin en uzun süreli ürün olan Model 4 ile; 3 ve 4. istasyondaki işçilerin ise en hızlı ürün olan Model 1 ile çalıştığını düşünelim. Model 1'in çevrim zamanı 27 dakika olduğundan, 3 ve 4. istasyonlar işlerini bitirecek ve hat hareket edecektir. Ancak Model 4'ün çevrim süresi 46 olduğundan, o modeldeki işin tamamlanması daha uzun süreceğinden işçiler ara stoktaki modelleri kullanacaktır. Böylece, olası bir açlık durumunun önüne geçilmiş olacak ve üretimin akışı sağlanmış olacaktır.

## 6. YENİ YERLEŞİM PLANININ OLUŞTURULMASI

Mevcut sistemdeki yerleşim planı ürün akışı açısından verimsiz durumdadır ve zaman kayıplarının yaşanmasına sebep olmaktadır. Şekil 1'de görülen teknik çizim firmanın mevcut yerleşim planını göstermektedir.



Şekil 1. Mevcut Sistemdeki Yerleşim Planı



Şekil 2. Yeni Yerleşim Planı

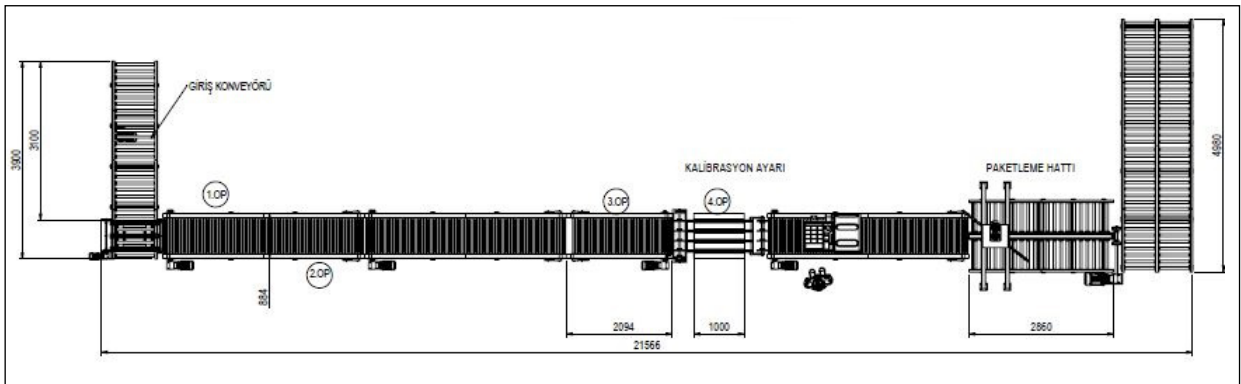
Sabit balans makinalarının sırasıyla beş aşaması olan kaynak, boyama, ön montaj, sabit montaj ve paketlenme işlemleri görüldüğü üzere birbirlerinden çok uzak mesafede bulunmaktadır ve işlem sıraları göz önünde bulundurulduğunda çok verimsiz bir dağılıma sahiptirler.

Mevcut sistemdeki verimsizliğin yok edilmesi, akışın yeniden düzenlenmesi ve kurulacak hattın yerinin belirlenmesi için yeni yerleşim planı oluşturulmuştur. Yeni yerleşim planı oluşturulurken işlemlerin sırası, bölümlerin birbiriyle ilişkileri göz önünde bulundurulmuştur. Hazırlanan ve firma tarafından onaylanan yerleşim planı

Şekil 2’de görülmektedir. Yeni planda kaynak işlemi tamamlanan ürün, boyama için hemen yanında bulunan alana ve daha sonra karşıdaki üretim hattına girer. Geriye kalan tüm işlemler sırasıyla hat üzerinde tamamlanır. Bu şekilde, yerleşim planı ile ilgili verimsizlikler ortadan kaldırılmış olur.

## 7. HAT TASARIMI

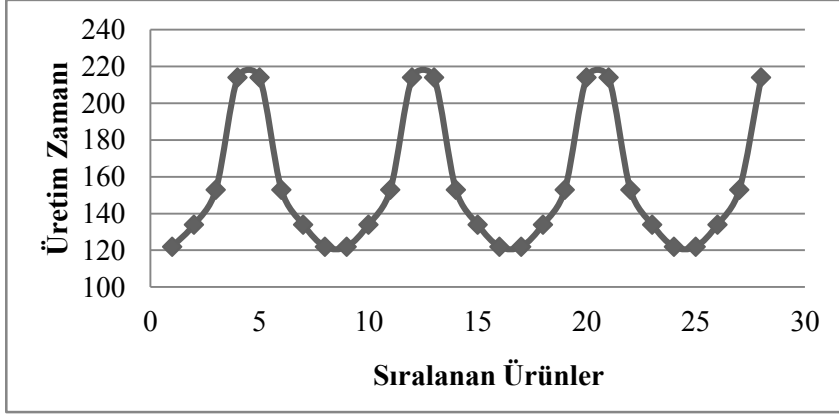
Elde edilen verilere ve bulunan sonuçlara göre tasarlanan üretim hattı Şekil 3’te görüldüğü gibidir. Üretim hattında beş işçi bulunmaktadır ve her işçiye bir



Şekil 3. Sabit Balans Makinası Üretim Hattı







Şekil 5. Üretim Zamanına Göre Model Sıralama Düzeni

bekleme sürelerini en aza indirmektedir. Belirlenen sıralama metodunun Arena simülasyon modelinde uygulanabilmesi için bir algoritma geliştirilerek iki boyutlu durum değişkenleri oluşturulması sağlanmıştır. Durum değişkenlerinin birinci boyutu, yavaşlayan ve hızlanan olmak üzere üretimin akış yönünü kontrol etmektedir. Değişkenin ikinci boyutu ise bir sonraki gün için hatta en son hangi ürünün girdiğini tutmaktadır. Durum değişkenlerinin dinamik olarak kontrolü yapılarak simülasyon modelinin belirtilen düzeni takip etmesi sağlanmıştır.

Modelin üçüncü kısmı ise ürünlerin hatta girişinden tamamlanana kadar geçen tüm işlemleri ele almaktadır ve gerçek zamanlı otomasyon sistemini içermektedir. Hattın tasarımına göre 1 ve 2. istasyonlar ile 3 ve 4. istasyonlar birbirlerine bağlı olduğundan, operasyonunu bitiren işçilerin birbirini beklemesi sağlanmıştır. Ara stok kapasitesinin kontrolü sağlanmış, hattın akışı ona göre düzenlenmiştir. Sırasıyla tüm istasyonlarda işlem gören ürünler müşteriye gönderilmek üzere hazır hale gelmektedir.

Simülasyon modeli, başlangıçta hattın boş ve pasif durumda olmasının etkisini azaltmak için uzun süreli, 100 gün boyunca çalıştırılmıştır. Bu çalışma sonucunda üretilen ürün sayısı 1309 olarak gözlenmiştir. Bu sonuç, günde ortalama 13 tane ürün üretildiğini göstermektedir. Bu ürünlerin modeller arası dağılımı ise gelen taleplere göre değişiklik göstermektedir. Gelen taleplerin %100'ünü Model 1'den gelecek şekilde ayarlayıp, simülasyon modeli çalıştırıldığında ortalama 17 tane Model 1 üretildiği gözlemlenmiştir. Yani, hattın kapasitesi ile

ilk baştaki 14 tane Model 1 hedefine fazlasıyla ulaşıldığı görülmektedir.

Ara stok kapasitesi olan 2 ürünün yeterli olup olmadığını görebilmek amacıyla ara stoklar için farklı kapasitelerle çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmaların sonucunda ara stok kapasitesi artsa dahi çıkan ürün sayısının değişmediği görülmüştür. Böylece, 2 tane ürün kapasiteli ara stokların yeterliliği kanıtlanmıştır. Ara stoklarda bekleyen ortalama ürün sayısına baktığımızda ise tutulan yarı mamul sayısının ve sıralama metodunun varyasyon etkisini gidermekte başarılı olduğu açıkça görülmektedir. Hattın verimliliğinin göstergesi olan başka önemli bir husus ise işçilerin kapasitesinin kullanımınıdır. Çıkan raporlardaki işçi kapasitesi kullanımına bakıldığında sonuçlar şu şekildedir; 1. istasyon için %98, 2. istasyon için %99, 3. istasyon için %98, 4. istasyon için %99 ve 5. istasyon için %87. Bu sonuçlar çözüm metodolojisinin gerçek hayata uygulanabilirliğini desteklemekte ve hattın verimli çalışacağını göstermektedir.

## 9. KARŞILAŞTIRMA VE UYGULUMA: İYİLEŞTİRME VE KARAR DESTEK SİSTEMİ

Mevcut sistemde günlük üretim kapasitesi, ortalama 7 tane karışık modelli ürün üretebilecek durumdadır. Kurulan yeni sistem ise geliştirilen çözüm metodu ve yapılan iyileştirmeler sayesinde ortalama 13 tane karışık modelli ürün üretebilecek kapasiteye sahiptir. Bu sayı, simülasyon modeli ile gerçekleştirilmiştir. Böylece, kurulan yeni sistem sayesinde üretim kapasitesinde %85

**Tablo 1.** Mevcut Sistem ile Geliştirilmiş Sistem Üretim Süreleri

	Mevcut Sistem Üretim Süreleri	Yeni Sistem Üretim Süreleri
<b>Model 1</b>	230 dk.	125 dk.
<b>Model 2</b>	255 dk.	134 dk.
<b>Model 3</b>	296 dk.	153 dk.
<b>Model 4</b>	386 dk.	214 dk.

artış sağlanmış ve bu artış işçi, sayısını arttırmadan elde edilmiştir. Tablo 1’de mevcut sistem ile yeni sistemin üretim süreleri arasındaki iyileştirmeler gösterilmektedir.

Yukarıda belirtilen gelişmeyi ve kapasite artımını başarabilmek için;

- Tüm süreçteki kayıplar (hata ve ürünlerin tekrar işlem görmesi, sırada bekleme, geç teslim, malzeme arama vb.) azaltılmıştır.
- Operasyonlarda çeşitli iyileştirmeler yapılarak süreleri kısaltılmıştır
- Kapasitenin verimli kullanımı arttırılmıştır.
- Yeni yerleşim planı sayesinde daha iyi materyal akışı sağlanmıştır.

- Dinamik bir şekilde kontrol edilen üretim ile en iyi ürün sıralaması yapılmıştır.
- Ara stoklar yardımıyla model geçişlerinde oluşacak vakit kayıplarının etkisi giderilmiştir.

Geliştirilen çözüm metodunun firmaya entegrasyonu ve kullanım kolaylığını sağlamak için fabrikanın ihtiyaçlarına ve üretime uygun olarak bir Karar Destek Sistemi (KDS) geliştirilmiştir. KDS’nin ana amacı en iyi günlük üretim planını oluşturmakla beraber, gün başında girilecek taleplere göre üretim sırası ve her istasyonda her model için yapılacak operasyonları göstermektedir. Üretim planının yapabildiği için ise Arena sonuçları yardımıyla geliştirilen ve durum değişkenlerini kullanan bir algoritma oluşturulmuştur. Şekil 6, taleplerin girildiği kullanıcı arayüzünün ana sayfasını göstermektedir. Ayrıca, KDS haftalık sevkiyat planının oluşturulabilmesi için her gün hattan çıkacak ürünleri ürün stoku başlığı altında göstermektedir. Oluşturulan hata ve çözüm öneri formu sayesinde yapılan hataların analizleri için gerekli verileri toplayarak ve bir veri tabanı oluşturularak verilerin saklanması sağlamaktadır. Gerekli olan esnekliği sisteme vermek amacıyla, yapılan iyileştirmeler sonucunda süresi ve/veya tanımı değişen operasyonları düzenleme seçenekleri bulunmakta ve eklenen yeni operasyonları öncül ilişkilerine göre uygun yerlere yerleştirmektedir.

**Teknik Balans Makine Sanayi ve Ticaret A.Ş.**

	Pazartesi	Salı	Çarşamba	Perşembe	Cuma	Cumartesi
<b>Model 1</b>						
<b>Model 2</b>						
<b>Model 3</b>						
<b>Model 4</b>						
<b>Notlar:</b>						

Operasyonların Ayrıntılarını Gör

Modelde Değişiklik Yap

Hata Raporu Oluştur

Üretim Planını Göster

Ürün Stoğunu Göster

Temizle

**Şekil 6.** Karar Destek Sistemi Kullanıcı Arayüzü Ana Sayfası

## 10. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu projede, Teknik Balans firmasının artan müşteri talebini karşılayabilmesi için, balans makinalarının dört modelini üretebilecek bir hat tasarlanmış ve model sıralamasının en iyi şekilde yapılabilmesi için bir yöntem geliştirilmiştir. Proje ile fabrika genelindeki verimsizliğin nedenleri bulunarak her birinin giderilmesi için çalışmalar yapılmıştır.

Planlanan çözüm yöntemi ışığında hattın ayrıntılı fiziksel tasarımı yapılarak imalatına başlanmıştır. Yeni hat sayesinde üretilen dört ürün modelinin işlem süreleri ve hattın çevrim zamanı en küçüklenmiş, üretim kapasitesi artırılarak teslimatı geciken müşteri sayısı ve karşılanamayan talep en aza indirilmiştir.

Karar destek sistemi ve arkasındaki sıralama algoritması sayesinde günlük üretim planı elde edilerek en kısa sürede en fazla ürün üretilmesi sağlanmıştır. Standart iş formları yardımıyla, operasyonlar ve üretim akışı standartlaştırılarak yalın felsefeye uygun bir akış yaratılmış ve operasyon kaynaklı olası hataların önüne geçilmiştir.

Geliştirilen çözüm yönteminin sadece geleneksel hat tipi değil tüm hat tiplerine uygulanabilir olması ve varyasyonu fazla olan çeşitli ürünleri tek hat üzerinde üretmek isteyen firmalarda uygulanabilirliği açısından büyük önem taşımaktadır. Üretimdeki artış sonrasında doğru pazarlamayla artacak olan kazanç ve çevrim süresinin kısılması sayesinde azalan işçi maliyetleri firmanın sektördeki diğer kurumlarla rekabet edebilirliğini büyük ölçüde arttıracaktır. Projenin öncül niteliğinde olduğu çok modellenen seri üretim hatlarındaki yüksek varyasyonu

engelleme yönetimi olan ara stok tutmak, aynı sorun ile karşı karşıya olan herhangi bir sektördeki kurum tarafından kullanılıp adapte edilebilir.

## TEŞEKKÜR

Bu çalışma, TÜBİTAK (Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu) tarafından 2209-B (2241-A) Sanayi Odaklı Lisans Bitirme Tezi Destekleme Programı kapsamında destek almaya hak kazanmıştır. Projenin firmalarında gerçekleştirilmesi için gösterdikleri ilgiden dolayı Bora Konuk, Seçkin Menteş ve diğer tüm Teknik Balans çalışanlarına teşekkür ederiz.

## KAYNAKÇA

1. **Bricker, D. L., Juang, S. H.** 1993. "A Mathematical Programming Model of the Assembly Line Balancing Problem". Department of Industrial Engineering the University of Iowa, Working Paper, <http://user.engineering.uiowa.edu/>, son erişim tarihi: 15.05.2016.
2. **Das, S. K., Jaturanonda C. ve Nanthavanij S.** 2013. "Heuristic Procedure for the Assembly Line Balancing Problem with Postural Load Smoothness", International Journal of Occupational Safety and Ergonomics, 19,531-541.
3. **Kilbridge, M. D. ve Wester, L.** 1961. "A Heuristic Method of Assembly Line Balancing", The Journal of Industrial Engineering, 12(4), 292-298.
4. **Mendes, A.R., Ramos, A.L., Simaria, A.S. ve Vilarinho, P.M.** 2005. "Combining Heuristic Procedures and Simulation Models for Balancing A PC Camera Assembly Line", Computers & Industrial Engineering, 49, 413-431.