

## ANA MODELLER İÇİN BOYA SONRASI MONTAJ HATTINDA KARAR DESTEK SİSTEMİ TASARIMI

*Melike AYDOĞAN, Merve DURAK, Merve ÖZYILMAZ, Görkem SAKARYA,  
Burak Serkan SERTBARUT, Yusuf Kürşad UĞUR, Hakan GÜLTEKİN\*, Ayşegül ALTIN*

*TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 06560 Söğütözü, Ankara  
\*hgultekin@etu.edu.tr, aaltin@etu.edu.tr*

### ÖZET

Bu çalışmada, Erkunt Traktör Sanayi A.Ş.'de boya sonrası montaj hattındaki verimlilik kayıpları ele alınmıştır. Problemin temel sebepleri, "iş yapmada standardizasyonun bulunmaması" ve "istasyonlar ve işçiler arasındaki iş yükü dengesizliği" olarak belirlenmiştir. Problemin çözümü için bir matematiksel model kurulmuş, ayrıca bir sezgisel yöntem de geliştirilmiştir. C++ programlama dilinde kullanıcı dostu bir yapıda kodlanan sezgisel, mümkün olduğunca esnek bir tasarıma sahiptir. Yazılım; yeni bir ürün modelinin eklenmesi, yeni bir iş adımının eklenmesi, işçi ve istasyon sayılarının değişmesi, değişen üretim rakamlarına göre çalışması gereken işçi ve istasyon sayılarının belirlenebilmesi gibi durumlarda firmanın, gelecekteki ihtiyaçlarını karşılamak üzere analizler yapmasını sağlamaktadır. Mevcut sisteme göre çevrim süresinde, matematiksel model kullanılarak %44,8'lik, sezgisel yöntem kullanılarak ise %40,6'lık azalma elde edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Montaj hattı dengeleme, matematiksel programlama, sezgisel yöntemler

### DESIGN OF A DECISION SUPPORT SYSTEM FOR THE AFTER PAINT ASSEMBLY LINE FOR THE MAIN LINES

### ABSTRACT

In this study, "after dye assembly line" of Erkunt Tractor Company is investigated for the reasons of productivity losses. The main reasons for these losses are found to be "the lack of standardization in making the operations" and "the workload imbalance among workers and stations." In order to solve the problem, a mathematical model as well as a heuristic algorithm is developed. The heuristic is coded in C++ programming language with a user-friendly interface and have a very flexible design. The software can make analyses for further needs of the company such as the additions of a new product model or a new work step, possible changes in the number of workers or stations and the determination of the required number of workers and stations for different levels of throughput rates. Compared with the current system, the cycle time is decreased by 44,8% using mathematical model and 40,6% using the heuristic algorithm.

**Keywords:** Assembly line balancing, mathematical programming, heuristic methods

\* İletişim yazarı

Doğuş Üniversitesi tarafından düzenlenen 32. Yöneylem Araştırması ve Endüstri Mühendisliği Ulusal Kongresi Öğrenci Proje Yarışması'nda üçüncülük ödülü kazanan çalışmanın ilgili öğretim üyelerinin katkılarıyla düzenlenmiş halini EM Dergisi yayım politikası doğrultusunda yayımlıyoruz.

## 1. GİRİŞ

Bu çalışmada, Erkunt Traktör Sanayi A.Ş'nin boya sonrası montaj hattı ele alınmıştır. Firmada şimdiye kadar yapılan gözlemler ve firmadan alınan veriler sonucunda, boya sonrası montaj hattında iş standardizasyonunun olmadığı ve bu bölümdeki iş istasyonlarının iş tanımlarının tam olarak yapılması nedeniyle iş yükü dağılımının dengesiz olduğu belirlenmiştir. Dolayısıyla bu hat üzerinde işlemlerin işçi ve istasyonlara atamasının yeniden yapılması ve hattın dengelenerek sorunların giderilmesine karar verilmiştir. Dengeleme çalışması için öncelikle hatta yapılan işlemlerin neler olduğu belirlenmiş ve bu işlemlerin zamanları tutulmuştur. Daha sonra bu zamanlar kullanılarak her bir işlemin standart zamanları hesaplanmıştır. Öncelikle, amaç fonksiyonu çevrim zamanını en küçükleme olan bir matematiksel model geliştirilmiştir. Geliştirilen bu model, klasik montaj hattı dengeleme problemlerinden farklı olarak işçilerin birden fazla istasyonda çalışmasına izin vermektedir. Klasik montaj hattı dengeleme problemlerinde istasyon zamanları, o istasyona atanan bütün işlerin toplam zamanı olarak hesaplanmaktadır. Kurulan modelde istasyon zamanı hesaplanırken paralel yapılan işler de göz önünde bulundurulmuş ve istasyonların gerçek zamanları hesaplanmıştır. Bu model, Cplex Optimization Studio 12.2 kullanılarak çözdürülmüştür. Optimal sonuca göre çevrim zamanı 35 dakikadan 19,3 dakikaya indirilmiştir. Ancak sonuçlar incelendiğinde, işçiler arasında iş yükü dengesizliğinin olduğu ve işçilerin istasyonlar arasında çok fazla yürüdüğü tespit edilmiştir. Bu durumu gidermek için bir önceki aşamada elde edilen çevrim zamanı kısıt olarak girilirken; amaç fonksiyonu, iş yükü dengesizliğini en küçükleme olarak değiştirilmiştir. Yeni model tekrar çözdürülmüş ve çevrim zamanının 19,3 dakika olduğu ve iş yükü dengesizliklerinin mümkün olduğunca giderildiği görülmüştür. Elde edilen sonuçlarla duyarlılık analizleri yapılarak sistem test edilmiştir. Mevcut durumda firmada herhangi bir optimizasyon yazılımı bulunmadığı için gelecekteki farklı isteklerin karşılanabilmesi amacıyla, ayrıca sezgisel bir çözüm yöntemi geliştirilmiş ve C++ programlama dilinde kodlanmıştır. Sezgisel algoritma, çevrim zamanı 20,8

dakika olan ve işçiler arası iş yükü dengesizliğinin de çok az olduğu bir çözüm çıkartmıştır. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde matematiksel modelle %100'lük, sezgisel algoritmayla da %92,3'lük bir üretim artışı sağlanmıştır.

## 2. FİRMA TANITIMI

Erkunt Traktör Sanayi A.Ş, 12 Eylül 2003 tarihinde hizmet vermeye başlamıştır. Erkunt Traktör'de Türkiye'nin ilk yerli tasarımı traktörü üretilmektedir. Üretim tesisi, Ankara Sincan Organize Sanayi Bölgesi'nde 12.000 m<sup>2</sup>'si kapalı olmak üzere toplam 32.000 m<sup>2</sup>'lik alana kurulmuştur. Erkunt Traktör'de 262 kişi çalışmaktadır. 2009'dan beri pazar üçüncüsü olan Erkunt Traktör, yıllık 6600 adet traktörle yaklaşık %12'lik bir pazar payına sahiptir. Firma 2013 yılında pazar payını %15 seviyesine çekmeyi hedefleyerek üretim miktarını da arttırmayı planlamaktadır.

Firma, dört seri içinde 38 farklı traktör modeli üretmektedir. Bunlar; Ekonomik Seri, Lüks Seri, Standart Seri ve Meyveci Serileridir. Her seri kendi içinde Servet (80 bg.), Nimet (70 bg.), Bereket (60 bg.) ve Kısmet (55 bg.) adlarıyla beygir güçlerine göre modellere ayrılmaktadır. Ayrıca her model için dört çeker, iki çeker, kabin ve güneşlik özellikleri mevcuttur. Firma, Armatrac markasıyla Balkan ülkelerine, Arap Yarımadasına, Afrika ülkelerine ve Amerika Kıtasındaki toplam 22 ülkeye ihracat yapmaktadır. Bu araçlarda kullanılan bazı parçalar ihraç edilecekleri ülkenin özelliklerine göre farklılık göstermektedir. Farklı parçaların montajlarında bir değişiklik olmadığı için farklı şekilde değerlendirilmelerine gerek yoktur. Erkunt Traktör, traktör üretiminin yanı sıra hem kendi ürünleri hem de dünyadaki diğer önemli traktör üreticileri için hidrolik aksam üretimi de yapmaktadır.

## 3. MEVCUT SİSTEM ANALİZİ

Mevcut sistem analizi kapsamında firmanın beklentileri ve şikâyetleri öğrenilmiştir. Bu doğrultuda mevcut sistemin yapısı analiz edilerek, sistemin nasıl çalıştığı anlaşılmıştır. Yapılan gözlemler sonucunda problem belirtileri detaylı bir şekilde incelenmiştir.

### 3.1 Firma Beklentileri ve Şikâyetleri

Firma, boya sonrası montaj hattında verimlilik kaybı olduğunu belirtmiştir ve bu kaybın en aza indirilmesini beklemektedir. Yapılan analiz ve gözlemler sonucunda verimlilik kaybının başlıca nedenleri olarak aşağıdaki iki konu saptanmıştır.

- Her işçinin işleri farklı bir şekilde ve farklı bir sırada yapmasından kaynaklanan işçi ve iş istasyonu bazında iş standardizasyonunun olmaması.
- İşçiler arası iş yükünün dengeli dağıtılmamış olması.

Firmanın beklentisine uygun olarak “verimlilik kayıplarının en aza indirilmesi” amacıyla proje kapsamında, boya sonrası montaj hattında bir dengeleme çalışması yapılarak her bir istasyonda yapılacak ve her bir işçinin yapacağı işlerin ve bunların hangi sırada yapılacağı belirlenmesi amaçlanmıştır. Bunun sonucunda işlerin standartlaşması sağlanacaktır. İstasyonda yapılan işlerin standartlaşması sonucunda kalite kontrolden eksik ve hatalı çıkan ürün sayısının azaltılması hedeflenmektedir. Diğer taraftan, işler istasyonlara dengeli bir şekilde dağıtılarak çevrim zamanı en küçüklenecek ve işçiler üzerine dengeli dağıtılarak işçi memnuniyeti ve motivasyonu artırılabilecektir.

### 3.2 Mevcut Sistemin Yapısı

Proje kapsamında ele alınan sistem, Erkunt Traktör Sanayi A.Ş'nin boya sonrası montaj hattıdır. Proje kapsamında boya sonrası montaj hattında çalışmalar yürütülmüştür. Bu hatta sekiz iş istasyonu bulunmaktadır, fakat fiziksel bir istasyon ayrımı yoktur. Belirli bir iş sıralamasının ve her istasyonun kesin iş paylaşımlarının olmaması sebebiyle istasyon sayıları zamana bağlı olarak değişiklikler göstermektedir. Mevcut durumda ilk istasyonda; genel olarak maskelerin çıkarılması, gresleme yapılması, akü montajı ve elektrik tesisatının takılması işlemleri yapılmaktadır. İkinci istasyonda; radyatör montajı ve kabin montajı yapılmaktadır. Üçüncü istasyonda kabin ayarları yapılmaktadır. Dördüncü istasyonda kabin ayarları devam etmektedir. Beşinci istasyonda; egzoz ve egzoz parçalarının monte edilmesi, klima ve kompresör takılması işlemleri yapılmaktadır. Altıncı istasyonda; kabin içi bağlantıları yapılmakta ve yakıt deposu takılmakta-

dır. Yedinci istasyonda; yağ doluları yapılmakta ve tekerlekler takılmaktadır. Son istasyonda ise, kaporta monte edilmekte ve son kontroller yapılmaktadır. Son kontrolden geçen traktörler eğer herhangi bir parça eksikliği ve hata yoksa Roll teste gönderilmektedir. Hatalı veya eksik parçalı traktörler, hatalarının veya eksikliklerinin giderilmesi için hat gerisinde oluşturulan özel bölgeye gönderilmektedirler. Eksikliklerin giderilmesine müteakip Roll teste girmektedirler. Roll test; traktörlerin bütün sistemlerinin çalışırılığının kontrol edildiği son testtir. Roll teste giren traktörlerde bir hata çıkmazsa stok alanına gönderilip sevkiyat için bekletilmektedirler. Hata çıkan traktörler ise, hataları özel bölgede giderildikten sonra tekrar Roll teste alınırlar ve sevkiyat için stok alanına gönderilirler.

### 3.3 Gözlemler ve Problem Belirtilerinin İncelenmesi

Firmaya yapılan ziyaretlerde işçilerin farklı istasyonlara gidebildikleri, çalışma konumlarının sabit olmadığı gözlemlenmiştir. Aynı zamanda işçilerin işleri yaparken belli bir sırayı takip etmedikleri belirlenmiştir. Belli bir iş sıralamasının olmaması her işçinin işleri kendi istediği şekilde yapmasına ve daha fazla montaj hatası yapılmasına sebep olmaktadır. İşler için belli bir sıralama olmadığı ve standart zamanlar bilinmediği için üretimin tamamen işçilerin çalışma temposuna bağlı olduğu gözlemlenmiştir. İşçilerin işleri her zaman aynı standartta yapmalarının sonucu olarak üretilen hatalı veya eksik parçalı traktör oranının fazla olduğu görülmüştür. Hatalı veya eksik parçalı traktörlerin eksikliklerinin giderilmesi için, işi yapabilecek işçiler, hattan hatalı traktör giderme alanına çağırılmaktadırlar. Bu durumda, ana hattaki işlerde gecikme olabilmektedir. Ayrıca bir istasyonda aynı anda farklı işlemler yapılabilmektedir. Dolayısıyla her bir istasyonun süresinin, o istasyona atanan bütün işlemlerin toplam zamanı değil, o istasyonda aynı anda yapılan paralel işlerin en büyüğünün toplam süresi kadar olduğu görülmüştür.

## 4. PROBLEM TANIMI VE FORMÜLASYONU

Yapılan sistem analizi ve gözlemler sonucunda problem tanımlanmış ve bu tanım doğrultusunda proje çıktıları ve başarı ölçütleri belirlenmiştir.

#### 4.1 Problemin Tanımı

Bu çalışmada ele alınan problem, boya sonrası montaj hattında istasyonlar arasındaki iş dağılımının belli olmaması, işçiler arası iş yükü dağılımının dengeli olmaması ile işçi ve iş istasyonu temelinde iş standardizasyonunun olmamasından kaynaklanan verimlilik kaybı şeklinde tanımlanmıştır.

#### 4.2 Proje Çıktıları

Bu proje sonunda öncelikle boya sonrası montaj hattı tasarımının yenilenmesi planlanmaktadır. Bu kapsamda; iş tanımları, işlem sıralamaları, her bir istasyonda yapılacak işler, her bir işçinin yapacağı işler ve istasyon sürelerini belirleyen matematiksel modelleme tabanlı bir çözüm yöntemi geliştirilecek ve mevcut sistem için çözüm elde edilecektir. Ayrıca, aynı problemi çözen bir sezgisel algoritma geliştirilecek ve kodlanacaktır. Bu algoritma çok çeşitli analizlerin yapıldığı bir karar destek sistemi şeklinde hazırlanacaktır. Bunun yanı sıra üretim miktarına göre iş sıralaması yapan bir karar destek sistemi hazırlanacaktır.

#### 4.3 Proje Başarı Ölçütleri

Aşağıda belirtilen konularda iyileşmeler elde edilmesi durumunda proje başarıyla tamamlanmış sayılacaktır:

1. Çevrim zamanının belirli bir oranda azaltılması.
2. Üretimdeki varyansın düşürülmesi ve üretimin düzgünleştirilmesi.
3. Değişen üretim rakamlarına göre çalışması gereken işçi ve istasyon sayılarının belirlenmesi, istasyonlar arası ve işçiler arası iş yükünün zaman ve gerek duyulan fiziksel güç açılarından dengelenmesi.

4. Hatalı veya eksik üretim oranının önemli bir oranda azaltılması.

### 5. KAYNAKÇA TARAMASI

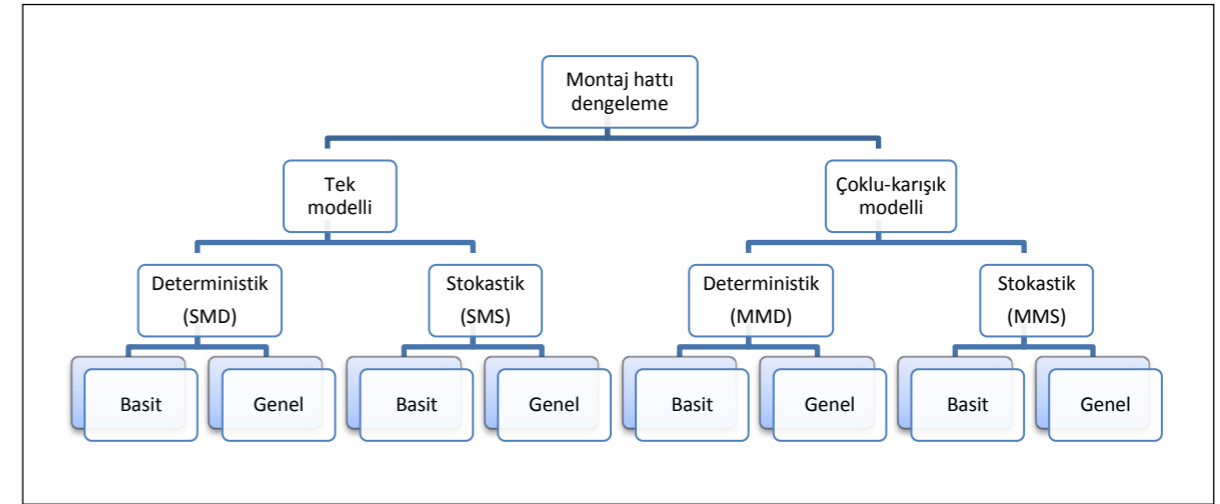
Montaj hatları, modern seri üretimin temelini oluştururlar. Montaj hatları sayesinde büyük miktarda ürün daha az maliyetle üretilir. İlk olarak Henry Ford tarafından önerilen montaj hatları günümüzde birçok sektörde kullanılmaktadır. Montaj hatları, manuel veya otomatik olarak, belli bir iş sıralamasıyla gereken parçaların birbirine veya ana parçaya montesiyle tek veya çok çeşit ürünlerin üretildiği iş istasyonlarından oluşan hatlardır. Baybars (1986), montaj hatlarını ürün modellerine, gecikmelerine, kurulum sıklığına, otomasyon düzeni ve şekline göre sınıflandırmaktadır. Bu sınıflandırma Tablo 1'de görülmektedir.

Erkunt Traktör'de ürün modeline göre karışık modelli, kontrol yapısına göre asenkronize gecikmeli, kurulum sıklığına göre yeniden dengeleme, otomasyon düzeyine göre elle, yerleşim şekline göre düz montaj hattı bulunmaktadır.

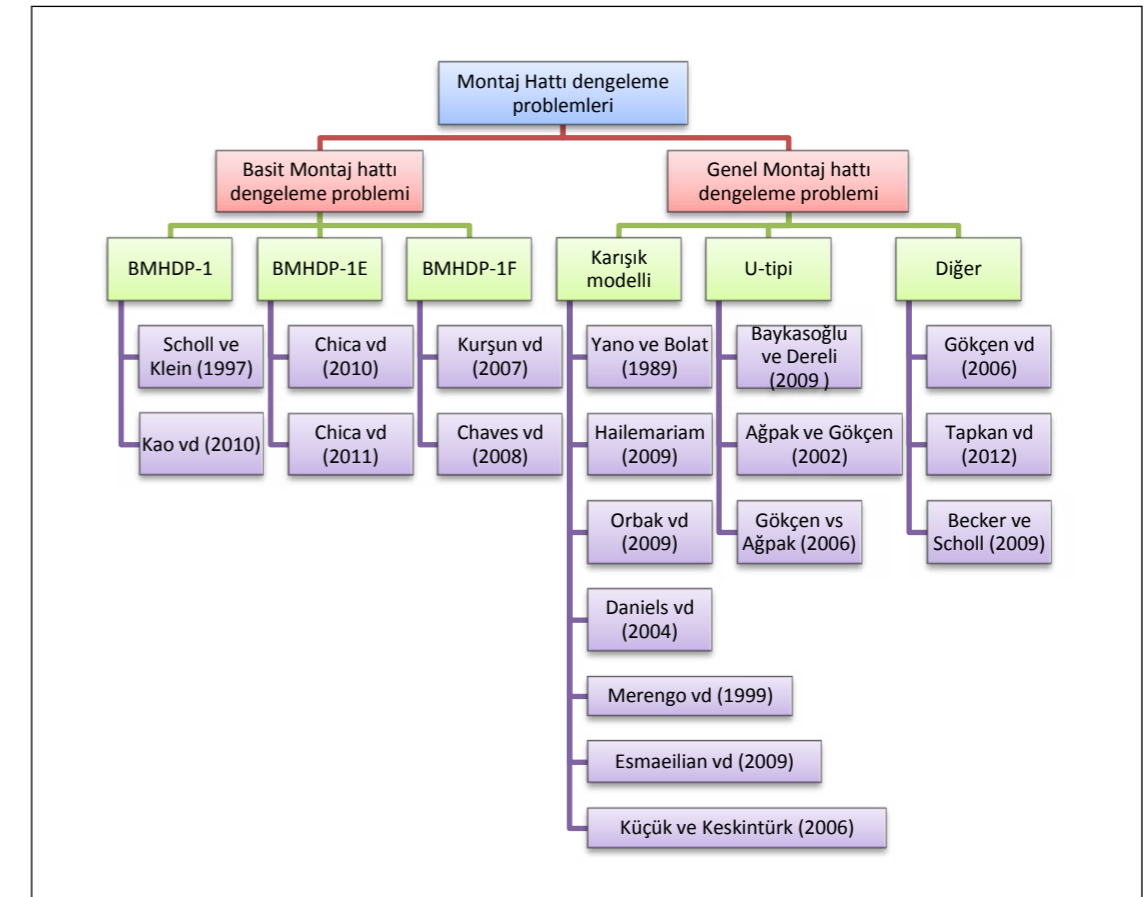
Montaj hattı dengeleme konusu ilk olarak Bryton (1954) tarafından ileri sürülmüş bir fikirdir. Bu konuda literatürdeki ilk çalışma ise, Salverson (1955)'a aittir. Salverson, hat dengeleme için ilk matematiksel model kurmuş ve COMPOSAL'ı geliştirmiştir. Baybars (1986) tarafından önerilen ilk sınıflandırma montaj hattı problemini iki bölüme ayırmaktadır: Basit Montaj Hattı Dengeleme Problemi (BMHDP) ve Genel Montaj Hattı Dengeleme Problemi (GMHDP). Scholl ve Becker (2004)'in belirttikleri gibi birçok problem farklı amaç fonksiyonlarından ortaya çıkar. Basit montaj hattı dengeleme problemleri, çevrim süresi ve istasyon

Tablo 1. Montaj Hattı Sınıflandırılması

Ürün modeli	Tek modelli	Çok modelli	Karışık modelli
Hattın kontrol yapısı	Gecikmesiz	Asenkronize gecikmeli	Senkronize gecikmeli
Kurulum sıklığı	İlk kez dengeleme	Yeniden dengeleme	
Otomasyon düzeyi	Elle	Otomatik	
Yerleşim şekli	Düz	U-tipi	Toplayıcı



Şekil 1. Montaj Hattı Dengeleme Sınıflandırılması



Şekil 2. Montaj Hattı Dengeleme Problemi Sınıflandırılması

**Tablo 2.** Karışık Modelli Hatlarda Yapılan Çalışmalar

Makale	Kısıtlar	Amaç	Yöntem
Yano ve Bolat (1989)	İstasyonlarda boş zaman olmaması, istasyona atanan işlerin zamanlarının toplamının o istasyondaki son işin bitim zamanından küçük olması	İstasyonlardaki toplam iş yükünü en küçüklemek	Dal ve Sınır algoritması
Merengo vd (1999)	Her işin bir istasyona atanması, işlerin öncelik diyagramına göre atanması, istasyona atanan işlerin çevrim zamanından küçük olması	Tamamlanmamış iş sayısını ve iş istasyon sayısını en küçüklemek	Sezgisel algoritma
Daniels vd (2004)	İşlerin tüm istasyonlarda aynı sırayla yapılması, çevrim zamanı içerisinde herhangi bir zaman diliminde kullanılabilen işçi sayısının ve kısmi olarak kullanılacak işçi sayısının sabit olması	İş gücünü esnek şekilde kullanarak çevrim zamanını azaltmak	Doğrusal programlama
Hailemariam (2009)	İşlerin öncelik diyagramına göre atanması, üretim miktarının sabit tutulması, işlerin belirlenen işlem sürelerinde tamamlanması	Hattaki darboğazları tespit etmek	Simülasyon
Küçük ve Keskintürk (2006)	İşlerin belirlenen işlem sürelerinde tamamlanması, işlerin öncelik diyagramına göre atanması, üretim miktarının sabit tutulması	Çevrim süresi sabit kabul edilerek gerekli istasyon sayısının minimize etmek	Genetik algoritma
Esmailian vd (2009)	Paralel hat sayısının sınıflandırılması, tüm işçilerin eşit deneyime sahip olması, bütün işlerin birbirinden bağımsız olmasına rağmen işlerin öncelik diyagramına göre atanması	Çevrim süresini minimize etmek	Sezgisel algoritma

sayısı bilgileri doğrultusunda sınıflandırılmaktadır. Ghosh ve Gagnon (1989)'un montaj hattı dengeleme problemlerinin sınıflandırılması Şekil 1'de gösterilmiştir.

Bu sınıflar üzerinde yapılan çalışmalar Şekil 2'de gösterilmiştir. Farklı montaj hattı dengeleme problemleri için literatürde birçok makale ve araştırma bulunmaktadır. Erkunt Traktör'deki montaj hattının karışık modelli olmasından dolayı kaynakça taraması karışık modelli hatlar arasında yapılmıştır. Farklı literatür çalışmalarında yer alan kısıtlar ve amaç fonksiyonları incelenmiş ve bizim projemizle örtüşen yanlarının üzerinde yoğunlaşmıştır. Bu makalelerde ele alınan problemler ve uygulanan çözüm yöntemleri Tablo 2'de özetlenmiştir.

Erkunt Traktör boya sonrası hattı, karışık modelli ve verileri deterministik olan bir hattır (MMD). Verimli çalışan bir hat tasarlamak amaçlı kurduğumuz matematiksel modelde amaç fonksiyonu, aynı iş grubundaki işçilerin arasındaki iş yükü dengesizliğini en küçüklemektir. Kullanılan yöntem ise karışık tamsayılı programlamadır. Yani, kesin çözüm veren yöntemdir. İlk aşamada çevrim süresini en küçükleme modeli

çözdürülmüş; buradan elde edilen çevrim süresi, işçiler arası iş yükü dengesizliğini en küçükleyen modele bir kısıt olarak eklenmiştir.

EK-1 ve EK-2'de görüldüğü üzere yapılan araştırmalara göre, çevrim süresinin en küçüklenmesi literatürde en fazla ele alınan yaklaşımlardan birisidir. Bununla beraber, işlerin istasyona ve işçilere ayrı ayrı atanması ele alınmadığı için, işçilerin iş yükünün dengelenmesi konusu yeterince çalışılmamıştır. EK-1 ve EK-2'de Şekil 1'de tanımlanmış olan problem kısaltmaları kullanılmıştır. Dikey toplamlar, montaj hattı sınıflandırmalarının toplam kullanım sıklıklarını; yatay toplamlar ise, amaç fonksiyonlarına göre kullanım sıklıkları toplamını göstermektedir.

Görüldüğü üzere MHD üzerine çok sayıda çalışma olsa da işlerin işçilere atanması, işçiler üzerindeki iş sıralamalarının belirlenmesi, işlerin işçi üzerinde ve istasyondaki başlama zamanlarının belirlenmesi gibi konularda bir çalışma bulunmamaktadır. Erkunt Traktör'deki sistemde işler, istasyona ve işçilere belli bir sıra olmadan atanmıştır. İşçiler, işleri belli bir standardizasyona göre yapmamaktadır. Ayrıca, işçiler ardışık

olmayan birden fazla istasyonda çalışabilmektedir. Bu çalışmada klasik montaj hattı dengeleme problemi gibi işlerin istasyonlara atanmasını sağlayacak bir matematiksel model geliştirilmesi dışında literatürden farklı olarak işlerin işçilere atanması, her bir işçinin işe başlama zamanı ve her bir işin istasyonda başlama zamanı bulunmuştur. İstasyon zamanları hesaplanırken, bir istasyonda paralel işlerin de yapılabileceği göz önünde bulundurularak, istasyonların gerçek zamanları hesaplanmıştır. Ayrıca model, işçilerin sabit bir istasyona atanmadığı ve sadece ardışık iki istasyonda çalışabilecekleri şekilde tasarlanmıştır. Böylece, bu tasarımla işçilerin yürüme mesafelerinin ve böylece atıl zamanlarının azaltılması sağlanmıştır. Ayrıca oluşturulan sistemde iş yükü dengesizliğinin de en aza indirilmesi hedeflenmiştir.

## 6. ÖNERİLEN YÖNTEM

Problem çözümünde öncelikle kesin çözüm veren yöntemler ele alınmıştır. Bu kapsamda problemin matematiksel modeli geliştirilmiştir. Bu model, karma tamsayılı doğrusal bir modeldir. Sonrasında ise, hem problem boyutu büyüdüğünden matematiksel modelin kullanılmayacak ve hem de firmada lisanslı

bir optimizasyon yazılımı olmaması sebebiyle sezgisel bir algoritma geliştirilmiştir.

### 6.1 Matematiksel Model

**Kullanılacak Veriler** Proje kapsamında gereksinim duyulan veriler şunlardır:

- İşlerin standart zamanları
- Öncelik ilişkileri
- Her işin atanabileceği ve atanamayacağı istasyonlar
- Her bir işçinin yapabileceği işlemler

### Kümeler

$G = \{\text{İşçi grupları}\}$

$K = \{\text{Bütün işçiler}\}, |K| = k$

$K_n = \{n. \text{ iş grubunda bulunan işçiler}\} \forall n = 1, \dots, |G|$

$W = \{\text{Bütün işler}\} \quad |W| = w$

$W_n = \{n. \text{ iş grubunda bulunan işçilerin yapabileceği işler}\}, n = 1, \dots, |G|$

### Parametreler

$d_i = i \text{ işinin yapılma süresi} \quad \forall i \in W$

$q_i = i \text{ işinin ihtiyaç duyduğu işçi sayısı} \quad \forall i \in W$

$g = \text{işçi grup sayısı}$

$C = \text{Çevrim süresi}$

$S = \text{istasyon sayısı}$

$$m_{ih} = \begin{cases} 1, & h \text{ işi } i \text{ işinin önceliği ise} \\ 0, & d. d. \end{cases} \quad \forall i, h \in W, \quad i \neq h$$

$$b_{ij} = \begin{cases} 1, & i \text{ işi } j \text{ istasyonuna atanabilirse} \\ 0, & d. d. \end{cases} \quad \forall i \in W, \quad j = 1 \dots S$$

### Karar Değişkenleri

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & i \text{ işi } j \text{ istasyonuna atandıysa} \\ 0, & d. d. \end{cases} \quad \forall i \in W, \quad j = 1 \dots S$$

$$y_{ik} = \begin{cases} 1, & i \text{ işi } k \text{ işçisine atandıysa} \\ 0, & d. d. \end{cases} \quad \forall i \in W, k \in K$$

$$a_{ih} = \begin{cases} 1, & h \text{ işi } i \text{ işinden önce yapılıyorsa} \\ 0, & d. d. \end{cases} \quad \forall i, h \in W_i, \quad i \neq h$$

$$t_{ij} = i \text{ işinin } j. \text{ istasyonda başlama zamanı} \quad \forall i \in W, \quad j = 1 \dots S$$

$$\tau_{ik} = k \text{ işçisinin } i \text{ işine başlama zamanı} \quad \forall k \in K, \quad i \in W$$

$$c_j = j. \text{ istasyondaki son işin tamamlanma zamanı} \quad \forall j = 1 \dots S$$

$$A = \text{Çevrim zamanı}$$

Yukarıda belirtilen karar değişkenleri ve parametreler kullanılarak aşağıdaki matematiksel model kurulmuştur.

Min A

Öyle ki

$$\sum_{j=1}^S b_{ij} \cdot x_{ij} = 1 \quad \forall i \in W \quad (1)$$

$$x_{ij} \leq \sum_{p=0}^{j-1} x_{h(j-p)} + (1 - m_{ih}) \quad \forall i, h \in W : i \neq h, j = 1, \dots, S \quad (2)$$

$$\sum_{k \in K_n} y_{ik} = q_i \quad \forall i \in W_n, n = 1, \dots, g \quad (3)$$

$$t_{hj} + d_h - t_{ij} \leq M(2 - (x_{ij} + x_{hj})) + M(1 - m_{ih}) \quad \forall i, h \in W_i : i \neq h, j = 1 \dots S \quad (4)$$

$$\tau_{hk} + d_h - \tau_{ik} \leq M(2 - (y_{ik} + y_{hk})) + M(1 - a_{ih}) \quad \forall i, h \in W_i : i \neq h, k \in K \quad (5)$$

$$\tau_{ik} + d_i - \tau_{hk} \leq M(2 - (y_{ik} + y_{hk})) + M a_{ih} \quad \forall i, h \in W_i : i \neq h, k \in K \quad (6)$$

$$t_{ij} \leq M \cdot x_{ij} \quad \forall i \in W, j = 1, \dots, S \quad (7)$$

$$\tau_{ik} \leq M \cdot y_{ik} \quad \forall i \in W, k \in K \quad (8)$$

$$\sum_{j=1}^S t_{ij} = \sum_{k=1}^k \frac{\tau_{ik}}{q_i} \quad \forall i \in W \quad (9)$$

$$\tau_{ik} - \tau_{il} \leq M(2 - y_{ik} - y_{il}) \quad \forall i \in W, k, l \in K : k \neq l \quad (10)$$

$$\tau_{il} - \tau_{ik} \leq M(2 - y_{ik} - y_{il}) \quad \forall i \in W, k, l \in K : k \neq l \quad (11)$$

$$c_j \geq t_{ij} + d_i \quad \forall i \in W, j = 1, \dots, S \quad (12)$$

$$A \geq c_j \quad \forall j \in 1, \dots, S \quad (13)$$

$$t_{ij}, \tau_{ik}, c_j, A \geq 0 \quad \forall i \in W, j = 1, \dots, S, k \in K \quad (14)$$

$$x_{ij}, y_{ik}, a_{ih} \in \{0,1\} \quad \forall i \in W, h \in W, j = 1, \dots, S, k \in K \quad (15)$$

Burada; amaç fonksiyonu çevrim zamanını en küçüklemektir. (1) sabit donanım matrisini kullanarak her işin yapılabileceği istasyonlar arasından sadece bir tanesine atanmasını sağlar. (2) öncelik ilişkileri kısıttır.  $h$  işi  $i$  işinin önceliği ise  $h$  işinin  $i$  işinden daha önceki bir istasyona veya iki işin de aynı istasyona

atanmasını sağlar. (3) her işe o işi yapabilecek işçiler arasından, o işin gerek duyduğu işçi sayısı kadar işçi atanmasını sağlar. (4) aynı istasyona atanmış iki

işin arasında öncelik ilişkisi varsa, öncelik olan işin diğer işten daha önce yapılmasını sağlar. (5) ve (6), aynı işçiye atanmış işlerin, işçi üzerindeki sıralamasının ve işlerin başlama zamanlarının belirlenmesini sağlar. (7) ve (8), bir iş, bir istasyona veya bir işçiye atanmadıysa ilgili başlama zaman karar değişkenle-

rinin 0 değerlerini almalarını sağlar. (9) bir işin bir istasyonda başlama zamanı ile işi yapacak işçinin o işe başlama zamanının aynı olmasını sağlar. (10) ve (11), bir işe iki işçi atandıysa iki işçinin de işe başlama zamanlarının aynı olmasını sağlar. (12) bir istasyon zamanının o istasyonda en son bitecek işin zamanına eşit olmasını sağlar. (13) çevrim zamanının en büyük istasyon zamanına eşit olmasını sağlar. (14) ve (15), işaret kısıtlarıdır.

### 6.2 Veri Analizi

Geliştirilen modelin çalıştırılabilmesi için ihtiyaç duyulan veriler, Ekim 2011'in ortasından beri yapılan çalışmalarla toplanmıştır. Bunlardan en önemlisi, işlerin standart zamanlarının hesaplanmasıdır. Firmada Ekim ayının ortasından beri devam eden zaman ölçümleri sonucunda, her bir iş adımı için yapılan ölçümlerin ortalaması alınmıştır. Bu ortalama değerler kullanılarak işlerin normal ve standart zamanları hesaplanmıştır.

Normal zamanlar, işlerin ölçülen zamanları ile işçilerin çalışma performansları yüzdeleri çarpılarak bulunmuştur. İşçi çalışma performans katsayısı, firma yetkilileriyle görüşülerek %80 olarak belirlenmiştir.

Standart zamanlar, işlerin normal zamanlarına kişisel ihtiyaçlar ile temel temel yorgunluk ve önlenemeyen beklemler nedeniyle ortaya çıkabilecek ek zaman ihtiyaçları ilave edilerek hesaplanmıştır. Bu paylar; kişisel ihtiyaçlar, işçinin tuvalete gitmesi, su içmesi gibi faktörleri içermektedir ve normal zamanın %5'i olarak alınmıştır. Temel yorgunluk; bir işçinin çalışmaktan kaynaklı yorgunluğunun işin yapılma zamanına etkisidir. Bu etki normal zamanın %4'ü olarak alınmıştır. Önlenemeyen beklemler; işin yapılması esnasında ortaya çıkabilecek ekstra durumları içermektedir. Bununla beraber işçinin malzemeleri düşürmesi, hatalı traktöre müdahale için hattan işçi çağırılması, eksik parçaların beklenmesi ve üretim mühendisinin çeşitli nedenlerle işçiyi çağırması gibi durumlar önlenemeyen beklemlerdir ve normal zamanın %1'i olarak alınmıştır. Toplamda normal zamanın %10'u normal zaman üzerine eklenerek her bir işin standart zamanı bulunmuştur.

### 6.3 Doğrulama ve Geçerleme

Matematiksel model CPLEX OPL Studio 12.2'de kodlandıktan sonra, doğrulama geçerlilik analizleri yapılmıştır. Her iş grubundan en az bir iş olacak şekilde sırasıyla 30, 40, 50, 60 ve 70 adet iş adımı içeren alt kümeler seçilmiş ve modelde belirtilen kısıtların sağlanıp sağlanmadıkları kontrol edilmiştir. Doğrulama analizi, bir işçiye aynı anda birden fazla iş atanmaması, sabit donanım gerektiren işlerin doğru istasyonlara atanması, öncelik ilişkilerinin sağlanması, seçilen işlerin tamamının atanıyor olması, işçilerin ardışık iki istasyonda çalışması gibi kısıtların sağlandıklarının kontrol edilmesiyle gerçekleştirilmiştir. Geçerlilik analizi için ise gerçek sistem sonuçları ile model sonuçları arasındaki uyum araştırılmıştır. Modelin çözdürülmesiyle elde edilen çevrim süresi, gerçek sistemin çevrim süresiyle karşılaştırıldığında, mantıklı bir sonucun bulunduğu gözlenmiştir.

### 6.4 Koşuturum Sonuçları

Öncelikle, geliştirilen matematiksel model çevrim zamanını en küçüklemek amacıyla özellikleri belirtilen yazılım ve donanım kullanılarak mevcut sistem için çözdürülmeye çalışılmıştır. Kullanılan donanımın kapasitesinin kısıtlı olması nedeniyle problemin optimal çözümüne ulaşılamamıştır. Program çözüme başladıktan 1 saat 45 dakika sonra, donanımın sahip olduğu bütün belleğin kullanılmasından dolayı yeterli hafıza bulunmadığı için çözüme son vermiştir. Tablo 3'te 30, 40, 50 ve 60 iş adımlık modellerin çözüm süreleri gösterilmiştir.

**Tablo 3.** Alt Modellerin Optimal Çözüme Ulaşma Süreleri

SÜRE (sn)			
30	40	50	60
4,15	452,47	1213	3519

Tablodan da anlaşılacağı üzere, iş adımları arttıkça optimal çözüme ulaşma süresinin de artacağından mevcut donanımla 125 adımlık problemi makul bir zamanda çözdürmenin imkânsız olacağı görülmüştür.

Modeli çözülebilir hâle getirmek için model üzerinde şu değişiklikler yapılmıştır:

- Aşağıdaki kısıtlar birer kesme (cut) olması için modele eklenmiştir.
- Ayrıca daha önce saniye cinsinden kullanılan standart zamanlar, işlem kolaylığı sağlayacağından dolayı dakikaya çevrilmiş ve alt modeller tekrar çözdürülmüştür.

Sonuç olarak geliştirilen modele eklenen kısıtlar şunlardır:

$$\sum_{i \in W} y_{ik} \cdot d_i \leq A \quad \forall k \in K \quad (16)$$

$$16 \cdot A \leq 520 \quad \forall k \in K \quad (17)$$

(16) bir işçinin bir çevrimdeki toplam çalışma zamanının çevrim süresinden uzun olmamasını sağlamaktadır. (17) ise model sonucunda elde edilecek çevrim zamanı ile her vardiyada üretilmesi istenen traktör sayısının çarpımının öngörülen vardiyalık toplam çalışma zamanını aşmayacak şekilde tamamlanmasını sağlamaktadır. Bu kısıtlar, orijinal modelin optimal çözülmesi halinde zaten sağlanan kısıtlardır. Fakat bu kısıtların eklenmesiyle model daha hızlı çözebilir hâle gelmiştir. Uygulanan koşturumun sonuçları Tablo 4'te gösterilmiştir.

**Tablo 4.** Alt Modellerin Optimal Çözümüne Ulaşma Süreleri

SÜRE(sn)			
30	40	50	60
3,15	12,47	18,15	26,52

$$z_{kj} = \begin{cases} 1, k \text{ işçisi } j \text{ istasyonuna atandıysa} \\ 0, d. d. \end{cases} \quad \forall k \in K, j \in [1, 8]$$

$$\beta_{km} = \begin{cases} 1, k \text{ işçisi } m \text{ bloğuna atandıysa} \\ 0, d. d. \end{cases} \quad \forall k \in K$$

Bu değişkenler kullanılarak matematiksel modele aşağıdaki kısıtlar eklenmiş ve model tekrar çözdürülmüştür.

$$z_{kj} \geq \frac{x_{ij} + y_{ik} - 1}{2} \quad \forall i \in W, k \in K, j \in [1, 8] \quad (18)$$

$$\sum_{j=1}^8 z_{kj} \leq 2 \quad \forall k \in K \quad (19)$$

Çözüm zamanları incelendiğinde, yeni eklenen kısıtların alt problemlerin daha kolay çözülmesine katkıda bulunduğu ve amaç fonksiyon değerlerinin değişmediği görülmüştür. Bu gözlem sonucunda yeni eklenen kısıtlarla oluşturulan modelin orijinal problemin çözdürülmesinde kullanılmasına karar verilmiştir.

Çevrim süresini en küçükmeyi amaçlayan model, belirtilen test ortamında yeni kısıtlar eklendikten sonra 3 dakika 45 saniyede optimal olarak çözdürülmüştür. Optimal çözüme göre çevrim süresi 19,3 dakika olarak bulunmuştur. Çözümde hangi işlerin hangi istasyonlarda yapılacağı, hangi işçilerin hangi işleri yapacağı ve bu işlerin yapılacağı sıra ile işlerin istasyonlardaki ve işçiler üzerindeki başlama zamanları belirlenmiştir.

Her bir işçi grubu için dengesizlik oranları; ilgili işçi grubundaki en büyük doluluk oranının en küçük doluluk oranından çıkartılıp en büyük doluluk oranına bölünmesi şeklinde tanımlanmıştır. Elde edilen çözüm incelendiğinde, aynı işçi grubunda bulunan işçiler arasında iş yükü dengesizliklerinin olduğu ve işçilerin her istasyona gidebilmelerine izin verildiği için çok fazla yürüme yaptıkları görülmüştür. İşçilerin iş yükleri ve grup içi iş yükü dengesizlikleri oranı Tablo 5'te gösterilmiştir. Tablo 5 incelendiğinde, aynı iş grubunda bulunan işçiler arası iş yükü dengesizliği çok fazla olduğu için bu çözümün uygulanabilir olmadığı anlaşılmıştır.

Modeli çözülebilir hâle getirmek için öncelikle aşağıdaki yeni değişkenler tanımlanmıştır.

$$\sum_{p=0}^1 z_{k(j+p)} \geq 2 \cdot \beta_{km} \quad \forall k \in K, j, m \in [1, 7], j = m \quad (20)$$

$$\sum_{m=1}^7 \beta_{km} = 1 \quad \forall k \in K \quad (21)$$

$$\sum_{k \in K} z_{kj} \leq 6 \quad \forall j \in [1, 8] \quad (22)$$

**Tablo 5.** İşçilerin İş Yükleri ve Grup İçi Dengesizlik Oranları

İŞÇİ GRUBU	İŞÇİ	İŞ YÜKÜ (%)	GRUP İÇİ DENGESİZLİK ORANI (%)
GRESÇİ	A	81,86	0,00
	B	45,62	
ELEKTRİKÇİ	C	11,91	83,81
	D	73,57	
	E	69,94	
RADYATÖRCÜ	F	95,33	26,63
	G	71,51	
KABİNCİ	H	71,52	0,00
	I	73,15	
KLİMACI	J	94,81	36,00
	K	60,62	
	L	99,94	
AYARCI	M	100,00	0,06
	N	33,86	
LASTİKÇİ	O	54,92	87,48
	P	33,16	
	R	62,17	
	S	41,45	
MONTAJ	T	27,46	50,21
	U	76,68	
DEPO	V	26,94	77,70
	Y	17,13	
KONTROL			0,00

(18) işlerin hangi istasyonlara ve hangi işçilere atandığına göre, işçilerin hangi istasyonlara atandığını belirler. (19) bir işçinin en fazla iki istasyona atanmasını sağlar. (20) bir işçinin ancak ardışık istasyona atanabilmesini sağlar. (21) bir işçinin sadece bir istasyon bloğuna atanmasını sağlar. (22) ise bir istasyona en fazla altı işçi atanmasını garanti eder. Bu kısıt, firma yetkililerinin isteği doğrultusunda modele eklenmiştir. Model çözdürüldükten sonra daha önceki optimal çözüme göre çevrim zamanının değişmediği gözlemlenmiştir.

Aynı işçi grubunda bulunan işçiler arasındaki iş yükünü dengeleyebilmek için (1)-(22) numaralı kısıtlarla ifade edilen matematiksel model, amaç fonksiyonu işçiler arası iş yükü dengesizliğini en küçükmek olacak şekilde değiştirilmiştir. Çevrim süresinin değişmemesi için ise bir önceki aşamada optimal sonuç olarak bulunan çevrim süresi kısıt olarak modele eklenmiştir. Bunun için öncelikle aşağıdaki değişkenler tanımlanmıştır.

$I_k^+ = k$  işçisinin iş yükünün ortalamadan pozitif sapma miktarı  $\forall k \in K$

$I_k^- = k$  işçisinin iş yükünün ortalamadan negatif sapma miktarı  $\forall k \in K$

$o_g = K_g$  işçi grubunda bulunan işçilerin bir çevrimdeki ortalama iş yükü oranı  $\forall k \in K$

$r_k = k$  işçisinin bir çevrimdeki iş yükü oranı  $\forall k \in K$

$$\begin{aligned} \text{Min } & \sum_{k=1}^k I_k^+ + I_k^- \\ r_k &= \frac{\sum_{i \in W} y_{ik} * d_i}{C} \quad \forall k \in K \end{aligned} \quad (23)$$

$$o_g = \frac{\sum_{k \in K_g} \text{oran}_k}{|K_g|} \quad g \in G \quad (24)$$

$$A \leq C \quad (25)$$

$$r_k = o_g + I_k^+ - I_k^- \quad \forall k \in K_g, g \in G \quad (26)$$

Yeni amaç fonksiyonu işçiler arası iş yükü dengesi en küçüklemektir. (23) her işçinin bir çevrimdeki iş yükü oranını, (24) aynı iş grubunda çalışan işçilerin ortalama iş yükü oranını hesaplamaktadır.

**Tablo 6.** Optimal Sonuca Göre İşçilerin İş Yükleri ve Grup İçi İş Yükü Dengesizlikleri Oranı

İŞÇİ GRUBU	İŞÇİ	İŞ YÜKÜ (%)	GRUP İÇİ DENGESİZLİK ORANI (%)
GRESÇİ	A	81,86	0,00
	B	28,96	
ELEKTRİKÇİ	C	63,94	54,57
	D	44,93	
	E	83,32	
RADYATÖRCÜ	F	83,35	0,04
	G	71,50	
KABİNCİ	H	71,50	0,00
	I	77,42	
KLİMACI	J	74,83	3,00
	K	76,82	
	L	99,93	
AYARCI	M	100,00	0,07
	N	83,06	
LASTİKÇİ	O	8,76	89,45
	P	12,55	
	R	82,87	
	S	35,10	
MONTAJ	T	35,81	2,00
	U	50,6	
DEPO	V	53,41	5,00
	Y	17,10	
KONTROL			0,00

(25) çevrim zamanının daha önceden (1)-(22)'nin optimal çözümü olarak belirlenen değerden küçük olmasını sağlamaktadır. Son olarak, (26) işçilerin iş yükü dengelerinin kendi grup ortalamalarından sapma miktarını hesaplamaktadır.

Elde edilen yeni model, yukarıda bahsedilen yazılım ve donanım kullanarak tekrar çözdürülmeye çalışılmıştır. Problemin çok büyük boyutlu olması sebebiyle yazılımın varsayılan ayarlarıyla optimal çözüme ulaşılamamıştır. Daha sonra CPLEX OPL'in farklı çözüm stratejileri denenmiştir. Derinlik öncelikli arama (Depth-first search) ve optimal sonuca olurluluktan daha fazla önem veren (optimality over feasibility) stratejileriyle 11 saat 27 dakikada optimal çözüme ulaşılmıştır. Optimal çözüme göre çevrim süresi 19,3 dakika olarak kalmış ve amaç fonksiyonu değeri; yani işçi iş yüklerinin buldukları grupların ortalamasından toplam sapma miktarı %187 olarak bulunmuştur. Optimal sonuca göre aynı işçilerin iş yükleri ve grup içi iş yükü dengesizlikleri oranı Tablo 6'da gösterilmiştir.

Optimal sonuca göre elektrikçi ve lastikçi işçi grubundaki işçiler hariç iş yükü dengesi sağlanmıştır. Bu gruplarda istenilen seviyede dengenin sağlanamamasının sebebi ise uzun zaman alan işlerin bulunmasıdır.

### 6.5 Sezgisel Algoritma

Matematiksel modelin çözümünün zaman alması ve kullanılan bilgisayar programının lisanslı bir program olması ve firmanın bu programı almayı tercih etmeyecek olması düşünüldükçe, firmayı gelecekteki değişikliklere kolay adapte edebilmek ve kısa sürede çözüm sağlayabilmek amacıyla bir sezgisel algoritma geliştirilmiştir. Bu sezgiselin adı hat dengeleme sezgiseli olarak belirlenmiş ve adımları şu şekildedir:

ADIM 1: Her iş için ağırlık hesapla.

ADIM 2: Atanmamış işler arasından en büyük ağırlığa sahip işi seç.

ADIM 3: Seçilen işin atanabileceği en erken istasyonu belirle.

ADIM 4: Seçilen işi yapabilecek işçilerden, iş için gerekli işçi sayısı kadar doluluk oranı en düşük olan işçi veya işçileri seç.

ADIM 5: Belirlenen istasyon ve işçi bilgilerine göre işin o istasyon ve o işçi üzerinde ayrı ayrı başlayabileceği en erken zamanları belirle.

ADIM 6: İşin istasyonda bitebileceği en erken zamanı ve işçi üzerinde bitebileceği en erken zamanı, izin verilen en yüksek çevrim zamanı değeriyle kontrol et (En yüksek çevrim zamanı = Bir vardiyadaki toplam süre / Vardiyada üretilmesi istenen miktar). Kontrol sonucu doğruysa ADIM 7; yanlışsa ADIM 8'den devam et.

ADIM 7: Seçilen işi belirlenen istasyona, belirlenen işçiye, belirlenen zamana ata. ADIM 9'dan devam et.

ADIM 8: Yanlış olan zamanın (günlük vardiya süresinin üretim sayısına bölünmesiyle bulunan çevrim zamanı) istasyon zamanı mı işçi zamanı mı olduğunu belirle. Yanlış olanı değiştir. İstasyon için bir sonraki istasyona geç, işçi için en düşük ikinci doluluk oranına sahip işçiye seç. ADIM 5'e geri dön.

ADIM 9: Atanmamış iş kaldıysa ADIM 2'ye dön. Değilse, sonlandır.

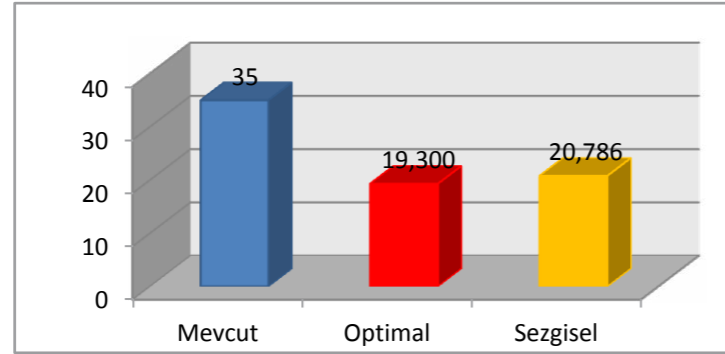
Firma, geliştirilen sezgisel algoritmayla dengeleme probleminin yanı sıra değişken üretim seviyelerinde boya sonrası montaj hattında kaç işçi çalıştırması gerektiğine de karar verebilecektir. Bu sayede firma, planlamalarını daha doğru bir şekilde yapabilecek ve işçi maliyetlerini en aza indirebilecektir.

Geliştirilen bu algoritma C++ programlama dili kullanılarak kodlanmış ve kullanıcıya kolaylık sağlanması açısından aynı programlama dili kullanılarak bir kullanıcı arayüzü oluşturulmuştur. Geliştirilen sezgisel algoritmanın akış şeması EK-3'te gösterilmiştir.

## 7. PERFORMANS ANALİZİ

Matematiksel model ve sezgisel algoritma daha önce bahsedilen özelliklere sahip bir bilgisayarda koşturulmuş ve sonuçlar birbiriyle ve mevcut sistemle karşılaştırılmıştır. Çevrim zamanı için elde edilen sonuçlar Şekil 3'te gösterilmektedir. Buna göre, mevcut sistemde 35 dakika olan çevrim zamanı optimal



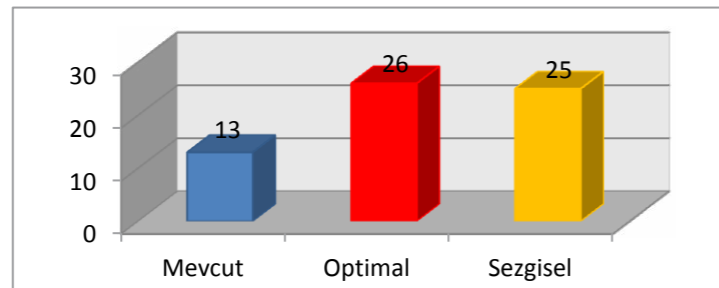


Şekil 3. Çevrim Süresi Karşılaştırması

çözümde 19,3 dakika, sezgisel algoritmayla ise 20,8 dakika olarak bulunmuştur. Çevrim zamanı cinsinden optimal çözümde %44,85'lik, sezgisel algoritmanın çözümünde %40,61'lik bir iyileşme görülmüştür. Matematiksel modelin çevrim zamanı ile sezgisel algoritmanın bulunduğu çevrim zamanı arasında 1,5 dakika yani %7,69 gibi küçük bir fark vardır.

Şekil 4'te görüldüğü üzere mevcut sistemde vardiyalık üretim 13 traktördür. Oysa ki, optimal çözüme göre bir vardiyada 26 traktör üretilebilecektir. Yani, vardiyalık üretim cinsinden %100'lük bir iyileşme görülmüştür. Sezgisel algoritmaya göre ise bir vardiyada 25 traktör üretilebilecektir. Yani, vardiyalık üretim cinsinden %92,3'lük bir iyileşme görülmüştür.

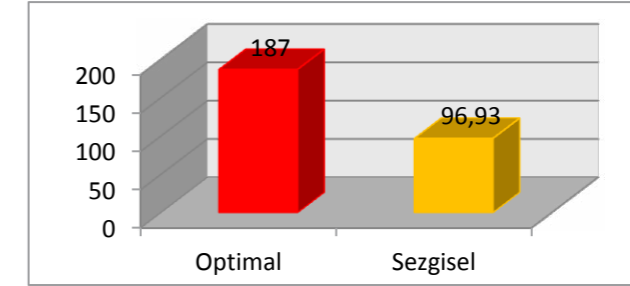
Mevcut sistemde işçiler sürekli farklı işlerde ve farklı istasyonlarda çalıştıkları için işçilerin gerçek doluluk oranları hesaplanamamıştır. Dolayısıyla elde edilen optimal sonuca ve sezgisel algoritma sonucuna göre, her bir işçinin doluluk oranları hesaplanmış ve sistemdeki toplam dengesizlik miktarı bulunmuştur.



Şekil 4. Vardiyalık Üretim Karşılaştırması

Şekil 5'te görülebilecek bu oranlara göre dengesizlik miktarı, optimal çözüm için %187, sezgisel algoritma için %96,92 bulunmuştur. Cplex Optimization Studio 12.2'de matematiksel model çevrim zamanı 20,8 alınarak çözdürülmüş ve toplam iş yükü dengesizliği %91,96 olarak bulunmuştur. Modelin asıl amacı, çevrim zamanını en küçüklemektir. Optimal sonuçta bulunan dengesizlik miktarı, en küçük çevrim zamanı için asgari dengesizlik miktarıdır. Sezgisel algoritma sonucunda çevrim zamanı optimal sonuçtan daha büyük çıktığı için ilgili dengesizlik miktarı daha düşük bulunmuştur. Elde edilen bütün sonuçlar bazında işçilerin doluluk oranları karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma Tablo 7'de gösterilmiştir. Tablo 7'deki durum, 1 çevrim zamanını en küçüklemek amacı için sonuçları ifade etmektedir. Durum 2 ise amaç fonksiyonu toplam iş yükü dengesizliğini en küçüklemek olduğundaki sonuçlardır.

Ayrıca bir işçi grubundaki en büyük doluluk oranının en küçük doluluk oranından çıkartılıp en büyük doluluk oranına bölünmesiyle her bir işçi grubu için



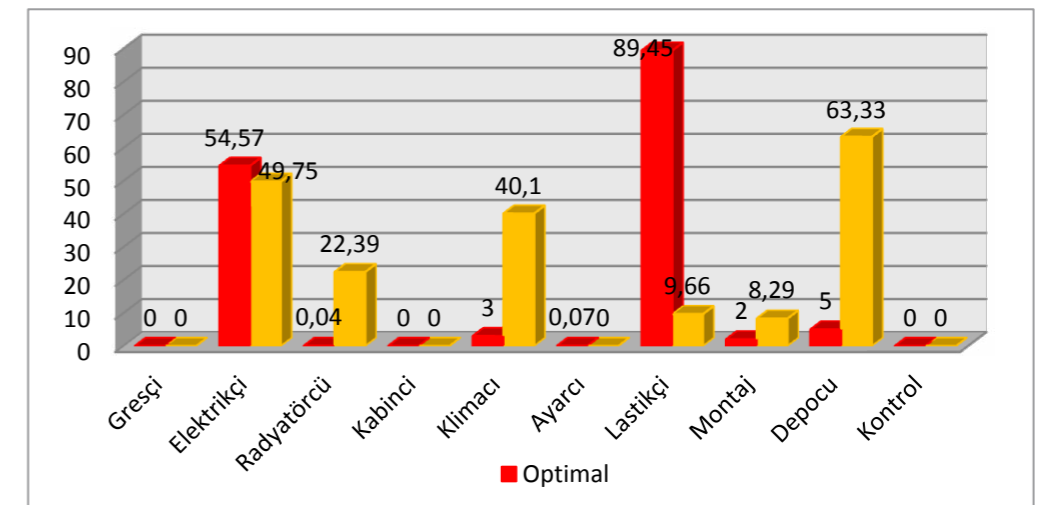
Şekil 5. Toplam Dengesizlik Miktarları Karşılaştırması

Tablo 7. Elde Edilen Çözümlere Göre İşçilerin İş Yükleri

İŞÇİ	DURUM 1	DURUM 2	SEZGİSEL	İŞÇİ	DURUM 1	DURUM 2	SEZGİSEL
A	81,86	81,86	79,95	L	99,94	99,93	92,97
B	45,6	28,96	29,84	M	100	100	92,62
C	11,91	63,94	38,77	N	33,86	83,06	45,79
D	73,57	44,93	59,38	O	54,92	8,76	41,37
E	69,94	83,32	67,62	P	33,16	12,55	42,81
F	95,33	83,35	87,14	R	62,17	82,87	43,91
G	71,5	71,5	66,86	S	41,45	35,1	31,5
H	71,5	71,5	66,86	T	27,46	35,81	34,35
I	73,1	77,42	94,34	U	76,68	50,6	54,64
J	94,81	74,83	61,57	V	26,94	53,41	41,96
K	60,62	76,82	56,51	Y	17,1	17,1	15,38

dengesizlik oranları hesaplanmıştır. Bu oranlar Şekil 6'da karşılaştırılmıştır.

Elde edilen bütün çözümlere göre grup içi dengesizlik oranları Tablo 8'de gösterilmiştir. Yapılan



Şekil 6. Her Bir İşçi Grubunun Dengesizlik Oranı Karşılaştırması

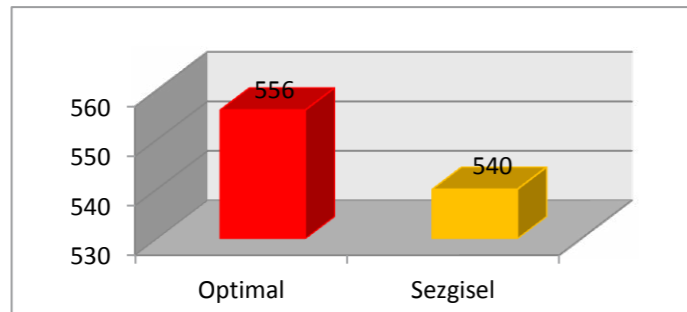


gözlemler sonucunda optimal çözüm ile de, sezgisel çözüm ile de, işçilerin doluluk oranlarının mevcut sistemden daha yüksek oldukları tespit edilmiştir. Yani, işçilerin atıl oldukları zamanlar azaltılmıştır. Bu sayede sistemin verimliliği artırılmıştır. Aynı zamanda, işçiler sürekli olarak aynı iş sırasında çalışacakları için işçi kaynaklı hataların azalacağı da öngörülmektedir.

cağı, sonraki iki ay için ise 20 olacağı varsayılmıştır. Dördüncü ayın sonundan itibaren optimal çözüm uygulanırsa vardiyalık üretim 26, sezgisel çözüm uygulanırsa 25 olacaktır. Bu varsayımlarla optimal çözüm uygulanması durumunda firma ilk yıl için 556 milyon TL, sezgisel çözüm uygulanırsa 540 milyon TL gelir artışı sağlayabilecektir. Gelir tahminleri karşılaştırılması Şekil 7'de gösterilmiştir.

**Tablo 8.** Elde Edilen Çözümlere Göre İşçi Gruplarının İş Yükü Dengesizlik Oranları

İŞÇİ GRUBU	DURUM 1	DURUM 2	SEZGİSEL
GRESÇİ	0,00	0,00	0,00
ELEKTRİKÇİ	83,81	54,57	49,75
RADYATÖRCÜ	26,63	0,04	22,39
KABİNCİ	0,00	0,00	0,00
KLİMACI	36,00	3,00	40,10
AYARCI	0,06	0,07	0,00
LASTİKÇİ	87,48	89,45	9,66
MONTAJ	50,41	2,00	8,29
DEPO	77,70	5,00	63,33
KONTROL	0,00	0,00	0,00



**Şekil 7.** İlk Yıl İçin Tahmini Gelir Karşılaştırması

Son olarak, yapılan çalışmanın uygulanmasıyla firmanın ilk yıl için ne kadar gelir artışı sağlayabileceği tahmin edilmeye çalışılmıştır. Bu tahmin yapılırken öğrenme zorluklarından dolayı işçilerin yeni sisteme alışmalarının zaman alacağı düşünülmüştür. Bu sebeple, yeni sistem uygulanmaya başladıktan sonra ilk iki ay içinde vardiyalık üretim miktarının 15 ola-

### 7.1 Duyarlılık Analizleri

Çözümlerin incelenmesinden sonra aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- Elektrikçi grubunda bulunan bir işçi ile lastikçi grubunda bulunan iki işçinin fazla işçiler olduğu gözlemlenmiştir. Bu işçiler çıkartılıp model tekrar

çözdürüldüğünde çevrim süresinin değişmediği; fakat amaç fonksiyon değerinin, yani aynı işçi grubunda bulunan işçiler arasındaki iş yükü dengesizliğinin, %48 oranında iyileştiği görülmüştür. Bu sonuç, sezgisel algoritmanın içinde bulunan işçi sayısı hesaplama algoritmasıyla karşılaştırılmış ve sezgisel algoritmaya göre de aynı işçilerin sistemde fazlalık olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca, bu işçiler çıkartılıp problem tekrar sezgisel algoritmayla çözdürülmüş ve çevrim süresinin orada da değişmediği gözlemlenmiştir.

- Ayarıcı iş grubunda çalışan iki işçi, yeni sistemin darboğazlarıdır. %100'lük iş yükü ile çalışmaktadırlar. Fazla işçilerden birinin bu gruba atanmasıyla çevrim süresi 18,03 dakikaya düşmektedir. Fazla olan bu işçilere bazı diğer işler için de eğitim verilerek bu işçilerin, bir işçi işe gelmediği takdirde onun görevini üstlenebileceği düşünülmüştür. Bu şekilde sistemin, işçilere olan bağımlılığı azaltılabilecektir. Dolayısıyla, günlük işçi eksikliğinin sistemi olumsuz etkilemesi, çevrim zamanının artması ve vardiyalık üretimin düşmesi gibi durumların önüne geçilebilir. Ayrıca eldeki imkânlar kullanılarak, fazla işçilerin darboğaz olan gruplarda kullanılması ve istasyon sayısının 9'a çıkarılması ile vardiyalık üretim miktarı, firmanın orta dönemli hedefi olan 30'a yükseltilebilir.

## 8. ÖNERİLEN ÇÖZÜMÜN KURULUŞTA UYGULAMA PLANI

Kurulan doğrusal programlama modelinin istenilen koşullarda çalışması sonucunda elde edilen çözümün firmada uygulanabilir olduğuna karar verilmiştir. Bu doğrultuda Erkunt Traktör A.Ş'ye sunulacak yeni iş, işçi ve istasyon atamaları sonucu firmayla ortak olarak geliştirilecek bir uygulama planı ortaya konulacaktır. Bu aşamada mavi yakalı ve beyaz yakalı çalışan eğitimleri, hat içinde senkronizasyon ve sisteme alışma problemleri, hat dışı etkenlerin hat ile bağlantısında oluşabilecek senkronizasyon problemleri oluşabilir. Bu problemlerin detayı ve önerilen çözümler aşağıda açıklanmıştır.

**Çalışan Eğitimleri:** Oluşturulan yeni atamalar sonucunda özellikle mavi yakalı çalışanların çalışma sistemlerinde bazı değişikliklerin yapılması gerekeceği gözlemlenmiştir. Yeni atamaların gerçekleştirilebilmesi için mavi yakalı çalışanlara eğitim verilmesi öngörülmüştür. Bu aşamada beyaz yakalı çalışanların, eğitimlerde görev almaları, ayrıca ileride yapılacak yeni uygulamalar/geliştirmeler için bilinçli olmak adına proje grubu tarafından eğitime tabi tutulmaları düşünülmüştür. Bu aşamada karşılaşılabilecek zorluk olarak, farklı alanlarda eğitim almış ve uzmanlaşmış çalışanların yeni sistemi benimsemekte güçlük çekmeleri gösterilebilir.

**Hat İçi Senkronizasyon Problemleri:** Çalışan eğitimlerinin tamamlanması sonucu uygulama aşaması gerçekleştirilecektir. Uygulama aşamasında, alınacak eğitimin ne denli faydalı olduğu ortaya çıkacaktır. İyi eğitim almış çalışanların hat üzerinde daha az kayıp zaman ile yeni istasyon ve yeni sıralamalarına alışmaları beklenir. Ayrıca, uzun süredir aynı sıralamada ve aynı istasyonda çalışan işçilerin, hızlı bir şekilde yeni sisteme adapte olmalarını beklemek gerçekçi olmayacaktır. Bu yüzden yeni sisteme alışma süresinin yeterli olacak şekilde hesaplanması, uygulama planının ise aşama aşama gerçekleştirilmesi düşünülmektedir. Bu aşamada karşılaşılabilecek zorluk olarak, yeni sisteme alışma süresinin, firma tarafından kabul edilebilecek süreden uzun olarak önerilmesi gösterilebilir.

**Hat Dışı Senkronizasyon Problemleri:** Hattı besleyen sistemlerin de boş zaman kayıplarına sebebiyet vermemeleri için, hatta uyum sağlamaları gerekmektedir. Bu sebeple hem hatta kullanılan malzemelerin tedariki hem de hattı besleyen boya fırınının geliştirilmesi gerekmektedir. Hem mekanik hem de çalışan etkenli bir durum oluşturduğu için, yeni sistemin aşama aşama gerçekleşecek bir uygulama planına göre uygulanması düşünülmektedir. Bu aşamada karşılaşılabilecek zorluk, hattı besleyen fırının yeni çevrim zamanına adapte olabilmesi için fırının işlem zamanının azaltılamaması olabilir. Mekanik değişikliklere bağlı olan işlem zamanının azaltılması için, farklı uzmanlıktaki çalışanların görev üstlenme-

leri gerekmektedir. Ayrıca, hattı dışarıdan besleyen malzemelerin tedarikinde, hem tedarikçi firmaların hem depo çalışanlarının hem de boya öncesi hatlardaki çalışanların yeni sisteme uyum sağlayabilmeleri önemlidir. Burada öncelikli uyum, tedarikçi firma ve ambar çalışanlarından beklenmektedir. Boya öncesi hatlarda işleyen süreçler, yeni çevrim zamanına uyum sağlayabilecek hıza sahiptirler. Hat dışı süreçlerin hatta uyum sağlayabilmeleri için aşama aşama gerçekleştirilecek bir uygulama planı hazırlanmalıdır.

## 9. GENEL DEĞERLENDİRME

Yapılan çalışmada, Erkunt Traktör'de boya sonrası montaj hattı incelenmiştir. Hatta montajlanan ürün modelleri için operasyon adımları çıkartılmıştır. Her bir operasyon için yeterli sayıda veri toplanana kadar zaman etüdü yapılmaya devam edilmiştir. Hatta yapılan gözlemler ve firmadan alınan veriler ışığında yapılan analizler sonucunda; boya sonrası montaj hattındaki istasyonlarda iş standardizasyonunun olmaması, istasyonlar ve işçiler arası iş yükü dengesinin bulunmaması gibi, hattın dengesiz çalışmasından kaynaklanan problemler tespit edilmiştir.

Problemin çözümü için bir matematiksel model geliştirilmiştir. Bu matematiksel model ile çevrim zamanı ve aynı iş grubunda çalışan işçiler arasındaki iş yükü dengesizliği en küçüklenmeye çalışılmıştır. Matematiksel model, IBM ILOG CPLEX Optimization Studio 12.2 programı ile çözdürülmüş ve amaç fonksiyon değerleri hesaplanmıştır. Ayrıca, matematiksel modelle işlerin, işçiler üzerindeki sıralamaları ve işlerin başlama zamanları belirlenmiştir. İşçilerin üzerindeki işlerin sıralamasında standardizasyon ve istasyonlardaki işlerin sabitlenmesi de sağlanmıştır. Dolayısıyla, aynı sayıda işçiyle daha hızlı üretim yapabilme ve hataları daha erken ve daha kolay fark edebilme imkânları sağlanmıştır.

Önerilen standardizasyon sonucunda hatalı üretilen traktör sayısı azaltılacağı öngörülmüştür. Böylece, firmanın hatalı traktörler için ayırdığı depo alanı ve hataların giderildiği özel alan küçültülecek veya tamamıyla kaldırılmaya çalışılacaktır. Ayrıca,

bu özel alandaki işçiler de diğer alanlardaki işlere kaydırılabilecektir. Bu şekilde firma ekstra yer kazanmış olacak ve traktörlerin müşterilerin eline ulaşma süreleri kısaltılacaktır. Bu iyileştirmelerle traktör başına maliyetler azaltılacak ve firmanın kârında artışlar sağlanmaya çalışılacaktır.

Firmanın çözüm için kullanılan programı almaya-cağı düşünülerek, iyi dengeleme sonuçları veren bir sezgisel algoritma geliştirilmiş ve C++ programlama dilinde kodlanmıştır. Algoritmaya bir kullanıcı arayüzü geliştirilmiştir. Geliştirilen algoritma hat dengeleme problemini çözmesinin yanında, vardiyalık üretim miktarı girildiğinde her bir işçi grubundan kaç işçi gerekli olduğunu da hesaplayabilmektedir. Bu sayede, firmaya planlarını daha doğru yapma imkânı ve işçi maliyetlerini azaltma imkânı da sunulmuştur. Ayrıca, yapılan çalışmalar sonucunda üretim kapasitesini arttırmanın firma için envanter artışına sebep olmayacağı değerlendirilmektedir. Çünkü, firma ürettiğini satabilme imkanına sahiptir.

## TEŞEKKÜR

Bu projenin başarıyla tamamlanması için her türlü desteği sağlayan Genel Müdür Yardımcısı M. Ceyhan Ergün'e, Metot Mühendislik Müdürü A. Cenk Çivici'ye ve Erkunt Traktör Sanayi A.Ş.'ye teşekkür ederiz.

## KAYNAKÇA

1. Ağpak, K., Gökçen, H. 2002. "Basit U Tipi Montaj Hattı Dengeleme Problemine Bulanık Programlama Yaklaşımı," Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen ve Mühendislik Dergisi, 4(2), 29-40.
2. Baybars, İ. 1986. "A Survey of Exact Algorithms for The Simple Assembly Line Balancing Problem," Management Science, 32(8), 909-932.
3. Baykasoglu, A., Dereli, T. 2009. "Simple and U-type Assembly Line Balancing by Using an Ant Colony Based Algorithm," Mathematical and Computational Applications, 14(1), 1-12.
4. Becker, C., Scholl, A. 2009. "Balancing Assembly Lines with Variable Parallel Workplaces: Problem Definition

- and Effective Solution Procedure," European Journal of Operational Research, 199, 359-374.
5. Bryton, B. 1954. "Balancing of a Continuous Production Line" M.S. Thesis, Northwestern University, Evanston, IL.
6. Chaves, A.A., Lorena, L.A.N., Corrêa, F.A. 2008. "Clustering Search Heuristic for the Capacitated P-median Problem," Advances in Soft Computing, 44, 136-143.
7. Chica, M., Cordon, O., Damas, S., Bautista, J. 2010. "Multiobjective Constructive Heuristics for the 1/3 Variant of the Time and Space Assembly Line Balancing Problem: ACO and Random Greedy Search," Information Sciences, 180(18), 3465-3487.
8. Chica, M., Cordon, O., Damas, S., Bautista, J. 2011. "Including Different Kinds of Preferences in a Multi-objective Ant Algorithm for Time and Space Assembly Line Balancing on Different Nissan Scenarios," Expert Systems with Applications, 38(1), 709-720.
9. Daniels, R.L., Mazzola, B.J., Shi, D. 2004. "Flow Shop Scheduling with Partial Resource Flexibility," Management Science, 50(5), 658-669.
10. Esmailian, G.R., Ismail, N., Sulaiman, S., Ahmad, M.M.H.M., Hamed, M. 2009. "Allocating and Balancing of Mixed Model Production Through the Parallel Assembly Lines," European Journal of Scientific Research, 31(4), 616-631.
11. Ghosh, S., Gagnon, R.J. 1989. "A Comprehensive Literature Review and Analysis of the Design Balancing and Scheduling of Assembly Systems," International Journal of Production Research, 27, 637-670.
12. Gökçen, H., Ağpak, K. 2006. "A Goal Programming Approach to Simple U-Line Balancing Problem," European Journal of Operational Research, 171(2), 577-585.
13. Gökçen, H., Benzer, R., Ağpak, K. 2006. "Balancing of the Parallel Assembly Lines," International Journal of Production Economics, 103(2), 600-609.
14. Hailemariam, D. 2009. "Mixed Model Assembly Line Balancing Using Simulation Techniques," M.S. Thesis, Addis Ababa University.

15. Kao, H.H., Yeh, D.H., Wang, Y.H., Hung, J.C. 2010. "An Optimal Algorithm for Type-I Assembly Line Balancing Problem with Resource Constraint," African Journal of Business Management, 4(10), 2051-2058.
16. Kurşun, S., Kalaoglu, F., Bahadır, Ç., Göcek, İ. 2007, "A Study of Assembly Line Balancing Problem in Clothing Manufacturing by Simulation," ASM '07 The 16th IASTED International Conference on Applied Simulation and Modelling, 94-98.
17. Küçük, B., Keskinürk, T. 2006. "Montaj Hattı Dengeleme-Genetik Algoritma Operatörlerinin Etkinliklerinin Araştırılması," Yöneylem Araştırması / Endüstri Mühendisliği (YA/EM) XXVI. Ulusal Kongresi, Kocaeli, 390.
18. Merengo, C., Nava, F., Pozzetti, A. 1999, "Balancing and Sequencing Manual Mixed-Model Assembly Lines," International Journal of Production Research, 37(12), 2835-2860.
19. Orbak, A.Y., Cengiz, T.G., Ulusoy, İ., Akgöz, H.K., Kiriş, M., İrice, G. 2009. "Bir Otomotiv Yan Sanayi Firmasında Tek Modelli ve Karışık Modelli Montaj Hattı Dengeleme Problemi," Endüstri Mühendisliği Dergisi, 22(1), 21-30.
20. Salverson, M. E. 1955. "The Assembly Line Balancing Problem," Journal of Industrial Engineering, 18-55.
21. Scholl, A., Becker, C. 2004. "State-of-the-art Exact and Heuristic Solution Procedures for Simple Assembly Line Balancing," European Journal of Operational Research 168, 666-693.
22. Scholl, A., Klein, R. 1997. "SALOME: A Bidirectional Branch and Bound Procedure for Assembly Line Balancing," INFORMS Journal on Computing, 9, 319-334.
23. Tapkan, P., Ozbakir, L., Baykasoglu, A. 2012. "Modeling and Solving Constrained Two-sided Assembly Line Balancing Problem via Bee Algorithms," Applied Soft Computing, 12(11), 3343-3355.
24. Yano, C.A., Bolat, A. 1989. "Survey, Development, and Application of Algorithms for Sequencing Paced Assembly Lines," Journal of Manufacturing and Operations Management, 2, 172-198.

**EKLER****Ek 1.** Amaç Fonksiyonlarına Göre Kullanım Sıklıkları

Amaç fonksiyonu	Kullanılma sıklıkları				
	SMD	SMS	MMD	MMS	Toplam
<b>Teknik</b>					
İstasyon sayısını en küçükleme	16	2	2	1	21
Çevrim süresini en küçükleme	13	1	2	0	16
Boş vakti en küçükleme	9	0	3	0	12
Gecikmeleri dengeleme	2	0	1	0	3
Hat uzunluğunu en küçükleme	0	0	2	0	2
Akış süresini en küçükleme	0	0	1	0	1
Çevrim süresini geçen istasyonların olasılığını en küçükleme	0	1	1	1	3
<b>Toplam</b>	<b>40</b>	<b>4</b>	<b>12</b>	<b>2</b>	<b>58</b>
<b>Ekonomik</b>					
İş gücü birleşik maliyetini en küçükleme	0	3	0	1	4
İş gücü birim maliyetini en küçükleme	3	1	0	0	4
Verimsiz işlerin toplam ceza maliyetlerini en küçükleme	0	0	2	0	2
Envanter, başlangıç maliyeti ve boş zaman maliyetlerini en küçükleme	0	0	1	0	1
Proses sürecinde stok maliyetini en küçükleme	0	1	0	0	1
Kârı en büyükleme	1	0	0	0	1
<b>Toplam</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>3</b>	<b>1</b>	<b>13</b>

**Ek 2.** Çözüm Yöntemlerine Göre Kullanım Sıklıkları

Çözüm için kullanılan teknikler	Kullanılma sıklıkları				
	SMD	SMS	MMD	MMS	Toplam
<b>Kesin Metotlar</b>					
Doğrusal programlama	1	0	0	0	1
Tamsayı programlama	7	0	1	0	8
Dinamik programlama	4	2	0	0	6
Amaç programlama	1	0	0	0	1
En kısa yol programlama	2	0	2	0	4
En büyükleme yol programlama	1	0	0	0	1
Dal ve Sınır	11	1	0	1	13
<b>Toplam</b>	<b>27</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>1</b>	<b>34</b>
<b>Kesin olmayan Metotlar</b>					
Öncelik sıralaması ve atama	10	5	7	2	24
Ağaç araması	8	1	0	0	9
Ticaret ve transfer	1	2	1	0	4
Rastgele örnekleme	3	1	0	0	4
Diğerleri	5	3	1	2	11
<b>Toplam</b>	<b>27</b>	<b>12</b>	<b>9</b>	<b>4</b>	<b>52</b>

**Ek 3.** Sezgisel Algoritma Akış Şeması