
BİR OTOMASYON TEKNOLOJİLERİ ÜRETİCİSİNDE STANDART ZAMAN HESAPLAMA VE MONTAJ HATTI DENGELEME YAZILIMI GELİŞTİRİLMESİ

*Ali ATAHAN**
*Mertcan KAPUAĞASI**
*Ümüþ Nur KOÇ**
*Burcu ÇAĞLAR GENÇOSMAN**
*Tülin İNKAYA**

Alınma: 18.09.2017; düzeltme: 05.12.2017; kabul: 19.03.2018

Öz: Bu çalışmada, bir otomasyon teknolojileri üreticisinde ürün çeşitliliği yüksek olan iki montaj hattı ele alınmıştır. Montaj hatlarında üretilen ürünlerin standart zamanlarının eksik olduğu ve operatörlerin iş yüklerinde dengesizlikler olduğu gözlemlenmiştir. Bu çalışma, üretimdeki darboğazların ortadan kaldırılmasını, sürekli akışın sağlanmasını ve iş gücü verimliliğini arttırmayı hedeflemektedir. İlk aşamada, standart zamanları belirlemek için ön tanımlı zaman sistemleri olan MTM-1 ve MTM-UAS karşılaştırılmıştır. Hızlı ve doğruya yakın sonuçları nedeniyle MTM-UAS seçilmiştir. Ürünlerin özelliklerini ve üretim operasyonlarını içeren bir veri tabanı oluşturularak tüm ürünler için MTM-UAS ile standart zamanlar belirlenmiştir. İkinci aşamada, karışık modelli montaj hattı dengeleme problemi için tamsayı programlama modeli geliştirilmiştir ve pilot bir uygulamada model doğrulanmıştır. Ancak, tüm ürünler için matematiksel model ile hızlı ve etkin bir şekilde çözüm elde edilememiştir. Bu nedenle, tavlama benzetimi tabanlı bir algoritma önerilmiştir. Önerilen algoritmanın parametreleri deneysel tasarım ile belirlenmiştir. Son aşamada, önerilen yaklaşımın firmada kullanımını kolaylaştırmak amacıyla iki modüllü bir yazılım geliştirilmiştir. Önerilen yaklaşım ile bir ürün için standart zaman hesaplama ve iş talimatı hazırlama süresi beş günden 27 saniyeye düşürülmüştür. Bunun yanı sıra, iş gücü verimliliğinde ürün başına ortalama %6 oranında iyileşme ve yıllık üretim kapasitesinde %6,7 oranında artış sağlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Karışık modelli montaj hattı dengeleme, tavlama benzetimi, standart zaman, MTM-UAS.

Development of a Software for Standard Time Calculation and Assembly Line Balancing in an Automation Technology Manufacturer

Abstract: In this study, two assembly lines with high product diversity are considered in an automation technology manufacturer. It has been observed that the standard times of the products produced in the assembly lines are incomplete, and there is imbalance in the workloads of the operators. This study aims to eliminate the bottlenecks in the production, to provide continuous flow, and to increase workforce productivity. In the first phase, the predefined time systems MTM-1 and MTM-UAS are compared to determine the standard times. MTM-UAS is chosen due to its fast and close to accurate results. Creating a database that contains the product specifications and production operations, the standard times for all products are determined by MTM-UAS. In the second stage, an integer programming model has been developed for the mixed model assembly line balancing problem, and the model is verified in a pilot application. However, for all products, a solution cannot be obtained quickly and efficiently with the

* Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Bursa, 16059, Türkiye
İletişim Yazarı: Burcu ÇAĞLAR GENÇOSMAN (burcucaglar@uludag.edu.tr)

mathematical model. For this reason, an algorithm based on simulated annealing is proposed. The parameters of the proposed algorithm are determined by experimental design. In the last stage, in order to facilitate the use of the proposed approach in the company, a software with two modules is developed. With the proposed approach, the time needed to calculate the standard time and prepare the work order per product has been reduced from five days to 27 seconds. In addition, an average improvement of 6% in the workforce productivity of each product and an annual production capacity increase of 6.7% are achieved.

Keywords: Mixed model assembly line balancing, simulated annealing, standard time, MTM-UAS.

1. GİRİŞ

Günümüzde kaynakların etkin ve verimli kullanımı firmaların rekabet gücünü belirlemektedir. Özellikle, ürün çeşitliliğinin yüksek ve üretim süreçlerinin farklılık gösterdiği montaj hatlarında iş yükünün kaynaklar arasında dengeli paylaşılması büyük önem arz etmektedir. Bu doğrultuda yapılan montaj hattı dengeleme (MHD) çalışmaları üretim kapasitesinde artış ve verimlilikte iyileşme sağlamaktadır.

MHD çalışmalarında üretim operasyonları ve üretim süreleri temel girdi niteliğindedir. Bu nedenle, firmada önce iş ölçümü yapılarak üretim süreçlerinin doğru ve sistematik bir şekilde analiz edilmesi, standart zamanların hesaplanması gerekir. İş ölçümü ile nitelikli bir operatörün belirli bir işi yapması için gerekli süre belirlenir. Bu esnada operatörün kişisel ihtiyaçları, yorgunluk ve bekleme gibi faktörler dikkate alınır. İş ölçümü kapsamında görevli personelin eğitilmesi, uygun tekniklerin seçilmesi, bu tekniklerin uygulanması ve standart zamanların belirlenmesi gerekir. Ürün çeşitliliğinin yüksek olduğu ve manuel işlemlerin bulunduğu üretim sistemlerinde bu süreç uzun sürmektedir. İş ölçümünün doğru, hızlı ve verimli yapılmasını sağlayan, MHD ile entegre edilebilecek yaklaşımlara ihtiyaç duyulmaktadır.

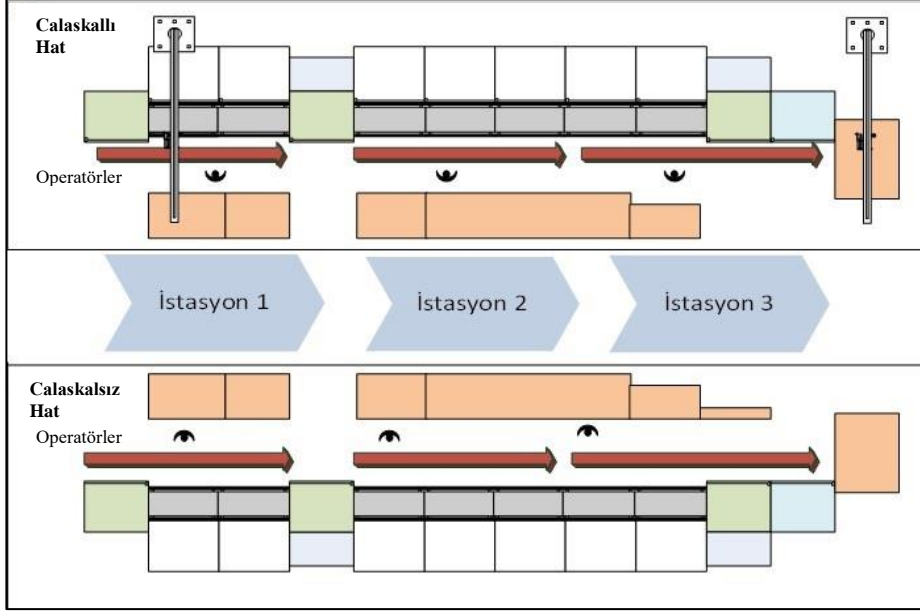
Bu çalışma, tahrik ve kontrol teknolojileri alanında faaliyet gösteren bir firmada gerçekleştirilmiştir. Firma 72.000 m²'si kapalı alan olmak üzere 120.000 m²'lik bir alan üzerinde 1000'e yakın çalışan sayısı ile faaliyet göstermektedir. Fabrikada iş, taşıma, istifleme, orman, tarım iş makineleri ile tır gibi karayolu yük taşıtlarının hidrolik sistemlerinde yer alan eksenel pistonlu pompa ve motorları, kontrol valf grupları ile şanzımanları üretilmektedir. Firmanın üretim hacminin %90'undan fazlası Avrupa ve dünya pazarlarına ihraç edilmektedir.

Çalışmada bu firmada bulunan iki montaj hattı ele alınmıştır. Hatlarda toplam 4578 çeşit pompa üretimi gerçekleştirilmekte olup hatların birinde calaskal mevcuttur. Ürünler, üretim süreçlerindeki benzerliklere göre dört ürün ailesine ayrılmaktadır. Standart ve Ventilli ürün aileleri calaskalsız montaj hattında, Calaskallı Standart ve Calaskallı Ventilli ürün aileleri ise calaskallı montaj hattında üretilmektedir. Şekil 1'de calaskallı ve calaskalsız montaj hatlarına ait yerleşim planı görülmektedir. Hatlar üç istasyondan oluşmaktadır ve her istasyonda bir operatör çalışmaktadır. Şekil 1'de oklarla gösterildiği gibi montaj hatlarında tek yönlü düz akış mevcuttur. İstasyon 1'de montaja hazırlık aşamaları ve pres işlemleri gerçekleştirilmektedir. İstasyon 2 ve İstasyon 3'te ise yarı mamullerin ürüne montajı yapılmaktadır ve ürün İstasyon 3'te tamamlanmaktadır.

Yapılan sistem analizi sonucunda, montaj hatlarında üretilen ürünlerin standart zamanlarının olmadığı gözlenmiştir. Ayrıca hatlarda çalışan operatörlerin iş yükleri arasında dengesizlikler olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle, hatlarda beklemeler ve dar boğazlar oluşmaktadır.

Bu çalışma, montaj hatlarında düzenli bir akış sağlayarak dar boğazların ve beklemelerin ortadan kaldırılması ile operatörler arasındaki iş yükünün dengelenmesini amaçlamaktadır. Öncelikle, standart zamanları belirlemek için ön tanımlı bir zaman sistemi olan MTM yöntemi kullanılmıştır. Bu kapsamda, MTM-1 ve MTM-UAS yöntemleri karşılaştırılmıştır. Hızlı ve doğruya yakın sonuçları ile MTM-UAS yöntemi seçilmiştir. Sonrasında, üretilen tüm ürünler için MTM-UAS analizine göre standart zamanları ile iş talimatlarını belirleyen bir yaklaşım

önerilmiştir. Daha sonra, operatörler arasındaki iş yükünü dengelemek amacıyla karışık modellenmiş montaj hattı dengeleme problemi ele alınmıştır. Firma, montaj hattı yerleşim düzeninde herhangi bir değişiklik yapmadan, sıfır maliyetle bir dengeleme yapılmasını istemektedir. Bu kapsamda, problem için tamsayı programlama modeli önerilmiş ve model pilot bir çalışma ile doğrulanmıştır.



Şekil 1:
Montaj Hatlarının Yerleşim Planı

Önerilen matematiksel model ile montaj hatlarında üretilen tüm ürünler için hızlı ve etkin bir çözüm elde edilememiştir. Bu nedenle, montaj hattı dengelemesi için tavlama benzetimi tabanlı bir algoritma geliştirilmiştir. Son olarak, önerilen yaklaşımın firmada kullanımını kolaylaştırmak amacıyla bütünleşik bir yazılım geliştirilmiştir. Yazılımın ilk modülü ile standart zamanlar elde edilmekte, ikinci modül ile montaj hattı dengelemesi yapıp iş talimatları oluşturulmaktadır.

Bu çalışma, ürünlerin standart zamanlarını ve iş talimatlarını otomatik olarak hesaplayan, montaj hattını dengeleyen bütünleşik bir yazılım sunması itibariyle literatüre katkı sağlamaktadır. Böylece, insan faktörünü gerçekçi bir şekilde dikkate alarak montaj hattı dengeleme yapılmaktadır. Ayrıca, bu çalışma ile firmanın yıllık üretim kapasitesinde ve iş gücü verimliliğinde artış sağlanmıştır. Önerilen yaklaşım firmada uygulanmaya başlanmıştır.

Çalışmanın geri kalan bölümleri şöyle düzenlenmiştir. İkinci bölümde, konuyla ilgili literatürdeki çalışmalar verilmiştir. Üçüncü bölümde, önerilen yaklaşım açıklanmıştır. Dördüncü bölümde, önerilen yaklaşımın firmada uygulama aşaması yer almaktadır. Çalışmanın son bölümünde, elde edilen sonuçlar özetlenmiştir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1. MTM ile İş Ölçümü

Açılımı “Methods Time Measurement” olan MTM ön tanımlı bir zaman sistemidir (Longo ve diğ., 2009). MTM herhangi bir manuel operasyonu veya metodu gerçekleştirmek için gerekli olan temel hareketleri analiz eden, her harekete hareketin doğası ve gerçekleşme şartları göz

önüne alınarak önceden tanımlanmış standart süreyi atayan bir prosedürdür (Maynard ve diğ., 1948).

MTM'in farklı jenerasyonları mevcuttur. İlk ve temel jenerasyon olan MTM-1 bir operasyonu uzanmak, tutmak, götürmek, yerleştirmek, bırakmak gibi temel hareketlere ayırır. Her temel hareket için önceden tanımlı bir standart zaman vardır. Bir operasyonun tamamlanması için gereken toplam süre, temel hareketlerin standart zamanlarının toplamına eşittir. Uygulamanın kolaylaştırılması amacıyla MTM-2, MTM-3, MTM-UAS (Üniversal Analiz Sistemi) gibi sistemler geliştirilmiştir (Laring ve diğ., 2002). Günümüzde en sık kullanılan MTM-UAS olup seri tipi üretim sistemlerinde tercih edilmektedir (Laring ve diğ., 2002). MTM-UAS'da temel hareketler birleştirildiği için bir operasyonun analiz edilmesi için harcanan süre azalmaktadır. Ancak, MTM-UAS'da standart zamanlar belirli bir tolerans dahilinde elde edilmektedir (H/JF MTM Institut, 2015). Örneğin, "yardımcı alet ile bir işlem yapmak" operasyonu MTM-1'de sırasıyla uzanmak, tutmak, götürmek, yerleştirmek, götürmek ve bırakmak olmak üzere altı hareket ile ifade edilirken aynı operasyon MTM-UAS'da tut-kullan (handle aid) tek bir hareket olarak tanımlanmıştır.

Literatürde MTM yöntemi çeşitli çalışmalarda kullanılmıştır (Tseng ve Tang, 2006; Çakmakçı ve Karasu, 2007). Çakmakçı ve Karasu (2007) hazırlık sürelerini azaltmak için SMED yöntemini kullanmışlardır. SMED çıktılarının sürekliliğini sağlamak için iyi ayarlanmış standart zamanlara ihtiyaç duymuşlardır. Bu amaçla, MTM-UAS analiziyle kalıp değişim süreleri iyileştirilmiş, standartlaştırılmış ve optimal kalıp değişim prosedürü oluşturulmuştur. Tseng ve Tang (2006) standart montaj sürelerinin belirlenmesinde MTM analizinden faydalanmışlardır. Montaj sırası belirleme ve montaj hattı dengeleme işlemlerini sıralı ve ürün bazlı olarak ele alıp problemin çözümü için genetik algoritma yaklaşımı geliştirmişlerdir.

Bu çalışmada, ürünlerin standart zamanlarının belirlenmesi için MTM-1 ve MTM-UAS sistemleri karşılaştırılarak firma için uygun olan sistem seçilmiştir. Ayrıca, ürünlerin standart zamanlarını otomatik hesaplayan bir yazılım geliştirilmiştir.

2.2. Montaj Hattı Dengeleme

Bir montaj hattı ardışık olarak sıralanmış, malzeme taşıma sistemleri ile bağlı istasyonlardan oluşmaktadır. Her istasyonda operatörler, makineler veya robotlar tarafından bir ya da birden fazla operasyon gerçekleştirilmektedir.

Hat yerleşimi problemleri mantıksal ve fiziksel yerleşim olmak üzere ikiye ayrılmaktadır (Delchambre, 1996). Mantıksal yerleşimde, bir dizi istasyona operasyon atanması ve hat boyunca istasyon sıralarının belirlenmesi amaçlanır (Scholl ve Becker, 2006; Erel ve Gökçen, 1999; Pastor ve diğ., 2002). Fiziksel yerleşimde ise montaj hatları tesis yerleşimi probleminin özel bir hali olarak ele alınır ve istasyon boyutları, malzeme saklama alanları ile benzeri unsurlar dikkate alınarak alan gereksinimleri belirlenir (Gökçen ve Erel, 1998; Lapiere ve Ruiz, 2004; Aksaraylı ve Altuntaş, 2009; Karadede ve diğ., 2016). Bu çalışmada mantıksal hat yerleşimi problemi ele alınmıştır.

Mantıksal hat yerleşimi problemleri montaj hattı dengeleme ve kaynak planlama problemleri olarak ikiye ayrılır (Rekiek ve diğ., 2001). Bu çalışmanın odak noktası olan montaj hattı dengeleme, özellikle manuel hatlarda hedeflenen üretim seviyesini koruyarak operasyonların istasyonlar arasında dengeli dağılımını amaçlamaktadır.

Montaj hattı dengeleme problemleri ile ilgili geniş bir literatür mevcuttur. Bu alanda yapılan çalışmalar, montajı yapılan model çeşitliliği, hattın yerleşimi ve kontrol tipi, otomasyon seviyesi gibi kriterlere göre sınıflandırılmaktadır (Boysen ve diğ., 2008; Boysen ve diğ., 2009; Battaia ve Dolgui, 2013). Bunlara ilave olarak, problemin amaç fonksiyonuna göre MHD problemleri Tip I ve Tip II olmak üzere iki gruba ayrılır (Scholl, 1995). Tip I'de sabit çevrim süresinde istasyon sayısının minimizasyonu hedeflenirken, Tip II'de ise sabit istasyon sayısı

kullanılarak çevrim zamanının minimizasyonu hedeflenmektedir. MHD problemlerinde montajı yapılan model çeşitliliğine göre yapılan sınıflandırma ise şöyledir:

a) Tek Modelli Montaj Hattı Dengeleme (TMHD): Yüksek hacimlerde tek tip ürünün ya da tek tip modelin üretilmesinde kullanılan, tip dönme süresi bulunmayan montaj hatlarıdır (Boysen ve diğ., 2008).

b) Karışık Modelli Montaj Hattı Dengeleme (KMHD): İki veya daha fazla benzer ürün veya bir ürünün değişik modellerinin aynı anda ve karışık olarak üretildiği, tip dönme sürelerinin yok denecek kadar az olduğu montaj hatlarıdır (Boysen ve diğ., 2008).

c) Çok Modelli Montaj Hattı Dengeleme (ÇMHD): Farklı ürünlerin veya bir ürünün farklı modellerinin ayrı yığınlar hâlinde ve değişik zamanlarda üretildiği montaj hatlarıdır. Bir ürünün üretimi bitmeden başka ürünün üretimine başlanmaz. Her model, bu hat üzerinde ayrı bir yığın oluşturur (Boysen ve diğ., 2008).

MHD problemlerinde düz hatların yanı sıra paralel, iki yönlü ve paralel iki yönlü hatlar da görülebilmektedir. Bu problem türleri için literatürde çok sayıda çalışma vardır (Özcan ve Toklu 2009; Özcan ve diğ., 2010; Küçükkoç ve Zhang 2016). Bu çalışmalarda kesin yöntemler ile sezgisel yöntemler geliştirilmiştir.

Bu çalışmada incelenen iki montaj hattı, tek yönlü düz hatlar olup üretilen model çeşitliliği ve tip dönme süreleri dikkate alındığında KMHD problemi Tip II grubu olarak sınıflandırılmıştır. Literatürde benzer problem için çeşitli çözüm yöntemleri geliştirilmiştir.

Gökçen ve Erel (1997), KMHD problemini ele almış ve problemin çözümü için hedef programlama modeli geliştirmişlerdir. Modelde her operatör için atama kısıtı, birbirini takip eden operasyonlarda öncelik ilişkilerini tanımlayabilmek için öncelik kısıtı, mevcut çevrim süresinden daha küçük bir çevrim süresi elde etmek için çevrim süresi kısıtı, kaç operatör çalışacağını belirlemek için istasyon kısıtı ve bölge kısıtı kullanılmıştır. İstasyon kısıtı, çevrim süresi kısıtı ve bölge kısıtı için hedefler tanımlanmıştır. Erel ve Gökçen (1999) ise KMHD problemini en kısa yol formülasyonu ile modellemişlerdir. Yazarlar önceki çalışmalarındaki (Gökçen ve Erel, 1997) öncelik ve atama kısıtını kullanarak bir operasyonun sadece bir operatör tarafından yapılacağını belirtmiştir. Amaç, toplam boş zamanın en küçüklenmesidir. Simaria ve Vilarinho (2004) Tip II grubu KMHD probleminin çözümü için bir matematiksel model önermişlerdir. Amaç fonksiyonu olarak çevrim zamanının ve operatör sayısının minimizasyonu hedeflenmiştir. Ele alınan gerçek hayat problemi için kısıt ve ikili değişken sayısı büyük olduğundan sezgisel yöntemler dikkate alınmıştır ve iteratif ilerleyen bir genetik algoritma yaklaşımı önerilmiştir. Altuntaş ve İşlier (2010) birliktelik kısıtları altında montaj hattı dengeleme problemini ele almışlardır. Bu çalışmada, birlikte yapılması gereken iş elemanları bir araya getirilerek aynı istasyona atamaları yapılmaktadır. Özel konum kısıtları sebebiyle geleneksel montaj hattı dengeleme yöntemlerinin uygulanamadığı büyük ölçekli bir montaj hattı için “En Büyük Aday” algoritması baz alınarak sezgisel bir yöntem geliştirmişlerdir. Önerilen yöntemin firmada uygulanması için metot ve zaman etüdü yapılarak iş elemanları, işlem süreleri ve öncelik ilişkileri belirlenmiştir. Orbak ve diğ. (2011) kablo ağı üreten bir otomotiv yan sanayi firmasında tek modelli ve karışık modelli montaj hatlarını incelemişlerdir. Karışık modelli montaj hattında bir otomobilin farklı modellerine ait kablo ağı üretilmektedir. Farklı modellerde farklı operasyonlar olabildiği gibi aynı olan operasyonların süreleri de farklılık gösterebilmektedir. Bu çalışmada, bölgeleme ve gruplama kısıtlarının kullanılabildiği sıralanmış pozisyon ağırlığı yöntemi kullanılmıştır. Ramezian ve Ezzatpanah (2015) çok amaçlı KMHD problemini ele almışlardır. Önceki çalışmalardan farklı olarak operatörün becerisini dikkate alarak operatör atamalarını yapmışlardır. Yağmahan ve Emel (2015) KMHD problemi için belli bir çevrim süresinde istasyon sayısının minimizasyonunu amaçlamışlardır. Hat dengeleme problemleri NP-zor olduğundan sezgisel bir çözüm yöntemi geliştirmişlerdir. Öncelikle, hızlı ve optimale yakın çözüm üreten sıralanmış pozisyon ağırlıkları yöntemi (Helgeson ve Birnie, 1961) ile başlangıç çözümü elde edilmiştir. Sonrasında, ilk çözümdeki dengesizlikleri gidermek için yasak arama algoritmasına dayalı pürüzsüzleştirme algoritması önerilmiştir.

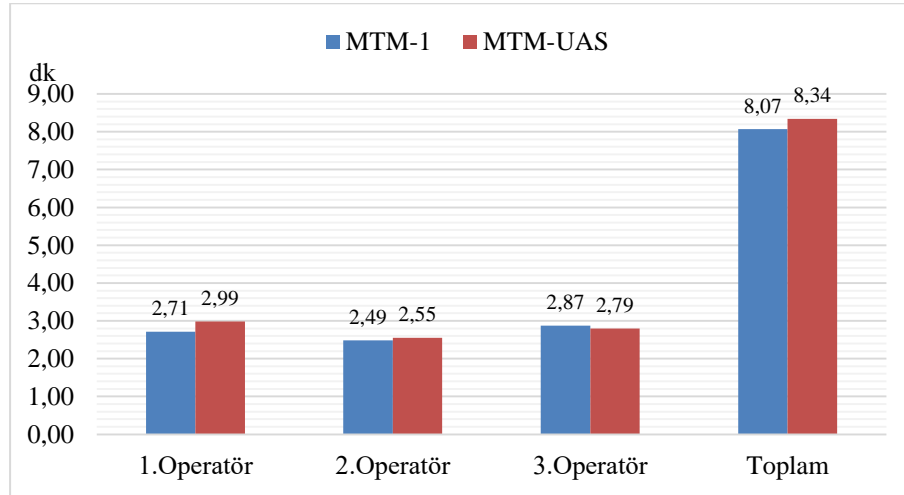
Bu çalışmada, ürün çeşitliliğinin yüksek olduğu ve manuel işlemlerin bulunduğu bir üretim sisteminde iş ölçümü ve KMHD problemi bütünlük olarak ele alınmıştır. Standart zamanlar otomatik olarak belirlendikten sonra KMHD problemi için girdi olarak kullanılmıştır. Firmanın hedefleri doğrultusunda her bir istasyondaki ortalama iş yükünün dengelenmesine yönelik tavlama benzetimi temelli bir algoritma geliştirilmiştir.

3. ÖNERİLEN YAKLAŞIM

Önerilen yaklaşım iki aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada, ürünlerin standart zamanlarını belirlemek için uygun yöntem seçilerek süreleri otomatik olarak hesaplayan bir algoritma geliştirilmiştir. İkinci aşamada, montaj hattı dengeleme problemi için matematiksel modelin yanı sıra tavlama benzetimi temelli bir sezgisel önerilmiştir.

3.1. Standart Zamanların Hesaplanması

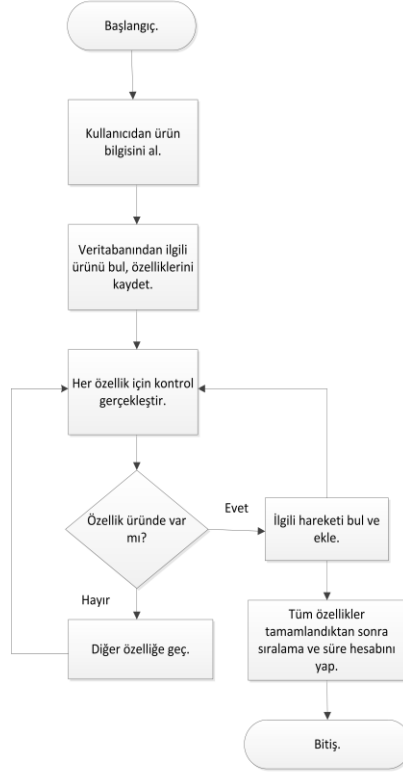
Montaj hattında üretilen örnek bir ürünün standart zamanının hesaplanması için MTM-1 ve MTM-UAS sistemleri karşılaştırılmıştır. İki sisteme göre üç operatörün iş yükleri Şekil 2’de verilmiştir. Ayrıca Operatör 1’in gerçekleştirdiği üç operasyon için detaylı MTM-UAS analizi EK 1’de örnek olarak verilmiştir. Benzer şekilde, bütün operasyonların analiz edilmesi MTM-1 ile on beş gün sürerken MTM-UAS ile altı gün sürmüştür. MTM-1 ile 802 adımda yapılan analiz, MTM-UAS ile 234 adımda tamamlanmıştır. MTM-1 ile standart zamanlar doğru bir şekilde elde edilirken MTM-UAS ile standart zamanlar ortalama %3 tolerans ile elde edilmiştir. MTM-UAS standart zamanların hızlı ve doğruya yakın olarak hesaplanmasını sağlamaktadır. Bu nedenle, firmada standart zamanların hesaplanmasında MTM-UAS’ın kullanılmasına karar verilmiştir.



Şekil 2:
MTM-1 ve MTM-UAS ile Operatörlerin İş Yükü Dağılımlarının Karşılaştırılması

MTM-UAS analizini tüm ürünlere otomatik olarak uygulayabilmek için bir veri tabanı oluşturulmuştur. İlk veri tabanı, tüm ürünlere olabilecek MTM-UAS hareketlerini, hareket kodlarını ve bu hareketlere ait süreleri içermektedir. İkinci veri tabanı ise her ürünün özelliklerini içermektedir. Ürünlerin özellikleri ile birinci veri tabanındaki operasyonlar Excel VBA’da yazılan bir makro ile eşleştirilerek standart zamanlar hesaplanmaktadır. Kullanıcı bir

ürünün tip numarasını girdiğinde MTM-UAS ile standart zaman hesaplaması yapan algoritmanın akışı Şekil 3'te verilmiştir. Geliştirilen yazılım ile ilk önce kullanıcıdan ürün bilgisi alınır. Veri tabanından ürünün özellikleri belirlenir ve bu özelliklerin ilgili üründe olup olmadığı kontrol edilir. Eğer özellik ilgili üründe varsa bu özelliğe ilişkin MTM-UAS hareketi standart zaman hesaplamasına dahil edilir ve sonraki özelliğin kontrolü yapılır. Eğer özellik ilgili üründe yoksa sonraki özellik için kontrol gerçekleştirilir. Bütün özellikler kontrol edildikten sonra belirlenen MTM-UAS hareketleri sıralanır ve iş talimatı oluşturulur. Belirlenen MTM-UAS hareketlerine ait sürelerin toplamı alınarak ürünün standart zamanı hesaplanır.



Şekil 3:

MTM-UAS ile Standart Zamanları Hesaplayan Algoritmanın Akışı

3.2. Montaj Hattı Dengeleme Problemi için Matematiksel Model

Firmadaki montaj hatları aşağıdaki özellikleri taşımaktadır.

- Hatlarda 4578 farklı ürünün üretimi yapılmaktadır.
- Çevrim zamanı değişkendir ve ürünler arası geçiş için tip dönme (hazırlık) süresi yok denecek azdır.
- Operasyon süreleri deterministiktir.
- Bir operasyon sadece bir istasyona atanabilir ve alt parçalara bölünemez.
- Bazı operasyonlar arasında öncelik ilişkileri vardır.
- Bir operasyonun süresi atandığı istasyondan bağımsızdır.

Firma montaj hattı yerleşim düzeninde herhangi bir değişiklik olmaksızın sıfır maliyetle bir dengeleme yapılmasını istemektedir. Bu doğrultuda, karışık modellenmiş montaj hattı dengeleme problemi için önerilen tamsayılı matematiksel model ve modele ait notasyon şöyledir.

İndisler (Kümeler aşağıda tanımlanmıştır.)

i, j : Operasyon sayısı, $i, j \in N$.

k : İstasyon sayısı, $k \in K$.

m : Tip sayısı, $m \in M$.

Kümeler

N : Operasyonlar kümesi, $N = \{1, 2, \dots, N_{max}\}$.

K : İstasyonlar kümesi, $K = \{1, 2, \dots, K_{max}\}$.

M : Tip (ürün) kümesi, $M = \{1, 2, \dots, M_{max}\}$.

PR_i : i . operasyondan direkt önce yapılan operasyonlar kümesi, $i \in N$.

Parametreler

t_{im} : m . tipte i . operasyonun süresi, $i \in N, m \in M$.

$\overline{C_m}$: m . tip için çevrim süresi üst sınırı, $m \in M$.

$W_{ik} : \begin{cases} 1, i. \text{ operasyon } k. \text{ istasyona atanabiliyorsa} \\ 0, \text{ aksi halde} \end{cases} \quad i \in N, k \in K.$

Karar Değişkenleri

$V_{ik} : \begin{cases} 1, i. \text{ operasyon } k. \text{ istasyona atanırsa} \\ 0, \text{ aksi halde} \end{cases} \quad i \in N, k \in K.$

B_{mk} : m . tipte k . istasyona atanan toplam işlem süresi ile m . tipteki ortalama istasyon yükü arasındaki sapma, $k \in K, m \in M$.

$$\min z = \sum_m \sum_k B_{mk} \quad (1)$$

$$B_{mk} \geq \frac{(\sum_i \sum_k t_{im} V_{ik})}{3} - \sum_i t_{im} V_{ik} \quad \forall m \in M, k \in K. \quad (2)$$

$$B_{mk} \geq -\frac{(\sum_i \sum_k t_{im} V_{ik})}{3} + \sum_i t_{im} V_{ik} \quad \forall m \in M, k \in K. \quad (3)$$

$$\sum_k W_{ik} V_{ik} = 1 \quad \forall i \in N. \quad (4)$$

$$\sum_k k V_{ik} \geq \sum_k k V_{jk} \quad \forall i, j \in PR_i \quad (5)$$

$$\sum_i t_{im} V_{ik} \leq \overline{C_m} \quad \forall k \in K, m \in M. \quad (6)$$

$$B_{mk} \geq 0 \quad \forall m \in M, k \in K. \quad (7)$$

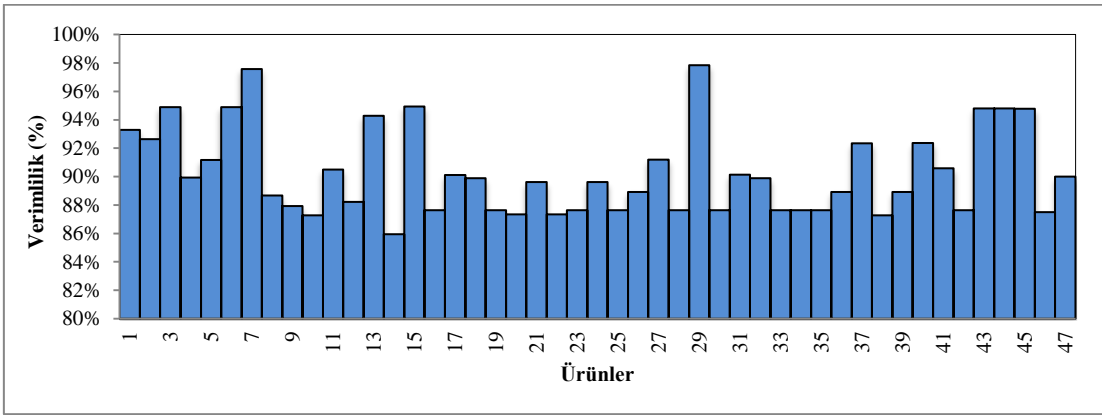
$$V_{ik} \in \{1, 0\} \quad \forall i \in N, k \in K. \quad (8)$$

Kısıt (1)'deki amaç fonksiyonu, operatörlerin iş yükleri ile ortalama iş yükü arasındaki sapmayı en küçüklemektedir. Kısıt (2) ve (3) ile operatörlerin iş yükleri ile ortalama iş yükü arasındaki pozitif ve negatif sapma hesaplanmaktadır. Kısıt (4) ile her bir operasyonun sadece bir operatöre atanması sağlanmaktadır. Kısıt (5) operasyonlar arasındaki öncelik kısıtıdır. Öncelik kısıtları ile bir operasyondan önce yapılması gereken operasyonlar tanımlanmaktadır. Kısıt (6) ile çevrim zamanı için bir üst sınır tanımlanmaktadır. Bu üst sınır ile elde edilen çevrim zamanının müşterilerin sipariş teslim sürelerini karşılaması sağlanmaktadır. Kısıt (7) ve (8) değişkenlerin çözüm uzayları tanımlanmıştır.

3.3. Matematiksel Modelin Doğrulanması

Matematiksel modelin doğrulanması için pilot bir uygulama gerçekleştirilmiştir. Pilot uygulama montaj hattında üretilen 47 tip ve bu tiplere ilişkin 89 operasyon için yapılmıştır. Operasyonlar öncelik ilişkileri ve kaynak kısıtları dikkate alınarak 49 operasyonda birleştirilmiştir. Matematiksel modeldeki PR_i , t_{im} , C_m ve W_{ik} parametrelerine ilişkin veriler firmadan elde edildikten sonra matematiksel modelin çözümü için MPL yazılımı ve Gurobi 6.0.0 çözücüsü kullanılmıştır.

Model sonucunda bir operatör için iş yükündeki ortalama sapma 1221,78 TMU olup operasyonlara ait istasyon atamaları EK 2’de verilmiştir. Ayrıca, her tip için operatör verimlilik yüzdeleri Şekil 4’te gösterilmiştir. 47 tip için ortalama verimlilik değeri mevcut durumda %72 iken matematiksel model sonucunda ortalama verimlilik %90 olarak elde edilmiştir. Böylece pilot uygulama ile verimlilikte ortalama %18 oranında iyileşme sağlanmıştır.



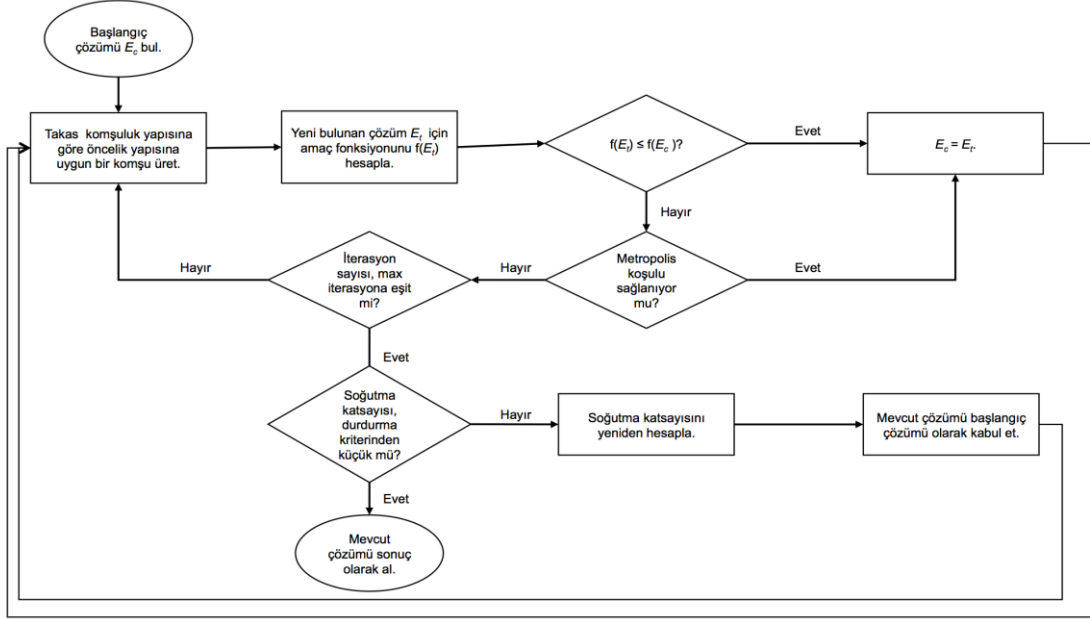
Şekil 4:
47 Ürün için Operatör Verimliliklerindeki İyileşme Yüzdeleri

3.4. Tavlama Benzetimi Algoritması

Firmaya ait gerçek boyutlu problem için (4578 tip ve 89 operasyon) tamsayı matematiksel model çalıştırıldığında bir saatlik zaman kısıtı sonucunda olurlu bir çözüm elde edilememiştir. KMHD problemi NP-zordur (Gutjahr ve Nemhauser, 1964; Gökçen ve Erel, 1998) ve büyük boyutlu problemlerde matematiksel programlama yaklaşımı ile makul sürede sonuç elde edilememektedir. Bu nedenle, literatürde KMHD probleminin çözümü için tavlama benzetimi (McMullen ve Frazier, 1998; Manavizadeh ve diğ., 2013; Roshani, ve Ghazi, 2017), yasadık arama (Lapierre ve diğ., 2006; Yağmahan ve Emel, 2015), genetik algoritma (Simaria ve Vilarinho, 2004; Tasan ve Tunali, 2008), sürü zekası (McMullen ve Tarasewich, 2003; Baykasoğlu ve Dereli, 2008) gibi metasezgisel yöntemler ile farklı metasezgiselleri birlikte kullanan hipersezgisel (Akpınar ve diğ., 2013) yöntemler önerilmiştir. Bu çalışmada, karışık montaj hattı dengeleme probleminde hızlı ve etkin sonuçlar vermesi itibarıyla tavlama benzetimi algoritması kullanılmıştır.

Tavlama benzetimi algoritması, bir komşuluk arama algoritması olup katıların tavlama sürecini temel almaktadır (Kirkpatrick ve diğ., 1983; Ayan, 2009; Manavizadeh ve diğ., 2013). Algoritma, başlangıç bir çözüm ile başlar ve bir komşuluk yapısında olasılıksal olarak arama işlemi gerçekleştirir. Algoritma, yerel optimal çözümlere takılmamak için sıcaklık (T) kontrol parametresini kullanır. Yüksek sıcaklıklarda algoritma $e^{-\left(\frac{f(E_t)-f(E_c)}{T}\right)}$ kabul olasılığı ile mevcut çözümü (E_c) amaç fonksiyonu değeri daha kötü olan komşu çözüm (E_t) ile değiştirebilir. Sıcaklık düştükçe kabul olasılığı düşer ve böylece çözümler optimal çözüme yakınsar

(Manavizadeh ve diğ., 2013). Tavlama benzetimi algoritmasının genel akışı Şekil 5'te verilmiştir (McMullen ve Frazier, 1998).



Şekil 5:

Tavlama Benzetimi Algoritmasının Akış Şeması (McMullen ve Frazier, 1998)

Literatürde KMHD problemlerinin çözümünde tavlama benzetimi algoritmasını kullanan çalışmalar mevcuttur. McMullen ve Frazier (1998) çok amaçlı KMHD problemini ele almışlardır. İşlem süreleri stokastik olan ve paralel istasyonlar bulunan bir montaj hattı için tavlama benzetimi algoritması geliştirmişlerdir. Manavizadeh ve diğ. (2013) Tip I olarak sınıflandırılan U-tipi KMHD problemi için tavlama algoritması kullanarak hat dengeleme yapmışlardır. İstasyon sayılarını belirledikten sonra kabiliyetlerine göre dört sınıfa ayırdıkları operatörlerin istasyonlara atamasını incelemişlerdir. Roshani ve Ghazi (2017) KMHD probleminde bir istasyona birden fazla operatörün atanabildiği durumu ele almışlardır. Tavlama benzetimi algoritması ile operatör ve istasyon sayısını eş zamanlı olarak minimize etmeyi amaçlamışlardır.

Literatürdeki çalışmalardan farklı olarak, bu çalışmada amaç fonksiyonu operatörlerin iş yükleri ile ortalama iş yükü arasındaki sapmayı en küçüklemek olup istasyon ve operatör sayıları sabittir. İşlem süreleri MTM-UAS ile belirlenmiştir ve deterministiktir. Ayrıca, montaj hattında paralel istasyonlara izin verilmemektedir.

Firma için önerilen tavlama benzetimi algoritması aşağıdaki adımlardan oluşmaktadır:

Adım 1: Çevrim süresi (C), başlangıç sıcaklığı (T), soğutma katsayısı (C_r), maksimum iterasyon sayısı (N_{max}) ve durdurma kriterlerinin (Metropolis katsayısı- T_{min}) başlangıç değerleri belirlenir. Başlangıç çözümü üretmek amacıyla öncelik ilişkilerine göre sıralanmış operasyonlar ilk istasyondan başlanarak istasyonlara atanır. Bir istasyona atanan işlem sürelerinin toplamı belirlenen üst sınırı aştığında sonraki istasyona geçilir ve operasyonlar bu istasyona atanır. Bu şekilde bütün operasyonlar istasyonlara atanır. Bu atama başlangıç çözümü olarak alınır. Başlangıç çözümü, mevcut çözüm (E_c) ve en iyi çözüm (E_b) olarak kaydedilir ve Adım 2'ye geçilir.

Adım 2: Mevcut çözüm kullanılarak komşu çözüm üretilir. İki operasyon (X) ve (Y) rassal olarak seçilir. Bu operasyonların yer değiştirmesi, öncelik kısıtları dikkate alınarak kontrol edilir. Y operasyonu X operasyonundan önce yapılabiliyorsa komşu çözüm üretilir. Aksi halde, olurlu bir komşu çözüm üretilene kadar farklı iki operasyonun rassal olarak seçilmesi işlemi

tekrarlanır. Üretilen komşu çözüm için amaç fonksiyonu değeri (E_t) hesaplanır ve Adım 3'e geçilir.

Adım 3: Komşu ve mevcut çözümlerin amaç fonksiyonu değerleri arasındaki fark $\delta E = E_t - E_c$ hesaplanır. Bu fark *enerji değişimi* (δE) olarak adlandırılır. Eğer enerji değişimi negatif ise ($E_t < E_c$), komşu çözüm mevcut çözümden daha iyi bir amaç fonksiyonu değeri vermektedir. Dolayısıyla komşu çözüm, mevcut çözüm olarak atanır ve Adım 4'e gidilir. Aksi halde Adım 5'e gidilir.

Adım 4: Eğer mevcut çözümün amaç fonksiyonu değeri (E_c) en iyi çözümden (E_b) küçükse, mevcut çözüm en iyi çözüm olarak kaydedilir. Adım 6'ya gidilir.

Adım 5: Mevcut çözümden daha büyük bir amaç fonksiyonu değeri olan komşu çözümü kabul etmek için Metropolis kriteri oluşturulur. Bu kriter ile komşu çözümün kabul edilme olasılığı $P(a) = e^{\left(\frac{-\delta E}{T}\right)}$ hesaplanır. Enerji değişimindeki negatif fark $-\delta E$ ile temsil edilirken T değeri mevcut sıcaklık değerini göstermektedir. Sonrasında (0,1) aralığında rassal bir sayı (*Rand*) üretilir. Eğer *Rand* değeri kabul olasılığından $P(a)$ küçükse, komşu çözüm mevcut çözüm olarak kabul edilir. Aksi halde mevcut çözüm değişmeden aynı kalır. Adım 6'ya gidilir.

Adım 6: T sıcaklığında mevcut iterasyon sayısı (N) maksimum iterasyon sayısına (N_{max}) eşitse Adım 7'ye gidilir. Aksi halde, N iterasyon sayısı bir birim artırılır ve Adım 2'ye gidilir.

Adım 7: Soğutma katsayısı kullanılarak T sıcaklığı güncellenir: $T = T \times C_r$. Eğer yeni T değeri T_{min} durdurma kriterinden küçükse Adım 8'e gidilir. Aksi halde, mevcut iterasyon sayısı $N=1$ yapılır ve Adım 2'ye gidilir.

Adım 8: Tavlama benzetimi algoritması tamamlanır. En iyi çözüm E_b değerini veren çözümdür.

4. UYGULAMA

4.1. Parametre Seçimi ve Pilot Çalışma

Tavlama benzetimi algoritmasındaki parametrelerin seçimi için deneysel tasarım yöntemi kullanılmıştır. Başlangıç sıcaklığı (T), soğutma katsayısı (C_r) ve maksimum iterasyon sayısı (N_{max}) olmak üzere üç faktör ele alınmıştır. Faktörlere ilişkin seviyeler şunlardır: Başlangıç sıcaklığı (T) için 4500, 5000, 5500; soğutma katsayısı (C_r) için 0,90 ve 0,95; maksimum iterasyon sayısı (N_{max}) için 3, 5, 10. Metropolis katsayısı (T_{min}) 3500 olarak alınmıştır.

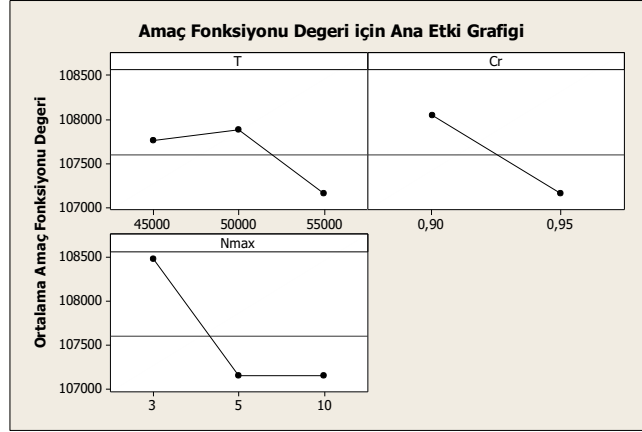
Önerilen tavlama benzetimi algoritması Excel VBA ortamında kodlanmıştır. Deneysel tasarım, pilot uygulamanın yapıldığı 47 ürün ve 49 operasyondan oluşan probleme uygulanmış, amaç fonksiyonu değeri ve çözüm süresi değerleri MINITAB programında incelenmiştir.

Amaç fonksiyonu değeri ve çözüm süresine ilişkin ana etki grafikleri Şekil 6'da ve Şekil 7'de gösterilmiştir. Şekil 6'da başlangıç sıcaklığı ve soğutma katsayısının en büyük değerleri için amaç fonksiyonu değerinde azalma gözlenmiştir. Ayrıca, maksimum iterasyon sayısı 5 ve 10 değerlerini aldığı anda amaç fonksiyonu değeri azalmaktadır. Şekil 7'de başlangıç sıcaklığı, maksimum iterasyon sayısı ve soğutma katsayısı arttıkça çözüm süresi artış göstermektedir. Amaç fonksiyonu değeri ve çözüm süresi birlikte dikkate alınarak parametre değerleri $T=5500$, $C_r=0,95$ ve $N_{max}=5$ olarak seçilmiştir.

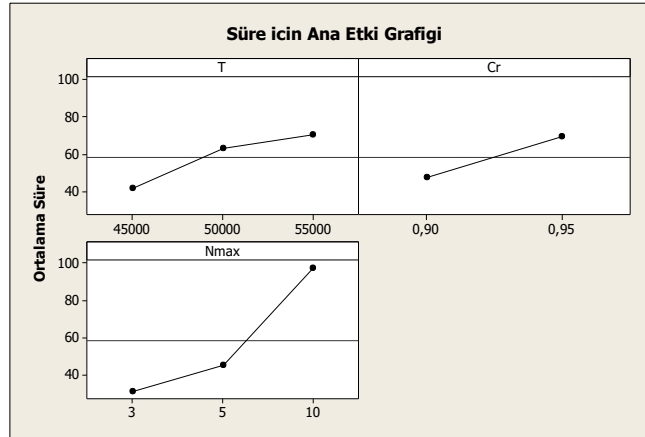
Pilot uygulamada incelenen problem 47 tip için tavlama benzetimi algoritması seçilen parametrelerle çalıştırılmıştır. Bir operatör için iş yükündeki ortalama sapma 2280 TMU olup operasyonlara ait istasyon atamaları EK 2'de verilmiştir.

Mevcut durumdaki verimlilik değerleri, matematiksel modelden ve tavlama benzetimi algoritmasından elde edilen verimlilik değerleri ile Şekil 8'deki gibi karşılaştırılmıştır. Matematiksel model ile bulunan çözüm tüm tiplerde en yüksek verimlilik değerlerini vermektedir. Tavlama benzetimi algoritması ile elde edilen verimlilik değerleri ikinci sırada yer almaktadır ve tüm tiplerde mevcut durumdaki verimlilik değerlerine göre iyileşme

sağlamaktadır. Özetle, 47 tip için ortalama verimlilik değeri mevcut durumda %72 iken matematiksel model sonucunda ortalama verimlilik değeri %90, tavlama benzetimi algoritması sonucunda ise %81 olarak elde edilmiştir. Böylece, matematiksel model ile verimlilikte ortalama %18, tavlama benzetimi ile verimlilikte ortalama %9 iyileşme sağlanmıştır.



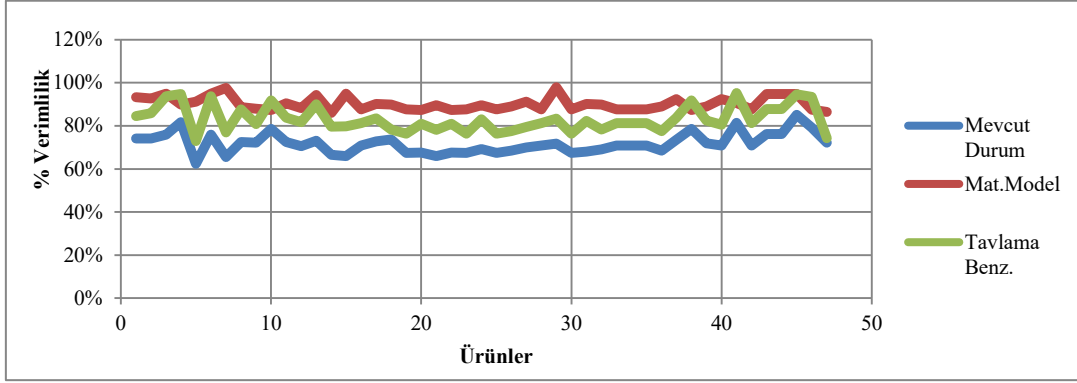
Şekil 6:
Amaç Fonksiyonu Değeri için Ana Etki Grafiği



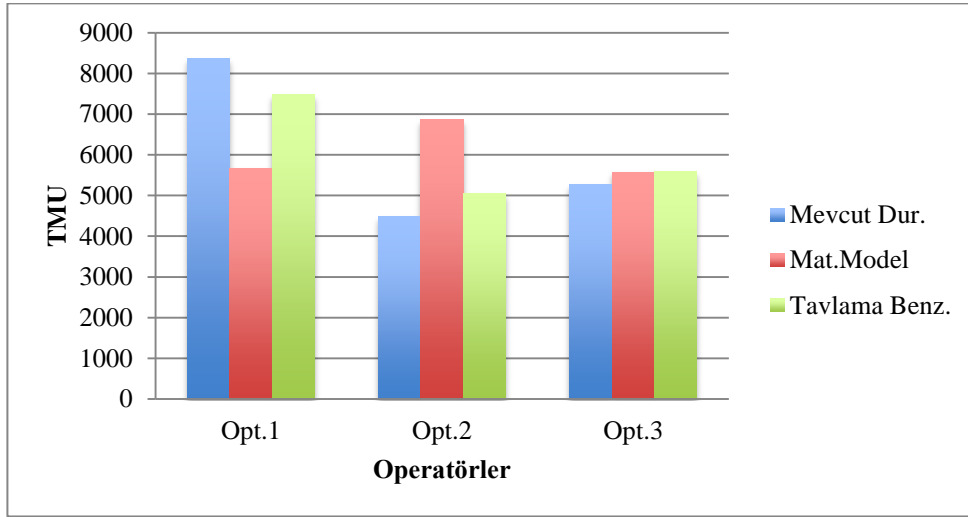
Şekil 7:
Çözüm Süresi için Ana Etki Grafiği

Örnek bir tip ürün için operatörlerin doluluk oranları incelenmiş ve mevcut durumdaki doluluk oranları, matematiksel model ve tavlama benzetimi algoritmasından elde edilen doluluk oranları ile Şekil 9'da görüldüğü gibi karşılaştırılmıştır. Mevcut durumda operatörler arası iş yükü dağılımlarının ortalamadan sapma değeri 4664,9 TMU iken bu değer tavlama benzetimi algoritması ile 2869,6 TMU'ya düşürülmüştür. Matematiksel model çözümü ile ortalamadan sapma değeri 1658,3 TMU olarak bulunmuştur. Dolayısıyla, mevcut duruma göre operatörlerin doluluk oranları matematiksel model ile iyileştirilmiştir ve dengeli bir iş yükü dağılımı sağlanmıştır. Bununla birlikte, tavlama benzetimi algoritması ile elde edilen operatörlerin doluluk oranları da mevcut duruma göre daha dengelidir.

Sonuç olarak, pilot çalışma ve yapılan analizler önerilen sezgisel yaklaşımın lisanslı bir yazılım satın almadan üretim sisteminde iyileşme sağladığını göstermektedir.



Şekil 8:
Pilot Uygulama (47 Tip) için Verimlilik Değerlerinin Karşılaştırılması



Şekil 9:
Örnek Bir Tip için Operatör Doluluk Oranlarının Karşılaştırılması

4.2. Önerilen Yaklaşımın Firmada Uygulanması

Montaj hatlarında üretilen ve üretim süreçleri birbirine benzerlik gösteren dört ürün ailesi için tavlama benzetimi algoritması uygulanmıştır. Her ürün ailesindeki ürün sayısı, mevcut durumdaki ve tavlama benzetimi algoritması ile elde edilen ortalama verimlilik değerleri Tablo 1’de verilmiştir. Buna göre, Standart ürün ailesi %3’lük verimlilik artışı ile iyileşmenin en az olduğu ürün ailesi olup, Calaskallı Standart ürün ailesi ise %12’lik verimlilik artışı ile iyileşmenin en çok olduğu ürün ailesidir.

4.3. Geliştirilen Yazılım

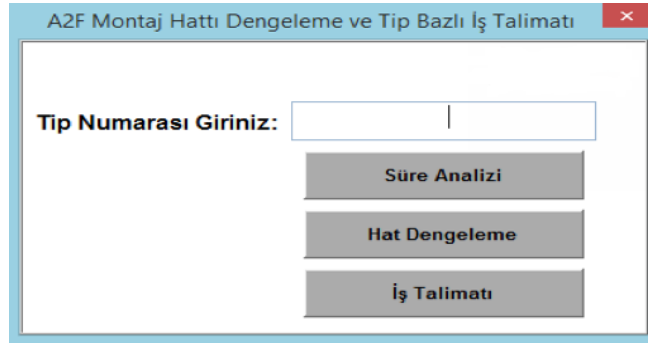
Önerilen yaklaşımın firmada kullanımını kolaylaştırmak amacıyla MTM-UAS ile standart zamanları hesaplayan ve montaj hattı dengeleme yapan bütünlük bir yazılım geliştirilmiştir. Yazılımın ara yüzü Excel VBA ortamında kodlanmıştır.

Yazılımın ilk modülünde, kullanıcı ara yüze ürünün numarasını girip “Süre Analizi” butonuna bastığında ürünün özellikleri ve özelliklerine göre operasyon süreleri otomatik toplanarak ürünün standart zamanı hesaplanmaktadır. Yazılımın standart zaman hesaplama modülüne ait ara yüz ve sonuç ekranı Şekil 10 ve Şekil 11’de görülmektedir.

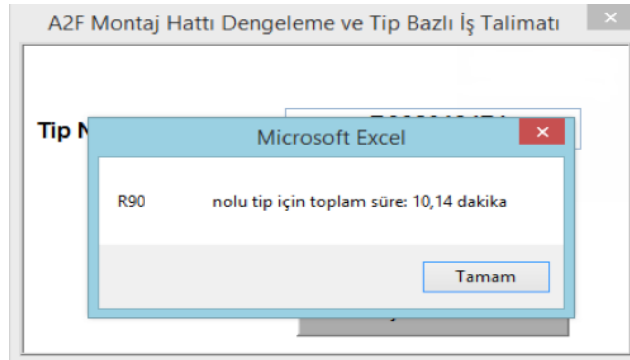
Tablo 1. Mevcut Sistem ve Tavlama Benzetimi Algoritması ile Elde Edilen Verimlilik Değerlerinin Karşılaştırması

	Ürün aileleri			
	Montaj Hattı 1		Montaj Hattı 2	
	Standart	Ventilli	Calaskallı Standart	Calaskallı Ventilli
Tip Adedi	1843	624	1233	879
Mevcut Verimlilik (Ortalama)	%76	%79	%73	%74
Tavlama Benzetimi Algoritması ile Verimlilik (Ortalama)	%79	%82	%85	%80

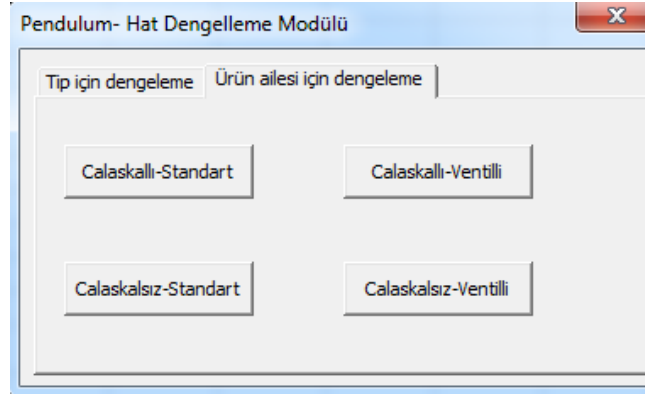
Yazılımın ikinci modülünde, kullanıcı seçilen bir ürün ailesi için tavlama benzetimi algoritması ile montaj hattı dengeleme yapabilmektedir. Ayrıca, tip için dengeleme seçeneği kullanılarak hatta tek tip üretildiği durumdaki (tek modellenli montaj hattı dengeleme problemi) operasyon atamaları ve iş yükü dengesi yapılabilmektedir. Bu seçenekte, operatör sayısı değiştirilebilmektedir. Aynı zamanda, her operatöre atanan operasyonları sırasıyla açıklayan iş talimatları elde edilebilmektedir. Yazılımın montaj hattı dengeleme modülüne ilişkin ara yüzler Şekil 12 ve Şekil 13'te, oluşturulan iş talimatı ise Şekil 14'te görülmektedir.

**Şekil 10:**

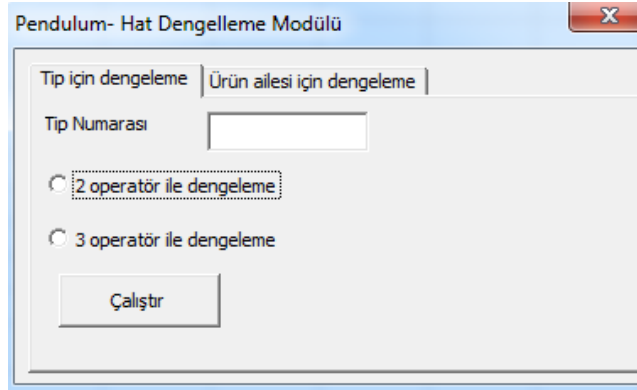
Yazılımın Standart Zaman Hesaplama Modülü için Ara Yüz

**Şekil 11:**

Yazılımın Standart Zaman Hesaplama Modülü için Sonuç Ekranı



Şekil 12:
Yazılımın Montaj Hattı Dengeleme Modülü için Ara Yüz – Ürün Ailesi için Dengeleme



Şekil 13:
Yazılımın Montaj Hattı Dengeleme Modülü için Ara Yüz – Ürün Tipi için Dengeleme

A2F Montaj
R90
Calaskallı - Standart

1 2 3

Σ te (dk) 8,22 Çevrim te (dk) 2,89 Plan WE 95%

İş Planı

Sıra	İş No	İş Tanımı	Süre	Birim
10	230,240	Triebwerk yerleştirme	41,60	sn
11	260	Steuerplatt.WT altına yerleştirme	6,47	sn
12	270,280	Triebwerk birinci Pres İşlemi	25,96	sn
13	290	Passscheiben montajı	2,88	sn
14	300	O-Ring-kanallarını supurge ile temizleme	10,61	sn

Şekil 14:
Örnek bir Ürün için İş Talimatı

5. SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında, otomasyon teknolojileri alanında faaliyet gösteren bir firmanın montaj hatlarında ürünlerin standart zamanlarını hesaplayan ve montaj hatlarını dengeleyen bütünlük bir yazılım geliştirilmiştir. Geliştirilen yazılım ile firmada aşağıdaki iyileştirmeler sağlanmıştır:

- Mevcut durumda MTM-UAS analizlerini tamamlamak için bir montaj hattında üç eğitimli operatör görevlendirilmiştir. Görevlendirilen operatörler MTM-UAS analizini öğrenmek amacıyla altı aylık eğitim sürecinden geçmektedir. Eğitimli bir operatör, video çekimi ve analizler ile bir ürünün standart zamanını beş günde belirlemektedir. Bu analiz, geliştirilen yazılım ile bir ürün için 27 saniyede tamamlanmaktadır. Ayrıca, kullanıcı ürünün tip numarasını girdiğinde ürünün standart zamanı ile birlikte iş talimatını elde edebilmektedir.
- Tüm ürünler için yapılacak MTM-UAS analizi üç operatör ile yaklaşık 2,5 yıllık bir çalışma gerektirmektedir. Bu analizin iş gücü maliyeti 127.500€'dur. Geliştirilen yazılım ile bu maliyet ortadan kaldırılmıştır. Ayrıca, MTM-UAS ile görevli üç operatör firmada başka çalışmalarda bulunmak üzere değerlendirilebilecektir.
- Montaj hattı dengeleme ile tüm ürünler için ortalama %6 daha dengeli atamaların gerçekleştirildiği görülmüştür. Bir ürünün üretim zamanı ortalama 9 dakikadır ve her 4 dakikada bir ürün çıktığı kabul edildiğinde, her ürün için 21,6 saniyelik bir iyileştirme yapılmıştır. Firmanın mevcut yıllık kapasitesi 120.000 adetten 128.000 adete çıkarılarak %6,7'lik kapasite artışı sağlanmıştır.
- Yapılan çalışma firmada uygulanmaya başlamıştır. Uygulama öncesinde, hattaki operatörlere ve ekip başına yazılımın kullanımı ile ilgili bir eğitim verilmiştir. Ayrıca, montaj hatlarına yeni bir ürün eklenmesi durumunda yazılımın nasıl güncelleneceği ile ilgili bilgilendirme yapılmıştır.

Bu çalışma, literatürdeki çalışmalardan farklı olarak sanayideki iş yükü dengeleme problemlerine iş ölçümü tekniklerini entegre ederek gerçekçi bir çözüm yaklaşımı sunmaktadır. Bu kapsamda, ilk olarak tanımlı bir zaman sistemi olan MTM-UAS ile standart zamanlar otomatik olarak hesaplanmaktadır. Sonrasında, standart zamanlar girdi olarak alınıp sezgisel bir algoritma ile montaj hattında iş yükü dengeleme yapılmaktadır.

Çalışma kapsamında geliştirilen yazılım benzer montaj hatları için uygulanabilir niteliktedir. Bunun için hatta üretilen ürünlere ait veri tabanının düzenlenmesi gerekmektedir. Montaj hattındaki operatörlerin ergonomik iş yüklerinin dengelenmesi önemli bir konudur ve ileriki çalışmalarda bu konuya odaklanabilir.

TEŞEKKÜR

Çalışmayı 2209B (2241A) Sanayi Odaklı Lisans Bitirme Tezi Destekleme Programı kapsamında destekleyen TÜBİTAK'a ve bu çalışmanın firmalarında gerçekleştirilmesi için destek ve katkı sağlayan Sayın Gökhan BAKADUR ile Sayın Ömer Faruk ÇELİK'e teşekkürlerimizi sunarız.

KAYNAKLAR

1. Akpınar, S., Bayhan, G. M., ve Baykasoğlu, A. (2013) Hybridizing ant colony optimization via genetic algorithm for mixed-model assembly line balancing problem with sequence dependent setup times between tasks, *Applied Soft Computing*, 13(1), 574-589. doi: 10.1016/j.asoc.2012.07.024.
2. Aksaraylı, M. ve Altuntaş, S. (2009). Malzeme Taşıma Odaklı Planlama için Üretim Sistemlerindeki Tezgah Yerleşim Düzenlerinin Benzetim Analizi ile Karşılaştırılması. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 15(2), 203-214. (<http://dergipark.ulakbim.gov.tr/pajes/article/view/5000088813>)
3. Altuntaş, S. ve İşlier, A. A. (2010) Birliktelik Kısıtları Altında Montaj Hattı Dengeleme Problemi İçin Bir Çözüm Yaklaşımı Önerisi ve Bir İşletmede Uygulama, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 16(1), 29-44. (<http://dergipark.ulakbim.gov.tr/pajes/article/view/5000088705>)
4. Ayan, T. Y. (2009) Kaynak Kısıtlı Çoklu Proje Programlama Problemi için Tavlama Benzetimi Algoritması, *Atatürk Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 23(2), 101-118. (<http://dergipark.gov.tr/download/article-file/30242>)
5. Battaia, O. ve Dolgui, A. (2013) A Taxonomy of Line Balancing Problems and Their Solution Approaches, *International Journal of Production Economics*, 142(2), 259-277. doi: 10.1016/j.ijpe.2012.10.020.
6. Baykasoğlu, A. ve Dereli, T. (2008) Two-sided Assembly Line Balancing Using an Ant-Colony-Based Heuristic, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 36(5-6), 582-588. doi: 10.1007/s00170-006-0861-3.
7. Boysen, N., Fliedner, M., ve Scholl, A. (2008) Assembly Line Balancing: Which Model to Use When?, *International Journal of Production Economics*, 111(2), 509-528. doi: 10.1016/j.ijpe.2007.02.026.
8. Boysen, N., Fliedner, M., ve Scholl, A. (2009) Sequencing Mixed-Model Assembly Lines: Survey, Classification and Model Critique, *European Journal of Operational Research*, 192(2), 349-373. doi: 10.1016/j.ejor.2007.09.013.
9. Çakmakçı, M. ve Karasu, M. K. (2007) Set-up Time Reduction Process and Integrated Predetermined Time System MTM-UAS: A Study of Application in a Large Size Company of Automobile Industry, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 33(3-4), 334-344. doi: 10.1007/s00170-006-0466-x.
10. Delchambre, A. (1996) *CAD Method for Industrial Assembly: Concurrent Design of Products, Equipment and Control Systems*, John Wiley and Sons, Inc. Chichester, United Kingdom. ISBN: 978-0-471-96261-8.
11. Erel, E. ve Gökçen, H. (1999) Shortest-route Formulation of Mixed-Model Assembly Line Balancing Problem, *European Journal of Operational Research*, 116(1), 194-204. doi: 10.1016/S0377-2217(98)00115-5.
12. Gökçen, H. ve Erel, E. (1997) A Goal Programming Approach to Mixed-Model Assembly Line Balancing Problem, *International Journal of Production Economics*, 48(2), 177-185. doi: 10.1016/S0925-5273(96)00069-2.
13. Gökçen, H. ve Erel, E. (1998) Binary Integer Formulation for Mixed-model Assembly Line Balancing Problem, *Computers & Industrial Engineering*, 34(2), 451-461. doi: 10.1016/S0360-8352(97)00142-3.

14. Gutjahr, A. L. ve Nemhauser, G. L. (1964) An Algorithm for the Line Balancing Problem, *Management Science*, 11(2), 308-315. doi: 10.1287/mnsc.11.2.308.
15. Helgeson, W.B. ve Birnie, D.P. (1961) Assembly Line Balancing Using the Ranked Positional Weight Technique, *Journal of Industrial Engineering*, 12(6), 394-398.
16. H/JF MTM Institut (2015) Roberth Bosch GMBH MTM-UAS Document.
17. Karadede, Y., Çalışkan, S., ve Önder, H. H. (2016) Yeni Bir Yöntem Olan Mat-Layout Yazılımı İle Tesis İçi Yerleşimi Ve Bir Örnek Uygulama. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 4(1), 1-13. (<http://dergipark.gov.tr/jesd/issue/20875/224052>)
18. Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D., ve Vecchi, M. P. (1983) Optimization by Simulated Annealing, *Science*, 220(4598), 671-680. (<https://pdfs.semanticscholar.org/e893/4a942f06ee91940ab57732953ec6a24b3f00.pdf>)
19. Küçükkoç, İ. ve Zhang, D. Z. (2016) Mixed-model parallel two-sided assembly line balancing problem: A flexible agent-based ant colony optimization approach. *Computers & Industrial Engineering*, 97, 58-72. doi: 10.1016/j.cie.2016.04.001.
20. Lapierre, S.D. ve Ruiz, A. B. (2004) Balancing assembly lines: an industrial case study. *Journal of the Operational Research Society*, 55, 589-597. doi: 10.1057/palgrave.jors.2601708.
21. Lapierre, S. D., Ruiz, A., ve Soriano, P. (2006) Balancing Assembly Lines with Tabu Search, *European Journal of Operational Research*, 168(3), 826-837. doi: 10.1016/j.ejor.2004.07.031.
22. Laring, J., Forsman, M., Kadefors, R., ve Örtengren, R. (2002) MTM-based Ergonomic Workload Analysis, *International Journal of Industrial Ergonomics*, 30(3), 135-148. doi: 10.1016/S0169-8141(02)00091-4.
23. Longo, F. ve Mirabelli, G. (2009) Effective Design of an Assembly Line Using Modelling and Simulation, *Journal of Simulation*, 3(1), 50-60. doi: 10.1057/jos.2008.18.
24. Manavizadeh, N., Hosseini, N. S., Rabbani, M., ve Jolai, F. (2013) A Simulated Annealing Algorithm for a Mixed Model Assembly U-Line Balancing Type-I Problem Considering Human Efficiency and Just-In-Time Approach, *Computers & Industrial Engineering*, 64(2), 669-685. doi: 10.1016/j.cie.2012.11.010.
25. Maynard, H. B., Stegemerten, G. J., ve Schwab, J. L. (1948) *Methods-Time Measurement*, McGraw-Hill Book Company: New York.
26. McMullen, P. R. ve Frazier, G. V. (1998) Using Simulated Annealing to Solve a Multiobjective Assembly Line Balancing Problem with Parallel Workstations, *International Journal of Production Research*, 36(10), 2717-2741. doi: 10.1080/002075498192454.
27. McMullen, P. R. ve Tarasewich, P. (2003) Using Ant Techniques to Solve the Assembly Line Balancing Problem, *IIE Transactions*, 35(7), 605-617. doi: 10.1080/07408170304354.
28. Orbak, A. Y., Cengiz, T. G., Ulusoy, İ., Akgöz, H. K., Kiriş, M., ve İrice, G. (2011) Bir Otomotiv Yan Sanayi Firmasında Tek Modelli ve Karışık Modelli Montaj Hattı Dengeleme Problemi, *Endüstri Mühendisliği Dergisi*, 22(1), 21-30. (https://www.mmo.org.tr/sites/default/files/b9eb912dd985f7f_ek.pdf)
29. Özcan, U. ve Toklu, B. (2009) Balancing of mixed-model two-sided assembly lines, *Computers & Industrial Engineering*, 57(1), 217-227. doi: 10.1016/j.cie.2008.11.012.

30. Özcan, U., Çerçioğlu, H., Gökçen, H., ve Toklu, B. (2010) Balancing and sequencing of parallel mixed-model assembly lines, *International Journal of Production Research*, 48(17), 5089-5113. doi: 10.1080/00207540903055735.
31. Pastor, R., Andres, C., Duran, A., ve Perez, M. (2002) Tabu search algorithms for an industrial multi-product and multi-objective assembly line balancing problem, with reduction of the task dispersion. *Journal of the Operational Research Society* 53, 1317–1323. doi: 10.1057/palgrave.jors.2601457.
32. Ramezani, R. ve Ezzatpanah, A. (2015) Modeling and Solving Multi-Objective Mixed-Model Assembly Line Balancing and Worker Assignment Problem, *Computers & Industrial Engineering*, 87, 74-80. doi: 10.1016/j.cie.2015.04.017.
33. Rekiek, B., De Lit, P., Pellichero, F., L'eglise, T., Fouda, P., Falkenauer, E., ve Delchambre, A. (2001) A multiple objective grouping genetic algorithm for assembly line design. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 12(5-6), 467-485. doi: 10.1023/A:1012200403940.
34. Roshani, A. ve Ghazi Nezami, F. (2017) Mixed-model Multi-Manned Assembly Line Balancing Problem: A Mathematical Model and a Simulated Annealing Approach, *Assembly Automation*, 37(1), 34-50. doi: 10.1108/AA-02-2016-016.
35. Scholl, A. (1995) *Balancing and Sequencing of Assembly Lines*, Physica-Verlag, Darmstadt.
36. Scholl, A. ve Becker, C. (2006) State-of-the-art exact and heuristic solution procedures for simple assembly line balancing. *European Journal of Operations Research* 168, 666–693. doi: 10.1016/j.ejor.2004.07.022.
37. Simaria, A. S. ve Vilarinho, P. M. (2004) A Genetic Algorithm Based Approach to the Mixed-Model Assembly Line Balancing Problem of Type II, *Computers & Industrial Engineering*, 47(4), 391-407. doi: 10.1016/j.cie.2004.09.001.
38. Tasan, S. O. ve Tunali, S. (2008) A Review of the Current Applications of Genetic Algorithms in Assembly Line Balancing, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 19(1), 49-69. doi: 10.1007/s10845-007-0045-5.
39. Tseng, H. E. ve Tang, C. E. (2006) A Sequential Consideration for Assembly Sequence Planning and Assembly Line Balancing Using the Connector Concept, *International Journal of Production Research*, 44(1), 97-116. doi: 10.1080/00207540500250606.
40. Yağmahan, B. ve Emel, E. (2015) Mixed-Model Assembly Line Balancing with Smoothing Approach Based on Tabu Search Algorithm, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 30(1), 57-69. doi: 10.17341/gummfd.73501.

EKLER**EK 1. Örnek bir MTM-UAS Analizi**

Operatör 1'in gerçekleştirdiği operasyonlardan 3 tanesi için MTM-UAS analizi yapılmış ve Tablo 2'de detaylandırılmıştır. Ana operasyonlar temel hareketlerden oluşmaktadır ve her temel hareketin MTM-UAS kodu, TMU değeri, sıklık adedi, sıklığa göre değişen toplam TMU değeri ve dakika cinsinden toplam süreler verilmiştir.

Tablo 2. Operatör 1'in Gerçekleştirdiği Üç Operasyon için MTM-UAS Analizi

Temel Hareket No.	Operasyon Adı	Temel Hareketler	Kod	TMU	Sıklık	Toplam TMU	Süre (dk)
1	Gövde parçasını tezgaha götürmek ve yerleştirmek	Gövde parçasını almak ve yerleştirmek	AJ2	65	1	65	0,04
2		Vücutu döndürmek	KA	25	1	25	0,01
3		Kasaya yürümek	KA	25	1	25	0,01
4		Cıvatayı almak ve yerleştirmek	AC3	70	1	70	0,04
5		Cıvatayı takma hareketi (16 kez)	ZB1	10	1	10	0,01
6		Anahtarı kullanmak	HC3	85	1	85	0,05
7		Gövdeyi sağ ele almak ve yerleştirmek	AJ2	65	1	65	0,04
8		Cıvataları almak ve yerleştirmek	AC1	40	1	40	0,02
9		Cıvata döndürme hareketi	ZB1	10	1	10	0,01
10		Vücut hareketi	KA	25	1	25	0,01
11	Verileri girmek	Mouse kullanmak	HA3	65	1	65	0,04
12		Klavye tuşlarına basmak(yerleri farklı 19 tuş)	BA1	10	19	190	0,11
13		Tuşları çalıştırmak (2 el ile mangal ve buton)	BB3	60	1	60	0,04
14		Tepsinin dönmesini beklemek	PT	111,2	1	111,2	0,07
15		Vücut hareketi	KA	25	1	25	0,01
16	Etiket konulması	Etiketi almak ve yerleştirmek	AA1	20	1	20	0,01
17		Perçin almak ve yerleştirmek	AF1	40	1	40	0,02
18		Perçini bastırmak	ZD	20	2	40	0,02
19		Çekiç kullanmak (9 kez)	HA3	65	4	260	0,16
20		El hareketi	ZB1	10	9	90	0,05
21		Perçin almak ve yerleştirmek	AF1	40	1	40	0,02
22		Perçini bastırmak	ZD	20	1	20	0,01
23		El hareketi	ZB1	10	6	60	0,04
24		Perçin almak ve yerleştirmek	AF1	40	1	40	0,02
25		Perçini bastırmak	ZD	20	1	20	0,01
26		El hareketi	ZB1	10	8	80	0,05
27		Perçin almak ve yerleştirmek	AF1	40	1	40	0,02
28		Perçini bastırmak	ZD	20	1	20	0,01
29		El hareketi	ZB1	10	7	70	0,04
30	Yüzey kontrolü el ile (PT)	PT	27,8	1	27,8	0,02	
Genel Toplam (TMU)						1739,00	
Genel Toplam süre (dk)						1,05	

EK 2. İstasyon Atamaları

Pilot uygulamada ele alınan 47 tip için matematiksel model ve tavlama benzetimi algoritması ile elde edilen istasyon atamaları Tablo 3'te gösterilmiştir. Örnek olarak 2. operasyon matematiksel model ile 2. istasyona atanırken tavlama benzetimi algoritması 1. istasyona atanmıştır.

Tablo 3. Matematiksel Model ve Tavlama Benzetimi Algoritması ile Elde Edilen İstasyon Atamaları

Operasyon No.	Matematiksel Model	Tavlama Benzetimi	Operasyon No.	Matematiksel Model	Tavlama Benzetimi
1	1	1	26	2	2
2	2	1	27	2	2
3	2	1	28	2	2
4	2	1	29	3	3
5	2	1	30	3	2
6	1	1	31	3	2
7	1	1	32	3	2
8	2	1	33	3	2
9	1	1	34	2	2
10	1	1	35	3	2
11	1	1	36	3	2
12	1	1	37	2	2
13	2	1	38	2	3
14	2	1	39	3	3
15	2	2	40	2	3
16	2	2	41	3	3
17	2	2	42	3	3
18	2	2	43	3	3
19	2	2	44	3	3
20	2	2	45	3	3
21	2	2	46	3	3
22	2	2	47	3	3
23	2	2	48	3	3
24	2	2	49	3	3
25	2	2			

