



HETEROJEN İŞGÜCÜNE SAHİP PARALEL MONTAJ HATLARI İÇİN MALİYET YÖNELİMLİ MATEMATİKSEL BİR MODEL VE SEZGİSEL BİR YAKLAŞIM

¹Serhan KÖKHAN^{ID}, ²Ömer Faruk BAYKOÇ^{ID}, ³Selçuk Kürşat İŞLEYEN^{ID}

Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Ankara, TÜRKİYE
¹serhankokhan@gazi.edu.tr, ²baykoc@gazi.edu.tr, ³isleyens@gazi.edu.tr

(Geliş/Received: 20.12.2019; Kabul/Accepted in Revised Form: 08.01.2020)

ÖZ: Gelişen teknolojiler ile son dönemde insan, makine ve robotların üretim ortamlarında işbirlikçi şekilde çalışabilmeleri mümkün hale gelmiştir. Özellikle işbirlikçi çalışma modeli, son yılların popüler başlığı olan Endüstri 4.0 kavramı ile montaj hattı problem yapılarını aynı çatı altında değerlendirme fırsatını doğurmuştur. Bu çalışmada, bu gelişimin bir parçası olarak literatürde de önemli bir yeri olan paralel montaj hatları problemleri ve Endüstri 4.0 felsefesinin önemli bir parametresi olan insan ve robot işbirlikçi işgücünü biraraya getiren bir matematiksel model önerilmiştir. Matematiksel model, paralel montaj hatları literatüründe bulunan mevcut veri setlerinden türetilen yeni veri setleri için denenmiş ve sonuçlar analiz edilmiştir. Ardından aynı veri setleri farklı bir çözüm metodu olan Rastgele Arama Metodu (RAM) ile çözülmüş ve sonuçlar karşılaştırılarak analiz edilmiştir. Literatürde Paralel Montaj Hattı Dengeleme Problemlerinde (PMHDP) heterojen yapıda işgücüne sahip olan çok az sayıda çalışmaya rastlandığından, yapılan çalışmanın literatüre ve endüstri 4.0 kavramı altında kurulması düşünülen montaj hatları için yeni bir bakış açısı sağlayacağı düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Paralel Montaj Hattı Dengeleme, Endüstri 4.0, İnsan-Robot Etkileşimli İmalat Sistemleri

A Cost-Driven Mathematical Model and Heuristic Approach for Parallel Assembly Lines with Heterogeneous Workforce

ABSTRACT: With the developing technologies, it has become possible for people, machines and robots to work collaboratively in production environments. In particular, the collaborative working model has created an opportunity to evaluate the concept of Industry 4.0 which is the popular title of recent years and assembly line problem structures under the same roof. In this study, as a part of this development, a mathematical model which combines parallel assembly line problems and human and robot collaborative workforce which is an important parameter of Industry 4.0 philosophy is proposed. The mathematical model was tested for new data sets derived from existing data sets in the parallel assembly lines literature and the results were analyzed. Then, the same data sets were solved with a different method called Random Search Method and the results were compared and analyzed. Since there are very few studies with heterogeneous workforce in Parallel Assembly Line Balancing Problems (PMHDP), it is thought that this study will provide a new perspective for the assembly lines which are thought to be established under the concept of industry 4.0.

Key Words: Parallel Assembly Line Balancing, Industry 4.0, Human-Robot Interactive Manufacturing System

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Gelişen teknolojiler, değişen müşteri beklentileri ve rekabet koşulları ürün/hizmet sağlayıcılarını her dönem farklı çözümler aramaya itmiştir. Buna en iyi örnek olarak da sanayi devrimleri verilebilir. Son

yıllarda popülerlik kazanan, Endüstri 4.0 (4. sanayi devrimi) kavramı da yine benzer bir ihtiyaçtan ortaya çıkmıştır. Son dönemde Doğu'nun üretim teknolojisindeki gelişimi, üretim rakamlarındaki artışı ve güçlenen ekonomisi Batı için bir tehdit haline gelmiş, bu tehdit özellikle Almanya'nın başını çektiği Batılı ülkeleri; ürünlerin pazara çıkış hızı daha yüksek olan, daha esnek bir üretim yapısına sahip, kişiselleştirilmiş ürünler üretebilen ve üretimde verimliliği arttıran modelleri aramaya itmiştir. Bu arayış sürecinde bazı yeni kavramlar ve modeller ortaya atılmıştır. Akıllı imalat ve akıllı fabrikalar bu kavram ve modellerin başında yer almaktadır. Akıllı imalat sahadaki endüstriyel bilgisayarlar vasıtasıyla üretimi merkezci bir yapıdan ve aynı zamanda uzaktan kontrol edebilen, bunun yanı sıra kendi yönetimini kendisi gerçekleştirebilen sistemlerin bütünü olarak ifade edilebilir. Akıllı fabrika üretim sistemlerinin geleneksel fabrikalara göre en önemli farkı da; insan gücü ile gerçekleştirilen manuel operasyonlardaki hataların, insan yerine makineler tarafından gerçekleştirilen üretimler ve/veya otomatik kontroller sayesinde ortadan kaldırılması, üretimin her safhasında verimliliği yüksek ve üst seviyede kaliteli ürün üretilmesi olarak açıklanabilir.

Bu nedendir ki günümüzde akıllı fabrikalar geleneksel fabrikaların yerini almaya başlamıştır. Yeni üretim modellerinde robot teknolojilerinin daha yoğun ve etkin, insan gücünün tek başına daha azken robotlarla işbirlikçi olarak daha fazla kullanımı tercih edilmektedir. Bu sayede üretim alanlarının küçültülerek maliyetlerin büyük ölçüde azaltılması, daha hızlı ve kaliteli üretim ile birlikte karlılığı artırarak, müşteri memnuniyetine yüksek kalitede ürün üretimiyle üst seviyede tutulması hedeflenmektedir.

Yeni üretim modelleri ile istenen çıktının elde edilebilmesi, mevcut üretim yapılarındaki değişikliklerle veya tümüyle yeni üretim sistemlerinin oluşturulması ile mümkün olabileceği görülmektedir. Akış tipi üretim sistemlerinin en önemli başlıklarından biri olan montaj hatları tasarımı da, bu yeni üretim modelleri içerisinde önemli bir yer tutmaktadır. Günümüz üretim ihtiyaçlarının değişmesine paralel olarak montaj hatları üzerine yapılan çalışmalar da yeni uygulama örnekleriyle birlikte gelişmektedir. Son yıllarda montaj hatları tasarımının alt bir başlık olarak sınıflandırılan paralel montaj hatları tasarımı konusunda da çalışmalar yapılmaktadır. İlk olarak Gökçen ve diğ. (2006) tarafından tanımlanan paralel montaj hattı dengeleme problemi ile bu alanda yeni çalışmaların önü açılmıştır. Paralel montaj hatları özellikle talebin yeterince yüksek olduğu standart ürünlerde yüksek kapasitede üretim imkânları sağlaması nedeniyle, yeni üretim modellerinde de potansiyeli yüksek bir çalışma alanı haline gelmiştir.

Bu çalışmada yeni üretim modellerinin ihtiyaçları doğrultusunda, insanların ve robotların üretim ortamında etkin, verimli ve işbirlikçi şekilde çalışabilmesi için mevcut üretim yapılarındaki gelişimlerde göz önüne alınarak, literatürde de incelendiği kadarıyla üzerine yeterince çalışma yapılmamış bir insan-robot etkileşimli maliyet yönelimli paralel montaj hattı dengeleme problemi çalışılmıştır. Çalışma kapsamında bir matematiksel model ve bir RAM oluşturulmuş, kullanılacak veri setleri literatürde bulunan paralel montaj hattı veri setleri üzerinden farklı işgücü tipleri ve maliyetlerine göre yeniden türetilmiş, kullanılmış ve sonuçları test edilmiştir. Yapılan çalışmanın bu yönüyle paralel montaj hattı dengeleme literatürüne katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Çalışmanın ilk bölümünde Montaj Hattı Dengeleme Problemleri (MHDP) ve bu konuda yapılmış önemli çalışmalar anlatılmıştır. Ardından MHDP'nin özel bir hali olan Paralel Montaj Hattı Dengeleme Problemleri (PMHDP) ve önemli çözüm yöntemleri açıklanmıştır. 2. bölümde PMHDP başlığı altında yapılan bazı çalışmaların literatürüne değilmiş, 3. bölümde çalışılan problemin tanımı ve önerilen matematiksel model açıklanmıştır. Problem tanımı ve önerilen modelin açıklamasının ardından 4. bölümde, türetilen veri setleri ile oluşturulan matematiksel modelin ve RAM'in çalıştırılması sonucunda elde edilen çözümler analiz edilmiştir. Son bölümde de yapılan çalışmanın literatüre katkısı açıklanmış ve gelecekteki çalışmalar için öneriler sunulmuştur.

Montaj Hattı Dengeleme Problemi (MHDP) (Assembly Line Balancing Problem)

MHDP, bir veya daha fazla sayıda amacın dikkate alınarak montaj işlerinin (görevlerin) optimal şekilde iş istasyonlarına paylaştırılması kararıdır. Literatürde MHD problemlerinde konusunda birçok

çalışma mevcuttur. Salveson (1955) tarafından MHD probleminin ilk matematiksel formülasyonundan beri akademik çalışmalar genelde görevlerin istasyonlara atanması problemi olan konfigürasyon temel problemine odaklanmıştır. Ancak sonraki çalışmalar problemi u-tipi hatlar, paralel istasyonlar veya işlem alternatifleri gibi pratikle ilgili sınırları entegre ederek daha da genelleştirmeye çalışmışlardır (Becker ve Scholl, 2006).

Genel anlamdaki MHDP temelini Basit Montaj Hattı Dengeleme (BMHD) karar problemi oluşturur. Basit Montaj Hattı Dengeleme Probleminin (BMHDP) içerdiği kısıtlamalardan dolayı gerçek dünya problemlerinin karmaşıklığını yansıtmaktan uzak olsa da montaj hatlarının temel özelliklerini dikkate almasından dolayı temel problem olarak birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir. Nitekim daha az sayıda kısıt içeren daha genel problemlerin birçoğu BMHDP'nin bir tür genelleştirmesi olmakta veya karar probleminin bir aşamasında problemin BMHDP olarak çözümüne ihtiyaç duyulabilmektedir. MHD konusunda yapılan araştırmaların çoğu BMHDP'ni modellemeye ve çözmeye yöneliktir. BMHDP'nin NP-zor yapıda bir optimizasyon problemi olduğu Karp (1972) tarafından ispatlanmıştır. Dolayısıyla problemin ilgili tüm genelleştirilmiş versiyonları aynı özelliklere sahiptir.

Literatürde montaj hatlarının; paralel iş istasyonları ve görevler, maliyetler, operasyon alternatifleri, bölgesel kısıtlamalar, stokastik ve sıraya bağlı operasyon zamanları ve u-tipi montaj hatları gibi çok sayıda farklı yönü ele alınmıştır. Montaj hatları ile ilgili güncel bilgiler ve montaj hatlarının sınıflandırması ile ilgili detaylı bilgiler Becker ve Scholl (2006) ile Boysen ve diğ. (2007) çalışmalarında bulunabilir.

Paralel Montaj Hattı Dengeleme Problemleri (PMHDP) (Parallel Assembly Line Balancing Problems)

İlk olarak Gökçen ve diğ. (2006) tarafından tanımlanan PMHDP, U-tipi hatların esnekliğini ve seri hatların üretim hızı ve yerleşim alanı özelliklerini bir araya getiren, aynı veya ürünlerin yüksek miktarlarda talebi karşılayacak şekilde ortak kaynak kullanımı esasına göre dengelendiği MHD problemidir. Yapısı itibarıyla NP-zor bir problem olan MHD problemi, paralel hat yapısı ile daha da zor bir problem haline gelmiştir. MHD probleminin çözümü için literatürde çok sayıda yaklaşım söz konusudur. BMHD problemleri için kesin çözüm sunan matematiksel programlama modelleri kullanılabilir. Ancak problem boyutu büyüdükçe ve çözüm uzayı karmaşık hale geldikçe optimal çözüme ulaşma süresi artmakta hatta büyük boyutlu problemler için matematiksel programlama pratik bir çözüm sunmaktan uzaklaşmaktadır. Yüksek verimlilik seviyelerinde çalışma imkânı sağlayan montaj hatlarında talebin de yeterince yüksek olması durumunda paralel istasyonlar/görevler/hatlar kullanılarak daha yüksek verimlilik seviyelerinde çalışabilme imkânı sağlanmaktadır.

Birden fazla montaj hattının kullanılması için iki temel gerekçe söz konusudur

- Ürüne olan talebin tek bir montaj hattı tarafından karşılanamayacak kadar yüksek olması,
- Benzer ürünlere olan talebin, her bir ürünün tek bir hatta üretilecek kadar yüksek olması.

(Gökçen ve diğ., 2006).

Günümüzde birçok firma daha uzun çevrim zamanlarına sahip ve her bir istasyonun daha fazla sayıda görevden sorumlu olabileceği çoklu hatlar kurmaktadır. Uygulamada sıkça kullanılmasına rağmen paralel montaj hatları ile ilgili araştırmalar sınırlı sayıda kalmıştır. Başlangıçta mevcut talebi karşılayabilecek aynı üretim hatlarının sayısının belirlenmesi problemi ele alınmış, zaman içerisinde ise paralel görevler ve paralel istasyon yapılarını inceleyen araştırmalar yapılmıştır.

Her biri belirli bir ürün veya ürün grubunun üretimini gerçekleştiren tümüyle paralel hatlar, yüksek üretkenlikle beraber olası hatalara ve arızalara karşı daha esnek üretim imkânları sunarlar. Birden fazla hattın kullanımı durumunda, paralel hat sayısının belirlenmesi ve hangi ürünlerin hangi hatta üretileceğinin belirlenmesine dair yeni karar problemleri ortaya çıkar. Aslında tek bir hatta da paralelleştirmenin avantajları paralel istasyonlar (iş parçalarının aynı işi yapan birden fazla sayıda operatöre paylaşılması) kurulmasıyla elde edilebilir. Aynı işi yapan birden fazla çalışan demek aynı işi yapan birden fazla makine kullanılması anlamına da gelmektedir (Becker ve Scholl, 2006). Paralel istasyonların avantajlarından birisi de istenilen çevrim zamanından daha büyük zamanlı görev(ler) söz konusu olduğu durumlarda global çevrim zamanının azaltılmasını sağlamasıdır (Freeman ve Jucker,

1967). Çevrim zamanını en büyük zamanlı görevin süresinden daha aşağıya çekmenin bir yolu da paralel görevler kullanmaktır. Sıralı görevler, tamamıyla farklı iş parçaları üzerinde döngüsel olarak gerçekleştirilecek şekilde, seri hattın farklı istasyonlarına atanır. Paralel istasyon yapısının beraberinde getireceği basit maliyetlerdeki artıştan dolayı, paralel istasyonlara sahip montaj hatlarının değerlendirilmesinde maliyet odaklı amaç fonksiyonları daha uygun olmaktadır. Paralel hatların sağladığı esneklikle daha iyi hat dengeleri ve daha az boş zamanlar elde edilerek üretkenliğin ve sistem verimliliğinin artırılması sağlanabilir. Ayrıca sistemin daha az sayıda istasyon kullanması durumunda; daha düşük işçilik maliyetleri, daha az alan ihtiyaçları ve daha az süreç içi stoklar ile çalışmak mümkün olabilmektedir (Chiang ve diğ. 2007).

Paralel MHD probleminin bir tasarım problemi olarak ele alınıp çözülmesi, kaynakların daha etkin kullanımına yardımcı olarak hat verimliliğinin artırılmasını sağlayabilecektir. Günümüz rekabet şartları ve gerçek dünya uygulamalarındaki hat sayıları da dikkate alındığında, paralel MHD probleminin önemi daha da artmaktadır.

PMHDP'de Çözüm Yaklaşımları (Solution Approaches in PALBP)

PMHDP birbiriyle bağlantılı iki alt problemden oluşmaktadır. Birinci problem, paralel hatlara atanacak hat-ürün kombinasyonlarının belirlenmesi problemi, ikincisi ise ürünlerin atandığı hatların dengelenmesi problemidir. Bu iki problemin birbirini etkileyen kesişim noktası ise komşu hatlardaki istasyonların birleştirilebilme veya ortak kullanılabilme imkânıdır. Montaj hatları tasarımı ve dengelenmesine yönelik kararlar hat sayısı arttıkça zorlaşmaktadır. BMHD problemi NP-zor bir problem olduğundan, hat sayısının arttığı, paralel hatların söz konusu olduğu problemler de NP-zor sınıfta problemlerdir. PMHDP'nin çözümüne yönelik matematiksel programlama, diğer analitik yöntemlere dayalı giderek artan sayıda çalışma söz konusudur.

LİTERATÜR ÇALIŞMASI (LITERATURE STUDY)

Bu bölümde PMHDP literatürü verilmiş olup, çalışmada kronolojik bir yol izlenmiştir. İncelenen literatürde daha çok mevcut çalışmamıza alt yapı oluşturan ve ilgili literatürde önemli etkileri olan çalışmalara yer verilmiştir.

Montaj hatları ve MHD ile ilgili çok sayıda araştırma bulunmasına rağmen paralel veya çoklu hatların ele alındığı çalışmalar nispeten sınırlı sayıdadır. Literatürdeki Ghosh ve Gagnon (1989), Erel ve Sarin (1998), Rekiek ve diğ. (2002), Becker ve Scholl (2006), Boysen ve diğ. (2007), Battaia ve Dolgui (2013) çalışmaları montaj hatları ile ilgili önemli literatür özetleri sağlamakta ve gelecekteki araştırmalara rehberlik etmektedir.

PMHDP Gökçen ve diğ. (2006) tarafından tanımlanmadan önce içerisinde paralellik geçen ancak kaynakların ortak kullanımı ile eşzamanlı dengelemeyi kapsamayan çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmalar daha çok hatların bağımsız dengelenmesini ve maliyetleri incelemiştir. Birden fazla montaj hattının paralel olarak değerlendirildiği ilk çalışma Lehman (1969) tarafından gerçekleştirilmiştir. Çalışmada bir dizi ürünün belirli bir sayıdaki paralel konumlandırılmış montaj hattına atanması problemi ele alınmıştır. Wyman ve Moberly (1971) çalışmada üç farklı paralel hat yapısının simülasyon modeli sonuçları analiz edilmiştir. Chakravarty ve Shtub (1988) tarafından yapılan çalışmada, sistemin tepki zamanını en küçükleyecek hat sayısının tespiti için analitik bir model geliştirilmiştir. Paralel montaj hatlarının kullanımıyla, işçi tatmini ve üretkenliğinde yükselmeler olabileceği, Ellegard ve Jonsson'ın (1992) çalışmada gösterilmiştir. Çok modellenli üretimde üretilecek modellerin mevcut hatlara atanması problemini ele alan bir çalışma da Ahmadi ve diğ. (1992) tarafından ele alınmıştır. Bu dinamik atama problemi için optimale yakın sonuçlar üreten 3 sezgisel yaklaşım önermişlerdir. Bu alandaki önemli bir çalışma da Süer ve Dağlı (1994) tarafından gerçekleştirilmiştir. Çalışmada n farklı modelin değişken sayıdaki hatlara atanması problemi ele alınmıştır. Paralel hatların kullanılmasıyla ortaya çıkacak makine teçhizat maliyetlerinin incelendiği çalışmada Daganzo ve Blumenfeld (1994), iki veya daha fazla sayıda montaj hattının paralel veya çoklu hat olarak kullanılmasının daha yüksek teçhizat maliyetlerine neden

olacağını göstermişlerdir. Paralel MHD problemi başlığında açıklandığı üzere ortak kaynaklarla birden fazla montaj hattının eş zamanlı ortaklaşa dengelenmesi problemi ilk olarak Gökçen ve Ağpak (2004) ile Gökçen ve diğ. (2006) tarafından gösterilmiştir. Scholl ve Boysen (2009) çalışmasında önerilen çözüm yaklaşımı ve elde edilen sonuçlar Gökçen ve diğ. (2006) çalışmasıyla karşılaştırılmıştır. Esmailian ve diğ. (2008) çalışmasında paralel hat yapısında karma modellenmiş montaj hattı dengeleme problemi ele alınmıştır. Özcan ve diğ. (2009) çalışmasında PMHDP'ne tabu arama algoritması ile çözüm geliştirilmiştir. Önerilen yaklaşım amaç fonksiyonu olarak istasyon sayısının en küçüklenmesi ve istasyon yükleri arasındaki değişimlerin en küçüklenmesi amaçlarını kullanmıştır. Bu yönü ile PMHDP'nin çözümünde çok amaçlı amaç fonksiyonu kullanan ilk çalışma olmuştur. Özcan ve diğ. (2010) karma modellenmiş paralel montaj hattı dengeleme problemini ele almışlardır. İsmail ve diğ. (2011) paralel karma modellenmiş bir problem yapısını meta-sezgisel bir model ile çözümlenmiştir. Özbara ve diğ. (2011) tip1 yapısına sahip paralel montaj hattı dengeleme probleminde homojen işgücü yapısına sahip problemi çoklu karınca algoritması ile meta-sezgisel bir çalışma yapmışlardır. Mamun ve diğ. (2012) tip 1 ve karma model yapısına sahip paralel montaj hattı problemi için bir genetik algoritma geliştirmişlerdir. Kellegöz ve diğ. (2012) tip 1 ve homojen işgücü yapısına sahip paralel montaj hattı problemi için dal ve sınır kesme algoritması modellemiştir. Rabbani ve diğ. (2014) stokastik süreli sahip Tip-1 karma modellenmiş bir paralel montaj hattı problemi için hibrit genetik bir algoritma oluşturmuşlardır. Küçükkoç ve diğ. (2014) deterministik süreli, karma modellenmiş ve homojen işgücü yapısına sahip bir paralel çift taraflı montaj hattı problemi için ajan tabanlı karınca optimizasyon algoritması geliştirmişlerdir. Kellegöz ve Toklu (2015) tek modellenmiş bir paralel montaj hattı problemi için istasyonlarda çalışacak işgücü sayısını minimize etmeye çalışan bir öncelik tabanlı yapısal bir sezgisel geliştirmişlerdir. Tiaccin (2015) stokastik süreli sahip, homojen işgücü yapısında bir karma modellenmiş paralel montaj hattı problemi için çok amaçlı dengeleme modeli geliştirmiştir. Küçükkoç ve diğ. (2015) Tip-E sınıfında çift taraflı bir paralel montaj hattı problemi için koloni optimizasyon tabanlı bir karınca algoritması geliştirmişlerdir. Küçükkoç ve diğ. (2016) karma modellenmiş bir çift taraflı paralel montaj hattı problemi için esnek ajan tabanlı bir karınca algoritması geliştirmişlerdir. Li ve diğ. (2019) çoklu operatöre sahip bir montaj hattı dengeleme problemi için modifiye edilmiş bir tavlama benzetimi algoritması üzerine çalışmışlardır.

PMHDP alanında Endüstri 4.0 kavramı, heterojen ve insan&robot etkileşimli montaj hatlarını dikkate alan ilk ve tek çalışma olan ve çalışmamıza en yakın içerikte gördüğümüz Çil ve diğ. (2017) çalışmasıdır. Çil ve diğ. tarafından önerilen çalışmada, bir paralel robotik montaj hattı problemi "RPALB-II" için yeni bir matematiksel model çalışılmış, farklı tipte "heterojen" işgücünün olduğu çalışmada "Tip-II" çevrim zamanı minimizasyonu amaçlanmıştır. Matematiksel model 25 göreve kadar çözüm bulabilmiştir. Matematiksel problemin Np-Zor yapısından dolayı daha büyük görevlerde çözüm bulunamadığı için ışın arama algoritması tabanlı farklı 3 tür meta-sezgisel algoritma (DE, CS-PSO ve PSO) kullanılmış ve sonuçları analiz edilmiştir. Önerilen algoritmaların robotik montaj hatları için etkin sonuç verdiği tespit edilmiştir.

Sonuç olarak literatürde incelendiği kadarıyla PMHDP'nde heterojen yapıda işgücüne sahip ve maliyet yönelimli olan bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu çalışmada ilk kez heterojen işgücüne sahip paralel montaj hatları için maliyet yönelimli bir matematiksel model ve RAM önerilmiş, ihtiyaç duyulan veri setleri mevcut paralel montaj hattı literatüründe bulunan veri setlerindeki öncüllük ve işlem zamanları baz alınarak yeniden oluşturulmuştur.

PROBLEM TANIMI VE ÖNERİLEN MODEL (PROBLEM DEFINITION AND PROPOSED MODEL)

Ele alınan üretim ortamındaki insan&robot etkileşimli paralel montaj hattı probleminde aynı ürünü üreten aynı montaj hattı dengesine sahip 2 adet paralel montaj hattı bulunmaktadır (bknz. Şekil-1). İşgücü; sadece insan, sadece robot ve insan&robot olarak 3 farklı tiptedir. Bu üç farklı işgücünün aynı işi yaparken harcadıkları süreler ve birim işgücü maliyetleri birbirinden farklıdır. Çevrim süresi bilinen problemimizde istasyon sayısı bilinmemektedir. Problemin amacı işgücü maliyet minimizasyonudur. Ayrıca dolaylı olarak istasyon sayısının da minimize edilmesi hedeflenmektedir. Problemin varsayımları;

- Görevler daha fazla alt işlemlere (operasyonlara) bölünemez.

- Her istasyona sadece bir işgücü atanabilir ve tüm görevler atanmalıdır.
- Her bir montaj hattında tek çeşit ürün montajlanmaktadır.
- Görevlerin öncelik ilişkisi bellidir, görevler öncelik ilişkisi dikkate alınarak atanmalıdır.
- Görevler kendi hatlarında yapılmak zorundadır.
- Bir istasyona atanan görevlerin toplam süresi, çevrim zamanını aşamaz.
- Üretim 2 montaj hattında da aynı zamanda başlayıp aynı zamanda sonlanmaktadır.
- 3 farklı işgücü tipi için işlem zamanları bilinmektedir ve sabittir.
- İstasyon açma maliyeti bilinmektedir ve sabittir. Çevrim zamanı önceden belirlidir.
- Transfer maliyetleri dikkate alınmamaktadır ve hatlar gecikmesiz hat mantığıyla çalışmaktadır.

Üretilen ürünlerde kalite problemi yaşanmamaktadır.

- Malzeme taşıma, yükleme ve boşaltma, hazırlık ve/veya aparat değiştirme zamanları ihmal edilebilecek kadar küçüktür veya görev zamanlarına dahil edilmiştir.
- İşgüçleri hatların her iki tarafında da çalışılabilmektedir.
- İşgücünde konum kısıtı bulunmamaktadır.
- Bazı görevlerin beraber yapılmaması gerekmektedir.



Şekil-1. İstasyonlara Atanabilecek İşgücü Tipleri
Figure-1. Types of Workforce Assignable to Stations

İndisler

t	: Zaman indisi	H	: Hat indisi
k	: İstasyon indisi	J	: İşgücü tipi indisi
i, i'	: Görev indisleri	r/v	: öncül/ardıl görev indisleri

Karar Değişkenleri

X_{hijk}	$\begin{cases} 1 & \text{h hattındaki i görevi, j işgücüsüyle, k istasyonunda yapılırsa} \\ 0 & \text{diğer durumda} \end{cases}$
Z_{jk}	$\begin{cases} 1 & \text{j işgücü k istasyonuna atanırsa} \\ 0 & \text{diğer durumda} \end{cases}$
Q_k	$\begin{cases} 1 & \text{k istasyonu açılırsa} \\ 0 & \text{diğer durumda} \end{cases}$

Parametreler

S_{ij}	: i görevi j işgücü tipiyle yapıldığında işgücü maliyeti
t_{ij}	: i görevi j işgücü tipiyle yapıldığında işlem süresi
α	: istasyon açma maliyeti (maliyet değeri=0,001 TL)
c	: Çevrim zamanı
H	: Toplam hat sayısı
K_{maks}	: Teorik en büyük istasyon sayısı
J	: Toplam işgücü tipi sayısı
N	: Bir hattaki toplam görev sayısı

Matematiksel Model

$$\min \sum_{h=1}^H \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K X_{hijk} * S_{ij} + \sum_{k=1}^K \alpha * Q_k \quad \text{K} \quad (1)$$

Kısıtlar

$$\sum_{j=1}^J Z_{jk} \leq 1 \quad \text{tüm } k = 1, \dots, K \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K x_{hijk} = 1 \quad \text{tüm } i = 1, \dots, n; h = 1, \dots, H \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K (k * x_{hrjk} - k * x_{hvjk}) \geq 0 \quad v = 1 \dots n, r \in P_v, h = 1 \dots H \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^n t_{ij} * x_{hijk} + \sum_{i=1}^n t_{ij} * x_{(h+1)ijk} \leq c * Z_{jk} \quad \text{tüm } h = 1 \dots H-1; j = 1 \dots J; k = 1 \dots K \quad (5)$$

$$\sum_{h=1}^H \sum_{j=1}^J (X_{hijk} + X_{hi'jk}) \leq 1 \quad \text{tüm } k = 1 \dots K; (i, i') \in S'' \quad (6)$$

$$\sum_{h=1}^H \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^J X_{hijk} \leq K_{maks} * Q_k \quad \text{tüm } k = 1, \dots, K \quad (7)$$

$$Q_{k-1} \geq Q_k \quad \text{tüm } k = 1, \dots, K \quad (8)$$

$$X_{hijk}, Z_{jk}, Q_k \in \{0,1\} \quad \text{tüm } h, i, j, k \quad (9)$$

Oluşturulan matematiksel modelde; amaç fonksiyonunda, işgücü maliyetinin minimizasyonu ve ikincil amaç olarak istasyon açma maliyetinin minimizasyonu dikkate alınmıştır. 2 nolu kısıt, her bir istasyona en fazla 1 işgücü atanmasını veya hiç atanmamasını sağlamaktadır. 3 nolu kısıt, h hatlarında her bir i görevi, herhangi bir istasyona, bir işgücü tipiyle atanmasını sağlamaktadır. 4 nolu kısıt, görevlerin öncelik ilişkisine göre görevler atanmalarını, 5 nolu kısıt, bir istasyona atanan görevlerin toplam süresinin çevrim zamanını aşmamasını sağlamaktadır. 6 nolu kısıt ile beraber yapılamayan görevlerin farklı istasyonlara atanması sağlanmaktadır. 7 nolu kısıt istasyon açılması ile ilgili istasyona görev atanması arasındaki ilişkiyi düzenleyen kısıttır. 8 nolu kısıt ise ataması yapılan istasyonların sıralı bir şekilde açılmasını sağlamaktadır.

ÇÖZÜM ANALİZİ (COMPUTATIONAL ANALYSIS)

Daha önceki paralel montaj hattı çalışmalarında, veri setlerinde tek tip işgücü için öncelik ve görev zamanları tanımlanmıştır. Yaptığımız çalışmada farklı işgücü tipi (insan, robot, insan&robot) bulunması nedeniyle problem çözümü için yeni veri setlerinin oluşturulması gerekmiştir. Bu nedenle literatürdeki mevcut veri setleri kullanılarak 3 farklı işgücü tipi için yeni veri setleri türetilmiştir. Örneğin 8 görevli Bowman veri setindeki zamanlar insan için kullanılmış, robot ve insan&robot tipindeki işgüçleri için görev süreleri, insan için alınan görev sürelerinin belirli bir katsayı ile çarpılmasıyla elde edilmiştir. Katsayılar robot için 0.33, insan&robot için 0.5'dir. Bu katsayılar robot ve insan&robot etkileşimli sistemler üzerine uzmanlaşmış kişiler ve sektör temsilcilerinin verdikleri bilgiler ışığında yaklaşık olarak belirlenmiştir. İş gücü tipine göre birim zamandaki maliyet katsayıları yine aynı uzman sektör temsilcilerinden alınan veriler ışığında yaklaşık olarak tespit edilmiştir. Herhangi bir görevin yine

herhangi bir işgücü ile yapıldığında oluşan maliyet ilgili işin görev zamanı ile ilgili işgücü tipinin birim zamandaki maliyeti çarpılarak hesaplanmıştır. Bowman-1 adlı üretilen veri setlerinde ise özel üretim ortamları (operatör görüşü, gözle kontrol, iş güvenliği, kimyasal durumlar, aşırı soğukluk, aşırı sıcaklık vb.) bazı durumlarda farklı işgücü tiplerinin farklı işgücü sürelerine sahip olabileceği öngörüsüyle alternatif bir veri seti daha oluşturulmuştur. Oluşturulan her iki veri seti tipinde de görevin özellikleri gereği beraber yapılamayacak görevler tanımlanmıştır. Çizelge 1’de modelde kullanılan veri setlerinin elde edildiği ana veri setleri görülmektedir.

Çizelge 1. Ana Veri Setleri

Table 1. Main Data Sets

Veri Setleri	Bir Hattaki Görev Sayısı	Görevlerin Top. Süresi (Dakika)
Bowman	8	75
Jackson	11	46
Mitchell	21	105
Sawyer	30	324
Gunther	35	483
Kilbrid	45	552
Hahn	53	14026
Tonge	70	3510
Lutz2	89	485

Oluşturulan veri setlerinde görev maliyetleri Çizelge 2’de katsayıları hesaplanarak elde edilmiştir. Birim zamandaki maliyetler hesaplanırken, insan için aylık maaş üzerinden, standart robotlar için satın alma ve enerji giderleri, insan&robot işgücü tipi için de işbirlikçi robotların satın alma ve enerji gideri ve insan için aylık maaş giderinin birim zamandaki değerleri toplanarak elde edilmiştir. Standart ve işbirlikçi robotların satın alma değerleri çalışmanın yapıldığı tarihteki piyasa verilerinden yaklaşık olarak elde edilmiştir. “Bu verilerin ülkeden ülkeye farklılıklar gösterebileceği unutulmamalıdır.”

Çizelge 2. İşgücü maliyetlerinin hesaplanması

Table 2. Calculation of workforce costs

	Gider Kalemleri	TL/Dakika	TL/Dakika
İnsan	Maaş (TL/Aylık)	0,069	0,07
Standart Robot	Satın Alma (TL)	0,193	0,24
	Enerji (TL/Dakika)	0,013	
İşbirlikçi Robot	Satın Alma (TL)	0,048	0,15
	Enerji (TL/Dakika)	0,008	
İnsan	Maaş (TL/Aylık)	0,069	

Elde edilen dakika bazında birim maliyet katsayıları ile yine daha önce oluşturulan görev zamanları çarpılarak 3 işgücü tipine göre görev maliyetleri hesaplanmıştır. Mevcut veri setleri farklı çevrim süreleri için tekrar oluşturulmuştur. Örneğin Bowman veri seti öncelikle çevrim süresi önce 17 dakika, ardından 34 dakika için çözülmüştür. Farklı 2 veri seti kendi içinde 2 farklı çevrim süresine göre çözülmüş ve öncüllük ilişkisi aynı olan Bowman ve Bowman-1 veri setleri için toplamda 4 farklı koşuturum yapılmıştır.

Her veri seti için oluşturulan 4 farklı veri tipi modelde çalıştırılmış ve elde edilen değerlerin ortalaması hesaplanmış ve Çizelge 3’de gösterilmiştir. Çizelgenin son sütununda yer alan Yüzdesel fark değeri 0.001 olarak alınmıştır. Yüzdesel fark $100 * (\text{en iyi tahmin} - \text{en iyi tahmin}) / (\text{en iyi tahmin})$ formülüyle hesaplanmıştır.

Çizelge 3. Veri Setlerinin KoşTURUM Sonuçları-1*Table 3. Computational Results of Data Sets-1*

Veri Setleri	Bir Hattaki Görev Sayısı	Örnekleme Sayısı	Ortalama Çözüm Zamanı (sn)	Ortalama YüZdesel Fark (%)
Bowman	8	4	1,68	< 0,001
Jackson	11	4	32,27	< 0,001
Mitchell	21	4	174,21	< 0,001
Sawyer	30	4	3639,68	0,0032
Gunther	35	4	3722,96	0,0040
Kilbrid	45	4	4387,13	0,0062
Hahn	53	4	2845,61	< 0,001
Tonge	70	4	7200,00	Çözüm Bulunamadı
Lutz2	89	4	7200,00	Çözüm Bulunamadı

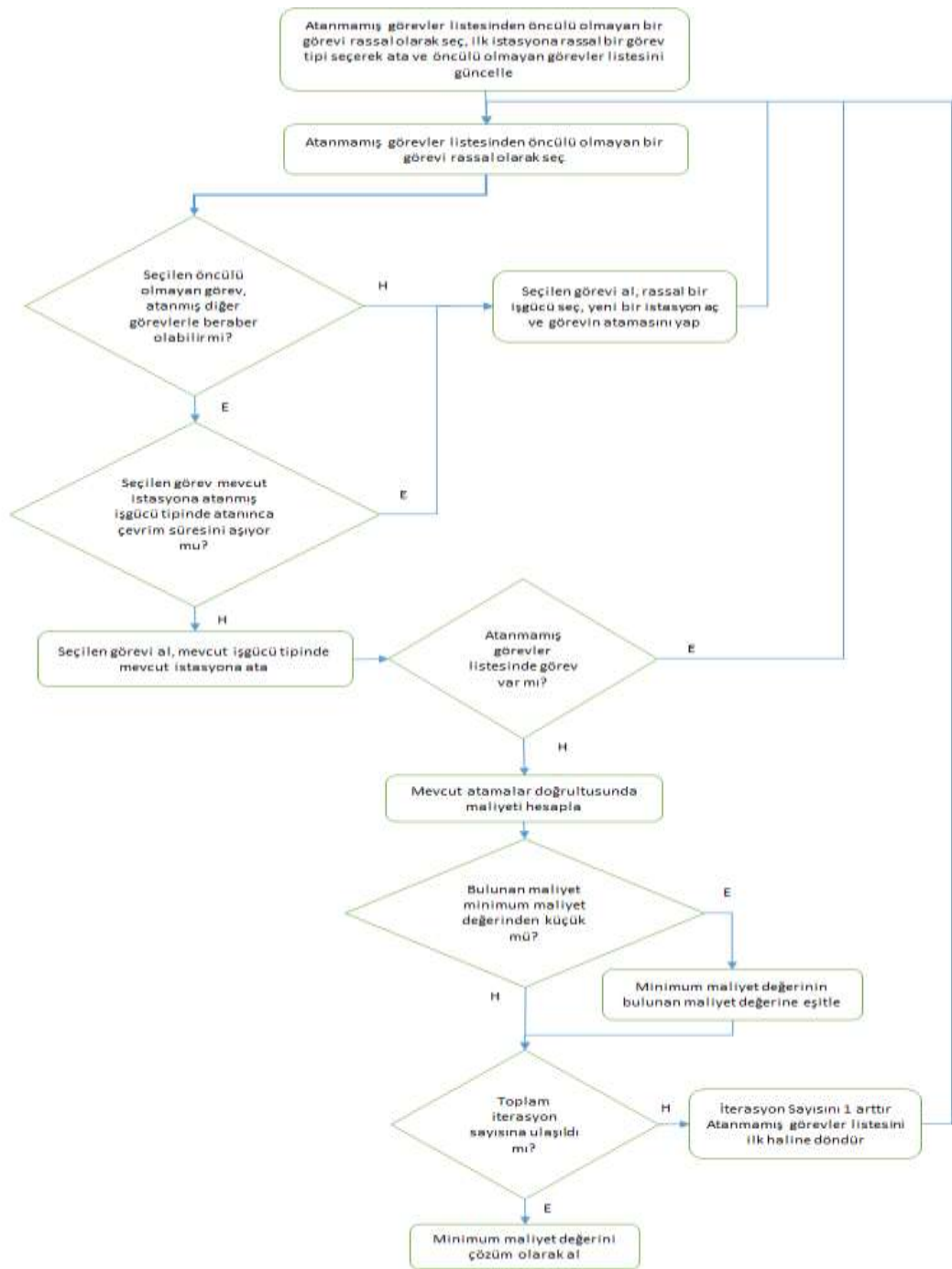
Veri setlerine göre yapılan koşTURUMLARDA, 21'lik Mitchell veri setine kadar matematiksel model ile hızlı bir şekilde sonuçlar alınmıştır. 30*2 görevli Sawyer veri setleri için ortalama çözüm zamanı 3640 saniye seviyesinde olmuştur. Diğer veri setleri için benzer zamanlarla olurlu sonuçlar elde edilmiştir. Son iki veri seti olan 70*2 görevli Tonge ve 89*2 görevli Lutz2 veri setleri için 7200 saniye boyunca model çalışmış ve olurlu bir çözüm elde edilememiştir. Görev süreleri arttıkça 7200 saniye içerisinde çözülebilen veri setleri azalmaktadır. Bu da problemin Np-Zor yapıda olmasından kaynaklanmaktadır.

Çizelge 4. Veri Setlerinden Elde Edilen Eniyi-Olurlu Sonuçlar*Table 4. Optimum-Feasible Results from Data Sets*

Veri Setleri	Örnek Sayısı	Eniyi Sonuç	Olurlu Sonuç
Bowman	4	4	*
Jackson	4	4	*
Mitchell	4	4	*
Sawyer	4	2	2
Gunther	4	2	2
Kilbrid	4	2	2
Hahn	4	3	1
Tonge	4	*	*
Lutz2	4	*	*

Çizelge 4 dikkate alındığında 36 farklı veri seti içerisinde 21 adedinde optimum sonuca ulaşılmış, 7 adedinde olurlu sonuca ulaşılmış, 4adedinde ise olurlu sonuç bulunamamıştır. Modelin 70*2'lik göreve sahip veri setlerine kadar maksimum 2 saatlik (7200 saniye) koşTURUMLAR için etkinçözümler bulunduğu görülmüştür.

Gerçek hayat problemlerinde genellikle MHDP'nin 40-50 görev seviyesinde olduğu bilinmektedir. Bu doğrultuda önerilen matematiksel modelinin gerçek hayat problemlerinde uygulanabileceği görülmüştür. Ancak bazı MHDP'nin görev sayısının çok daha fazla olduğu durumlarda, matematiksel modelin yetersiz kalabileceği, bu nedenle sezgisel metodların bu seviyedeki problemlerde daha etkin sonuç verebileceği öngörülmektedir. Bu sebeple temel bir sezgisel olan RAM kullanılarak mevcut probleme özgü bir metod geliştirilmiştir. Rastgele arama algoritmaları anlaşılması ve uygulaması kolay olan arama metodlarıdır. Her ne kadar rastgele arama algoritmaları en hızlı sayısal optimizasyon teknikleri olmasa da, klasik yöntemlerle karşılaştırıldığında bazı belirleyici avantajlar sergilerler (Fogel, 1995). RAM'de; yerel minimuma takılma sorununun düşük bir olasılık olması, algoritmaların basit olması ve karmaşık programlama bilgisi gerektirmemesi ve kullanım alanlarının çokluğu avantajları olarak kabul edilebilir. Çalışmada ele alınan problem için geliştirilen metodun akış diyagramı Şekil 2'de görülmektedir.



Şekil-2. RAM Akış Algoritması
Figure-2. RAM Flow Algorithm

Şekil 2’de gösterilen akış diyagramı üzerinden kodlanan model mevcut veri setleri için koşturulmuş ve sonuçlar elde edilmiştir. Matematiksel model çalıştırıldığında optimum sonucu elde edilen problemler için, RAM’de kullanılan Alt Sınır (AS), optimum değer olarak alınmış. Optimum sonucu bilinmeyen problemler için de aşağıda belirtilen alt sınır hesaplama yöntemi ile elde edilen değerler alt sınır olarak kabul edilmiştir. Bu kabulün nedeni, optimizasyon problemlerinde global optimal sonucun elde edilemediği durumlarda etkin AS değeri hesaplanarak global optimal yerine bir alternatif olarak kullanılabilmesidir. Problem için önerilen AS değeri hesaplanırken;

$$F_1 = \frac{\sum_{i=1}^N \min_{j=1, \dots, J} t_{ij}}{C} * \alpha$$

• F_1 hesabında bir görevin farklı görev tipleri arasından en az sürede yapılanı tüm görevler için toplanmış, kabul edilen çevrim süresi parametresine bölünerek gerekli istasyon sayısı bulunmuş, bulunan istasyon sayısı birim istasyon açma maliyeti ile çarpılarak istasyon açma maliyeti hesaplanmıştır.

$$F_2 = \sum_{i=1}^N \min_{j=1, \dots, J} S_{ij}$$

• F_2 hesabında ise bir görevin farklı işgücü tiplerinde yapıldığındaki maliyeti dikkate alınarak ilgili her bir görevin en az maliyetle yapılan değeri toplanarak toplam işgücü maliyet değeri hesaplanmıştır.

$$AS = 2 * (F_1 + F_2)$$

• AS hesabında da istasyon açma ve işgücü maliyet değerleri toplanarak ve 2 ile çarpılarak paralel 2 hat için AS maliyet değerine ulaşılmıştır.

Çizelge 5. Veri Setlerinin Koşuturum Sonuçları-2

Table 5. Computational Results of Data Sets-2

Veri Setleri	Bir Hattaki Görev Sayısı (N)	Örnek Sayısı	Çözüm Zamanı (5*N sn)	Ortalama Yüzsdesel Fark (%)
Bowman	8	6	40	0,016
Jackson	11	6	55	1,236
Mitchell	21	6	105	0,632
Sawyer	30	6	150	4,005
Gunther	35	6	175	3,761
Kilbrid	45	6	225	3,758
Hahn	53	6	265	4,246
Tonge	70	6	350	4,255
Lutz2	89	6	445	5,537

Problem yapısının Np-Zor yapıda olması nedeniyle belli bir görev sayısından sonra olurlu sonuç elde edilememesi beklenen bir durumdur. Ele alınan problem için geliştirilen matematiksel model ile 53'lük veri setinden sonra olurlu sonuç bulunamamıştı. Çizelge 5 dikkate alındığında, RAM ile 70*2(paralel iki 70 görevlik klon hat) ve 89*2'lik veri setlerinde de olurlu sonuçlar elde edilmiştir. Koşuturum süreleri bir hattaki görev sayısı 5 ile çarpılarak (N*5) hesaplanmıştır. AS'ler dikkate alınarak elde edilen yüzsdesel hata değerleri %0,016 ile %5,537'lik arasında elde edilmiştir.

Çizelge 6. Veri Setlerinden Elde Edilen Eniyi-Olurlu Sonuçlar*Table 6. Optimum-Feasible Results from Data Sets*

Veri Setleri	Örnek Sayısı	Eniyi Sonuç	Olurlu Sonuç
Bowman	6	2	4
Jackson	6	*	6
Mitchell	6	*	6
Sawyer	6	*	6
Gunther	6	*	6
Kilbrid	6	*	6
Hahn	6	*	6
Tonge	6	*	6
Lutz2	6	*	6

Çizelge 6 dikkate alındığında 54 farklı veri seti içerisinde 2 adedinde optimum sonuca ulaşılmış, 52 adedinde olurlu sonuca ulaşılmıştır. Matematiksel modelde 53*2'lik göreve sahip veri setlerinden sonra olurlu çözüm bulunamayan 70*2 ve 89*2'lik görevler için RAM ile olurlu sonuçlar elde edilmiştir.

SONUÇ VE ÖNERİLER (CONCLUSIONS AND FUTURE RESEARCH DIRECTIONS)

Çalışmamızda gelişen teknolojiler ışığında işbirlikçi çalışma stratejisine geçiş sürecinde önemli bir konu başlığı olan montaj hattı problem yapılarına değinilmiştir. Montaj hattı dengeleme problemlerinin özel bir başlığı olan paralel montaj hattı dengeleme problemleri için literatür çalışması ışığında, incelendiği kadarıyla heterojen işgücüne sahip paralel montaj hatları için maliyet yönelimli bir çalışmaya rastlanmamıştır. Önerilen ilk modelde heterojen işgücüne sahip paralel bir montaj hattı için maliyet yönelimli bir matematiksel model geliştirilmiştir. Modelin çözümü için gerekli veri setlerine literatürde ulaşılamadığı için mevcut paralel montaj hattı veri setleri üzerinden farklı işgücü tipi ve maliyetleri içeren yeni veri setleri, uzman ve sektör temsilcileriyle görüşülerek oluşturulmuştur.

Geliştirilen matematiksel modelle 7200 saniye ile sınırlanan çözümler içerisinde 9 veri setinin %58,3'ünde optimum çözüm elde edilirken, %19,4'ünde olurlu çözüm elde edilmiş ve %11,1'inde çözüm bulunamamıştır. Alternatif çözüm metodu olarak geliştirilen RAM' de 5*N saniyelik zaman zarfında 9 veri seti için %4 optimum sonuç ve %96 olurlu sonuç elde edilmiştir. Mevcut sonuçlar dikkate alındığında RAM ile 89*2 görevden daha fazla göreve sahip paralel hatlı problemler için de olurlu sonuçlar elde edilebileceği görülmüştür.

Çözüm kalitesi açısından, mevcut ve daha fazla göreve sahip PMHDP'de RAM dışında daha etkin sezgisel metotlar geliştirilerek kullanıldığında daha iyi çözümler elde edilebileceği öngörülmektedir. Ayrıca türetilen veri setlerinin benzer çalışmalarda da kullanılması ve bu alanda yapılacak çeşitlendirilmiş yeni çalışmaların literatüre katkı sağlayabileceği düşünülmektedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Ahmadi, R.H.; Dasu, S.; Tang, C.S., 1992, "The dynamic line allocation problem, Management Science", 38, 1341-1353. doi.org/10.1287/mnsc.38.9.1341
- Battaia, O. Dolgui, A., 2013, "A taxonomy of line balancing problems and their solution approaches", International Journal of Production Economics, 142(2), 259-277. doi.org/10.1016/j.ijpe.2012.10.020
- Becker, C. Scholl, A., 2006, "A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing", European Journal of Operational Research, Vol. 168, issue 3, 694-715. doi.org/10.1016/j.ejor.2004.07.023
- Boysen, N. Fliedner, M. Scholl, A., 2007, "A classification of assembly line balancing problems", European Journal of Operational Research, 183(2), 674-693. doi.org/10.1016/j.ejor.2006.10.010

- Boysen, N. Scholl, A., 2009, "A General Solution Framework for Component-Commonality Problems", *Business Research*, Volume 2, Issue 1, 86–106.
- Chakravarty, A.M. Shtub, A., 1988, "Modelling the effects of learning and job enlargement on assembly systems with parallel lines", *International Journal of Production Research*, 26, 267–281.doi.org/10.1080/00207548808947858
- Chiang, W. C. Kouvelis, P., Urban, T. L., 2007, "Line balancing in a just in time production environment: Balancing multiple U-lines", *IIE Transactions*, 39, 347-359.doi.org/10.1080/07408170600838340
- Çil, Z.A. Mete, S. Özceylan E. Ağpak, K., 2017, "A beam search approach for solving type II robotic parallel assemblyline balancing problem", *Applied Soft Computing*, 61, 129–138.doi.org/10.1016/j.asoc.2017.07.062
- Daganzo, C. F. Blumenfeld, D. E., 1993, "Assembly system design principles and tradeoffs, *International Journal of Production Research*", Volume 32,3, 669–681.doi.org/10.1080/00207549408956959
- Ellegard, K. Jonsson, D., 1992, "Reflective production in the final assembly of motor vehicles: an emerging Swedish challenge", *International Journal of Operations and Production Management*, 12, 117–133.[Doi.org/10.1108/EUM0000000001307](https://doi.org/10.1108/EUM0000000001307)
- Erel, E. Sarin, S.C., 1998, "A survey of the assembly line balancing procedures, *Production Planning and Control*", 9, 414–434. doi.org/10.1080/095372898233902
- Esmailian, G.R. Sulaiman, S. Ismail, N. Ahmad, M. Hamed, M., 2008, "Application of MATLAB to Create Initial Solution for Tabu Search in Parallel Assembly Lines Balancing", *International Journal of Computer Science and Network Security*, Vol.8, 132-136.
- Fogel, D.J., 1995, "Evolutionary Computation: Toward a New Philosophy of Machine Intelligence", IEEE Press, New York.
- Freeman, D.R., Jucker, J.V., 1967, "The line balancing problem", *AIIE Transactions*, 18(6), 361-364.
- 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. doi.org/10.1080/00207548908942574
- Gökçen, H., Ağpak, K. Benzer, R., 2006, "Balancing of parallel assembly lines", *International Journal of Production Economics*, 103, 600–609.doi.org/10.1016/j.ijpe.2005.12.001
- Gökçen, H., Ağpak, K., 2004, "Hat Dengeleme Yeni Bir Felsefe: Paralel Montaj Hatlarının Eşzamanlı Dengelenmesi", *Karabük Teknik Eğitim Fakültesi Teknoloji Dergisi*, 7(1),181-188.
- İsmail, N. G. Esmailian, R. Hamed, M. Sulaiman, S., 2011, "Balancing of parallel assembly lines with mixed-model product", *International Conference on Management and Artificial Intelligence*, Vol 6, 120-124.
- Karp, M.R., 1975, "Reducibility among Combinatorial Problems", *Complexity of Computer Computations*, 85-103.
- Kellegöz, T. Toklu, B., 2012, "An efficient branch and bound algorithm for assembly line balancing problems with parallel multi-manned workstations", *Computers&Operations Research*, 39, 3344–3360.doi.org/10.1016/j.cor.2012.04.019
- Kellegöz, T. Toklu, B., 2015, "A priority rule-based constructive heuristic and an improvement method for balancing assembly lines with parallel multi-manned workstations", *International Journal of Production Research*, Vol. 53, 3, 736–756.doi.org/10.1080/00207543.2014.920548
- Küçükçok, İ. Zhang, D.Z., 2015, "Balancing of parallel U-shaped assembly lines", *Computers & Operations Research*, 64, 233–244. doi.org/10.1016/j.cor.2015.05.014
- Küçükçok, İ. 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.org/10.1016/j.cie.2016.04.001
- Küçükçok, İ. Zhang, D.Z., 2014, "Simultaneous balancing and sequencing of mixed-model parallel two-sided assembly lines", *International Journal of Production Research*, Vol 52, 12, 3665–3687.doi.org/10.1080/00207543.2013.879618

- Lehman, M., 1969, "On criteria for assigning models to assembly lines", *International Journal of Production Research*, 7, 269-285.doi.org/10.1080/00207546808929817
- Li, Y. Wang, H. Yang, Z., 2019, "Type II assembly line balancing problem with multi-operators", *Neural Computing and Applications*, 31, 347-357.doi.org/10.1007/s00521-018-3834-1
- Mamun, A.A. Khaled, A.A. Ali, S.M. Chowdhury, M.M., 2012, "A heuristic approach for balancing mixed-model assembly line of type I using genetic algorithm", *International Journal of Production Research*, Vol. 50, 18, 5106-5116.doi.org/10.1080/00207543.2011.643830
- Nabil, A. Ismail, G. R. Esmailian, Sulaiman S., 2011, "Balancing of parallel assembly lines with mixed-model product", 2011 International Conference on Management and Artificial Intelligence, IPEDR Vol.6.
- Özcan, U. Çerçioğlu, H. Gökçen, H. Toklu, B., 2009, "A Tabu Search Algorithm for the Parallel Assembly Line Balancing Problem", *Gazi University Journal of Science*, Cilt 22, 4, 313-323.
- Özcan, U. Çerçioğlu, H. Gökçen, H. Toklu B., 2010, "Balancing and sequencing of parallel mixed-model assembly lines", *International Journal of Production Research*, 48(17), 5089-5113.doi.org/10.1080/00207540903055735
- Rabbania, M. Ziaefara, A. Manavizadehb, N., 2014, "Mixed-model assembly line balancing in assemble-to-order environment with considerin express parallel line: problem definition and solution procedure", *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, Vol 27, 7, 690-706.doi.org/10.1080/0951192X.2013.834473
- Salveson, M.E., 1955, "The Assembly Line Balancing Problem", *Journal of Industrial Engineering*, 6, 18-25.
- Süer, G.A. Dağlı, C.H., 1994, "A knowledge-based system for selection of resource allocation rules and algorithms", *Handbook of expert system applications in manufacturing: structures and rules*, Chapman and Hall, 108-129.
- Tiaccin, L., 2015, "Coupling a genetic algorithm approach and a discrete event simulator to design mixed-model un-paced assembly lines with parallel workstations and stochastic task times", *Int. J. Production Economics*, 159, 319-333.doi.org/10.1016/j.ijpe.2014.05.005
- Wyman, F.P. Moberly, L.E., 1971, "An application of simulation to compare production line configurations with failures and repairs", *Proceedings of the 5th conference on winter simulation*, 187-196.
- <https://drive.google.com/open?id=1LRLF8jn6Fl3KOUcSb1KtXSTrGqy3KXEf> Erişim Tarihi: 24.09.2019, Konu: Paralel Montaj Hattı Veri Setleri.