



## ERGONOMİK RİSK VE ENERJİ TÜKETİM KISITLARI ALTINDA MONTAJ HATTI Dengeleme Probleminin Hedef Programlama İle Modellenmesi ve Çözümü

Dilara MENKİS<sup>1\*</sup>, Emin KAHYA<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Müh. Mim. Fak. Meşelik Yerleşkesi  
Endüstri Mühendisliği Bölümü ESKİŞEHİR

ORCID No : <https://orcid.org/0009-0003-0081-3730>

<sup>2</sup>Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Müh. Mim. Fak. Meşelik Yerleşkesi  
Endüstri Mühendisliği Bölümü ESKİŞEHİR

ORCID No : <http://orcid.org/0000-0001-9763-2714>

### Anahtar Kelimeler

### Öz

Montaj hattı  
dengeleme,  
Ergonomik Risk  
Değerlendirmesi,  
REBA,  
Hedef Programlama,  
Enerji tüketim  
miktarı

Montaj hattı dengeleme probleminde, işlemler arasındaki öncelik ilişkileri dikkate alınarak boş süreleri enküçükleyecek şekilde işlemler istasyonlara atanır. Montaj hatları, üretim sürecinin kritik bir noktasını oluşturur ve ergonomik faktörlerin burada dikkate alınması, çalışanların performansını ve memnuniyetini belirleyici bir etken haline gelir. Aynı zamanda işlemlerin fiziksel iş yükleri ile çalışanların o işlemi yaparken harcadıkları enerji miktarları arasında farklılıklar olmaktadır. Bu nedenle montaj hatları dengelenirken istasyonun risk seviyesinin ve çalışanın harcadığı enerji miktarının da kabul edilebilir bir seviyeye düşürülmesi amaçlanmalıdır. Bu çalışmada, bir beyaz eşya metal sanayi işletmesinde basit tek modellenmiş montaj hattı dengeleme problemi ergonomik risk seviyeleri ve çalışanların harcadığı enerji miktarları dikkate alınarak modellenmiştir. Her bir işlemin zorluk dereceleri REBA yöntemi ile hesaplanmıştır. Çalışanların harcadığı enerji miktarları

\*Sorumlu yazar; e-posta : [dmenkis@gmail.com](mailto:dmenkis@gmail.com)

doi : <https://doi.org/10.46465/endustrimuhendisligi.1524402>

*sabah ve öğleden sonra olmak üzere toplam 120 dakika akıllı saat ile ölçüm alınarak belirlenmiştir. Çevrim süresi, fiziksel iş yükü ve harcanan enerji miktarından sapmaları enküçükleyen bir hedef programlama modeli geliştirilmiştir. Her bir istasyonda toplam REBA skoru ve harcanan enerji miktarı için hedef ve maksimum değerler belirlenmiş, kısıt olarak modele eklenmiş ve GAMS paket programı ile model çözülmüştür. Ergonomik risk ve harcanan enerji miktarı dikkate alınmadan yapılan dengeleme sonuçları karşılaştırılmış ve hedeflenen REBA skorundan sapma oranı %22'den %14,4'e ve enerji tüketim miktarının hedeflenen değerden sapması %10,7'den %5,4'e düşmüştür. Risk seviyesi yüksek olan istasyon sayısı 5'ten 4'e azalmış ancak enerji tüketim miktarı yüksek olan istasyon sayısı 5'ten 6'ya yükselmiştir. Maksimum REBA değerinden sapma ise %15,2'den %8,8'e, enerji tüketim miktarı sapması ise %5'den %0,3'e düşmüştür. Risk seviyesi yüksek istasyon sayısı aynı kalmasına rağmen hem fiziksel iş yükleri hem de harcanan enerji miktarları açısından daha dengeli bir montaj hattı oluşturulmuştur.*

## **MODELING AND SOLUTION OF THE ASSEMBLY LINE BALANCING PROBLEM UNDER ERGONOMIC RISK AND ENERGY CONSUMPTION CONSTRAINTS WITH GOAL PROGRAMMING**

### **Keywords**

*Assembly line  
balancing,  
Ergonomic risk  
evaluation,  
REBA,  
Goal Programming,  
Energy consumption*

### **Abstract**

*In the assembly line balancing problem, operations are assigned to stations in order to minimize idle times, taking into account the priority relationships between operations. Assembly lines constitute a critical point in the production process, and taking ergonomic factors into consideration here becomes a determining factor in employee performance and satisfaction. At the same time, there are differences between the physical workloads of the operations and the amount of energy spent by the employees while performing that operation. Therefore, when balancing assembly lines, it should be aimed to reduce the risk level and energy amount of the station to an acceptable level. In this study, a simple single-model assembly line balancing problem in a kitchen appliances enterprise was modeled*

*by taking into account ergonomic risk levels and the amount of energy consumed by employees. The difficulty levels of each operation were calculated with the REBA method. A smart watch was used to determine the amount of energy consumed by employees. A total of 120 minutes of measurements were taken in the morning and afternoon. A goal programming model has been developed to minimize deviations from cycle time, physical workload and the amount of energy consumed. Target and maximum values for the total REBA score and the amount of energy spent at each station were determined, added to the model as a constraint, and the model was solved with the GAMS package program. The balancing obtained as a result of the study was compared with the balancing results made without taking into account the ergonomic risk and the amount of energy consumed, the deviation from the targeted REBA score decreased from 22% to 14.4% and the deviation from the targeted energy consumption amount decreased from 10.7% to 5.4%. The number of stations with high risk levels decreased from 5 to 4, and the number of stations with high energy consumption increased from 5 to 6. The deviation from the maximum REBA value decreased from 15.2% to 8.8%, and the deviation from the maximum energy consumption amount decreased from 5% to 0.3%. Although the number of high-risk stations remains the same, a more balanced assembly line has been created in terms of both physical workloads and the amount of energy consumed.*

Araştırma Makalesi

Research Article

Başvuru Tarihi : 29.07.2024

Submission Date : 29.07.2024

Kabul Tarihi : 31.10.2014

Accepted Date : 31.10.2014

## 1. Giriş

Üretim sistemlerinin iyileştirilmesinin arkasındaki ana motivasyon, pazarda daha büyük bir pay ve daha iyi bir imaj almaktır. Özellikle benzer ürünlere sahip montaj hatları, üretim sürecinin her aşamasında yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Montaj hatlarında, otomatik olmayan sistemlerle üretim ve montaj için daha fazla esneklik sağlanabilmektedir. Böyle sistemlerinin performansı, hatların dengelenmesine ek olarak, ergonomik faktörlerin montaj hatlarında nasıl yer aldığına bağlı olarak değişmektedir. Ergonomik açıdan riskleri en aza indirilmiş montaj hatlarında, üretim verimliliği de artmaktadır (Gülbandılar Canbazoğlu ve Kahya, 2023).

Günümüzde yapılan işlerin çoğu için, enerji tüketimi açısından ölçülü ve zararsız olduğu oldukça yaygın bir kanıdır. Ancak montaj hatlarında işlerin büyük çoğunluğunda, operatörler, yüksek enerji tüketmektedirler. Bu fiziksel tüketim, çalışanların sağlığı için riskler doğurabilir. Montaj hattı iş istasyonlarının tasarımında; işçinin iş yükünü uygun şekilde yerine getirebilmesi için ihtiyaç duyduğu alan ve bu yük ile ilişkili ergonomik risk, bu sorunlardan bazılarıdır (Bautista, Rocio ve Batalla, 2016). Elverişsiz çalışma koşulları veya kötü iş yeri ergonomisi problemi, günümüzde öncelikli bir konu olarak değerlendirilmektedir. İşyerindeki ergonomik riskler; çalışanların sağlığına, yaşam kalitesine zarar vermekte ve bir bütün olarak değerlendirildiğinde üretim verimliliğini olumsuz etkilemektedir.

Montaj hattı, istasyon adı verilen işlemleri gerçekleştiren üretim birimlerinin seri bir şekilde hizalandığı akış odaklı bir üretim sistemidir. İş parçaları hat boyunca genellikle bir tür taşıma sistemi (örneğin konveyör bandı) aracılığıyla hareket ettirilirken istasyonları sırayla ziyaret eder (Boysen, Fliedner ve Scholl, 2008). Bir montaj hattı, seri veya paralel olarak düzenlenmiş birkaç iş istasyonundan oluşur. Bir üretim ögesinin imalatı bir dizi göreve bölündüğünden, bu görevlerin belirli kısıtlamaları yerine getiren istasyonlara nasıl atanabileceğini belirlemek zor bir sorundur. Montaj hattı dengeleme problemlerinde amaç; görev alt kümelerinin, tesisin istasyonlarına en uygun şekilde atanmasıdır (Chica, Cordon, Oscar, Damas ve Bautista, 2012).

Montaj hatları için çok sayıda formülasyon ve algoritma geliştirilmesine rağmen, bunların birçoğu üretim ortamındaki uygulamalarda gerçeği yansıtmamaktadır. Montaj hattı dengeleme problemlerinde (MHDP) genellikle çevrim zamanı, istasyon sayısı, işin monotonluk düzeyi gibi kısıtlar dikkate alınmış, ürün çıktısı ya da üretim maliyetleri düşürülerek hattın verimliliğinin artırılması hedeflenmiştir. Ancak montaj hattı dengeleme (MHD) büyük yatırımlar gerektirdiğinden uzun vadeli bir karar verme problemidir ve birçok faktörden kaynaklanabilecek olası sorunların da hesaba katılması gerekmektedir (Yetkin, 2019).

Klasik montaj hattı dengeleme probleminde, genel olarak, işleri istasyonlara dağıtırken problemin tipine göre ya iş istasyonu sayısı (1. tip) ya da çevrim süresi (2. tip) enküçüklenmeye çalışılır. Bu atama sırasında istasyonların toplam işlem süreleri olabildiğince birbirine yakın tutulmaya çalışılır ki istasyonlar arasındaki iş yükü düzgün dağılmış olsun. Fakat istasyonlar arasındaki iş yükünü düzgün dağıtmak için yalnızca işlemlerin sürelerini dikkate almak çoğu durumda yeterli değildir. Aynı zamanda işçilerin zorlanma derecelerini de mümkün olduğunca eşit tutmak gerekir. Aksi takdirde, bazı işçilerde aşırı yüklenme oluşması sonucu çeşitli verimlilik ve işgücü kayıpları, uzun dönemde ise meslek hastalıkları ve kalıcı hasarlar oluşabilir (Baykasoğlu ve Demirkol Akyol, 2014).

İstasyonlarda yapılan farklı işlemler arasında işlem süresi olarak bir fark olmasa bile fiziksel zorlanma düzeylerinde ve harcanan enerji miktarları arasında

farklılıklar olabilmektedir. Bu nedenle montaj hattı dengelenirken yalnızca işlem sürelerini dikkate almak iş yükü ve enerji miktarı açısından dengeli bir düzenleme oluşturmaz, işlemlerin risk düzeyleri ve icrası için harcanan enerji miktarları da dikkate alınmalıdır. Böylece daha adil bir iş yükü dağılımı sağlanmış olunacaktır.

İşçilerin montaj faaliyetlerinin yapımı esnasında fiziksel zorlanma düzeyleri (iş yükü), literatürdeki yöntemlerden biri kullanılarak tespiti gerçekleştirilir. Çalışanların harcadığı enerji miktarlarının tespiti için ise akıllı saat kullanılabilir. Böylece, ergonomik risk değerlendirme yöntemleri ile elde edilen iş yükleri ve akıllı saat ile elde edilen harcanan enerji miktarları ile Hedef Programlama yöntemi kullanılarak montaj hattının optimum dengelenmesi sağlanabilir. Böylelikle çalışanlar arasında hem fiziksel iş yüklerinin hem de harcanan enerji miktarlarının daha adil bir şekilde dağıtılması sağlanmış olur.

Bu çalışmada, bir beyaz eşya metal sanayi işletmesinde basit tek modelli montaj hattı dengeleme problemi ergonomik risk seviyeleri ve çalışanların harcadığı enerji miktarları dikkate alınarak modellenmiştir. REBA yöntemi ile her bir işlemin zorluk dereceleri belirlenmiştir. Çalışanların harcadığı enerji miktarlarının saptanması için akıllı saat kullanılmıştır. Sabah ve öğleden sonra olmak üzere toplamda 120 dakika ölçüm alınmıştır. Çevrim süresinden, fiziksel iş yükünden ve harcanan enerji miktarından sapmaları enküçükleyecek bir hedef programlama modeli geliştirilmiştir. Her bir istasyonda toplam REBA skoru ve harcanan enerji miktarı için hedef ve maksimum değerler belirlenmiş, kısıt olarak modele eklenmiş ve GAMS paket programı ile model çözülmüştür. Çalışma sonucu elde edilen dengeleme ile ergonomik risk ve harcanan enerji miktarını dikkate alınmadan yapılan dengeleme sonuçları karşılaştırılmış ve hem fiziksel iş yükleri hem de harcanan enerji miktarları açısından daha dengeli bir montaj hattı oluşturulmuştur.

İzleyen bölümde bilimsel yazın taramasına yer verilmiştir. Üçüncü bölümde matematiksel modelin geliştirilmesi ve performans ölçütlerinin tanımlanması ve dördüncü bölümde geliştirilen modelin gerçek bir problemde uygulaması ele alınmıştır. Son bölümde ise sonuç ve öneriler tartışılmıştır.

## 2. Bilimsel Yazın Taraması

Literatürdeki çalışmalarda önerilen matematiksel modellerde ergonomi etkisinin nasıl uygulandığı araştırılmış ve son yıllarda gerek ergonomik risk kısıtları ve gerekse enerji tüketim miktarı dikkate alınarak yapılan montaj hattı dengelemesi alanında yapılmış bazı önemli çalışmalar tanıtılacaktır.

Güner ve Hasgöl (2012), aşırı fiziksel iş yükünün yorgunluğa ve dikkatsizliğe neden olabileceğinden ve bunun sonucunda kalite sorunların ve iş kazası riskinin artmasından dolayı problem için bazı ergonomik faktörleri içeren U tipi montaj hattı için bir tamsayı programlama modeli önermişlerdir.

Battini, Delorme, Dolgui ve Sgarbossa (2015), ergonomi ilkelerini dikkate alan MHDP ele almışlardır. Montaj hattıyla ilgili yeni çözüm önerileri sağlamak için iki farklı yaklaşımı önermişlerdir. İlki; ergonomik risk seviyesi olarak kullanılan enerji miktarına dayalı çok amaçlı bir modellemedir. İkincisi ise çok amaçlı problemi tek amaca indirgemektir.

Battini, Delorme, Dolgui, Persona ve Sgarbossa (2016), montaj hatlarında, istasyonlara malzeme tedariki ve fiziksel ergonomik kısıtları dikkate alan yeni bir model önermişlerdir. Fiziksel ergonomik kısıtları her bir işlem için dakikada gerekli olan kcal olarak modele eklenmiş ve hesaplama için Garg, Chaffin ve Herrin (1978) tarafından geliştirilen metabolik enerji tüketimi formülleri kullanılmıştır. Her operatör için gerekli dinlenme süreleri kısıt olarak eklenmiş ve operatör sınır enerji tüketimi değerini aştığında, ek dinlenme süresi verilmesi sağlanmıştır.

Polat, Mutlu ve Özgörmüş (2018), sağlık ve güvenlik boyutlarıyla ilgili olarak Tip-2 MHDP sorununu ele almışlardır. REBA yöntemini kullanarak her iş istasyonunun genel fiziksel iş yükünü dengelemeyi amaçlayan bir karışık tamsayı model geliştirmişlerdir. Problemi çözmek için hedef programlama modeli uygulanmış ve üretilen test örneği için problem çözülmüştür.

Şahin ve Kahya (2018), istasyon sayısını ve iş yükünden sapmaları enküçükleme amacı altında bir hedef programlama modeli geliştirilmişlerdir. Ergonomik risk skoru REBA yöntemiyle belirlenmiş, her bir istasyon için olması istenen maksimum REBA limiti kısıt olarak modele eklenmiştir. Sonuçların karşılaştırılması amacıyla istasyon zamanı ve risk skoru için sapmaların ortalamasını temel alan iki performans ölçütü tanımlanmıştır. Çalışma sonucunda gerek ergonomik risk gerek ise istasyon sayısı bakımından daha dengeli bir montaj hattı oluşturulmuştur.

Bautista Valhondo ve Alfaro Pozo (2018), karışık modellenmiş montaj hatları çalışanları için ergonomik riski azaltmak amacıyla iş istasyonlarının ergonomik risk değerleri arasındaki ortalama aralığı en aza indirmeye odaklanmışlardır. İstasyonların ergonomik risk seviyeleri arasındaki farkları azaltmanın yanında aynı zamanda montaj hattının ortalama maksimum ergonomik riskini de azaltmayı amaçlamışlardır. Oluşturulan karışık tamsayı model basit hat dengeleme modelleriyle kıyaslanmıştır.

Tiacci (2018), montaj hatlarında çalışanların ergonomik iş yükünü azaltmak amacıyla dinlenme zamanlarının belirlenmesi sorununu ele almıştır. Montaj hatlarında çalışanlara dinlenme zamanlarının atanması problemi OCRA yöntemiyle değerlendirilmiş ve dinlenme zamanı atanmasının karışık model montaj hatlarında çalışanların ergonomik riskini nasıl etkilediğini gösterilmiştir.

Kahya, Şahin, Daşdelen ve Doğru (2018), istasyon zamanını ve çalışanlar arasındaki fiziksel risk faktörlerini eşzamanlı dengeleme amacıyla sezgisel bir algoritma sunmuşlardır. İlk olarak COMSOAL algoritması kullanılarak istasyon

zamanına dayanan bir başlangıç atama gerçekleştirmiş, daha sonra yeniden görev atama algoritması ile ilk aşamada elde edilen atama, fiziksel risk skorları dikkate alınarak hattın dengelenmesi sağlanmıştır. Risk skorları REBA yöntemiyle hesaplanmıştır. Sonuçların karşılaştırılması amacıyla istasyon zamanı ve risk skoru için, sapmaların ortalamasını temel alan iki performans ölçütü tanımlanmıştır.

Akyol ve Baykasoğlu (2019), ergonomik riskleri dikkate alan yeni bir tür montaj hattında işçi atama ve dengeleme problemi önermişlerdir. Çalışanların yürüttükleri farklı işlemler nedeniyle iş yükleri farklıdır. Problemin karmaşık yapısından dolayı optimum arama yöntemleri sorunu çözemediğinden önerilen problem, çoklu kurala dayalı yapıcı rastgele arama yaklaşımıyla ele alınmıştır. Ergonomik risk değerlendirmesi için OCRA yöntemi kullanılmıştır.

Dalle Mura ve Dini (2019), montaj hattı dengeleme probleminin çözümü için enerji harcamasına dayalı ergonomiyi dikkate alan çok amaçlı bir genetik algoritma önermişlerdir. İş istasyonu sayısının enaza indirilmesinin yanı sıra, montaj görevlerinin işçinin teknik becerilerine ve işçinin fiziksel yeteneklerine göre iş istasyonlarına dağılımını optimize etmişlerdir.

Zhang, Tang, Ruiz ve Zhang (2020), çevrim süresini ve ergonomik riskleri aynı anda en aza indirmek için U şeklinde bir montaj hattı işçi atama ve dengeleme problemini formüle etmişlerdir. Ayrıca akış atölyesi çizelgeleme problemlerindeki başarılı sonuçları nedeniyle, her iki hedefi de optimize etmek için Yeniden Başlatılan Yinelenen Pareto Açgözlü algoritması tasarlanmıştır. Ayrıca, algoritmanın yerel optimumdan kaçmasına yardımcı olacak bir yeniden başlatma mekanizması önermişlerdir.

Mokhtarzadeh, Rabbani ve Manavizadeh, (2021), karışık modellenmiş paralel U şeklindeki bir montaj hattının ergonomik riskler dikkate alınarak dengelenmesi için iki aşamalı bir sistem geliştirmişlerdir. İlk aşamada çeşitli ergonomi standartlarına göre en iyi-en kötü yöntemi ve ELECTRE TRI kullanarak her işlemin ergonomik riskleri belirlenmiş ve her işlem zor, normal ve kolay sınıflara ayrılmıştır. İkinci aşamada ise her sınıfın işlem sayısını istasyonlar arasında eşitlemek için yeni bir amaç fonksiyonu dikkate alınarak problemin matematiksel modelini geliştirmişlerdir. Bu amaç, her sınıftaki işlemlerin istasyonlar arasında eşit olarak dağıtılmasını ve her istasyonda eşit sayıda zor, normal ve kolay işlemin bulunmasını sağlamıştır. Problemi çözmek için bir kısıt programlama modeli ve sezgisel bir algoritma geliştirmişlerdir. Önerilen çözüm yaklaşımlarının performansını ise altı farklı meta-sezgisel algoritmaya göre incelemişlerdir.

Calzavara, Faccio, Persona ve Zennaro (2021), sabit işçi ile yürüyen işçi montaj stratejileri arasında hem montaj sırasında gerçekleştirilen faaliyetler hem de montaj iş istasyonlarındaki malzeme maruziyeti açısından farklılıkları dikkate alarak bir karşılaştırma yapmışlardır. Montaj süresi ve operatörlerin enerji

harcamaları üzerindeki etkiyi anlamak için bir matematiksel model önermişlerdir.

Yetkin ve Kahya (2022), montaj hattı dengeleme problemi için, çevrim zamanı ve ergonomik risk düzeyleri dikkate alınarak çok amaçlı bir matematiksel model geliştirmişlerdir. Geliştirilen model ağırlıklı toplam ve konik skalerleştirme yöntemleri ile 108 görev ve 32 istasyondan oluşan bir beyaz eşya montaj hattında uygulanmıştır. Ergonomik risk olarak REBA risk skorları belirlenmiştir. GAMS paket programı ile çözülerek sonuçlar elde edilmiştir. Çok amaçlı matematiksel model için bir toplam performans göstergesi elde etmek amacıyla iki amaç ağırlıklandırılmış ve OMAX yöntemi ile değerlendirilmiştir.

Lin ve diğ. (2023), ergonomik risk sorununu dikkate alarak karışık model montaj hattı dengelemesi ve sıralamasını ele almışlar ve aşırı iş yüklerini yönetmeyi amaçlamışlardır. Bu sorunları çözmek için hiyerarşik ve iki aşamalı bir sistem önermişlerdir. Amaçları iş istasyonlarının ve kamu hizmeti çalışanlarının sayısını en aza indirmektir. Ayrıca bir açgözlü algoritmayı bir genetik algoritmaya entegre etmişlerdir.

Nourmohammadi, Ng, Fathi, Vollebregt ve Hanson (2023), karışık modeli montaj hattı dengeleme problemini işçi duruşunu dikkate alarak ele almışlardır. REBA yöntemini kullanarak işle ilgili kas-iskelet sistemi bozukluklarının risklerini değerlendirmek için dijital insan modelleme ve duruş değerlendirme teknolojilerinden yararlanmışlardır. Problemin üç amaç doğrultusunda karışık tamsayılı doğrusal programlama modelini formüle etmişlerdir. Bu amaçlar çevrim süresi, iş istasyonlarının maksimum ergonomik riski ve toplam ergonomik riskler olarak belirlenmiştir. Gelişmiş bir baskın olmayan sıralama genetik algoritmasını, komşuluk çözümleri üreten bir yerel arama prosedürünü ve gelecek vaat eden çözümlerin seçimini sağlayan çok kriterli bir karar verme mekanizmasını birleştirerek geliştirmişlerdir.

Katirae, Calzavara, Finco, Battaia ve Battini (2023), montaj hattı işçi atama ve yeniden dengeleme problemi üzerine bir çalışma yapmışlardır. Çalışanların performans değişkenliğini dikkate alarak görevlendirilmesi, işçiye bağlı fiziksel efor kısıtlamalarının dengelenmesi ve deneyimsiz işçilere yardımcı olmak için eğitmenlerden yararlanma imkânı sunulmuştur. Çevrim süresini ve yeniden atanan görev sayısını en aza indirmeyi amaçlayan iki amaçlı bir doğrusal programlama modeli önermişlerdir. Bu iki amaçlı problem için Pareto sınırlarını oluşturmak için Epsilon Kısıt yaklaşımı kullanılmış ve model farklı veri setleri için test edilmiş, sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Dalle Mura ve Dini (2023), gürültüye maruz kalmanın da dikkate alındığı, çalışanların ergonomisini iyileştirmek için iş rotasyonu ve işbirlikçi robotlar içeren karışık modeli montaj hattı dengeleme problemini çözmek için genetik algoritmaya dayalı bir yazılım aracı önermişlerdir. Hattın maliyetinin optimizasyonu yoluyla dikkate alınan ekonomik yönler ve hat üzerinde



operasyonların gerçekleştirilmesi için hem işçilerin enerji harcamalarının hem de gürültü maruziyetinin azaltılması ve düzeltilmesi amaçlanmıştır.

Harcanan enerji miktarları literatürde birçok farklı amaçlarla ele alınmış ancak bilindiği kadarıyla, MHDP’de çalışanların harcadıkları enerjinin akıllı saat kullanılarak tespiti ve bununla birlikte ergonomik risk skoru ile montaj hattı dengelemesini sağlayan bir çalışma ile karşılaşılmamıştır.

### 3. Modelin Geliştirilmesi

Montaj hattı dengeleme problemi, belirli bir amacı optimize etmek amacıyla; atama, öncelik ilişkileri ve kapasite kısıtlarını dikkate alarak işleri istasyonlara atama problemidir (Kucukkoc ve Zhang, 2014). MHDP için birçok yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemler üç ana başlık altında incelenebilir (Kucukkoc, 2020). Birinci grup “kesin yöntemler” adı verilen ve problemin eniyi (optimal) çözümünü bulan ve genellikle de matematiksel programlamaya dayalı yöntemlerin yer aldığı gruptur. Bu yöntemlere 0-1 Tamsayı Programlama, Hedef Programlama, Dinamik Programlama, Dal- Sınır Algoritması örnek verilebilir. İkinci grup ise üzerinde çalışılan probleme özgün olarak geliştirilmiş “sezgisel algoritmalar”dır. Bu yöntemler eniyi sonucu garanti etmez ama kısa bir zamanda iyi bir çözümü, kesin yöntemlere kıyasla, daha kısa bir sürede elde etmektedirler. Bu yöntemlere Kilbridge ve Wester Yöntemi, Hoffman Yöntemi ve Comsoal yöntemi örnek verilebilir. Üçüncü grupta ise algoritmanın orijinal hali problemin yapısından bağımsız olarak geliştirilmiş ancak istenilen probleme uyarlanabilen “meta-sezgisel algoritmalar” yer alır. Bu yöntemlere Genetik Algoritmalar, Karınca Koloni Algoritması, Tavlama Benzetimi, Yasaklı Arama yöntemleri örnek verilebilir.

Montaj hattı dengeleme problemlerinde, öncelik ilişkilerinin sağlanması ve istasyonlardaki boş sürelerin enküçüklenmesi amaçlanarak işlemlerin istasyonlara dengeli bir şekilde dağıtımı sağlanır. Ancak istasyonlarda yapılan farklı işlemler arasında işlem süresi olarak bir fark olmasa bile çalışanların harcadıkları enerji miktarları (Kcal) ve fiziksel zorlanma düzeylerinde farklılıklar ve sapmalar olabilmektedir. Bu nedenle montaj hatları dengelenirken, sadece işlemler arasındaki öncelik ilişkileri dikkate alınarak boş süreleri enküçükleyen değil, aynı zamanda hatta çalışan işçilerin yaptıkları işlemlerin fiziksel iş yükleri ve enerji tüketim miktarlarının da olabildiğince dengeli dağıtılması gerekmektedir. Aksi halde çalışanlar arasında adaletsiz iş yükü ve enerjinin dağılımı olacak ve iki ölçütün aynı istasyonda yüksek olması durumunda bu işlemleri yerine getiren çalışanlarda daha fazla kas iskelet sistemi rahatsızlıklarının (KİSR) oluşması beklenmektedir.

Çalışanların fiziksel iş yükü düzeylerinin belirlenmesinde ergonomik risk değerlendirme yöntemlerinden REBA yöntemi kullanılmıştır. Hignett ve McAtamney (2000) tarafından duruşları analiz etmek üzere geliştirilmiştir.

REBA metoduyla dinamik hareketler analiz edilebildiği gibi sabit duruşlar da analiz edilebilir. (Kocabaş, 2009). REBA yönteminde, vücut bölgeleri olarak; gövde, boyun, bacak, üst kol, alt kol ve bileklerin duruşu analiz edilir, duruş sırasında uygulanan kuvvet (veya taşınan yük), kavrama ve aktivite skoru eklenerek REBA skoru elde edilmektedir.

Çalışanların harcadığı enerji miktarlarının saptanması için akıllı saat kullanılmıştır.

### 3.1. Modelin Temel Yapısı

Bu çalışmada, istasyonların ergonomik risk ve enerji tüketim miktarları açısından kabul edilebilir düzeyde olmasını ve istasyonlara dengeli dağıtılmasını sağlayacak bir modelin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, literatürde çevrim süresini en küçükleme amacıyla kullanılan Basit Montaj Hattı Dengeleme-2 (BHMD-2) modeline ergonomik risk düzeyini ve enerji tüketim miktarlarını da göz önüne alan bir model geliştirilmiş ve beyaz eşya üretimi yapan bir işletmenin ocak montaj hattında uygulanmıştır.

Hedef programlama modelinde kullanılmak üzere her bir işlem için belirlenen ergonomik risk ve enerji tüketim miktarlarının her çalışana eşit dağılması varsayımıyla ortalama değerleri belirlenen istasyon sayısı dikkate alınarak hesaplanır. Ortalamanın  $\pm$  %15 toleransı alınarak her bir istasyon için kabul edilebilir maksimum ve minimum risk ve enerji tüketim düzeyleri belirlenmiştir. Böylece montaj hattı dengelenirken öncelik ilişkileri, çevrim süresi, istasyonların ergonomik risk düzeyleri ve enerji tüketim miktarları dikkate alınmıştır.

#### 3.1.1. Ergonomik Risk ve Enerji Tüketim Kısıtı Olmayan Model

İlk aşamada ergonomik risk düzeyi ve enerji tüketim miktarları dikkate alınmadan, çevrim süresini enküçükleme amacı ile model oluşturulmuştur.

#### Varsayımlar:

- İşlem süreleri atanan istasyondan bağımsız ve deterministiktir.
- Öncelik kısıtlamaları dışında atama kısıtlaması yoktur.
- Her işlem bir iş istasyonuna atanır.
- Her işçi her işlemi yerine getirebilmektedir.
- İşlemler bölünemez, atandığı istasyonda tamamlanması gerekmektedir.
- Her işlem bir istasyona atanmak zorundadır.
- Tek taraflı düz, seri hat düzeni.
- İstasyon sayısı bilinmemekte.

**Kümeler ve İndisler:**

$I$ : İşlem kümesi,  $I = \{1, 2, \dots, n\}$

$J$ : İstasyon kümesi,  $J = \{1, 2, \dots, m\}$

$P$ : Öncelik ilişkileri kümesi,  $i, h \in P$ ;  $i$  işlemi  $h$  işleminin komşu öncülüdür.

$i, h$ : İşlem indisi

$j$ : İstasyon indisi

**Parametreler:**

$t_i$ :  $i$  işlemin işlem süresi

$n$ : İşlem sayısı

$m$ : İstasyon sayısı

**Karar Değişkenleri:**

$x_{ij}$ :  $i$  işlem  $j$  istasyona atanmışsa 1, de 0.

$C$ : Çevrim süresi

**Amaç Fonksiyonu:**

$$\text{Min } C \tag{1}$$

**Kısıtlar:**

$$\sum_j X_{ij} = 1 \quad \forall i \tag{2}$$

$$\sum_i t_i X_{ij} \leq C \quad \forall j \tag{3}$$

$$\sum_j X_{ij} \leq \sum_j X_{hj} \quad \forall (i, h) \in P \tag{4}$$

$$X_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i, j \quad (5)$$

$$C \geq 0 \quad (6)$$

Denklem (1)'deki amaç fonksiyonu çevrim süresinin enküçüklenmesidir. Denklem (2) her işlemin bir iş istasyonuna atanmasını sağlar. Denklem (3) toplam istasyon süresinin çevrim süresini aşmamasını sağlar. Denklem (4) işlemler arasındaki öncelik ilişkilerinin sağlanmasını sağlar. Denklem (5) ve Denklem (6) işaret kısıtlarıdır.

### 3.1.2. Hedef Programlama Modeli

İşlemlerin ergonomik risk seviyeleri REBA yöntemiyle hesaplanmış, enerji tüketim miktarları ise akıllı saat kullanarak belirlenmiş ve modele kısıt olarak eklenmiştir. Amaç fonksiyonu ise çevrim süresi, ergonomik risk seviyesi ve enerji tüketim miktarlarının hedeflenen düzeylerinin aşılmaması için bu değerlerden sapmalarının enküçükleneceği biçimde değiştirilmiştir. Bu sapmaların alabileceği değer aralıkları birbirinden farklı olduğu için her bir sapma değeri alabileceği en büyük değere bölünmüş ve normalleştirilmiştir. Sapma değerleri karar verici için farklı önem derecesinde olabileceği için her bir normalleştirilmiş sapma değeri, ağırlıklar toplamı 1 olacak şekilde ağırlık değerleriyle çarpılmıştır.

Ergonomik risk ve enerji tüketim kısıtı olmayan model varsayımlarına ek varsayımlar şunlardır:

- Ergonomik risk değerlendirme yöntemlerinden REBA yöntemi ile işlemlerin iş yükleri belirlenmiştir.
- İşlemlerin enerji tüketim miktarları hesaplanırken tüm işçilerin aynı özelliklere (boy, kilogram vb.) sahip olduğu varsayılmıştır.
- Hedeflenen amaç fonksiyonu değerlerinin aşılmasına izin verilmiştir ancak cezalandırılmaktadır.

### Kümeler ve İndisler:

$I$ : İşlem kümesi,  $I = \{1, 2, \dots, n\}$

$J$ : İstasyon kümesi,  $J = \{1, 2, \dots, m\}$

$P$ : Öncelik ilişkileri kümesi,  $i, h \in P$ ;  $i$  işlemi  $h$  işleminin komşu öncülüdür.

$i, h$ : İşlem indisi

$j$ : İstasyon indisi

### Parametreler:

$t_i$ :  $i$ . işlemin işlem süresi

$n$ : İşlem sayısı

$m$ : İstasyon sayısı

$r_i$ :  $i$ . işlemin REBA risk skoru

$e_i$ :  $i$ . işlemin yapılmasında harcanan enerji miktarı

$C_{max}$ : Çevrim süresinin alabileceği maksimum değer

$R_{max}$ : İstasyonlarda REBA skoru toplamının alabileceği maksimum değer

$E_{max}$ : İstasyonlarda enerji miktarı toplamının alabileceği maksimum değer (cal)

$TC$ : Hedeflenen çevrim süresi

$R$ : Hedeflenen iş yükü değeri

$E$ : Hedeflenen enerji miktarı (cal)

$w_1$ : Çevrim süresi sapmasının önem derecesi

$w_2$ : İş yükü sapmasının önem derecesi

$w_3$ : Enerji miktarı sapmasının önem derecesi

### Karar Değişkenleri:

$x_{ij}$ :  $i$ . işlem  $j$ . istasyona atanmışsa 1, de 0.

$d_{j+}$ :  $j$ . istasyonda çevrim süresinin üstünde kalan pozitif sapma miktarı

$d_{j-}$ :  $j$ . istasyonda çevrim süresinin altında kalan negatif sapma miktarı

$b_{j+}$ :  $j$ . istasyonda REBA limitinin üstünde kalan pozitif sapma miktarı

$b_{j-}$ :  $j$ . istasyonda REBA limitinin altında kalan negatif sapma miktarı

$u_{j+}$ :  $j$ . istasyonda enerji miktarının üstünde kalan pozitif sapma miktarı

$u_{j-}$ :  $j$ . istasyonda enerji miktarının altında kalan negatif sapma miktarı

**Amaç Fonksiyonu:**

$$\text{Min } w_1 \frac{\sum_j d_j^+}{C_{max}} + w_2 \frac{\sum_j b_j^+}{R_{max}} + w_3 \frac{\sum_j u_j^+}{E_{max}} \quad (7)$$

**Kısıtlar:**

$$\sum_j X_{ij} = 1 \quad \forall i \quad (8)$$

$$\sum_i t_i X_{ij} - d_j^+ + d_j^- = TC \quad \forall j \quad (9)$$

$$\sum_j X_{ij} \leq \sum_j X_{hj} \quad \forall (i, h) \in P \quad (10)$$

$$\sum_i r_i X_{ij} - b_j^+ + b_j^- = R \quad \forall j \quad (11)$$

$$\sum_i e_i X_{ij} - u_j^+ + u_j^- = E \quad \forall j \quad (12)$$

$$X_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i, j \quad (13)$$

$$d_j^+, d_j^-, b_j^+, b_j^-, u_j^+, u_j^- \geq 0 \quad \forall j \quad (14)$$

Denklem (7)'deki amaç fonksiyonu, iş istasyonlarının fiziksel iş yükünü ve enerji miktarlarını dengelemenin yanı sıra çevrim süresinin enküçüklenmesini sağlar. Denklem (8) her işlemin bir iş istasyonuna atanmasını sağlar. Denklem (9) toplam istasyon süresinin çevrim süresini aşmamasını sağlar. Denklem (10) işlemler arasındaki öncelik ilişkilerinin sağlanmasını sağlar. Denklem (11) bir iş istasyonunun toplam fiziksel iş yükünü değerlendirir. Denklem (12) bir iş istasyonunun toplam enerji miktarını değerlendirir. Denklem (13) ve Denklem (14) işaret kısıtlarıdır.

### 3.2. Performans Kriterleri

Oluşturulan modelin başka yöntemlerle yapılan çözüm sonuçları ile karşılaştırılabilmesi için üç performans ölçütü tanımlanmıştır.

İlk performans ölçütü, atama sonrası istasyonların sırasıyla süre, ergonomik risk seviyeleri ve enerji miktarı ile hedef değerleri arasındaki sapmadır ve her bir istasyonun süre, ergonomik risk seviyeleri ve enerji miktarının ortalama değerden pozitif sapmaları toplamının ortalama değerleri ile istasyon sayısı çarpımına bölünmesiyle bulunur. Çevrim süresinin hedef değerden pozitif sapmaları dikkate alınarak hesaplanan performans ölçütü Denklem (15)'te verilmiştir. Ergonomik risk düzeyinin hedef değerden pozitif sapmaları dikkate alınarak hesaplanan performans ölçütü Denklem (16)'da verilmiştir. Enerji tüketim miktarının hedef değerden pozitif sapmaları dikkate alınarak hesaplanan performans ölçütü Denklem (17)'de verilmiştir.

$TC$ : Hedeflenen çevrim süresi

$C_{max}$ : Çevrim süresinin alabileceği maksimum değer

$T_j$ :  $j$ . istasyon zamanı

$K$ : İstasyon sayısı

$R$ : Hedeflenen iş yükü değeri

$R_{max}$ : İstasyonlarda REBA skoru toplamının alabileceği maksimum değer

$R_j$ :  $j$ . istasyonun toplam REBA skoru

$E$ : Hedeflenen enerji miktarı

$E_{max}$ : İstasyonlarda enerji miktarı toplamının alabileceği maksimum değer (cal)

$E_j$ :  $j$ . istasyonun toplam enerji miktarı

$$\text{Süre Performansı} = \frac{\sum |TC - T_j|}{TC * K} * 100 \quad (15)$$

$$\text{REBA Performansı} = \frac{\sum |R - R_j|}{R * K} * 100 \quad (16)$$

$$\text{Enerji Performansı} = \frac{\sum |E - E_j|}{E * K} * 100 \quad (17)$$

İkinci performans ölçütü, atama sonrası istasyonların sırasıyla süre, ergonomik risk seviyeleri ve enerji miktarı ile izin verilen maksimum değerleri arasındaki sapmadır ve her bir istasyonun süre, ergonomik risk seviyeleri ve enerji miktarının izin verilen maksimum değerden pozitif sapmaları toplamının izin verilen maksimum değerleri ile istasyon sayısı çarpımına bölünmesiyle bulunur. Çevrim süresinin maksimum değerden pozitif sapmaları dikkate alınarak hesaplanan performans ölçütü Denklem (18)'de verilmiştir. Ergonomik risk düzeyinin maksimum değerden pozitif sapmaları dikkate alınarak hesaplanan performans ölçütü Denklem (19)'da verilmiştir. Enerji tüketim miktarının maksimum değerden pozitif sapmaları dikkate alınarak hesaplanan performans ölçütü Denklem (20)'de verilmiştir.

$$\text{Süre Performansı(Max)} = \frac{\sum |C_{max} - T_j|}{C_{max} * K} * 100 \quad (18)$$

$$\text{REBA Performansı(Max)} = \frac{\sum |R_{max} - R_j|}{R_{max} * K} * 100 \quad (19)$$

$$\text{Enerji Performansı(Max)} = \frac{\sum |E_{max} - E_j|}{E_{max} * K} * 100 \quad (20)$$

Üçüncü performans ölçütü, hattın süre, ergonomik risk düzeyi ve enerji miktarı açısından performansı, üç ölçütün ortalaması alınarak toplam performans hesaplanır. Bu değer mümkün olduğunca küçük olması istenir. Hedef değerden sapmaları ile hesaplanan süre, REBA ve enerji performanslarının ortalaması Denklem (21)'de verilmiştir. Maksimum değerden sapmaları ile hesaplanan süre, REBA ve enerji performanslarının ortalaması Denklem (22)'de verilmiştir.

$$\text{Toplam Performans} = \frac{\text{Süre Performansı} + \text{REBA Performansı} + \text{Enerji Performansı}}{3} \quad (21)$$

$$\text{Toplam Performans(Max)} = \frac{\text{Süre Performansı(Max)} + \text{REBA Performansı(Max)} + \text{Enerji Performansı(Max)}}{3} \quad (22)$$



#### 4. Modelin Uygulanması

Bu bölümde geliştirilen modelin bir montaj hattında uygulaması açıklanmıştır. Montaj hattı ilk olarak ergonomik faktörler ve harcanan enerji miktarları dikkate alınmadan, çevrim süresini enküçükleme amacı ile BHMD-2 modeli temel alınarak dengelenmiştir. Daha sonra aynı modele her bir istasyon için belirlenen REBA ve enerji miktarı üst sınırından pozitif ve negatif sapmaların enküçükleneceği kısıtlar eklenerek, amaç fonksiyonu da hedef programlama yöntemine göre güncellenmiştir. İki çözüm sonucu karşılaştırılmıştır.

Bu çalışma, ankastre ocak montajının yapıldığı bir işletmenin montaj hattında uygulanmıştır. Çalışma öncesinde işletme yöneticisi ile temas kurularak çalışmanın amacı, yürütüm şekli hakkında detaylı bilgi verilmiş, araştırma ve makale için 13 Ekim 2023 tarihli izin alınmıştır. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri İnsan Araştırmaları Etik Kurulu Başkanlığı'nın 25 Ekim 2023 tarih ve 2023-20.01 nolu kararı ile araştırmanın etik ve bilimsel açıdan uygunluğu onaylanmıştır.

Bu çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

İşletmenin ocak montaj hattı 33 metre uzunlukta olup 34 işlem (görev) 13 adet istasyon bulunmaktadır.

Ocak montaj hattındaki işlemler, gözleme başlamadan önce çalışandan ölçümler için onay almış ve kabul etmesi halinde gönüllü katılım formunu imzalatmıştır. Montaj hattındaki her bir istasyon için iş analiz formları oluşturulmuş, ardından montaj hattında farklı gün ve saatlerde zaman etüdü yöntemi ile ölçümler alınarak standart süreler tespit edilmiştir.

Çalışma pozisyonlarından kaynaklanan KİSR belirlemek amacıyla birçok ergonomik risk değerlendirme yöntemi geliştirilmiştir. Yapılan işe, çalışma ortamına ve amaçlara uygun olarak doğru ergonomik risk değerlendirme yöntemini seçmek önemlidir. Gözleme dayalı ergonomik risk değerlendirme yöntemleri arasında literatürde en yaygın kullanılanlar; REBA, OWAS ve QEC yöntemleridir. Bu çalışmada, işletmedeki işlemler için uygun olabileceği değerlendirilen REBA yönteminin kullanılması tercih edilmiştir. Ergonomik riskin tespiti için, işlemin nasıl yapıldığı, işçinin işlemleri yapış esnasında vücut bölgelerini ne düzeyde zorlandığı gözlemlenmiş, sonra da REBA formunda belirtilen vücut bölgeleri için işçinin zorlanma düzeyi belirlenip forma işaretlemiştir. İşaretlenen düzeylere göre formdaki puanlar toplanarak REBA risk skoru hesaplanmıştır.

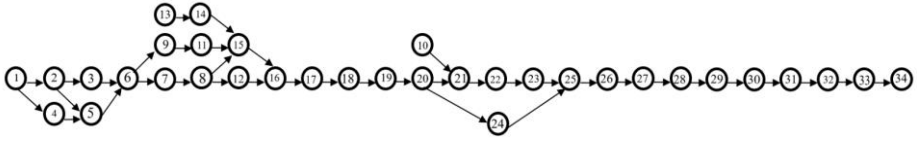
Mevcut montaj hattında, istasyonların standart süreleri ile REBA skorları Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1.  
İşlemlerin Standart Süre ve REBA Skoru Değerleri

İstasyon No	Sıra No	İşlemler	Süre (sn)	REBA Skoru	Toplam REBA Skoru
1	1	Çakmak Takma	10	12	26
	2	Buji Takma	16	4	
	3	Sekman Takma	16	10	
2	4	Switch Takma	17	4	9
	5	Termokupl Sensör Takma	17	5	
3	6	Sensör-Bek Bağlantısı Takma	17	5	10
	7	Somun Ağızlatma	13	5	
4	8	Sensör-Bek Bağlantısını Sabitleme	7	3	17
	9	Klips Takma	4	4	
	10	4D Etiket Yapıştırma	3	4	
	11	Kabloları Klipse Toplama	8	2	
5	12	Havuz Contası Takma	15	4	8
	13	Enerji Kablosu Montajı	20	4	
	14	Güç Kablosu Bağlantılarını Yapma	6	2	
	15	Kabloları Kablolarını Klipse Takma	8	2	
	16	Switch Kablolarını ve Düğme Valf Yönü Düzeltme	6	2	
6	17	Cam Yerleştirme	5	11	20
	18	Üst Tablaya Ayna Takılması	11	5	
	19	Wok İçin Conta	13	2	
7	20	Cam Aynalarının Vida ile Sabitlenmesi	40	5	5
8	21	Gaz Kontrol Testi	34	6	6
	22	Bek Gövde,Kapaklarını Takma ve Topraklama Testi Başlatma	31	5	5
9	23	Alev Kontrolü	32	6	8
	24	Cam Üstü Etiket Yapıştırma	5	2	
10	25	Son Kontrol	13	6	10
	26	Silme	12	2	
	27	Bek Kapaklarını Bantlama	12	2	
11	28	Alt Etiket Yapıştırma	10	7	37
	29	Ürün Etiketi Yapıştırma	14	7	
	30	Şilte Yerleştirme	4	5	
	31	Kartonlanmış Izgaraları Yerleştirme	6	6	
12	32	Yedek Ürün ve Kullanma Kılavuzunu Ürünün Yanına Bırakma	9	10	37
	33	Paket Üstü Etiketini Ürün Yanına Bırakma	5	2	
13	34	Paketleme	44	12	12

Akıllı saat teknolojisi, son yıllarda dikkat çeken ve piyasadaki çeşitliliği artış gösteren bir giyilebilir teknoloji ürünüdür. Gelişen teknolojiyle birlikte, taşınabilir teknolojik ürünler ve nesnelerin internetinin de gelişmesiyle, akıllı saatler günlük hayatta yer edinmeye başlamıştır. Akıllı saatler hem akıllı telefonlar ile uyumlu hem de sağlıkla ilgili birçok özelliği bir arada bulundurmaktadır. Akıllı saatler, bileğe takılmak üzere tasarlanmış, akıllı telefon özelliklerini içeren taşınabilir cihazlardır. Aktivite takibi, kalp atış hızı ve diğer yaşamsal fonksiyonları da kayıt altında tutmaktadır (Turgut, Danişan ve Tamer, 2020). Günümüzde pek çok farklı akıllı saat markası ve modeli bulunmaktadır. Bunların bazıları temel birkaç özelliğe yoğunlaşırken bazıları olabildiğince çok özelliğe sahip olmayı amaçlamaktadır. Akıllı saatlerde en yaygın bulunan özellikler ise nabız ölçme, harcanan enerji miktarını ölçme ve adım saymadır.

Montaj hattına ait öncelik ilişki diyagramı Şekil 1’de yer almaktadır.



Şekil 1. Ocak Montaj Hattına Ait Öncelik Diyagramı

Bu araştırmada, işçinin işlem boyunca harcadığı enerji miktarının tespiti için piyasada mevcut olan akıllı saatlerden biri olan **APPLE Watch SE** modelin kullanımı tercih edilmiştir. Akıllı saat çalışana takıldıktan sonra parametreler sıfırlanmış, işçinin kalp atış frekansının düzenli hale gelmesi için 5-10 dk beklendikten sonra ölçüm alınmaya başlanmıştır. Her istasyonda montaj yapan işçi için sabah ve öğleden sonra 60'ar dk olmak üzere, 120 dk boyunca harcanan enerji miktarı (Kcal) değerleri kayıt edilmiştir (Tablo 2).

Akıllı saat ile elde edilen enerji miktarları çalışanların istasyonda yaptıkları tüm işlemleri kapsamaktadır. Her bir işlemin enerji miktarını belirleyebilmek için istasyon için ölçülen enerji miktarı, o istasyonda yapılan tüm işlemlere, işlem süresiyle orantılı olarak dağıtılmalıdır. Örneğin 1. istasyonda 3 işlem vardır. Toplam işlem süresi 42 saniye ve enerji tüketim miktarı 240 Kcal'dir. Çalışan 120 dakikada 240 Kcal harcıyorsa dakikada 2 Kcal, saniyede 0,033 Kcal harcar. 1. işlem yapılırken işlem süresi 10 sn olduğu için 0,33 Kcal harcanır. Kaloriye çevirmek için 1000 ile çarpılırsa işlemin enerji miktarını 333 cal olarak elde edilir.

Tablo 2.

## Enerji Tüketim Miktarları

İstasyon No	Sabah Ölçümü	Öğleden Sonra Ölçümü	Toplam Enerji Miktarı (120 dk)
	Harcanan Enerji (60 dk)	Harcanan Enerji (60 dk)	
1	135	105	240
2	136	161	297
3	173	212	385
4	173	101	274
5	189	244	433
6	87	97	184
7	108	109	217
8	134	129	263
9	85	142	227
10	127	198	325
11	120	138	258
12	112	124	236
13	143	126	269

İşlemlerin enerji miktarlarının hesaplanması Denklem (23)'de gösterilmiştir.

$$\text{Enerji Miktarı} = \frac{\text{Harcanan toplam enerji miktarı}}{120 \cdot 60} * \text{İşlem Süresi} * 1000 \quad (23)$$

Her işlemin Denklem (23) kullanılarak hesaplanan enerji tüketim miktarları Tablo 3'te verilmiştir.

İşletmenin montaj hattında mevcut düzende istasyon sayısı 13'dür. Bu istasyon sayısında dengeleme yapıldığında boş zamanlar fazla kalmaktadır. Bu yüzden istasyon sayısı 12 olarak montaj hattının dengelemesi yapılmıştır. Toplam işlem süresi, REBA skoru ve enerji miktarları sırasıyla 468 sn, 173 ve 18.390 cal'dır. İşlemlerin süreleri, REBA risk skorları ve enerji miktarları her istasyona eşit dağılacığı düşünülürse hedeflenen çevrim süresi, hedeflenen iş yükü değeri ve hedeflenen enerji miktarı (cal);

$$TC: 468/12= 39$$

$$R: 173/12 =14,41 \approx 15$$

$$E: 18390/12= 1532,5 \approx 1533$$

Tablo 3.

## İşlemlerin Enerji Tüketim Miktarları

İstasyon No	Sıra No	İşlemler	Enerji Tüketim Miktarı
1	1	Çakmak Takma	333
	2	Buji Takma	533
	3	Sekman Takma	533
2	4	Switch Takma	701
	5	Termokupl Sensör Takma	701
3	6	Sensör-Bek Bağlantısı Takma	909
	7	Somun Ağızlatma	695
4	8	Sensör-Bek Bağlantısını Sabitleme	266
	9	Klips Takma	152
	10	4D Etiket Yapıştırma	114
	11	Kabloları Klipse Toplama	304
5	12	Havuz Contası Takma	571
	13	Enerji Kablosu Montajı	1203
	14	Güç Kablosu Bağlantılarını Yapma	361
	15	Kabloları Kablolarını Klipse Takma	481
6	16	Switch Kablolarını ve Düğme Valf Yönü Düzeltme	153
	17	Cam Yerleştirme	128
	18	Üst Tablaya Ayna Takılması	281
	19	Wok İçin Conta Takılması	332
7	20	Cam Aynalarının Vida ile Sabitlenmesi	1206
8	21	Gaz Kontrol Testi	1242
9	22	Bek Gövde, Kapaklarını Takma ve Topraklama Testi Başlatma	977
10	23	Alev Kontrolü	1444
	24	Cam Üstü Etiket Yapıştırma	226
11	25	Son Kontrol	466
	26	Silme	430
	27	Bek Kapaklarını Bantlama	430
12	28	Alt Etiket Yapıştırma	328
	29	Ürün Etiketini Yapıştırma	459
	30	Şilte Yerleştirme	131
	31	Kartonlanmış Izgaraları Yerleştirme	197
	32	Yedek Ürün ve Kullanma Kılavuzunu Ürünün Yanına Bırakma	295
	33	Paket Üstü Etiketini Ürün Yanına Bırakma	164
13	34	Paketleme	1644

Bu değerler çevrim süresi, fiziksel iş yükü ve enerji kısıtlarının hedeflenen değerleri olarak modele eklenmiştir. Ancak en yüksek işlemin enerji miktarı 1644 cal olduğu için 1533 cal hedeflenen değere ulaşmak mümkün değildir. Bu yüzden tüm ortalama değerler için  $\pm$  %15 toleransı her bir istasyon için kabul edilebilir maksimum ve minimum risk düzeyi olarak belirlenmiştir. Çevrim süresinin alabileceği maksimum değer, istasyonlarda REBA skoru toplamının alabileceği maksimum değer ve istasyonlarda enerji miktarı toplamının alabileceği maksimum değer (cal);

$$C_{max} = 39 * 1,15 = 44,85 \approx 45$$

$$R_{max} = 15 * 1,15 = 17,25 \approx 17$$

$$E_{max} = 1533 * 1,15 = 1762,95 \approx 1763$$

Bu değerler modele eklenmiş ve GAMS paket programı yardımıyla çözülmüştür. İlk olarak işlemlerin REBA skorları ve enerji miktarları dikkate alınmadan ve amaç fonksiyonu çevrim süresini enküçükleme olacak şekilde alınarak montaj hattı dengelemesi yapılmış ve çevrim süresi ise 47 sn olarak bulunmuştur. Hedef ve maksimum değerlerinin üzerinde kalan sapma değerleri hesaplanmış, altında kalan sapmalar 0 olarak gösterilmiştir. Sonuçlar Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4.

## REBA ve Enerji Tüketim Miktarları Dikkate Alınmadan Hat Dengelemesi

İstasyon No	İşlemler	İstasyon Zamanı	REBA Skoru	Enerji Tüketim Miktarı	HEDEF DEĞER			MAKSİMUM DEĞER		
					Çevrim Sapması	REBA Sapması	Enerji Tüketim Sapması	Çevrim Sapması	REBA Sapması	Enerji Tüketim Sapması
1	1,2,3,10	45	30	1513	6	15	0	0	13	0
2	4,13,14	43	10	2265	4	0	732	0	0	502
3	5,6,9,11	46	16	2066	7	1	533	1	0	303
4	7,8,12,15	43	14	2013	4	0	480	0	0	250
5	16,17,18,19,24	40	22	1120	1	7	0	0	5	0
6	20	40	5	1206	1	0	0	0	0	0
7	21	34	6	1242	0	0	0	0	0	0
8	22	31	5	977	0	0	0	0	0	0
9	23	32	6	1444	0	0	0	0	0	0
10	25,26,27,28	47	17	1654	8	2	121	2	0	0
11	29,30,31,32,33	38	30	1246	0	15	0	0	13	0
12	34	44	12	1644	5	0	111	0	0	0
				Toplam Sapma	36	40	1977	3	31	1055

Çözüm incelendiğinde 1. 3. 5. 10. ve 11. istasyonların belirlenen ergonomik risk seviyesini aştığı ve ergonomik anlamda kabul edilemez olduğu görülmektedir. 2. 3. 4. 10 ve 12. istasyonların da belirlenen enerji seviyesini aştığı görülmektedir. Çevrim süresi ise 47 sn olarak elde edilmiş olup ulaşılmak istenen hedefi aşmıştır.

Hedef çevrim süresi, REBA değeri ve enerji miktarından sapmaların toplamı; sırasıyla 36, 40 ve 1977 olarak elde edilmiştir. Hedef değerden +%15 sapma ile kabul edilebilir sınır tanımlanan değerlerden ise sırasıyla 3, 31 ve 1055 sapmıştır.

Bu çözüm için performans değerleri aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

$$\text{Süre Performansı} = \frac{|39 - 45| + |39 - 43| + |39 - 46| + |39 - 43| + \dots + |39 - 47| + |39 - 44|}{39 * 12} * 100 = \%7,7$$

$$\text{REBA Performansı} = \frac{|30 - 15| + |16 - 15| + |22 - 15| + |17 - 15| + |30 - 15|}{15 * 12} * 100 = \%22,2$$

$$\text{Enerji Performansı} = \frac{|2265 - 1533| + |2066 - 1533| + \dots + |1654 - 1533| + |1644 - 1533|}{1533 * 12} * 100 = \%10,7$$

$$\text{Toplam Performans} = \frac{7,7 + 22,2 + 10,7}{3} = \%13,5$$

$$\text{Süre Performansı (Max)} = \frac{|45 - 46| + |45 - 47|}{45 * 12} * 100 = \%0,6$$

$$\text{REBA Performansı(Max)} = \frac{|30 - 17| + |22 - 17| + |30 - 17|}{17 * 12} * 100 = \%15,2$$

$$\text{Enerji Performansı(Max)} = \frac{|2265 - 1763| + |2066 - 1763| + |2013 - 1763|}{1763 * 12} * 100 = \%5$$

$$\text{Toplam Performans(Max)} = \frac{0,6 + 15,2 + 5}{3} = \%6,9$$

Aynı modele her bir istasyon için belirlenen REBA ve enerji miktarı sapmalarının toplamının enküçükleneceği kısıtlar eklenerek amaç fonksiyonu da hedef programlama yöntemine göre düzenlemiş ve farklı önem dereceleri için elde edilen sonuçlar Tablo 5' te verilmiştir.

Tablo 5.

## REBA ve Enerji Tüketim Miktarları Dikkate Alınarak Farklı Öncem Dereceleri ile Hat Dengelemesi Sonuçları

Çözüm No	ÖNEM DERECELERİ			Çevrim Süresi	REBA Skoru	Enerji Tüketim Miktarı	HEDEF DEĞER			Amaç Fonksiyonu Değeri
	Çevrim ( $w_1$ )	REBA ( $w_2$ )	Enerji ( $w_3$ )				Çevrim Sapması	REBA Sapması	Enerji Tüketim Sapması	
1	1	0	0	47	30	2069	28	36	1362	0.622222
2	0	1	0	87	17	2887	118	4	4512	0.235294
3	0	0	1	53	37	1904	40	42	797	0.452070
4	0,2	0	0,8	53	37	1774	37	41	797	0.526101
5	0,4	0	0,6	53	37	2112	35	41	831	0.593924
6	0,6	0	0,4	51	37	1904	31	35	978	0.635228
7	0,8	0	0,2	51	30	2259	29	32	1192	0.650780
8	0	0,8	0,2	68	17	2333	87	5	2655	0.536485
9	0	0,6	0,4	68	19	2333	74	7	2273	0.762771
10	0	0,4	0,6	65	30	2219	51	20	1058	0.830656
11	0	0,2	0,8	65	30	2219	51	22	921	0.676748
12	0,8	0,2	0	47	30	2259	29	28	1409	0.844967
13	0,6	0,4	0	63	30	2421	38	22	1571	1.024314
14	0,4	0,6	0	68	19	2333	70	7	2468	0.869281
15	0,2	0,8	0	68	17	2333	81	5	2754	0.595294
16	0,2	0,2	0,6	64	30	1819	42	26	877	0.791018
17	0,2	0,4	0,4	65	30	2219	51	20	1058	0.937300
18	0,4	0,2	0,4	51	30	1836	33	26	1001	0.826329
19	0,4	0,4	0,2	51	30	2305	38	23	1164	1.011002
20	0,6	0,2	0,2	51	30	2164	30	27	1126	0.845384



1, 2 ve 3 numaralı çözümlerde amaç fonksiyonlarında sırasıyla sadece çevrim süresi, REBA skoru ve enerji tüketim miktarının enküçüklenmesidir. 4-7 numaralı çözümler REBA kısıtının, 8-11 numaralı çözümler çevrim süresinin, 12-15 numaralı çözümler enerji kısıtının dikkate alınmadığı çözümlerdir. 16-20 numaralı çözümler ise 3 amacın da dikkate alındığı çözüm sonuçlarıdır. 3 amacın da dikkate alındığı çözümlerde 16. ve 17. çözümlerde çevrim süreleri sırasıyla 64 ve 65 olarak elde edilmiştir. Bu değerler ergonomik risk ve enerji tüketim miktarları dikkate alınmadan yapılan dengeleme sonucu elde edilen 47 sn çevrim süresinden oldukça fazladır. 18. 19. ve 20. çözümlerde ise çevrim süresi 51 sn olarak elde edilmiştir. REBA skoru açısından incelendiğinde ise hepsinde 30 değeri elde edilirken enerji tüketim miktarları açısından en düşük değer 18. çözümde elde edilmiştir. Bu yüzden kurulan iki modelin karşılaştırılması için 18. çözüm seçilmiştir. Hedef ve maksimum değerlerinin üzerinde kalan sapma değerleri hesaplanmış, altında kalan sapmalar 0 olarak gösterilmiştir. Hat dengelemesi Tablo 6'da verilmiştir.

Çözüm incelendiğinde 1. 5. 10. ve 11. istasyonların belirlenen ergonomik risk seviyesini aştığı görülmektedir. 1. 2. 3. 4. 10 ve 12. istasyonların da belirlenen enerji seviyesini aştığı görülmektedir. Çevrim süresi ise 51 sn olarak elde edilmiştir ve ulaşılmak istenen hedefi aşmıştır. Hedef çevrim süresi, REBA değeri ve enerji miktarından sapmaların toplamı sırasıyla 33, 26 ve 1001 olarak elde edilmiştir. Hedef değerden +%15 sapma ile kabul edilebilir sınır tanımlanan değerlerden ise sırasıyla 8, 18 ve 73 sapmıştır.

Bu çözüm için performans değerleri aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\text{Süre Performansı} = \frac{|39 - 43| + |39 - 43| + |39 - 51| + |39 - 47| + |39 - 44|}{39 * 12} * 100 = \%7,1$$

$$\text{REBA Performansı} = \frac{|20 - 15| + |19 - 15| + |17 - 15| + |30 - 15|}{15 * 12} * 100 = \%14,4$$

Tablo 6.

## REBA ve Enerji Tüketim Miktarları Dikkate Alınan Hat Dengelemesi Sonuçları

İstasyon No	İstasyon İşlemler	İstasyon Zamanı	REBA Skoru	Enerji Tüketim Miktarı	Çevrim Sapması	HEDEF DEĞER		MAKSİMUM DEĞER		
						REBA Sapması	Enerji Tüketim Sapması	Çevrim Sapması	REBA Sapması	Enerji Tüketim Sapması
1	1,2,4	43	20	1567	4	5	34	0	3	0
2	5,6,9	38	14	1762	0	0	229	0	0	0
3	7,8,11,12	43	14	1836	4	0	303	0	0	73
4	3,13	36	14	1736	0	0	203	0	0	0
5	14,15,16,17,19	38	19	1455	0	4	0	0	2	0
6	18, 20	51	10	1487	12	0	0	6	0	0
7	10,21	37	10	1356	0	0	0	0	0	0
8	22,24	36	7	1203	0	0	0	0	0	0
9	23	32	6	1444	0	0	0	0	0	0
10	25,26,27,28	47	17	1654	8	2	121	2	0	0
11	30,31,32,33,29	38	30	1246	0	15	0	0	13	0
12	34	44	12	1644	5	0	111	0	0	0
Toplam Sapma					33	26	1001	8	18	73

$$\text{Enerji Performansı} = \frac{|1567 - 1533| + |1762 - 1533| + \dots + |1654 - 1533| + |1644 - 1533|}{1533 * 12} * 100 = \%5,4$$

$$\text{Toplam Performans} = \frac{7,1 + 14,4 + 5,4}{3} = \%9$$

$$\text{Süre Performansı (Max)} = \frac{|45 - 51| + |45 - 47|}{45 * 12} * 100 = \%1,5$$

$$\text{REBA Performansı(Max)} = \frac{|20 - 17| + |19 - 17| + |30 - 17|}{17 * 12} * 100 = \%8,8$$

$$\text{Enerji Performansı(Max)} = \frac{|1836 - 1763|}{1763 * 12} * 100 = \%0,3$$

$$\text{Toplam Performans(Max)} = \frac{1,5 + 8,8 + 0,3}{3} = \%3,5$$

İki çözümün hesaplanan performans ölçütlerine göre karşılaştırması Tablo 7' de verilmiştir.

Tablo 7.

#### Çözüm Sonuçlarının Karşılaştırılması

	Hedef Değer İçin		Maksimum Değer için	
	REBA ve Enerji Kısıtsız Çözüm	REBA ve Enerji Kısıtlı Çözüm	REBA ve Enerji Kısıtsız Çözüm	REBA ve Enerji Kısıtlı Çözüm
Süre Performansı	%7,7	%7,1	%0,6	%1,5
REBA Performansı	%22,2	%14,4	%15,2	%8,8
Enerji Performansı	%10,7	%5,4	%5	%0,3
Toplam performans	%13,5	%9	%6,9	%3,5

Çevrim sürelerinin, REBA skorlarının ve enerji tüketim miktarlarının hedef değerden sapmalarını hesaplamak amacıyla tanımlanan ölçütlerin değerlerine göre; ikinci modelde REBA ve enerji miktarı kısıtları dikkate alındığında istasyonların REBA skoru açısından hedef değerden sapma oranı %7,8 azalırken

aynı zamanda enerji miktarı açısından sapmasında %5,3 oranında azalma sağlanmıştır. Çevrim süresinde diğer ölçütlere göre daha az iyileştirme sağlanmış olup hedef değerden sapma oranı %0,6 azalmıştır.

Çevrim sürelerinin, REBA skorlarının ve enerji tüketim miktarlarının izin verilen maksimum değerden sapmalarını hesaplamak amacıyla tanımlanan ölçütlerin değerlerine göre; ikinci modelde istasyonların REBA skoru açısından izin verilen maksimum değerden sapma oranı %6,4 azalırken aynı zamanda enerji miktarı açısından sapmasında %4,7 oranında azalma sağlanmıştır. Çevrim süresinde ise amaçların belirlenen önem derecelerinden kaynaklı izin verilen maksimum değerden ilk modele göre %0,9 daha fazla sapmıştır.

İlk modelde hedef değerden sapmalar ikinci modele göre, tüm ölçütlerde daha yüksek değer alırken REBA ve enerji miktarı kısıtları dikkate alınan ikinci modelde ise bu sapmalar azalmış ve çalışanlar arasında iş yükü ve enerji miktarı açısından daha adil bir dengeleme elde edilmiştir.

İkinci modelde ergonomik risk seviyesi yüksek olan istasyon sayısında azalma sağlanmış ve aynı zamanda istasyonların risk seviyelerinde de azalma sağlanmıştır. İzin verilen maksimum değer için ise hem risk skorlarının hem de enerji tüketim miktarlarının sapmalarının azaldığı, enerji tüketim miktarı sınırını aşan istasyon sayısının sadece bir istasyona düştüğü görülmüştür. İkinci modelde hattın toplam performansı sapması azalmıştır, böylelikle her iki ölçüt açısından da ilk modele göre daha dengeli bir hat düzeni oluşturulmuştur.

## 5. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada beyaz eşya fabrikasında gerçek bir montaj hattı problemi modellenerek, çevrim süresi ve öncelik ilişkilerine ek olarak ergonomik risk faktörleri ve enerji tüketim miktarlarını da içeren matematiksel bir modelin çözümü sunulmuştur. Ayrıca, geliştirilen model ile klasik dengeleme modelinin çözümlerini karşılaştırmak için çevrim süresinin, ergonomik risk seviyesinin ve enerji tüketim miktarının kıyaslanması için performans ölçütleri tanımlanmıştır.

Bu çalışma, ergonomik risklerin ve enerji tüketim miktarlarının da montaj hattı dengelenirken dikkate alınmasının ne kadar önemli olduğunu göstermiştir. Sadece istasyonlardaki en yüksek ergonomik risk ve enerji tüketim miktarının değil aynı zamanda diğer istasyonların risk skorlarının ve enerji tüketim miktarlarının da azaltılmasını sağlamıştır.

Gelecek çalışmalarda U-tipi, paralel, çift taraflı montaj hatlarında veya ürün çeşitliliği açısından çok modelli ve karışık modelli montaj hatları için matematiksel modelin uygulaması yapılabilir. Gerçek hayat problemleri için işlemlerin çok daha fazla olması durumunda, büyük dengeleme problemleri için,

matematiksel model ile çözüm süresi artabileceğinden daha kısa bir zamanda iyi bir çözüm sonucu veren meta sezgisel algoritmalar probleme uyarlanabilir.

REBA değerleri modele eklenirken işlem süreleri dikkate alınarak, yani her bir işlemin yapıldığı süreyle orantılı ağırlıklı REBA değerlerinin kullanılması ile modelin güvenilirliğini arttırabilir.

Gerçek hayatta her bir işçinin bir montaj işlemini yerine getirirken harcadığı süre, ergonomik risk skorları ve enerji miktarı kişiden kişiye değiştiği düşünüldüğünde her bir işçi için her işlemin süre, fiziksel iş yükleri ve enerji tüketim miktarının belirlenip kurulan modele işçi atanmasıyla ilgili kısıtların eklenmesi ile bu üç ölçüt açısından daha iyi sonuçlar elde edilebilir.

### **Teşekkür**

Bu çalışma, 2209-B Üniversite Öğrencileri Sanayiye Yönelik Araştırma Projeleri Desteği Programı 2023 Yılı 2. dönem tarafından 1139B412301643 nolu proje kapsamında desteklenmiştir.

### **Araştırmacıların Katkısı**

Bu çalışmada; Dilara MENKİS, zaman ve enerji tüketim ölçümlerinin alınması, modelin GAMS ile kodlanması ve çözümü; Emin KAHYA, bilimsel yayın araştırması, modelin kurgulanması, makalenin oluşturulması, konularında katkı sağlamışlardır.

### **Çıkar Çatışması**

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

### **Kaynaklar**

Akyol, S. D., ve Baykasoğlu, A. (2019). ErgoALWABP: a multiple-rule based constructive randomized search algorithm for solving assembly line worker assignment and balancing problem under ergonomic risk factors. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 30, 291-302. Doi: <https://doi.org/10.1007/s10845-016-1246-6>

Battini, D., Delorme, X., Dolgui, A., ve Sgarbossa, F. (2015). Assembly line balancing with ergonomics paradigms: two alternative methods. *IFAC-PapersOnLine*, 48(3), 586-591. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.145>

- Battini, D., Delorme, X., Dolgui, A., Persona, A., ve Sgarbossa, F. (2016). Ergonomics in assembly line balancing based on energy expenditure: a multi-objective model. *International Journal of Production Research*, 54(3), 824-845. Doi: <https://doi.org/10.1080/00207543.2015.1074299>
- Bautista, J., Alfaro-Pozo, R., ve Batalla-García, C. (2016). Maximizing comfort in Assembly Lines with temporal, spatial and ergonomic attributes. *International Journal of Computational Intelligence Systems*, 9(4), 788-799. Doi : <https://doi.org/10.1080/18756891.2016.1204125>
- Bautista Valhondo, J., ve Alfaro Pozo, R. (2018). Mixed integer linear programming models for minimizing ergonomic risk dispersion in an assembly line at the Nissan Barcelona factory. *Dirección y organización. Revista de ingeniería de organización*, 65(2018), 72-89. Erişim adresi: <http://hdl.handle.net/2117/121515>
- Baykasoğlu, A. ve Akyol, Ş. D. (2014). Ergonomik montaj hattı dengeleme. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 29(4). Doi: <https://doi.org/10.17341/gummdf.00296>
- 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: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2007.02.026>
- Calzavara, M., Faccio, M., Persona, A., ve Zennaro, I. (2021). Walking worker vs fixed worker assembly considering the impact of components exposure on assembly time and energy expenditure. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 112, 2971-2988. Doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06438-9>
- Chica, M., Cordon, O., Damas, S., ve Bautista, J. (2012). Multiobjective memetic algorithms for time and space assembly line balancing. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 25(2), 254-273. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2011.05.001>
- Dalle Mura, M., ve Dini, G. (2019). Optimizing ergonomics in assembly lines: A multi objective genetic algorithm. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 27, 31-45. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2019.08.004>
- Dalle Mura, M., ve Dini, G. (2023). Improving ergonomics in mixed-model assembly lines balancing noise exposure and energy expenditure. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 40, 44-52. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2022.11.005>
- Garg, A., Chaffin, D. B., ve Herrin, G. D. (1978). Prediction of metabolic rates for manual materials handling jobs. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 39(8), 661-674. Doi: <https://doi.org/10.1080/0002889778507831>

- Gülbandılar Canbazoğlu, S. ve Kahya, E. (2023). Ergonomik montaj hattı dengeleme probleminin farklı risk faktörleri için modellenmesi ve çözümü. *Endüstri Mühendisliği*, 34(3), 433-457. <https://doi.org/10.46465/endustrimuhendisligi.1329111>
- Güner, B. ve Hasgül, S. (2012). Sürdürülebilir denge için ergonomik faktörleri içeren U-tipi montaj hattı dengelemesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 27(2), 407-415.
- Hignett, S. ve McAtamney, L. (2000). Rapid entire body assessment (REBA). *Applied Ergonomics*, 31(2), 201-205. Doi : [https://doi.org/10.1016/S0003-6870\(99\)00039-3](https://doi.org/10.1016/S0003-6870(99)00039-3)
- Lin, L., Wei, L., Liu, T., Zhang, H., Qin, P., Leng, J., ... ve Liu, Q. (2024). Hierarchical and two-stage framework for the paced mixed-model assembly line balancing and sequencing problem considering ergonomic risk. *Engineering Optimization*, 56(7), 1098-1121. Doi: <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.26242881.v1>
- Kahya, E., Şahin, B., Daşdelen, E. ve Doğru, S. (2018). Ergonomik risk kısıtları altında yeni bir montaj hattı dengeleme modeli geliştirilmesi, *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 6(ÖS:Ergonomi2017), 188-196. Doi: <https://doi.org/10.21923/jesd.363560>
- Katirae, N., Calzavara, M., Finco, S., Battaia, O. ve Battini, D. (2023). Assembly line balancing and worker assignment considering workers' expertise and perceived physical effort. *International Journal of Production Research*, 61(20), 6939-6959. Doi : <https://doi.org/10.1080/00207543.2022.2140219>
- Kocabaş, M. (2009). *Ağır ve tehlikeli işlerde çalışan iş görenlerde zorlanmaya neden olan çalışma duruşlarının analizi* (Yüksek Lisans Tezi). Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Kucukkoc, I. (2020). *Montaj Hattı Planlama Modelleme ve Optimizasyon*, Nobel Yayıncılık.
- Kucukkoc, I. ve Zhang, D. Z. (2014). Simultaneous balancing and sequencing of mixed-model parallel two-sided assembly lines. *International Journal of Production Research*, 52(12), 3665-3687. Doi : <https://doi.org/10.1080/00207543.2013.879618>
- Mokhtarzadeh, M., Rabhani, M. ve Manavizadeh, N. (2021). A novel two-stage framework for reducing ergonomic risks of a mixed-model parallel U-shaped assembly-line. *Applied Mathematical Modelling*, 93, 597-617. Doi : <https://doi.org/10.1016/j.apm.2020.12.027>
- Nourmohammadi, A., Ng, A. H., Fathi, M., Vollebregt, J. ve Hanson, L. (2023). Multi-objective optimization of mixed-model assembly lines incorporating musculoskeletal risks assessment using digital human modeling. *CIRP Journal*

of *Manufacturing Science and Technology*, 47, 71-85. Doi : <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2023.09.002>

Polat, O., Mutlu, Ö. ve Özgormus, E. (2018). A mathematical model for assembly line balancing problem type 2 under ergonomic workload constraint. *The Ergonomics Open Journal*, 11, 1-10. Doi: <https://doi.org/10.2174/1875934301811010001>

Şahin, B. N. ve Kahya, E. (2018). Hedef programlama modeli ile ergonomik kısıtlar altında montaj hattı dengelemesi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 6, 188-196. Doi: <https://doi.org/10.21923/jesd.358709>

Tiacci, L. (2018). The problem of assigning rest times to reduce physical ergonomic risk at assembly lines. *IFAC-PapersOnLine*, 51(11), 692-697. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.399>

Turgut, Z. N., Danişan, T. ve Tamer, E. R. E. N. (2020). Spor yapanlar için en uygun akıllı saatin AHP ve PROMETHEE yöntemleri ile seçimi. *Uluslararası Beden Eğitimi Spor ve Teknolojileri Dergisi*, 1(2), 1-11. Erişim adresi : <https://dergipark.org.tr/en/pub/best/issue/59360/777576>

Yetkin, B. N. (2019), *Ergonomik Montaj Hattı Dengeleme Probleminin Konik Skalerleştirme Yöntemiyle Çözümü* (Yüksek Lisans Tezi). Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.

Yetkin, B. ve Kahya, E. (2022). A bi-objective ergonomic assembly line balancing model with conic scalarization method, *Human Factors and Ergonomics In Manufacturing*, 32(6), 494-507. Doi : <https://doi.org/10.1002/hfm.20967>

Zhang, Z., Tang, Q., Ruiz, R. ve Zhang, L. (2020). Ergonomic risk and cycle time minimization for the U-shaped worker assignment assembly line balancing problem: A multi-objective approach. *Computers & Operations Research*, 118, 104905. Doi : <https://doi.org/10.1016/j.cor.2020.104905>