



ERGONOMİK MONTAJ HATTI Dengeleme Probleminin Farklı Risk Faktörleri İçin Modellemesi ve Çözümü

Sena GÜLBANDILAR CANBAZOĞLU¹, Emin KAHYA^{2*}

¹Ford Otosan A.Ş.

Bursa KütaHYa Yolu İNÖNÜ/ESKİŞEHİR

ORCID No : <http://orcid.org/0000-0001-7295-0505>

²Eskişehir 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

Montaj hattı dengeleme problemleri, akış odaklı bir üretim sisteminde gerekli tüm görevlerin iş istasyonlarına etkili bir şekilde atanmasını amaçlar. Fakat montaj hatlarında meydana gelen tekrarlı hareketler ve statik duruşlar çalışanlarda Kas-İskelet Sistemi Rahatsızlıklarına sebep olmaktadır. Bu çalışmada, sadece istasyon sayısını azaltmayı hedefleyen değil aynı zamanda ergonomik zorlanmayı da dengeleyen bir montaj hattı probleminin ele alınması amaçlanmıştır. İstasyonlarda yer alan görevler için zaman etüdü ile süreler ve istasyon başına düşen ergonomik risk değerleri REBA yöntemi ile belirlenmiştir. Önerilen model, bir ağır ticari araç işletmesinin motor montaj hattındaki 24 istasyon ve 198 görev için uygulanmıştır. Sonuçta, çevrim süresi 14,31 dakika, toplam dengeleme gecikmesi 42,64 dakika olarak elde edilmiştir. Bu hatta, istasyon başına REBA skorları 6

*Sorumlu yazar; e-posta : ekahya@ogu.edu.tr

doi : <https://doi.org/10.46465/endustrimuhendisligi.1329111>

ile 55 arasında değişmektedir. GAMS paket programı kullanılarak montaj hattı dengeleme modelinin verdiği optimum çözüme göre atamalar yapılmış, elde edilen çözümlerlerde istasyon sayısı 23 ve toplam dengeleme gecikmesi 28,33 dakika elde edilmiştir. Ergonomik risk kısıtı içeren çözümde ise istasyon sayısı 29'a yükselirken toplam dengeleme gecikmesi 114,39 dakika hesaplanmıştır. Ancak istasyonlar arası REBA skorlarının dağılımı 6 ile 30 arasında değişkenlik göstermiştir. Model; mevcut ortalama ergonomik risk düzeyi için farklı toleranslar ile, ağırlıklı ergonomik risk düzeyi içeren model ve değişken üretim talebi için oluşturulan yeni hedefler ile çözdürülerek duyarlılık analizi yapılmıştır.

MODELING AND SOLUTION OF THE ERGONOMIC ASSEMBLY LINE BALANCING PROBLEM FOR DIFFERENT ERGONOMIC RISK FACTORS

Keywords

Assembly Line Balancing, Ergonomic Risk Assessment, REBA

Abstract

Assembly line balancing problems aim to assign all required tasks effectively to workstations in a flow-oriented production system. However, due to repetitive movements and static postures on assembly lines, it causes Musculoskeletal Disorders in employees. In this study, it is aimed to address an assembly line problem that not only aims to reduce the number of stations but also balances the ergonomic strain. Operation times by using time study and ergonomic risk values by the REBA method for the stations were determined. In the engine assembly line of a heavy commercial vehicle enterprise, the cycle time is 14.31 minutes and the total balancing delay is 42.64 minutes for 198 tasks and 24 stations. In this line, REBA scores per station range from 6 to 55. With the GAMS package program, the assignments were made with the optimum solution of the assembly line balancing problem. The number of stations was 23 and the total balancing delay was 28.33 minutes. In the solution containing ergonomic risk constraint, the number of stations increased to 29, while the total balancing delay was calculated as 114.39 minutes. However, the distribution of REBA scores per station varied between 6 and 30. In the model; sensitivity analysis was carried out by solving with different tolerance margins for the current average ergonomic risk

constraint, with the model containing the weighted ergonomic risk constraint, and with new targets created in line with the variable production demand.

Araştırma Makalesi	Research Article
Başvuru Tarihi : 18.07.2023	Submission Date : 18.07.2023
Kabul Tarihi : 10.11.2023	Accepted Date : 10.11.2023

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.

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. 2008'de, ABD'de ortalama 10 gün süreyle işten uzak durmayı gerektiren 315.000 işle ilgili kas-iskelet sistemi bozukluğu vakası rapor edilmiştir (Otto ve Scholl, 2011).

Otomatik olmayan montaj hatlarında, operatörler, aynı tip işlemleri sürekli olarak tekrarlamaktadır. Tekrarlayan işlerin işçi üzerinde kümülatif bir etkisi vardır. Ergonomik olarak iyi tasarlanmayan montaj hatları, sadece verimsizliğe değil, aynı zamanda çalışanların meslek hastalıklarına yakalanmalarına da sebep olmaktadır. Meslek hastalığı, çalışma koşullarının bir sonucu olarak ortaya çıkan kronik bir hastalık veya bozukluktur. Sosyal Güvenlik Kurumunun 2020 yılı istatistiklerine (<https://www.sgk.gov.tr/Istatistik/Yillik/fcd5e59b-6af9-4d90-a451-ee7500eb1cb4/>) göre, 17.358.140 (zorunlu sigortalı) işçi istihdam edilmiş, iş yerlerinde 908 meslek hastalığı vakası meydana gelmiş, bunların 54 adeti (%5,73) ise kas iskelet sistemi hastalıkları sınıfında yer almıştır.

Montaj hattı, seri bir şekilde düzenlenmiş istasyon adı verilen üretken alanlardan oluşan akış odaklı bir üretim sistemidir. Nihai ürün, konveyör veya bant gibi bir taşıma sistemi üzerindeki tüm istasyonlardan geçen hattan aşağı doğru hareket

eden bir iş parçası olarak başlar. Her istasyonda iş parçası üzerinde montaj işlemleri gerçekleştirilir. Her iş parçasının bir istasyonun sınırları içinde kaldığı süre, konveyör hızına bağlıdır. İş parçalarının temin süreleri arasındaki aralığa çevrim süresi denir. Genel olarak, herhangi bir istasyonda tek bir operatör tarafından iş parçası üzerinde yapılan montaj işlemlerinin toplam miktarı bu çevrim süresini aşamaz. Montaj işlemlerinin teknolojik ve organizasyonel koşullar nedeniyle bazı öncelik kısıtlamaları vardır. Çevrim süresi sınırlamasını ve operasyonlar arasındaki öncelik şartını sağlarken bazı amaçlara göre montaj operasyonlarının istasyonlara atanmasına ilişkin karar problemlerine Montaj Hattı Dengeleme Problemi (MHDP) denir. 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).

MHDP, bir montaj hattını tasarlarlarken ortaya çıkan bir karar problemidir ve bazı hedeflere karşılık gelen iş istasyonları arasında her biri bir işlem süresine ve bir dizi öncelik ilişkisine sahip olan görevlerin optimal atamasını bulmaktan oluşur. Problem, kapasite ve maliyet odaklı olandan sosyal ve organizasyonel odaklı olana kadar değişen çeşitli hedeflere göre hattın iş istasyonları arasında montaj işinin optimal dağılımını belirlemeyi hedefler (Zacharia ve Nearchou, 2013).

Pek çok montaj hattında ergonominin verimlilik ve iş güvenliği üzerinde büyük etkisi olabilir. Geleneksel MHDP'nde optimizasyon yaklaşımları zaman ve maliyet değişkenlerini dikkate alırken, çok az çalışma ergonomi yönlerini de ele almıştır (Battini, Delorme ve Dolgui, 2016).

Bu çalışmada, MHDP, ergonomi boyutunu da içerecek şekilde genişletilerek, çok amaçlı modelleme ele alınmıştır. Öncelik ilişkileri ve çevrim zamanı kısıtına ilaveten çalışma duruşlarına ait ergonomik risk düzeyini dikkate alarak istasyon sayısını belirleyen MHDP modeli sunulmuştur. Her istasyonun ergonomik risk skoru, REBA yöntemi ile belirlenmiş ve maksimum (ortalamanın %10 üzeri) ile minimum (ortalamanın %10 altı) arasında kalacak şekilde sınırlandırılmıştır. Çalışmada, bir ağır ticari araç işletmesinin 24 istasyon ve 198 görev (iş elemanı) olan bir montaj hattı için, ergonomik kısıtları içeren ve içermeyen Basit Montaj Hattı Dengeleme Problemi (BMHDP), GAMS arayüzünün CPLEX çözücüsü kullanılarak istasyon sayısının en küçüklenmesini amaçlayan modelleri için çözülmüştür. Model, değişken talepler için de çözümlenerek duyarlılık analizleri gerçekleştirilmiştir.

2. Bilimsel Yazın Taraması

Son yıllarda montaj operatörlerinin üretim hatlarında yaşadıkları zorluklar geniş çapta incelenmiş ve araştırmacıların yakın tarihli çalışmaları, insan operasyonları analizine ergonomi değerlendirmelerinin dahil edilmesinin

önemli olduğu montaj sistemlerinde; verimlilik ve ergonomi arasında bir bağlantı olduğunu göstermiştir.

Bu konuyla ilgili önceki araştırmalar, montaj mühendisliğini ergonomiyle birleştirmenin ekstra değerini göstermiş olup, yapılan çalışmalarının çoğu, çalışanların ergonomik zorlanmalarından kaynaklanan süre kayıplarına odaklanmıştır. En kısa çevrim süresini sağlayan bir çözüm, aslında montaj hattında ergonomik zorlanmalar nedeniyle, her zaman montaj hattının kabul edilebilir risk sınırlarına uymayabilmektedir.

Literatürdeki çalışmalarda önerilen matematiksel modellerde ergonomi etkisinin nasıl uygulandığı araştırılmış ve son yıllarda yapılan bazı çalışmalar, üç başlık altında incelenerek sunulmuştur.

- a) Kısıtlarda ergonomik riski eşitlik halinde bulunan MHDP çalışmaları
- b) Amaç fonksiyonunda ergonomik parametre bulunan MHDP çalışmalar
- c) Karma model üretim, paralel ve/veya U tipi üretim hatları, işçi ataması, alan kısıtlamaları gibi diğer yöntemler ile ergonomik MHDP çalışmaları

Kısıtlarda ergonomik riski eşitlik halinde bulunan MHDP çalışmaları, ergonomik risk skorlarının aşılması için eklenen kısıtların bulunduğu çalışmalardır. Mutlu ve Özgörmüş (2012), işle ilgili yaralanmaları azaltmak için görev önceliği, işlem süreleri ve fiziksel iş yüklerini içeren bir montaj hattı dengeleme problemi ele almışlardır. Bir görevin fiziksel iş yükünü bulanık bir kavram olarak ele alarak bulanık bir doğrusal programlama modeli önermişler ve problemi GAMS yardımıyla çözmüşlerdir. Baykasoğlu ve Demirkol Akyol (2014), BMHDP Type-2 için COMSOAL yöntemi ile, ergonomik risk düzeyleri açısından daha kabul edilebilir bir dengeleme ele almışlardır. Ergonomik risk OCRA yöntemi kullanılarak hesaplanmış, COMSOAL dengelemesi yapılırken istasyona atanabilecek görevler kümesinde, çevrim süresi ve öncelik kısıtlarına ek olarak kabul edilebilir risk seviyesini aşmayacak görevler seçilmiştir. Sonuçta istasyon sayısı artmadan, belirlenen ergonomik risk seviyesinin altında istasyonlar elde edilmiştir. Sternatz (2014), montaj hattında tüm gereklilikleri karşılayabilecek esneklik ve hızda yeni bir sezgisel prosedür geliştirmiştir. Gerekli kısıtlamaları göz önünde bulundurmak için Fleszar ve Hindi (2003)'nin Çoklu-Hoffman sezgiselini genişletilerek kullanılmıştır. Tüm görevler için biyomekanik analiz yapılmış, istasyonda bulunan görevlerin biyomekanik zorlanma düzeyine bağlı olarak; riskli, potansiyel riskli ve risksiz olarak sınıflandırılmıştır. Sezgisel prosedür, yapılan test problemlerinde risksiz ve potansiyel riskli istasyonlardan oluşan uygun çözümler bulmuştur. Kara, Atasagun, Gökçen, Hezer ve Demirel (2014), basit modeli MHDP için, kaynak ve ergonomik kısıtları içeren maliyet tabanlı çok amaçlı bir matematiksel model geliştirmişlerdir. Model, işçi maliyeti, gerekli yardımcı işçi maliyeti, ekipman kullanım maliyeti ve yüksek aydınlatma maliyetlerinin toplam yıllık değeri ile ayakta çalışan işçi sayısını en küçüklemeyi amaçlamaktadır.

Otto ve Battaia (2017), ergonomik riskleri dikkate alan montaj hattı dengeleme ve iş rotasyon planlamasına yönelik optimizasyon yaklaşımlarını içeren bir literatür araştırması (survey) sunmuşlar, önemli bulguları özetlemişlerdir. Takanokura ve diğ. (2017), bir istasyona atanan işlemlerin oluşturduğu toplam risk yükünü işlem süreleri ile ağırlıklandırmış ve çevrim süresine bölerek kümülatif bir risk yükü elde etmişlerdir. Çalışmada, bir işçinin günlük kümülatif fiziksel risk yükünü hesaplarken, o gün üretilen ürün miktarı ile, bir çevrim için hesaplanan ağırlıklı risk yükü çarpılmıştır. Fiziksel risk için REBA yöntemine dayanan bir yöntem önerilmiştir. Önerilen yöntemin geçerliliği bir satış otomati montaj hattında 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. Dalle Mura ve Dini (2022), çalışanların ergonomik koşullarını iyileştirmek amacıyla, iş rotasyonu ve insan-robot işbirliğini dikkate alarak, BMHD ele almış ve genetik algoritma ile çözüm önermişlerdir. Problemin hedefleri; (i) işbirlikçi robotlar ile montaj hattını uygulama maliyetini en aza indirme vb (ii) atanmış işlemlerini gerçekleştirirken enerji harcamalarını azaltmak için işçiler arasındaki enerji yükü değişimini en aza indirmektir. Çalışmada, önerilen model bir aracın endüstriyel montaj hattına uygulanmıştır.

Özcan, Aydoğan, Himmetoğlu ve Delice (2022), paralel montaj hatlarında işçi atama ve montaj hattı dengeleme problemi için ortak çevrim süresinin en küçüklenmesini ele alan bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Dual doğrusal matematiksel programlama modeli geliştirilmiş, orta ve büyük boyutlu problemler için yapay arı kolonisi tabanlı çözüm yaklaşımı önerilmiştir. Önerilen modelin etkinliğini değerlendirmek amacıyla klasik parçacık sürüsü optimizasyonu algoritması ve on farklı öncelik kuralıyla karşılaştırılmıştır.

Junior, Michels ve Magatao (2023), Tamsayılı Doğrusal Programlama ile çözmek için minimum istasyon sayısının elde edildiği ve maksimum ergonomik risk iş yükünü karşılamaya odaklanan F tipi bir ergonomik montaj hattı dengeleme problemini çözmek için bir yaklaşım önermişlerdir. OCRA yöntemi ile toplanan veriler doğrusallaştırılarak kısıtlara eklenmiş olup istasyon sayısını en küçüklemeyi amaçlayan problem sunmuşlardır.

Amaç fonksiyonunda ergonomik parametre bulunan çalışmalardan, Choi (2009), MHDP-2 için iki amaçtan oluşan, 0-1 tam sayılı bir model geliştirmiştir. Modelin amaçları; a) istasyonların ortalama işlem zamanından toplam pozitif sapmalarını en küçüklemek b) istasyonların toplam ergonomik riskinin, en iyi çalışma koşullarında işçide biriken iş yükü olarak belirlenen standart bir

değerden pozitif sapmalarını en küçüklemek olarak belirlenmiştir. İşçinin maruz kaldığı ergonomik fiziksel riskleri tanımlayan 13 farklı ölçüt tanımlanmıştır. Bu ölçütler ağırlıklandırılarak bileşke bir risk faktörü oluşturulmuştur. Çok amaçlı modelin çözümünde Chebyshev hedef programlama yöntemini kullanmış ve 20 test probleminde denemeler yapılmıştır. Otto ve Scholl (2011), MHDP-1 için ergonomik riskleri modele farklı şekillerde entegre etmeyi denemişlerdir. Ergonomik riskin, kısıt olarak değil amaç fonksiyonu ile modele eklenmesi incelenmiştir. İstasyon sayısı ve ergonomik risk arasında uzlaşık çözümlerin bulunması için iki amacı ağırlıklı toplayarak birleştiren çok amaçlı fonksiyon oluşturulmuştur. Amaç fonksiyonunda ergonomik risk farklı versiyonlarda uygulanmıştır. Çözüm yöntemi olarak iki aşamalı tavlama benzetimi ve yerel arama sezgiselleri uygulanmıştır. İstasyonların ergonomik risk skoru OCRA, NIOSH, EAWS yöntemleri ile hesaplanmıştır. 268 test problemi ile modelin uygulanması yapılmıştır. Cheshmehgaz, Haron, Kazempour ve Desa (2012), MHDP için tekrarlı ve monoton duruşlardan kaynaklanan ergonomik riskleri azaltmayı amaçlayan yeni bir model geliştirmişlerdir. ARP adlı, çalışanın farklı vücut bölgeleri için (kolar, bacaklar ve sırt) birikimli duruş riskini hesaplayan bir formül kullanmışlardır. Ergonomik riskler OWAS yöntemi ile belirlenmiştir. ARP amaç fonksiyonunda ergonomik riskin olması ile iyi sonuçlar elde edilmiş ancak istasyon sayısı arttıkça çözüm zamanı artmış ve daha az uygun çözüm elde edilmiştir. 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 modelledir. İkincisi ise çok amaçlı problemi tek amaca indirgemektir. Barathwaj, Raja ve Gokulraj (2015), istasyon sayısı, istasyonlar arası ve her istasyon içindeki iş yükü indeksini azaltmayı amaçlayan karma model MHDP ele almışlardır. Bir iş istasyonunun ergonomik risk seviyesi, RULA yöntemi kullanılarak hesaplanan birikimli risk durumu adı verilen bir parametre ile değerlendirilmiştir. Problemin çözümünde genetik algoritma kullanılmıştır. Seçme, çaprazlama ve mutasyon gibi genetik algoritma çözümlenmesi ele alınan karma MHDP'ne göre düzenlenmiştir. Sonuçlar, üretim hızının %39,5 arttığını ve belirli bir model için montaj süresinin 18 dakikadan 13 dakikaya düştüğünü göstermiştir.

Battini, Delorme ve Dolgui (2016), karışık modelli 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. Bautista, Rocío ve Batalla-García (2016), karışık modelli MHDP için, istasyonların ergonomik risklerinin ortalama mutlak sapmalarını en küçüklemeyi amaçlayan bir matematiksel model oluşturmuşlardır. Tek amaçlı bu modelin çözümünde, karışık tam sayılı programlama yöntemi ve GRASP

algoritması kullanarak iki farklı çözümü karşılaştırmışlardır. RULA, OCRA ve NIOSH ergonomik risk değerlendirme yöntemleri kullanılmış ve çözüm yöntemlerinin performansını karşılaştırmak için; hattın maksimum ergonomik riski ve hattaki en iyi ve en kötü ergonomik risk skorları arasındaki farkın miktarına bakmışlardır. Sonuç olarak; GRASP algoritması çok daha kısa sürelerde ve maksimum ergonomik risk açısından daha iyi çözümler elde edilmiştir. Mura ve Dini (2017), çok amaçlı bir BMHDP çözmek için yeni bir genetik algoritma yaklaşımı önermişlerdir. Hedefler, iş istasyonu sayısını ve iş yükü dengesizliğini en aza indirilmesidir. Manuel montaj hatlarında çok önemli olan vasıflı işçi sayısı, iş istasyonları ve montaj ekipmanı sayısının en aza indirilmesi amaçlanmıştır. Baykasoğlu, Tasan, Tasan ve Akyol (2017), MHDP, alt MHDP'de, işçi atama ve istasyon yerleşim problemlerinin hepsini içeren montaj hattı tasarımında ergonomik risk faktörlerini içeren bir yaklaşım sunmuşlardır. Alt problem olarak ele alınan montaj hattı dengelemede; ergonomik risk skorları OCRA indeks yöntemiyle hesaplanmış ve tüm istasyonların risk değerleri, ortalama risk değeri etrafında düzgün dağılması için kısıt oluşturulmuştur. Çok fazla amaç ve kısıt olması nedeniyle kesin çözüm yöntemleri yerine kural tabanlı bir sezgisel yöntem geliştirilmiş ve windows tabanlı bir karar verme yazılım programı ile çözülmüştür.

Şahin ve Kahya (2018), istasyon sayısını ve iş yükünden sapmaları en küçükleme 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. Polat, Mutlu ve Özgörmüş (2018), BMHDP-2 için çevrim zamanının yanında istasyonların fiziksel risklerini de en küçüklemeyi amaçlayan çok amaçlı bir model geliştirmişlerdir. Ergonomik riskler REBA yöntemiyle hesaplanmış ve her bir istasyonun alabileceği maksimum risk skoru sınır koyularak, pozitif ve negatif sapmalar kısıtlara eklenmiştir. İki amaçlı model küçük boyutlu bir test problemine uygulanarak, hedef programlama yöntemiyle GAMS paket program ile çözülmüştür. Özdemir ve diğ. (2021) ergonomik riskleri dikkate alan montaj hattı için bir model geliştirmişlerdir. Ergonomik riskler, görevleri yerine getiren işçilerin duruşuna ek olarak ağırlık, boyut ve şekil faktörleridir. Problemin amaçları belirsiz olduğundan önerilen model bulanık küme teorisine göre geliştirilmiştir. Geliştirilen bulanık çok amaçlı model, bir buzdolabı şirketinden elde edilen veriler ile uygulanmıştır. 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 çözümlenerek sonuçlar

elde edilmiştir. Çok amaçlı matematiksel model için bir toplam performans göstergesi elde etmek amacıyla iki amaç ağırlıklandırılmış ve OMAX yöntemi ile değerlendirilmiştir.

Keshvarparast, Battaia, Pirayesh ve Battini (2022) araştırmalarında, insan-robot işbirliğine dayalı montaj hattı için çevrim süresini ve insan operatörlerin fiziksel iş yükünü aynı anda en aza indirecek yeni bir iki amaçlı optimizasyon modeli önermişlerdir. İnsan operatörlerinin iş gücü çeşitliliği, deneyim düzeyi ve fiziksel yeteneklerinin sınıflandırılması aracılığıyla modellemişlerdir. Geliştirilen modelin faydalarını analiz etmek için Pareto cephesinden farklı çözümler arasında bir karşılaştırma yapmışlardır. Çalışmalarının sonuçlarında, Cobot (insan-robot) kullanımının montaj hattındaki hem döngü süresini hem de fiziksel iş yükünü azaltabileceğini göstermektedir.

Üçüncü kategori, karma model üretim, paralel ve/veya U tipi üretim hatları, işçi ataması, alan kısıtlamaları gibi diğer yöntemler ile ergonomik MHDP çalışmalarıdır. Tiacci ve Mimmi (2018), karışık modelli, stokastik işlem zamanlı ve paralel MHDP için ergonomik risk faktörlerini de dikkate alan bir model geliştirmişlerdir. Fiziksel ergonomik riskler OCRA yöntemi ile hesaplanmıştır. Modelin amaç fonksiyonu işçilik, ekipman ve hat besleme maliyetlerini, hattın çevrim zamanı aşıldığında oluşan ceza maliyetlerini ve hattın risk değeri aştığında verilen ceza maliyetlerini en küçükleme olarak belirlenmiştir. Zhang, Tang, Ruiz ve Zhang (2020), çevrim sürelerini ve ergonomik riskleri aynı anda en aza indirmek için U tipi bir montaj hattında, işçisi atama ve dengeleme problemini formüle etmişlerdir. Her iki amacı optimize etmek için Yeniden Başlatılmış Yinelenen Pareto Açgözlü Algoritması geliştirilmiştir. Bu algoritmada, ilk çözümü elde etmek için probleme özgü buluşsal tabanlı bir başlangıç belirlemişlerdir. Zhang, Tang ve Chica (2020), modellerinde, görev ataması, öncelik, döngü süresi, sıralama ve alan kısıtlamalarını dikkate alarak beş kısıtlı yeni bir modeli, karınca kolonisi sistemi ile toplam iş istasyonu ve operatör sayısını en aza indirmeyi amaçlamışlardır. Mokhtarzadeh, Rabbani ve Manavizadeh (2021), ergonomik riskleri göz önünde bulundurarak karma model paralel U şeklinde bir montaj hattını dengelemek için iki aşamalı bir model geliştirmişlerdir. İlk aşamada, çeşitli ergonomik standartlara göre en iyi-en kötü yöntemi ve ELECTRE TRI kullanılarak her bir görevin ergonomik risklerini belirleyerek görevleri zor, normal ve kolay olarak sınıflandırmışlardır. İkinci aşamada, her sınıfın görev sayısını istasyonlar arasında seviyelendirmek için yeni bir amaç fonksiyonu tanımlayarak problemin matematiksel bir modelini geliştirmişlerdir. Sayısal sonuçlar, önerilen amaç fonksiyonunun ergonomik riskleri iyi bir şekilde seviyelendirebileceğini göstermiştir. Rahman, Janardhanan ve Ponnambalam (2023); üretim sürecini işçilerin, robotların ve insan-robot işbirliğini içerdiği karmaşık bir yarı otomatik montaj hattı dengeleme problemi üzerinde çalışmışlardır. Bu çalışma, bu tür montaj sistemleri için ilk kez karma tam sayılı doğrusal programlama modelinin formüle edildiği MHDP ele almaktadır. MHDP, belirsizlik, şans kısıtlaması programlama yaklaşımı kullanılarak çözümlenmiştir. Sorunu çözmek için Q-

öğrenme ve Monte-Carlo simülasyon destekli genetik algoritma tabanlı çözüm önerilmiştir.

Bu çalışmada, sadece istasyon sayısını azaltmayı amaçlayan değil aynı zamanda ergonomik zorlanmayı da dengeleyen bir montaj hattı dengeleme problemi ele alınmıştır. Bu çalışmanın, diğer çalışmalardan en büyük üstünlüğü, modelin çok büyük boyutlu bir problem için uygulanmasıdır. Bir ağır ticari araç işletmesinin 198 görev ve 24 istasyonu olan bir motor montaj hattında, ergonomi kısıtları hem içeren hem içermeyen BMHDP, GAMS arayüzünün CPLEX çözücüsü kullanılarak istasyon sayısının en küçüklenmesini amaçlayan modelleri için çözülmüştür.

Geliştirilmiş olan MHDP çözüm modeli; motor imalat sektöründe yer alan çok fazla istasyon ve görev içeren bir modelin iterasyonlarını takip etmektedir. Modelin uygulanabilirliği doğrultusunda olası tüm senaryoları dahil eden duyarlılık analizlerinin çalışılmış olmasıyla diğer ERGO-MHDP'lerinden farklılık göstermektedir. Geliştirilen model, hem üretim temposunun değişkenliğini hem de ergonomik kısıtların montaj hattına olan etkisi konusunda duyarlılık analizlerini kapsamaktadır.

3. Yöntem

Çalışmanın yürütüldüğü montaj hattı, işletme yöneticileri ile ön görüşmeler ve gözlemler sonucunda belirlenmiş olup 198 görev ve 24 istasyonu olan motor montaj hattı tercih edilmiştir. İşletme onayı sonrası ESOĞÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Etik Kurulu'nun 14.10.2022 tarihli kararı ile etik onayı alınmıştır.

Bu çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

3.1. Verilerin Toplanması

Problemin çözümü için montaj istasyonundaki görevlerin (iş elemanlarının) sürelerine, öncelik ilişkilerine ve ergonomik risk skorlarına ihtiyaç bulunmaktadır.

Motor montaj hattında, haftanın 6 günü ve 2 vardiya olarak çalışma yapılmaktadır. Mevcut durumda günlük üretim 65 adet için hedeflenmiş olup bu hedefe göre çevrim süresi 14,31 dakika olarak belirlenmiştir. Montaj hattındaki iş istasyonlarının süre değerleri işletmeden tedarik edilmiştir. 24 istasyonda mevcut 198 görevler arasındaki öncelik ilişkileri çıkarılmıştır.

Ergonomik risk kısıtı içeren modelin oluşumu için ergonomik risk değerlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, gerek satın alma maliyeti gerektirmemesi ve gerekse montaj hattında 198 görev bulunduğundan, analizin makul sürede sonuçlanabileceği basit gözleme dayalı yöntemlerden REBA yönteminin kullanımı uygun görülmüştür. REBA yöntemi, 6 vücut bölgesi (üst

kol, alt kol, bilek, boyun, gövde ve bacak) duruşları ile yük/kuvvet, kavrama ve aktivite değerini (toplam 9 bileşen) analiz etmeyi amaçlayan bir yöntemdir. Bir işlem için uygulama süresi makuldür. Bu özelliği nedeniyle, literatürde en fazla araştırma yapılan yöntemdir. Analizi kolaylaştırmak amacıyla, her işlemin video kayıtları alınmıştır. Bir görev süresince, her vücut bölgesi için en yüksek zorlanmanın olduğu düzey belirlenerek forma işaretlenmiş, REBA risk skoru hesaplanmıştır.

Mevcut motor montaj hattında 24 istasyonda 198 görev için çevrim süresi 14,31 dakika, toplam istasyon dengeleme gecikmesi 42,64 dakikadır. İş istasyonlarının REBA risk değerleri **6 ile 55** arasında değişmektedir (Tablo 1).

Tablo 1

Mevcut Durum İstasyon Atama ve REBA Skorları

İstasyon NO	Görev (İş Elemanı)	Süre (dk)	Ergonomik Risk Değeri (REBA Skoru)	Toplam Süre	İstasyon Dengeleme Gecikme Süresi	İstasyon REBA skoru
1	Görev 1.1	1	2	13,5	0,81	27
	Görev 1.2	0,5	2			
	Görev 1.3	0,5	2			
	Görev 1.4	2	2			
	Görev 1.5	5	9			
	Görev 1.6	2	4			
	Görev 1.7	0,5	2			
	Görev 1.8	0,5	2			
	Görev 1.9	1,5	2			
...						
7	Görev 7.1	1,67	9	13,17	1,14	55
	Görev 7.2	0,67	2			
	Görev 7.3	1,67	3			
	Görev 7.4	1,50	5			
	Görev 7.5	1,67	2			
	Görev 7.6	0,50	3			
	Görev 7.7	1,67	9			
	Görev 7.8	2,00	9			
	Görev 7.9	0,83	9			
	Görev 7.10	1,00	4			
...						
22	Görev 22.1	1,00	4	9,83	4,48	19
	Görev 22.2	1,33	3			
	Görev 22.3	1,00	2			
	Görev 22.4	1,00	2			
	Görev 22.5	5,00	3			
	Görev 22.6	0,50	5			
23	Görev 23.1	12,00	4	13,33	0,98	6
	Görev 23.2	1,33	2			
24	Görev 24.1	2,50	7	6,67	7,64	11

Açıkça görülmektedir ki montaj hattı süre yönü ile dengeli olmakla birlikte işçilerin maruz kaldıkları fiziksel zorlanmalar açısından dengesizdir.

3.2. Ergonomik Risk Kısıtı İçermeyen BMHDP Modeli

Montaj hattı dengeleme problemi için istasyon sayısını ve istasyon dengeleme gecikme zamanını en küçükleyen model sunulacaktır.

Matematiksel modelin REBA kısıtı olmadan, sadece istasyon sayısını en küçükleyen model hali çözdürülmüştür.

Matematiksel modelde kullanılan parametre ve değişken tanımlamaları:

i, h : İş elemanları indisi ($i = 1, \dots, |I|$)

k : İstasyon indisi ($k = 1, \dots, |k|$)

S_k : k istasyonuna yapılan atama

$t(i)$: i . iş elemanına ait süre değeri (dk)

C : Çevrim Süresi (dk)

$$X_{ik} = \begin{cases} 1, & i. \text{ iş elemanı } k \text{ istasyonuna atandıysa} \\ 0, & \text{d. d.} \end{cases}$$

Problemde i ve k olmak üzere iki indis bulunmaktadır. Ergonomik risk kısıtı içermeyen BMHDP'indeki parametreler iş elemanlarının süreleri olup çevrim süresi sabit değer olarak tanımlanmıştır. Problemin kısıtları ve amaç fonksiyonu aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

Atama kısıtı; her görevin sadece bir istasyona atanmasını sağlayan kısıttır. Her bir iş elemanının bir istasyona atamasını sağlayan kısıttır.

$$\sum_{k=1}^{k_{max}} X_{i,k} = 1 \quad (1)$$

Çevrim süresi kısıtı; faaliyetlerin istasyonun çevrim süresini aşmamasını sağlamaktadır. Problemde çevrim süresi 14,31 dakikadır. Atamaların çevrim süresini geçmemesini sağlayan kısıt Denklem (2) ile gösterilmiştir.

$$\sum_{i=1}^{|I|} t_i * X_{ik} \leq 14,31 * S_k \quad (2)$$

Öncelik kısıtı; a iş elemanının, b iş elemanından önce gelmesi gerektiği durumlarda yazılır. Bu problemde öncüllük ilişkisi öncüllük matrisi ile tanımlanmıştır. Modelde "alias(i, h)" komutu ile öncelik tanımlamaları yapılmıştır. Matematiksel model olarak yazımı Denklem (3)'de yer almaktadır.

$$\sum_{k=1}^{k_{max}} k * X_{ak} \leq \sum_{k=1}^{k_{max}} k * X_{bk} \quad (3)$$

İstasyon kısıtı, istasyonların sıralı olmasını sağlamaktadır.

$$S_k \geq S_{k+1} \quad (4)$$

Amaç minimum istasyon kullanarak iş elemanlarını istasyonlara atamak olduğu için amaç fonksiyonu Denklem (5)'de belirtildiği üzere tanımlanacaktır.

$$MinZ = \sum_{k=1}^{k_{max}} S_k \quad (5)$$

Montaj hattının çözümü için kullanılan paket programın kapasite kısıtı sebebiyle model iki aşamada çözümlenmiştir. Montaj hattına başka bir hattan gelen parçanın dahiliyetinin olduğu yer baz alınarak 12. istasyonun başlangıcı ile çözümlenmiştir.

3.3. Ergonomik Risk Kısıtı İçeren BMHDP Modeli

Geliştirilen modelde; çevrim süresi kısıtına, öncelik kısıtlarına ve atama kısıtlarına ek olarak ergonomik risk kısıtı da eklenmiştir. Mevcut sistemdeki atamalara istinaden istasyon başına düşmesi beklenen ortalama REBA skoru hesaplanmıştır. Hesaplanan ortalama REBA skoru modele R_{max} değeri olarak tanımlanmıştır. Bu sayede istasyon başına düşebilecek maksimum REBA kısıtı bu ortalama REBA skoru olacak şekilde atamalar yapılmıştır. İstasyon atamalarına bu yeni kısıt da eklenerek istasyon başına düşen kümülatif ergonomik risk değerinin azaltılması hedeflenmiştir.

Modelde iş elemanlarının REBA skorları ve süre değerleri parametre olarak tanımlanmıştır. Eklenen yeni parametre ve değişken değerleri aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

R_i : i iş elemanının REBA skoru

R_{max} : Matematiksel modele atanabilecek en büyük kümülatif REBA skoru

e_k : k istasyonuna atanan ergonomik risk skoru

R_{ort} : Ortalama REBA skoru, bakınız Denklem (6)'de gösterilmiştir.

m: Mevcut durumdaki istasyon sayısı

$$R_{ort} = \frac{\sum_i |I| R_i}{m} = 30 \quad (6)$$

Tanımlanan REBA kısıtı; istasyonlara atanan iş elemanlarının R_{max} değerini aşmamasını sağlamaktadır. Problemde R_{max} değeri istasyon başına düşen ortalama REBA skorundan yola çıkarak 30 olarak tanımlanmıştır. Atamaların tanımlanan sınırı geçmemesini sağlayan kısıt Denklem (7) ile gösterilmiştir.

$$\sum_{i=1}^{|I|} R_i * X_{ik} \leq 30 * e_k \quad (7)$$

4. Bulgular ve Tartışma

4.1. Ergonomik Risk Kısıtı İçermeyen BMHDP Modelin Çözümü

Mevcut durumda montaj hattı ile ergonomik risk kısıtı içermeyen modelin karşılaştırılması yapılmıştır. Mevcut sistemin ilk çıktıları diğer tüm atamalar için karşılaştırmaya dahil edilerek oluşturulan modelin verimlilik düzeyi tespit edilmiştir.

Modelin temel varsayımları aşağıdaki gibidir:

- Bir iş elemanı sadece tek bir istasyona atanabilir.
- Bir iş elemanı her zaman öncüllük şartı olan iş elemanından sonra başlayabilir.
- Mola süreleri ve yemek süreleri hesaplama dahil edilmemiştir.
- İş elemanlarının süresi deterministiktir.

t_i : i. iş elemanının süresi (dk)

t_{bos} : İstasyon dengeleme gecikmesi

T_{ik} : k istasyonuna atanmış i iş elemanlarının toplam işlem süresi, Denklem (8)'de verilmiştir.

$$T_{ik} = \sum_{i \in (X_{ik}=1)} t_i \quad (8)$$

BZ_K : İstasyon dengeleme gecikme zamanı, Denklem (9)

$$BZ_K = C - \sum_{i \in (X_{ik}=1)} t_i \quad (9)$$

Tablo 2'de görüleceği üzere mevcut sistemde toplam istasyon dengeleme gecikme zamanı 42,64 dakika iken ergonomik risk kısıtı içermeyen model ile hat dengeleme yapıldığında bu süre 28,33 dakikaya düşmüştür. Mevcut sistemde maksimum istasyon REBA skoru 55 iken, ergonomik risk kısıtı içermeyen modelde bu skor 60'dır. İstasyon sayısı 24'ten 23'e düşmüş, ancak maksimum istasyon REBA skoru ile minimum istasyon REBA skoru arasındaki fark artmıştır.

4.2. Ergonomik Risk Kısıtlı BMHDP Modelin Çözümü

Ortalama ergonomik risk kısıtı içeren modelin çözümlenmesinde, mevcut durumdaki ortalama istasyon REBA skorunu aşmayacak şekilde istasyonlara atama yapılmıştır. Temel varsayımlar bu çözümleme için aynı kalmıştır.

Ortalama ergonomik risk kısıtı eklenerek yapılan çözümde en yüksek istasyon süresi 14 dakika iken toplam istasyon dengeleme gecikmesi 114,19 dakika

olarak hesaplanmıştır. İstasyon başına düşen ortalama REBA skoru 30 olarak modele eklendiğinde istasyonlar arası REBA skorlarının 6 ile 30 arasında dağıldığı gözlemlenmiştir. Tablo 2’de mevcut durum, ergonomik risk kısıtı içermeyen modelin çözümü ve ortalama REBA skorunun kısıt olarak atandığı 3 çözüm için karşılaştırma yapılmıştır.

Tablo 2

Ortalama Ergonomik Risk Kısıtı İçeren Modelin Diğer Modeller İle Kıyaslanması

	Mevcut Sistem	Ergonomik Risk Kısıtsız BMHDP	Ortalama Ergonomik Risk Kısıtlı BMHDP
Toplam İstasyon Dengeleme Gecikme Zamanı	42,64	28,33	114,19
En Yüksek İstasyon Zamanı	13,67	14,17	14
Maks İstasyon REBA Skoru	55	60	30
Min İstasyon REBA Skoru	6	6	6
İstasyon Sayısı	24	23	29

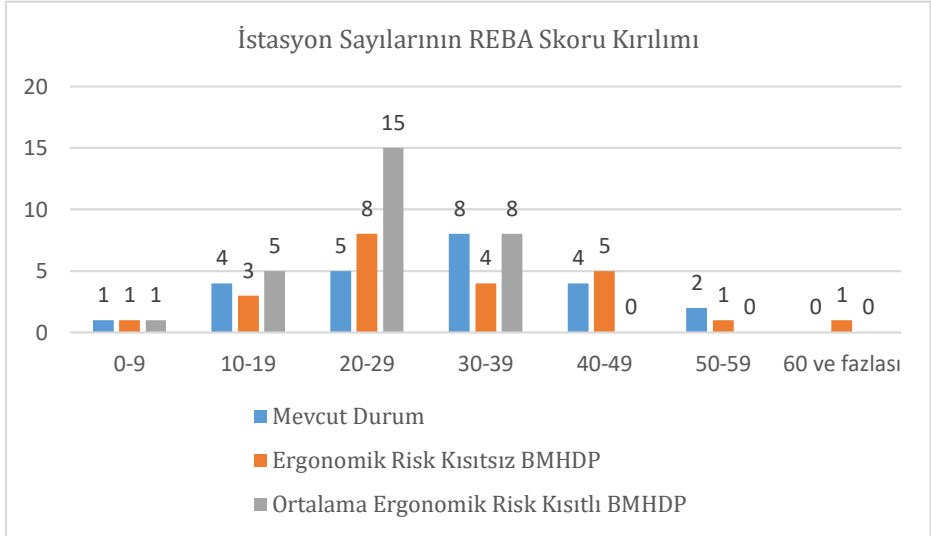
Ergonomik risk kısıtlı model ile yapılan çözümleme sonucunda ergonomik risk skorlarının istasyonlar özelinde daha dengeli dağıldığı gözlemlenmiştir. Modellere göre toplam REBA skorlarına göre, istasyon sayıları Tablo 3’deki gibi analiz edilmiştir. Mevcut durumda istasyonların toplam REBA skoru 30-39 aralığında daha fazla var iken; ergonomik risk kısıtsız modelde 20-29 aralığına düşmüştür. Ancak ortalama ergonomik risk kısıtlı modelde ise istasyon sayısı 23’ten 29’a çıkmış olmakla birlikte risk skoru 30’dan çok istasyon olmayarak zorlanmanın daha az olduğu sonuçlar elde edilmiştir.

Tablo 3

Modellere Göre İstasyon Sayılarının REBA Skoru Aralığı

Birikimli REBA Skoru Aralığı	Mevcut Durum	Ergonomik Risk Kısıtsız BMHDP	Ortalama Ergonomik Risk Kısıtlı BMHDP
0-9	1	1	1
10-19	4	3	5
20-29	5	8	15
30-39	8	4	8
40-49	4	5	0
50-59	2	1	0
60 ve fazlası	0	1	0

Her üç durum için istasyon sayılarının REBA skorlarına bağlı kırılımı Şekil 1'de gösterilmiştir. Ortalama ergonomik risk kısıtlı modelin istasyon atamalarının 20-29 arasında yoğunlaştığı ve bu aralıkta 15 istasyon olduğu saptanmıştır. 30-39 aralığında 8 istasyon bulunmaktadır ancak zaten bu 8 istasyonun ergonomik risk değeri 30'dur. Yapılan atama sonucu oluşan dengeli istasyon ataması şekilde gözlemlenmektedir.



Şekil 1. Modellerde Göre İstasyon Sayılarının REBA Skoru Kırılımı

4.3. Farklı Risk Kısıtı İçeren Modeller

Ortalama ergonomik risk kısıtı içeren model R_{ort} değeri ile kısıtlanarak çözümlendirilmiştir. Modelde R_{max} değeri R_{ort} değeri ile eşit tutulmuştur. Bu çözümleme ile istasyon sayısı 29'a ve istasyon dengeleme gecikme zamanının 114,19 dakika olduğu gözlemlenmiştir. Ergonomik risk kısıtının kabul edilebilir limitinin belirlenebilmesi için ortalama REBA skorunun %5 ve %10 tolerans ile modellemesi yapılmıştır. %5 tolerans için R_{max} değeri 32 ; %10 tolerans için R_{max} değeri 33 olarak modele kısıt olarak eklenmiştir.

Sonuçlar incelendiğinde (Tablo 4) %5 tolerans eklenerek R_{max} değeri 32 ile kısıtlanarak oluşturulan çözümde istasyon dengeleme gecikme zamanı 99,88 dakikaya düşmektedir. En yüksek istasyon zamanı ve istasyon zamanı ortalama ergonomik risk kısıtlı BMHDP ile aynı kalmış olup, istasyonlar arası ergonomik risk dağılımının 6 ile 28 arasında olduğu gözlemlenmiştir.

%10 tolerans ile oluşturulan modelde ise R_{max} değeri 33 olarak tanımlanarak modele eklenmiştir. Toplam istasyon dengeleme gecikme zamanının diğer çözümlere kıyasla 69,59 dakikaya ve istasyon sayısının 26'ya düştüğü görülmüştür. En yüksek istasyon zamanı 14,17 dakikadır. İstasyonlar arası risk dağılımı ise 6 ile 33 arasında değişmektedir.

Tablo 4

Ortalama Ergonomik Risk Kısıtı İçeren Modelin Farklı Tolerans Payları İle Kıyaslanması

	Ortalama Ergonomik Risk Kısıtlı BMHDP	%5 Tolerans Payı Eklenerek Ergonomik Risk Kısıtlı BMDP	%10 Tolerans Payı Eklenerek Ergonomik Risk Kısıtlı BMDP
R_max	30	32	33
Toplam İstasyon Dengeleme Gecikme Zamanı	114,19	99,88	69,59
En Yüksek İstasyon Zamanı	14	14	14,17
Maks İstasyon REBA Skoru	30	32	33
Min İstasyon REBA Skoru	6	6	6
İstasyon Sayısı	29	28	26

Ergonomik risk değerlerinin sürekliliğinin analizi ve yapılan atama sonucunda etkisinin ölçülmesi için ağırlıklı ergonomik risk değerleri belirlenmiştir. Görevler özelinde ağırlıklı ergonomik risk değerinin nasıl bulunduğu Denklem 10'da belirtilmiştir.

R_{ARS} : i görevin ağırlıklı risk skoru

R_i : i görevin REBA skoru

t_i : i. Görevin süresi (dk)

$$R_{ARS} = R_i * t_i \quad (10)$$

Ağırlıklı ergonomik risk kısıtı eklenerek modelin çözümlenmesinde öncelikle istasyon başına düşen ağırlıklı ergonomik risk değeri kısıt olarak eklenmiştir. Ancak model çözümsüz olarak bulunmuştur. Ortalama ağırlıklı ergonomik risk değeri 50 bulunmuştur. Fakat 179. görev için ağırlıklı ergonomik risk değeri 75'tir. Dolayısıyla R_{ARS} değeri öncelikle %50 tolerans payı ile 75 sonrasında %100 tolerans payı alınarak ağırlıklı risk değeri 100 alınarak değerlendirilmiş ve Tablo 5'deki sonuçlar elde edilmiştir.

Tablo 5

Ağırlıklı Ergonomik Risk Kısıtı İçeren Modelin Oluşturulması ve Farklı Toleranslar İle Karşılaştırılması

	Ortalama Ergonomik Risk Kısıtlı BMHDP	%50 Tolerans Payı Eklenerek Ağırlıklı Ergonomik Risk Kısıtlı BMHDP	%100 Tolerans Payı Eklenerek Ağırlıklı Ergonomik Risk Kısıtlı BMHDP
Toplam İstasyon Dengeleme Gecikme Zamanı	114,19	27,02	28,33
En Yüksek İstasyon Zamanı	14	14,17	14,17
Maks İstasyon REBA Skoru	30	52	60
Min İstasyon REBA Skoru	6	6	6
İstasyon Sayısı	29	23	23

4.3. Değişken Talep İçin Duyarlılık Analizleri

Yapılan çalışmanın değişken üretim taleplerine nasıl yanıt verdiğini gözlemleyebilmek için duyarlılık analizi yapılmıştır. Üretim hattında rastlanması muhtemel kapasite artışları için montaj hattı dengelemesi yapılmıştır. Mevcut durumda günlük hedef üretim 65 adet olduğunda; 15,5 saatlik iki vardiya çalışma rutininde çevrim süresi 14,31 dakikadır. Talebin %5 ve %10 arttığı durumlar için hedef üretim 68 adet ve 72 adet olarak hesaplanmıştır.

%5 kapasite artışı ile 68 adet hedef üretim için çevrim süresi 13,68 dakika hesaplanmıştır. Atama sonucunda toplam istasyon dengeleme gecikme süresi 28,19 dakika ve en yüksek istasyon süresi 13,67 dakika olarak sonuçlanmıştır. İstasyon sayısı 24 olarak kalmış olup istasyon başına düşen en yüksek REBA skoru 50 olarak bulunmuştur. İstasyon başına düşen en düşük REBA skoru 6'dır. İstasyonlar arası kümülatif risk değeri 6 ile 50 arasında değişmektedir.

%10 kapasite artışı ile 72 adet üretim hedefi için yapılan atama sonucunda toplam istasyon dengeleme gecikme süresi 48,04 dakika; en yüksek istasyon süresi ise 48,04 dakika olarak belirlenmiştir. İstasyon başına düşen maksimum REBA skoru 52 iken minimum istasyon REBA skoru 4 olarak belirlenmiştir. Diğer tüm atamalarda 6 olarak belirlenen minimum istasyon REBA skoru bu atama özelinde 4 olarak belirlenmiştir. Görev 23.1 işlem süresi 12 dakika olduğu için ardılı olan görev, 12,92 dakika çevrim süresi kısıtını aşmamak için yeni istasyon oluşumuna sebebiyet vermiştir.

Üretim hattının, kapasite dalgalanmalarına verdiği tepkilerin duyarlılık analizi Tablo 6'da özetlenmiştir.

Hedef üretim adedi arttıkça çevrim süresi azaldığı için %10'luk artış durumunda istasyon sayısı 27'e yükselmiştir. İstasyonlar arası ergonomik risk dağılımları 68 adetlik hedef üretimde 6 ile 50 arasında değişirken, 72 adet hedef üretim için 4 ile 52 arasında değiştiği gözlemlenmiştir.

Tablo 6

Hedef Üretim Adedi Değişkenliğinde Üretim Hattının Duyarlılık Analizi Karşılaştırması

	Mevcut durum 65 adet için çözümleme	%5 kapasite artışı ile 68 adet hedef üretim çözümlemesi	%10 kapasite artışı ile 72 adet hedef üretim çözümlemesi
Çevrim Süresi (dk)	14,31	13,68	12,92
Toplam İstasyon Dengeleme Gecikme Zamanı (dk)	42,64	28,19	48,04
En Yüksek İstasyon Zamanı (dk)	13,67	13,67	12,83
Maks İstasyon REBA Skoru	55	50	52
Min İstasyon REBA Skoru	6	6	4
İstasyon Sayısı	24	24	27

5. Sonuçlar

Bu çalışmada, MHDP, öncelik ve çevrim süresi kısıtlamalarına ilaveten ergonomik risk düzeyini de dikkate alan yeni bir modelin geliştirilmesi ele alınmıştır. Önerilen modelde iki farklı çözüm yöntemi geliştirilmiştir. İlk olarak ergonomik risk kısıtı olmaksızın çevrim süresi ve öncelik kısıtları için model çözümlenmiştir. Ardından bu kısıtlara ek olarak ortalama REBA skoru da istasyonlara atama yapılırken kısıt olarak tanımlanmıştır. Geliştirilen model bir motor montaj hattında uygulanmıştır. Montaj hattında görev süreleri ölçülmüş, öncelikler oluşturulmuş ve REBA yöntemi kullanılarak ergonomik risk skorları hesaplanmıştır. Problem GAMS paket programı ile çözülmüş ve sonuçlar her üç durum için de birbirleri ile kıyaslanmıştır. Mevcut durumda toplam istasyon dengeleme gecikme zamanı 42,64 dakika iken bu süre ergonomik risk kısıtsız BMHDP'nde 28,33 dakikaya düşürülerek montaj hattının verimliliğini %67 arttırmıştır. İstasyon sayısı mevcut durumda 24 iken ergonomik risk kısıtsız BMHDP için yapılan çözümde 23'e düşürülmüştür. En yüksek istasyon zamanı mevcut durum için 13,67 dakika iken ergonomik risk kısıtsız model ile çözümde 14,17 dakika olacak şekilde atama yapılmıştır. Ancak mevcut durumda maksimum istasyon REBA skoru 55 iken yapılan atama sonucunda bu skor 60'a yükselmiştir. Minimum istasyon REBA skoru tüm modellerde 6 olarak bulunmuştur.

Ergonomik risk kısıtlı BMHDP çözümü sonrasında toplam istasyon dengeleme gecikme zamanı 114,19 dakikaya yükselmiştir. İstasyon sayısı ise 29'a yükselmiştir. Ancak maksimum istasyon REBA skoru 30 olarak sabitlenmiştir. Diğer durumlarda maksimum istasyon REBA skoru ile minimum istasyon REBA skoru arasındaki farklar sırasıyla; mevcut durum için 49 ve ergonomik risk kısıtsız BMHDP için önerilen çözümde 54 iken ergonomik risk kısıtlı BMHDP için sunulan çözüm önerisinde 24'tür. Ergonomik risk kısıtlı BMHDP çözümü, istasyonlardaki çalışanlar arasındaki zorlanma düzeyi en düşük istasyon REBA skorları ve en yüksek istasyon REBA skorları arasındaki farka bağlı olarak değerlendirildiğinde; ergonomik risk kısıtı içeren modelin mevcut duruma göre %51, ergonomik risk kısıtı içermeyen modele göre ise %56 daha dengeli olduğu saptanmıştır. Çalışmada sunulan gerçek hayat montaj hattı dengeleme problemi çözüm önerisi ile büyük ve karmaşık üretim hatlarında ergonomik şartlar altında nasıl dengeleme yapıldığı okuyucularla paylaşılmıştır. Ergonomik montaj hattı dengeleme çözüm önerilerinde (ergonomik risk kısıtının değişkenlik gösterdiği her bir model için) üretim esnekliğine tam zamanında cevap verebilecek modellerle tekrar kurgulanarak yeni çözümler oluşturulmuş ve değerlendirilmiştir. Bu sayede üretimde yaşanan artış veya azalışların ergonomik montaj hattı dengeleme problemindeki davranışı gözlemlenmiştir.

Bu çalışmanın uygulanmasında karşılaştığımız problem, kullanılması hedeflenen GAMS paket programının modelin büyüklüğü karşısında yetersiz kalması olmuştur. Çok fazla görev ve istasyonların bulunması beraberinde çok fazla iterasyonu getirmiştir. GAMS paket programı, bu kadar büyük bir probleminin çözüm iterasyonları için çok fazla zaman harcamıştır ki bu durum da çözüm süresince zaman kaybına sebep olmuştur. Karmaşık MHDP için başka çözümler değerlendirilebilir. Python içerisinde bulunan çözümler kullanılarak büyük boyutlardaki montaj hatları için modelleme yapılabilir.

Gelecek araştırmalar için tabu arama, genetik algoritma, karınca kolonisi, tavlama benzetimi, gibi yöntemlerin kullanımı ile çözüm önerileri sunulabilir. İlk aşama olarak klasik sezgisel yöntemlerden Helgeson-Birnie metodu, En Büyük Aday Yöntemi veya COMSOAL algoritması Python ile kodlanarak başlangıç çözüm oluşturulabilir. Çözüm yöntemi seçildikten sonra test problemleri ile elde edilecek sonuçlar karşılaştırılmalıdır.

Araştırmacıların Katkıları

Bu araştırmada; Sena GÜLBANDILAR CANBAZOĞLU, literatür araştırması, matematiksel modelin oluşturulması ve bilgisayar ortamına aktarılması, çözüm algoritmasının belirlenip araştırılması ve probleme uygulanması, sonuçların elde edilmesi ve değerlendirilmesi; Emin KAHYA, problemin tanımlanması, matematiksel modelin oluşturulması ve değerlendirilmesi katkılarında bulunmuştur.

Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

Kaynaklar

- Barathwaj, N., Raja, P. ve Gokulraj, S. (2015). Optimization of assembly line balancing using genetic algorithm. *Journal of Central South University*, 22, 3957-3969. Doi : <https://doi.org/10.1007/s11771-015-2940-9>
- Bautista, J., Rocío, A., Batalla-García, C. (2016). Maximizing comfort in assembly lines with temporal, spatial and ergonomic attributes. *International Journal of Computational Intelligence Systems*, 9(4), 788-99. Doi : <https://doi.org/10.1080/18756891.2016.1204125>
- 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. (2016). Ergonomics in assembly line balancing based on energy expenditure: A multi-objective model, *International Journal of Production Research*, 54(3), 824-45. Doi : <https://doi.org/10.1080/00207543.2015.1074299>
- Baykasoğlu, A., ve Akyol, Ş. D. (2014). Ergonomik montaj hattı dengeleme. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 29(4). 4, 785-792. Doi : <https://doi.org/10.17341/gummfd.00296>
- Baykasoğlu, A., Tasan, S., Tasan, A. ve Akyol, S. (2017). Modeling and solving assembly line design problems by considering human factors with a real-life application, *Human Factors and Ergonomics In Manufacturing*, 27(2), 96-115.
- Cheshmehgaz, H. R., Haron, H., Kazemipour, F. ve Desa, M. I. (2012). Accumulated risk of body postures in assembly line balancing problem and modeling through a multi-criteria fuzzy-genetic algorithm. *Computers & Industrial Engineering*, 63(2), 503-512. Doi : <https://doi.org/10.1016/j.cie.2012.03.017>
- Chica, M., Cordon, Oscar., Damas, S. ve Bautista, J. (2012). Multiobjective memetic algorithms for time andspace assembly line balancing, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 25, 254-273. Doi : <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2011.05.001>
- Choi, G. (2009). A goal programming mixed-model line balancing for processing time and physical workload, *Computers & Industrial Engineering*, 57(1), 395-400. Doi : <https://doi.org/10.1016/j.cie.2009.01.001>
- Dalle Mura, M., ve Dini, G. (2022). Job rotation and human-robot collaboration for enhancing ergonomics in assembly lines by a genetic algorithm. *The*

International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 1-14. Doi : <https://doi.org/10.1007/s00170-021-08068-1>

- Fleszar, K. ve Hindi, K. S. (2003). An enumerative heuristic and reduction methods for the assembly line balancing problem. *European Journal of Operational Research*, 145(3), 606-620. Doi : [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(02\)00204-7](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(02)00204-7)
- Garg, A., Chaffin, D. B. ve Herrin, D. G. (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. (2013). *Montaj hattı dengeleme probleminde zorlayıcı duruşların değerlendirilmesine yönelik ergonomik yaklaşım* (Yüksek Lisans Tezi). Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Hazır, Ö. ve Dolgui, A. (2011). A decomposition based exact solution algorithm for balancing U-Type assembly lines, *Conference: 21st International Conference on Production Research* Erişim adresi : <https://www.researchgate.net/publication/260176796>
- Junior, M.C.P., Michels, A.S., Magatao, L. (2023). An exact method to incorporate ergonomic risks in Assembly Line Balancing Problems, *Computers & Industrial Engineering*, 183. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109414>
- 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>
- Kara, Y., Atasagun, Y., Gökçen, H., Hezer, S. ve Demirel, N. (2014). An integrated model to incorporate ergonomics and resource restrictions into assembly line balancing, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 27(11), 997-1007. Doi : <https://doi.org/10.1080/0951192X.2013.874575>
- Keshvarparast, A., Battaia, O., Pirayesh, A., Battini, A. (2022). Considering physical workload and workforce diversity in a Collaborative Assembly Line Balancing (C-ALB) optimization model. *IFAC-PapersOnLine*, 55, 10, 157-162. Doi : <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.09.383>
- Mura, M. ve Dini, G. (2017). A multi-objective software tool for manual assembly line balancing using a genetic algorithm, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 19, 72-83. Doi : <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2017.06.002>
- Mutlu, Ö. ve Özgörmüş, E. (2012). A fuzzy assembly line balancing problem with physical workload constraints, *International Journal of Production Research*, 50(18), 5281-5291. Doi : <https://doi.org/10.1080/00207543.2012.709647>

- Mokhtarzadeh, M., Rabbani, 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>
- Otto, A. ve Scholl, A. (2011). Incorporating ergonomic risks into assembly line balancing. *European Journal of Operational Research*, 212, 277-286. Doi : <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2011.01.056>
- Otto, A., ve Battaia, O. (2017). Reducing physical ergonomic risks at assembly lines by line balancing and job rotation: A survey, *Computers & Industrial Engineering*, 111, 467-480. Doi : <https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.04.011>
- Özcan, U., Aydoğan, E.K., Himmetoğlu, S., Delice, Y. Parallel assembly lines worker assignment and balancing problem: A mathematical model and an artificial bee colony algorithm. *Applied Soft Computing*, 130, 109727. Doi:<https://doi.org/10.1016/j.asoc.2022.109727>
- Özdemir, R., Sarıgöl, I., AlMutairi, S., AlMeea, S., Murad, A., Naqi, A. ve AlNasser, N. (2021). Fuzzy multi-objective model for assembly line balancing with ergonomic risks consideration. *International Journal of Production Economics*, 239, 108188. Doi : <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2021.108188>
- 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>
- Rahman, H. F., Janardhanan, M. N., Ponnambalam, S.G. (2023). Energy aware semi-automatic assembly line balancing problem considering ergonomic risk and uncertain processing time. *Expert Systems with Applications*, 231, 120737. Doi : <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.120737>
- Sternatz, J. (2014). Enhanced Multi-Hoffmann heuristic for efficiently solving real-world assembly line balancing problems in automotive industry, *European Journal of Operational Research*, 235, 740-754. Doi : <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.11.005>
- Şahin, B. ve Kahya, E. (2018). Hedef programlama modeli ile ergonomik kısıtlar altında montaj hattı dengelemesi, *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 6(ÖS:Ergonomi2017), 188-196. Doi : <https://doi.org/10.21923/jesd.358709>
- Takanokura, M., Tanaka, T., Watanebe I., Kakehi, I., Utsuki, H. ve Nakamura, M. (2017). Posture-based risk assessment for improvement of physical workload: Case study for an assembly line, *Journal of Japan Industrial Management Association*, 67(4), 338-47. Doi : <https://doi.org/10.11221/jjima.67.338>
- Tiacci, L. ve Mimmi, M. (2018). Integrating ergonomic risks evaluation through OCRA index and balancing/sequencing decisions for mixed model stochastic

asynchronous assembly lines, *Omega*, 78, 112-138. Doi : <https://doi.org/10.1016/j.omega.2017.08.011>

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>

Zacharia, P. ve Nearchau, A. (2013). A meta-heuristic algorithm for the fuzzy assembly line balancing type-E problem, *Computers & Operations Research*, 40, 3033-3044. Doi : <https://doi.org/10.1016/j.cor.2013.07.012>

Zhang, Z., Tang, Q. ve Chica, M. (2020). Multi-manned assembly line balancing with time and space constraints: A MILP model and memetic ant colony system, *Computers & Industrial Engineering*, 150, 106862. Doi : <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106862>

Zhang, Z., Tang, Q., Ruiz, R., 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>