

## ERGONOMİK MONTAJ HATTI Dengeleme Problemine Farklı Çok Amaçlı Çözüm Yaklaşımları

Büşra Nur YETKİN<sup>1\*</sup>, Emin KAHYA<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Eskişehir  
ORCID No: <http://orcid.org/0000-0002-4963-5483>

<sup>2</sup>Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Eskişehir  
ORCID No: <http://orcid.org/0000-0001-9763-2714>

Anahtar Kelimeler	Öz
Montaj Hattı Dengeleme, Ergonomik Risk, REBA, Çok Amaçlı Matematiksel Programlama	Montaj hattı dengeleme problemlerinde (MHDP) istasyon sayısı, çevrim zamanı gibi ekonomik kısıtların yanında gerçekleştirilen görevler nedeniyle oluşabilecek zorlanmalardan kaynaklanan riskler dikkate alınmalıdır. Çünkü montaj istasyonlarında tekrarlı işler ve bu işler esnasında sergilenen statik çalışma duruşları Kas İskelet Sistemi Rahatsızlıklarının (KİSR) oluşmasına yol açmaktadır. Bu durum çalışanların ve dolayısıyla montaj hatlarındaki işgücü verimliliğini olumsuz etkilemektedir. Bu çalışmada istasyonun çevrim zamanını ve istasyonların ergonomik risk skorundan pozitif sapmalarının toplamını enküçükleyen iki amaçlı bir matematiksel model geliştirilmiştir. Önerilen çok amaçlı modelin çözümünde, ağırlıklı toplam, konik skalerleştirme, epsilon kısıt ve melez yöntemleri uygulanmıştır. Bu yöntemler karşılaştırılarak her bir yöntemde elde edilen pareto noktalar incelenmiştir. Geliştirilen modelin gerçek hayat uygulaması bir beyaz eşya fabrikasında gerçekleştirilmiştir. Toplam 32 istasyon, 78 iş elemanından oluşan tek modelli basit montaj hattında Hızlı Tüm Vücut Değerlendirme (Rapid Entire Body Assessment-REBA) analizi yapılarak çalışma duruşlarına ilişkin ergonomik risk skorları belirlenmiştir. Montaj hattından günlük elde edilmek istenen çıktı miktarına göre çevrim süresi 41 saniye olarak belirlenmiştir. Model ve çözüm yöntemleri The General Algebraic Modelling System(GAMS) programında kodlanarak çözdürülmüş ve sonuçlar elde edilmiştir. Konik Skalerleştirme Yöntemi ergonomik MHDP’ de ilk kez kullanılmış böylece, klasik çözüm yöntemlerinin tarayamadığı çözüm alanlarında farklı pareto çözümler elde edilmiştir. Ergonomik riskler dikkate alınarak elde edilen çözümlerde yüksek riskli istasyon sayısında azalma olduğu görülmüştür.

## DIFFERENT MULTI-OBJECTIVE SOLUTION APPROACHES TO THE ERGONOMIC ASSEMBLY LINE BALANCING PROBLEM

Keywords	Abstract		
Assembly Line Balancing, Ergonomic Risk, REBA, Multi-objective Optimization	In assembly line balancing problems (ALBP), beside technological constraints such as the number of stations and cycle time as well as the strain loads that may occur due to operations should also be taken into account. Because repetitive works in assembly stations and static body postures during these works cause Musculoskeletal Disorders (WMSD) and thus negatively affect the productivity and efficiency of the workers and therefore the assembly lines. In this study, a two-objective mathematical model has been developed that minimizes the cycle time and the sum of positive deviations from the ergonomic risk score of the stations. In the solution of the multi-objective model, weighted sum, conical scalarization, epsilon constraint and hybrid methods are applied. By comparing these methods, pareto points obtained in each method were examined. The real life application of the developed model was realized in a home-appliance factory. REBA (Rapid Entire Body Assessment) analysis was performed on a single-model assembly line consisting of 32 stations and 78 operations, and ergonomic risk scores for working postures were determined. The cycle time is determined as 41 seconds, depending on the amount of daily output desired to be obtained from the assembly line. Model and solution methods were coded in GAMS program and results were given. Conical Scalarization method is used for the first time in ergonomic ALBP, and different pareto solutions have been obtained in the solution areas that classical solution methods cannot scan. Considering the ergonomic risks, it has been observed that there is a decrease in the number of high-risk stations in the solutions.		
Araştırma Makalesi	Research Article		
Başvuru Tarihi	: 15.02.2021	Submission Date	: 15.02.2021
Kabul Tarihi	: 08.06.2021	Accepted Date	: 08.06.2021

\*Sorumlu yazar; e-posta : [bnsahin@ogu.edu.tr](mailto:bnsahin@ogu.edu.tr)

## 1. Giriş

Sanayileşmenin artışıyla üretim sistemlerini daha ekonomik ve verimli bir şekilde işletmek, fiziksel çaba gerektiren işler sonucu oluşan rahatsızlıkları azaltmak ve uygun ergonomik çalışma koşullarını sağlamak kritik problemler olarak karşımıza çıkmaktadır. Ergonomik risk faktörleri meslek hastalıklarına ve iş kazalarına yol açarak çalışanın sağlığını tehdit eder ve hayat kalitesini düşürür. Yöneticiler açısından ergonomik düzenlemeler, iş gücü, zaman vesermeye gerektirdiği için ertelenen uygulamalar arasındadır. Fakat yapılan çalışmalar ergonomik anlamda iyi düzenlenmiş iş yerlerinin, çalışanın performansını olumlu etkileyerek ekonomik hedeflerin gerçekleşme ihtimalini arttırdığını göstermiştir. Ergonomik iyileştirmelerin maliyet-fayda analizi üzerine yapılan bir araştırma, kas iskelet sistemi rahatsızlıkları (KİSR) azaldıkça işe devamın arttığını ve üretimde verimlilik ve kalitedeki artış sayesinde, ergonomik yatırımların geri dönüşünün bir yıldan daha az zamanda gerçekleştiğini göstermiştir (Otto ve Battaia, 2017).

Otomasyonun artması birçok avantajı beraberinde getirirse de, her koşulda düşük maliyetli ve esnek çözüm sağlayamaz. Manuel montaj hatlarında yapılan işlemlerin yüksek katma değerli olması, son ürün kalitesinin yüksek olması ve otomasyona göre, belirsiz talepleri karşılayabilecek esnekliğe sahip olması nedenleriyle hala yüksek oranda tercih edilmektedir. İşçilik maliyetinin düşük olduğu ülkelerde yüksek esneklik sağlayacak hatlardan en fazla etkinliği elde edebilmek için montaj hattı dengeleme problemleri önemli bir yer tutar. Bundan dolayı, MHDP hem gelişmekte olan hem de gelişmiş ülkeler için önemlidir.

Montaj hattı işlenecek parçaların konveyör ya da işgücü gibi bir malzeme aktarma sistemiyle taşınmaları ve işlemlerin de hat üstünde sıralı istasyonlarda yapılması olarak tanımlanır. Manuel montaj hatlarında çalışanlar genellikle üst ekstremiteyi kullanarak montaj yapar, ayrıca istasyon içi ve birimler arası yürüme, depolama yerlerinden malzeme taşıma gibi işlemleri de gerçekleştirirler. Montaj işlemlerinde KİSR oluşturabilecek, benzer işlemlerin kısa sürelerde çok sayıda tekrarlı hareketlerle yapılması, yüksek güç gerektiren işlemler ve uygun olmayan çalışma duruşları sık gözlenmektedir. Bu nedenle montaj hattı çalışanlarının maruz kaldığı ergonomik riskler ve KİSR hakkındaki çalışmalar önem kazanmıştır.

European Agency for Safety and Health at Work (EASHW) (2012)'ye göre, görevlerin %30' u ağır yük kaldırma, uygun olmayan duruşlar ya da tekrarlı hareketler içermektedir. Ayrıca KİSR, meslek hastalıklarının %40' ını oluşturarak en yaygın meslek hastalığı haline gelmiştir. Dördüncü Avrupa Çalışma Koşulları Anketi'ne göre montaj hattı çalışanlarının %35' inde kronik sırt ve kas ağrıları olduğu bildirilmiştir (Schneider ve Irastorza, 2010).

KİSR' nin oluşması ile montaj işleri arasında bu şekilde doğrudan bir ilişki olması, montaj hattı tasarımı ve istasyonların ergonomik risk seviyesi arasında da doğrudan bir ilişki olduğunu göstermektedir. Montaj hatlarında ergonomik risk seviyelerini en fazla etkileyen faktör, işlemlerin istasyonlara dengeli bir şekilde atanmasıdır. Montaj hatlarıyla ilgili çok sayıda yöntem ve algoritma geliştirilmiştir ancak bunların çoğu gerçeği yansıtmamaktadır. Bunun nedeni MHDP' de çoğunlukla çevrim zamanı ya da istasyon sayısı gibi organizasyonla ilgili kısıtlar hesaba katılarak üretim çıktısı ve verimliliğin arttırılmaya çalışılmasıdır. Ancak montaj hattı dengelememontaj hattında büyük tasarım değişiklikleri ve yatırımlar gerektirebilmektedir. Bu nedenle uzun vadeli bir karar verme sürecidir ve gerçek hayattaki birçok faktörün dikkate alınması gerekmektedir. Bu kapsamda, MHDP'de ergonomik riskleri tanımlayan ve ergonomik riski ifade eden farklı bakış açıları geliştirilmeye odaklanılmıştır.

Bu çalışmada montaj hatlarında dikkate alınan klasik kısıtlara ek olarak montaj işlemlerinden kaynaklanabilecek ergonomik risklerin de çözüm sürecine yansıtılması amaçlanmıştır ve çok amaçlı bir matematiksel model geliştirilmiştir. Geliştirilen modelde, iş elemanlarının istasyonlara ataması yapılırken çevrim süresi ve öncelik ilişkilerine ek olarak çalışanların zorlanmasına neden olan faktörler de incelenmiştir. Zorlanma düzeyini belirlemek için, montaj istasyonlarındaki iş elemanlarını gerçekleştirirken sergilenen çalışma duruşları incelenmiş ve bu duruşların risk düzeyleri REBA yöntemi ile belirlenmiştir. REBA skorları işlem süreleri ile ağırlıklandırılarak yeni bir kümülatif risk skoru oluşturulmuştur. Modelin amaçları, istasyon zamanını enküçükleme ve istasyonların risk sapmaları toplamını enküçükleme şeklinde belirlenmiştir. Önerilen model, bir beyaz eşya fabrikasında bulunan bulaşık makinesi hattına ait veriler kullanılarak

çözümüştür. Çözüm aşaması için çok amaçlı model kesin çözüm yöntemlerinden ağırlıklı toplam, epsilon kısıt, konik skalerleştirme ve melez yöntemlerinden faydalanılmış ve GAMS programı kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar, bulunan etkin pareto nokta sayısı, zayıf pareto noktalar ve çözüm süresi açılarından karşılaştırılmıştır.

Bu çalışmanın ikinci bölümünde ergonomik MHDP hakkında yapılan bilimsel yayın taraması, üçüncü bölümde modelin oluşturulması ve çözüm sürecinde kullanılan yöntemler sunulmuştur. Sonuçların değerlendirilmesi dördüncü bölümde, tartışma ve gelecek dönemlere ait çalışma fikirleri ise beşinci bölümde verilmiştir.

## 2. Bilimsel Yayın Taraması

Montaj Hatlarında KİSR önleme yaklaşımları iki şekilde gerçekleştirilebilir. Bunlardan ilki çalışma koşullarını iyileştirerek fiziksel iş yükünü azaltmaktır. Burada ürün tasarımı, üretim yöntemi, kullanılan ekipmanların tasarımı gibi alanlarda ergonomik ilkeler kullanılabilir. Ayrıca montaj hattı yüksekliğinin ayarlanması, daha düşük hızda üretim yapılması, çalışanın aşırı güç sarfetmesi ve titreşime maruz kalmasının önlenmesi gibi değişiklikler de yapılabilir. İkinci kategori ise, işçilerin yaptığı işlemlerin çeşitlendirilmesini içerir. Bu sayede, aynı vücut bölgelerinin tekrarlı hareket etmesi önlenir ve KİSR' ye yol açabilecek fizyolojik zorlanmalar hafifletilir. Burada işin ve işçinin rotasyonu, işin zenginleştirilmesi, genişletilmesi ve işlerin başka şekillerde atanması gibi yaklaşımlar vardır. Hattın verimliliğini ve ergonomik risk düzeyini beraber dikkate alan uygulamalardan en etkili hat dengeleme sırasında ekonomik faktörlere ek olarak ergonomik risk faktörlerini de hesaba katmaktır. Bu bölümde ergonomik MHDP ile ilgili yapılan literatürden örnekler verilmiştir.

Literatürde yer alan çalışmalar genellikle ergonomik riski değerlendirmek için ya basit gözlem tekniklerinden ya da enerji tüketimi gibi direkt ölçüm yöntemlerinden yararlanmışlardır. Colombini ve Occhipinti (2006), Mesleki Tekrarlamalı Hareketler İndeksi (Occupational Repetitive Actions-OCRA) indeksini kullanarak istasyon sayısı arttırılmadan, riskli istasyon sayısında %25 oranında azalma sağlandığını göstermişlerdir. Ergonomik risklerin modele farklı bir şekilde entegre edilmesine Otto ve Scholl (2011) güzel bir örnek vermiştir. Bu çalışmaya göre eğer hatta işçi rotasyonu mümkünse ortalama

ergonomik risk hesabını, eğer mümkün değilse ergonomik sapmaların kareleri toplamını amaç fonksiyonuna dahil etmişlerdir. Modelin çözümünde tavlama benzetimi ve yerel arama sezgiselleri kullanılmıştır. Ergonomik risk düzeylerini hesaplarken OCRA, EASHW (Ergonomic Assessment Work-Sheet) ve NIOSH (National Institute for Occupational Safety and Health) denklemi yöntemlerini kullanılarak alternatif modeller geliştirmişlerdir. Zhang, Tang, Ruiz ve Zhang (2020), U tipi montaj hatlarında ergonomik işçi atama ve hat dengeleme probleminde çevrim zamanını ve aynı zamanda ergonomik riskleri enküçüklemeyi amaçlamışlardır. Ergonomik risk skorlarını OCRA yöntemiyle hesaplamışlardır ve iki amacı optimum yapmak için Pareto ağırlıklı sezgisel algoritmasını kullanmışlardır. Yine işçi atama ve hat dengeleme problem için Akyol ve Baykasoğlu (2019) da istasyonların ergonomik risk hesabında OCRA yöntemini kullanarak çoklu kural tabanlı tur geliştiren rassal arama algoritması ile çözüm bulmuştur.

Literatürde sadece mevcut risk değerlendirme yöntemlerini kullanmayıp, farklı yöntemler ve formüller geliştiren çalışmalar da vardır. Bu çalışmalardan biri Rajabalipour, Haron, Kazemipour ve Desa (2012) 'nin MHDP' ye çalışanın duruşunu entegre eden çalışmalarıdır. ARP adını verdikleri çalışanın kol, bacak ve sırt bölgelerindeki risk düzeyinin belirlenmesi için OWAS yöntemini kullanarak birikimli duruş riskini hesaplamak amacıyla bir formül geliştirmişlerdir. Bu yöntemle, az sayıda istasyon olması durumunda ergonomik risk anlamında iyi sonuçlar elde edilmiştir. Montaj hatlarında birikimli ergonomik risk düzeyini hesaplayan bir diğer metod da, Takanokura, Tanaka, Watanebe, Kakehi, Utsuki ve Nakamura (2017) tarafından önerilmiştir. Bir işçinin günlük birikimli risk yükünü belirlemek için günlük üretim miktarı ile işlem zamanları ağırlıklandırılmış bir çevrim için REBA yöntemiyle belirlenen risk skoru çarpılmıştır.

Bir çalışanın anlık risk skorunu veya duruşunu değil, toplam birikimli oluşan risk skorunu hesaplamak için yapılan çalışmalara bir diğer örnek Bortolini, Maurizio, Mauro ve Francesco (2017) tarafından yapılan çalışmadır. Montaj işlemleri ve malzeme toplama işlemleri esnasında oluşan zorlanmalara ek olarak boş kalmanın KİSR' e olumlu etkisini göstermek amacıyla işçinin iş parçaları arasında boş kalma zamanları için risk skoru 1 alınmış ve bileşke risk skoru hesaplayan bir formül

geliştirilmiştir. Sonuçta ergonomik risk düzeylerinin çok daha dengeli atandığı görülmüştür.

Literatürde hat dengeleme ve risk skoru hesaplamayı aynı anda yapan yazılımların kullanıldığı da görülmektedir. Benedetto ve Fanti (2012), ErgoAnalysis isimli bir yazılım kullanarak OCRA ve NIOSH yöntemleriyle hesaplanan risk skorlarına göre alternatif dengelemeler oluşturmuştur. Matematiksel model kurmak yerine hat dengeleme için literatürde bulunan sezgisel yöntemleri kullanan çalışmalar da bulunmaktadır. Jaturanonda ve Nanthavanij (2006), Kilbridge Wester algoritmasını kullanarak, bir başlangıç ataması yapmıştır. Daha sonra, RULA yöntemiyle risk skorları hesaplanmış ve ilk yapılan atamayı risk skorlarına göre yeniden düzenlemek için yerel arama sezgiseli kullanılmıştır. Baykasoğlu ve Demirkol Akyol (2014), risk skorlarını OCRA yöntemiyle hesaplamış ve COMSOAL sezgiseli ile hat dengelemeyi yaparken çevrim zamanı ve öncelik kısıtlarına ek olarak, kabul edilebilir risk seviyesinin aşılmasını damodele dahil etmişlerdir. Baykasoğlu, Tasan, Tasan ve Akyol (2017), MHDP, işçi atama ve yerleşim problemlerinin hepsini içeren bir yaklaşım sunmuşlardır. Risk skorları OCRA indeksiyle hesaplandığı, kural tabanlı bir sezgisel yöntem geliştirilmiştir. Kahya, Şahin, Daşdelen ve Doğru (2018), istasyon zamanını ve ergonomik risk faktörlerini eşzamanlı dengelemek için COMSOAL algoritmasına dayanan sezgisel bir algoritma sunmuşlardır.

Xu, Jeonghan, Cochran ve Jung (2012) yeni bir metodoloji geliştirmek amacıyla ergonomik riskler ve hat dengeleme modeli arasında doğrusal bir ilişki kurmayı hedeflemişlerdir. Risk skorları ACGIH (American Conference of Industrial Hygienists) yöntemiyle belirlenmiş ve görev atamanın doğrusal bir fonksiyonu olarak ifade edilmiştir. Polat, Mutlu ve Özgörmüş (2015), risk skorlarını REBA ile belirlemiş ve geliştirilen çok amaçlı modelde amaçlardan birisini en büyük risk skorunu aşan toplam pozitif sapmaların en küçüklmesi olarak belirlemişlerdir. Pozitif ve negatif sapmalar kısıtlara eklenerek hat ergonomik anlamda dengelenmiştir. Benzer bir çalışma Şahin ve Kahya (2018) tarafından, istasyon sayısını ve iş yükünden sapmaları en küçükleme amaçları altında, bir hedef programlama modeli ile yapılmıştır. İş elemanlarının ergonomik risk skorları REBA yöntemiyle belirlenmiş, her bir istasyon için olması istenen maksimum REBA skoru da kısıt olarak modele eklenmiştir. Sonuçların karşılaştırılması için

istasyon zamanı ve risk skoru için olmak üzere, sapmaların ortalamasını temel alan iki tane performans ölçütü tanımlanmıştır. Bautista, Rocio ve Batalla-Garcia (2016), RULA, OCRA ve NIOSH yöntemlerini kullanarak belirledikleri risk skorlarının ortalamasından mutlak sapmaları en küçükleyen bir model geliştirmişlerdir.

Literatürde montaj istasyonlarında yapılan işlemleri kolaylık, monotonluk, benzerlik gibi özelliklerine göre sınıflandırarak kullanan çalışmalar da bulunmaktadır. Özgörmüş ve Mutlu (2007), işlemlerin zorluk derecesi, monotonluk ve risk derecesi gibi ergonomik kısıtlar ekleyerek tüm istasyonların risk skoru için bir maksimum limit belirlemişler ve bulanık MHDP geliştirmişlerdir. Güner ve Hasgöl (2012), işlemler arasındaki uyumsuzlukları dikkate alarak, işlemlerin gerektirdiği enerji miktarını hesaplamış ve bir günde istasyonda yapılan işin sürekli performans sınırı ile kısıtlanmasını sağlayan bir model geliştirmişlerdir. Kara, Atasagün, Gökçen, Hezer ve Demirel (2014) işçilerin çalışırken harcadıkları oksijen tüketim miktarını hesaplayarak MHDP modeline eklemişlerdir. Ayrıca işlemlerin ve işçilerin beceri düzeylerini, çalışma duruşlarını ve aydınlatma seviyesi ergonomik kısıtlarını içeren maliyet tabanlı MHDP modeli geliştirmişlerdir. Çevresel faktörleri dikkate alan başka bir çalışma Choi (2009) tarafından yapılmıştır. Çalışmada ergonomik riskler dikkate alınırken, işçinin maruz kaldığı

fiziksel riskleri de tanımlayan 13 farklı parametre tanımlamıştır. Bu parametreler: statik ve uygun olmayan vücut duruşları; uygun olmayan sıcaklık, aydınlatma, titreşim gibi çevresel risk faktörleri ve tekrarlı hareketler, yük kaldırma gibi fiziksel yorulmaya neden olan faktörler olmak üzere 3 grupta toplanmıştır. Bu parametreler ağırlıklandırılarak toplanmış ve bileşke bir risk değeri oluşturmuştur.

Literatür incelendiğinde matematiksel modellerin ve kesin çözüm yöntemlerinin sıklıkla kullanıldığı görülmektedir. Matematiksel modeller genellikle çok amaçlı olarak geliştirilmekte ve çözüm olarak klasik ağırlıklı toplam veya epsilon kısıt yöntemleri kullanılmaktadır. Büyük boyutlu veri setleri için kesin çözüm yöntemleri kullanılarak, MHDP' nin makul sürelerde en iyi çözümünü bulmak oldukça zordur. Dolayısıyla MHDP NP-Zor sınıfı kombinatoriyel eniyileme problemidir. Kesin çözüm yöntemleri kullanılarak sadece küçük boyutlu problemler için en iyi çözümler makul sürelerde elde edilebilmektedir. Ancak yine de MHD uzun

dönemli bir karar ve düzenleme olduğu için çözüm süreleri uzun olsa da literatürde kesin çözüm yöntemleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada hem ergonomik MHDP modeli geliştirilmiş hem de çok amaçlı programlamada kullanılan en yaygın çözüm yöntemlerinden dört yöntem kullanılarak çözümler karşılaştırılmıştır.

### 3. Materyal ve Yöntem

Bu çalışmada, ergonomik risk skorlarını belirleyecek yöntemin seçilmesinin ardından MHDP' de kullanılmak amacıyla bir duruşun değil bir istasyonun risk skorunun hesaplandığı, kümülatif bir risk skoru önerilmiştir. Geliştirilen modelde amaçlanan ergonomik risk skorlarının en küçüklenmesi ve çevrim zamanının enküçüklenmesi birbiriyle çatışan amaçlardır. Bu nedenle ergonomik MHDP bir uzlaşma problem haline gelir. Çatışan amaçları çözebilmek için literatürde birçok sezgisel ve kesin yöntem geliştirilmiştir. Bu çalışmada kesin yöntemlerden klasik ağırlıklı toplam, epsilon kısıt, melez ve konik skalerleştirme yöntemleri kullanılarak model çözülmüş ve sonuçlar karşılaştırılarak incelenmiştir. Bu çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur. Fabrikadan gerekli izinler yapılan yüksek lisans tezi kapsamında Fen ve Mühendislik Bilimleri Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Kurulu' ndan 53893652-299-E.42842 sayılı karar ile gerekli izinler alınmıştır.

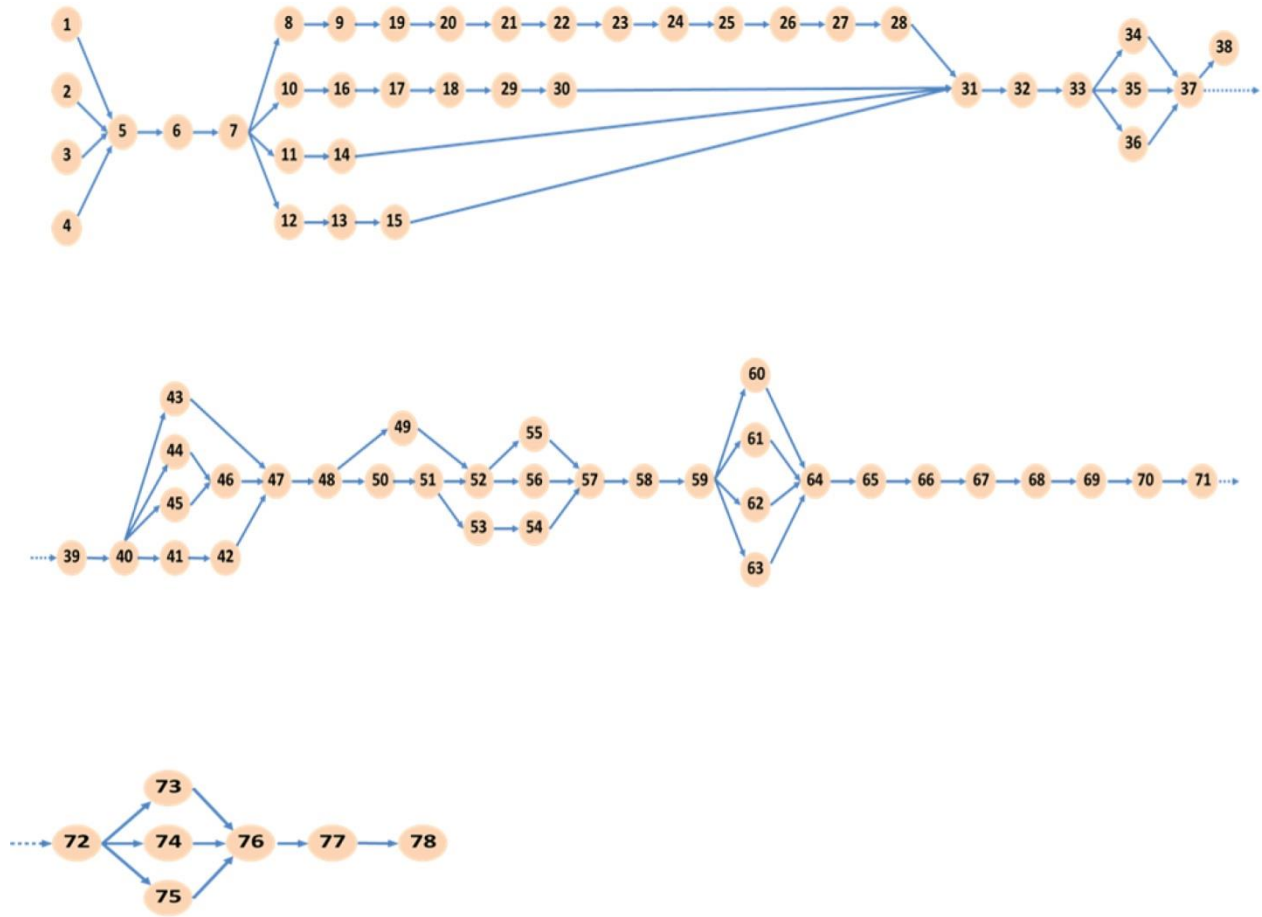
#### 3.1 Risk Değerlendirme Yönteminin Seçimi

Çalışmada işçilerin montaj işlemleri esnasında sergilediği çalışma duruşlarını değerlendirmek ve

ergonomik risk skorlarını belirlemek amacıyla REBA yöntemi kullanılmıştır. Yöntem, bir duruş için boyun, kollar, bacaklar, gövde ve bilekler olmak üzere tüm vücudu analiz ederek, kaldırılan yükünağırlığını, kavrama durumunu, hareketlerin tekrar sıklığını da göz önüne alarak ergonomik riski belirlemektir. Diğer yöntemlere bakıldığında REBA kadar kapsamlı olmadıkları görülmüştür. Örneğin, NIOSH biyomekanik yüklenmeyle ilgili duruşları analiz etmekte, OWAS tüm vücudu değerlendirmekte ancak hareket sıklığına bakmamakta, OCRA ise el, bilek, dirsek ve omuz dışındaki vücut bölgelerini dikkate almamaktadır. Bu nedenlerden dolayı montaj hatlarında daha yüksek hassasiyet sağlayan ve literatürde de sıkça kullanılan REBA yöntemi seçilmiştir.

#### 3.2 Verilerin Toplanması ve Risk Skoru Hesabı

Çalışma, bir beyaz eşya fabrikasının tek modeli bulaşık makinesi üreten montaj hattında gerçekleştirilmiştir. Hatta toplam 32 istasyon bulunmakta ve her istasyonda bir işçi çalışmaktadır. Günlük üretilmesi hedeflenen ürün miktarı 790 adet olup, hattın normal mesaisi haftada 5 gün, günde 9 saattir. Bu bilgiler doğrultusunda hattın olması gereken çevrim süresi 41 saniye olarak belirlenmiştir. İşler iş elemanlarına ayrılmış ve zaman etüdü yardımıyla MHDP' de kullanılacak iş elemanı süreleri hesaplanmıştır. Ayrıca iş elemanları arasındaki öncelik ilişkileri de Şekil 1'de verildiği gibi belirlenmiştir. Bu çalışmada veri toplamak amacıyla gerekli izinler Fen ve Mühendislik Bilimleri Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Kurulundan 53893652-299-E.42842 sayılı karar ile alınmıştır.

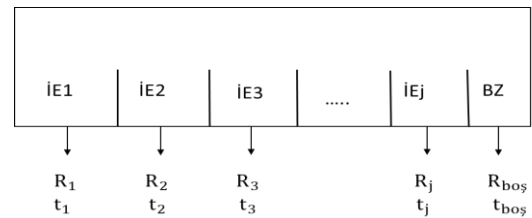


Şekil 1. Bulaşık Makinesi Hattına Ait Öncelik Diyagramı

Basit gözlem teknikleri uygulanırken yalnızca tek bir duruşa odaklanılmakta ve o duruş için ergonomik risk skoru hesaplanmaktadır. Ancak bir istasyonda işçiler, farklı birçok iş elemanını gerçekleştirirken duruşlarını sıkça değiştirmekte ve farklı duruşlar sergilemektedir. Bu nedenle ergonomik risk kısıtları MHDP'de dikkate alınırken istasyonun kümülatif risk skoru hesaba katılmıştır. Her saniye gerçekleşen duruşun risk skoru hesaplanmasa da her iş elemanının en riskli duruşu için bir skor belirlenip bunlardan yola çıkarak, oluşturdukları görevin toplam risk skoru bir formülasyonla belirlenmiştir. Bu çalışmada iş elemanlarının süresi ile risk skoru çarpılarak süre ağırlıklı risk skoru hesaplanmış ve boş kalmanın KİSR üzerindeki olumlu etkisini yansıtmak amacıyla istasyonda boş geçen sürenin REBA değeri 1 kabul edilerek geliştirilen formüle dahil edilmiştir.

Şekil 2'de, bir istasyonda yapılan iş elemanları ve sıradaki ürüne geçmeden önce kalan boş zaman gösterilmiştir. Önerilen yöntem ile istasyonun

kümülatif risk skorunun nasıl hesaplanacağı Denklem (1)'de verilmiştir.



Şekil 2. İstasyon İş yükü hesabı

C= Çevrim Zamanı

İEj = İş elemanı

Rj = Reba Skoru

tj = İş elemanının süresi

BZ= İstasyon boş zaman aktivitesi

Rboş = Boş kalan işçinin REBA skoru

tboş = İstasyon boş zamanı

$$ER_{ist} = \frac{(\sum_{j=1}^n R_j * t_j) - R_{bos} * t_{bos}}{c} \quad (1)$$

### 3.3 Çok Amaçlı Ergonomik Montaj Hattı Dengeleme Modeli

Bu çalışmada birbirleriyle çelişen istasyon zamanını en küçüklemek ve istasyonların ortalama ergonomik risk skorundan sapmalarını en küçüklemek olmak üzere iki amaç ele alınmıştır. İstasyonların ortalama ergonomik risk skoru hesaplanırken, Denklem(1)'de verilen formülasyon kullanılmıştır.

Matematiksel model verilmeden önce, modelde kullanılan parametre ve değişken tanımlamalarına aşağıda yer verilmiştir:

#### İndisler:

- $j, i$  : İş elemanları kümesi ( $j = 1, \dots, |J|$ ).
- $k$  : İstasyon kümesi ( $k = 1, \dots, |K|$ ).
- $P_j$  :  $j$  iş elemanından önce iş elemanları kümesi.

#### Parametreler:

- $m$  : İstasyon sayısı,  $m = |K|$ , bilinen ve sabit bir değer.
- $t_j$  :  $j$  iş elemanlarının işlem süresi.
- $C$  : Çevrim süresi.
- $R_j$  :  $j$  iş elemanının REBA skoru.
- $ER_j$  :  $j$  iş elemanının ergonomik risk skoru, bakınız denklem (2).

$$ER_j = R_j * t_j \quad (2)$$

$T_{ort}$  : Bir ürün üretmek için her istasyondaki ortalama süre, bakınız denklem (3).

$$T_{ort} = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^{|J|} t_j \quad (3)$$

$BZ_k$  :  $k$  istasyonunda boş geçen zaman, bakınız denklem (5).

$$BZ_k = C - \sum_{j \in (x_{jk}=1)} t_j \quad \forall k \quad (4)$$

$ER_{max}$  = Bir istasyonun alabileceği izin verilen maksimum ergonomik risk skoru.

#### Karar Değişkenleri:

$$x_{jk} = \begin{cases} 1, & j \text{ iş elemanı } k \text{ istasyonuna atanmışsa} \\ 0, & d.d. \end{cases}$$

$T_{j,k}$  :  $k$  istasyonuna atanmış  $j$  iş elemanlarının toplam işlem zamanı, bakınız denklem (5).

$$T_{j,k} = \sum_{j \in (x_{jk}=1)} t_j \quad (5)$$

$ER_{j,k}$  :  $k$  istasyonuna atanmış  $j$  iş elemanlarını toplam ergonomik risk skoru, bakınız denklem (6).

$$ER_{j,k} = \sum_{j \in (x_{jk}=1)} ER_j \quad \forall k \quad (6)$$

$S_k^+(ER)$  = İstasyonun ortalama istasyon ergonomik risk skorunu aşan risk değeri, pozitif sapma, bakınız denklem (7).

$$S_k^+(ER) = [\sum_{j=1}^{|J|} ER_j \cdot X_{j,k} - ER_{ort}] \quad (7)$$

#### 1. Amaç Fonksiyonu:

$$F_1(x) = Y \quad (8)$$

#### 2. Amaç Fonksiyonu:

$$F_2(x) = \sum_{k=1}^K S_k^+(ER) \quad (9)$$

#### Normalleştirilmiş Amaç Fonksiyonu:

$$EnkZ = \left( \frac{EnkF_1}{40.28} \right) + \left( \frac{EnkF_2}{4.5} \right) \quad (10)$$

#### Kısıtlar:

$$\sum_{k=1}^{|K|} X_{j,k} = 1 \quad \forall j \quad (11)$$

$$\sum_{j=1}^{|J|} X_{j,k} \geq 1 \quad \forall k \quad (12)$$

$$k \sum_{k=1}^{|K|} X_{i,k} - k \sum_{k=1}^{|K|} X_{j,k} \leq 0 \quad i \in P_j \quad \forall j \quad (13)$$

$$\sum_{j=1}^{|J|} t_j X_{j,k} \leq C \quad \forall k \quad (14)$$

$$\sum_{j=1}^{|J|} ER_j X_{j,k} \leq ER_{max} \quad \forall k \quad (15)$$

$$Y \geq \max \left[ \sum_{j \in (x_{jk}=1)}^{|J|} t_j X_{j,k} \right] \quad \forall k \quad (16)$$

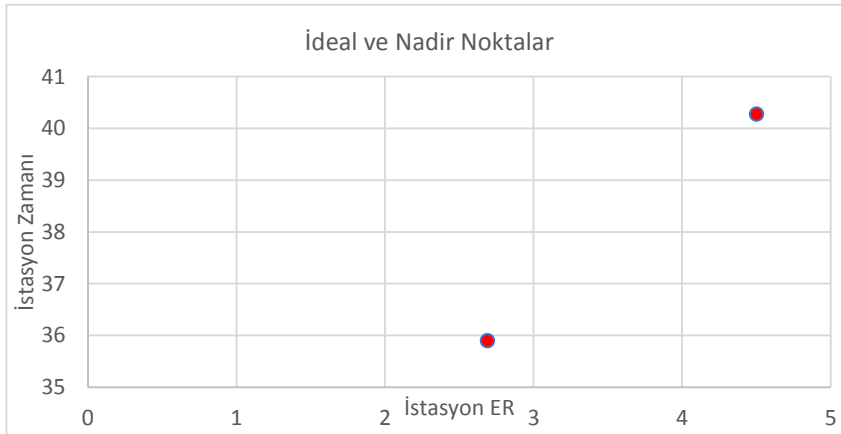
Amaç fonksiyonlarından ilki Denklem (8)'de verildiği gibi en büyük istasyon zamanının enküçüklenmesidir. Her bir istasyon için en büyük istasyon zamanını bulmak amaç fonksiyonuna değil kısıtlara eklenmiş ve amaç fonksiyonuna direkt değişken olarak yazılmıştır. İkinci amaç fonksiyonu istasyonların ortalama kümülatif ergonomik skorundan pozitif sapmalarının toplamı olarak Denklem (9)'daki gibi verilmiştir. Denklem (10) söz konusu iki amaç fonksiyonunun nadir noktalarıyla normleştirilmiş fonksiyonudur. Denklem (11) ve Denklem (12) atama kısıtlarıdır, her iş elemanı yalnızca bir istasyona atanabilir ve her iş elemanı mutlaka bir istasyona atanmalıdır. Denklem (13) öncelik diyagramına uyulması için eklenen öncelik kısıtıdır. Denklem (14) çevrim zamanı kısıtıdır ve her istasyon için atanan iş elemanlarının toplam süresinin çevrim zamanını aşmamasını sağlar. Denklem (15) her istasyonun ergonomik risk skorunun belirlenen maksimum kümülatif ergonomik risk skorunun altında kalmasını sağlar.

Hattaki maksimum istasyon süresinin hesaplanması için Denklem (16) oluşturulmuştur.

#### 4. Çok Amaçlı Ergonomik MHDP'nin Farklı Yöntemlerle Çözülmesi

Çok amaçlı matematiksel modellerde kullanılan amaç birleştirme yöntemlerinin ana fikri çok amaçlı problemi tek amaçlı hale dönüştürmektir. Bunun için her yöntem farklı bir yaklaşım kullanır. Örneğin ağırlıklı toplam ve konik skalerleştirme yöntemleri tüm amaç fonksiyonlarını temsil edecek bütünleşik bir fonksiyon oluşturur. Epsilon kısıt yöntemi bazı amaç fonksiyonlarını kısıta dönüştürür. Melez yöntem ikisini beraber yapar. Bazı yöntemler ise belirlenen bir referans çözüme en yakın çözümü bulmaya çalışır.

Çok amaçlı MHDP için öncelikle ideal ve nadir noktalar bulunmuştur. Eğer ideal nokta ve nadir nokta birbirine eşit değilse, bu noktalar arasında pareto etkin değerler bulunabilmektedir. İdeal nokta, amaç uzayı dışında yer alırken nadir nokta, amaç uzayı içerisinde yer almaktadır. Bu çalışmada kullanılan problemin ideal ve nadir noktaları Tablo 1 ve Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 3. İdeal ve Nadir Noktalar

Tablo 1  
İki Amaç İçin İdeal ve Nadir Noktalar

	1. Amaç	2. Amaç
İdeal Nokta	35.9	2.69
Nadir Nokta	40.28	4.5



Nadir nokta, tüm pareto-optimal kümesindeki çözümlerinin en kötü amaç değerleri tarafından oluşturulur. İdeal nokta ile birlikte, nadir nokta, tüm pareto-optimal çözümlerin içinde bulunması gereken amaç değerler aralığını sağlar. Bu nedenle, nadir nokta, çok amaçlı optimizasyonla ilgilenen araştırmacılar ve uygulayıcılar için önemli bir noktadır. Burada nadir amaç vektörü amaç fonksiyonu değerlerini normalleştirmek amacıyla kullanılmıştır. Bu iki uç değerle, amaç fonksiyonları ölçeklendirilebilir, böylece her ölçeklenen amaç aynı aralıkta değerler alır.

Çok Amaçlı Programlama yöntemleri iki şekilde sınıflandırılabilir. Bunlardan ilki, yöntemi uygulamadan önce karar vericinin tercih bilgilerine ihtiyaç duyan yöntemlerdir. Bu sınıfa ağırlıklı toplam, melez yöntem ve konik skalerleştirme yöntemleri dahil edilebilir. İkinci sınıf ise, önceliğin analiz olduğu yöntemlerdir. Karar verici, karar sürecinin sonunda rol alır. Önce, çok amaçlı problemin Pareto etkin yüzeyi analiz edilir ve karar vericiye problemin etkin çözüm uzayı hakkında bilgi verilir. Karar verici, sonuçlara bakarak bir karar verir. Bu sınıfa, Epsilon Kısıt yöntemi girmektedir.

#### 4.1 Ağırlıklı Toplam Yöntemiyle Çözüm

En eski ve en yaygın kullanılan amaç birleştirme yöntemidir. Kullanımının kolay olması ve karar vericinin tercihlerini modele yansıtması gibi avantajları vardır. Ancak tüm etkin çözümleri bulabilmesi için uygun çözüm alanının ve amaç fonksiyonlarının dışbükeylik şartı bulunmaktadır. Denklem (23)' te genel formülü verilmiştir.

$$enk \sum_{k=1}^p w_k f_k(x) \quad (23)$$

Model bu yöntemle çözülmek istendiği zaman amaç fonksiyonu Denklem (24)' teki gibi yazılabilir.

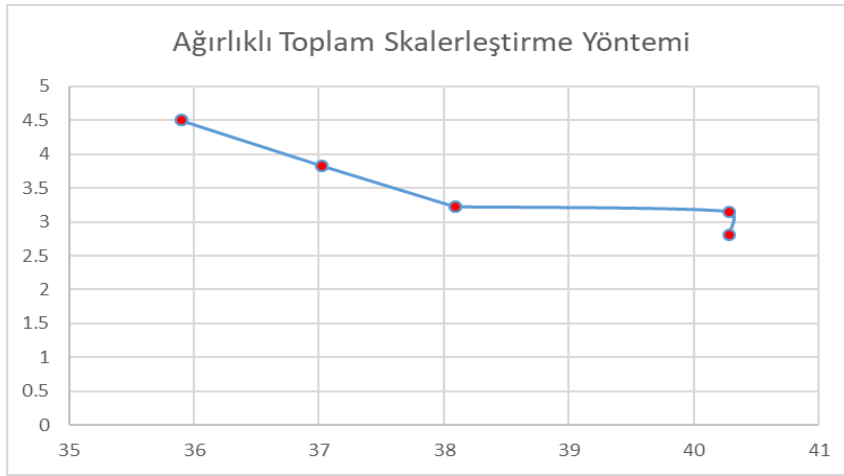
$$enk[(w_1 * Y) + (w_2 * \sum_{k=1}^K S_k^+(ER))] \quad (24)$$

1-50 sayıları arasından rassal olarak tüm ağırlıklar seçilerek denendiğinde, Tablo 2' deki sonuçlar elde edilmiştir.

Tablo 2  
Ağırlıklı Toplam Çözüm Sonuçları

$W_1$	$W_2$	$F_1$	$F_2$
41-50	9-0	35.9	4.5
35-19	15-31	35.9	4.5
18	32	37.02	3.83
17.5	32.5	37.02	3.83
17-12	33-38	38.09	3.22
11	39	38.09	3.22
10	40	40.28	3.15
8-0	42-50	40.28	2.81

Sonuçların grafiği çizildiğinde Şekil 4 elde edilir. Ağırlıklı toplam yöntemi ile elde edilen sonuçlara bakıldığında pareto etkin çözümlerin çoğunun bulunduğu görülmektedir. Fakat ağırlıklı toplam yöntemi amaç fonksiyonu ve uygun çözüm alanı üzerinde dışbükeylik şartı gerektirdiğinden bazı pareto noktaları yakalayamamıştır. Bunun yanında bu yöntem ile zayıf pareto etkin çözümler de bulunmuştur. Özellikle birinci amaç fonksiyonunun ağırlığı 40 ve ikinci amaç fonksiyonunun ağırlığı 10 olduğu durumda zayıf etkin çözümler bulunmuştur.



Şekil 4. Ağırlıklı Toplam Çözüm Grafiği

#### 4.2 Epsilon Kısıt Yöntemiyle Çözüm

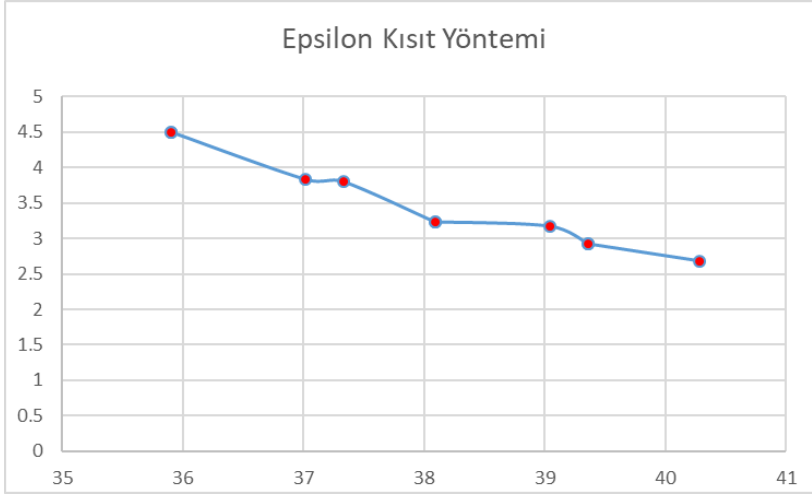
Epsilon kısıt yönteminde amaçları birleştirmek yerine amaçlardan birisi en iyilenirken diğer amaç fonksiyonu kısıt olarak yazılır. Epsilon kısıt yöntemi ile bulunan çözümler en azından zayıf etkin çözümdür. Dışbükeylik şartına gerek yoktur. İlk olarak birinci amaç fonksiyonu amaç olarak alınmış ve ikinci amaç fonksiyonu kısıt olarak eklenmiştir. Tablo 3'te çözüm değerleri verilmiştir.

Tablo 3  
Epsilon Kısıt Çözüm Sonuçları

$F_1^0$	$F_1$	$F_2$
35.9	35.9	4.501
36.4	35.9	4.501
37.1	37.02	3.829
37.6	37.33	3.799
38.1	38.09	3.23
38.6	38.09	3.23
39.1	39.04	3.17
39.6	39.36	2.921
40.1	39.36	2.921
40.6	40.28	2.68

Birinci amaç fonksiyonunun kısıtlara eklendiği, ikinci amacın ise amaç fonksiyonu olarak alındığı durumda çözüm uzayı Şekil 5'te verilmiştir. İkinci olarak ise birinci amaç fonksiyonu amaç fonksiyonu

olarak yazılmış ve ikinci amaç fonksiyonu kısıtlara yazılmıştır. Elde edilen çözüm değerleri Tablo 4 ve çözüm uzayı ise Şekil 6'da verilmiştir.



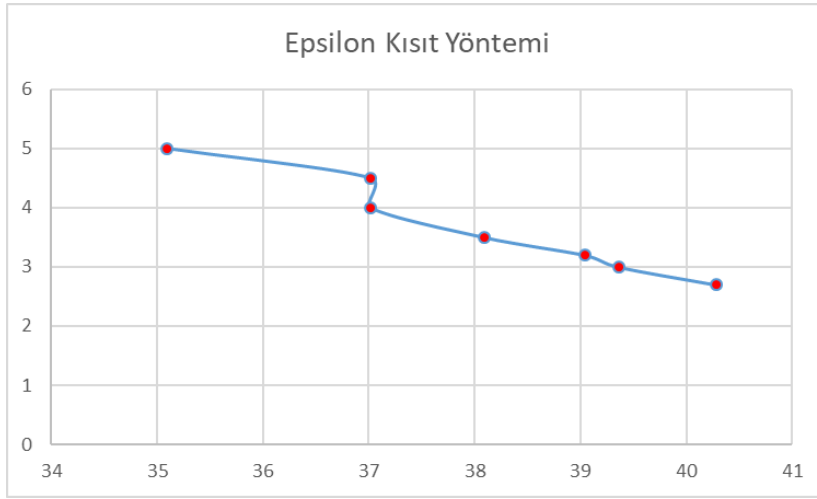
Şekil 5. Epsilon Kısıt Çözüm Grafiği

Epsilon kısıt yöntemi ile elde edilen sonuçlara bakıldığında pareto etkin noktaların üretilebildiği görülmektedir. Bunun yanında zayıf pareto etkin noktalar da bulunmuştur. Ağırlıklı Toplam Skalerleştirme yöntemine göre daha fazla pareto nokta bulunmuştur fakat çözüm süreleri daha fazla çıkmıştır.

Tablo 4  
Epsilon Kısıt Çözüm Sonuçları

$F_2^0$	$F_1$	$F_2$
2.7	40.28	2.7
3	39.36	3
3.2	39.04	3.2
3.5	38.09	3.5
4	37.02	4
4.5	37.02	4.5
5	35.09	5

İkinci amaç kısıtlara eklendiğinde bulunan noktaların çoğu zayıf pareto noktalarıdır.



Şekil 6. Epsilon Kısıt Çözüm Grafiği

### 4.3 Melez Yöntem ile Çözüm

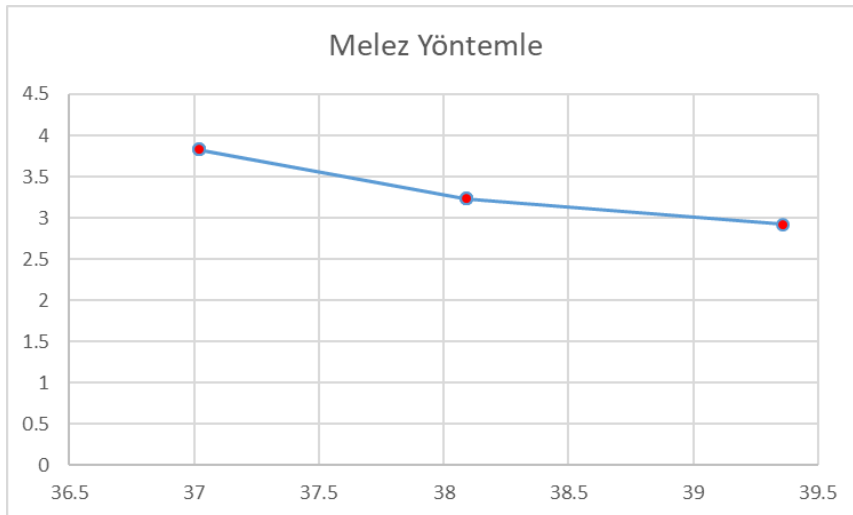
Melez yöntem, epsilon kısıt ve ağırlıklı toplam skalerleştirme yöntemlerinin birlikte kullanılmasıyla ortaya çıkmıştır. Melez yöntemde, bütün amaç fonksiyonlarına konulan kısıtlar altında amaç fonksiyonlarının ağırlıklı toplamları en küçüklenir. Bu yöntem de, epsilon yöntemi gibi dışbükeylik şartına ihtiyaç duymaz. Kullanıcı kararları modele yansıtılabilir. Fakat sadece doğrusal fonksiyon ile desteklenebilen noktalara ulaşılabilir. Melez yöntemle elde edilen çözüm değerleri Tablo 5'te verilmiştir. Diğer yöntemlere göre daha az pareto nokta bulunmuştur ve bunlar etkin pareto noktalarıdır.

Tablo 5

Melez Yöntem Çözüm Sonuçları

$F_1^0$	$F_2^0$	$W_1$	$W_2$	$F_1$	$F_2$
39.1	4	0.5	0.5	37.02	3.83
39.1	4	0.3	0.7	38.09	3.23
39.1	4	0.7	0.3	37.02	3.829
39.1	4	0.9	0.1	37.02	3.829
40	3.5	0.5	0.5	38.09	3.23
40	3.5	0.7	0.3	38.09	3.23
40	3	0.5	0.5	39.36	2.921

Bu çözüm değerlerinin oluşturduğu çözüm uzayı Şekil 7' deki gibidir.



Şekil 7. Melez Yöntem Çözüm Grafiği

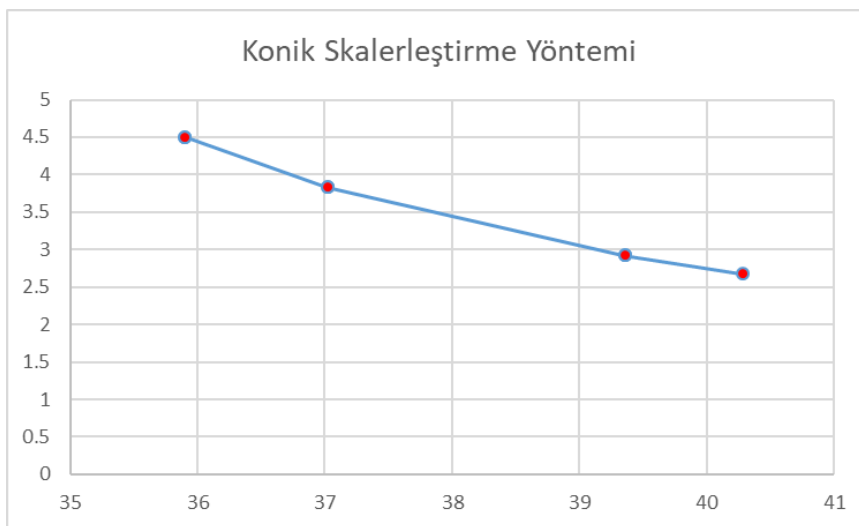
#### 4.4 Konik Skalerleştirme Yöntemiyle Çözüm

Klasik ağırlıklandırma yöntemi ile çözüm uzayında hiper düzlemlerle desteklenemeyen Pareto etkin çözümleri elde etmek mümkün değildir. Dışbükey olmayan kümede doğru ile desteklenemeyen noktalar koni ile desteklenebilmektedir. Konik skalerleştirme yönteminde noktalar hiper düzlemlerle değil de konilerle desteklendiğinden, klasik ağırlıklandırma yöntemi ile bulunması mümkün olmayan pareto etkin çözümlerin elde edilebilmesi mümkün olabilmektedir. Konik skalerleştirme yöntemi (KSY) dışbükeylik şartı gerektirmediğinden çok geniş problem sınıfına başarıyla uygulanabilmektedir. Yöntemde farklı amaç fonksiyonlarının birleştirilmesinde dışbükey monoton fonksiyonlar kullanıldığından, eğer asıl problem doğrusal veya dışbükey ise dışbükeylik korunmaktadır (Gasimov, 2001). Konik skalerleştirme formülasyonu Gasimov (2001) tarafından gerçekleştirilmiş ve Denklem (25)'te gösterilmiştir.

$$[\alpha \sum_{i=1}^K |F_i(x) - B_i| + \sum_{i=1}^K w_i (F_i(x) - B_i)] \quad (25)$$

Çok amaçlı MHDP'yi KSY ile çözebilmek için  $\alpha$  ve  $w_1$  değerleri  $0 \leq \alpha \leq \text{enk}\{w_1, w_2\}$  kuralına göre belirlenir.  $B_i$  noktaları da dışbükey pareto noktalardan seçilir. Olası içbükey pareto çözümleri elde etmek için 24 numaralı denklem kullanılır. Örnek bir amaç fonksiyonu Denklem (26)'daki gibidir:

$$[2(3|F_1(x) - 39.1|) + (7(F_2(x) - 3))] \quad (26)$$



Şekil 8. Melez Yöntem Çözüm Grafiği

Bu şekilde farklı ağırlık ve referans değerlerle elde edilen çözüm değerleri Tablo 6'da gösterilmiştir.

Tablo 6  
Konik Skalerleştirme Çözüm Değerleri

$\alpha$	$W_1$	$W_2$	$F_1$	$F_2$
1	1	9	35.9	4.501
1	9	1	35.9	4.501
1	8	2	37.02	3.829
3	7	3	37.02	3.829
2	3	7	39.36	2.921
1	2	8	39.36	2.921
1	1	9	40.28	2.68

Bu çözüm değerlerinin oluşturduğu çözüm uzayı Şekil 8'deki gibidir. Konik skalerleştirme yöntemi ile elde edilen sonuçlara bakıldığında pareto etkin değerlerin hemen hemen hepsinin bulunduğu görülmüştür. Buna karşılık çözüm zamanının diğer yöntemlere göre oldukça fazla olduğu da görülmektedir. MHDP gibi NP-Zor bir probleme konik skalerleştirme gibi çözüm zorluğunu daha da arttıran bir yöntem uygulandığı için çözüm zamanı oldukça yüksek çıkmıştır. Konik skalerleştirme yöntemi ile yaklaşık 7 saatte pareto etkin noktalar bulunabilmiştir. Ancak çok amaçlı MHDP gibi uzun dönemli bir karar problemi için yine de makul bir zaman olduğu düşünülmektedir. Montaj hatlarında esneklik seviyesi düşüktür ve bir ürün için hat dengeleme kararı orta dönemli bir karardır. Bu nedenle koni ile desteklenebilecek alternatif pareto çözümler bulmak amacıyla kullanılması gereken bir yöntemdir.

Farklı yöntemler sonucu elde edilen değerler hem ergonomik hem de istasyon zamanı açısından karşılaştırılarak tablolar oluşturulmuştur. Bu tablolarda her bir yöntemin ergonomik risk ve istasyon zamanı açısından bulunan en iyi ve en kötü

değerler yazılarak tüm yöntemlerin sonuçları karşılaştırılmıştır. Tablo 7'de ergonomik risk değerleri Tablo 8'de istasyon zamanı değerleri verilmiştir.

Tablo 7  
REBA skorları açısından yöntemlerin karşılaştırılması

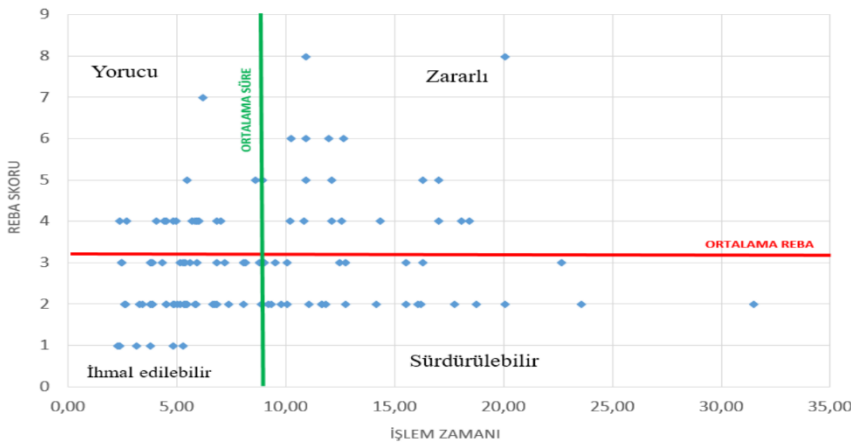
Yöntem	En büyük REBA	En küçük REBA
Ağırlıklı Toplam	4,5	2,81
Epsilon Kısıt	5	2.68
Melez Yöntem	3,83	2,92
Konik Skalerleştirme	4,5	2,68

Tablo 8  
İstasyon zamanı açısından yöntemlerin karşılaştırılması

Yöntem	En büyük İstasyon Zamanı	En küçük İstasyon Zamanı
Ağırlıklı Toplam	40,28	35,9
Epsilon Kısıt	40,28	35,9
Melez Yöntem	40,28	35,9
Konik Skalerleştirme	39,36	37,02

Ergonomik risk düzeyinde iyileşmeler açısından elde edilen birçok sonuç karar vericinin tercihinin göre incelenebilir. Öncelikle montaj hattında bulunan işlerin süre ve REBA skoru açısından ortalama değerleri referans olarak işlem süreleri ve REBA risk skoruna göre Bortolini vd. (2017) tarafından önerilen bir sınıflandırma yapılmıştır. Bu sınıflandırmaya göre işler ortalama değerinin altında

veya üstünde kalmasına göre "Yorucu", "Sürdürülebilir", "Zararlı" ve "İhmal Edilebilir" olarak belirlenmiştir. Hatta yapılan iş elemanlarının Ortalama REBA skoru ; 3,06, ortalama işlem zamanı; 8,75' tir. Bu değerlere göre Şekil 9 oluşturulmuştur. Bu sınıflandırmaya göre işlerin %16 sı hem süre hem REBA skoru açısından zararlı kategorisinde yer almaktadır.



Şekil 9. Bulaşık Makinesi Hatındaki İş Elemanlarının Sınıflandırılması

Montaj Hattının belirlenen iş elemanları süre ve REBA skorlarına göre ortalama kümülatif risk seviyesi ise Denklem (26)' deki gibi hesaplanabilir:

$$ER_{Ort,k} = \frac{(\sum_{j=1}^n R_j * t_j) - [k * C - \sum_{j=1}^n R_j * t_j]}{C * k} \quad (27)$$

Geliştirilen bu formüle göre bulaşık makinesi hattının ortalama Kümülatif Ergonomik Risk Skoru Denklem (27)' deki gibidir:

$$\frac{3100,9 - [32 * 41 - (944,96)]}{41 * 32} = 2,08 \cong 2,1 \quad (28)$$

Tablo 7

Bulunan iki farklı çözüm değerinin karşılaştırılması

	<b>F1:35.9</b>	<b>F1: 39.36</b>
	<b>F2:4.5</b>	<b>F2:2.92</b>
Yüksek Riskli İstasyon	13	9
Orta Riskli İstasyon	10	14
Düşük Riskli İstasyon	9	9

Karar verici ergonomik anlamda daha dengeli bir montaj hattı istiyorsa (F1: 39.36 ve F2: 2.92) olan çözümü seçmelidir. Burda diğer çözüme göre istasyon zamanında 3,4 saniyelik bir artış olsa da hattın hedeflenen çevrim süresi 41 saniyeden azdır. Buna karşılık 13 tane olan yüksek riskli istasyon sayısı 9 adete düşmüştür.

## 5. Sonuçlar ve Tartışma

Bu çalışmada ergonomik MHDP için çok amaçlı bir model yaklaşımı geliştirilmiştir. Genellikle ayrı ayrı değerlendirilen ergonomik risk skorları ve istasyon zamanları eş zamanlı değerlendirilerek, işlerin istasyonlara atanma kısıtlarına eklenmiştir. İş elemanlarının sahip oldukları ergonomik risk skorları değerlendirilirken, genel yaklaşım çalışanın tek bir duruşu için hesaplanan ergonomik risk skorunu işlemlere dahil etmektir. Ancak bu yaklaşım ihtiyaçları karşılamaz çünkü bir çalışanın bir çevrim boyunca istasyonda yaptığı birden fazla iş elemanı ve sergilediği duruş vardır. Çalışmada bu ihtiyacı karşılamak için kümülatif ergonomik risk skorunu hesaplayan, iş elemanlarının zamanıyla ağırlıklandırılan ve boş zamanları da dikkate alan bir formül önerilmiştir.

Bulunan REBA skorlarına göre değil de bir istasyonun Kümülatif Ergonomik Risk Skorunu hesaplayan yukarıdaki sonuca göre istasyonlar risk seviyesine göre sınıflandırılmalıdır. Bir sonraki aşamada, iş elemanlarının ve hattın ortalama değerlerini bulduktan sonra çözümlerin ergonomik risk açısından karşılaştırmaları yapılabilir. Burada, istasyon zamanının enküçüklenme amacının (F1) ve Pozitif Kümülatif Ergonomik Risk Sapmalarının enküçüklenme (F2) amaçlarının çözülmesi farklı yöntemlerle elde edilen istasyon atamalarına ilişkin sonuçlar Tablo 7'de gibi gösterilmiştir.

Uygulama, bir beyaz eşya fabrikasının 32 istasyonlu tek modellenmiş bulaşık makinesi üretim hattında gerçekleştirilmiştir. Çözüm yöntemi olarak, kesin yöntemlerin başarısını göstermek amacıyla 4 farklı yöntem uygulanmıştır. Çözüm GAMS paket programı ile çözülmüştür. Bu yöntemler çok amaçlı programlamada sıkça kullanılan ağırlıklı toplam, epsilon kısıt, melez yöntem ve konik skalerleştirme yöntemidir. Bu çözümlerin birbirine göre avantaj ve dezavantajları gösterilmiştir. Ağırlıklı toplam ve melez yöntemin çözüm süreleri çok kısa olmasına rağmen tüm alternatif pareto çözümleri üretmemiştir. Konik skalerleştirmenin çözüm süresi çok uzun olmasına rağmen koniyle desteklenen tüm alanları taramış ve pareto noktaları bulmuştur. Epsilon kısıt yöntemi hem makul sürede sonuç vermesi hem de hemen hemen tüm etkin pareto noktaları bulması nedeniyle en etkin çözüm yöntemi olmuştur. Bu yöntemlerin kullanılmasında NP-Zor ve iki amaçlı MHDP çok büyük boyutta bir problemde uygulanırsa bile, kesin yöntemlerin makul sürelerde iyi sonuçlar elde ettiği görülmüştür. Konik Skalerleştirme Yöntemi, literatürde ilk kez ergonomik MHDP çözümünde kullanılmıştır.

Her çözüm yöntemi, her problemde çözüm sürelerinde ve pareto noktalara ulaşma açısından farklılık göstermektedir. Bu çalışmada, bu

farklılıklar gösterilmiştir. Bazı yöntemlerde daha çok zayıf pareto noktalar bulunmuştur, örneğin burada Epsilon kısıt yöntemi ise, tüm etkin pareto noktaları bulabilmiştir. Ağırlıklı toplam yöntemi ise, çok az alternatif çözüm bulabilmiştir. Bu nedenle MHDP gibi uzun dönemli ve hem çalışanları hem de hattın verimliliğini doğrudan etkileyen kararlarda çözüm yöntemlerine iyi karar verilmeli ve tüm alternatif çözümler araştırılmalıdır.

Bu çalışmada geliştirilen model tek model üreten bir montaj hattında uygulanmıştır. Gelecek çalışmalarda karma modellenmiş, çok modellenmiş ya da U tipi, paralel montaj hatları gibi farklı alanlarda da uygulaması yapılabilir. REBA yöntemi, bu çalışma için uygun bulunmuştur ancak literatürde yaygın kabul gören diğer OCRA, OWAS, NIOSH vb. yöntemler de kullanılabilir. Ergonomik anlamda daha bütüncül bir yaklaşım sergilemek adına sadece, duruşlardan kaynaklanan riskler değil, bireysel, çevresel ve psikolojik faktörler de MHDP'ye entegre edilebilir.

#### Araştırmacıların Katkısı

Bu çalışmada; Büşra Nur YETKİN, 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 konularında katkı sağlamışlardır.

#### Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

#### Kaynaklar

Akyol, Ş. & Baykasoğlu, A. (2019). A multiple-rule based constructive randomized search algorithm for solving assembly line worker assignment and balancing problem. *Journal of Intelligent Manufacturing* 30(1), 557-573. Doi : <https://doi.org/10.1007/s10845-016-1262-6>.

Battaia, O., & Dolgui, A. (2013). A taxonomy of line balancing problems and their solution approaches. *International Journal of Production*

*Economics* (142), 259-277. Doi : <https://doi.org/10.1016/j.iipe.2012.10.020>.

Battini, D., Calzavara M., Otto, A. & Sgarbossa, F. (2016). The integrated assembly line balancing and parts feeding problem with ergonomics considerations. *IFAC-Papers OnLine* 49 (12), 191-96. Doi : <http://dx.doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.07.594>.

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 : <http://dx.doi.org/10.1080/00207543.2015.1074299>.

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 : <http://dx.doi.org/10.1080/18756891.2016.1204125>.

Bautista, J., Batalla-García, C. & Alfaro-Pozo, R. (2016). Models for assembly line balancing by temporal, spatial and ergonomic risk attributes. *European Journal of Operational Research*, 251(3), 814-29. Doi : <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2015.12.042>.

Baykasoğlu, A , Demirkol Akyol, Ş . (2014). Ergonomik montaj hattı dengeleme. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi* , 29 (4), Doi : <https://doi.org/10.17341/gummfd.00296>

Baykasoğlu, A., Tasan, S., Tasan, A. & 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. Doi : <https://doi.org/10.1002/hfm.20695>.

Becker, C. & Armin, S. (2006). A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing. *European Journal of Operational Research* 168 (3), 694-715. Doi : <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.07.02>.

Becker, D., Battaia, O., Cegarra, J. & Lazarev, A. (2018b). Work planning in low-volume assembly lines under ergonomic constraints. *Procedia CIRP* 72, 786-89. Doi : <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.03.019>.

Boenzi, F., Digiesi S., Mossa, G., Mummolo, G. & Romano, V. (2013). Optimal break and job



- rotation schedules of high repetitive - low load manual tasks in assembly lines: an ocr - based approach. *IFAC Proceedings Volumes* 46 (9), 1896-1901. Doi : <http://dx.doi.org/10.3182/20130619-3-RU-3018.00625>.
- Bortolini, M., Maurizio, F., Mauro, G., & Francesco, P. (2017). Multi-objective assembly line balancing considering component picking and ergonomic risk. *Computers and Industrial Engineering*, 112, 348-67. Doi : <http://dx.doi.org/10.1016/j.cie.2017.08.029>.
- Carnahan, Brian J., Norman, Bryan A. & Redfern, Mark S. (2001). Incorporating physical demand criteria into assembly line balancing. *IIE Transactions (Institute of Industrial Engineers)* 33 (10), 875-887. Doi : <https://doi.org/10.1023/A:1010926722609>
- Chankong, V. & Haimes, Y.Y. (1983). Multiobjective decision making: theory and methodology. *Elsevier Science Publishing Co*, New York.
- Cheshmehgaz, H.R., Haron, H., Kazemipour, F. & 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>.
- Choi, G. (2009). A goal programming mixed-model line balancing for processing time and physical workload. *Computers and Industrial Engineering* 57 (1), 395-400. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cie.2009.01.001>.
- Colombini, D., & Occhipinti, E. (2006). Preventing upper limb work-related musculoskeletal disorders (UL-WMSDs): new approaches in job (re)design and current trends in standardization. *Applied ergonomics*, 37(4), 441-450. Doi : <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2006.04.008>.
- Di Benedetto, R., & Fanti, M. (2012). An integrated tool to support engineers for WMSDs risk assessment during the assembly line balancing. *Work(Reading, Mass.)*, 41 (1), 2329-2333. Doi : <https://doi.org/10.3233/WOR-2012-0460-2329>
- EASHW (European Agency for Safety and Health at Work). (2012). Promoting active ageing in the workplace.
- Gasimov R.N. (2001) Characterization of the Benson Proper Efficiency and Scalarization in Nonconvex Vector Optimization. In: Köksalan M., Zionts S. (eds) Multiple Criteria Decision Making in the New Millennium. *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*. 507. Springer, Berlin, Heidelberg. Doi : [https://doi.org/10.1007/978-3-642-56680-6\\_17](https://doi.org/10.1007/978-3-642-56680-6_17).
- Güner, B, Hasgöl, S . (2013). Sürdürülebilir denge için ergonomik faktörleri içeren u-tipi montaj hattı dengelemesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 27 (2) , Erişim adresi : <https://dergipark.org.tr/tr/pub/gazimmfd/issue/e/6692/88655>
- Hignett, S., & 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)
- Jaturanonda, C., Nanthavanij, S. & Das, S.K. (2013). Heuristic procedure for the assembly line balancing problem with postural load smoothness. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 19 (4), 531-541, Doi : <https://doi.org/10.1080/10803548.2013.11077017>.
- Kahya, E , Şahin, B , Daşdelen, E , Doğru, S . (2018). Ergonomik risk kısıtları altında yeni bir montaj hattı dengeleme modeli geliştirilmesi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, Özel Sayı: ERGONOMİ 2017* , 49-57 . Doi : <https://doi.org/10.21923/jesd.363560>.
- Kara, Y., Atasagun, Y., Gökçen, H., Hezer, S. & 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>.
- Otto , A. & Battaia, O. (2017). Reducing physical ergonomic risks at assembly lines by line balancing and job rotation: a survey. *Computers and Industrial Engineering* 111, 467-80. Doi : <http://dx.doi.org/10.1016/j.cie.2017.04.011>.
- Otto, A., & Scholl, A. (2011). Incorporating ergonomic risks into assembly line balancing. *European Journal of Operational Research* 212 (2), 277-86. Doi : <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2011.01.056>.
- Özgörmüş E. (2007). *Ergonomik Koşullar Altında Montaj Hattı Dengeleme*. (Yüksek Lisans Tezi). Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Pamukkale Üniversitesi, Denizli.

- Bautista, J., Alfaro-pozo, R. & Batalla, C. (2016). Advances in artificial hands. *The Sciences* 5 (10), 9-12.
- Rajabalipour, C., Haron, H., Kazemipour, F. & Desa, M. (2012). Accumulated risk of body postures in assembly line balancing problem and modeling through a multi-criteria fuzzy-genetic algorithm. *Computers and Industrial Engineering* 63 (2), 503-12. Doi : <http://dx.doi.org/10.1016/j.cie.2012.03.017>.
- Salveson, M. E. (1955). The assembly line balancing problem. *Journal of Industrial Engineering*, 6, 18-25.
- Schneider, E., & Irastorza, X. (2010). Work-Related Musculoskeletal Disorders in the EU. European Agency for Safety and Health at Work, Luxembourg: Publications Office of the European Union.
- Şahin, B. Kahya, E. (2018). Hedef programlama modeli ile ergonomik kısıtlar altında montaj hattı dengelemesi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, Özel Sayı: Ergonomi 2017 , 188-

196 . Doi : <http://dx.doi.org/10.21923/jesd.358709>.

- Takanokura, M., Tanaka, T., Watanebe I., Kakehi, I., Utsuki, H. & 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.
- Xu, Z., Jeonghan K., Cochran, D. & Jung, M. (2012). Design of assembly lines with the concurrent consideration of productivity and upper extremity musculoskeletal disorders using linear models. *Computers and Industrial Engineering* 62 (2), 431-441. Doi : <http://dx.doi.org/10.1016/j.cie.2011.10.008>.
- 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 and Operations Research* 118. Doi : <http://dx.doi.org/10.1016/j.cor.2020.104905>.