



ERGONOMİK RİSK KISITLARI ALTINDA YENİ BİR MONTAJ HATTI Dengeleme Modeli Geliştirilmesi

Emin KAHYA*¹, Büşra Nur ŞAHİN¹, Esra DAŞDELEN¹, Seda DOĞRU¹

¹ Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Eskişehir Türkiye

Anahtar Kelimeler

Montaj hattı dengeleme,
COMSOAL,
Çalışma duruşu,
Ergonomik Risk,
REBA.

Öz

Montaj hattı dengeleme probleminde, öncelik ilişkileri dikkate alınarak ve istasyonların gecikmeleri olabildiği ölçüde enazlayacak şekilde işlerin atanması amaçlanır. Ergonomik anlamda iyi tasarlanmamış montaj hatları, tehlikeli çalışma duruşlarının sergilenmesine yol açarak işçilerde mesleki kas-iskelet sistemi rahatsızlıklarının oluşmasına sebep olmaktadır. Bu tür problemleri önlemek için montaj hattını dengelerken her bir istasyonda gerçekleştirilen işlerde sergilenen çalışma duruşlarına ait risk seviyesinin de kabul edilebilir olması veya işçiler tarafından yapılan işlerin zorluk seviyelerinin de dengelenmesi gereklidir. Bu çalışmada, öncelik ilişkileri ve çevrim süresi kısıtına ilaveten çalışma duruşlarına ait risk düzeyini de dikkate alarak istasyon sayısını belirleyen yeni bir montaj hattı dengeleme modeli geliştirilmesi amaçlanmıştır. Önerilen modelde COMSOAL(Computer Method of Sequencing Operations for Assembly Lines) algoritması kullanılmıştır. Geliştirilen modelin sonuçlarının, COMSOAL kullanılarak gerçekleştirilen klasik montaj hattı dengeleme modelinin sonuçlarıyla karşılaştırılması için süre ve çalışma duruşu risk düzeyinin bileşkesinden oluşan yeni bir performans ölçütü önerilmiştir. Geliştirilen model, fırın üreten bir işletmenin montaj hattı için uygulanmıştır. Montaj hattında işlem süreleri ölçülmüş, öncelik ilişkileri çıkarılmış ve REBA (Rapid Entire Body Assessment) yöntemi ile ergonomik risk düzeyleri hesaplanmıştır. COMSOAL yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen klasik hat dengeleme sonucunda performans düzeyi %28.56 olarak bulunurken geliştirilen modelde %25.22 elde edilmiştir. Geliştirilen model performans düzeyinde %3,34' lük bir iyileştirme sağlamıştır.

DEVELOPMENT OF A NEW ASSEMBLY LINE BALANCE MODEL UNDER ERGONOMIC RISK CONSTRAINTS

Keywords

Assembly line balancing,
COMSOAL,
Working posture
Ergonomic risk,
REBA.

Abstract

It is intended to assign tasks in the assembly line balancing problem, taking into account the precedence constraints and minimizing to the delays of the stations as possible. Assembly lines which is not designed properly in an ergonomic way, lead to the display of dangerous work postures, resulting in Work-related Musculoskeletal Disorders (WSMD) on workers. To prevent such problems, it should aimed to catch acceptable level for all workstation's total risk score and assign ergonomic risks equivalently among workers. In this study, for assembly line balancing problem, a new model approach is tackled, which constitute stations by considering ergonomic risk levels in addition to cycle time and precedence constraints. In the proposed model, COMSOAL (Computer Method of Sequencing Operations for Assembly Lines) algorithm was used. In order to compare proposed model with classical assembly line balancing techniques, a performance criteria which is combination of cycle time and ergonomic risk level is defined. The developed model were applied in an oven factory assembly line. In the assembly line, task times were measured, precedence diagram was constructed and

*İlgili yazar / Corresponding author: ekahya@ogu.edu.tr, +90-222-239-3750-3300

ergonomic risk levels were evaluated by using REBA method. When balancing lines with using COMSOAL technique, performance level is %28,56 but when it comes to balance with developed model performance levels were obtained %25,22. eveloped model provides improvement in line's performance %3,34.

Alıntı / Cite

Kahya, E., Şahin, B.N., Daşdelen, E.,Doğru, S., (2018). Ergonomik Risk Kısıtları Altında Yeni Bir Montaj Hattı Dengeleme Modeli Geliştirilmesi, *Journal of Engineering Sciences and Design*, 6(ÖS: Ergonomi2017), 49–57

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

Emin Kahya, 0000-0001-9763-2714
Büşra Nur Şahin - 0000-0002-4963-5483
Esra Daşdelen -
Seda Doğru -

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	07.12.2018
Revizyon Tarihi / Revision Date	19.03.2018
Kabul Tarihi / Accepted Date	08.06.2018
Yayın Tarihi / Published Date	24.12.2018

1. Giriş

İş yükü ve işgücü kapasitesinin en iyi şekilde dengelenip, hem işçinin sağlığını koruyan, hem de üretimin artmasını sağlayan insan - makine - çevre sisteminin tasarlanması için biyolojik bilginin anatomi, fizyoloji ve deneysel psikoloji alanlarında uygulanmasına ergonomi denir. İşyeri ergonomisi; işe bağlı faktörler, bireysel faktörler ve psikososyal faktörlere dayanmaktadır İşe bağlı risk faktörleri; çalışma esnasındaki tekrarlayıcı hareketler, uygun olmayan duruşlar, ağır yük kaldırma ve işle ilgili eğitimin yetersizliği gibi faktörlerdir. Bireysel risk faktörleri; kişinin yaşı, cinsiyeti, kilosu ve fiziksel kapasitesi ile ilişkilidir. Psikososyal risk faktörleri ise takım çalışması eksikliği, sosyo-ekonomik seviye ve eğitim seviyesi gibi faktörlerdir (Bernard, 1997). İşyerindeki bu ergonomik riskler, işçinin hayat kalitesinin düşmesine, sağlığının zarar görmesine ve işletmelerde işgücü kayıpları ile birlikte verimlilik azalmasına neden olmaktadır.

Ayakta durma, eğilme, uzanma ve bu duruşlarda bir süre sabit olarak kalma kaslardaki kan akışını azaltmaktadır. Kan akışının azalmasıyla oksijensiz kalan bacak, sırt, bel, boyun ve kol kaslarında yorgunluk ve ağrı oluşabilmektedir. Dolayısıyla bir montaj masasında uzun süre benzer duruşlarda çalışmak zorunda kalan işçilerin yaşadığı yorgunluk ve ağrılar, daha sonra Kas İskelet Sistemi Rahatsızlıkları (KİSR) dönüşmektedir.

Üretimde montaj işlemleri, insan gücüne en fazla ihtiyaç duyulan faaliyetlerden biridir. Bu süreçte yapılan bazı işler, işçileri bedensel olarak zorlayan veya rahatsız eden duruşlar oluşturabilmektedir. Çalışma sırasında uzun süre ayakta kalma, çömelme, eğilme, uzanma veya dönme gibi durumlar montaj işlerinde gözlemlenen ve işçilerin sağlığını ve iş performansını olumsuz yönde etkileyen duruşlardır. Montaj hatlarında işler genelde monoton olduğundan ergonomik açıdan uygun olmayan bu çalışma duruşları gün boyu tekrarlanmaktadır.

KİSR en yüksek morbidite maliyetlerine neden olan hastalıkların başındadır. ABD’de KİSR işverenler tarafından ödenen yıllık tazminat maliyeti 15-20 milyar dolardır (OSHA, 2000). Bazı tahminlere göre, Avrupa’da yaklaşık 44 milyon işçi, mesleki KİSR maruz kalmaktadır (Nunes, 2009).

İşe bağlı KİSR şikâyetlerinin azaltılması için çalışma ortamlarında, uygun olmayan duruşların düzeltilmesi gerekmektedir. Ergonomik açıdan doğru ve uygun çözümler ile bel, boyun ve bacak gibi aktif kaslarda meydana gelen zorlanmaların azalması sağlanabilecektir.

Makalenin içeriği şu şekilde devam etmektedir: İkinci bölümde konu ile ilgili literatür araştırması, üçüncü bölümde montaj hatları ve ergonomik risk değerlendirme yöntemlerine genel bir bakış sunulmuştur. Dördüncü bölümde modelin geliştirilmesi ve performans ölçütlerinin tanımlanması ve 5. bölümde geliştirilen modelin gerçek bir problemde uygulaması ele alınmıştır. Son bölümde ise sonuç ve öneriler sunulmuştur.

2. Bilimsel Yazın Taraması

Literatür incelendiğinde montaj hattı dengeleme ile ilgili yapılan ilk çalışmalarda hat dengeleme ve ergonomik değerlendirmelerin birbirinden bağımsız olarak gerçekleştirildiği görülmektedir (Xu vd., 2012).

Tharmmaphornphilas ve Norman (2007) kaldırma işlemlerinde oluşan sırt ağrısını azaltmak için iş rotasyon çizelgelemesinde yeni bir sezgisel yöntem geliştirmişlerdir. Seçkiner ve Kurt (2007) işçilerin iş yükünü minimize etme amacıyla bir tavlama benzetimi yaklaşımı geliştirmişlerdir.

Otto ve Scholl (2011) yaygın ergonomik metodlara genel bir bakış sunmuşlardır. Ergonomik kısıtları içeren montaj hattı dengeleme problemine “ERGO-SALBP” (Ergonomic Simply Assembly Line Balancing Problem) adını vermişlerdir. Hesaplamalarında, ilk olarak ERGO-SALBP tip 1 için maksimum izin verilen ergonomik riskleri minimize etmek olarak oluşturulmuşlardır, ikinci olarak amaç fonksiyonunu

da ergonomik riskleri minimize etme denklemini eklemiştir. Ergonomik risk seviyesini montaj hattındaki ergonomik risk seviyesini belirlemek için; NIOSH (the National Institute for Occupational Safety and Health), OCRA (Occupational Repetitive Action) ve EAWS (European Assembly Worksheet) metodu olmak üzere üç farklı yöntem kullanmışlardır. Mutlu ve Özgörmüş (2012), hat dengelemesi yaparken, risk seviyesi, zorluk derecesi, monotonluk düzeyi gibi ergonomik faktörleri bulanık olarak ifade eden bir bulanık doğrusal programlama modeli geliştirmişlerdir.

Güner ve Hasgül (2012), U-tipi montaj hatları için, kirli el işi, temiz el işi gerektiren işleri ve yapılan görev süresince vücut konumunun sabit kaldığı işleri uyumsuz işlemler olarak düşünmüşler ve işlemler arasındaki uyumsuzluğa ve kullanılan enerji miktarına göre işçiler arasındaki performans faktörlerine dayanan yeni bir matematiksel model geliştirmişlerdir. Akyol ve Baykasoglu (2016), ergonomik risk faktörlerini dikkate alan ErgoALWABP (assembly line worker assignment and balancing problem which considers ergonomic risks) adını verdikleri yeni bir yöntem sunmuşlardır. Yazarlar çoklu-kural tabanlı, rassal yapısal bir arama algoritması oluşturmuşlar ve test etmişlerdir. Baykasoglu vd. (2017), montaj sistemlerinin tasarımı için, ergonomik riskleri dikkate alan ve üç alt problemden oluşan sistematik bir yaklaşım önermişlerdir. İlk iki alt problemde OCRA yöntemiyle değerlendirilen ergonomik riskler dikkate alınarak kural tabanlı arama algoritması oluşturulmuş ve sonra yerleşim problemi taşıma kısıtları altında çeşitli komşuluk yapıları araştırılarak çözülmüştür.

Birçok çalışma montaj hattı dengeleme çalışmalarına ergonomik uygulamaların dahil edilmesinin gereğini ve önemini göstermiştir. Emek yoğun montaj hatlarında, uzun süre, uygun olmayan postür ve tekrarlı hareketler ile yapılmasından dolayı işçilerde çeşitli meslek hastalıkları oluşur. Bu hastalıklar ergonomik risk faktörlerinin bilincinde olarak ve bu faktörlerin belirli bir seviyenin üstüne çıkmasına izin vermeyerek büyük ölçüde önlenmiş olur. Montaj hatlarını dengeleme aşamasında ergonomik risk seviyelerini hesaba katan çalışmalar ve uygulamalar oldukça azdır. Bu çalışmada, literatürden farklı olarak, klasik montaj hattı dengeleme yöntemlerine ergonomik risk faktörleri eklenerek, istasyonlardaki ergonomik risklerin kabul edilebilir seviyeye çekilebileceği gösterilmiştir.

3. Ergonomik Riskleri Dikkate Alan Montaj Hattı Dengeleme

Klasik montaj hattı dengeleme problemlerinde istasyon sayısının ve çevrim süresinin en küçüklenmesi amaçlanmakta ancak istasyonlara atanan işlerin hattaki ergonomik risk seviyesini

etkilediği göz ardı edilmektedir. Ayrıca, daha iyi ergonomik koşullar kusur oranını ve hastalıklar nedeniyle işe devamsızlığı azaltacağından (Eklund, 1995), ergonominin montaj hattı dengeleme ile birleştirilmesi üretimin kârlılığını arttırabilecektir. Montaj hatları, özellikle son montajın yapıldığı hatlar insan gücüne en fazla ihtiyaç duyulan aşamalardan olduğu için ergonomik uygulamalara yüksek önem verilmelidir. Bir istasyonda yapılan iki işlem arasında süre olarak bir fark olmasa da fiziksel zorlanma düzeylerinde farklılıklar olabilmektedir. Bir işlem süresi kısa olmasına rağmen zorlayıcı vücut duruşları gerektirebilmektedir. Bu nedenle montaj hattı dengelenirken yalnızca işlem sürelerini dikkate almak iş yükü açısından dengeli bir düzenleme oluşturmaz, işlemlerin ergonomik risk düzeyleri de dikkate alınmalıdır. Aksi takdirde en değerli kaynak olan işgücü etkin kullanılmaz ve uzun vadede verimlilik kaybı oluşur (Baykasoglu ve Akyol, 2014).

3.1. Montaj Hattı Dengeleme Problemi

Montaj Hattı Dengeleme Problemi (MHDP), bir ürünün gerekli montajı ya da demontajı için yapılacak işlemlerin hattı oluşturan iş istasyonlarına atanmasına odaklanır. Bu istasyonlar klasik olarak birbiri ardına sırayla dizilir ve devam eden parçaların sabit bir hızla hareketini sağlayan bir taşıma sistemi ile birbirine bağlanır. Böylece, her istasyon atanan görevi gerçekleştirmek için belirli bir zamana (çevrim zamanı, c) sahiptir.

Öncelik ilişkileri teknolojik ve yönetsel birtakım kısıtlar sonucu ortaya çıkar. Bir öncelik ilişkisinde A, deterministik sürelerle sahip işlemlerin kümesi olmak üzere, $(i,j) \in A$, i işleminin j işleminden önce yapılması gerekiyorsa, i j'nin öncülü olarak adlandırılır.

MHDP en temel ve klasik olanı, basit MHDP, tip-1 problemidir. Burada sabit bir çevrim zamanı altında istasyon sayısı en küçüklenmeye çalışılır (Scholl ve Becker, 2006). Basit MHDP iş parçalarının istasyonlar boyunca aktarıldığı düz bir montaj hattını ele alır. Her bir iş parçasının her bir istasyonda harcayacağı süre ancak çevrim zamanı kadardır. İşlerin atanmasında çevrim zamanına ve öncelik ilişkilerine önem verilmelidir.

MHDP ile ilgili olarak pek çok yöntem geliştirilmiştir. Bunlar problemin;

- En iyi çözümü bulan kesin yöntemler ve
- En yaklaşık çözümler veren sezgisel yöntemlerdir.

Kesin yöntemlerden; doğrusal programlama, 0-1 tamsayı programlama; sezgisel yöntemlerden ise en büyük aday yöntemi, COMSOAL, Kilbridge-Wester yöntemleri örnek verilebilir.

3.2. Çalışma Duruşu Değerlendirme Yöntemleri

Ergonomik risk seviyesi duruşsal risk düzeyinden önemli ölçüde etkilenmektedir.

KİSR riskini değerlendirmek için kullanılan yöntemler;

- ❖ Anket yöntemleri,
- ❖ Sistematik gözlemlere dayalı yöntemler ve
- ❖ Direkt ölçüm yöntemleri

olarak sınıflandırılabilir (Özel ve Çetik, 2010; Mert, 2014).

Anket Yöntemleri: KİSR riskinin değerlendirilmesi için kullanılan anketler ve kontrol listelerinden bazıları şu şekildedir:

- ❖ Standardize Edilmiş İskandinav KİS Anketi (Nordic Musculoskeletal Questionnaire - NMQ),
- ❖ Alman KİSR Anketi (Dutch Musculoskeletal Discomfort Questionnaire),
- ❖ Cornell Kas İskelet Rahatsızlık Anketi (Cornell Musculoskeletal Discomfort Questionnaire).
- ❖ Hissedilen çaba derecesine dayanan İsveç Mesleki Yorgunluk Envanteri (Swedish Occupational Fatigue Inventory, SOFI).

Bu yöntemlerin en büyük avantajı, maliyetinin düşük olması, etkili yöntemler olması ve büyük çaplı örneklere uygulanabilmesidir (Koç ve Testik, 2016). Ancak bu yöntemler ürettikleri sonuçlar açısından düşük geçerliliğe sahiptir.

Sistematik Gözlemlere Dayalı Yöntemler: KİSR riskinin nicel olarak değerlendirilebilmesi amacıyla kullanılan bu yöntemler de basit gözleme dayalı yöntemler ve gelişmiş gözleme dayalı yöntemler olarak ikiye ayrılabilir:

i. Basit Gözleme Dayalı Yöntemler

- ❖ Amerika Ulusal İş Güvenliği ve Sağlığı Enstitüsü Yük Kaldırma Endeksi (NIOSH Lifting Equation),
- ❖ Snook'un Tabloları (Snook Tables),
- ❖ El ile Taşıma Değerlendirme Çizelgeleri (Manual Handling Assessment Charts - MAC),
- ❖ Mital ve ark.'nın Tabloları
- ❖ Hızlı Üst Uzun Değerlendirmesi (Rapid Upper Limb Assessment - RULA),
- ❖ Zorlanma İndeksi (The Strain Index - SI).
- ❖ Kümülatif Travma Rahatsızlığı İndeksi (The Cumulative Trauma Disorder Risk Index - CTD RAM),
- ❖ Mesleki Tekrarlamalı Hareketler İndeksi (Occupational Repetitive Actions Index - OCRA),
- ❖ Hızlı Maruziyet Değerlendirme Yöntemi (Quick Exposure Check - QEC),
- ❖ Hızlı Tüm Vücut Değerlendirmesi (REBA),

- ❖ Ovako Çalışma Duruşları Analiz Sistemi (Ovako Working Posture Analyzing System - OWAS).

ii. Gelişmiş Gözleme Dayalı Yöntemler : Bu yöntemler bilgisayar destekli olup en sık kullanılanları Ergo-Man, Sammie Cad, Safework, Creo Manikin, 3DSSPP, Jack, RAMSIS Model, AnyBody Modelleme Sistemi, OpenSIM, HumanCAD, LifeMod olarak sayılabilir .

Direkt ölçüm yöntemleri: İnsan hareketlerini ve duruşlarının analizi için direkt ölçümlerde elektromiyografi (EMG), açölçer, biyomekanik analiz araçları ve optik araçlar kullanılmaktadır.

Direkt ölçüm yöntemleri, en doğru maruziyet seviyesini göstermektedir. Ancak diğer yöntemlerle kıyaslandığında maliyeti yüksektir. Büyük çaplı epidemiyolojik çalışmalarda çok geniş popülasyonda, önemli kaynaklar ve uzman gerektirdiğinden, bireysel maruziyet değerlendirmesi için uygun değildir (Özel ve Çetik, 2010).

Gözlemsel metotlar, uygulayıcılar tarafından hala en çok kullanılan yöntemlerdir. Alanda veritoplama söz konusu olduğunda kullanımı daha kolay, maliyeti daha düşük ve daha esnek metotlardır (David, 2005; Koç ve Testik, 2016).

Gözlemsel metotlar arasında en yaygın olarak kullanılanlardan birisi REBA'dır. REBA (Rapid Entire Body Assessment) yöntemi, Hignett ve McAtamney (2000) tarafından Nottingham'da geliştirilen, statik veya değişken tüm vücut hareketlerinin duruş analizinin yapılması için kullanılan gözleme dayalı bir yöntemdir. Tüm vücut hareketleri sırasında duruşların analiz edilerek puanlanmasını ve böylece elde edilen sayısal değerle mesleki açıdan risk yaratabilecek duruşların belirlenmesini sağlar. REBA için işler seçilirken çalışma sırasında çok sık tekrarlanan, fazla zaman alan, yüksek kuvvet veya kas faaliyeti gerektiren, işçiyi rahatsız eden, uygunsuz olarak tanımlanabilecek duruşlar ele alınmalıdır.

REBA yönteminin uygulanmasında ilk olarak gövde, boyun ve bacakların duruşu açısal olarak gözlemlenir ve puanlanır. Yönteme ait A tablosundan gövde, boyun ve bacakların duruş puanlarına yönelik bir skor elde edilir. Bu skora duruş sırasında uygulanan kuvvet veya taşınan yüke ilişkin puan eklenir. Böylece A skoru elde edilmiş olmaktadır. Diğer yandan üst kol, alt kol ve bileklerin duruşu analiz edilir ve puanlanır. A skoru ile benzer şekilde B tablosundan üst kol, alt kol ve bileklerin duruş puanları ile bir puan elde edilir ve bu puana kavramaya ilişkin puan eklenir, böylece B skoru hesaplanmaktadır. Tablo C'de, Tablo A'dan elde edilen kuvvet veya taşınan yüke ilişkin A skoru ve Tablo B'den elde edilen puan+kavrama puanı B skoru birleştirilerek C puanı elde edilmektedir.

4. Modelin Geliştirilmesi

MHDP' nde işler istenen üretim miktarını sağlayacak şekilde ve öncelik kısıtları altında istasyonlara dengeli olarak dağıtılır. İş yükünü istasyonlar arasında dengeli bir şekilde dağıtabilmek için yalnızca işlem sürelerini dikkate almak yeterli değildir, aynı zamanda işçiler tarafından maruz kalınan ergonomik risk seviyelerinin de istasyonlar arasında olabildiğince dengeli dağıtılması gerekmektedir. Aksi takdirde işçiler arası adaletsiz bir iş yükü dağılımı, aşırı yüklenmiş işçilerde KİSR ve verimlilik düşüşleri yaşanacaktır.

4.1. Modelin Temel Yapısı

Klasik MHDP, genel olarak, işleri istasyonlara dağıtırken problemin tipine göre ya iş istasyonu sayısı ya da çevrim süresi en küçüklenmeye çalışılır. Bu atamada iş yükünün dengeli dağıtılabilmesi için istasyonların toplam işlem süreleri olabildiğince birbirine yakın olmalıdır ki istasyonlara iş yükü dengeli dağılmış olsun. İstasyonlar arasındaki iş yükünü düzgün dağıtmak için yalnızca işlerin operasyon sürelerini dikkate almak yeterli değildir. Aynı zamanda işçilerin zorlanma derecelerini de mümkün olduğunca eşit tutmak gerekir.

Bu çalışmada, COMSOAL sezgisel metodu ile hat dengeleme yapıldıktan sonra istasyonların REBA skorları da modele eklenerek, tek modellenmiş düz montaj hatları için sezgisel bir algoritma geliştirilmiştir. Algoritmanın amacı hat dengelemeye ergonomik boyut kazandırmaktır.

Önerilen modelde öncelikle, COMSOAL metodu ile hat dengelemesi yapılır. Ergonomik risk seviyelerini dikkate alan MHDP'nin varsayımları:

- Montaj hattında tek bir ürünün montajı büyük miktarlarda gerçekleştirilmektedir.
- Problemin öncüllük ilişkileri bilinmektedir.
- Bir görev iki ya da daha fazla iş istasyonu arasında bölüştürülemez.
- Bir görev kendisinden önce gelen görevler (öncülleri) tamamlanmadan başlayamaz.
- Görev zamanları deterministiktir.
- Görevlerin zorluk dereceleri toplanabilmektedir.

Her bir işlem için belirlenen ergonomik risk düzeyleri ve COMSOAL ile tespit edilmiş istasyon sayısı dikkate alınarak ortalama risk düzeyi hesaplanır. İşlemlerin ayrı ayrı REBA değerleri toplanıp, COMSOAL yönteminden elde edilen istasyon sayısına bölünür. Ortalamanın \pm %10 toleransı alınarak her bir istasyon için kabul edilebilir maksimum ve minimum (REBA) risk düzeyi belirlenir.

REBA skoru üst sınırın üstünde olan istasyonlar tesbit edilir. Bu istasyonlar içinden REBA skoru en büyük olan istasyondan başlanarak çevrim süresi, öncüllük-ardıllık ilişkisi ve REBA skoru kısıtları altında bir

önceki ya da bir sonraki istasyonlara işlemlerin (REBA/Süre) oranı en yüksek olandan başlamak üzere ataması yapılır. Eğer bu atama sonuç vermiyorsa (REBA/Süre) oranı en büyük olan işlem, çevrim süresi ve REBA Skoru kısıtı dikkate alınmaksızın izleyen istasyona atanır. Atama sırasında öncüllük-ardıllık ilişkileri dikkate alınır.

Son istasyona gelindiğinde öncüllük-ardıllık, çevrim süresi ve REBA skoru koşulları tüm istasyonlarda sağlanıyorsa dengeleme tamamlanır. Sağlanmıyorsa hattın sonuna yeni bir istasyon açılır, koşulu sağlayan işler son istasyona atanır.

4.2. Performans Ölçütleri

Oluşturulan modelin başka yöntemlerle yerine elde edilen çözüm sonuçları ile karşılaştırılabilmesi için iki performans ölçütü tanımlanmıştır.

Birinci performans ölçütü; literatürde dengeleme gecikmesi olarak bilinen ve her istasyonun, mevcut çevrim süresinden sapmaları toplamının çevrim süresine bölümüyle hesaplanan ölçüttür.

İkinci performans ölçütü, atama sonrası istasyonların ergonomik risk düzeyleri arasındaki dengesizliğin bir ölçüsüdür, her bir istasyonun ergonomik risk değerinin ortalama değerden sapmalarının toplamının ortalama ergonomik risk düzeyine bölünmesiyle hesaplanır.

Hattın süre ve ergonomik risk düzeyi açısından performansı, iki ölçütün ortalaması alınarak hesaplanır. Bu değer mümkün olduğunca küçük olması istenir.

C: Hattın çevrim süresi (sn)

S_i : i. İstasyondaki işlemlerin standart süreleri toplamı (sn)

n: istasyon sayısı

ERD_{ort} : İstasyonların ortalama Ergonomik Risk Düzeyi

ERD_i : i. İstasyondaki işlemlerin Ergonomik Risk Düzeyleri toplamı

olmak üzere;

$$\text{Zaman performansı} = \frac{\sum |C - S_i|}{C \cdot n} \quad (1)$$

$$\text{Ergonomik Risk Düzeyi Performansı} = \frac{\sum |ERD_{ort} - ERD_i|}{n \cdot ERD_{ort}} \quad (2)$$

$$\text{Ortalama Performans} = (\text{Zaman Performansı}) \cdot 0,50 + (\text{ERD Performansı}) \cdot 0,50 \quad (3)$$

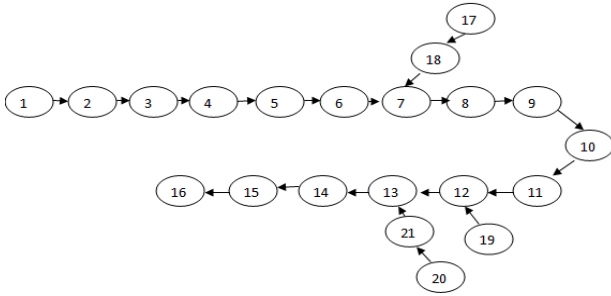
şeklinde hesaplanır.

5. Modelin Uygulanması

Bu bölümde geliştirilen modelin örnek bir montaj hattında uygulaması gösterilmiştir.

- Montaj hattı ergonomik faktörler dikkate alınmadan, istasyon sayısını en küçükleme amacı altında COMSOAL yöntemi ile dengelenmiştir.
- Her bir istasyon için belirlenen Maksimum REBA skoru ($REBA_{max}$) üst sınırından fazla olan istasyonlardaki bazı işlemler diğer istasyonlara aktarılmıştır.
- İki yöntemin performans ölçütleri karşılaştırılarak sağlanan iyileştirme tesbit edilmiştir.

Geliştirilen algoritma ATA Döküm A.Ş. 'de fırın montaj hattına uygulanmıştır. Ergonomik risk düzeylerinin belirlenmesi için REBA yöntemi seçilmiş ve her bir işlemin REBA yöntemiyle duruş analizi yapılmıştır. Şekil 1'de hatta ait öncelik diyagramı yer almaktadır. İşlemlerin süreleri ve REBA skorları Tablo 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Fırın Montaj Hattına Ait Öncelik Diyagramı

Tablo 1. Fırın Montaj Hattı Verileri

İşlem no	Standart süre (sn)	REBA skoru	REBA/Süre
1	221	3	0,014
2	78	10	0,128
3	48	6	0,125
4	65	8	0,122
5	48	6	0,125
6	54	6	0,111
7	98	11	0,112
8	42	4	0,095
9	216	9	0,041
10	54	9	0,170
11	72	7	0,096
12	125	5	0,040
13	90	6	0,066
14	42	7	0,170
15	30	7	0,233
16	196	8	0,041
17	51	3	0,059
18	199	4	0,020
19	68	4	0,058
20	32	3	0,094

21	232	10	0,043
----	-----	----	-------

21 adet işlemden oluşan fırın montaj hattının çevrim süresi 432 saniyedir ve işlemlerin REBA skorları 3-11 arasında değişmektedir.

COMSOAL sezgisel modeli kullanılarak hat dengeleme problemi için başlangıç çözüm bulunmuş ve Tablo 2'de verilmiştir. Ergonomik risk düzeti REBA yöntemiyle belirlendiği için, REBA Performansı hesaplanmıştır.

Tablo 2. COMSOAL ile İstasyon Bilgileri

İstasyon No	Birleştirilen İşlemler	Süre	REBA
1	1-2-17-19	418,8	20
2	3-4-5-6-18	415,2	30
3	7-8-9-10	410,4	33
4	11-12-20	229,8	15
5	13-14-15-21	394,2	30
6	16	196,2	8

Toplam REBA Skoru = 136

Ortalama REBA (ERD_{ort}) Skoru=22,67

olup, %10 tolerans ise,

$REBA_{min}$ = 20 olarak elde edilmiştir.

$REBA_{max}$ = 25 olarak elde edilmiştir.

elde edilir.

REBA Skoru 20'den küçük olan istasyonlar : {1,4,6}

REBA Skoru 25'den büyük olan istasyonlar : {2,3,5}

belirlenmiştir.

Başka bir ifade ile, 2, 3 ve 5. istasyonların, maksimum ergonomik risk seviyesini ($REBA=25$) aştığı ve zorlanma düzeyi açısından kabul edilemez olduğu görülmektedir.

Bu çözüm için performans ölçütleri;

$$Zaman\ Performansı = \frac{\sum |CS - S_i|}{CS * n}$$

$$Zaman\ Per. = \frac{(432-418,8)+(432-415,2)+\dots+(432-196,2)}{432*6}$$

$$Zaman\ Performansı = \%20,23$$

$$REBA\ Performansı = \frac{\sum |REBA_{ort} - REBA_i|}{REBA_{ort} * n}$$

$$REBA\ Performansı = \frac{|22,67-20|+|22,67-30|+|22,67-33|+\dots+|(22,67-8)|}{22,67*6}$$

$$REBA\ Performansı = \%36,76$$

$$Ortalama\ Performans = (Zaman\ performansı)*0,50 + (REBA\ performansı)*0,50$$

Ortalama Performans = $20,23 \cdot 0,50 + 36,76 \cdot 0,50 = \% 28,56$

Tablo-2’de başlangıç COMSOAL çözümünden hareketle, REBA skoru, REBA_{max} üzeri, en yüksek olan 3. istasyondur. Bu istasyondaki işlemler 7, 8, 9 ve 10’ dur. Bu işlemlerin (REBA/Süre) oranları; sırasıyla {0,112; 0,095; 0,041; 0,170} olup 10.işlem, oranı en büyük olan işlemdir. Öncüllük-ardılık ilişkisi kontrol edilerek 10. işlem 4.istasyona atanmıştır (Tablo-3).

Tablo 3. Üçüncü İstasyonun Düzenlenmesi

İstasyon No	Birleştirilen İşlemler	Süre	REBA
1	1-2-17-19	418,8	20
2	3-4-5-6-18	415,2	30
3	7-8-9- 10	356,4	24
4	10 -11-12-20	283,8	24
5	13-14-15-21	394,2	30
6	16	196,2	8

REBA skoru, REBA_{max} üzeri olan 5. istasyon (REBA=30) olup işlemler 13, 14, 15 ve 21 numaralı işlemlerdir. Bu işlemlerden (REBA/Süre) oranı en büyük (0,233) olan işlem ise 15 numaralı işlem olduğu için 6. istasyona aktarılmıştır (Tablo-4).

Tablo 4. Beşinci İstasyonun Düzenlenmesi

İstasyon No	Birleştirilen İşlemler	Süre	REBA
1	1-2-17-19	418,8	20
2	3-4-5-6-18	415,2	30
3	7-8-9	356,4	24
4	10-11-12-20	283,8	24
5	13-14- 15 -21	364,2	23
6	15 -16	226,2	15

REBA skoru, REBA_{max} üstünde olan 2. istasyondur. İşlemler 3, 4, 5, 6 ve 18. Bu işlemlerden (REBA/Süre) oranı en büyük olan 3 ve 5. işlemlerdir. Ancak;

- ❖ 5 nolu işlem öncüllük-ardılık ilişkisi gereği
- ❖ 3 numaralı işlem ise 1. istasyona atandığında çevrim süresi aşılacağı için

atanamaz. Tüm kısıtları sağladığı için, 6. işlem 3. istasyona atanmıştır (Tablo-5).

Tablo 5. İkinci İstasyonun Düzenlenmesi

İstasyon No	Birleştirilen İşlemler	Süre	REBA
1	1-2-17-19	418,8	20
2	3-4-5- 6 -18	361,2	24
3	6 -7-8-9	410,4	30
4	10-11-12-20	283,8	24
5	13-14-21	364,2	23
6	15-16	226,2	15

REBA skoru, REBA_{max} üzeri olan 3. istasyondur. İşlemler 6, 7, 8 ve 9’ dur. Bu işlemlerden (REBA/Süre) oranı en büyük olan işlem 7 numaralı işlemdir. Ancak öncüllük-ardılık ilişkisi gereği 6 numaralı işlem bir önceki 2. istasyona atanmadan 7 numaralı işlem atanamaz. Aynı şekilde 8 ve 9 numaralı işlemler atanmadan bir sonraki 4. istasyona atanamaz. Bu aşamada 9 numaralı işlem 4. istasyona atanır (Tablo-6).

Tablo 6. Üçüncü İstasyonun Düzenlenmesi

İstasyon No	Birleştirilen İşlemler	Süre	REBA
1	1-2-17-19	418,8	20
2	3-4-5-18	361,2	24
3	6-7-8- 9	200,4	21
4	9 -10-11-12-20	499,8	33
5	13-14-21	364,2	23
6	15-16	268,2	22

REBA skoru büyük olan 4. istasyondaki işlemler 9, 10, 11, 12 ve 20 numaralı işlemlerdir. Bu işlemlerden (REBA/Süre) oranı en büyük olan işlem 11 numaralı işlemdir, bu işlemler öncüllük-ardılık ilişkisi gereği atanamamıştır. Bu istasyonda, çevrim süresi sınırı aşıldığı için; hem 12 ve hem de 20 numaralı işlemler 5. istasyona atanmıştır. (Tablo-7).

Tablo 7. Dördüncü İstasyonun Düzenlenmesi

İstasyon No	Birleştirilen İşlemler	Süre	REBA
1	1-2-17-19	418,8	20
2	3-4-5-18	361,2	24
3	6-7-8	200,4	21
4	9-10-11- 12 -20	342,6	25
5	12 -13-14- 20 -21	521,4	31
6	15-16	226,2	15

REBA skoru üst limitin üstünde olan 5. istasyondaki işlemlerden (REBA/Süre) oranı en büyük olan 20. işlemdir. Ancak öncüllük-ardılık ilişkisi gereği atanamaz. Çevrim süresi kısıtı gereği 13 ve 14 numaralı işlemler 6. istasyona atanmıştır.

Tablo 8. Beşinci İstasyonun Düzenlenmesi

İstasyon No	Birleştirilen İşlemler	Süre	REBA
1	1-2-7-19	418,8	20
2	3-4-5-18	361,2	24
3	6-7-8	200,4	21
4	9-10-11	342,6	25
5	12- 13 - 14 -20-21	388,8	18
6	13 - 14 -15-16	358,8	28

Altıncı (son) istasyonun REBA skoru üst sınırın üzerinde olduğundan yeni bir istasyon açılır. Açılan

istasyona öncüllük-ardıllık ilişkisine dikkat edilerek 16 numaralı işlem atanır (Tablo-9).

Tablo 9. Yeni İstasyon Açılması

İstasyon No	Birleştirilen İşlemler	Süre	REBA
1	1-2-17-19	418,8	20
2	3-4-5-18	361,2	24
3	6-7-8	200,4	21
4	9-10-11	342,6	25
5	12-20-21	388,8	18
6	13-14-15-16	162,6	20
7	16	196,2	8

Önerilen modele göre hat dengelemenin performansı;

$$\text{Zaman performansı} = \frac{\sum |CS - S_i|}{CS - n}$$

Zaman

Performansı =

$$\frac{(432-418,8) + (432-361,2) + (432-200,4) + (432-342,6) + (432-388,8) + (432-162,6) + (432-196,2)}{432 \cdot 7}$$

Zaman performansı = %31,53

Ortalama REBA Skoru = $136/7 = 19,43$

$$\text{REBA Performansı} = \frac{\sum |REBA_{Ort} - REBA_i|}{REBA_{Ort} \cdot n}$$

$$\frac{|19,43-20| + |19,43-24| + |19,43-21| + |19,43-25| + |19,43-18| + |19,43-20| + |19,43-8|}{19,43 \cdot 7}$$

REBA Performansı = %18,90

Total Performance = (Zaman performansı) * 0,50 + (REBA performansı) * 0,50

Ortalama Performans = $31,53 \cdot 0,50 + 18,90 \cdot 0,50$

Ortalama Performans = % 25,22

6. Sonuçlar

Bu çalışmada, montaj hattı dengelemede öncelik ilişkileri ile çevrim süresi kısıtına ilaveten, ergonomik risk düzeyini de dikkate alarak dengeleme yapan bir model önerilmiştir. Önerilen modelin klasik montaj hattı dengeleme modeli ile karşılaştırılması amacıyla, süre ve ergonomik risk düzeyinin bileşkesinden oluşan performans ölçütü tanımlanmıştır. Geliştirilen model, bir işletmenin fırın montaj hattı için uygulanmıştır. Montaj hattında işlem süreleri ölçülmüş, öncelik ilişkileri çıkarılmış ve REBA yöntemi ile ergonomik risk düzeyleri hesaplanmıştır.

Geliştirilen modelin ve klasik COMSOAL yönteminin montaj hattında uygulanması ve belirlenen performans ölçütlerine göre karşılaştırılması yapılmıştır. İki modelin performans ölçütlerine göre karşılaştırması Tablo 10'da görüldüğü gibidir.

Tablo 10. Çözüm Sonuçlarının Karşılaştırılması

	COMSOAL çözüm	REBA kısıtlı çözüm
Zaman Performansı	%20,35	%31,53
REBA Performansı	%36,76	%18,90
Ortalama Performans	%28,56	%25,22

Çevrim sürelerinin ve REBA skorlarının sapmalarını hesaplamak amacıyla tanımlanan ölçütlerin değerlerine göre, ikinci modelde REBA kısıtları dikkate alındığında istasyonların doluluk oranları azalarak etkinlik açısından daha dengesiz hale gelmiştir. Ancak REBA risk skorlarının belirlenen risk seviyesinden sapma oranları %37'den %19'a ciddi oranda azalmıştır.

İstasyonların REBA skorları;

- ❖ İkinci istasyonda 30'dan 24'e
- ❖ Üçüncü istasyonda 33'den 21'e
- ❖ Beşinci istasyonda 30'dan 18'e

düşmüş ve yüksek riskli istasyon kalmamıştır.

7. Tartışma

Montaj hattı dengeleme probleminde, iş yükleri istasyonlara atanırken çalışma duruşundan kaynaklanan ergonomik risk seviyelerinin de dengelenmesi önemlidir. Aksi taktirde bazı istasyonlarda yapılan işler zorluk derecesi bakımından aşırı yüklenmeyi de beraberinde getirir.

Bu çalışmada beyaz eşya fabrikasında gerçek bir montaj hattı problemi modellenerek, çevrim süresi ve öncelik ilişkilerine ek olarak duruşsal riski dikkate alan bir model sunulmuştur. Geliştirilen model ile klasik dengeleme modelinin çözümlerini karşılaştırmak için çevrim zamanının ve ergonomik risk seviyesinin bileşkesi olan bir performans ölçütü tanımlanmıştır.

Ergonomik risk düzeyleri dikkate alındığında istasyonların risk düzeylerinin daha dengeli dağıldığı ve belirlenen risk seviyesinin aşılmadığı görülmüştür. Firmalar yoğun rekabet ortamında talebe hızlı bir şekilde cevap verebilmek için hattın mümkün olduğu kadar fazla üretim yapmasını isterler. Oysaki bu düşünce kısa vadeli bir düşüncedir. Uzun vadeli planlar yapan işletmeler, ergonomik koşullara önem vermeye mecburdurlar. Günümüzde yalnızca sayısal oranlardaki artış, üretkenlikte ya da verimlilikte artış anlamına gelmemektedir. Artık elindeki en değerli kaynak olan işgücünü etkin kullanabilmek önem kazanmıştır.

Bu nedenle, farklı ve fazla sayıda ergonomik faktörleri içeren kısıtların modellerde kullanılması için en iyi çözüme ulaşma süresi artacağından daha kısa sürede çözüm bulan sezgisel yaklaşımlar geliştirilmesine ihtiyaç vardır.

Gerçek hayat problemleri için işlemlerin çok daha fazla olması durumunda, büyük dengeleme problemleri için, sezgisel problem çözme yaklaşımları ve ergonomik risk düzeyleri birlikte kullanılarak çözüm etkinliği ve sonuçları daha da geliştirilebilir.

Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

Kaynaklar

Akyol, S. D., Baykasoglu, A., 2016. ErgoALWABP: A multiple-rule based constructive randomized search algorithm for solving assembly line worker assignment and balancing problem under ergonomic risk factors. *Journal of Intelligent Manufacturing*. doi:10.1007/s10845-016-1246-6

Baykasoglu, A., Tasan, S.O., Tasan, A.S., 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 & Service Industries*, 27(2), 96-115.

Baykasoglu, A., Akyol, S., 2014. Ergonomik Montaj Hattı Dengeleme. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 29(4), 785-792.

Bernard, B. P., 1997. Musculoskeletal disorders and workplace factors: A critical review of epidemiologic evidence for work-related musculoskeletal disorders of the neck, upper extremity and low back pain, U.S Department of Health and Human Services NIOSH Publication, 97-141.

David, G. C. 2005. Ergonomic methods for assessing exposure to risk factors for work-related musculoskeletal disorders. *Occupational Medicine*, 55, 190-199.

Eklund, J. A. E., 1995. Relationships between ergonomics and quality in assembly works. *Applied Ergonomics*, 26 (1), 15-20.

Güner, B., Hasgül, S. , 2012. Sürdürülebilir denge için ergonomik faktörleri içeren U-tipi montaj hattı dengelemesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 27(2), 407-415.

Hignett, S., Mc Atamney, L. 2000. Rapid entire body assessment (REBA). *Applied Ergonomics*, 31, 201-205.

Koç, S. , Testik, Ö.M. 2016. Mobilya Sektöründe Yaşanan Kas-İskelet Sistemi Risklerinin Farklı Değerlendirme Metotları İle İncelenmesi Ve Minimizasyonu. *Endüstri Mühendisliği Dergisi*, 27(2), 2-27.

Mert, E. A. 2014. Ergonomik risk değerlendirme yöntemlerinin karşılaştırılması ve bir çanta imalat atölyesinde uygulanması. *İş Sağlığı ve Güvenliği Uzmanlık Tezi*, T.C. Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı İş Sağlığı ve Güvenliği Genel Müdürlüğü, Ankara.

Mutlu, Ö., Özgörmüş, E. 2012. A fuzzy assembly line balancing problem with physical workload constraints. *International Journal of Production Research*, 50, 5281-5291.

Nunes, I. L. 2009. FAST ERGO_X – a tool for ergonomic auditing and work-related musculoskeletal disorders prevention. *Work: A Journal of Prevention, Assessment & Rehabilitation*, 34, 133-148.

OSHA, 2000. "Ergonomics: The Study of Work", *Occupational Safety and Health Administration* 3125, 1-14.

Otto, A., Scholl, A., 2011. Incorporating ergonomic risks into assembly line balancing. *European Journal of Operational Research*, 212, 277-285.

Özel, E., Çetink, O. 2010. Mesleki Görevlerin Ergonomik Analizinde Kullanılan Araçlar ve Bir Uygulama Örneği. *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 22, 41-56.

Scholl, A., Becker, C., 2006. State-of-the-art exact and heuristic solution procedures for simple assembly line balancing. *European Journal of Operational Research*, 168(3), 666-693.

Seçkiner, S. U., Kurt, M., 2007. A simulated annealing approach to the solution of job rotation scheduling problems. *Applied Mathematics and Computation*, 188, 31-45.

Tharmmaphornphilas, W., & Norman, B. A., 2007. A methodology to create robust job rotation schedules. *Annals of Operations Research*, 155, 339-360.

Xu, Z., Ko, J., Cochran, D. J., Jung, M., 2012. Design of assembly lines with the concurrent consideration of productivity and upper extremity musculoskeletal disorders using linear models. *Computers & Industrial Engineering*, 62, 431-441.