



HEDEF PROGRAMLAMA MODELİ İLE ERGONOMİK KISITLAR ALTINDA MONTAJ HATTI DENGELEMESİ

Büşra Nur ŞAHİN¹, Emin KAHYA^{*1}

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

Anahtar Kelimeler

Montaj hattı dengeleme,
Ergonomik Risk
Değerlendirmesi,
REBA,
Hedef Programlama

Öz

Montaj hattı dengeleme probleminde amaç, işlerin öncelik ilişkileri dikkate alınarak ve gecikmeleri olabildiği ölçüde enazlayacak şekilde istasyonlara atanmasıdır. Ergonomik tasarlanmamış iş istasyonları, hatalı çalışma duruşlarının sergilenmesine yol açarak işçilerde mesleki kas-iskelet sistemi rahatsızlıklarının oluşmasına sebep olmaktadır. Böyle olumsuzlukları önlemek için montaj hattını dengelerken her bir istasyonun risk seviyesinin kabul edilebilir seviyeye çekilmesi de amaçlanmalıdır. Bu çalışmada, bir beyaz eşya metal sanayi işletmesinde basit tek modellenmiş montaj hattı dengeleme problemi ergonomik risk etmenleri dikkate alınarak modellenmiştir. REBA yöntemi ile her bir iş elemanının zorluk dereceleri hesaplanmıştır. İstasyon sayısını ve iş yükünden sapmaları en azlayacak bir hedef programlama modeli geliştirilmiştir. Her bir istasyon için maksimum REBA skoru 10 olarak belirlenip, kısıt olarak modele eklenmiş ve GAMS paket programı ile model çözülmüştür. Çalışma sonucunda gerek ergonomik risk gerek ise istasyon sayısı bakımından daha dengeli bir montaj hattı oluşturulmuştur.

ASSEMBLY LINE BALANCING WITH A GOAL PROGRAMMING MODEL CONSIDERATION OF ERGONOMIC RISK LEVELS

Keywords

Assembly line balancing,
Ergonomic risk evaluation,
REBA,
Goal Programming

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 are not designed properly in an ergonomically, lead to the display of dangerous work postures, resulting in occupational 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, the ergonomic risk factors are taken to model in a simple single model assembly line balancing problem in a white goods metal industry operation. The risk scores of tasks are calculated with the REBA method. A goal programming model is developed to predict workload and number of workstation. For each workstation, maximum REBA score is determined as 10 and added to model as constraint. The model is solved with GAMS package program. In the result of study, more balanced line is obtained, in terms of station number and risk levels.

Alıntı / Cite

Şahin, B.N., Kahya, E. (2018). Hedef Programlama Modeli İle Ergonomik Kısıtlar Altında Montaj Hattı Dengelemesi, *Journal of Engineering Sciences and Design*, 6(ÖS: Ergonomi2017), 188 – 196

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

Emin Kahya, 0000-0001-9763-2714
Büşra Nur Şahin, 0000-0002-4963-5483

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	28.11.2018
Revizyon Tarihi / Revision Date	29.03.2018
Kabul Tarihi / Accepted Date	17.09.2018
Yayın Tarihi / Published Date	24.12.2018

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

1. Giriş

Ergonomi, insanı anatomik, fizyolojik, sosyolojik ve psikolojik anlamda inceleyen, iş yükünü en iyi şekilde dengeleyip, hem çalışanın sağlığını koruyan, hem de üretimin artmasını sağlayan, sonuçta işin insana, insanın işe uyumunu araştıran disiplinler arası bir bilim dalıdır. 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, fiziksel kapasitesi ile ilgili olmaktadır. Psikososyal risk faktörleri ise takım çalışması eksikliği, sosyo-ekonomik seviye ve eğitim seviyesi gibi faktörlerdir (Bernard, 1997). İşyerindeki bu ergonomik riskler, çalışanın hayat kalitesinin düşmesine, sağlığının zarar görmesine ve işletmelerde işgücü kayıpları ile birlikte verimlilik düşüşlerine neden olmaktadır.

Kanada’ da yapılan bir çalışmada, KİS rahatsızlıklarının kardiyovasküler hastalıklardan sonra gelen en maliyetli ikinci hastalıklar olduğu görülmüştür (Santé Canada, 2002). Dünya Sağlık Örgütü’ ne göre KİS rahatsızlıkları gelişmiş ülkelerde, işyerlerinde sakatlığın başta gelen nedenidir (WHO, 2003).

2008 yılında, ABD’ de meydana gelen 315,000 iş ile ilgili KİS rahatsızlıkları boyunca işten uzakta kalmayı gerektiren iş süresi ortalama 10 gün olarak rapor edilmiştir (Bureau of Labor Statistics, 2009).

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

Üretimde montaj işlemleri, insan gücüne en fazla ihtiyaç duyulan aşamalardan biridir. Bu aşamada yapılan bazı işler, çalışanları 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 çalışanların sağlığını ve iş performansını olumsuz yönde etkileyen duruşlardır. Montaj hatlarında işler genelde monoton olduğundan ergonomik açıdan uygun olmayan bu çalışma duruşları gün içinde tekrarlanmaktadır.

Ayakta durma, eğilme, uzanma ve bu duruşlarda bir süre sabit olarak kalma kaslarda 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 durumlarda

çalışmak zorunda kalan çalışanların yaşadığı yorgunluk ve ağrılar, daha sonra kas iskelet sistemi rahatsızlıklarına dönüşmektedir.

İşe bağlı kas iskelet sistemi rahatsızlığı şikâyetlerinin azaltılması için hastane servislerinde uygun olmayan duruşların düzeltilmesi gerekmektedir. Ergonomik açıdan doğru ve uygun çözümler ile bel, boyun ve bacak gibi aktif kaslarda meydana gelen zorlanmaların azalması sağlanmaktadır.

Makalenin içeriği şu şekilde devam etmektedir: ikinci bölümde bilimsel yayın taraması, üçüncü bölümde montaj hatları ve ergonomik risk değerlendirme yöntemlerine genel bir bakış sunulmuştur. Dördüncü bölümde matematiksel modelin geliştirilmesi ve performans ölçütlerinin tanımlanması ve 5. bölümde geliştirilen modelin gerçek bir problemde uygulaması yapılmıştır. Son bölümlerde de sonuç ve öneriler ile makale tamamlanmıştır.

2. Bilimsel Yayın Taraması

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

Seçkiner ve Kurt(2007) operatörlerin iş yükünü minimize etme amacı altında bir tavlama benzetimi yaklaşımı geliştirmişlerdir.

Otto ve Scholl (2011) yaygın ergonomik metodlara genel bir bakış sunmuşlardır. Ergonomik kısıtları ve amaçları içeren montaj hattı dengeleme problemine ERGO-SALBP (Ergonomic Simply Assembly Line Balancing Problem) adını vermişlerdir. Hesaplamalarında, Otto ve Scholl (2011) ilk olarak ERGO-SALBP tip 1 için maksimum izin verilen ergonomik seviyeyi bir kısıt olarak eklemişlerdir, ikinci olarak amaç fonksiyonuna ergonomik riskleri minimize etme denklemini eklemişlerdir. Ergonomik risk seviyesini montaj hattına üç farklı metod ile entegre etmişlerdir: NIOSH denklemi, OCRA metodu ve EAWS metodu. Mutlu ve Özgörmüş (2012), 1. tip basit montaj hat dengeleme probleminde, hem amaç fonksiyonunu hem de risk derecesi, zorluk derecesi, monotonluk düzeyi gibi ergonomik faktörleri bulanıklaştırarak bir bulanık doğrusal programlama modeli geliştirmişlerdir.

Güner ve Hasgöl (2012), U-tipi montaj hatları için, kirli el işi ve 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 adını verdikleri yeni bir yöntem sunmuşlardır. Yazarlar çoklu-kural tabanlı, rassal yapısal bir arama

algoritması oluşturmuşlar ve test etmişlerdir. Baykasoglu vd. (2016), 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 oluşturulur ve sonra yerleşim problemi taşıma kısıtları altında çeşitli komşuluk yapıları araştırılarak çözülmüştür.

Kara vd. (2014), fizyolojik zorlanma, fiziksel zorlanma, çalışan becerileri, çoklu operatör, ekipman, çalışma duruşları ve aydınlatma seviyesini kısıt olarak alan maliyet tabanlı yeni bir model önermişlerdir.

Cheshmehgaz vd. (2012) işçinin çalışma duruşundan kaynaklanan risk seviyesini belirleyen ARP(Accumulated Risk of Postures) adını verdikleri yeni bir parametre geliştirmişlerdir. Bu parametreyi belirlerken OWAS yöntemi kullanarak formüle etmişler ve işçinin maruz kaldığı, yüksek risk içeren monoton duruşları saptamak istemişlerdir. Daha sonra bir bulanık hedef programlama modeli önermişler ve çevrim zamanını ve toplam fiziksel iş yükünü bulanıklaştırarak genetik algoritma sezgiseli ile bir örnek problem üzerinde çözüme ulaşmışlardır.

Polat vd. (2018) , 2. tip basit montaj hatlarında ergonomik kısıtlar altında bir dengeleme modeli oluşturmuştur. İstasyonlardaki fiziksel iş yükünü hesaplamak için REBA yönteminden faydalanmışlar. REBA değerlerini kullanarak her istasyon için maksimum iş yükünü aşmayacak şekilde kısıt oluşturmuşlar ve çevrim zamanının yanında ikinci bir hedef olarak modele eklemişlerdir. Önerilen model üretilen bir test örneğinde çözülmüştür.

Birçok çalışma montaj hattı dengeleme hesaplamalarına ergonomik risk düzeylerinin de dahil edilmesinin önemini vurgulamaktadır. Montaj hatlarını dengeleme aşamasında ergonomik risk seviyelerini hesaba katan çalışmalar ve uygulamalar oldukça azdır. Bu çalışmada basit montaj hattı dengelemede kullanılan bir matematiksel modele ergonomik risk düzeyinin bir göstergesi olarak hesaplanan REBA düzeyleri eklenerek, hatta ve işçilerin maruz kaldığı duruşsal risk düzeyindeki değişimler gösterilmiştir.

3. Ergonomik Riskleri Dikkate Alan Montaj Hattı Dengeleme

Çevrim süresi, istasyon sayısı gibi işletmenin karına doğrudan etki eden ölçütleri aynı tutarak, işlemlerin istasyonlara farklı şekillerde atanması montaj hattındaki ergonomik risk seviyesini büyük ölçüde etkiler. Daha iyi ergonomik koşullar işlemlerdeki kusur oranını ve hastalıklar nedeniyle işe devamsızlığı azaltacağından (Eklund, 1995), ergonominin montaj hattı dengeleme ile birleştirilmesi üretimin karlılığını arttıracaktır. Montaj hatları, özellikle son montajın yapıldığı hatlar insan gücüne en fazla ihtiyaç duyulan

aşamalardan olduğu için ergonomik uygulamalara önem verilmelidir. Bir istasyonda yapılan iki farklı işlem arasında işlem süresi olarak bir fark olmasa da işlemlerin gerektirdiği fiziksel zorlanma düzeylerinde farklılıklar ve sapmalar olabilmektedir. Bu nedenle montaj hattı dengelenirken yalnızca işlem sürelerini dikkate almak iş yükü açısından dengeli bir düzenleme oluşturmaz, işlemlerin risk düzeyleri de dikkate alınmalıdır. Böylece en değerli kaynak olan işgücü etkin kullanılarak, uzun vadede üretkenlik ve verimlilik artacaktır.

3.1. Montaj Hattı Dengeleme Problemi

Problem, bir ürünün gerekli montajı 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 atan görevi gerçekleştirmek için belirli bir zamana (çevrim zamanı, c) sahiptir.

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 zaman ancak çevrim zamanı kadardır. İşlerin atanmasında çevrim zamanına ve öncelik ilişkilerine önem verilmelidir.

MHDP ilgili olarak pek çok yöntem geliştirilmiştir. Bunlar kesin yöntemler dediğimiz problemin en iyi çözümünü bulan yöntemler ve (en yaklaşık) çözümler veren sezgisel yöntemlerdir. Kesin yöntemlerden: doğrusal programlama, 0-1 tamsayılı programlama; sezgisel yöntemlerden ise en büyük aday yöntemi, COMSOAL, Kilbridge-Wester yöntemleri örnek verilebilir.

Bu çözüm yöntemlerinin amacı; belli bir performans ölçüsünü eniyileyecek şekilde hattın dengelenmesi ve taleplerin karşılanmasıdır.

3.2. Fiziksel Ergonomik Risk Değerlendirme Yöntemleri

Fiziksel ergonomik risk seviyesi, ağır yükleri kaldırma, uygun olmayan duruşlar, uzun süreli oturma ya da ayakta kalma, tekrarlı hareketler, titreşim; sıcaklık, nem, gürültü, aydınlatma gibi çevresel faktörler gibi maruz kalınan fiziksel iş yükü faktörlerinin; yoğunluk, frekans, süresine bağlıdır. Bu faktörleri değerlendirmenin amacı işyerindeki riskleri saptamak ve ölçmektir.

KİSR riskini değerlendirmek için kullanılan yöntemler;

- ❖ Kişisel anket yöntemleri,
- ❖ Sistematik gözlemlere dayalı yöntemler ve
- ❖ Direkt ölçüm yöntemleri

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

Kişisel Anket Yöntemleri: KİSR riskinin değerlendirilmesi için kullanılan öznel 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 maruziyet seviyesi ve değişimi ile ilgili olarak düşük geçerliliğe sahiptir.

Sistemik 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 Tabloları (Snook Tables),
- ❖ El ile Taşıma Değerlendirme Çizelgeleri (Manual Handling Assessment Charts - MAC),
- ❖ Mital ve ark. 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 sayılabilir.

Gözlemsel metotlar, uygulayıcılar tarafından hala en çok kullanılan yöntemlerdir. Alanda veri toplamak istendiğinde, diğer yöntemlere göre kullanımı daha

kolay, maliyeti daha düşük ve daha esnek metotlardır (David, 2005; Koç ve Testik, 2016).

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 seviyesi 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).

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, çalışanı rahatsız eden, uygunsuz olarak tanımlanabilecek ve iyileştirilebilecek 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 puanları ile 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.

4. Modelin Geliştirilmesi

Montaj hattı dengeleme problemlerinde, 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 risk seviyelerinin de istasyonlar arasında olabildiğince dengeli dağıtılması gerekmektedir. Aksi takdirde işçiler arası adaletsiz bir iş yükü dağılımı, aşırı yüklenmiş işçilerde KİS rahatsızlıkları ve verimlilik düşüşleri olacaktır.

4.1. Modelin Temel Yapısı

Bu çalışmada istasyonların ergonomik çalışma ortamı açısından kabul edilebilir risk düzeyinde olmasını ve

riskin dengeli dağıtılmasını sağlayacak bir yöntemin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla istasyon sayısını en azlama amacı altında Patterson ve Albracht'ın matematiksel modeli gibi literatürde sıkça kullanılan bir modelde ergonomik risk düzeyini göz önüne alan bir model geliştirilmiş ve bir beyaz eşya üretimi yapılan işletmedeki fırın montaj hattında uygulanmıştır.

Her bir işlem için belirlenen ergonomik risk düzeyleri ve belirlenen istasyon sayısı (teorik minimum istasyon sayısı hesabı ile belirlenebilir) dikkate alınarak ortalama risk düzeyi hesaplanır. Ortalamanın \pm %10 toleransı alınarak her bir istasyon için kabul edilebilir maksimum ve minimum risk düzeyi belirlenir. Böylece montaj hattı dengelenirken öncelik ilişkileri, çevrim süresi ve istasyonların ergonomik risk düzeyleri ile birlikte dikkate alınır.

Model oluşturulmadan önce bir işlemin atanabileceği en erken ve en geç istasyonlar Denklem [1] ve [2] verildiği gibi hesaplanır.

$$E_i = \left(\frac{t_i + \sum_{a \in P_i} t_a}{c} \right)^+ \quad (1)$$

$$L_i = M_{\max} + 1 - \left(\frac{t_i + \sum_{a \in S_i} t_a}{c} \right)^+ \quad (2)$$

İlk aşamada ergonomik risk düzeyi dikkate alınmadan, istasyon sayısını en azlama amacı altında aşağıdaki model oluşturulur:

Karar Değişkenleri :

X_{ij} : i görevi j istasyonuna atanmışsa 1; atanmamışsa 0.

Z_j : j istasyonuna görev atanmışsa 1; atanmamışsa 0.

Parametreler:

C: Çevrim zamanı

t_i : i. Görevin işlem süresi

M_{\max} : Maksimum istasyon sayısı.

W_j : j. İstasyona atanabilecek görevler kümesi

$||W_j||$: W_j kümesinin eleman sayısı

P_i : i görevinin öncüllerinin kümesi

S_i : i görevinin ardıllarının kümesi

Amaç Fonksiyonu : Min Z_j

Kısıtlar:

$$\sum_{i \in W_j} X_{ij} - ||W_j|| Z_j \leq 0 \quad (3)$$

$$\sum_{i \in W_j} X_{ij} t_i \leq C \quad j=1,2,\dots,m_{\max} \quad (4)$$

$$\sum_{j \in E_i}^{L_i} X_{ij} = 1 \quad i=1,2,\dots,n \quad (5)$$

$$\sum_{j \in E_a}^{L_a} X_{aj} - \sum_{j \in E_b}^{L_b} X_{bj} \leq 0 \quad (6)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad (7)$$

İşlemlerin ve istasyonların ergonomik risk düzeyi REBA yöntemiyle hesaplanmış ve modele kısıt olarak eklenmiştir, amaç fonksiyonu da hedeflenen risk düzeyinin aşılmaması için bu değerlerden sapmanın en azlanacağı biçimde değiştirilmiştir.

Karar Değişkenleri :

X_{ij} : i görevi j istasyonuna atanmışsa 1; atanmamışsa 0.

Z_k : k istasyonuna görev atanmışsa 1; atanmamışsa 0.

Parametreler:

C: Çevrim zamanı

t_i : i. Görevin işlem süresi

r_i : i. Görevin reba skoru

M_{\max} : Maksimum istasyon sayısı.

W_j : j. İstasyona atanabilecek görevler kümesi

$||W_j||$: W_j kümesinin eleman sayısı

P_i : i görevinin öncüllerinin kümesi

S_i : i görevinin ardıllarının kümesi

R: İstasyonda izin verilen maksimum iş yükü

r_{j+} : Reba limitinin üstünde kalan pozitif sapma miktarı

r_{j-} : j. İstasyon için reba limitinin altında kalan negatif sapma miktarı

Amaç Fonksiyonu :

$$\text{Min } \sum_{j=1} Z_j + r_j \quad (8)$$

Kısıtlar:

$$\sum_{i \in W_j} X_{ij} - ||W_j|| Z_j \leq 0 \quad (9)$$

$$\sum_{i \in W_j} X_{ij} t_i \leq C \quad j=1,2,\dots,m_{\max} \quad (10)$$

$$\sum_{j \in E_i}^{L_i} X_{ij} = 1 \quad i=1,2,\dots,n \quad (11)$$

$$\sum_{j \in E_a}^{L_a} X_{aj} - \sum_{j \in E_b}^{L_b} X_{bj} \leq 0 \quad (12)$$

$$\sum_{i \in W_i} r_i X_{ij} + r_j^- - r_j^+ = R \quad \forall_j \quad (13)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, r^+, r_j^- \geq 0 \quad (14)$$

Ergonomik faktörleri dikkate alan MHDP'nin kısıtları:

- ❖ Atama kısıtı
- ❖ Çevrim zamanı kısıtı
- ❖ Öncelik ilişkileri kısıtı
- ❖ İstasyon kısıtı
- ❖ Zorluk derecesi kısıtı (REBA)

Ergonomik faktörleri dikkate alan MHDP'nin varsayımları:

- ❖ Bir görev iki ya da daha fazla iş istasyonu arasında bölüştürülemez.
- ❖ Bir görev kendisinden önce gelen görevler (öncülleri) tamamlanmadan başlayamaz.
- ❖ Görev zamanları deterministiktir.
- ❖ Görevlerin zorlanma düzeyleri toplanabilmektedir.

4.2. Performans Kriterleri

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

İlk kriter; literatürde dengeleme gecikmesi olarak kullanılır ve her istasyonun, mevcut çevrim süresinden sapmaları toplamının çevrim süresine bölümüyle hesaplanır.

İkinci kriter, atama sonrası istasyonların ergonomik risk düzeyleri arasındaki dengesizliğin bir ölçüsüdür ve her bir istasyonun ergonomik risk değerinin ortalama değerden sapmalarının toplamının ortalama ergonomik risk düzeyine bölünmesiyle bulunur.

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

CS: Hattın çevrim süresi (sn)

S_i : i. İstasyonun standart süresi (sn)

n: istasyon sayısı

ERD_{ort} : istasyonların ortalama Ergonomik Risk Düzeyi

ERD_i : i. istasyonun Ergonomik Risk Düzeyi

olmak üzere;

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

$$\text{Ergonomik Risk Düzeyi performansı} = \frac{\sum |ERD_{ort} - ERD_i|}{n * ERD_{ort}}$$

$$\text{Toplam performans} = (\text{Zaman Performansı}) * 0,50 + (\text{ERD Performansı}) * 0,50$$

5. Modelin Uygulanması

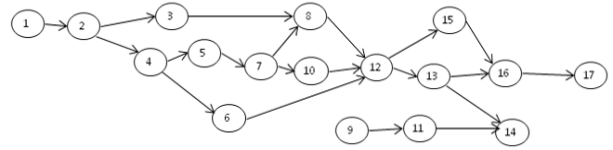
Bu bölümde geliştirilen modelin bir montaj hattında uygulaması açıklanmıştır. Montaj hattı ilk olarak ergonomik faktörler dikkate alınmadan, istasyon sayısını en azlama amacı altında Patterson ve Albracht'ın modeli temel alınarak dengelenmiştir.

Daha sonra aynı modele her bir istasyon için belirlenen REBA üst sınırından pozitif ve negatif sapmaların en azlanacağı kısıtlar eklenerek, amaç fonksiyonu da hedef programlamaya göre revize edilmiştir.

İki çözümün performans ölçütleri karşılaştırılmıştır.

5.1. Fırın Montaj Hattı

Model maksî fırınların son montaj işlemlerinin yapıldığı işletme'de bir hatta uygulanmıştır. Ergonomik risk düzeylerinin belirlenmesi için REBA yöntemi seçilmiş ve her bir işlemin REBA yöntemiyle analiz 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

No	İşlem	Süre(sn)	Reba Skoru
1	Motor Takma	36	4
2	Kazan Toplama	135	4
3	Kazana İzocam sarma	89	3
4	Panelin iç kazana montajı	49	3
5	Cam contasını sıkma	17	1
6	Paneldeki kabloları iç kazana bağlama	17	1
7	Cam menteşesinin iç kazana montajı	61	4
8	Cam kapağına yay takma	12	2
9	Gösterge düğmelerini takma	84	2
10	Dış kablolarını iç kazana bağlama	31	2
11	Gösterge düğmelerini kontrol	23	6
12	Gövdeyi iç kazana geçirme	63	5
13	Ayaklıkların gövdeye montajı	26	7
14	Dış alt sacdaki besleme kablosunun iç kazana montajı	25	1
15	Arkalık montaj	163	3
16	Kalite kontrol	30	1
17	Paketleme	157	6

17 adet işlemden oluşan fırın montaj hattının çevrim süresi 192 saniyedir, işlemlerin REBA skorları 1-7 arasında değişmektedir.

Montaj hattındaki işlemleri, her istasyona çevrim süresini tümüyle dolduracak biçimde atanıldığı düşünülürse gerekli iş istasyonu sayısı:

$$K_{\min} = \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{C} = \frac{1018}{192} = 5,33 \approx 6$$

Toplam REBA skoru=60

Ortalama REBA skoru=60/6=10

Bu değerler istasyon ve REBA kısıtı olarak modele eklenmiştir. GAMS paket programı yardımıyla çözülmüştür.

İlk olarak işlemlerin REBA skorları dikkate alınmadan yani zorluk derecesi kısıtı çıkarılarak ve amaç fonksiyonu istasyon sayısını en küçükleyecek şekilde alınarak (Min(Z₁ +Z₂ + Z₃+ Z₄+ Z₅+ Z₆)) montaj hattı dengeleme yapılmış ve sonuçlar Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. REBA Kısıtsız Çözüm

İstasyon No	İşlem	REBA Skoru	İstasyon Zamanı
1	1,2	8	171
2	3, 4, 5	7	155
3	6, 7, 8, 10, 12	14	184
4	15	3	163
5	9, 11, 13, 16	16	163
6	14, 17	7	182

Çözüm incelendiğinde elde edilen istasyon sayısı minimum istasyon sayısına eşit bulunmuştur ve çevrim süresi sağlanmıştır, ancak 3. ve 5. istasyonların belirlenen ergonomik risk seviyesini aştığı ve ergonomik anlamda kabul edilemez olduğu görülmektedir. Bu çözüm için tanımlanan performans ölçütleri aşağıdaki gibi hesaplanır:

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

$$Zaman\ Per. = \frac{|171-192|+|155-192|+|184-192|+|163-192|+|182-192|}{192*6}$$

Zaman Performansı = %11,63

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

$$REBA\ Per. = \frac{|8-10|+|14-10|+|7-10|+|3-10|+|16-10|+|7-10|}{10*6}$$

REBA Performansı = %41,6

Toplam Performans = (Zaman performansı)* 0,50+(ERD performansı)*0,50

Toplam Performans = 11,63*0,50 + 41,6* 0,50 = % 26,6

Aynı modele her bir istasyon için belirlenen REBA üst sınırında negatif sapmaların en azlanacağı zorluk

derecesi kısıtları eklenerek amaç fonksiyonu da hedef programlamaya göre revize edilmiş ve sonuçlar Tablo 3’te verilmiştir.

Tablo 3. Zorluk derecesi kısıtlarıyla çözüm

İş,İ	İşlem	REBA Skoru	İstasyon Zamanı
1	1,2	8	171
2	4, 5, 6, 7	9	175
3	3, 8, 12	10	164
4	13, 15	10	164
5	16, 17	7	187
6	9, 11, 14	9	132

Çözüm incelendiğinde istasyon sayısında ve çevrim zamanında bir artış olmadığı ancak tüm istasyonların risk seviyelerinin kabul edilebilir seviyeye çekildiği görülmektedir. Bu çözüm için performans ölçütleri:

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

$$Zaman\ Per. = \frac{|171-192|+|175-192|+|164-192|+|164-192|+|187-192|+|132-192|}{192*6}$$

Zaman Performansı = %13,8

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

$$REBA\ Per. = \frac{|8-10|+|9-10|+|10-10|+|10-10|+|7-10|+|9-10|}{10*6}$$

REBA Performansı = %11,6

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

Toplam Performans = 13,8*0,50 + 11,6* 0,50 = % 12,7

İki çözümün hesaplanan performans ölçüm karşılaştırması Tablo 4’te verilmiştir.

Tablo 4. Çözüm Sonuçlarının Karşılaştırılması

	REBA kısıtsız çözüm	REBA kısıtlı çözüm
Zaman Performansı	11,63%	13,8%
REBA Performansı	41,6%	11,6%
Toplam Performans	26,6%	12,7%

Çevrim sürelerinin ve REBA skorlarının sapmalarını hesaplamak amacıyla tanımlanan ölçütlerin değerlerine göre;

2. modelde REBA kısıtları dikkate alındığında istasyonların doluluk oranları %2,2 oranında azalarak etkinlik açısından daha dengesiz hale gelmiştir.

Ancak REBA risk skorlarının belirlenen risk seviyesinden sapma oranları % 41,6' dan %11,6' ya ciddi oranda azaltılmıştır. 3. İstasyonun toplam REBA skoru ilk çözümde 14 iken, ergonomik kısıtlar dikkate alındığında 10' a düşmüştür. 6. İstasyonun REBA skoru ise 16' dan 7' ye düşmüştür. Ergonomik risk taşıyan istasyon kalmamıştır.

6. Sonuçlar

Bu çalışmada, montaj hattı dengelemede, öncelik ilişkileri ile çevrim süresi kısıtına ek olarak, ergonomik risk düzeyini de dikkate alarak dengeleme yapan bir matematiksel model geliştirilmesi ele alınmıştır. Önerilen modelin klasik montaj hattı dengeleme matematiksel 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 matematiksel modelin montaj hattında uygulanması ve belirlenen performans ölçütlerine göre karşılaştırılması yapılmıştır. Buna göre; REBA kısıtları dikkate alındığında dengeleme gecikmesi %11,63'den %13,8'e çıkararak istasyonların daha boş kaldığı görülmektedir. Ancak REBA risk skorlarının belirlenen risk seviyesinden sapma oranları % 41,6'den %11,6' ya düşerek büyük oranda azaltılmış ve maksimum risk seviyesinin üstünde olan bir istasyon kalmamıştır.

Ergonomik risk düzeyleri dikkate alındığında istasyonların risk düzeylerinin daha dengeli dağıtıldığı ve belirlenen risk seviyesinin aşılmadığı görülmüştür.. Geliştirilen yöntem ile bir hat dengeleme yöntemine ergonomik koşullar da eklenerek uygulaması yapılmış ve ergonomik iyileştirme anlamında istenen sonuçlar elde edilmiştir.

7. Sonuç ve Öneriler

Montaj hattı dengeleme probleminde, iş yükleri istasyonlara atanırken duruştan kaynaklanan ergonomik risk seviyelerinin de düzgün atanması önemlidir. Aksi takdirde, bazı istasyonlar, ergonomik risk faktörlerinin artmasına neden olan zorluk derecesi bakımından aşırı yüklenir.

Bu çalışmada beyaz eşya fabrikasında gerçek bir montaj hattı problemi modellenerek, çevrim süresi ve öncelik ilişkilerine ek olarak risk faktörlerini de içeren matematiksel bir çözüm sunulmuştur. Ayrıca, geliştirilen model ile klasik dengeleme modelinin çözümlerini karşılaştırmak için çevrim zamanının ve ergonomik risk seviyesinin bileşkesi olan bir performans ölçütü tanımlanmıştır.

Firmalar rekabet ortamında hızlı bir şekilde talepleri karşılamak için hattın en yüksek verimde çalışıp en fazla üretimi yapmasını isterler ve sadece işlem sürelerini dikkate alarak düzenlemeler yaparlar. Oysaki bu kısa vadeli bir düşüncedir, ergonomik risklere de önem verilmeli, çalışma ortamında işçilerin ve her problemde göz önünde bulundurulmalıdır. Artık elindeki en değerli kaynak olan işgücünü etkin kullanabilmek önem kazanmıştır.

Daha fazla ergonomik faktörleri içeren kısıtların modellerde dikkate alınması istendiğinde en iyi çözüme ulaşma süresi artacağından daha kısa sürede çözüm bulan sezgisel yaklaşımların 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.

References

- 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., 2016. Modeling and solving assembly line design problems by considering human factors with a real-life application. *Human Resource Management Journal*. Doi: 10.1002/hfm.20695/s. 96-115.
- 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.
- Bureau of Labor Statistics (2009, November 24). Nonfatal occupational injuries and illnesses requiring days away from work, 2008. Economic news release.
- Cheshmehgaz, H.R., Haron, H., Kazemipour, F., Desa, M.H. 2012. Accumulated risk of body postures in assembly line balancing problem and modeling through a multi-criteria fuzzy-genetic algorithm. *Computers & Industrial Engineering* 63 (2012) 503-512.

- Chiasson, M. E., Imbeau, D., Major, J., Aubry, K., Delisle, A. 2012. Comparing The Results of Eight Methods Used to Evaluate Risk Factors Associated with Musculoskeletal Disorders. *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 42, p. 478-488.
- 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.
- 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, 997-1007.
- 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.
- Otto, A., Scholl, A., 2011. Incorporating ergonomic risks into assembly line balancing. *European Journal of Operational Research*, 212, 277-285.
- Özel, E., Çetik, O. 2010. Mesleki Görevlerin Ergonomik Analizinde Kullanılan Araçlar ve Bir Uygulama Örneği. *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 22, 41-56.
- Polat, O., Mutlu, Ö., Özgörmüş, E. (2018). A Mathematical Model For Assembly Line Balancing Problem Type 2 Under Ergonomic Workload Constraint. *The Ergonomics Open Journal*, 11(1), 1-11.
- Santé Canada, 2002. Economic Burden of Illness in Canada 1998. Health Canada, Ottawa, ON. <http://www.phac-aspc.gc.ca/ebic-femc/index-eng.php>.
- 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.
- 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.
- WHO Scientific Group, 2003. The Burden of Musculoskeletal Conditions at the Start of the New Millennium. World Health Organization, Geneva, Geneva.