

## TEKRARLI MANUEL İŞLERDE FİZYOLOJİK YÜKÜN METABOLİK HIZ MODELLEMESİ İLE ANALİZİ

Betül YILDIZ<sup>1\*</sup>, Nuh Mete AKIN<sup>2</sup>, Ferdi AYDIN<sup>3</sup>, Tülin GÜNDÜZ<sup>4</sup>, Besim Türker ÖZALP<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Bursa  
ORCID No: <https://orcid.org/0000-0001-5974-722X>

<sup>2</sup>Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Bursa  
ORCID No: <https://orcid.org/0000-0002-5898-7712>

<sup>3</sup>Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Bursa  
ORCID No: <https://orcid.org/0000-0002-3607-6141>

<sup>4</sup>Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Bursa  
ORCID No: <https://orcid.org/0000-0002-7134-3997>

<sup>5</sup>Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Bursa  
ORCID No: <https://orcid.org/0000-0003-0307-1026>

Anahtar Kelimeler	Öz
Metabolik Enerji Harcama Hızı, Enerji Yüğü Değerlendirmesi, Manuel Malzeme Taşıma İşleri, Ergonomi	<i>İş taleplerinin, çalışanların yeteneklerini aşmamasını sağlamak ve bir işi gün boyu yapabilecek düzeyde tutmak ergonomi alanında çalışanların sorumluluğu ve hedefidir. Sürekli performans sınırının üzerinde iş yapması beklenen çalışan yorulur. Yorgunluk; çalışanların iş verimi, sağlığı, güvenliği ve psikolojik dengesi açısından olumsuz etkiler yaratabilmektedir. Metabolik enerji harcama hızı, aşırı miktarda fiziksel yorgunluk biriktirmeden sürekli olarak gerçekleştirilebilecek maksimum iş yoğunluğunu belirlemek için kullanılan fizyolojik bir ölçümdür. Bu çalışmada, kauçuk hortum üretimi yapan bir işletmenin lojistik bölümünde metabolik hız ve enerji yüğü değerlendirilmesi, manuel malzeme taşıma işleri için metabolik hız harcama modeli kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Mevcut durumda çalışanın metabolik enerji harcama hızı 6,56 kcal/dk olarak bulunmuştur. Geliştirilen yeni konveyör sistem ile birlikte metabolik enerji harcama hızı 4,35 kcal/dk'ya düşürülerek sınır değerinin altında kalması sağlanmıştır.</i>

### ANALYSIS OF PHYSIOLOGICAL LOAD WITH METABOLIC RATE MODELLING IN REPETITIVE MANUAL TASKS

Keywords	Abstract
Metabolic Energy Expenditure Rate, Energy Load Assessment, Manual Material Handling, Ergonomics	<i>It is the responsibility and goal of those working in the field of ergonomics to ensure that job demands do not exceed the abilities of employees and to keep a job at a level that can be done all day long. The employee, who is expected to work constantly above the performance limit, gets tired. Fatigue can create negative effects in terms of work efficiency, health, safety and psychological balance of employees. Metabolic energy expenditure rate is a physiological measurement used to determine the maximum work intensity that can be performed continuously without accumulating excessive physical fatigue. In this study, the evaluation of metabolic rate and energy load in the logistics department of a rubber hose manufacturing enterprise was achieved using the metabolic rate expenditure model for manual material handling works. In the current situation, the metabolic energy expenditure rate of the employee was found to be 6,56 kcal/min. With the new conveyor system developed, the metabolic energy expenditure rate was reduced to 4,35 kcal/min and it was kept below the limit value.</i>
Araştırma Makalesi	Research Article
Başvuru Tarihi : 06.01.2022	Submission Date : 06.01.2022
Kabul Tarihi : 26.05.2022	Accepted Date : 26.05.2022

\*Sorumlu yazar; e-posta: [betul.yildizz98@hotmail.com](mailto:betul.yildizz98@hotmail.com)

## 1. Giriş

İnsanın yaptığı her türlü iş, ölçülebilir düzeyde ve iş formülleri ile ifade edilebilecek şekilde gerçekleşir. İnsanlara verilecek işler, onların bu işleri gün boyu yapabileceği düzeyde kalmak zorundadır. Sürekli performans sınırının üzerinde iş yapmaya zorlanan çalışan yorulur ve verimi düşer. Yorgunluk; çalışanların iş verimi, sağlığı, güvenliği ve psikolojik dengesi açısından olumsuz etkiler yaratabilmektedir. Bu nedenle, çalışan kişilerin performans sınırlarının bilinmesi; çalışma koşullarının iyileştirilmesi, dinlenme ve çalışma saatlerinin belirlenmesi, gerekirse enerji tüketimini dengeleyecek şekilde beslenmelerinin düzenlenmesi açısından önem taşımaktadır (Eminoğlu, 2013).

İnsan performansının belirlenmesi ve geliştirilmesi konusundaki araştırmalar 19. yüzyılın son çeyreğine kadar uzanmaktadır. Bu konudaki ilk araştırmacı Frederick Winslow Taylor'dır. Taylor, çalıştığı çelik şirketinde iş verimini artırmak için çeşitli yöntemler geliştirmiş, bu sayede demir yüklemde günlük iş kapasitesi üç kat artmıştır. Ayrıca yükleme işinde kullanılan aletlerin ağırlıkları ve boylarında değişiklik yaparak işçilerin zorlanmalarını azaltılmış ve günlük iş verimlerini yükseltmiştir. İnsan performansının belirlenmesine yönelik çalışmalar 2. Dünya Savaşından sonra hız kazanmıştır ve özellikle İngiltere ve Amerika'da birçok araştırmacı performans kapasitesinin geliştirilmesi konusunda çalışmaya başlamıştır. Günümüzde de insan işgücünün kullanıldığı her alanda performans kapasitesinin belirlenmesine yönelik araştırmalar yaygınlaşarak sürmektedir (Eminoğlu, 2013).

Manuel malzeme taşıma görevlerinde, bir kişi aşırı zorlanma veya yorgunluk olmadan performans gösterebilmelidir. Biyomekanik ve fizyolojik ölçümler, farklı endüstriyel iş türlerini fiziksel zorlanma ve yorgunluk açısından karşılaştırmak için nesnel bir ölçek sağlar. Metabolik enerji harcama hızı ve kalp atış hızı, aşırı miktarda fiziksel yorgunluk biriktirmeden sürekli olarak gerçekleştirilebilecek maksimum iş yoğunluğunu belirlemek için literatürde en sık önerilen fizyolojik ölçümlerdir (Garg, Chaffin ve Herrin, 1978).

Tekrarlayan kaldırma ve yük taşıma gibi aktivitelerde büyük kas grupları submaksimal dinamik kasılmalar gerçekleştirir. Bu tür çalışmalar sırasında kişinin dayanıklılığı, öncelikle oksijen taşıma ve kullanma sistemlerinin

kapasitesi (maksimum aerobik güç) ile sınırlıdır. Bir işte harcanan enerji, dayanıklılık çabası için bireylerin aerobik gücü ile ilişkilendirilerek, çalışanın belirli bir işi yorulmadan yerine getirmesi için iş kapasitesinin objektif bir değerlendirmesi yapılabilir. Sekiz saatlik sürekli bir çalışma süresi için, Chaffin (1972) tarafından (genç, sağlıklı bir erkek için) 5,2 kcal/dk 'lık bir fiziksel çalışma kapasitesi sınırı önerilmektedir.

Bu çalışmada bir işin metabolik gereksinimlerinin işçinin özelliklerine ve işin tanımına dayalı olarak tahmin edilmesi amaçlanmıştır.

### 1.1 Enerji Gereksinimlerini Tahmin Etmek İçin Mevcut Yöntemler

Çeşitli manuel faaliyetlerde metabolik enerji harcamasını tahmin etmek için oksijen kullanım oranının ölçümü kullanılabilir. Metabolik hızları belirlemek için yaygın olarak kullanılan üç yöntem şunlardır:

- İşteki oksijen tüketiminin ölçülmesi
- Makro çalışmalar (tablo değerleri)
- Mikro çalışmalar

Oksijen kullanımının iş başında ölçümü, mevcut bir işin metabolik gereksinimlerini belirlemek için uygun bir yöntemdir. Ancak, tek bir oksijen alım ölçümü kişisel ve görev faktörlerinin metabolik iş yükünü nasıl etkilediğini yansıtmaz.

Makro çalışmalar, farklı çalışma koşulları altında karmaşık manuel faaliyetler gerçekleştiren "ortalama" insanlar tarafından harcanan metabolik enerjiyi belirlemek gibi ortak bir amaca sahiptir. Bu değerler kişiye göre önemli düzeyde değişkenlik gösterebilir. Tablo değerleri, herhangi bir işin metabolik yükünün yalnızca çok kaba bir tahminini sağlar. İşlerin aşırı basit açıklamaları nedeniyle hatalar kolaylıkla yapılabilir. Örneğin 4,5 kg yükü yerden 0,91 m yüksekliğindeki bir masaya kaldırmak, aynı yükü 0,91 m yüksekliğindeki bir tabladan 1,68 m yüksekliğindeki bir masaya kaldırmanın net metabolik maliyetinin iki katından daha fazladır. Net metabolik oran; toplam metabolik hız - ayakta durma / oturma görevi için dinlenme / oturma metabolik hızı olarak tanımlanır. Bu nedenle, örneğin kaldırma için tek değeri baz alarak işlem yapmak, yanıltıcı olacaktır. Literatürde çok sayıda farklı aktivite için metabolik enerji harcaması tahminleri mevcuttur. Bu değerler, ölçüm sırasında kullanılan belirli çalışma durumlarına çok özeldir ve çoğu zaman, frekanslar,

ağırlıklar, yükseklikler vb. gibi önemli kişisel ve görev parametrelerinin etkilerini yansıtmaz.

Mikro çalışmalar, bir kişi tarafından harcanan metabolik enerjinin büyüklüğünü, manuel aktivitenin çeşitli genel fiziksel ölçümlerinin büyüklüğü ile ilişkilendirir. Mikro çalışma yaklaşımı, esas olarak varyans modellerinin regresyonu ve analizi yoluyla, metabolik enerji harcama hızları ile işin bir veya daha fazla fiziksel parametresi arasında fonksiyonel ilişkiler sağlar. Bu çalışmalar, öncelikle yürüme, taşıma ve kaldırma için metabolik maliyetle sınırlıdır ve bir manuel malzeme taşıma işinin %50'sini oluşturabilecek alçaltma, tezgâh üstünde bir yük itme, tutma ve farklı kol hareketi türleri gibi diğer manuel malzeme taşıma faaliyetlerini içermez.

Üretimde manuel taşımının yerine malzeme taşıma manipülatörleri, farklı taşıma tiplerine göre çalışana gelen yükü azaltabilir (Nussbaum ve Chaffin, 1999). Dijital insan modelleme ile hangi tip taşıma sisteminin uygun olarak kullanılabileceği belirlenebilir. Endüstri 4.0 kapsamında, algılanan yorgunluğu tahmin etmek için giyilebilir sensörlerden gelen özelliklerle algılanan eforun derecelendirmelerini tahmin yöntemleri mevcuttur (Hajifar ve diğ., 2021). Giyilebilir sensör verilerinin bir çalışanın yorgunluk durumunu tahmin etmeyi destekleyebileceği belirlenmiştir (Hajifar ve diğ., 2021). İşletmelerde yoğunlukla karşılaşılan manuel kaldırma-taşıma işlemlerinde, kutunun ağırlığı ve kaldırma ve indirme yükseklikleri görevlerin sürelerini etkilemektedir. Ayrıca bir görevi gerçekleştirme zamanı, aynı iş sürecindeki diğer görevlerin performansından da etkilenmektedir (Harari, Riemer ve Bechar, 2018).

Bir vardiyada 2 saatten fazla süre ile özellikle beli bükerek veya eğilerek çalışmak ya da ayaklara destek vermeden oturmak gibi uygun olmayan çalışma pozisyonlarında, iskelet-kas sistemi zorlanır (Akay, Dağdeviren ve Kurt, 2003). Farklı iş tasarımı parametrelerindeki değişikliklerin fizyolojik maliyet üzerindeki etkilerini açıklamak ve tahmin etmek için genel uygulanabilirlik modellerinin geliştirilmesine ihtiyaç vardır. Bu tür modeller çalışma hızı, yük ağırlığı ve yatay ve dikey hareket faktörlerini içermelidir. Kısacası, herhangi bir fizyolojik yorgunluk kriteri, frekanslar, ağırlıklar, mesafeler vb. gibi yararlı tasarım parametrelerine dönüştürülemediği sürece iş analisti tarafından kullanılamaz. Bu çalışmada bir işin fiziksel tanımlayıcılarına ve iş analistine /

tasarımcısına yardımcı olacak, çalışana dayalı olarak hesaplanan metabolik enerji harcama hızı ortaya konmuştur.

## 1.2 Ergonomik Değerlendirme İçin Metabolik Enerji Harcamasına Yönelik Literatür Araştırması

Atmaca ve Koçak (2013) üretim işletmeleri için çalışanın iş ağırlıklarına göre tespit edilen metabolik hız aralıkları için ısı konfor aralıkları tespit etmişlerdir. Demirel, Zhang ve Duffy (2016) ise metabolik eşdeğer (MET) verilerini kullanarak bir ergonomik yazılım modülü geliştirmişlerdir. Geliştirilen diğer bir yazılım ise farklı risk analizi yöntemleri ile işlerin ergonomik değerlendirmesinin yapılabilmesine imkân vermekle beraber, çalışanın görev tanımının tabular formda tanımlanmasıyla her bir görevdeki ve toplamdaki metabolik hızı hesaplayıp raporlayabilmektedir (Aydın, Özalp ve Gündüz, 2022). Arıtan, Şensöğüt ve Tümer (2017) yaptıkları çalışmada bir mermer işletmesinde çalışanların termal konforunu tespit etmek için Predicted Mean Vote (PMV) indeksini hesaplamışlardır. PMV değişkenlerinden olan metabolik hız ise uluslararası standart bilgisi kullanılarak bulunmuştur. Li, Chu ve Chen (2019) sırt çantası ile farklı koşullarda yürümenin fizyolojik yükünü MET ölçümleri ile yapmışlar ve literatürdeki diğer çalışmalara kıyasla daha fazla efor sarf edildiğini tespit etmişlerdir.

Son yıllarda üretim sistemlerinin verimliliğini arttırmaya yönelik Yöneylem Araştırması Anabilim dalında yapılan çalışmalarda, çalışanların fiziksel yeteneklerinin gözetildiği ve oluşturulan matematiksel modellere ergonomik kısıtların da eklendiği gözlemlenmektedir. Kara, Atasagun, Gökçen, Hezer ve Demirel (2014), 30 farklı görev tanımları için yedi çalışanın enerji harcamasını kalori/çevrim olarak ölçmüşlerdir. Montaj hattı dengelemesi yapan matematiksel modellerine ekledikleri ergonomik kısıtlar ile çalışanın toplam kalori harcamasının limit değerinin üstüne çıkmasının önüne geçmişlerdir. Battini, Delorme, Dolgui, Persona ve Sgarbossa (2016) çok amaçlı matematiksel modellerinde montaj hattı dengelemesi yapmışlardır. Hat dengeleme literatüründe ilk kez bu çalışmada, Garg ve diğ. (1978)'nin önerdiği metabolik hız tahmini denklemleri matematiksel modele entegre edilerek kullanılmıştır. Başka bir çalışmada ise sipariş toplama depoları için bir bütünleşik depo atama

yöntemi geliştirilmiştir. Üç farklı raf düzenini senaryo olarak kullanan çalışmada oluşturulan sezgisel modele ekonomiklik ve ergonomiklik fonksiyonları eklenmiştir. Toplam sipariş toplama performansı maliyet fonksiyonlarını oluştururken, enerji harcama hızı ve çalışan postürlerinin OWAS ile değerlendirmesi suretiyle ergonomik fonksiyonlar türetilmiştir. Bu modelin çalıştırılması ile hangi malzemelerin hangi paleta atanacağına karar verilmekte ve maliyetle beraber fiziksel efor minimize edilmektedir (Calzavara, Glock, Grosse ve Sgarbossa, 2019). Stecke ve Mokhtarzadeh (2022), insan ve robotların beraber çalıştıkları montaj hatlarını dengelemek için ergonomik risklerle beraber çevrim süresini minimize edecek üç farklı çözüm yöntemi geliştirmişlerdir. Karışık-Tamsayı Doğrusal Programlama, Kısıt Programlama ve Benders Ayırıştırma Algoritması çözüm yöntemleridir. Ergonomik risk olarak ise enerji harcaması tespit edilip Garg ve diğ. (1978) tarafından geliştirilen denklemler kullanılmıştır. Her üç yöntem ile edilen sonuçlar kıyaslanarak sunulmuştur.

### 1.3 İşyeri Tasarımında Ergonomik Değerlendirme İçin 3 Boyutlu Simülasyon ve Dijital İnsan Modelleme (DHM)

Tasarım sürecinin başlarında hesaplamalı modelleme ve simülasyon araçlarının etkin kullanımı, modern ürün geliştirme için bir standart haline gelmektedir. Henüz tasarım sürecinin başlarında DHM'yi fiziksel veya dijital modellerle uygulayarak, farklı senaryoların oluşturulmasına imkân sağlanır. Böylece uygulanabilir olmayan fikirler filtrelenerek, konsept oluşturma çabasında daha iyi tasarım alternatifleri ortaya konabilir. Uzun soluklu bu çaba esnasında DHM, genel maliyet ve zamandan da tasarruf edilmesini sağlar (Demirel, Ahmed ve Duffy, 2021). Dijital insan modellemesi (DHM) bir bilgisayar kullanarak, etkileşim içinde olan gerçek dünya durumunu simüle ederek insanların hızlı, sanal bir temsiliyi sağlar (Hu, Ma, Zhang, Salvendy, Chablat ve Bennis, 2011).

Günümüzde ergonomi araştırmalarında DHM sıklıkla kullanılmaktadır. Tasarım aşamasında ergonomik risklerin değerlendirilmesi, kritik risklerin tespit edilmesini sağlar. Henüz sürecin başlarında düzeltici eylemlerin kullanılması ve potansiyel ergonomik risklerin daha sonra değerlendirilmesinden daha az maliyetlidir (Demirel ve diğ., 2021; Geiger, Branderburg ve

Stark, 2020). Ergonomi analizlerinin gerçekleştirilmesinde kolaylık sağlayan ve insan modellemesine imkan veren yazılım platformları (3DSSPP, OpenSim, CATIA vb.), arzu edilen postürün elde edilmesi için bir manikinin 3D modellemesini, eklemlerin arasındaki açılarının girilmesi ile sağlarlar (Demirel vd., 2021). Tasarım aşamasında kullanılan ve DHM imkanı sağlayan pek çok yazılım (CATIA, DELMIA, IPS IMMA, Jack Siemens, SOLIDWORKS, Dassault Human) günümüzde endüstri ve akademide sıklıkla kullanılmaktadır (Da Silva, Gomes ve Winkler, 2022).

Çalışma ortamlarının dijital olarak yaratıldığı ve DHM ile ergonomik analizlerin gerçekleştirildiği pek çok araştırma literatürde mevcuttur. Duplakova, Flimel, Duplak, Hatala, Radchenko ve Botko (2019), çalışma ortamı ışıklandırmasının yeniden tasarımı için bir algoritma geliştirmişlerdir. Algoritmanın doğruluğu Dialux Evo 6.1 simülasyon yazılımında gerçek ortamın dijital ikizinin yaratılması ve dijital ortamdaki değerler ile gerçek verilerin kıyaslanması ile gerçekleştirilmiştir. Yeni ve daha iyi bir ışıklandırma ortamı teklifi simülasyon üzerinde gerçekleştirilmiştir. Golabchi, Han ve AbouRizk (2018) yaptıkları çalışmada duvar ören inşaat işçilerinin duruşlarını OWAS ile beraber biyomekanik açıdan analiz etmişlerdir. Daha sonra 3DSSPP yazılımında DHM kullanarak oluşturdukları farklı senaryoların analizlerini ortaya koymuşlar ve iyileştirme tekliflerini sunmuşlardır.

İşyerinde çalışanların maruz kaldıkları yükleri analiz etmek için kullanılan gözleme dayalı metotlardan bazıları RULA, REBA ve OWAS olarak sıralanabilir (David, 2005). Yapılan pek çok çalışmada çalışanların mevcut çalışma koşullarındaki ergonomik yükleri bu yöntemlerden bazıları ile analiz edilmiştir. Daha sonra simülasyon araçları ile beraber DHM kullanılarak yeni çalışma koşulları tasarlanıp analiz edilmiş ve bunlar iyileştirme önerisi olarak sunulmuştur. (Boulila, Ayadi ve Mrabet, 2018; Erdemir ve Eldem, 2020; Kumar ve Singh, 2018; Kushwaha ve Kane, 2016; Liang, Sun ve Wu, 2016; Top, Başak ve Şahin, 2021)

Güncel literatür incelendiğinde mevcut işyerlerinin ergonomik değerlendirilmesinde gözleme dayalı formların kullanıldığı çok sayıda çalışma vardır. Ayrıca Yöneylem Araştırması başlığında bakıldığında, ergonomik kısıtlar içeren

matematiksel modellerin lot büyüklüğü, çevrim hızı ya da mevcut hücrelere çalışan ataması gibi bir takım parametreleri değiştirdiği gözlenmiştir. Mevcut sistemin metabolik enerji harcaması denklemleri ile analiz edilip, bunun üzerine yeni bir tasarımın geliştirilmesi literatüre katkı açısından tercih edilmiştir.

## 2. Yöntem

Bu çalışmada, kauçuk imalatı yapan bir firmanın lojistik bölümündeki çalışan dikkate alınmıştır. Çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur. Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen ve Mühendislik Bilimleri Araştırma ve Yayın Etik Kurulu Başkanlığı'ndan 27.10.2021 tarih ve E-92662996-044-32376 sayı numarası ile etik kurul onayı alınmıştır. Çalışmanın yapıldığı İbraş Kauçuk Otomotiv Yan San. ve Tic. A.Ş.'den 08/12/2021 tarihinde izin alınmıştır.

Kolilerin taşınıp paletlere yerleştirilmesi işleminde manuel olarak yük itme, kaldırma ve yerleştirme işlemleri gerçekleştirilmektedir. Yapılan bu iş esnasında harcanan metabolik enerji hızının hesaplanması için metabolik hız harcama modeli kullanılmıştır.

Manuel malzeme taşıma için geliştirilen model, bir işin basit görevlere (faaliyet öğelerine) bölünebileceği ve basit görevlerin enerji harcamaları ve işin süresinin bilinmesi ile işin ortalama metabolik enerji harcama oranının tahmin edilebileceği varsayımına dayanmaktadır. İş görev unsurlarına bölerek ve her görevdeki ölçülebilir güç, mesafe, sıklık, duruş, teknik, cinsiyet, vücut ağırlığı ve zaman faktörlerine dayalı olarak her göreve metabolik bir maliyet atayarak, sadece bu görevi yerine getirmek için bir enerji gereksinimi belirlenebilir. Ortalama metabolik enerji harcaması, basitçe, görevin enerji taleplerinin toplamına ve zaman içinde ortalaması alınan vücut duruşunun sürdürülmesine eşittir. Çalışmada matematiksel olarak Garg ve diğ. (1978) tarafından oluşturulan model kullanılmıştır. Kullanılan modelin ana fonksiyonu Denklem (1)'de verilmiştir.

$$\bar{E}_{i\dot{s}} = \frac{\sum_{i=1}^n \dot{E}_{pos} \times t_i + \sum_{i=1}^n \Delta E_{görev_i}}{T} \quad (1)$$

Bir vücut duruşunu sürdürmenin metabolik enerji harcama hızı ( $\dot{E}_{pos}$ ), cinsiyet, vücut ağırlığı ve vücut duruşunun bir fonksiyonudur. Ek-1'de verilmiş olan tahmin denklemleri (2)-(4) ile hesaplanır. Bir

görevin metabolik enerji harcamasındaki net artış ( $\Delta E_{görev}$ ), hem statik hem de dinamik çalışmayı içerir. Bir görevin metabolik enerji harcamasındaki net artış ( $\Delta E_{görev}$ ) üzerindeki etkilerini hesaba katmak için kullanılan kişisel ve görev değişkenleri şu şekilde sıralanabilir. Cinsiyet, vücut ağırlığı, eller tarafından uygulanan yük veya kuvvetin ağırlığı, vücuda yüklenme sıklığı (hız), görevin dikey yükseklik aralığı, kolların yatay düzlemde ileri ve yanal hareketi, vücudun dikey hareketi, yürüme yüzeyinin derecesi ve bileşimi, yürüme ve yük taşıma hızı, vücut duruşu, uygulanan teknik görev ve görevin süresidir. Ek-2'de verilmiş olan tahmin denklemleri (5)-(26) ile hesaplanır.

Bunlar aynı zamanda, submaksimal seviyelerde bir görevin net metabolik enerji harcaması üzerinde önemli etkiye sahip olduğu gösterilen önemli değişkenlerdir. Tabii ki, yaş, eğitim, fiziksel uygunluk, yükün boyutu, bir görevi yerine getirme hızı, tasarım, sıcaklık ve nem gibi faktörlerin tümü, bir görevin metabolik enerji harcama oranını etkiler. Bununla birlikte, normal çalışma koşulları altında (sıcaklık, nem ve sosyal çevrenin aşırı olmadığı) orta ve ağır manuel malzeme taşıma görevlerinde, bu faktörlerden bazıları daha az önemli roller oynar. Dahası, bu faktörlerden bazılarının ölçülmesi zordur. Özellikle kaldırma ve indirme için farklı görevlerin net metabolik maliyeti için tüm tahmin denklemlerinin çalışanın boyundan bağımsız olduğunu belirtmek gerekir. Kaldırma ve indirme yükseklikleri zemin seviyesine göredir ve çalışanın diz, bel, göğüs ve baş üstü referanslarından bağımsızdır. Denklem (18)-(19)'da, 'F' eller tarafından uygulanan itme/çekme kuvvetini temsil eder ve bu nedenle, yükün ağırlığının yanı sıra yüzeyin sürtünme katsayısını da içerir. Bu, bir el dinamometresi ile kolayca ölçülebilir. Cinsiyet etkilerinin belirli görevler için (kaldırma, indirme, masa yüksekliğinde itme, 90 derecelik kolların yana doğru hareketi) ortaya çıktığını, ancak diğerlerinde (tutma, yürüme, taşıma, kolların ileri hareketi, yanal hareket) görülmediğini belirtmek önemlidir.

Tahmin denklemleri performans başına net metabolik maliyet olarak sunulmuştur (örneğin, kcal/kaldırma). Bu nedenle, bu denklemler, nadiren meydana gelen görevlerin veya tekrarlayan bir işin özel döngülerinde ortaya çıkan unsurların net metabolik maliyetini tahmin etmek için de kullanılabilir. Böylelikle model hem tekrar eden hem de yarı tekrarlayan işlere uygulanabilir. Ek-2'de listelenen görevler (Denklem (5)-(26)) kesinlikle tüm endüstriyel iş faaliyetlerini

kapsamaz. Önemli miktarda küçük el veya kol hareketi gerektiren işleri (tel kesme vb.) görev bileşenlerine ayırmak zordur. Bu modeli kullanmak için gerekli verilerin çoğu, günümüzde endüstride yaygın olarak kullanılan mevcut hareket ve zaman etüdü verilerinden veya önceden belirlenmiş hareket zamanı veri sistemlerinden elde edilebilir.

### 3. Uygulama

#### 3.1 Mevcut İşlerin Metabolik Hız Analizi

Otomotiv sektörüne yönelik kauçuk üretimi yapan bir işletmenin lojistik bölümünde, çalışan tarafından kolilerin taşınıp paletlere yerleştirilmesi işlemi incelenmiştir. Çalışan 18 kg ağırlığındaki kolileri paletlerin yanına kadar 2 m yerde iterek (Şekil 1) paletin üzerine 3 sıra halinde yerleştirmektedir (Şekil 2). Her sırada 4 koli yer almaktadır ve palete toplam 12 koli yerleştirilmektedir. Çalışan, bu işlemi gerçekleştirirken sırasıyla; yerde itme, yürüme, kaldırma, palet üzerinde itme işlemlerini gerçekleştirmektedir. İşin görevlere fiili dağılımı ve her görevin net metabolik maliyetleri Tablo 1'de verilmiştir. İncelenen bu işlem 69 kg ağırlığında bir erkek işçi tarafından 3,08 dk (çalışma süresi +%15 dinlenme payı) süreyle gerçekleştirilmektedir.



Şekil 1. Çalışanın Kolileri Yerde İtmesi



Şekil 2. Çalışanın Kolileri Palete Yerleştirmesi

Tablo 1  
Lojistik Bölümü Metabolik Hız Tablosu

Görev No	Görev	Teknik	Tekrar Sayısı	Yükün Ağırlığı	Başlangıç h1(m)	Bitiş h2(m)	Zaman (dk)	Harcanan Enerji (kcal)
1	İtme/Çekme	Masa Yüksekliğinde (0,8 metre)	12	-	-	-	-	5,032
2	Yürüme	-	12	-	-	-	0,09	0,810
3	Kaldırma	Çömelerek	4	18	0	0,12	-	1,392
4	İtme/Çekme	Masa Yüksekliğinde (0,8 metre)	4	-	-	-	-	0,554
5	Kaldırma	Çömelerek	4	18	0	0,7	-	2,565
6	Kaldırma	Çömelerek	4	18	0	0,8	-	2,768
7	Kaldırma	Kol Gücüyle	4	18	0,8	1,26	-	0,961
8	İtme/Çekme	1,5 metre Yüksekliğinde	2	-	-	-	-	0,508

Tablo 1’de verilen ilk iş, kolilerin paletin yanına, zemin üzerinde 8 kgf kuvvetle 2 metre boyunca itilmesidir. Bir paleti tamamlamak için gereken koli sayısı 12 olduğundan bu iş 12 defa tekrarlanmaktadır. Bu görevin net metabolik maliyeti Denklem (18) kullanılarak tahmin edilir.

Toplam 12 koliyi paletin yanına getirmek amacıyla çalışan, 12 kez kolileri almak için 2 m boyunca yürünmektedir. Bu görevin net metabolik maliyeti Denklem (12) kullanılarak tahmin edilir.

Tüm koliler paletin yanına getirildikten sonra çalışan kolileri yerden kaldırarak paletin 1. sırasına yerleştirmektedir. Her sırada 4 koli yer almaktadır. 18 kg ağırlığındaki 4 koli zeminden 0,12 m yüksekliğe kaldırılmaktadır. Bu görevin net metabolik maliyeti Denklem (6) kullanılarak tahmin edilir. Kaldırma ve indirme işlemlerinin net metabolik maliyetini tahmin etmek için mevcut tüm denklemler işçinin boyundan bağımsızdır. Kaldırma ve indirme yükseklikleri zemin seviyesine göredir ve çalışanın diz, bel, göğüs ve baş üstü referanslarından bağımsızdır.

Çalışan ilk sıraya yerleştirdiği 2 koliyi paletin arkasına itmektir. İkinci sırada da aynı yükseklik aralığında 2 koli arkaya itildiği için bu işlem Tablo 1’de 4 kez tekrarlanmış olarak alınmıştır. Bu görevin net metabolik maliyeti denklem (18) kullanılarak tahmin edilir.

İlk sıra tamamlandıktan sonra çalışan paletin yanındaki kolileri yerden kaldırarak 2. sıraya yerleştirmektedir. 18 kg ağırlığındaki 4 koli zeminden 0,7 m yüksekliğe kaldırılmaktadır. Bu görevin net metabolik maliyeti denklem (6) kullanılarak tahmin edilir.

Son olarak çalışan paletin yanındaki kolileri yerden kaldırarak 3’üncü sıraya yerleştirmektedir. 18 kg ağırlığındaki 4 koli zeminden 1,26 m yüksekliğe kaldırılmaktadır. Bu yükseklik aralığı 0 ile 0,8 m ve 0,8 ile 1,26 m olmak üzere iki dikey yükseklik aralığına ayrılmıştır. Bu görevin net metabolik maliyeti Denklem (6) ve (8) kullanılarak tahmin edilir.

Çalışan üçüncü sıraya yerleştirdiği 2 koliyi paletin arkasına ittiği için bu işlem Tablo 1’de 2 kez tekrarlanmış olarak alınmıştır. Bu görevin net metabolik maliyeti Denklem (19) kullanılarak tahmin edilir.

8 görev için net metabolik maliyet tahminleri tablonun son sütununda verilmiştir. Bu net metabolik maliyetlerin toplamı 14,591 kcal’dır.

Çalışan bu işlemi ayakta ve ayakta bel eğik pozisyonda gerçekleştirdiği için metabolik maliyetin postürel bileşeni Denklem (3)-(4) kullanılarak 5,619 Kcal/dk olarak tahmin edilmiştir. Bu nedenle işin Denklem (1) kullanılarak hesaplanan ortalama hızı aşağıdaki gibidir:

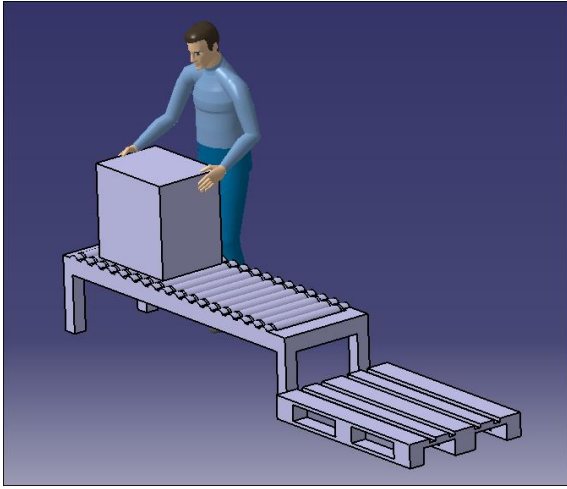
$$\bar{E}_{i\dot{s}} = \frac{(1,932 \times 1,88 + 1,656 \times 1,20) + 14,591}{3,08} = 6,56 \text{ kcal/dk}$$

### 3.2 Önerilen Yeni İş Sistemi ile Metabolik Hızın Azaltılması

Çalışanın işini daha rahat ve sağlıklı bir şekilde yapabilmesi için gereken önlemler işverence alınmalı ve gerekli iyileştirmeler yapılmalıdır. Mevcut durumda çalışan kolileri yerde iterek paletlerin yanına getirdikten sonra kaldırarak paletle yerleştirmektedir. Hesaplanan metabolik hızı bakıldığında bu oldukça yüksek bir metabolik hızdır ve bir kişinin yeterli dinlenme süreleri olmadan bu işte sekiz saat dayanması beklenemez. Bu yüksek metabolik hızı neden olan iki ana bileşenin itme/çekme (görev 1) ve kaldırma (görev 5 ve görev 6) olduğu Tablo 1’de de açıkça görülmektedir.

Geliştirilen ve bir görsel simülasyon programı üzerinde modellenen modelde, çalışan kolileri Şekil 3’de gösterilen bir konveyör üzerinde doldurduktan sonra daha az bir itme kuvveti uygulayarak paletin yanına getirerek, daha az kaldırma mesafeleri ile paletle yerleştirecektir. Geliştirilen model ile çalışanın hem kolileri paletin yanına götürmek için uyguladığı itme kuvveti azaltılmakta hem de kolileri paletle kaldırırken ki kaldırma mesafeleri azaltılarak daha az yorulma ile kaldırma işlemini gerçekleştirmesi sağlanmaktadır.





Şekil 3. Lojistik Bölümündeki İyileştirme ile Dijital İnsan Modeli

Geliştirilen yeni sistem ile birlikte (Şekil 3) metabolik hız ve enerji yükü değerlendirmesi tekrar yapılmıştır. İşin görevlere fiili dağılımı ve her görevin net metabolik maliyetleri Tablo 2 'de verilmiştir.

Tablo 2  
Lojistik İyileştirme Metabolik Hız Tablosu

Görev No	Görev	Teknik	Tekrar Sayısı	Yükün Ağırlığı	Başlangıç h1(m)	Bitiş h2(m)	Zaman (dk)	Harcanan Enerji (kcal)
1	İtme/Çekme	Masa Yüksekliğinde (0,8 metre)	12	-	-	-	-	2,649
2	Yürüme	-	12	-	-	-	0,09	0,810
3	İndirme	Eğilerek	4	18	0,12	0,47	-	0,825
4	İtme/Çekme	Masa Yüksekliğinde (0,8 metre)	4	-	-	-	-	0,554
5	Kaldırma	Eğilerek	4	18	0,47	0,7	-	0,664
6	Kaldırma	Eğilerek	4	18	0,47	0,8	-	0,821
7	Kaldırma	Kol Gücüyle	4	18	0,8	1,26	-	0,961
8	İtme/Çekme	1,5 metre Yüksekliğinde	2	-	-	-	-	0,508

Geliştirilen modelde görev 1'de çalışan kolileri yerde itmek yerine 0,47 m yükseklikte ve 2 m uzunluktaki bir makaralı konveyör üzerinde itecektir. Federal Almanya İş Güvenliği ve İş Hekimliği Kurumunun Yük İtme-Çekme Risk Değerlendirme Yöntemine göre 18 kg'lık kolinin kaydırılarak itilmesinde yük, yardımcı araçların kullanıldığı sistemlere göre 4 kat fazladır (Babalık, 2016). Böylelikle mevcut durumda çalışanın kutuları itmek için uyguladığı 8 kg değerindeki itme kuvveti 2kg'ya düşmüş olacaktır. Çalışan daha az itme kuvveti ile daha az enerji harcamış olacaktır. Görev 3'de ise çalışan koliyi zeminden

kaldırmak yerine 0,47 m yükseklikten palete indirme işlemi yapacaktır. İndirme işlemi ile mevcut sistemde yaptığı kaldırma işlemine göre daha az enerji harcamış olacaktır. Görev 5 ve 6'da ise çalışan mevcut çalışma koşullarında koliyi zeminden çömelerek kaldırmaktadır ve bu da daha fazla enerji harcamasına neden olmaktadır. İyileştirilmiş çalışma koşullarında ise çalışan kolileri zeminden daha yüksek bir yerden kaldırdığı için çömelmeden sadece eğilerek bu işi gerçekleştirebilmektedir. Bu da çalışanın daha az enerji harcamasını sağlar. Tasarlanan



sistemde çalışanın koluyu kaldırdığı mesafeler arasındaki fark azaltıldığı için çalışanın bu işi gerçekleştirme sırasındaki harcadığı enerji de azalmaktadır.

$$\bar{E}_{i\dot{s}} = \frac{5,619+7,792}{3,08}=4,35 \text{ kcal/dk}$$

Önerilen model ile çalışanın metabolik hızı 6,56 kcal/dk 'dan 4,35 kcal/dk 'ya düşürülmüştür. Böylelikle Chaffin tarafından 1972 yılında yapılan çalışmada belirlenen 5,2 kcal/dk 'lık sınır değer altına düşürülmüştür. Çalışanın sekiz saatlik bir çalışma süresi için bu işi sürdürmesi uygundur.

#### 4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada, kauçuk imalatı yapan bir firmada lojistik bölümünde çalışanın ortaya koyduğu metabolik enerji harcama hızı incelenmiştir. Yapılan araştırmada çalışan, kolileri yerde iterek paletin yanına getirdikten sonra kaldırarak palete yerleştirmektedir. Çalışma kapsamında metabolik enerji harcama hızını tahmin etmek için metabolik hız modeli kullanılmıştır. Model, bir işin basit görevlere bölünebileceği ve basit görevlerin enerji harcamaları ve işin süresinin bilinmesi ile işin ortalama metabolik enerji harcama hızının tahmin edilebileceği varsayımına dayanmaktadır.

Yapılan hesaplamalar sonucunda mevcut durumda çalışanın metabolik enerji harcama hızı 6,56 kcal/dk olarak bulunmuştur. Bu değer 5,2 kcal/dk olan sınır değer üzerinde ve bir kişinin ek dinlenme süreleri olmadan bu işi sekiz saat sürdürmesi beklenemez. Bu değer sınır değer altına düşürülmesi amacıyla makaralı konveyör önerisi geliştirilmiştir.

Geliştirilen yeni iş sisteminde çalışan kolileri bir konveyör üzerinde doldurduktan sonra daha az bir itme kuvveti uygulayarak paletin yanına getirerek, daha az kaldırma mesafeleri ile palete yerleştirecektir. Geliştirilen yeni iş sistemi ile çalışanın hem kolileri paletin yanına götürmek için uyguladığı itme kuvveti azaltılmakta hem de kolileri palete kaldırırken ki dikey kaldırma mesafeleri azaltılarak daha az enerji harcama ile kaldırma işlemini gerçekleştirmesi sağlanmaktadır. Geliştirilen konveyör sisteminde çalışanın uyguladığı kuvvet ve çalışma yüksekliği değiştiği için iyileştirilmiş sistemde yapılan enerji hesabında çalışanın harcadığı enerji dakikada 4,35 kcal olarak hesaplanmıştır. Chaffin (1972)'in yaptığı araştırmada bulduğu sınır değeri olan dakikada 5,2 kcal değerinin aşılmadığı

görülmektedir. Böylece çalışan, bu işi ek dinlenme sürelerine ihtiyaç duymadan sekiz saatlik bir çalışma süresi boyunca sürdürebilecektir.

Yapılan çalışma ile manuel malzeme taşıma işleri için çalışanın metabolik gereksinimlerini belirlemek isteyen işletmelere kaynak oluşturulmuş ve uygulama örneği verilen model ile kullanım kolaylığı sağlanmıştır. Farklı görevleri içerecek bir işin tasarımında iş güvenliği uzmanları, diğer yöntemlerle beraber bu yöntemi kullanarak olası ergonomik riskleri minimize etmeye çalışabilir. Metabolik hızın tespitinde kullanılacak ölçüm ekipmanları yerine literatürde kabul gören denklemlerin kullanılması, çalışanın işine müdahale etmeden daha hızlı sonuç alınmasına imkân vermektedir. Ayrıca çalışanlar ile yapılacak sübjektif anket sonuçlarına kıyasla, metabolik hızın tespitiyle iş yükünün hesaplanması, daha objektif sonuçlar verecektir. Tabii ki çevre faktörlerinin çalışan üzerindeki yükü bu yöntemle belirlenmemektedir. Havanın sıcaklığı ve hızı, ortamdaki kimyasallar vb. çevresel faktörlerin fizyolojik yükteki etkileri bu çalışmada ortaya konamamıştır. Bu alanda daha fazla çalışma yapılması ve bu yöntemin geliştirilmesi gerekmektedir.

#### Teşekkür

Bu çalışma İbraş Kauçuk Otomotiv Yan San. ve Tic. A.Ş. firmasında gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın yürütülmesi sırasında kıymetli desteğini esirgemeyen Sayın Yusuf ŞENSOY'a ve analizlere katılan firma çalışanlarına teşekkür ederiz.

#### Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

#### Yazarların Katkısı

Bu araştırmada; Betül YILDIZ, bilimsel yayın araştırması, uygulanması, makalenin oluşturulup düzenlenmesi ve makale sonuçlarının hazırlanması; Nuh Mete AKIN, makalenin düzenlenmesi ve görsel simülasyon modellemesi; Ferdi AYDIN, bilgisayar ortamına aktarılması, matematiksel modelin uygulanması ve makalenin düzenlenmesi Tülin GÜNDÜZ, literatür araştırması; Besim Türker ÖZALP, literatür araştırması ve matematiksel modelin uygulanması konularında katkı sağlamıştır.

**Kaynaklar**

- Akay D., Dağdeviren M., ve Kurt M. (2003). Çalışma duruşlarının ergonomik analizi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 18(3), 73-84. Erişim adresi: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/gazimmfd/issue/6657/88995>
- Aritan, A. E., Şensöğüt, C. ve Tümer, M. (2017). Doğaltaş işleme tesisinde termal konfor analizi. *Soma Meslek Yüksekokulu Teknik Bilimler Dergisi*, 1 (23), 1-10. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/somatbd/issue/30679/331461>
- Atmaca, İ. ve Koçak, S. (2013). İşletmelerde farklı metabolik aktivite düzeylerinde çalışanlar için ısı konfor bölgelerinin tespiti. *Mühendis ve Makina*, 54(638), 26-32. Erişim adresi: <https://www.mmo.org.tr/mart-2013/makale/makale-isletmelerde-farkli-metabolik-aktivite-duzeylerinde-calisanlar-icin-isi>
- Aydın, F., Özalp, B. T. ve Gündüz, T. (2022). Ergonomik risk analizi yöntemleri ve metabolik hız hesabı yazılım uygulaması. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 27(1), 341-360. Doi: <https://doi.org/10.17482/uumfd.973215>
- Babalık F. C. (2016). *Mühendisler İçin Ergonomi – İşbilim*. Bursa: Dora Yayın Dağıtım Ltd. Şti.
- Battini, D., Delorme, X., Dolgui, A., Persona, A. ve Sgarbossa, F. (2016). Ergonomics in assembly line balancing based on energy expenditure: A multi-objective-model. *International Journal of Production Research*, 54 (3), 824–845. Doi: <https://doi.org/10.1080/00207543.2015.1074299>
- Boulila, A., Ayadi, M. ve Mrabet, K. (2018). Ergonomics study and analysis of work stations in Tunisian mechanical manufacturing. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*, 28, 166–185. Doi: <https://doi.org/10.1002/hfm.20732>
- Calzavara, M., Glock, C. H., Grosse E. H., ve Sgarbossa F. (2019). An integrated storage assignment method for manual order picking warehouses considering cost, workload and posture. *International Journal of Production Research*, 57(8), 2392-2408, Doi: <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1518609>
- Chaffin, D. B. (1972). *Some effects of physical exertion*. Department of Industrial and Operations Engineering, The University of Michigan.
- Da Silva, A. G., Mendes Gomes, M. V. ve Winkler, I. (2022). Virtual reality and digital human modeling for ergonomic assessment in industrial product development: A patent and literature review. *Applied Sciences*, 12(3), 1084. Doi: <https://doi.org/10.3390/app12031084>
- Duplákóvá, D., Flimel, M., Duplák, J., Hatala, M., Radchenko, S. ve Botko, F. (2019). Ergonomic rationalization of lighting in the working environment. Part I.: Proposal of rationalization algorithm for lighting redesign. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 71, 92-102. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2019.02.012>.
- David, G. C. (2005). Ergonomic methods for assessing exposure to risk factors for work-related musculoskeletal disorders. *Occupational Medicine*, 55(3), 190–199. Doi: <https://doi.org/10.1093/occmed/kqi082>
- Demirel, H. O., Ahmed S. ve Duffy V. G. (2021). Digital human modeling: A review and reappraisal of origins, present, and expected future methods for representing humans computationally. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 1-41. Doi: <https://doi.org/10.1080/10447318.2021.1976507>
- Demirel, H. O., Zhang, L. ve Duffy, V. G. (2016). Opportunities for meeting sustainability objectives. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 51, 73–81. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2014.09.009>
- Eminoğlu, M. B. (2013). Farklı çalışma programlarının çapa makinası operatörlerinin fiziksel zorlanmasına etkisinin belirlenmesi. *Tarım Makinaları Bilimi Dergisi*, 9(1), 1-8. Erişim adresi: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/tarmak/issue/11534/137369>
- Erdemir, F. ve Eldem, C. (2020). Bir döküm atölyesindeki çalışma duruşlarının dijital insan modelleme tabanlı reba yöntemi ile ergonomik analizi. *Politeknik Dergisi*, 23(2), 435-443. Doi: <https://doi.org/10.2339/politeknik.534877>
- Garg, A., Chaffin, D. B. ve Herrin, D. G. (1978). Prediction of metabolic rates for manual materials handling jobs. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 39(8), 661-674. Doi: <https://doi.org/10.1080/0002889778507831>

- Geiger, A., Brandenburg, E. ve Stark, R. (2020). Natural virtual reality user interface to define assembly sequences for digital human models. *Applied System Innovation*, 3(1), 1-16. Doi: <https://doi.org/10.3390/asi3010015>
- Golabchi, A., Han, S. ve Abourizk, S. (2018). A simulation and visualization-based framework of labor efficiency and safety analysis for prevention through design and planning. *Automation in Construction*, 96, 310-323. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.10.001>
- Hajifar S., Sun, H., Megahed, F. M., Jones-Farmer, L. A., Rashedi, E. ve Cavuoto, L. A. (2021). A forecasting framework for predicting perceived fatigue: Using time series methods to forecast ratings of perceived exertion with features from wearable sensors. *Applied Ergonomics*, 90, 103262. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2020.103262>
- Harari, Y., Riemer, R. ve Bechar, A. (2018). Factors determining workers' pace while conducting continuous sequential lifting, carrying, and lowering tasks. *Applied Ergonomics*, 67, 61-70. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2017.09.003>
- Hu, B., Ma, L., Zhang, W., Salvendy, G., Chablat, D. ve Bennis, F. (2011). Predicting real-world ergonomic measurements by simulation in a virtual environment. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 41(1), 64-71. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2010.10.001>
- Kara, Y., Atasagun, Y., Gökçen, H. Hezer, S. ve Demirel N. (2014). An integrated model to incorporate ergonomics and resource restrictions into assembly line balancing. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 27(11), 997-1007. Doi: <https://doi.org/10.1080/0951192X.2013.874575>
- Kumar, M. ve Singh, B. (2018). Ergonomic analysis of electric auto rickshaw using Catia. *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development (IJMPERD)*, 8(3), 209-216. Erişim adresi: <http://www.tjprc.org/publishpapers/2-67-1524890929-24.IJMPERDJUN201824.pdf>
- Kushwaha, D. K. ve Kane, P. (2016). Ergonomic assessment and workstation design of shipping crane cabin in steel industry. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 52, 29-39. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2015.08.003>
- Li K. W., Chu J. C. ve Chen C. C. (2019). Strength decrease, perceived physical exertion and endurance time for backpacking tasks. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(7),1296. Doi: <https://doi.org/10.3390/ijerph16071296>
- Liang, D., Sun, G. Z. ve Wu, S. (2016). The ergonomics analysis in the process of reversed loader cylinder virtual assembly based on CATIA and DELMIA. *MATEC Web of Conferences*, 44, 02020. Doi: <https://doi.org/10.1051/mateconf/20164402020>
- Nussbaum, M. A. ve Chaffin, D. B. (1999). Effects of pacing when using material handling manipulators. *Human Factors*, 41(2), 214-225. Doi: <https://doi.org/10.1518%2F001872099779591240>
- Stecke K. E. ve Mokhtarzadeh M. (2022). Balancing collaborative human-robot assembly lines to optimise cycle time and ergonomic risk, *International Journal of Production Research*, 60(1), 25-47. Doi: <https://doi.org/10.1080/00207543.2021.1989077>
- Top, N. Başak, H. ve Şahin, İ. (2021). Biyomimetik tabanlı fonksiyonel yürüteç tasarımı ve dijital insan modelleme ile ergonomik analizi. *El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi*, 8(2), 618-634. Doi: <https://doi.org/10.31202/ecjse.854770>

**Ekler****Ek-1.** Vücut duruşunun korunması denklemleri:

$$\text{Oturma} \quad \dot{E} = 0,023 \text{ BW} \quad (2)$$

$$\text{Ayakta durma} \quad \dot{E} = 0,024 \text{ BW} \quad (3)$$

$$\text{Ayakta durma, bel eğik} \quad \dot{E} = 0,028 \text{ BW} \quad (4)$$

**Ek-2.** İşlerin net Metabolik maliyetleri denklemleri:Eğilerek kaldırma (kcal/kaldırma)  $\rightarrow h_1 < h_2 \leq 0,81$ 

$$\Delta E = 10^{-2}[0,325 \text{ BW} (0,81-h_1) + (1,41L + 0,76S \times L)(h_2-h_1)] \quad (5)$$

Çömelerek kaldırma (kcal/kaldırma)  $\rightarrow h_1 < h_2 \leq 0,81$ 

$$\Delta E = 10^{-2}[0,514 \text{ BW} (0,81-h_1) + (2,19L + 0,62S \times L)(h_2-h_1)] \quad (6)$$

Tek elle kaldırma (kcal/kaldırma)  $\rightarrow h_1 < h_2 \leq 0,81$ 

$$\Delta E = 10^{-2}[0,352 \text{ BW} (0,81-h_1) + 3,03L (h_2-h_1)] \quad (7)$$

Kol gücüyle kaldırma (kcal/kaldırma)  $\rightarrow 0,81 < h_1 < h_2$ 

$$\Delta E = 10^{-2}[0,062 \text{ BW} (h_2-0,81) + (3,19L - 0,52S \times L)(h_2-h_1)] \quad (8)$$

Eğilerek indirme (kcal/indirme)  $\square h_1 < h_2 < 0,81$ 

$$\Delta E = 10^{-2}[0,268 \text{ BW} (0,81-h_1) + 0,675L (h_2-h_1) + 5,22S (0,81-h_1)] \quad (9)$$

Çömelerek indirme (kcal/indirme)  $\square h_1 < h_2 \leq 0,81$ 

$$\Delta E = 10^{-2}[0,511 \text{ BW} (0,81-h_1) + 0,701L (h_2-h_1)] \quad (10)$$

Kol gücüyle indirme (kcal/indirme)  $\square 0,81 < h_1 < h_2$ 

$$\Delta E = 10^{-2}[0,093 \text{ BW} (h_2-0,81) + (1,02L + 0,37S \times L) (h_2-h_1)] \quad (11)$$

Yürüme (kcal)

$$\Delta E = 10^{-2}(51 + 2,54 \text{ BW} \times V^2 + 0,379 \text{ BW} \times G \times V) \text{ t} \quad (12)$$

Taşıma, kollar iki yanda uzanırken (tek veya iki elde) (kcal)

$$\Delta E = 10^{-2}[80 + 2,43 \text{ BW} \times V^2 + 4,63L \times V^2 + 4,62L + 0,379 (L + \text{BW})G \times V] \text{ t} \quad (13)$$

Taşıma, yük önde bel hizasında veya uyluk hizasında (kcal)

$$\Delta E = 10^{-2}[68 + 2,54 \text{ BW} \times V^2 + 4,08L \times V^2 + 11,4L + 0,379 (L + \text{BW})G \times V] \quad (14)$$

Tutma, yük önde uyluk hizasında veya kollar yanlarda(çift elle) (kcal)

$$\Delta E = 0,037 L \times t \quad (15)$$

Tutma, yük bel hizasında (kcal)

$$\Delta E = 0,062 L \times t \quad (16)$$

Tutma, tek elde kol uzunluğunda (kcal)

$$\Delta E = 0,088 L \times t \quad (17)$$

İtme/çekme, masa yüksekliğinde(0,8 metre)(kcal/itme)

$$\Delta E = 10^{-2} X (0,112 \text{ BW} + 1,15F + 0,505 S \times F) \quad (18)$$

İtme/çekme, 1,5 metre yükseklikte (kcal/itme)

$$\Delta E = X (0,086 + 0,036F) \quad (19)$$

Kolların yanal hareketi, 180 derece, çift elle(kcal/yanal kol hareketi)

$$\Delta E = 10^{-2} (0,11 \text{ BW} + 0,726L) \quad (20)$$

Kolların yanal hareketi, 180 derece, tek elle(kcal/yanal kol hareketi)

$$\Delta E = 10^{-2} (0,097 BW + 0,946L) \quad (21)$$

Kolların yanal hareketi, 90 derece, ayakta, tek veya çift elle(kcal/yanal kol hareketi)

$$\Delta E = 10^{-2} (3,31 + 0,629L + 0,143S \times L) \quad (22)$$

Kolların yanal hareketi, 90 derece, oturarak, çift elle(kcal/yanal kol hareketi)

$$\Delta E = 10^{-2} (3,5 + 0,682L + 0,321S \times L) \quad (23)$$

Kolların yanal hareketi, 90 derece, oturarak, tek elle(kcal/yanal kol hareketi)

$$\Delta E = 10^{-2} (2,54 + 1,1L + 0,248S \times L) \quad (24)$$

Kolların ileri hareketi, ayakta, tek veya çift elle(kcal/kol hareketi)

$$\Delta E = 10^{-2} X (3,57 + 1,23L) \quad (25)$$

Kolların ileri hareketi, oturarak, tek veya çift elle(kcal/kol hareketi)

$$\Delta E = 10^{-2} X (6,3 + 2,71L) \quad (26)$$

### Semboller

$\bar{E}_{i\dot{s}}$	İşin ortalama enerji sarfiyat hızı (kcal/dk)
$\dot{E}_{pos}$	i.postürün korunması için gerekli metabolik enerji sarfiyat hızı (kcal/dk)
$t_i$	i.postürün süresi (dk)
$n_i$	İşte gerçekleşen postürlerin topları
$\Delta E_{görevi}$	Durağan halde i.görevin net metabolik enerji sarfiyatı (kcal)
$n$	Verilen işteki toplan görev sayısı
$T$	İşin süresi (dk)
$\dot{E}$	Metabolik hız (kcal / dk)
$\Delta E$	Yürüme, taşıma ve tutma işleri için kcal. Tüm diğer işler için kcal/performans
BW	Vücut ağırlığı
F	Eller tarafından uygulanan ortalama itme/çekme kuvveti (kg)
G	Yürüme zemininin eğimi (%)
$h_1$	Yerden dikey yükseklik (m); kaldırma işinde başlangıç, indirme işinde bitiş noktası
$h_2$	Yerden dikey yükseklik (m); kaldırma işinde bitiş, indirme işinde başlangıç noktası
L	Yükün ağırlığı (kg)
S	Cinsiyet; erkekler için 1; kadınlar için 0
V	Yürüme hızı (m/s)
X	Yükün yatay hareketi (m)
t	Zaman (dakika)