



## Analysis of working postures in a wiring harness conveyor line with AnyBody Modeling System and design proposal of a new line

Demet Gönen Ocaktan<sup>1\*</sup>, Hilal Atıcı Ulusu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Industrial Engineering Department, Balıkesir University, Balıkesir, 10145, Turkey

<sup>2</sup>Industrial Engineering Department, Bursa Uludağ University, Bursa, 16059, Turkey

### Highlights:

- A case study conducted in assembly conveyor line of a real automotive company
- A novel conveyor line design which can move in accordance with the operators
- Use of virtual human modelling system on assembly conveyor line

### Keywords:

- Musculoskeletal disorders
- AnyBody Modelling System
- Postural disorders

### Article Info:

Research Article  
Received: 08.09.2020  
Accepted: 18.01.2021

### DOI:

10.17341/gazimmfd.791702

### Acknowledgement:

This study was supported by The Ministry of Industry and Technology of Republic of Turkey [grant number 0650.STZ.2014]. The authors thank Nursan Wiring Harness Inc. for their contributions.

### Correspondence:

Author: Demet Gonen Ocaktan  
e-mail:  
dgonen@balikesir.edu.tr  
phone: +90 266 612 1194

### Graphical/Tabular Abstract

**Table A.** Comparative AMS analyses of working postures of employees in the current, designed and manufactured conveyor lines

AMS analyses results for the current situation					AMS analyses results for the proposed situation (design) before manufactured				AMS analyses results for the new line manufactured and put into use					
Working postures	Max. muscle activity (%)	L4-L5 joint reaction force(N)	Glenohumeral joint reaction force(N)		Working postures	Max. muscle activity (%)	L4-L5 joint reaction force(N)	Glenohumeral joint reaction force(N)		Working postures	Max. muscle activity (%)	L4-L5 joint reaction force(N)	Glenohumeral joint reaction force(N)	
			Left	Right				Left	Right				Left	Right
	43	1656	149	163		23	623	110	110		22	691	129	129
	54	1237	135	109		19	576	89	89		19	639	106	106

**Purpose:** The aim of this study is to ergonomically analyze a wiring harness assembly line and propose a new design to reduce the physical strain of the employees.

### Theory and Methods:

Ergonomically unsuitable working postures are encountered in labor-intensive companies. These postures affect the performance, quality, costs, and productivity. In this study, a wiring harness conveyor line was investigated. AnyBody Modeling System was used to evaluate the stress on the muscles caused by unsuitable postures. Kinematic analyses were performed on the current conveyor line, new design and the prototype.

### Results:

The initial analyses demonstrated high joint reaction forces in the trunk, shoulders, arms, and legs, which can cause musculoskeletal disorders. Therefore, a new conveyor line design that can reduce the physical workload on operators is proposed. The working postures in the proposed design were analyzed, and the new design significantly improved the working postures. Decrease in joint reaction forces of up to 59% in the trunk, 69% in the shoulders and 46% in the legs was detected.

### Conclusion:

The validated conveyor was manufactured, and final analyses showed that the workload on the trunk, shoulders, arms, and legs was decreased. This produced prototype is thought to be a useful example for other similar conveyor lines.



## Bir kablo demetleme konveyör hattındaki çalışma duruşlarının AnyBody Modelleme Sistemi ile analizi ve yeni bir hat tasarımı önerisi

Demet Gönen Ocaktan<sup>1\*</sup>, Hilal Atıcı Ulusu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 10145 Çağış Balıkesir, Türkiye

<sup>2</sup>Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 16059, Nilüfer Bursa, Türkiye

### Ö N E Ç İ K A N L A R

- Bir otomotiv şirketinin montaj konveyör hattında yürütülen bir vaka çalışması
- Operatörlere göre hareket edebilen yeni bir konveyör hattı tasarımı
- Montaj konveyör hattında sanal insan modelleme sisteminin kullanılması

### Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 08.09.2020

Kabul: 18.01.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.791702

### Anahtar Kelimeler:

Kas-iskelet sistemi rahatsızlıkları, AnyBody Modelleme Sistemi, duruş bozuklukları

### ÖZ

Emek yoğun işletmelerde ergonomik açıdan uygun olmayan bazı çalışma duruşlarıyla karşılaşmaktadır. Üretimde bu çalışma duruşları performans, kalite, maliyet ve verimlilik üzerinde olumsuz etki oluşturmaktadır. Bu çalışmada, otomobiller için komple kablo demetleme işlemi yapan bir firmada, kablo demetleme konveyör hattı incelenmiştir. Uygun olmayan duruşların kaslarda yarattığı zorlanmayı değerlendirmek için AnyBody Modelleme Sistemi kullanılmıştır. Analizlerde gövde, omuz, kol ve bacaklarda kas-iskelet sistemi rahatsızlıklarına neden olabilecek yüksek eklem reaksiyon kuvvetleri oluştuğu görülmüştür. Bu nedenle, operatörler üzerindeki iş yükünü azaltabilecek yeni bir konveyör hattı tasarımı önerilmiştir. Önerilen tasarımdaki çalışma duruşları analiz edilmiş ve yeni tasarımın operatörlerin çalışma duruşlarını önemli ölçüde iyileştirdiği tespit edilmiştir. Ardından prototip konveyör hattı üretilerek, bu hat üzerinde de çalışma duruşları incelenmiştir. Analizler ile doğrulanan konveyör hattının imalatı gerçekleştirilmiştir. Son analizler gövde, omuz, kol ve bacaklar üzerindeki iş yükünün azaldığını göstermektedir. Elde edilen kazanımlar ortaya konulduğunda bu imal edilen prototip hattın işletmedeki diğer hatlar için de örnek olduğu ve benzer konveyör hatlarına da uygulanabileceği sonucuna varılmıştır.

## Analysis of working postures in a wiring harness conveyor line with AnyBody Modeling System and design proposal of a new line

### H I G H L I G H T S

- A case study conducted in assembly conveyor line of a real automotive company
- A novel conveyor line design which can move in accordance with the operators
- Use of virtual human modelling system on assembly conveyor line

### Article Info

Research Article

Received: 08.09.2020

Accepted: 18.01.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.791702

### Keywords:

Musculoskeletal disorders, AnyBody Modeling System, postural disorders

### ABSTRACT

Ergonomically unsuitable working postures are encountered in labor-intensive companies. These postures in production have a negative affect on the performance, quality, costs, and productivity. In this study, a wiring harness conveyor line was investigated in a company that performs complete wiring harness for automobiles. To evaluate the stress on the muscles caused by unsuitable postures, the AnyBody Modeling System was used. The analysis demonstrated excessively high joint reaction forces in the trunk, shoulders, arms, and legs, which can cause musculoskeletal disorders. Therefore, a new conveyor line design that can reduce the workload on operators is proposed. The working postures in the proposed design were analyzed, and the new design significantly improved the working postures. Then, the prototype conveyor line design was produced. Working postures on the produced prototype were also analyzed. The validated conveyor was manufactured, and final analyses showed that the workload on the trunk, shoulders, arms, and legs was decreased. This produced prototype is a useful example for other similar conveyor lines.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Dünya Sağlık Örgütü, kas-iskelet sistemi rahatsızlıkları terimini kaslar, tendonlar, iskelet, kıkırdak, bağlar ve sinirler gibi hareket sistemi elemanlarının sağlık sorunları olarak tanımlamaktadır [1]. Mesleki kas-iskelet sistemi rahatsızlıkları (MKİSR), yapılan işle birlikte zaman içinde gelişen rahatsızlık, enfeksiyon, sakatlık veya kalıcı ağrılar ile karakterize edilen kas, tendon, eklem veya sinir bozukluklarıdır. Bu rahatsızlıklar tekrarlayan ve çalışanı zorlayan hareketler, eğilme, bükülme ve uzanma vb. uygun olmayan çalışma duruşları gibi biyomekanik faktörler ve/veya aşırı yüklenme, yetersiz dinlenme süreleri gibi psikososyal faktörler sonucu oluşmaktadır [2, 3]. MKİSR sebepleri hakkında son yıllarda daha fazla bilgi sahibi olunmakta ve kas iskelet sistemi sağlığı konusunda farkındalık artmaktadır [4]. İşyerlerinde KİSR risklerini azaltmak için katılımcı ergonomik müdahaleler gerçekleştirilmektedir. Ergonomik müdahalelerde çalışma ortamında yeni tasarımlar yapılmakta ve bu sayede birçok farklı iyileştirmeler gerçekleştirilmektedir. Bu müdahale çalışmaları, risk faktörlerini ve çalışan sağlığı üzerindeki etkilerini belirlemek için işyerlerindeki faaliyetleri izlemeyi ve değiştirmeyi içermektedir [5]. MKİSR risk faktörlerine ilişkin nicel değerler, örneğin vücut eğilme açısı ve kas aktivitesi [6] veya omurga basıncı ve omurlar arası kuvvetler [7], müdahale öncesi ve sonrası durumlar için karşılaştırılmaktadır. Müdahaleler sonucunda bu değerlerde etkili düşüşlerin sağlandığı bildirilmiştir. Katılımcı müdahalelerin, risk faktörlerine maruz kalan kişilerin bizzat kendileri tarafından veya bu kişilerin fikirleri dikkate alınarak yapıldığında, daha da etkili bir strateji haline geldiği bilinmektedir [8].

İş yerinde MKİSR'na yol açabilecek sebepler, eklemler üzerinde baskı yaratan hareketler, uygun olmayan çalışma duruşları, statik duruşlar, tekrarlı hareketler ve yetersiz mola süreleridir. Bu tip faaliyetler en çok manuel montaj hatlarında görülmektedir. Montaj hatlarında özellikle tekrarlı hareketler içeren birçok işlem gerçekleştirildiğinden, önemli seviyelerde zorlanma veya uygun olmayan duruşlar doğrudan veya dolaylı olarak MKİSR'na sebep olabilmektedir [9]. Bu nedenle, işin yoğunluğunu emek yoğun operasyonların oluşturduğu manuel montaj hatlarında çalışma duruşlarını iyileştirmek için ergonomik müdahaleler gerçekleştirilmektedir [10, 11]. İmalat sanayinde çok önemli bir yere sahip olan montaj hatları, ergonomik olarak iyileştirildiğinde iş sağlığı ve güvenliği açısından pek çok sorunun önüne geçilmektedir [12-14]. Ergonomi uygulamaları ile yaralanma riskleri azaltılmakta ve fiziksel çalışma koşulları iyileştirilmektedir. Ayrıca montaj hatlarında yapılan bu müdahaleler ile yaralanma, devamsızlık ve sigorta maliyetleri de azalmaktadır [9]. Otomotiv sektöründe yapılan bazı çalışmalarda da bu tip uygulamalardan bahsedilmektedir [14, 15].

Yeni tasarım uygulamalarından önce ve sonra çalışanların KİSR risklerine maruz kalma durumunu değerlendirmek için

sanal insan modelleme, biyomekanik analiz, duruş analizi ve çalışan görüşmeleri gibi birçok analiz yöntemleri kullanılmaktadır. Duruş analizlerinde, fotogrametri ile postural açı değerlendirmeleri yapılarak MKİSR tespit edilebilmektedir [16]. Son 20 yılda, sanal insan modelleme ve biyomekanik analiz için yeni dijital teknolojiler geliştirilmektedir. Bilgisayar destekli analizler ve sanal insan modelleri, son zamanlarda imalat ve montaj işlemlerinin ergonomik iyileştirmesi için de kullanılmaktadır [17, 18]. Montaj görevlerinde kas yorgunluğu seviyelerini [19] ve çalışma duruşlarının yarattığı zorlanma ve yorgunluğu [20, 21] değerlendirmek için sanal insan simülasyon tekniklerinden yararlanılmıştır. Çalışma ortamı koşullarının sanal ortama aktarılması ve biyomekanik modeller oluşturulması yoluyla yapılan uygulamaların KİSR'nın önlenmesine yardımcı olduğu gösterilmiştir [22]. Zhu vd. [23] çalışmalarında, son 5 yıl için, sanal insan modellerinin ana uygulama alanının otomotiv sektörü olduğundan ve ana uygulama türlerinin de montaj/bakım simülasyonları ve değerlendirmeleri olduğundan bahsetmişlerdir.

Bilgisayar destekli ergonomik analiz, tasarım ve müdahale çalışmalarında; sanal insan modellemesi, biyomekanik analiz ve simülasyonlar gerçekleştirilebilen çeşitli yazılımlar kullanılmaktadır. Bu yazılımlar, tasarımları veya sistemleri ergonomik olarak incelemek için kullanılan proaktif araçlardır. Dolayısıyla bir ürün veya üretim aracının ergonomik sorunlarının, üretime veya kullanıma geçmeden önce tespit edilmesi ve çalışma ortamlarına yerleştirilen sanal insan modelleri ile hareket ve duruşların görselleştirilmesi için faydalı olmaktadır [24]. Bu yazılımlardan bazıları 3DSSPP, Siemens PLM Jack, RAMSIS [25], AnyBody Modelleme Sistemi [26], LifeMod ve SammieCAD'dir [27]. Bu tür teknolojiler, yeni ürünlerin veya üretim ortamlarının tasarım sürecinde biyomekanik analiz için bir avantaj sağlamaktadır. Ayrıca sanal insan model animasyonlarına yeni hareket tahmin modelleri eklendikçe, tasarım için dinamik biyomekanik modeller etkinleştirilecektir [28].

Bilgisayar destekli kas-iskelet sistemi simülasyonları için kullanılan AnyBody Modelleme Sistemi (AMS), son yıllarda başarılı ergonomi yazılımlarından biri olarak ortaya çıkmaktadır. AMS, insan vücudunun alt sistemlerinin veya tüm insan vücudunun modellenmesinin yanı sıra detaylı bir kas iskelet sistemi modeli içerdiğinden kas kuvvetlerinin, eklem reaksiyonlarının, mekanik çabanın, verimliliğin ve kullanıcı tarafından belirtilen ölçülerin, tanımlanan hareketler için hesaplanmasını sağlamaktadır [29]. AMS'de kas iskelet sistemi modellerinde tüm alt bileşenlerin kas kuvvetleri ve aralarındaki reaksiyon kuvvetleri hesaplanırken, bu kuvvetlere ait çeşitli grafikler zamana ve açılara bağlı olarak elde edilebilmektedir. Diğer sanal insan modelleme yazılımları genellikle önce eklem kuvvetlerini daha sonra kas kuvvetlerini hesaplarken, AMS'de ters dinamik analiz ve optimizasyon birlikte yapılarak kas ve eklem kuvvetleri aynı anda hesaplanmaktadır [30]. Damsgaard vd. [31], AMS'nin omuzlar ve bel omurları

üzerindeki eklem reaksiyon kuvvetlerinin ve tüm vücudun genel kas aktivitesinin hesaplanmasında kullanıldığından bahsetmektedir. Çalışmada, çalışanların iş esnasında harcadıkları efor, kas aktivitesi ve zorlanma seviyelerinin karşılaştırmaları elde edilmektedir.

AMS, günlük yaşamdaki çoğu duruş ve hareket için vücudun her bölgesinin kas-iskelet sistemi analizinde kullanılmaktadır. Alt ekstremite dikkate alındığında, ayak [32], bacak [33], diz [34] ve kalça bölgelerinin biyomekanik modellerinin oluşturulması; bu bölgelerdeki kuvvetlerin oturma [35], ayağa kalkma [36, 37] ve yürüyüş gibi hareketler için hesaplanmasında AMS kullanılmaktadır. AMS ile yürüme hareketi ve postürü üzerine yapılan çalışmalarda; yürüme sırasında diz eklemleri üzerindeki etkiler [38], ayak bölgesinin kinetik kas aktivitesi ve farklı yürüme duruşları sırasında yer reaksiyon kuvvetleri [39], diz ve kalça eklemlerinin reaksiyon kuvvetleri [40] ve bel omurlarının reaksiyon kuvvetleri [41] incelenmektedir.

AMS'de üst ekstremitte hareketlerinin tahmini için omurga fleksiyon ve ekstansiyonu, lateral fleksiyon ve kol pronasyonu ve supinasyonu dikkate alınmaktadır [29]. Manuel bir işlem sırasında kas aktivasyonundaki herhangi bir değişiklik, hareket yönüne ve örneğin tezgâh yüksekliği gibi çalışma ortamı koşullarına bağlı olarak AMS ile ölçülebilmektedir [42]. Yük kaldırma gibi hareketlerden etkilenebilecek omuzların değerlendirilmesi için AMS'de oluşturulan biyomekanik omuz modelleri ve hareket yakalama sistemleri, omuzlardaki eklem reaksiyon kuvvetlerini ölçmek için kullanılmaktadır [43-45]. Boyun omurgası [46], bel omurgası [47, 48] ve tüm omurganın [49] biyomekanik modelleri, boyun, sırt ve bel ağrısına neden olan yüklerin analizi için AMS'de oluşturulmuştur. Montaj işlerinde görülebilen omurga gerilmeleri AMS kullanılarak değerlendirilebilmekte ve bazı ergonomik müdahaleler ve yeni tasarımlarla ortadan kaldırılabilmektedir [50-52].

Otomobiller ve diğer binek araçlar için tüm elektrikli bileşenler, kablo demeti montaj işlemlerinde birleştirilir ve bu işlemler, otomotiv sektöründeki önemli montaj süreçlerinden birini oluşturmaktadır. Kablo demetleme konveyör hatları, operatörlerin fiziksel boyutlarına bağlı olarak farklı duruşlarda çalışmasını gerektirmektedir. Bu nedenle, bu konveyör hatlarında ergonomik olmayan bazı

çalışma duruşları gözlemlenmektedir. Bununla birlikte, kablo demetleme montaj hatlarında ergonomik olmayan çalışma duruşları ile ilgili çok az ergonomik müdahale çalışması bulunmaktadır. Sugiono vd. [53] çalışmalarında, yalnızca gözlem ve anket yöntemlerine benzer bir ergonomik risk değerlendirme yöntemi uygulayarak, kablo demetleme hattındaki risk faktörlerini azaltmak için basit öneriler geliştirmiştir. Delfs vd. [54] çalışmalarında kablo demeti montaj hatlarında uygun insan duruşları ve hareketleri için ergonomik bir değerlendirme yöntemi önermiştir. Bu yöntem bir otomotiv işletmesinin montaj işlemleri için Jack insan modelleme yazılımı kullanılarak uygulanmıştır. Bu çalışmada ise AMS kullanılarak benzer bir biyomekanik değerlendirme yöntemi ile bir kablo demetleme konveyör hattı incelenecektir.

Bu çalışmanın motivasyonu, otomotiv sektörü için kablo demeti (Şekil 1a) üreten bir işletmenin hareketli konveyör hattında (Şekil 1b) çalışan operatörlerde oluşan ve çalışma duruşlarından kaynaklanan kas-iskelet sistemi rahatsızlıklarını azaltmak ve hatta ortadan kaldırmak için iyileştirmeler yapmak, elde edilen kazanımlar gözönünde bulundurulurken, bu iyileştirmelerin işletmede bulunan diğer montaj hatlarına da uygulanması ile üretim hızını arttırmaktır.

Kablo demeti montaj işlemleri çalışanların uzun süre ayakta durmasını ve fiziksel özelliklerine göre montaj masalarına doğru eğilmesini veya uzanmasını gerektirmektedir. Genellikle sık tekrarlı olan ve ergonomik açıdan uygun olmayan bu çalışma duruşları, çalışanlar üzerinde yüksek iş yüküne neden olmaktadır. Çalışmada uygun olmayan çalışma duruşlarının neden olduğu gövde, omuz-kol bölgesi ve bacaklardaki yükü belirlemek için AMS ile bilgisayar destekli analiz gerçekleştirilmiştir. AMS yazılımı ile zorlanmaları en aza indirecek çalışma duruşları belirlenmiş, her çalışana uygun kişisel montaj masası yüksekliği ve eğim açısı bulunmuştur. Böylelikle, çalışma esnasında uzun boylu çalışan için yüksek, kısa boylu çalışan için düşük yükseklik değerine ve istenilen eğim açısına ayarlanabilen bir montaj masası tasarımı geliştirilmiştir. Geliştirilen tasarım, sanal insan modelleme sistemi AMS yardımıyla analiz edilmiş, çalışma sırasında çalışanların kas aktivasyon değerleri ve eklem reaksiyon kuvvetleri belirlenmiştir. Yeni konveyör hattının kullanıma alınması ile ergonomik olmayan çalışma



**Şekil 1.** Kablo demeti ve kablo demetleme konveyör hattı (Wiring harness and wiring harness conveyor line)

a) Kablo demeti (Wiring harness) b) Konveyör hattı (Conveyor line)

duruşlarının azaltılması ve bunun sonucunda iş gücünde daha sonra oluşabilecek KİSR'nın önlenmesi amaçlanmıştır. Ayrıca montaj hattında yapılan iyileştirmeler ile operatörlere işletme için önemli olduklarının gösterilmesi ve çalışan memnuniyetinin sağlanmasıyla hem iş verimliliğini hem de üretim hızını artırmak, ergonomik olmayan çalışma koşullarının oluşturacağı tedavi maliyetlerini ve iş gücü kayıplarını azaltmak hedeflenmiştir. Bu çalışmanın literatürde hareketli konveyör hatları üzerinde yapılan sınırlı sayıda vaka çalışmasına da katkıda bulunacağı düşünülmektedir.

## 2. MEVCUT KABLO DEMETLEME KONVEYÖR HATTI VE ANALİZLERİ (THE CURRENT WIRING HARNESS CONVEYOR LINE AND THE ANALYSES)

### 2.1. Mevcut Kablo Demetleme Konveyör Hattı (The Current Wiring Harness Conveyor Line)

Kablo demetleme süreci, emek yoğun çalışmayı gerektiren bir süreçtir. Kablo demetleme montaj hatlarında yer alan sekiz montaj masası üzerinde her ürünün farklı araç modelleri için müşterinin istediği projeler yer almaktadır. Montaj masalarında projelere uygun olarak ön hazırlık, kablo döşeme, bantlama ve aksesuar takma işlemleri gerçekleştirilmektedir. Bu işlemler ayakta durarak yapılmaktadır. Ön hazırlık aşamasında, kablo demetinde kullanılacak kablolar gruplama masalarında soketlere takılır (Şekil 2a). İkinci aşamada, birinci aşamada hazırlanan kablolar montaj panoları üzerinde bulunan gösterimlere göre döşenir (Şekil 2b). Bantlama ve aksesuar takma aşamasında, konveyör üzerindeki gösterimlere göre donanım bantları ve

aksesuarları takılır (Şekil 2c). Bu işlemler esnasında konveyör hattı çok yavaş hareket ettiği için, çalışanların ayakta durması ve konveyör hattının hareketine uyum sağlaması gerekmektedir.

İstasyonların iş dağılımı dengelidir ve her bir çalışan eş zamanlı olarak istasyondaki işlerini tamamlayıp diğerine geçmektedir. Analiz edilen konveyör hattındaki tüm çalışanlar, sağ ellerini aktif olarak kullanmaktadır ve demetleme konveyör hattı üzerinde gerçekleştirilen işlemler çalışanların her iki ellerini de kullanmasını gerektirmektedir. Mevcut sistemde montaj panolarının yüksekliği ve eğimi sabittir.

Kablo demetleme konveyör hattında sekiz çalışan vardır. Bu hatta çalışan kadınların boy uzunlukları 161 cm ile 165 cm arasında, erkeklerin boy uzunlukları 163 cm ile 181 cm arasında değişmektedir. Panoların üst kısmının yerden yüksekliği 150 cm'dir. Panonun üst kısmında ya da alt kısmında çalışılırken, çalışanların yana esnemeleri (Şekil 3a), boyu kısa çalışanların masanın üstünde yer alan demetleme işlemleri için yukarıya doğru uzanmaları (Şekil 3b), ya da boyu uzun çalışanların masanın altında yer alan demetleme işlemleri için aşağıya doğru eğilmeleri (Şekil 3c) gerekmektedir. Gün içerisinde tekrarlı olarak yapılan bu hareketler çalışanlarda yorulmalara ve zorlanmalara neden olmaktadır. Ergonomik açıdan uygun olmayan çalışma duruşları kas iskelet sistemi rahatsızlıkları olasılığını artırmakta ve aynı zamanda çalışanın iş performansını da etkilemektedir. Ayrıca eğilerek çalışma esnasında dikkatsizlik sonucu montaj masasında yer alan çatalara çarpma riski bulunmaktadır (Şekil 3d).



**Şekil 2.** Kablo demetleme konveyör hattındaki işlemler (Operations on the wiring harness conveyor line)  
a) Ön hazırlık (Preliminary preparation) b) Kablo döşeme (Cable laying and taping)  
c) Bantlama ve aksesuar takma (Banding and accessory insertion)



**Şekil 3.** a-c. Çalışanların çalışma duruşları (Working postures of the employees) a) Yana esneme (Side stretch) b) Yukarı uzanma (Reaching up) c) Aşağıya eğilme (Bending down) d) Çatallar (Prongs on the panel)

Çalışmada, kablo demetleme konveyör hattında gerçekleştirilen montaj işlemine ait zaman etüdü çalışması, tasarım sonrası elde edilecek kazanımları görmek amacıyla yapılmış ve hattın maksimum istasyon süresi 6,65 dk, ortalama istasyon süresi 6,36 dk ve konveyör hattının toplam süresi 50,87 dk olarak bulunmuştur.

## 2.2. Mevcut Konveyör Hattında AMS Analizleri (AMS Analyses on the Current Conveyor Line)

Bu bölümde mevcut konveyör hattında uygun olmayan çalışma duruşları, insan-makine etkileşimi esnasında kas-iskelet sistemi üzerinde oluşan zorlanmaları belirlemek amacıyla AnyBody Modelleme Sistemi (AMS) ile analiz edilmiştir. AMS'ye girdi olarak verilen hareket bilgisi hareket yakalama (motion capture) sistemleri ile elde edilmiştir. Kablo demetleme konveyör hattında yer alan sekiz montaj sehpasında yapılan işlemler ve çalışma duruşları dört adet kamera ile 30 fps resim karesi hızında kaydedilmiş, insan modelinin montaj hattındaki durumu yansıtması sağlanarak (Şekil 4) statik olarak analiz edilmiştir. Ayrıca antropometrik ölçüler ile çalışanların bel, boyun, kol bölgelerindeki eğilme ve bükülme açıları ölçülmüş, aynı zamanda video kaydı alınmıştır. Toplamda alınan video kaydında yer alan 252 çalışma duruşu içerisinden eğilme ve bükülme açıları fazla olan ve çalışanları en çok zorlayan iki farklı çalışma duruşuna (Şekil 5a ve Şekil 5b) odaklanılmıştır.

İlk çalışanın boy uzunluğu 185 cm, ikinci çalışanın boy uzunluğu 164 cm'dir. Birinci çalışan montaj sehpasının alt kısmında işlem yaparken eğilmektedir (Şekil 5a). İkinci çalışan da işlemler esnasında vücudunu burarak ve hafif eğilerek çalışmaktadır (Şekil 5b). Bu tür hareketler gövdeyi etkileyerek boyun ve bel ağrısına neden olabilir. Bu nedenle, gövde içerisindeki bağlantılar için reaksiyon kuvvetleri hesaplanmıştır. Bel ağrısı için öne çıkan diskler olan bel omurları (L4 ve L5) arasındaki eklem reaksiyon kuvvetleri Şekil 5a- Şekil 5b'deki iki çalışma duruşu için AMS ile sırasıyla 1656 N ve 1237 N olarak belirlenmiştir. Veriler değerlendirildiğinde zorlanma değerlerinin ilk etapta çok yüksek olmadığı düşünülebilmektedir (Örneğin beldeki kuvvetler NIOSH'un bel baskısı için aksiyon sınırı olan 3400

N'dan düşüktür) [55]. Ancak, bu çalışma duruşu gün içerisinde sürekli olarak tekrarlandığında zamanla hissedilen zorlanmanın artması, bel bölgesinde sağlık sorunlarına yol açabilecektir [56].



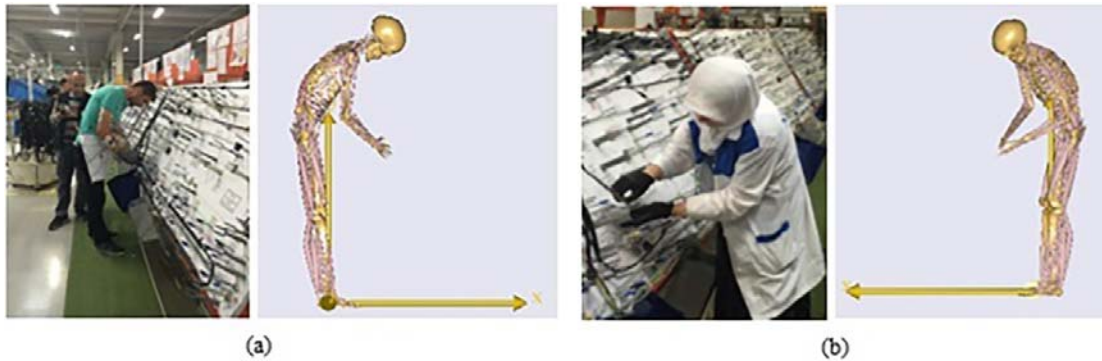
Şekil 4. Çalışanın hareket yakalama sistemi ile elde edilen sanal görüntüsü  
(Virtual image of the employee obtained with the motion capture system)

## 3. YENİ KONVEYÖR HATTININ TASARIMI VE DOĞRULAMA ANALİZLERİ (DESIGN OF THE NEW CONVEYOR LINE AND VERIFICATION ANALYSES)

Mevcut kablo demetleme konveyör hattı için yapılan analizler sonucu, belirlenen zorlanmaları ve yorgunluğu gidermek veya en azından azaltmak için yeni bir kablo demetleme konveyör hattı tasarlanmıştır. Tasarlanan yeni konveyör hattı imal edilmeden önce çalışan duruşları değerlendirilmek üzere AMS'ye aktarılarak analiz edilmiştir. Böylece yeni tasarım, mevcut hat analiz sonuçları ile karşılaştırılarak doğrulanmıştır.

### 3.1. Yeni Konveyör Hattının Tasarımı (Design of the New Conveyor Line)

Yeni kablo demeti konveyör hattının tasarımı SolidWorks yazılımı ile yapılmış ve Şekil 6'da verilmiştir. Yeni tasarımda



Şekil 5. Çalışanları en çok zorlayan mevcut çalışma duruşları (Current working postures that enforce employees the most)  
a) Birinci çalışanın çalışma duruşu (aşağıya eğilme) (First working posture (bending down)) b) İkinci çalışanın çalışma duruşu (eğilme ve bükülme) (Second working posture (twist and bending down))

montaj sehpasının yüksekliği ve eğimi çalışanın boyuna göre ayarlanabilmektedir [57]. Ayrıca, konveyör hattının her istasyonu, şirketin programına uygun olarak üç ayrı projenin farklı zamanlarda çalışmasını sağlayacak üç panel içermektedir. Yazarlar tarafından tasarımı gerçekleştirilen kablo demetleme konveyör hattının tasarım modellerinin yer aldığı Atıcı vd. [57] çalışmasında, tasarım modeli üzerinde AMS analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu tasarımın imalatı sonrası işletmeye alınması durumunda elde edilecek sonuçlar, analiz ile verilmiştir.

### 3.2. Yeni Konveyör Hattının Tasarımı için AMS Analizleri (AMS Analyses on the New Conveyor Line Design)

Çalışma duruşlarını iyileştirmek için tasarlanan kablo demeti konveyör hattının üç boyutlu montaj modeli AMS'ye aktarılmış ve bu tasarım üzerinde çalışan insan modelinin duruşları incelenmiştir (Şekil 7).

Konveyör hattında yer alan masaların yükseklik ve eğim açılarına göre çalışanların duruşları AMS'de analiz edilmiş ve elde edilen sonuçlar Tablo 1'de verilmiştir. Analizlerde kas aktivasyon seviyesi, yorulma ile direkt ilişkilendirilebilen bir veri olduğu için çalışanın yorulması ve verimi hakkında bilgi edinilmesi amacı ile kullanılmıştır [52]. Maksimum kas aktivitesi, kas aktivasyon seviyesinin

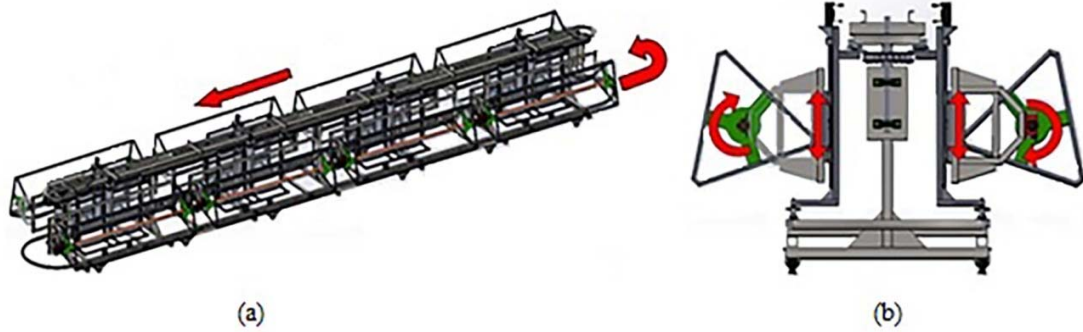
yüzde değeri olarak alınmaktadır. Çalışma duruşlarında L4-L5 eklem reaksiyon kuvvet değerleri ve sol-sağ olmak üzere omuz-kol bölgeleri değerlendirilmiştir.

Konveyör yeni tasarımda operatörlere göre hareket edebildiğinden, bükülme ve uzanma hareketleri kaldırılmıştır. Bu durumda, maksimum kas aktivitesi, L4-L5 ve omuz eklemi reaksiyon kuvvetleri mevcut durumdan daha düşük ve öngörülen değerlere yakın bulunmuştur.

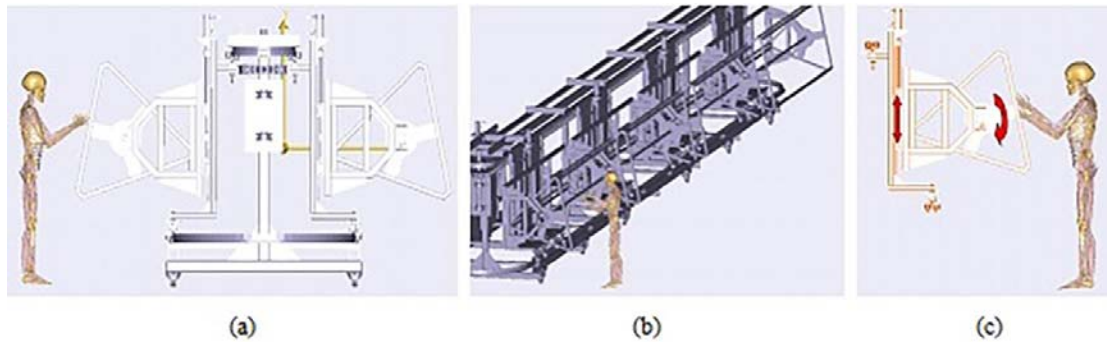
Tablo 1 incelendiğinde; karşılaştırılan iki çalışma duruşunda gözlenen eklem reaksiyon kuvvetlerinin, önerilen tasarımın hayata geçirilmesi ile azalacağı görülmektedir. Yapılan işin gün içerisinde sürekli olarak tekrarlandığı düşünüldüğünde tasarımı gerçekleştirilen konveyör hattının imal edilmesi ile çalışma duruşlarındaki eğilme ve/veya uzanmaların ortadan kaldırılacağı ve çalışanlara daha konforlu bir çalışma ortamı yaratılacağı öngörülmektedir.

## 4. YENİ KABLO DEMETLEME KONVEYÖR HATTI İMALATI VE ANALİZLERİ (MANUFACTURING OF THE NEW WIRING HARNESS CONVEYOR LINE AND ANALYSES)

Bu bölümde, AMS ile ergonomik doğrulaması yapılan yeni tasarım kablo demetleme konveyör hattının prototip imalatı







**Şekil 6.** Kablo demetleme konveyör hattının bilgisayar destekli tasarımına ait çizimler (Computer-aided design drawings of the wiring harness conveyor line) a) Konveyör hattı perspektif görünüşü (Perspective view of the conveyor line) b) Konveyör hattı ön görünüşü (Front view of conveyor line)



**Şekil 7.** Tasarlanan konveyör hattında çalışma duruşları (Working postures of the human model on the conveyor line design) a) Hattın sol yan görünüşü (Left side view of the conveyor line) b) Hattın perspektif görünüşü (Perspective view of the conveyor line) c) Masa (yükseklik-eğim ayarları) (Assembly panel (height-inclination setting))

**Tablo 1.** Mevcut ve önerilen konveyör hattında çalışanların çalışma duruşlarının karşılaştırmalı AMS analizleri  
(Comparative AMS analyses of working postures of employees in the current and proposed conveyor lines)

Mevcut duruma ait AMS analiz sonuçları					Önerilen duruma (tasarıma) ait AMS analiz sonuçları				
Çalışma duruşları	Maksimum kas aktivitesi (%)	L4-L5 Eklem Reaksiyon Kuvveti (N)	Sol Glenohumeral Eklem Reaksiyon Kuvveti (N)	Sağ Glenohumeral Eklem Reaksiyon Kuvveti (N)	Çalışma duruşları	Maksimum kas aktivitesi (%)	L4L-5 Eklem Reaksiyon Kuvveti (N)	Sol Glenohumeral Eklem Reaksiyon Kuvveti (N)	Sağ Glenohumeral Eklem Reaksiyon Kuvveti (N)
	43	1656	149	163		23	623	110	110
	54	1237	135	109		19	576	89	89

gerçekleştirilmiş ve prototip hat üzerinde analizler yapılmıştır.

#### 4.1. Üretim Aşaması (The Manufacturing Phase)

Kablo demetleme konveyör hattı oluşturulurken montaj masalarının hareketli oluşu nedeniyle masalardaki hareketi sağlayacak servo motorlara enerji iletimi için busbar sistemi kullanılmıştır (Şekil 8a). Sistemden enerjiyi masaya aktaran kontak elemanı Şekil 8.b'de verilmiştir. Servo motorlara sinyal gönderme işlemi için kablosuz iletişim sistemlerinden yararlanılmıştır. Bu amaçla her masada bulunan sürücü devre sistemi kablosuz modem ile desteklenerek servo motorlara veri iletişimi gerçekleştirilmiştir (Şekil 8c).

Prototip konveyör hattı şu şekilde çalışmaktadır. Formen, sürücü panosundan işgörenin çalışacağı masa için çalışanın verilerini girmektedir. Veri olarak çalışanların dirsek yükseklikleri ve masa eğim açıları girilmiştir. Masa eğim açıları belirlenirken, montaj masalarının üst kısmında yapılacak işlemlerde çalışanların erişim uzaklıkları dikkate alınarak öne doğru uzanmalarının azaltılması hedeflenmiştir. Açılar, çalışanların masada çalışacağı alanlara göre belirlenir. Masaların alt yükseklikleri 550 ile 870 mm arasında ayarlanmıştır. Çalışana uygun yükseklik seçimi için masa ağırlık merkezi çalışanın dirsek yüksekliğine eşit olacak şekilde belirlenmiştir. Masa eğimi de çalışanın boyuna göre değişmektedir. Çalışanın uzanma veya eğilme hareketini ortadan kaldırmak amacıyla eğim açıları, çalışana uygun olarak ayarlanmıştır. Masalarda çalışacak işgönerlerin boyutsal verilerinin girilmesi ile masa yüksekliği ve eğim açısı girilen veriye göre değişmektedir. Veri giriş işlemleri dokunmatik ekran üzerinden ayarlanmaktadır. Ekrandan girilen veriler WI-FI modem ile ana kontrol panosuna aktarılmaktadır. Ana kontrol panosunda işlemcilerden geçen

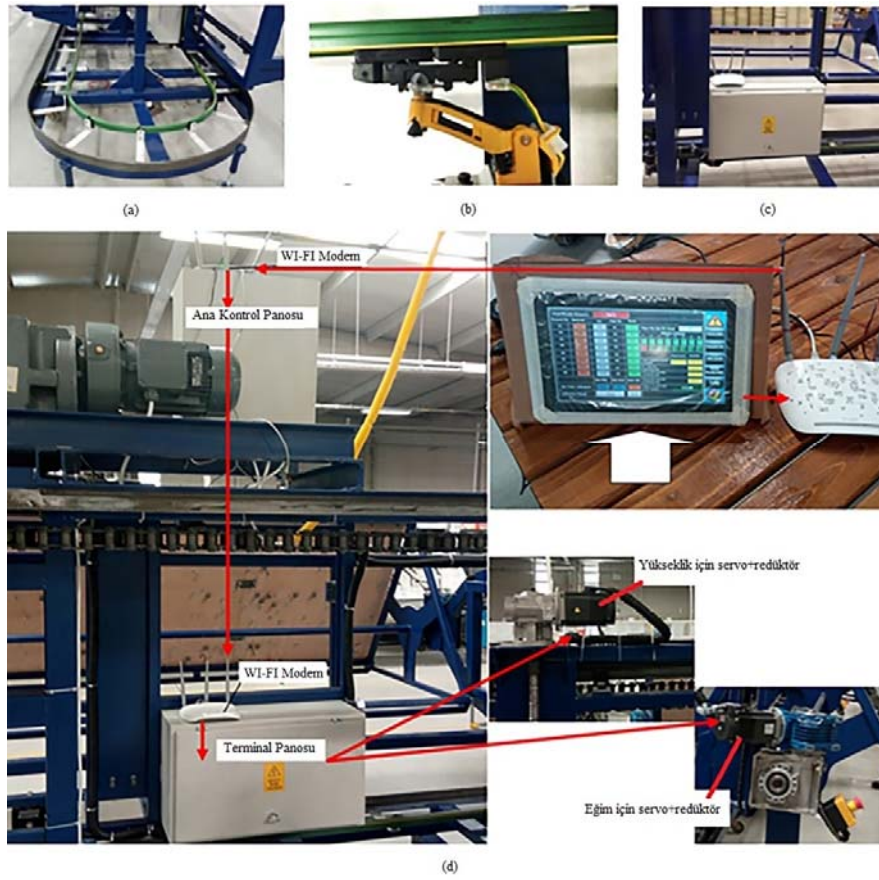
komut yine WI-FI aracılığı ile kablosuz olarak terminal panolarına iletilmektedir. Veri iletişimi için IP adresleri kullanılmaktadır. Terminal denetim masalarından alınan sinyaller servo motorlara aktarılmaktadır. Bu işlemlerin sonunda masa yükseklik ve eğim açısı çalışana uygun olarak otomatik ayarlanabilmektedir. Sistemin şematik gösterimi Şekil 8d'de verilmiştir.

#### 4.2. İmal Edilen Prototip Konveyör Hattında AMS Analizleri (AMS Analyses on the Prototype Conveyor Line Manufactured)

Firmanın mevcut üretim hatlarında masa yüksekliği ve eğimi sabittir. Herhangi bir şekilde yükseklik ve eğim açısı ayarlaması yapılamamaktadır. Bu çalışma ile masa yüksekliği ve eğim açısının kişiselleştirilebilmesiyle daha konforlu bir çalışma ortamı oluşturulmuştur. Geliştirilen sistemde masa yüksekliğinin ve eğiminin ayarlanabilir olması sayesinde, uzun boylu ve kısa boylu çalışan aynı masa yüksekliğinde ve eğimde çalışmak zorunda kalmamıştır (Şekil 9).

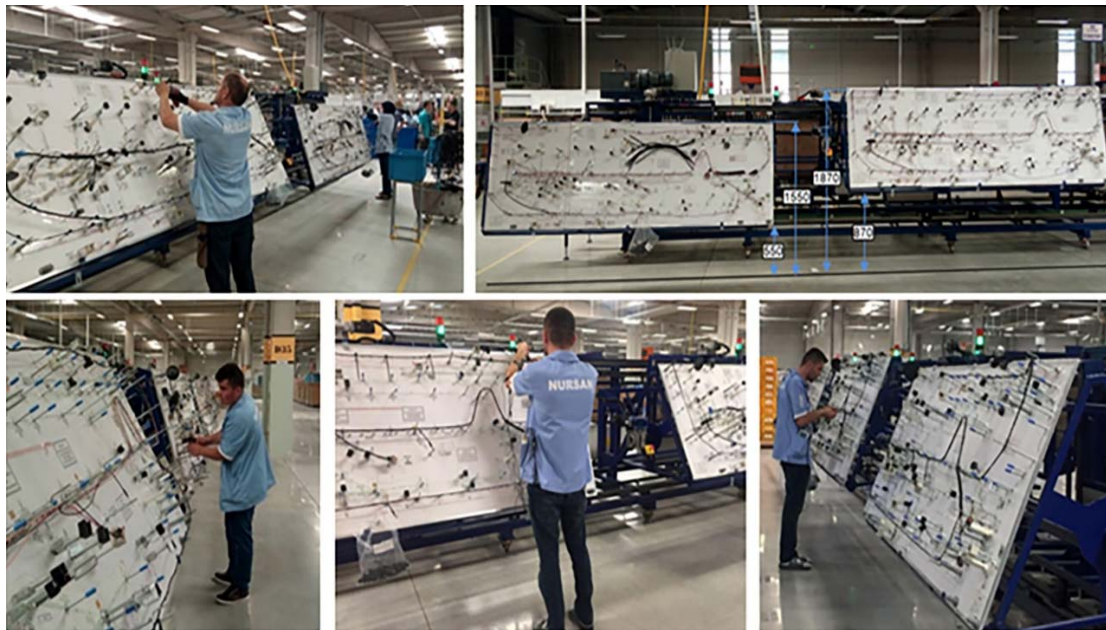
Kişiyeye özel ayarlanabilir konveyörlü montaj sisteminin devreye alınmasıyla, kablo demetleme konveyör hattında montaj işlemine ait zaman etüdü çalışması dört çalışan ile tekrarlanmıştır. İşlemin dört çalışan ile yapılmasının nedeni, sekiz hat çalışanından dördü ya farklı bir hatta yönlendirilmiş ya da işten ayrılmıştır. Zaman etüdü için işlerine devam eden dört çalışanın her biri iki montaj masasında çalışmak üzere görevlendirilmiştir. Çalışanlara yeni hatta ergonomik olarak nasıl çalışacakları konusunda eğitim verilmiş ve eğitimden sonra mevcut hatta yapılan tüm analizler tekrarlanmıştır. Prototip hat için yapılan zaman etüdü çalışmasına göre; hatta gerçekleştirilen işlemlerin maksimum çevrim süresi 9,99 dk, ortalama çevrim süresi 7,25 dk ve konveyör hattı üzerindeki operasyonlar için





**Şekil 8.** Konveyör hattının çalışmasına ait görüntüler (Images related to the operation of the conveyor)

- a) Busbar sistemi (Busbar system) b) Kontak elemanı (Connection element) c) Kablosuz modem ve sürücü panosu (Wireless modem and driver panel) d) Sistemin şematik gösterimi (Schematic representation of the system)



**Şekil 9.** Prototip kablo demetleme konveyör hattı (Prototyping wiring harness conveyor line)

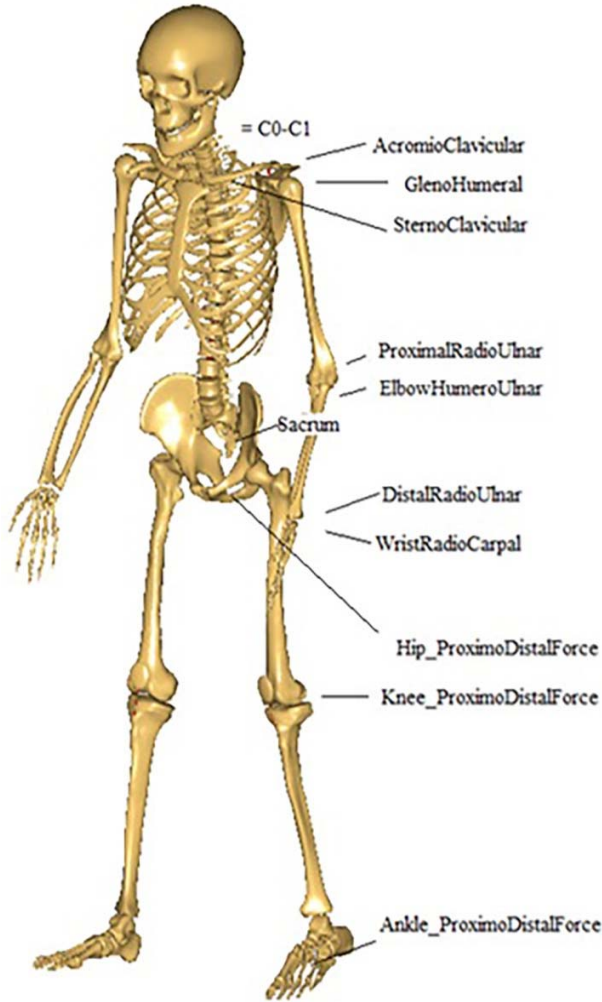
toplam süre 58 dk olarak bulunmuştur. Mevcut ve prototip hat karşılaştırıldığında; mevcut hattın toplam çevrim süresi

51 dk ve günlük üretim miktarı 67,7 adettir. Prototip konveyör hattının toplam çevrim süresi 58 dk ve günlük

**Tablo 2.** Mevcut ve yeni kablo demetleme konveyör hattının karşılaştırması  
(Comparison of current and new wiring harness conveyor line)

	Çalışan sayısı	Maksimum çevrim süresi (dk)	Ortalama çevrim süresi (dk)	Toplam süre (dk)	Günlük üretim miktarı (adet)
Mevcut konveyör hattı	8	6,65	6,36	51	67,7
Yeni konveyör hattı	4	9,99	7,25	58	45

üretim 45 birimdir. Çalışan sayısının yarıya indiği düşünüldüğünde aradaki zaman farkının fazla olmadığı, hatta işgücü kazancının olduğu görülmektedir (Tablo 2). Çalışanların yeni konveyör hattına alışmaları ile performanslarının artması beklenmektedir.

**Şekil 10.** AMS ile analiz edilen reaksiyon kuvvetleri  
(Reactions forces analyzed with AMS)

Üretimi gerçekleştirilen ve kullanıma alınan yeni kablo demetleme konveyör hattında üretim öncesi önerilen duruma (tasarıma) ait AMS analizleri tekrarlanmış ve analiz sonuçlarının gövde bölgesi için yaklaşık %10, omuz-kol

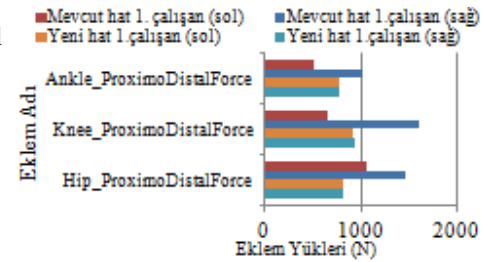
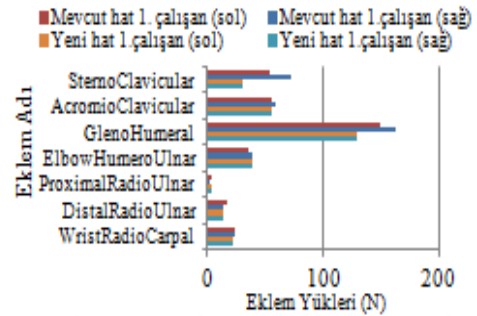
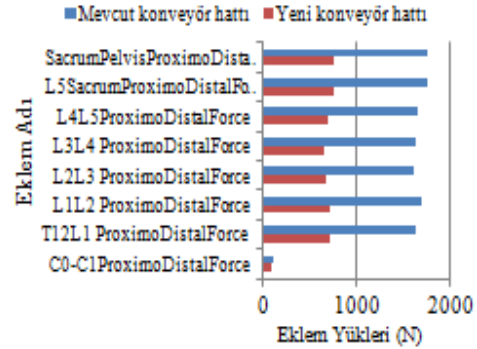
bölgesi için yaklaşık %19 oranında farkla birbirine yakın olduğu görülmüştür. Üretimi gerçekleştirilen ve faaliyete alınan kablo demetleme konveyör hattında çalışanların çalışma duruşları daha detaylı şekilde AMS ile kinematik ve ters dinamik olarak analiz edilmiştir. Çalışanlarda uzanma hareketleri gövde, omuz-kol eklemlerini etkilediğinden hem sağ hem de sol omuz-kol eklemleri için ortalama eklem reaksiyon kuvvetlerine bakılmıştır. Ayrıca ayakta durma pozisyonu bacakları etkilediğinden, operatörlerin bacak bölgesindeki eklem yükleri AMS ile hesaplanmıştır. İncelenen eklem reaksiyon kuvvetleri Şekil 10'da ve elde edilen sonuçlar birinci çalışan için Tablo 3'de, ikinci çalışan için de Tablo 4'de verilmiştir. Ayrıca tablolarda yeni konveyör hattı ile eklem yüklerindeki azalma oranları da yer almaktadır.

Tablo 3 ve Tablo 4'de birinci ve ikinci çalışanın mevcut ve önerilen konveyör hattı için gövde bölgesindeki eklem kuvvetleri incelendiğinde, her iki çalışma duruşu için mevcut hatta daha yüksek eklem reaksiyon kuvvetlerinin olduğu gözlenmiştir. Önerilen yeni hat ile çalışma duruşları analiz edildiğinde gövde bölgesinde oluşan eklem kuvvetlerinde birinci çalışanda yaklaşık %59 oranında azalmanın olduğu, bu iyileşmenin ikinci çalışan için %49 oranında olduğu görülmüştür. Her iki çalışanın önerilen yeni hatta çalışmaları durumunda bilek, dirsek ve omuz eklemlerinde daha az zorlanma olduğu görülmektedir. Omuz-kol eklem yükleri birinci çalışan için yaklaşık %42, ikinci çalışan için %69 oranında iyileşme göstermiştir. Birinci çalışan eğilerek çalıştığı için gövdesinde daha çok zorlanma gözlenir. İkinci çalışan vücudunu burarak ve eğilerek çalıştığı için omuz ekleminde zorlanmalar daha fazladır. Her iki çalışanın bacak bölgesindeki eklem reaksiyon kuvvetleri değerlendirildiğinde, yeni konveyör hattı için eklem reaksiyonlarında azalma meydana gelmiştir. Birinci çalışanın sağ bacağı için, mevcut durumda kalça, diz ve ayak bileklerine daha çok zorlanma olduğu gözlenmiştir. Bu yüklerin önerilen tasarımla kalçada %44, dizde %42 ve bilekte %24 oranında azaldığı görülmüştür. Birinci çalışanın sol bacağına kalça, diz ve ayak bileklerinde sırasıyla %44, %42 ve %22 oranında azalma olmuştur. İkinci çalışanın sağ bacağı için mevcut durumda kalça, diz ve ayak bileği eklem kuvvetlerinin daha fazla olduğu belirlenmiştir. Bu kuvvetler önerilen tasarımla kalçada yaklaşık %52, dizde %21 ve bilekte %9 oranında azalmıştır. İkinci çalışanın sol bacağına bu oranlardaki azalmanın sırasıyla yaklaşık %46, %37 ve %19 olduğu görülmüştür.

**Tablo 3.** Birinci çalışanın mevcut ve yeni konveyör hattı için eklem reaksiyon kuvvetlerinin karşılaştırılması ve yeni hatta eklem kuvvetlerindeki azalma oranı

(Comparison of the first employee's joints reaction forces for the current and new conveyor line and the rate of reduction in joint forces on the new line)

Çalışanlarda analiz edilen eklem reaksiyon kuvvetleri	Mevcut Konveyör Hattı		Yeni Konveyör Hattı		Yeni Konveyör Hattı İle Eklem Yüklerinin Azalma Oranı (%)
	Eklem kuvvetleri (N)		Eklem kuvvetleri (N)		
Gövde için; C0-C1, T12L1, L1L2, L2L3, L3L4, L4L5, L5 ve Sacrum değerlerine,					
Omuz-kol bölgeleri için; Wrist Radio Carpal, Distal Radio Ulnar, Proximal Radio Ulnar, Elbow Humero Ulnar, Gleno Humeral, Acromio Clavicular ve Sterno Clavicular değerlerine,					
Bacak bölgesi için; Hip_Proximo Distal Force, Knee_Proximo Distal Force ve Ankle_Proximo Distal Force değerlerine bakılmıştır.					
Gövde içerisindeki bağlantılar			Mevcut-Yeni Hat Karşılaştırma Grafikleri		
C0-C1ProximoDistalForce	109	105			4
T12L1 ProximoDistalForce	1634	713			56
L1L2 ProximoDistalForce	1703	716			58
L2L3 ProximoDistalForce	1618	684			58
L3L4 ProximoDistalForce	1635	664			59
L4L5ProximoDistalForce	1656	691			58
L5SacrumProximoDistalForce	1765	755			57
SacrumPelvisProximoDistalForce	1758	755			57
Omuz-kol bölgesindeki bağlantılar	Sağ Sol		Sağ Sol		
WristRadioCarpal	23	24	22	22	8
DistalRadioUlnar	14	16	14	14	13
ProximalRadioUlnar	2	3	4	4	13
ElbowHumeroUlnar	38	35	39	39	1
GlenoHumeral	163	149	129	129	42
AcromioClavicular	59	56	56	56	44
SternoClavicular	72	53	31	31	42
Bacak bölgesindeki bağlantılar			Sağ Sol		
Hip_ProximoDistalForce	1464	1447	812	811	44
Knee_ProximoDistalForce	1601	1572	922	916	42
Ankle_ProximoDistalForce	1016	977	769	761	24



**Tablo 4.** İkinci çalışanın mevcut ve yeni konveyör hattı için eklem reaksiyon kuvvetlerinin karşılaştırılması ve yeni hatta eklem kuvvetlerindeki azalma oranı (Comparison of the second employee's joints reaction forces for the current and new conveyor line and the rate of reduction in joint forces on the new line)

Çalışanlarda analiz edilen eklem reaksiyon kuvvetleri	Mevcut Konveyör Hattı		Yeni Konveyör Hattı İle Eklem Yüklerinin Azalma Oranı (%)	Gövde için; C0-C1, T12L1, L1L2, L2L3, L3L4, L4L5, L5 ve Sacrum değerlerine, Omuz-kol bölgeleri için; Wrist Radio Carpal, Distal Radio Ulnar, Proximal Radio Ulnar, Elbow Humero Ulnar, Gleno Humeral, Acromio Clavicular ve Sterno Clavicular değerlerine, Bacak bölgesi için; Hip_Proximo Distal Force, Knee_Proximo Distal Force ve Ankle_Proximo Distal Force değerlerine bakılmıştır.			
	Mevcut Konveyör Hattı Eklem kuvvetleri (N)	Yeni Konveyör Hattı Eklem kuvvetleri (N)					
Gövde içerisindeki bağlantılar				Mevcut-Yeni Hat Karşılaştırma Grafikleri			
C0-C1ProximoDistalForce	115	109	5				
T12L1 ProximoDistalForce	1202	627	48				
L1L2 ProximoDistalForce	1229	640	48				
L2L3 ProximoDistalForce	1185	622	48				
L3L4 ProximoDistalForce	1187	607	49				
L4L5ProximoDistalForce	1237	639	48				
L5SacrumProximoDistalForce	1329	708	47				
SacrumPelvisProximoDistalForce	1325	708	47				
Omuz-kol bölgesindeki bağlantılar							
WristRadioCarpal	18	26	21			19	
DistalRadioUlnar	11	7	12	12		8	
ProximalRadioUlnar	4	13	4	4		21	
ElbowHumeroUlnar	32	32	35	35		69	
GlenoHumeral	109	135	106	106		21	
AcromioClavicular	59	162	50	50		52	
SternoClavicular	55	75	31	31	21		
Bacak bölgesindeki bağlantılar							
Hip_ProximoDistalForce	1057	962	512		519	52	46
Knee_ProximoDistalForce	655	898	517		570	21	37
Ankle_ProximoDistalForce	502	612	457	494	9	19	

## 5. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Makalede, kablo demetleme konveyör hattında çalışanların çalışma duruşları incelenmiş ve çalışanlar üzerindeki zorlanmaları belirleyebilmek için AnyBody Modelleme Sistemi ile kas-iskelet sistemi analizleri yapılmıştır. Hareket yakalama sistemi ile alınan duruş verileri AMS yazılımında statik olarak analiz edilmiş ve analizler sonucunda,

çalışanların eğildiği, uzandığı vb. duruşlarda eklem reaksiyon kuvvetlerinin ve maksimum kas aktivitesi değerlerinin fazla olduğu görülmüştür. Bu çalışma duruşlarının çalışanlarda zorlanmalara, zorlanmalar sonucu erken yorulmalara neden olduğu ve çalışanların çalışma performanslarını olumsuz etkilediği gözlenmiştir. Ergonomik açıdan uygun olmayan bu çalışma duruşlarını ortadan kaldırmak ve çalışandan daha fazla iş verimi elde edebilmek amacıyla yeni hat tasarımı yapılmış ve hat

üretilecek kullanıma alınmıştır. Tasarım esnasında antropometrik ölçümler ve AMS ile kas gerilmelerini minimize edecek çalışma pozisyonları belirlenerek, kişiye özel montaj masa yüksekliği ve montaj masası eğim açısı belirlenmiştir. Konveyör masa yükseklikleri hat çalışanlarına göre yukarı-aşağı yönde hareket edebilmekte, aynı zamanda masa eğim açısı çalışana uygun değiştirilebilmektedir. Masaların bu hareketi ile uzun boylu çalışanların eğilme hareketlerinin, kısa boylu çalışanların uzanma hareketlerinin minimize edilmesi ve hatta ortadan kaldırılması amaçlanmıştır. Tasarımı gerçekleştirilen hattın üretimi yapılmadan önce çalışma ortamı sanal insan modelleme yardımıyla analiz edilmiş, analiz sonucunda mevcut çalışma duruşlarında meydana gelen zorlanmaların yeni tasarım ile azaldığı gözlenmiştir.

Yeni tasarlanan konveyör hattı imal edilip kullanıma alındıktan sonra, AMS ile sanal ortamda simüle edilmiş ve çalışma duruşları için statik analizler tekrarlanmıştır. Çalışanlara göre ayarlanan montaj masa yüksekliği ve eğim açısı ile kas aktiviteleri ve eklem reaksiyon kuvvetlerinin mevcut duruma göre azaldığı gözlenmiştir.

İmalatı gerçekleştirilen konveyör hattı ile elde edilecek bir başka kazanım da işlerin yapılış zamanıdır. Bunu belirleyebilmek amacıyla mevcut konveyör hattı ve önerilen konveyör hattı için gerçekleştirilen zaman etüdü çalışmaları karşılaştırılmıştır. Her iki etüt değerlendirildiğinde iyileştirmenin olumlu olduğu sonucuna varılmıştır.

Çalışmadan elde edilen bulgulara göre; bir sistemin henüz tasarım aşamasındayken çalışanlar için ergonomik olup olmayacağı, günümüz modern tasarım ve analiz araçlarıyla mümkün hale gelmiştir. Mevcut konveyör hattında çalışanlar için gerçekleştirilen analiz sonuçları yeni kablo demetleme konveyör hattı için tasarım verisi olarak kullanılmış, çalışanlarda oluşan zorlanmaları azaltacak ve hatta ortadan kaldıracak bir konveyör hattı, imal edilmeden bilgisayar destekli analizler sonucu oluşturulmuş ve bu değerlere göre ergonomik çalışmaya uygun tasarım doğrulama çalışmaları yapılmıştır.

Gelecekte yapılacak çalışmalarda; konveyör hattı hareketli olduğu için, çalışanların montaj sehпасındaki çalışması esnasındaki duruşu dinamik olarak analiz edilebilir.

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma, Sanayi Tezleri programı (San-Tez) tarafından desteklenmiştir. Proje numarası: 0650.STZ.2014  
Proje adı: Kablo Demetleme Konveyör Hattında Bilgisayar Destekli Ergonomi Analizleriyle İyileştirmeler Katkıları nedeniyle Nursan Kablo Donanımları Sanayi ve Ticaret Anonim Şirketi'ne teşekkür ederiz.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. World Health Organization. Protecting workers' health series no. 5: Preventing musculoskeletal disorders in the

workplace.

- [https://www.who.int/occupational\\_health/publications/en/oehmsd3.pdf](https://www.who.int/occupational_health/publications/en/oehmsd3.pdf). Yayın tarihi 2003. Erişim tarihi 2019.
2. Korhan, O., & Memon, A. A., Introductory Chapter: Work-Related Musculoskeletal Disorders. In Work-Related Musculoskeletal Disorders. IntechOpen, 2019.
  3. Kılıç Delice E., Can G.F., Kahya E., Improving the rapid office strain assessment method with an integrated multi-criteria decision making approach. Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 35 (3), 1297-1314, 2020.
  4. Crawford, J. O., Berkovic, D., Erwin, J., Copsey, S. M., Davis, A., Giagloglou, E., ... & Woolf, A., Musculoskeletal health in the workplace. Best Practice & Research Clinical Rheumatology, 101558, 2020.
  5. Edwards K., Winkel J., A method for effect modifier assessment (EMA) in ergonomic intervention research, Appl. Ergon., 72, 113-120, 2018.
  6. Mirka G. A., Ning X., Jin S., Haddad O., Kucera K., Ergonomic interventions for commercial crab fishermen, Int. J. Ind. Ergon., 41 (5), 481-487, 2011.
  7. Ramsey T., Davis K., Kotowski S., Anderson V., Waters T., Reduction of spinal loads through adjustable interventions at the origin and destination of palletizing tasks, Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society, 56 (7), 1222-1234, 2014.
  8. Bernardes J. M., Wanderck C., Moro A., Participatory ergonomic intervention for prevention of low back pain: assembly line redesign case, Work: A Journal of Prevention, Assessment and Rehabilitation, 41, 5993-5998, 2012.
  9. Battini D., Faccio M., Persona A., Sgarbossa F., New methodological framework to improve productivity and ergonomics in assembly system design, Int. J. Ind. Ergon., 41 (1), 30-42, 2011.
  10. Shin W., Park M., Ergonomic interventions for prevention of work-related musculoskeletal disorders in a small manufacturing assembly line. International Journal of Occupational Safety and Ergonomics, 25 (1), 110-122, 2019.
  11. Kee D., Kamalinia M., Oliaee M., Daneshmandi H., Mohammadi H., An ergonomic intervention to relieve musculoskeletal symptoms of assembly line workers at an electronic parts manufacturer in Iran, Work: A Journal of Prevention, Assessment and Rehabilitation, 61 (4), 515-521, 2018.
  12. Yeow P. H. P., Sen R. N., Quality, productivity, occupational health and safety and cost effectiveness of ergonomic improvements in the test workstations of an electronic factory, Int. J. Ind. Ergon., 32, 147-163, 2003.
  13. Gonen D., Oral A., Yosunlukaya M., Computer-aided ergonomic analysis for assembly unit of an agricultural device, Hum. Factors Ergon. Manuf. Serv. Ind., 26 (5), 615-626, 2016.
  14. Zare M., Black N., Sagot J. C., Hunault G., Roquelaure Y., Ergonomics interventions to reduce musculoskeletal risk factors in a truck manufacturing plant. Int. J. Ind. Ergon., 75, 1-12, 2020.

15. Sundin A., Christmansson M., Larsson M., A different perspective in participatory ergonomics in product development improves assembly work in the automotive industry, *Int. J. Ind. Ergon.*, 33 (1), 1-14, 2004.
16. Candan, S. A., Sahin, U. K., & Akoğlu, S., The investigation of work-related musculoskeletal disorders among female workers in a hazelnut factory: Prevalence, working posture, work-related and psychosocial factors. *Int. J. Ind. Ergon.*, 74, 102838, 2019.
17. Chryssolouris G., Mavrikios D., Fragos D., Karabatsou V., A virtual reality-based experimentation environment for the verification of human-related factors in assembly processes, *Rob. Comput. Integr. Manuf.*, 16 (4), 267-276, 2000.
18. Mgbemena, C. E., Tiwari, A., Xu, Y., Prabhu, V., & Hutabarat, W., Ergonomic evaluation on the manufacturing shop floor: A review of hardware and software technologies. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 30, 68-78, 2020.
19. Ma L., Chablat D., Bennis F., Zhang W., Guillaume F., A new muscle fatigue and recovery model and its ergonomics application in human simulation, *Virtual and Physical Prototyping*, 5 (3), 123-137, 2010.
20. Regazzoni D., Rizzi C., Digital human models and virtual ergonomics to improve maintainability, *Comput.-Aided Des. Applic.*, 11 (1), 10-19, 2014.
21. Chang S., Wang M., Digital human modeling and workplace evaluation: Using an automobile assembly task as an example, *Hum. Factors Ergon. Manuf. Serv. Ind.*, 17 (5), 445-455, 2007.
22. Spada S., Sessa F., Corato F., Virtual reality tools and statistical analysis for human movements simulation: Application to ergonomics optimization of workcells in the automotive industry, *Work: A Journal of Prevention, Assessment and Rehabilitation*, 41, 6120-6126, 2012.
23. Zhu, W., Fan, X., & Zhang, Y., Applications and research trends of digital human models in the manufacturing industry. *Virtual reality & intelligent hardware*, 1 (6), 558-579, 2019.
24. Polášek P., Bureš M., Šimon M., Comparison of digital tools for ergonomics in practice, *Procedia Eng.*, 100, 1277-1285, 2015.
25. Wirsching H.J., *Human Solutions RAMSIS, DHM and Posturography*, 1, Editörler: Sofia Scataglini, Gunther Paul, Academic Press, A.B.D, 49-55, 2019.
26. Rasmussen J., Vondrak V., Damsgaard M., De Zee M., Christensen S. T., Dostal Z., The AnyBody Project - computer analysis of the human body. *Biomechanics of Man.*, 270-274, 2002.
27. Özöğül B., Çimen B., Kahya E., Bir metal sanayi işletmesinde ergonomik risk analizi, *Journal of Engineering Sciences and Design*, 6, 159-175, 2018.
28. Chaffin D. B., The evolving role of biomechanics in prevention of overexertion injuries, *Ergonomics*, 52 (1), 13-14, 2009.
29. Rasmussen J., Olesen C., Lund M., Andersen M., Farahani S., De Zee M., Prediction of motion in musculoskeletal models. ISB Technical Group on Computer Simulation Symposium, Leuven, Belçika, June 30 – July 2, 2011.
30. Cadova, M., Use of OpenSim and AnyBody modelling software for dynamic simulation of the human masticatory system. 18th International Symposium on Computational Biomechanics in Ulm CBU, 37-38, 2013.
31. Damsgaard M., Tørholm S., Rasmussen J., An Efficient Numerical Algorithm for Solving The Muscle Recruitment Problem in Inverse Dynamics Simulations, *International Society of Biomechanics 18th Congress, Zürich- Switzerland, January, 2001.*
32. Carbes S., Tørholm S., Telfer S., Woodburn J., Oosterwaal M., Rasmussen J., A New Multisegmental Foot Model and Marker Protocol for Accurate Simulation Of The Foot Biomechanics During Walking, *International Society of Biomechanics 23rd Congress, Brüksel, Belçika, 3-7 July, 2011.*
33. Cao E., Inoue Y., Liu T., Shibata K., Estimate muscle forces of ankle joint with wearable sensors. *Journal of Biomechanical Science and Engineering*, 6 (4), 299-310, 2011.
34. Nolte D., Andersen M., Rasmussen J., Al-Munajjed A., Development of a Patient-Specific Musculoskeletal Model of a Healthy Knee to Analyze Hard and Soft Tissue Loading, 21th Annual Symposium on Computational Methods in Orthopaedic Biomechanics, Texas, A.B.D, January 25th, 2013.
35. Kasal A., Yüksel M., Kılıç H., Ergun M. E., Ozcan C., Oturma mobilyası tasarımında bilgisayar destekli ergonomik analiz, *Selçuk-Teknik Dergisi*, 14 (2), 26-44, 2015.
36. Cao E., Inoue Y., Liu T., Shibata K., An inverse dynamic approach for quantitative muscle force estimation during human standing-up process, *Journal of Biomechanical Science and Engineering*, 8 (1), 63-78, 2013.
37. Stambolian D., Eltoukhy M., Asfour S., Development and validation of a three dimensional dynamic biomechanical lifting model for lower back evaluation for careful box placement. *Int. J. Ind. Ergon.*, 54, 10-18, 2016.
38. Andersen M., Rasmussen J., Ramsey D., Benoit D., Validation of knee joint models - an in vivo study, *IFMBE Proceedings*, 31, 1288-1291, 2010.
39. Oosterwaal M., Telfer S., Tørholm S., Carbes S., van Rhijn L., Macduff R., Woodburn J., Generation of subject-specific, dynamic, multisegment ankle and foot models to improve ortotic design: a feasibility study, *BMC Musculoskeletal Disorders*, 12 (1), 256, 2011.
40. Sandholm A., Schwartz C., Pronost N., de Zee M., Voigt M., Thalmann D., Evaluation of a geometry-based knee joint compared to a planar knee joint, *The Visual Computer*, 27 (2), 161-171, 2011.
41. Kim S., Nussbaum M. A., Jia B., Low back injury risks during construction with prefabricated (panelised) walls: Effects of task and design factors, *Ergonomics*, 54 (1), 60-71, 2011.

42. Pontonnier C., de Zee M., Samani A., Dumont G., Madeleine P., Strengths and limitations of a musculoskeletal model for an analysis of simulated meat cutting tasks, *Appl. Ergon.*, 45 (3): 592-600, 2014.
43. Hopkins A., Emmenegger D., Stroud L., Schärer C., Lovem B., Holt C., Seebeck J., Generation of Subject Specific Kinematic Models From Motion Capture Data and AnyBody Simulation, ISB Technical Group on Computer Simulation Symposium, Leuven, Belçika, June 30 – July 2, 2011.
44. Cutlip K., Nimbarte A., Chowdhury S., Jaridi M., Evaluation of shoulder stability during forceful arm exertions, *Industrial and Systems Engineering Review*, 3 (1), 49-58, 2015.
45. Møller S. P., Brauer C., Mikkelsen S., Alkjær T., Koblauch H., Pedersen E. B., Simonsen E. B., Thygesen L. C., Risk of subacromial shoulder disorder in airport baggage handlers: Combining duration and intensity of musculoskeletal shoulder loads, *Ergonomics*, 61 (4), 576-587, 2018.
46. Nimbarte A., Sivak-Callcott J., Zreiqat M., Chapman M., Neck postures and cervical spine loading among microsurgeons operating with loupes and headlamp, *IIE Trans. Occup. Ergon. Hum. Factors.*, 1 (4), 215-223, 2013.
47. De Zee M., Hansen L., Wong C., Rasmussen J., Simonsen E., A generic detailed rigid-body lumbar spine model, *J. Biomech.*, 40 (6), 1219-1227, 2007.
48. Zander, T., Dreischarf, M., Schmidt, H., Bergmann, G., Rohlmann, A., Spinal loads as influenced by external loads: A combined in vivo and in silico investigation, *J. Biomech.*, 48, 578–584, 2015.
49. Galibarov P., Dendorfer S., Rasmussen J., Two Computational Models of the Lumbar Spine: Comparison and Validation, *Orthopaedic Research Society 2011 Annual Meeting*, Long Beach, A.B.D, January, 2011.
50. Graichen S., Stein T., Deml B., Adaptive workplace design based on biomechanical stress curves, *Advances in Production Technology*, 175-183, 2014.
51. Gönen D., Oral A., Bir Tarım Aleti Montaj Ünitesinin Bilgisayar Destekli Ergonomik Analizi, 18. Ulusal Ergonomi Kongresi, Gaziantep, Türkiye, 16-18 Kasım, 2012.
52. Gönen D., Oral A., Özcan C., Analysis of working postures in the assembly process of wheel hay rake using Anybody Modelling System. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 32 (3), 651-660, 2017.
53. Sugiono S., Efranto R.Y., Budiprasetya A.R., Reducing musculoskeletal disorder (MSD) risk of wiring harness workstation using workplace ergonomic risk assessment (WERA) method. *Scientific Review - Engineering and Environmental Sciences*, 27 (4), 536-551, 2018.
54. Delfs N., Bohlin R., Gustafsson S., Mårdberg P., Carlson J., Automatic creation of manikin motions affected by cable forces, *Procedia CIRP*, 23, 35-40, 2014.
55. Waters T. R., Putz-Anderson V., Garg A., Fine L. J., Revised NIOSH equation for the design and evaluation of manual lifting tasks, *Ergonomics*, 36, 749-776, 1993.
56. Callaghan J. P., McGill S. M., Intervertebral disc herniation: studies on a porcine model exposed to highly repetitive flexion/extension motion with compressive force, *Clin. Biomech.*, 16 (1), 28-37, 2001.
57. Atıcı H., Gönen D., Oral A., Kaya B., Ergonomic Analysis of an Assembly Line Using the AnyBody Modeling System, 3<sup>rd</sup> World Congress on Mechanical, Chemical, and Material Engineering (MCM'17), Roma, İtalya, 8 – 10 Haziran, 2017.

