

ALT EKSTREMİTE HAREKETLERİNİN DİNAMİK ANALİZİ İÇİN BİLGİSAYAR DESTEKLİ MODEL GELİŞTİRİLMESİ

Kasım SERBEST¹, Murat ÇİLLİ², Osman ELDOĞAN³

¹kserbest@sakarya.edu.tr Sakarya Üniversitesi, Makine Eğitimi Bölümü, 54187 Sakarya

²mcilli@sakarya.edu.tr Sakarya Üniversitesi, Antrenörlük Eğitimi Bölümü, 54187 Sakarya

³eldogan@sakarya.edu.tr Sakarya Üniversitesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, 54187 Sakarya

ÖZET

Canlıları cansızlardan ayıran en büyük özelliklerden biri olan hareket, birçok araştırma alanının ilgisini çekmektedir. İnsan hareketinin tanımlanabilmesi; biyomekanik analizler, hareket bozuklarının belirlenmesi, ortez ve protez tasarımları, ergonomik çalışmalar, insansı mekanizmalar, bilgisayar uygulamaları ve sportif faaliyetler gibi alanlarda önemli rol oynamaktadır.

Bu çalışmada, insan alt ekstremitesi hareketlerinin analiz edilebilmesini sağlayan 2 boyutlu bir eklem-uzuv modeli geliştirilmiştir. Eklem-uzuv modeli, MATLAB (7.6.0) ve SimMechanics (2.7.1) kütüphaneleri kullanılarak oluşturulmuştur. İnsan vücudunun antropometrik özelliklerinin belirlenmesinde CAD yazılımlarından faydalanılmıştır. Modelin benzetimi, ters dinamik yöntem kullanılarak gerçekleştirilmiş ve elde edilen veriler deneysel çalışma ile karşılaştırılmıştır. Sonuçların birbirine çok yakın olduğu görülmüştür.

Anahtar Sözcükler: Biyomekanik analiz, Hareket analizi, Bilgisayar destekli analiz

ABSTRACT

Locomotion which is one the most important features separating living beings from inanimate attracts a lot of research areas. Identification of the human motion plays an important role in determining movement disorders, designing of an orthosis and a prosthesis, ergonomic studies, humanoid mechanisms, computer applications and sport activities.

In this study, a two-dimensional link-segment model which allows analysis of the human lower extremity movements has been developed. The link-segment model has been created using MATLAB (7.6.0) and SimMechanics (2.7.1) libraries. Determining the anthropometric characteristics of the human body has been utilized CAD software. Simulation of the model has been carried out using inverse dynamics method and the obtained data were compared with experimental study. It was observed that the results were very close to each other.

Keywords: Biomechanical analysis, Motion analysis, Computer-aided analysis

1. GİRİŞ

İnsan doğada var olan mükemmel sistemlerin başında gelmektedir. Bu mükemmeliyet insanın hareketine de yansımıştır. İnsan hareketi tarihin en eski dönemlerinden beri araştırmacıların ilgisini çekmiştir. 1830'larda Weber kardeşlerin öncülüğünde modern anlamda yürüyüş analizi çalışmaları

başlamıştır [1]. Günümüzün araştırmalarına Winter tarafından gerçekleştirilen çalışmalar öncülük etmektedir [2].

Çağımızda gelişen bilgisayar sistemleri ve bunlara bağlı yazılımlar sayesinde hareketlerin izlenmesi, görüntülerin işlenmesi ve hareketin biyomekanik olarak analiz edilmesi daha kolay hale gelmiştir. Biyomekanik, güvenlik, ergonomi ve sportif çalışmalar için geliştirilmiş bazı yazılımlara örnek olarak TASS (TNO Automotive Safety Solitiouns), LifeMOD, The AnyBody Modelling System, OpenSim ve CATIA ergonomik tasarım ve analiz modülü gösterilebilir [3]. Ayrıca pazarda çok sayıda ticari hareket analizi sistemi mevcuttur. Bunların en çok bilinenleri; APAS (Ariel Dynamics, Inc.), CODA (Charnwood Dynamics Ltd.), ELITE (Bioengineering Technology and Systems), OPTOTRACK (Northern Digital, Inc.), PEAK (Peak Performance Technologies, Inc.), QUALISYS (Qualisys Medical AB) ve VICON (Vicon Motion Systems Ltd.) tarafından geliştirilen sistemlerdir [4].

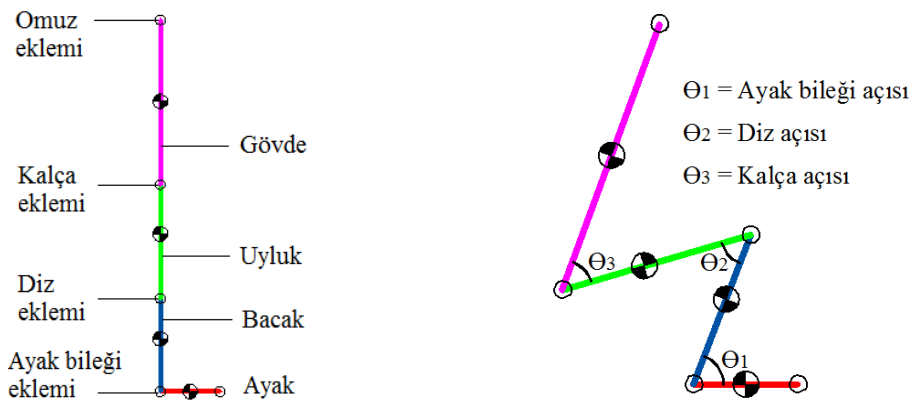
Nispeten karmaşık olmayan insan hareketlerinin modellenmesinde kullanılan bir diğer uygulama da SimMechanics yazılımıdır. SimMechanics, Simulink ve MATLAB (The MathWorks) araçlarından da faydalanarak fiziksel sistemlerin blok diyagramları şeklinde modellendiği, katı cisimlerin ve bu cisimlere ait hareketlerin Newton dinamiği yasalarına göre çözümlendiği bir yazılımdır. Bu yazılımla, uygun araçlar seçilerek mekanik sistemlerin fiziksel ve kütsel özellikleri belirlenebilir, bu özelliklere uygun hareketler tanımlanabilir ve cisimlerin hareketi dinamik olarak incelenebilir. SimMechanics, mekanik sistemler için geliştirilmiş bir yazılım olmasına rağmen insan hareketinin incelenmesinde de kullanılmaktadır [5-12].

Bu çalışmada, insan vücudunun mekanik yapısı SimMechanics yazılımı kullanılarak modellenmiştir. Antropometrik özelliklerin belirlenmesinde SolidWorks (Dassault Systemes) yazılımından faydalanılmıştır. Oluşturulan modelin benzetimi gerçekleştirilerek elde edilen sonuçlar deneysel çalışma ile karşılaştırılmış ve modelin doğruluğu ölçülmüştür.

2. MATERYAL VE METOD

2.1 Eklem-Uzuv Modelinin Oluşturulması

İnsan vücudunun biyomekanik olarak incelenmesinde eklem-uzuv modelleri sıklıkla kullanılmaktadır [2,13,14]. İnsan vücudunun temel yapısına açıklık getiren bu modellerin kullanımıyla hareketi meydana getiren kas sistemi, eklemler, kemikler, kıkırdak doku ve sinir dokusu gibi oluşumların karmaşıklığı ortadan kalkmaktadır. Bu sayede mekanik analizleri gerçekleştirmek mümkün hale gelmektedir. Bu çalışmada insan vücudu ayak, bacak, uyluk ve gövde olmak üzere toplam 4 uzuvdan oluşan ve açık zincir bir mekanik yapıya sahip eklem-uzuv modeli ile temsil edilmiştir (Şekil1).

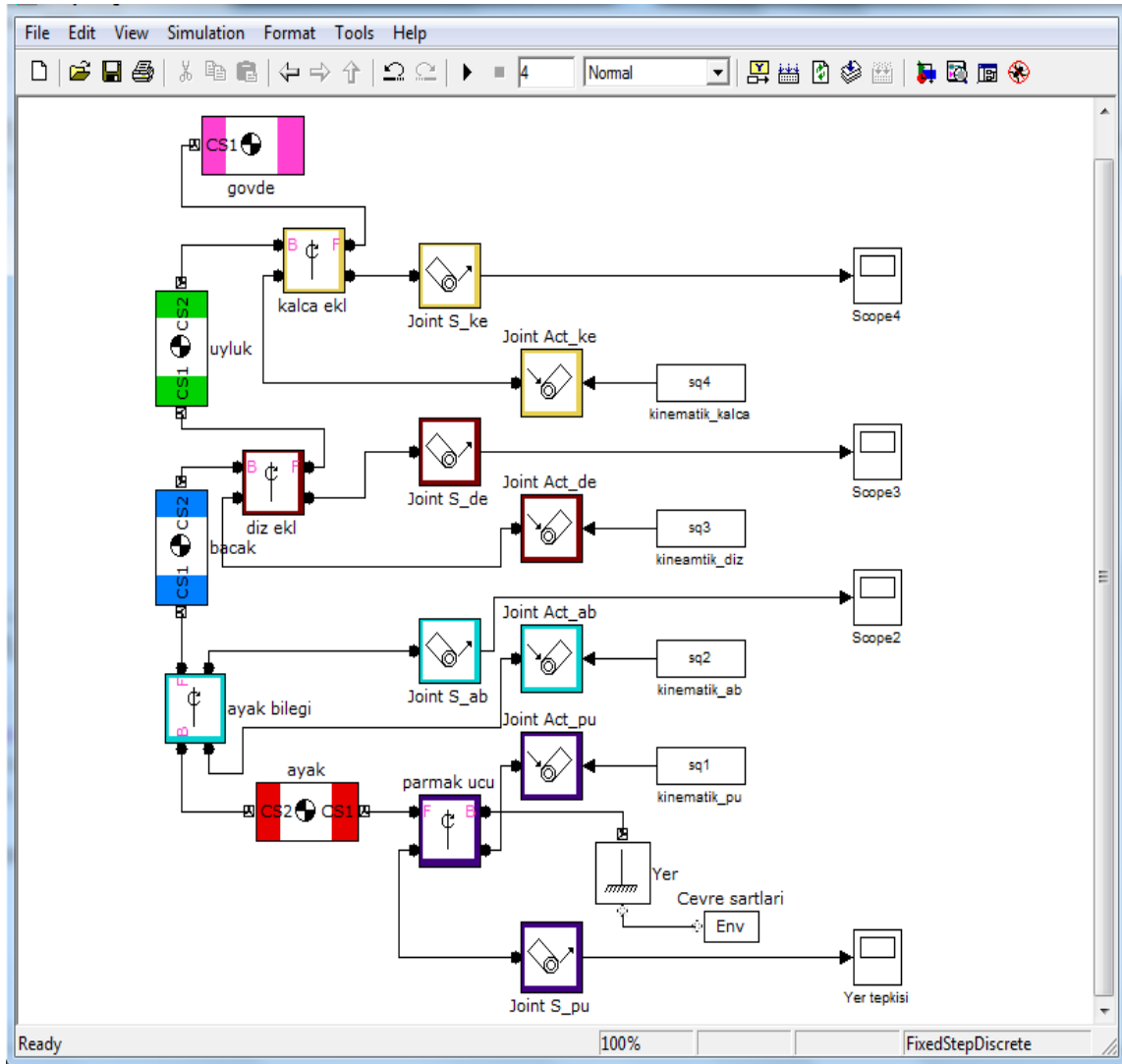


Şekil 1. İnsan vücudunun sagittal düzlemdeki eklem-uzuv modeli ve eklem açıları

Alt ekstremite hareketlerinin incelenmesine yönelik bir model geliştirileceğinden baş, boyun ve üst ekstremite modele dahil edilmemiştir [11,12]. Hareketlerin dinamik analizini gerçekleştirmek ve benzetimini yapmak için oluşturulan eklem-uzuv modeli SimMechanics yazılımı kullanılarak MATLAB ortamına aktarılmıştır [15]. Şekil 2, modelin SimMechanics yapısını göstermektedir.

Sagittal düzlemde (SimMechanics referans eksen takımına göre XY düzlemi) 2 boyutlu olarak oluşturulan insan vücudu modelinde, uzuvlar katı cisim olarak kabul edilmiştir. Hareket esnasında meydana gelen yer tepki kuvvetinin ayakucu noktasında olduğu varsayılmıştır. Modelin, yer çekimi etkisini oluşturan zemin ile bağlantısı da ayakucundan gerçekleştirilmiştir. Uzuvları birbirine bağlayan eklemlerin her biri z eksenine etrafında (SimMechanics referans eksen takımına göre) dairesel hareket yapacak şekilde tek serbestlik derecesine sahip olarak modellenmiştir.

Modelin çözümü yapılırken, ters dinamik (inverse dynamics) yaklaşım kullanılmıştır. Ters dinamik yaklaşım, mekaniğin kinematik ve kinetik disiplinleri arasında bağlantı kuran bir alt dalıdır. Bu yaklaşım kuvvet ve momentleri, hareket halindeki cisimlerin kinematik ve atalet özelliklerinden yararlanarak dolaylı olarak belirleyen bir süreci ifade etmektedir. 1970'lere kadar sınırlı sayıda çalışma yapılmış olmasına rağmen, ticari kuvvet platformlarının yaygınlaşması ve bilgisayar sistemlerinin ucuzlaması ile bu yaklaşımla yapılan çalışmalar artmıştır [16].



Şekil 2. Eklem-uzuv modelinin SimMechanics yapısı

2.2 Modelin Antropometrik Özelliklerinin Belirlenmesi

İnsan uzuvlarının antropometrik özelliklerinin belirlenmesine yönelik çalışmalar genel olarak dört gruba ayrılmaktadır. Bunlar; kadavra çalışmaları, matematiksel modellemeler, tarama ve görüntüleme teknikleri ve kinematik ölçüm işlemleridir [16]. Biyomekanik analizlerde sıklıkla kullanılan modeller, kadavra çalışmalarına ve matematiksel hesaplamalara dayalı oluşturulan modellerdir. Dempster [16], Chandler ve diğ. [17] insan kadvraları üzerinde gerçekleştirdikleri çalışmalarla uzuvların kütle, atalet momenti, jirasyon yarıçapı, uzunluk ve kütle merkezi gibi özelliklerini belirlemişlerdir. Uzuvların atalet momentlerinin ve kütle merkezlerinin belirlenmesinde, Hanavan [18] ve Hatze [19] tarafından geliştirilen matematiksel modeller fayda sağlamaktadır.

Bu çalışmada, eklem-uzuv modelini oluşturulan uzuvların katı modelleri SolidWorks [20] yazılımı kullanılarak tasarlanmıştır. Şekil 3'de, gövdeye ait katı model görülmektedir. Ayak, bacak, uyluk ve gövde uzuvlarının katı modelleri oluşturulurken 174 cm boyunda ve 70.2 kg ağırlığında olan denegin özellikleri referans alınmıştır. Uzuvların kütle, kütle merkezi, boy ve atalet momenti özellikleri SolidWorks yazılımının sunduğu imkanlarla hesaplanmıştır. Uzuv kütlelerinin hesaplanması için gerekli uzuv yoğunluğu değerleri belirlenirken Chandler ve diğ. tarafından yapılan çalışmanın sonuçları referans alınmıştır [17]. Uzuvların SolidWorks yazılımında hesaplanan antropometrik özelliklerine Tablo 1'de yer verilmiştir.

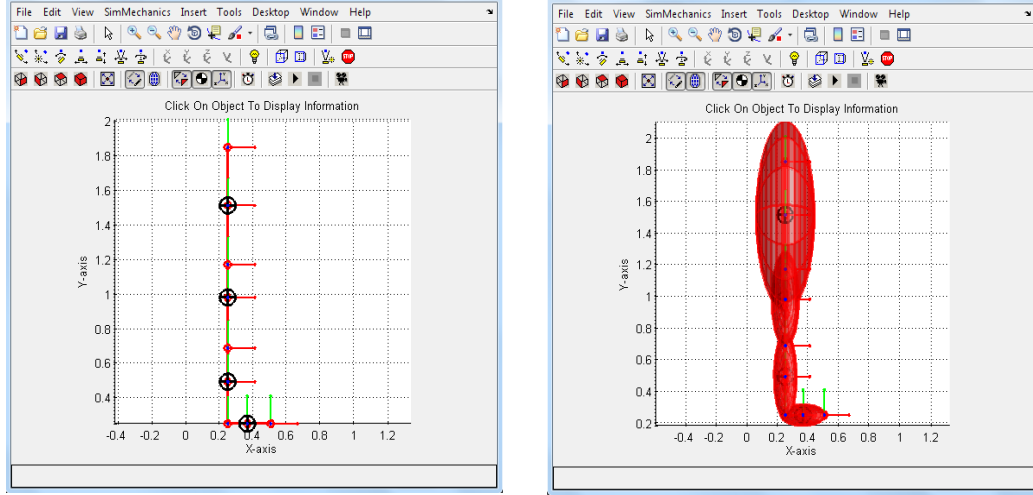
Tablo 1. Uzuvların SolidWorks yazılımında hesaplanan antropometrik özellikleri

Uzuv	Uzuv boyu (cm)	Kütle (kg)	Atalet momenti (g·cm ²)			Proksimal uçtan itibaren kütle merkezi yeri (cm)
			I _{xx}	I _{yy}	I _{zz}	
Ayak	25.5	1.09	16423	55034	58959	11.6
Bacak	43.8	3.76	584660	67468	599696	19.53
Uyluk	48.4	7.97	1617321	248250	1621112	19.1
Gövde	67.8	31.74	13607251	3090865	12785577	33.68



Şekil 3. Gövdenin SolidWorks yazılımında oluşturulan katı modeli

Uzuvların SolidWorks yazılımı ile belirlenen antropometrik özellikleri, SimMechanics yazılımında oluşturulan modele aktarılmıştır. Sagittal düzlemde, vücudun yarısı baz alınarak çalışma yapıldığı için ayak, bacak ve uyluk uzuvlarının sadece birer tanesi modelde yer almıştır. Uzuvların kütle ve atalet özelliklerin de tanımlanmasıyla birlikte oluşan SimMechanics simülasyon ekranı yapısı Şekil 4'de görülmektedir.



Şekil 4. SimMechanics simülasyon ekranının görüntüleri

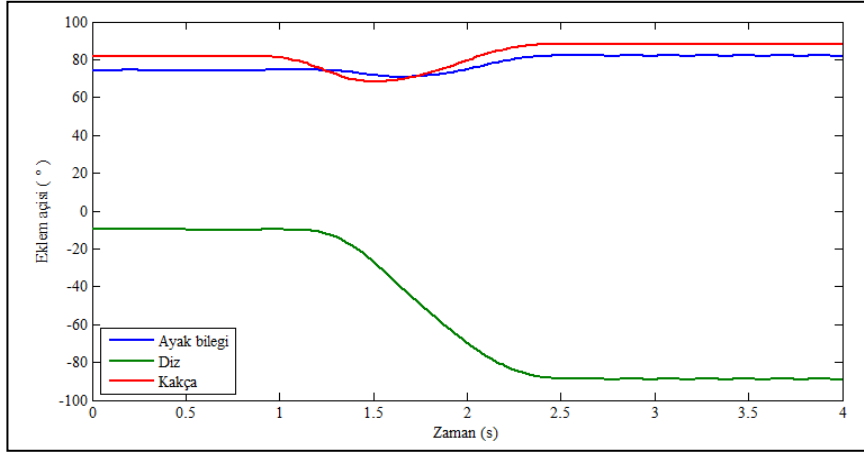
2.3 Hareket Analizi

SimMechanics yazılımı kullanılarak oluşturulan model ters dinamik yöntem kullanılarak çözüleceğinden, modeldeki her bir eklemin hareketinin tam olarak bilinmesi gerekmektedir. Eklemleri harekete geçirmek için gerekli olan açısal yer değiştirme, açısal hız ve açısal ivme değerlerinin tespit edilebilmesi için antropometrik özellikleri SimMechanics yazılımı ile oluşturulan modele de aktarılan gönüllü deneyin (harekete mani olacak herhangi bir engeli bulunmayan, 26 yaşında erkek birey), oturmakta olduğu 40 cm yükseklikten kalkış hareketinin analizi gerçekleştirilmiştir. Bu analizi gerçekleştirmek için saniyede 25 kare görüntü yakalama özelliği olan bir dijital kamera, dikey yöndeki tepki kuvvetlerini ölçen bir kuvvet platformu (Kistler Group, İsviçre), aydınlatma sistemi, yansıtma özelliği olan pasif işaretleyiciler ve bilgisayar sistemi kullanılmıştır.

Ayakucu, ayak bileği, diz, kalça ve omuz eklemine yerleştirilen işaretleyiciler üzerine ışık etki ettirilmiş ve bu sayede kameradaki görüntülerinin belirginleşmesi sağlanmıştır. Ayrıca kameranın enstantane hızı artırılarak hareket halindeki görüntünün daha net hale gelmesi amaçlanmıştır. Denek, önceden planlanmış hareketi yaparken görüntüler kameraya kaydedilmiştir. Aynı zamanda hareketler esnasında oluşan yer tepki kuvvetleri, kuvvet platformu aracılığıyla ölçülmüştür.

Beş antropometrik noktaya yerleştirilen işaretleyicilerin koordinat değerlerinin elde edilmesi için görüntünün sayısallaştırılması gerekmektedir. Kamera görüntülerindeki işaretleyicilerin konumlarının tespit edilebilmesi için MATLAB (versiyon 7.6.0) yazılımında oluşturulan bir programdan yararlanılmıştır. Bu program çalıştırdıktan sonra sayısallaştırılacak görüntü seçilmekte, koordinatları belirlenecek noktaların sayısı belirtilmekte ve ışık yoğunluğuna olan duyarlılık ayarlanmaktadır. Program, hareket halindeki görüntüde işaretleyicilerin yerini algılayarak her bir görüntü karesindeki koordinat değerlerini tespit etmektedir. Elde edilen koordinat değerleri bir dosyaya yazdırılarak kullanılabilir hale gelmektedir. Sayısallaştırılarak koordinatları elde edilen noktaları görüntüden kurtarmak ve konum verilerini hareketin doğasına uygun hale getirmek için filtreleme işlemi uygulanmıştır. Bu işlem, MATLAB ortamında konum verilerine "Low-pass digital filter" tekniğinin uygulanmasıyla gerçekleştirilmiştir [21]. Bu sayede sayısallaştırma işlemi sırasında oluşan hataların

yumuşatılması da sağlanmıştır. Eklemlerin, incelenen hareket esnasında uzuvlara göre yaptıkları açıların değişimi Şekil 5'de gösterilmiştir.

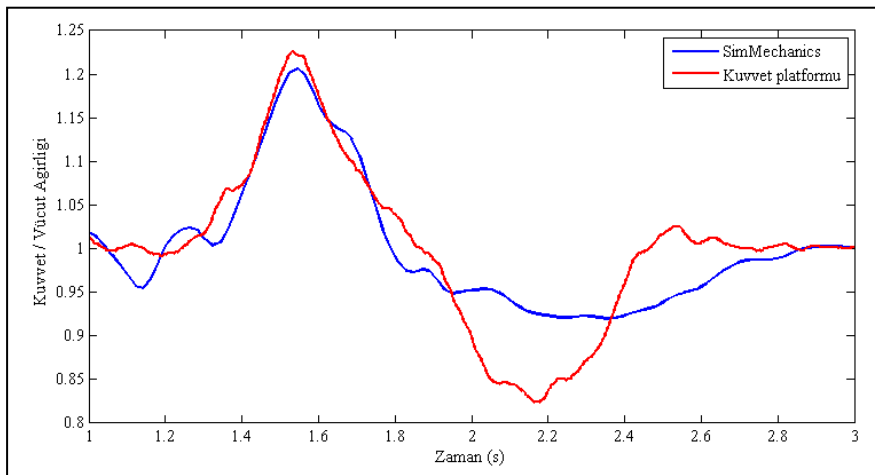


Şekil 5. Eklem açılarının değişimi

2.4 Bulguların Karşılaştırılması

SimMechanics yazılımında oluşturulan modelin benzetimini gerçekleştirmek için modeldeki eklemler, hareket analizinden elde edilen konum verilerinden yararlanılarak tahrik edilmiştir. Bu sayede deneysel çalışma ile gerçekleştirilen 40 cm yükseklikten kalkış hareketinin benzetimi, insana özgü bir şekilde yapılmıştır. Şekil 6, oturlan 40 cm yükseklikten kalkış hareketine ait bulguların karşılaştırmasını göstermektedir. Karşılaştırma işlemi, hareket esnasında oluşan dikey yöndeki yer tepki kuvvetleri referans alınarak yapılmıştır. Benzetim işlemi ile hesaplanan dikey yöndeki yer tepki kuvvetinin maksimum değerinin ve değişim davranışının, deneysel çalışma esnasında kuvvet platformuyla ölçülen değerlere çok benzer olduğu görülmektedir.

Deneysel ölçüm ve benzetim çalışması arasında meydana gelen farklılıkların başlıca sebebi, vücut uzuvlarının katı cisimler kabul edilerek yumuşak doku hareketlerinin göz ardı edilmesidir. Hareket analizi için geliştirilen programın, işaretleyicilerin yerini belirlemedeki hassasiyeti sonuca etki eden bir diğer faktördür. İlaveten, SolidWorks yazılımında katı modelleri oluşturulan vücut uzuvlarının, gönüllü denegın antropometrik özelliklerini temsil edebilme durumu da sonucu etkilemektedir.



Şekil 6. İncelenen hareket esnasında meydana gelen yer tepki kuvvetinin karşılaştırılması

3. SONUÇ

Bu çalışma ile alt ekstremitte hareketlerinin analiz edilebilmesini sağlayan bir mekanik model geliştirilmiştir. Geliştirilen modelin benzetimi sonucunda elde edilen kuvvet bulgusu, deneysel çalışma ile karşılaştırılmıştır. Deneğin, oturmakta olduğu 40 cm yükseklikten kalkış hareketinin benzetimi sonucunda hesaplanan maksimum dikey yer tepki kuvvetinin Hang ve Zhaoli [12] tarafından gerçekleştirilen oturup kalkma hareketinin analizine yönelik çalışmanın sonuçları ile benzerlikler gösterdiği görülmüştür.

Geliştirilen model yardımıyla oturup kalkma, çömelip ayağa kalkma, basamak çıkma, yüksekteki bir nesneye uzanma ve parmak ucu üzerinde yükselme gibi hareketlerin analizleri gerçekleştirilebilir. SimMechanics yazılımının sunduğu imkanlar sayesinde doğrudan ölçülemeyen ancak bir takım yaklaşımlarla hesaplanabilen eklem kuvvetleri ve momentleri kolaylıkla belirlenebilmektedir. Ayrıca yazılımın sunduğu esneklikler sayesinde modelde değişiklikler uygulanarak daha kapsamlı analizler yapılabilir.

Bu çalışma, SimMechanics yazılımının insan hareketlerinin mekanik olarak analiz edilmesinde faydalı sonuçlar ortaya koyduğunu göstermiştir. Uzunların antropometrik özelliklerinin belirlenmesinde katı modelleme yazılımlarından faydalanılabileceği anlaşılmıştır. MATLAB ortamında oluşturulan hareket analizi programının, karmaşık olmayan hareketlerin analiz edilmesinde başarılı olduğu görülmüştür.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Sakarya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu tarafından desteklenmiştir (Proje no: 2012-50-01-006).

4. KAYNAKÇA

- [1] YAVUZER, G., The use of computerized gait analysis in the assessment of neuromusculoskeletal disorders, **Journal of Physical Medicine and Rehabilitation Sciences**, 10, 2, 043-045, (2007).
- [2] WINTER, D., A., Biomechanics and motor control of human movement, 2nd Edition, **John Wiley & Sons**, Canada, (1990).
- [3] LEE, K., CAD systems for human-centered design, **Computer-Aided Design & Applications**, 3, 5, 615-628, (2006).
- [4] CİVEK, E., Comparison of kinematic results between METU-KISS & Ankara University-Vicon gait analysis systems, Y. Lisans Tezi, ODTÜ, Makina Mühendisliği Bölümü, (2006).
- [5] MEHMOOD, A., CAMESCASSE, B., OUEZDOU, F., B. ve CHENG, G., Simulation and design of 3-DOF eye mechanism using Listing's Law, **International Conference on Humanoid Robots**, Korea, 429-434, (2008).
- [6] DAUMAS, B., XU, W., L. ve BRONLUND, J., Jaw mechanism modeling and simulation, **Mechanism and Machine Theory**, 40, 821-833, (2005).
- [7] HERNANDEZ-SANTOS, C., SOTO, R. ve RODRIGUEZ, E., Design and dynamic modeling of humanoid biped robot e-Robot, **Electronics Robotics and Automotive Conference**, 191-196, (2011).

- [8] HAJNY, O. ve FARKASOVA, B., A study of gait and posture with the use of cyclograms, **Acta Polytechnica**, 50, 4, 48-51, (2010).
- [9] KAILAI, W., TAGAWA, Y. ve SHIBA, N., Simulation of human body motion under the condition of weightlessness, **International Joint Conference**, Japan, 3835-3839, (2009).
- [10] AMCA, A., M., HARBİLİ, E. ve ARITAN, S., Koparma kaldırışının biyomekanik analizi için mekanik model geliştirilmesi, **Hacettepe Spor Bilimleri Dergisi**, 21, 1, 21-29, (2010).
- [11] JAMSHIDI, N., ROSTAMI, M., NAJARIAN, S., SAADATNIA, M. ve FIROOZ S., Modelling of human walking to optimise the function of ankle-foot orthosis in Guillan-Barre patients with drop foot, **Singapore Medical Journal**, 50, 4, 412-417, (2009).
- [12] HANG, S. ve ZHAOLI, M., Kinematics simulation of sit to stand based on SimMechanics, **International Conference on Future Computer Science and Education**, China, 59-61, (2011).
- [13] ÇİLLİ, M., İnsan hareketinin modellenmesi ve benzeşiminde temel bileşenler analizi yönteminin kullanılması, Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, (2007).
- [14] KAPTI, A., O., İnsan alt ekstremitesinin incelenmesi ve aktif diz üstü protezi tasarımı, Doktora Tezi, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, (2001).
- [15] The MathWorks, Inc., SimMechanics 2.7.1, (2008).
- [16] GORDON, D., ROBERTSON, E., CALDWELL, G., E., HAMILL, J., KAMEN, G. ve WHITTLESEY, S., N., **Research methods in biomechanics**, Human Kinetics, USA, (2004).
- [17] CHANDLER, R., F., CLAUSER, C., E., MCCONVILLE, J., T., REYNOLDS, H., M. ve YOUNG, J., W., Investigation of inertial properties of the human body, Aerospace Medical Research Laboratory, 1-162, Washington D.C., (1975).
- [18] HANAVAN, E., P., A mathematical model of the human body, United States Air Force, 1-73, USA, (1964).
- [19] HATZE, H., Neuromusculoskeletal control systems modeling – a critical survey of recent developments, **IEEE TRANSACTIONS ON AUTOMATIC CONTROL**, AC-25, 3, (1980).
- [20] Dassault Systemes, SolidWorks, (2010).
- [21] GOURGOULIS, V., AGGELOUSSIS, N., KALIVAS, V., ANTONIOU, P. ve MAVROMATIS, G., Snatch lift kinematics and bar energetics in male adolescent and adult weightlifters, **Journal of Sports Medicine and Physical Fitness**, 44, 126-131, (2004).