

Günlük Fiziksel Aktivitelerin Alt Ekstremitte Üzerindeki Biyomekanik Etkileri

^{*1}Kasım Serbest ²Murat Çilli ³Osman Eldoğan

^{*1}Sakarya Üniversitesi Makine Eğitimi Bölümü, Sakarya

²Sakarya Üniversitesi Antrenörlük Eğitimi Bölümü, Sakarya

³Sakarya Üniversitesi Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Sakarya

Özet

Bu çalışmada gündelik fiziksel aktivitelerin başında gelen oturup kalkma, çömelip kalkma ve basamak çıkma hareketleri esnasında alt ekstremitte eklemlerinde oluşan momentlerin tespit edilmesi amaçlanmıştır. Çalışmaya 26 yaşında fiziksel herhangi bir sorunu olmayan sağlıklı bir erkek birey katılmıştır. Bireyin antropometrik özelliklerine uygun olarak oluşturulan eklem-uzuv modeli, eklem momentlerinin hesaplanacağı MATLAB yazılımına aktarılmıştır. Birey, hareketleri gerçekleştirirken görüntüler kamera ile izlenmiş ve sayısallaştırma işlemi yapılarak eklemlere ait konum verileri elde edilmiştir. Yapılan benzetim işlemi sonucunda alt ekstremitte eklemlerinde meydana gelen momentler hesaplanmıştır. Bulgular, diz ekleminin ekstansiyon ve fleksiyon hareketleri sırasında oluşan yüksek momentleri taşıyabilecek nitelikte olduğunu açıklamaktadır. Eklem-uzuv modeli ve MATLAB yazılımında ters dinamik yöntem kullanılarak yapılan benzetim işlemi, eklem momentlerinin hesaplanmasında başarılı sonuçlar ortaya koymuştur.

Anahtar Kelimeler: Alt ekstremitte, eklem momenti, ters dinamik yöntem, SimMechanics

1. Giriş

Canlıları cansızlardan ayıran en büyük özelliklerden biri hareket etmektir. İnsan, gündelik işleri sırasında çok farklı hareketler sergiler. İnsan hareketlerinin tanımlanabilmesi ortez ve protez tasarımları [1-2], ergonomik çalışmalar [3], sportif faaliyetler [4-6] ve insansı mekanizmalar [7-8] açısından önem arz etmektedir.

Sayısız miktarda kas, eklem ve sinir etkileşimi içeren insan hareketleri, günlük yaşantı içerisinde farkına varılmadan gerçekleştirilmektedir. Bazı hareketleri gerçekleştirebilmek için nispeten daha fazla güce ihtiyaç vardır. Dolayısıyla hareket sistemi üzerine binen yük artmaktadır. Alt ekstremitte ve gövde kaslarının uyumlu bir şekilde çalıştığı bu hareketler; oturup kalkma, çömelip kalkma ve basamak çıkma şeklinde sıralanabilir.

Günümüzde insan hareketlerinin dinamik ve statik analizlerini gerçekleştirmek için geliştirilmiş birçok ticari ve akademik yazılım mevcuttur [9]. Son yıllarda, karmaşık olmayan insan hareketlerinin dinamik olarak analiz edilmesinde kullanılan bir diğer uygulama SimMechanics yazılımıdır [2, 7-8, 10-11]. Bu çalışmada insan vücudu, SimMechanics (2.7.1) [12] yazılımında 6 parçalı açık zincir bir eklem-uzuv modeli ile temsil edilmiştir. SimMechanics ortamında oluşturulan modeldeki eklemlerin tahriki, hareket analizi verilerinden yararlanılarak sağlanmış ve

*Sorumlu yazar: Adres: Sakarya Üniversitesi Makine Eğitimi Bölümü, 54187, Sakarya TÜRKİYE. E-mail adres: kserbest@sakarya.edu.tr, Tel: +902642956538

ters dinamik yöntem kullanılarak çözüme ulaşılmıştır. Ters dinamik yöntem, mekaniğin kinematik ve kinetik disiplinleri arasında bağlantı kuran bir alt dalıdır. Bu yöntem kuvvet ve momentleri, hareket halindeki cisimlerin kinematik ve atalet özelliklerinden yararlanarak dolaylı olarak belirleyen bir süreci ifade etmektedir [13]. Benzetim işlemi sonucunda, incelenen hareketler esnasında meydana gelen yer tepki kuvvetleri ve eklem momentleri tespit edilmiştir.

2. Gereç ve Yöntem

2.1. Antropometrik özelliklerin belirlenmesi

Hareketleri incelenecek olan gönüllü denek; 26 yaşında, hareketlere mani olacak herhangi bir sağlık sorunu bulunmayan, kütlesi 70.2 kg ve boyu 174 cm olan erkek bireydir. Çalışma, Mayıs 2012 tarihinde Sakarya Üniversitesi Beden Eğitimi ve Spor Yüksekokulu Biyomekanik Laboratuvarında yapılmıştır. Kinematik ve kinetik analizleri gerçekleştirebilmek için denekğin antropometrik özelliklerinin belirlenmesi gerekmektedir (Tablo1). Bu amaçla, antropometrik modellerden [13-14] ve CAD (Computer Aided Design - Bilgisayar Destekli Tasarım) yazılımlarından faydalanılmıştır.

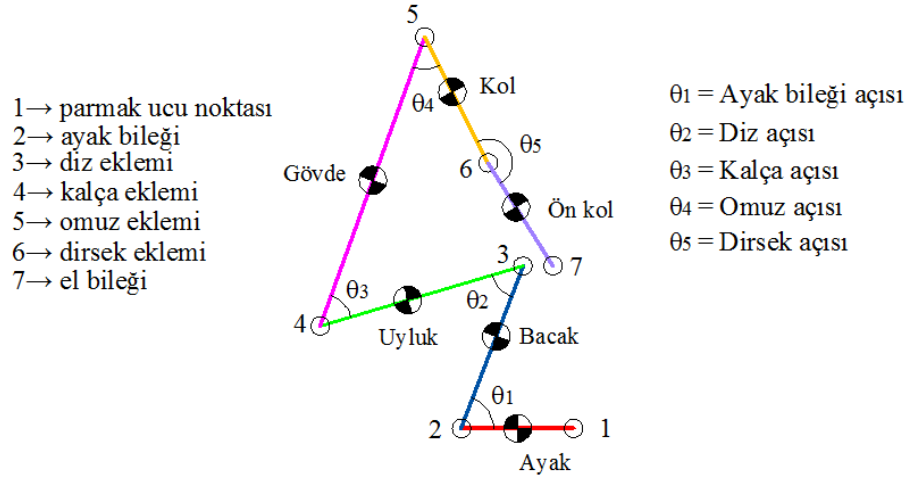
Tablo1. Deneğe ait uzuvların antropometrik özellikleri

Uzuv	Uzuv boyu (cm)	Kütle (kg)	Atalet momenti ($\text{g}\cdot\text{cm}^2$)			Proksimal uçtan itibaren kütle merkezi yeri (cm)
			I_{xx}	I_{yy}	I_{zz}	
Ayak	24.33	0.993	$7\cdot 10^3$	$30\cdot 10^3$	$33\cdot 10^3$	12.16
Bacak	37.53	3.185	$329\cdot 10^3$	$29\cdot 10^3$	$391\cdot 10^3$	16.25
Uyluk	45.82	6.850	$1157\cdot 10^3$	$224\cdot 10^3$	$1137\cdot 10^3$	19.84
Gövde	66.44	23.53	$19744\cdot 10^3$	$9325\cdot 10^3$	$12736\cdot 10^3$	32.88
Kol	30.52	1.965	$132\cdot 10^3$	$22\cdot 10^3$	$133\cdot 10^3$	13.3
Ön kol	26.3	1.123	$64.5\cdot 10^3$	$8.8\cdot 10^3$	$66.9\cdot 10^3$	11.31

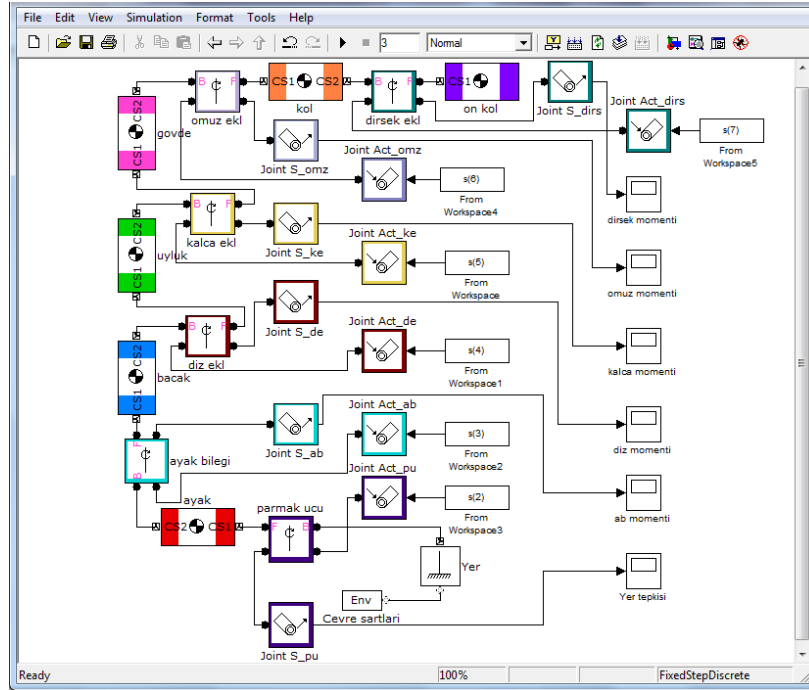
2.2. Eklem-uzuv modeli

İnsan vücudunun biyomekanik olarak incelenmesinde eklem-uzuv modelleri sıklıkla kullanılmaktadır [1, 6, 15]. Bu çalışmada insan vücudu ayak, bacak, uyluk, gövde, kol ve ön kol olmak üzere toplam 6 katı uzuvdan oluşan ve açık zincir mekanik yapıya sahip bir eklem-uzuv modeli ile temsil edilmiştir. İncelenen hareketler esnasında uzuvlar simetrik olarak hareket ettiğinden vücudun, sagittal düzleme göre yarısı referans alınarak eklem uzuv modeli oluşturulmuştur (Şekil 1). Oluşturulan eklem-uzuv modeli ve denekğin antropometrik özellikleri,

dinamik analizlerin gerçekleştirilebilmesi için SimMechanics yazılımı ile MATLAB ortamına aktarılmıştır. Sagital düzlemde iki boyutlu olarak oluşturulan modelde uzuvlar katı cisim olarak kabul edilmiştir [2, 15-16]. Çok serbestlik dereceli ve polisentrik yapıdaki eklemler, sagital ekseninde ekstansiyon-fleksiyon hareketlerini yapabilecek şekilde modellenmiştir [15]. Şekil 2, dinamik analizlerin yapılacağı SimMechanics modelinin blok diyagramlarını göstermektedir.



Şekil 1. Sagital düzlemdeki eklem-uzuv modeli ve eklem açıları



Şekil 2. Eklem-uzuv modelinin SimMechanics blok diyagramı

2.3. Hareket analizi

SimMechanics yazılımında oluşturulan modelin çözümü, ters dinamik yöntem kullanılarak gerçekleştirileceğinden uzuvları birbirine bağlayan eklemlere ait hareketlerin tam olarak bilinmesi gerekmektedir. Bu amaçla denek üzerine; ayakucu, ayak bileği, diz, kalça, omuz, dirsek ve el bileği noktalarına yansıtma özelliği olan işaretleyiciler yerleştirilmiştir. Denek, hareketleri gerçekleştirirken görüntüler kamera ile izlenmiş ve MATLAB ortamında görüntü işleme teknikleri kullanılarak işaretleyicilere ait konum verileri elde edilmiştir. Ayrıca hareketler esnasında oluşan yer tepki kuvvetleri kuvvet platformu aracılığıyla ölçülmüştür. Denek oturup kalkma hareketini, kolçakları ve sırt desteği olmayan bir tabure üzerinden kendi belirlediği normal bir hız ile 20 cm ve 40 cm yüksekliklerden gerçekleştirmiştir. Çömelip kalkma hareketi, vücut dik pozisyonda ve iki ayak üzerindeyken yere çömelip tekrar aynı pozisyona gelme şeklinde gerçekleştirilmiştir. Basamak çıkma hareketi incelenirken gönüllü denek, 10 cm ve 20 cm yüksekliğindeki basamaklara basarak tek ayağı üzerinde yükselmiştir [16].

Bu analiz işlemi için saniyede 50 kare görüntü yakalama özelliği olan ve 720 x 576 piksel çözünürlüğündeki bir video kamera, dikey yöndeki tepki kuvvetlerini ölçen bir kuvvet platformu (veri toplama hızı 500 Hz, Kistler Quatro Jump), aydınlatma sistemi, yansıtma özelliği olan pasif işaretleyiciler ve bilgisayar sistemi kullanılmıştır. Yedi antropometrik noktaya yerleştirilen işaretleyicilerin koordinat değerlerinin elde edilmesi için görüntülerin sayısallaştırılması gerekmektedir. Kamera görüntülerindeki işaretleyicilerin konum verilerinin tespit edilmesi amacıyla MATLAB (7.6.0) yazılımında hazırlanan kodlar kullanılmıştır. SimMechanics modelindeki eklemleri harekete geçirmek için gerekli açısal yer değiştirme, açısal hız ve açısal ivme değerleri, işaretleyicilerin koordinat değerlerinden faydalanılarak MATLAB ortamında hesaplanmıştır [16].

3. Bulgular

MATLAB yazılımı ile yapılan benzetim işlemi sonucunda ayak bileği, diz ve kalça eklemlerinde meydana gelen moment değişimleri analiz edilmiştir [17-18]. Oluşturulan modelin doğruluğunu sınamak için hareket analizi işlemi sırasında kuvvet platformu aracılığıyla ölçülen dikey yer tepki kuvvetleri, MATLAB yazılımında yapılan benzetimin sonucunda hesaplanan dikey yer tepki kuvvetleri ile karşılaştırılmıştır. Hesaplanan yer tepki kuvvetlerinin ölçülen yer tepki kuvvetleri ile tutarlı olduğu görülmüştür.

Tablo 2’de, hareketler esnasında oluşan en büyük dikey yer tepki kuvvetlerinin karşılaştırması görülmektedir. Benzetim işlemi ile hesaplanan yer tepki kuvvetinin maksimum değerinin, ölçülen değerlere çok benzer olduğu açıktır. Bu durum, SimMechanics yazılımında oluşturulan modelin oturup kalkma, çömelip kalkma ve basamak çıkma hareketlerinin dinamik analizini başarılı bir şekilde gerçekleştirdiğini göstermektedir. SimMechanics yazılımının sunduğu esneklikler sayesinde eklem momentleri kolaylıkla hesaplanmıştır. İncelenen hareketlerde en büyük momentler alt ekstremite eklemlerinde meydana gelmektedir. Tablo 3, SimMechanics yazılımında hesaplanan en büyük eklem momentlerini göstermektedir.

Tablo 2. Yer tepki kuvvetlerinin karşılaştırması. N; Newton, BW; vücut ağırlığı

Dikey yer tepki kuvveti (N / BW)	İncelenen hareket				
	Oturup kalkma		Çömelip kalkma	Basamak çıkma	
	20 cm	40 cm		10 cm	20 cm
Kuvvet platformu	1.33	1.22	1.29	1.17	1.25
SimMechanics	1.41	1.25	1.38	1.14	1.23

Tablo 3. Eklemlerde meydana gelen en büyük momentler

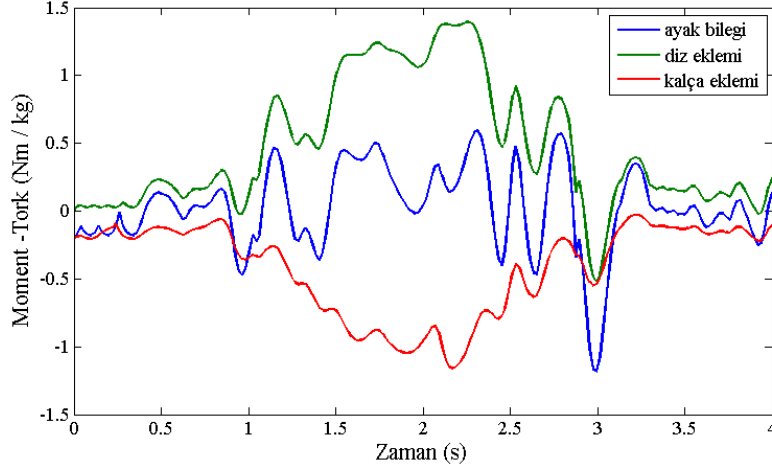
İncelenen hareket	En büyük eklem momenti (N·m)		
	Ayak bileği	Diz eklemi	Kalça eklemi
20 cm kalkış	97.8	111.4	-68.2
40 cm kalkış	133.6	139.4	-50.1
Çömel – kalk	-83.1	97.8	-81.3
10 cm basamak çıkma	144.7	139.6	-42
20 cm basamak çıkma	146	157.2	-29

4. Sonuç ve Tartışma

Gündelik fiziksel aktivitelerin başında gelen hareketlerin incelendiği bu çalışmada, eklem momentlerine bakıldığında en büyük zorlanmaların diz ekleminde olduğu görülmektedir. Diz eklemine en fazla zorlayan hareket, basamak çıkma hareketidir ve basamak yüksekliği arttıkça, ekleminde meydana gelen moment de artmaktadır (Bkz. Tablo 3). Margaret ve ark. [19] tarafından oturup kalkma hareketine yönelik gerçekleştirilen çalışmada en büyük eklem momentinin diz ekleminde meydana geldiği tespit edilmiştir. Oturma yüksekliği arttıkça (20 cm'den 40 cm'ye) ekleminde meydana gelen moment artmaktadır. Oturma yüksekliğinin artması, vücut kütle merkezinin diz ve ayak bileği eklemlerinden uzaklaşmasına neden olmaktadır. Bu durum oluşan eklem momentini yükseltmektedir. Bu veriler, diz ekleminin anatomik yapısının [20-21] ekstansiyon ve fleksiyon hareketleri sırasında oluşan yüksek momentleri taşıyabilecek nitelikte olduğunu ortaya koymaktadır.

İncelenen hareketlere bakıldığında en düşük momentlerin kalça ekleminde olduğu anlaşılmaktadır. Yere çömelip kalkma hareketi, kalça eklemine en çok zorlayan harekettir. Nispeten daha düşük eklem momentleri oluşmasına rağmen, çömelip kalkma hareketi insanı en

çok yoran harektir. Çömelip kalkma hareketine ait moment grafiği incelendiğinde en uzun süreli değişimin bu hareket sırasında olduğu anlaşılmaktadır (Şekil 3). Bu durum, hareket esnasında daha fazla enerji harcanmasını gerektirir.



Şekil 3. Çömelip kalkma esnasında meydana gelen eklem momentlerinin değişimi

Bu çalışmanın en büyük sınırlılığı olarak, tek bir deneğin hareketlerinin incelenmesi gösterilebilir. Örneklem sayısı artırılarak daha kapsamlı incelemeler yapmak mümkündür. Ancak şunu göz ardı etmemek gerekir ki, insana ait her oluşumda olduğu gibi, insan hareketi de kişiye özel farklılıklar içerir. Bunlara antropometrik farklılıklar da ilave edilince değişik sonuçlara ulaşılabilir. Çalışmanın özgün unsuru, harici bir aparat kullanılarak doğrudan ölçülmesinde sakıncalar bulunan eklem momentlerinin [1, 15, 19], mekanik sistemlerin analizi için geliştirilmiş bir yazılım kullanılarak başarılı bir şekilde hesaplanmasıdır.

Teşekkür

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

Kaynaklar

- [1] Kaptı AO. İnsan alt ekstremitesinin incelenmesi ve aktif diz üstü protezi tasarımı. Doktora tezi. İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü; 2001.
- [2] Jamshidi N, Rostami M, Najarian S, Menhaj MB, Saadatnia M, Firooz S. Modelling of human walking to optimise the function of ankle-foot orthosis in Guillan-Barre patients with drop foot. Singapore Med J 2009;50(4):412-7.

- [3] Mavrikios D, Karabatsou V, Alexopoulos K, Pappas M, Gogos P, Chryssolouris G. An approach to human motion analysis and modelling. *International Journal of Industrial Ergonomics* 2006;36:979-89.
- [4] Hubbard M, Hibbard RL, Yeadon MR, Komor A. A multisegment dynamic model of ski jumping. *International Journal of Sport Biomechanics* 1989;5:258-74.
- [5] Cavanagh PR, Lafortune MA. Ground reaction forces in distance running. *J. Biomechanics* 1980;13:397-406.
- [6] Çilli M. İnsan hareketinin modellenmesi ve benzeşiminde temel bileşenler analizi yönteminin kullanılması. Doktora tezi. Hacettepe Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü; 2007.
- [7] Dumas B, Xu WL, Bronlund J. Jaw mechanism modeling and simulation. *Mechanism and Machine Theory* 2005;40:821-33.
- [8] Winder SB, Esposito JM. Modeling and control of an upper-body exoskeleton. 40th Southeastern Symposium on System Theory; 2008 March 16-18; New Orleans, USA. p. 263-8.
- [9] Lee K. CAD systems for human –centered design. *Computer-Aided Design & Applications* 2006;3:615-28.
- [10] Hang S, Zhaoli M. Kinematics simulation of sit to stand based on SimMechanics. *International Conference on Future Computer Science and Education*; 2001 China. p.59-61.
- [11] Amca AM, Harbili E, Arıtan S. Koparma kaldırışının biyomekanik analizi için mekanik model geliştirilmesi. *Hacettepe Spor Bilimleri Dergisi* 2010;21:21-9.
- [12] The MathWorks Inc. MATLAB 7.6.0, 2008.
- [13] Gordon D, Robertson E, Caldwell GE, Hamill J, Kamen G, Whittlesey SN. *Research methods in biomechanics*. USA: Human Kinetics; 2004.
- [14] Chandler RF, Clauser CE, McConville JT, Reynolds HM, Young JW. *Investigation of inertial properties of the human body*. Aerospace Medical Research Laboratory; 1975; Washington D.C.
- [15] Winter DA. *Biomechanics and motor control of human movement*. 2nd ed. Canada: John Wiley & Sons; 1990.
- [16] Serbest K. İnsan vücudunun farklı durumlardaki hareketinin dinamik modellenmesi ve simülasyonu. Yüksek Lisans Tezi. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü; 2012.
- [17] SimMechanics User's Guide. The MathWorks Inc.;2008.
- [18] Simulink for System and Algorithm. Training Book. MathWorks Inc.; 2010.
- [19] Margaret KYM, Levin O, Mizrahi J, Hui-Chan CWY. Joint torques during sit-to-stand in healthy subjects and people with Parkinson's disease. *Clinical Biomechanics* 2003;18:197-206.
- [20] Tandoğan NR. The meniscus: biomechanics, kinematics and function. *Acta Orthop Traumatol Turc* 1997;31:397-401.
- [21] Drake RL, Vogl W, Mitchell AWM. *Gray's anatomy for students*. Canada: Churchill Livingstone Elsevier; 2004, p.532-40.