

# KOPARMA TEKNİĞİNİN BİYOMEKANİĞİ

Erbil HARBİLİ<sup>1</sup>, Serdar ARITAN<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Selçuk Üniversitesi Beden Eğitimi ve Spor Yüksekokulu

<sup>2</sup>Hacettepe Üniversitesi Spor Bilimleri ve Teknolojisi Yüksekokulu

## ÖZET

Halterde koparma tekniği, dinamiği son derece karmaşık olan olimpik bir spor dalıdır. Koparma tekniğinde etkili olan eklem kuvvetleri kaldırışın başarısını etkilediği kadar spor yaralanmalarının boyutunu ve görülme sıklığını da belirleyen dinamiklerdir. Bu çalışmanın amacı, koparma tekniğinde eklemlerde etkili olan kuvvetleri hesaplamak ve bu hesaplamalar için önerilen modelin geçerliğini test etmektir. Önerilen modelde insan vücudu silindirik katı cisim olarak kabul edilen sekiz üyeden oluşmaktadır. Bu üyeler, ayak, alt bacak, üst bacak, üst kol, ön kol ile gövde ve başın yarısıdır. Çalışmaya bir elit halterci alındı. Haltercinin 65 kg koparma kaldırışının görüntüsü dört adet sayısal kamera kullanılarak bilgisayar ortamında kaydedildi. Hareket analizi yazılımı (SIMI Motion) kullanılarak dört ayrı kamera görüntüsü işlendi. Antropometrik noktaların üç boyutlu kinematik verisi Doğrudan Doğrusal Dönüşüm algoritması ile hesaplandı. Vücut üyelerinin kütlesi ve üye kütle merkezi Clauser ve ark. (1969)'nın verisi kullanılarak hesaplandı. Serbest cisim diyagramında tanımlanan ve kaldırış sırasında etkili olan eklem kuvvetleri görüntünün sayısallaştırılması sonucu elde edilen kinematik veriden Newton-Euler hareket denklemleri kullanılarak ters dinamik analiz ile üç boyutlu olarak hesaplandı. Modelin geçerliğini test etmek için gerekli olan yer tepki kuvveti hareket analiz ile eşzamanlı olarak kuvvet platformu kullanılarak ölçüldü. Koparma tekniği için oluşturulan katı cisim modelinden hesaplanan dikey yer tepki kuvvetinin büyüklüğü kuvvet platformu ile ölçülen dikey yer tepki kuvvetinden daha fazla olduğu gözlemlendi. Model yardımıyla hesaplanan yer tepki kuvvetleri ile koparma hareketi sırasında ölçülen yer tepki kuvvetleri karşılaştırıldığında davranışların benzerliği katı cisim modelinin geçerliğini gösterdi. Katı cisim modelinden hesaplanan yer tepki kuvvetlerinin kabuller çerçevesinde koparma hareketini temsil ettiği ve dinamik modelin de geçerli bir yaklaşım olduğu sonucuna varıldı.

**Anahtar Sözcükler:** Halter, Koparma, Model, Ters dinamik, Eklem kuvvetleri

## BIOMECHANICAL ANALYSIS AND MODELLING OF SNATCH TECHNIQUE

### ABSTRACT

Snatch is a complex sports event in the Olympic weightlifting. The joint forces and moments not only play an important role in the dynamics of successful lifting but they are also related to sports injuries. In this study, the human body was modelled as a simplified rigid body. Three-Dimensional (3D) joint forces were calculated during the snatch

attempt. The snatch movement of 65 kg weights was captured by using four high-speed digital cameras. The ground reaction forces were also recorded by using a synchronised force plate. The four camera views were processed by using Simi Motion software, and 3D spatial coordinates of anthropometric points were obtained by utilising DLT algorithm. The joint forces and moments were calculated by utilising inverse dynamics into the rigid body model. The validity of the rigid body model was evaluated by comparing with calculated and measured ground reaction forces. In the calculations, the magnitude of the vertical ground reaction force was higher for the rigid body model compared to the measured values. Finally, the vertical ankle joint force was the largest in magnitude during lift. The shoulder joint moments were also higher than the other joints. As a result, rigid body model shows similar results and represents the real life.

**Key Words:** Weightlifting, Snatch, Modelling, Inverse dynamics, Joint forces

### **Bilimsel Kısaltmalar**

S1	Ayak
S2	Alt bacak
S3	Üst bacak
S4	Gövde
S5	Üst kol
S6	Ön kol
S7	Baş
SB	Bar ve el
M(1)	Ayak bileği eklem merkezi
M(2)	Diz eklem merkezi
M(3)	Kalça eklem merkezi
M(4)	Omuz eklem merkezi
M(5)	Üstkolun proksimali
M(6)	Dirsek eklem merkezi
g	Yerçekimi ivmesi (m.s-2)
F <sub>ix</sub>	i eklemdaki öne-arkaya kuvvet bileşeni (N)
F <sub>iy</sub>	i eklemdaki yanal kuvvet bileşeni (N)
F <sub>iz</sub>	i eklemdaki dikey kuvvet bileşeni (N)
L	Üye uzunluğu (m)
v	Doğrusal hız (m.s-1)
a	Doğrusal ivme (m.s-2)
m <sub>i</sub>	Üye kütlesi (kg)
P <sub>i</sub>	Üye kütle merkezinin üye uzunluğuna oranı

### **GİRİŞ**

Günümüzde performans sporlarında mücadele eden sporcular insan vücudunun sınırlarını zorlamaktadır. Özellikle halter gibi tekniğin, patlayıcı kuvvetin ve esnekliğin üst düzeyde sergilendiği bir spor branşında performans artışı için kas kuvvetinin artırılması ve bu kuvvetin teknikte bütünleşmesi sınırların zorlanmasındaki temel nedenleri oluşturmaktadır (Souza, Shimada ve Koontz, 2002). Böylesine dinamiği karmaşık bir yapı sergileyen halter sporunda kuvvet ve kuvvetin vücut üzerindeki etkilerini incelemek biyomekanik analizleri ve modellemeleri gerektirmektedir.

İnsan vücudunda sportif hareketler sırasında üyeler arası kuvvetlerle ilişkili birçok problemin çözümünde ters dinamik hesaplama ve bilgisayar modellemesi yaygın bir şekilde kullanılır. Bu tüm vücut biyomekanik modellemelerinde üyeler (baş, kol, gövde vb.) birbirine basit kinematik hatlarla bağlanan katı cisimlerden oluşturulur (Pain ve Challis, 2006). Birbirine bağlı katı cisimlerden oluşan insan modellemelerinde üyelerin eklemlerle birbirine bağlandığı ve üyenin başa yakın (proksimal) ve baştan uzak olan (distal) uçlarında oluşan kuvvet ve momentler dinamik olarak hesaplanabilmektedir (Winter, 2005). Bu hedefe ulaşmak için ilk

adım yer tepki kuvvetlerini ve yeterli sayıda kinematik değişkeni kuvvet platformu ve hareket analizi kullanarak ölçmektir. İkinci adımda insan vücudunun biyomekanik modeli oluşturularak deney verisinden ters dinamik hesaplamalarla eklem kuvvet ve momentlerinin hesaplanmasıdır (Gruber, Ruder, Denoth ve Schneider, 1998). Hareket analizi ve kuvvet platformunun kullanıldığı ilk çalışmalardan biri olan Enoka (1979)'nın çalışmasında hareket analizi ile barın dikey eksenindeki yer değiştirmesi belirlendikten sonra bara uygulanan dikey kuvvet Newton mekaniği kullanılarak hesaplanmış ve kuvvet platformu ile ölçülen yer tepki kuvveti ile karşılaştırılarak çekiş evresinde iki pozitif ivmeli hareketin yapıldığı, yere ve bara uygulanan kuvvette azalmanın görüldüğü negatif ivmeli bir davranış gözlemlenmiştir.

Ağırlık kaldırma sporlarının dinamiğini inceleyen çalışmalarda, koparma, silkme, sabit omuzlama, skuat, "dead lift" gibi olimpik olan ve olmayan branşlar göze çarpmaktadır. Bu çalışmalarda, ya "dead lift" tekniğinde olduğu gibi hareketin tümü ya da tekniklerin sadece çekiş evrelerinin kinetik ve kinematikleri incelenmiştir. Özellikle barın kaldırılması sırasında sistem ağırlığının yere uyguladığı kuvvetin dikey bileşeninin ölçüldüğü (Enoka, 1979; Souza, Schimada ve Koontz, 2002) ve hareket analizi ile eklem kinematiklerinin (Bartoniets, 1996; Burdett, 1982; Enoka, 1988; Gourgoulis, Aggeloussis, Kalivas, Antoniou ve Mavromatis 2004; Garhammer, 1980, 1982, 1985, 1991; Garhammer, Kauhanen ve Hakkinen, 2002; Garhammer ve Takano, 1992; Gourgoulis ve ark., 2002; Gourgoulis, Aggelousis, Mavromatis ve Garas, 2000; Isaka, Okada ve Funato, 1992; Schilling ve ark., 2002) değerlendirildiği görülmektedir. Brown ve Abani (1985)'nin çalışmasında ise, "dead lift" kaldırışının iki boyutlu dinamik modeli sonucunda, barın kütlesine bağlı olarak

hem kalça, diz ve ayak bileği eklemlerindeki kuvvetin, hem de kalça eklemine etki eden üyeler arası bileşke momentin büyüklüğünün arttığı görülmüştür. Bar ile kalça, diz ve ayak bileği eklemleri arasındaki yatay moment kollarının, eklemlerdeki bileşke moment değerleri ile yüksek ilişki gösterdiği bulunmuştur.

Aynı çalışmada, eklemlerdeki dikey yöndeki kuvvet değişimlerinin barın dikey yöndeki ivme değişimleri ile doğrudan ilişkili olduğu da vurgulanmaktadır. Ancak, çalışmada omuz ve dirsek eklemine etki eden kuvvet ve moment bulguları sunulmamıştır. Buna karşın, endüstride malzemelerin yerden öne eğilerek ve çömelerek yukarıya kaldırılmasına ilişkin ergonomik modelleme çalışmaları yapılmıştır. Freivalds, Chaffin, Garg ve Lee (1984)'nin belirttiğine göre, sırtın aşırı bükülmesi bel ligamentlerini zorlamakta, kaldırışın aniden hızlı çekilerek yapılması vücut üzerindeki eylemsizlik kuvvetlerini artırmakta ve kaldırışta gövdenin aşırı ivmeli hareketi bel bölgesindeki gerilmeleri daha da artırmaktadır.

Bunun yanında, yapılan işteki değişkenler, örneğin kaldırılan malzemenin büyüklüğü, şekli ve yükün ağırlığındaki değişimlerin bel ve sırttaki stresleri artıracakı vurgulanmaktadır. Literatürde koparma tekniğinin üç boyutlu dinamik modeline ve koparma tekniğine özel eklem kuvvet ve momentlerinin tartışıldığı bir çalışmaya rastlanamamıştır.

Koparma tekniğinde vücut ve bardan oluşan sistemin dinamik davranışı tekniğin tüm evreleri göz önüne alındığında oldukça karmaşıktır. Ancak, koparma tekniğine özel bir model yaklaşımı, bu karmaşıklığı gidererek tekniğin tüm evrelerinde bar ve vücut üyelerinin dinamiklerinin açıklanmasını sağlayabilir. Koparma tekniğinde vücut üyelerinin dinamiklerini temsil edebilecek model yaklaşımında, vücut ve bardan oluşan sistemin

simetrisi kaldırışın dinamik yapısını etkileyen önemli bir faktördür. İdeal olan vücutun ve barın her iki yarısının benzer bir dinamik davranış sergilemesidir. Bu nedenle, koparma kaldırışında vücutun bağlantılı katı cisim modelinin koparma tekniğinin dinamik davranışını temsil edebileceği düşünülmektedir. Koparma tekniğinin simetrik olduğu noktasından hareketle çalışmanın iki temel amacı vardır. Bunlardan ilki eklem kuvvetlerini doğrudan ölçen bir yöntem olmadığı için kuvvet platformu ile ölçülen yer tepki kuvvetini kullanarak eklem kuvvetlerini hesaplamaktır. İkincisi ise vücut ve bardan oluşan sistemin bir tarafının yere uyguladığı kuvveti bir model oluşturarak hesaplamak ve modelden hesaplanan yer tepki kuvveti ile kuvvet platformundan ölçülen yer tepki kuvvetini karşılaştırarak modelin geçerliliğini test etmektir.

## YÖNTEM

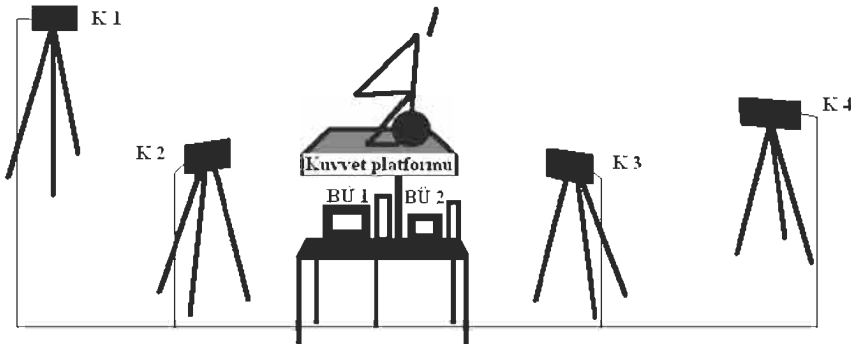
**Denekler:** Çalışmada koparma kaldırışı için geliştirilen biyomekanik modelin işlerliğinin değerlendirilmesi için bir denek kullanıldı. İnsan vücudunu oluşturan üye-

lerin özellikleri (kütle, kütle merkezi vb.) modelde değişken olarak tanımlandığı için bireysel farklılıkları kapsamaktadır. Modelde bir başka değişken koparma kaldırışında vücut üyelerinin ve barın kinematik verisidir. Bu nedenle halter erkek milli takımının 69 kg kategorisinde yarışan Olimpiyat oyunlarında ve uluslar arası yarışmalarda dereceleri olan bir halterci (yaş: 30 yıl, boy: 1.62 m, vücut kütlesi: 60 kg) çalışmaya denek olarak alındı.

**Verilerin Toplanması:** Çalışmada dinamik modelin girdisini oluşturan verinin toplanması iki aşamada gerçekleştirildi. Ters dinamik analiz hesaplamalarında kullanılmak üzere kinematik verinin elde edilmesi için görüntü kaydı ve modelden hesaplanan yer tepki kuvvetleri ile modelin işlerliğini test edecek kuvvet platformu ölçümü yapıldı. Deney düzeneğinde kullanılan hareket analizi sistemi ve kuvvet platformu Şekil 1'de gösterilmiştir.

## Veri Toplama Araçları

**Hareket analizi sistemi:** Vücut üyeleri ve bar hareketinin 3 boyutlu kinematik



**Şekil 1.** Deney verisini toplama aşamasını gösteren şematik resim. K1, K2, K3 ve K4 kameraların yerleşim pozisyonlarını gösterirken BÜ 1, kamera görüntülerini, BÜ 2 kuvvet platformu verisini toplayan bilgisayar üniteleridir.

verisi insan hareketlerinin analizi için geliştirilen "SİM Motion 7.3" yazılımı kullanılarak bilgisayar ortamında elde edildi. Hareket analizinde kullanılan donanımı oluşturan elektronik cihazlar şunlardı: 4 adet taşınabilir video kamera (200 Hz frekanslı Basler A602f-HDR), kamera ile kaydedilen görüntüyü yakalamak için iki video kartı (Board Firewire PCI), senkronize kutusu (Trigger Box), kalibrasyon kafesi (uzaysal konumları bilinen 12 noktalı kafes), eklemlere ve bara yerleştirilen yansıtıcı işaretler ("reflective marker").

Hareket analizi üç aşamada gerçekleştirildi:

**Görüntü kaydı:** Haltercinin koparma kaldırışı 4 adet kamera ile kaydedildi. Kameralar vücudun sağ tarafına yaklaşık 180° açıyı tarayacak şekilde yerleştirildi (Şekil1). Dört farklı kameranın çektiği görüntü 2 adet video kartı ile yakalandı ve görüntüler senkronize kutusu yardımı ile eşzamanlı toplandı.

**Sayısallaştırma:** Bu çalışmada kullanılan 11 yansıtıcı işaret tüm vücudun eklemlerine yerleştirildi. Her bir resimdeki yansıtıcı işaretler yazılımın otomatik sayısallaştırma komutu ile sayısallaştırıldı. Hatalı sayısallaştırılan noktalar fare yardımıyla elle tıklanarak düzeltildi. Antropometrik noktaların sayısallaştırma işlemleri tamamlandıktan sonra kalibrasyon görüntüsünde kafes üzerindeki noktaların sayısallaştırma işlemi gerçekleştirildi. Bu noktaların uzaysal konumları yazılıma tanıtıldı. Her bir yansıtıcı işaretin konum bileşenlerine DLT (Direct Linear Transformation) algoritması uygulandı.

**Yumuşatma:** Sayısallaştırılarak uzaysal konumları elde edilen noktaların konum verisi filtrelenerek yumuşatıldı.

**Kuvvet platformu:** Yer tepki kuvveti (YTK), insan vücudunun yere uyguladığı kuvvete karşı yerin gösterdiği bir tepkidir. Koparma kaldırışında haltercinin vücut ağırlığı (60 kg) ve bar ağırlığının (65 kg)

oluşturduğu sistemin yere uyguladığı kuvvetin toplanmasında yer tepki kuvveti ölçme sistemi (YTKOS, Tümer Elektronik, Türkiye) kullanılmıştır (Tümer, 2005).

Bu sistem; kuvvet platformu, güçlendiriciler (amplifikatörler), analog sayısal çevirici (A/D çevirici) ve bilgisayardan oluşmuştur.

**Yer tepki kuvveti bileşenlerinin hesaplanması:** Kuvvet platformunda YTK ölçmek için her biri en fazla 10 kN ölçebilen sekiz adet yük ölçer (AMKN-1D, Gefran, İtalya) kullanılmıştır. Yük ölçerlerin ikisi öne-arkaya ( $F_x$ ) diğer ikisi yanlara ( $F_y$ ) ve platformun köşelerine yerleştirilen dört adet yük ölçer ise dikeyde uygulanan kuvvetleri ( $F_z$ ) ölçmüştür. Kuvvet platformu dikey ekseninde toplam 40 kN, yanlara ve öne-arkaya 10'ar kN ölçme kapasitesine sahipti. Yük ölçerler sekiz adet sinyal güçlendiriciye (PCIR, Gefran, İtalya) bağlanmıştır. Sinyal güçlendiricilerin girişleri seçilen yük ölçerlerine uygun olarak 2.000 mV/V'a, çıkışları ise tam yükte 10 V çıkış verecek şekilde ayarlanmıştır.

Sinyal güçlendiricilerin çıkışları (AD-716, Advantech, ABD) 16 bitlik bir analog sayısal dönüştürücü kartının ilk sekiz kanalına bağlanmıştır. Platformdan alınan sinyaller ilk önce bir yükselteç yardımı ile yükseltilecek bilgisayar içinde bulunan A/D (Analog/sayısal) çeviricisine gönderilmiştir. Analog sinyaller bu çevirici yolu ile sayısal bilgiye dönüştürülmüştür.

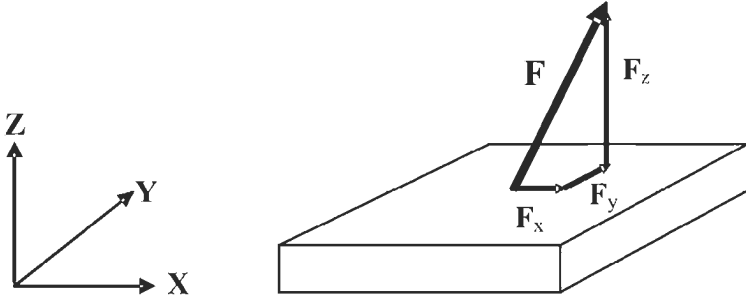
Yer Tepki Kuvvetinin öne-arkaya ve yanlara olan bileşenleri o yönlerdeki yük ölçerlerden gelen sayısal verinin vektörel farkına eşittir.

$$F_x = F_{x1} - F_{x2} \quad (1)$$

$$F_y = F_{y1} - F_{y2} \quad (2)$$

Yere uygulanan kuvvetin dikey bileşeni ( $F_z$ ) platformun köşelerine yerleştirilen yük ölçerlerden gelen sayısal verinin vektörel toplamına eşittir.

$$F_z = F_{z1} + F_{z2} + F_{z3} + F_{z4} \quad (3)$$



Şekil 2. Kuvvet platformundan ölçülen yer tepki kuvvetinin bileşenleri.

**Eşzamanlılık (Senkronizasyon):**

Koparma kaldırışında görüntü analizi ile kuvvet platformu verisinin eşzamanlı olarak toplanabilmesi için flaş kullanıldı. Kaldırışın başlangıcında halterci başlangıç pozisyonunu aldıktan sonra, kuvvet platformunun yüzey alanı üzerine yerleştirilen ve flaşın patlaması için anahtar görevi gören metal mandala kuvvet platformunun okuyabileceği büyüklükte bir kuvvetle vuruldu. Yanan flaşı kendi aralarında eşzamanlı olan kameralardan herhangi biri-

nin görmesi sağlanarak kuvvet verisinde ilk ani yükselme ile kamera görüntüsünde flaşın patlama anı eşleştirildi (Şekil 3).

**Verilerin İşlenmesi:** Koparma, silkme ve sabit omuzlama tekniklerinin bar ve vücut kinematiğini inceleyen çalışmalarda konum verilerindeki gürültünün uzaklaştırılması için 2. dereceden kesme frekansı 3.6, 4, 6 Hz'lerde değişen alt frekansların geçişine izin veren sayısal filtreler (Enoka, 1988; Gourgoulis ve ark.,



Şekil 3. Hareket analizi ile kuvvet platformu verisini eşzamanlı toplayabilmek için kullanılan flaşın patlama anı.

2004; Isaka ve ark., 1996) ve 5 noktalı kayan ortalama (Garhammer, 1991) yumuşatma teknikleri kullanılmıştır. Souza ve ark., (2002) çalışmalarında örnekleme hızı 500 Hz olan kuvvet platformu kullanarak ölçülen kinetik veriye 8. dereceden kesme frekansı 25 Hz olan alçak geçiren sayısal filtre uygulanmıştır. Kinematik veriye ise 8. dereceden kesme frekansı 8 Hz olan sayısal filtre uygulanmıştır. Bu çalışmada ise, örnekleme frekansı 200 Hz olan kuvvet platformu ile ölçülen yer tepki kuvveti ile hareket analizi verisinden filtrelenmesi ve belirli bir frekansın üzerinde titreşim yapan sinyallerin kesilmesi için kullanılan sayısal filtrenin derecesi 4, kesme frekansı 10 Hz olarak belirlenmiştir. 4, 6 ve 8 Hz kesme frekansları hem kuvvet platformu hem de kinematik verinin 2. çekişe karşılık gelen zirve değerlerini kesmekte idi. Bu sebeple, 2. çekişteki zirve değerlerin kesilmemesi için filtrenin kesme frekansı 10 Hz olarak belirlendi. İşlemlerin tümü Matlab 7.0 yazılımında çözümlendi.

*Biyomekanik model:* Model iki temel varsayıma dayanmaktadır. Birincisi, koparma kaldırışı sırasında vücudun ve barın simetrik olduğu varsayımdır. Bu varsayıma dayanarak haltercinin vücudunun yarısı modellendi. İkincisi, vücut üyeleri katı cisimlerden oluşan bağlantılı üye modeli ile temsil edilmektedir. Katı cisim modeli gövde ve başın yarısı ile vücudun sağ tarafındaki ayak, alt bacak, üst bacak, üst kol, önkol ve barın yarısı olmak üzere toplam sekiz üyeden oluşturulmuştur. Garhammer (1982) ortasagittal simetriden dolayı kaldırış sırasında vücudun bir tarafının katı cisimlerden oluşan bağlantılı üye modeli ile temsil edilebileceğini bildirmektedir. Bu nedenle, hareket analizinde vücudun sağ tarafı (ayak, alt bacak, üst bacak, gövde, üst kol, önkol ve baş) sayısallaştırılmış ve simetriye bağlı olarak kuvvet platformu ile ölçü-

len yer tepki kuvvetinin yarısı alınmıştır. Modelde üyeler arası eklem kuvvetleri hesaplanmıştır. Katı cisim modellemelerinde üyeye etki eden kuvvet, büyüklüğünde değişim olmaksızın tepki kuvveti olarak bir üyeden diğer üyeye aktarıldığı için kaldırış sırasında vücut ve bar ağırlığından oluşan sistemin yere uyguladığı kuvvet ters dinamik analiz ile hesaplanmıştır (Şekil 4).

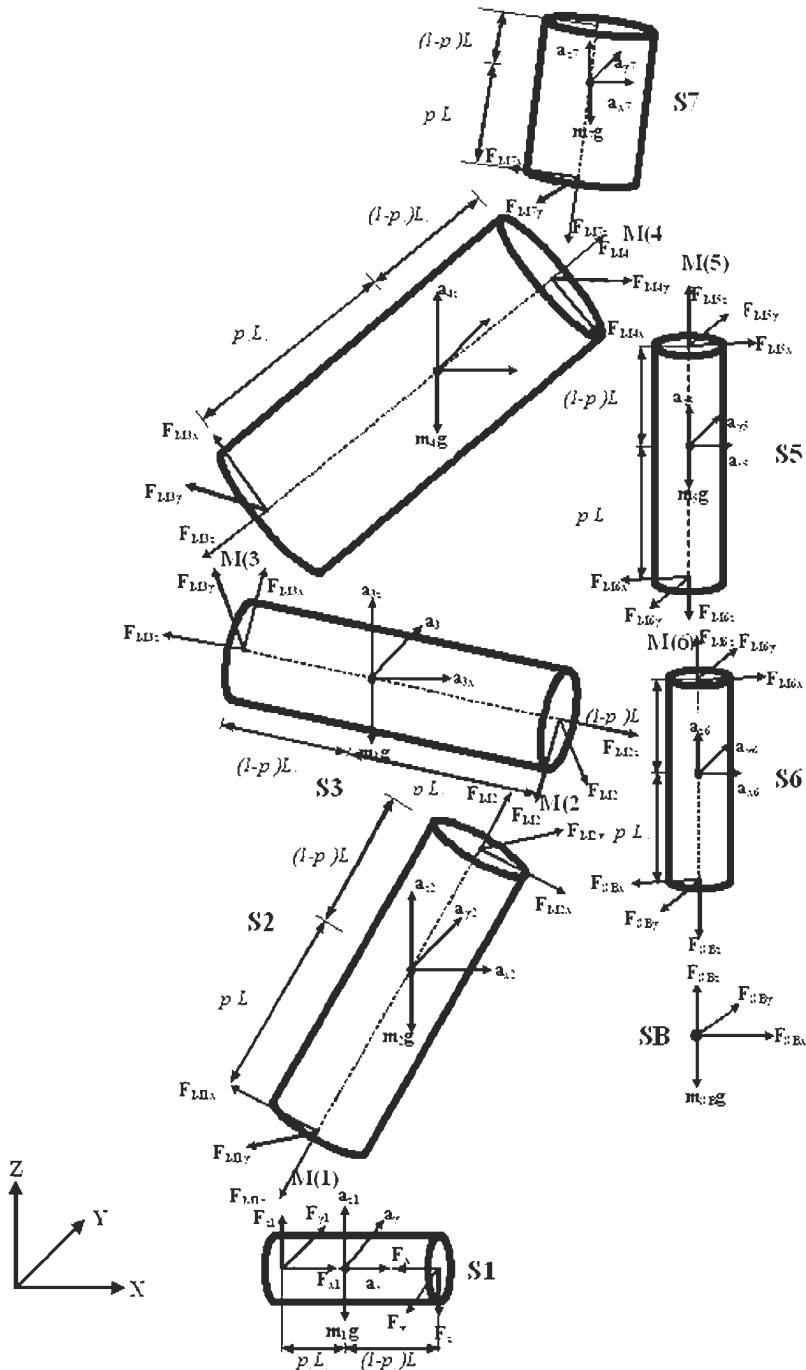
Biyomekanik modeldeki kabuller:

- 1) Halterci ve bar iki taraflı ve simetriktir,
- 2) Vücut üyeleri silindirik ve katı cisim kabul edilmiştir
- 3) Eklemler sürtünmesiz ve iğne başı olarak düşünülmüştür
- 4) Elin kütle merkezinin konumu barın merkezi ile üst üste çakıştığı ve el tarafından bara hiçbir moment uygulanmadığı kabul edilmiş ve elin kütlesi bara eklenmiştir

Biyomekanik modelin işletilmesi: Biyomekanik modelin 3 tip girdisi vardır. Bunlar; üyelerin kütlesi, kaldırışta her bir üyenin kinematik verisi ve kaldırılan barın kütlesidir.

Hareket analizi kullanılarak elde edilen eklem merkezlerinin konumlarından üye uzunlukları hesaplanmıştır. Clauser ve arkadaşları (1969)'nın referans değerleri kullanılarak üye kütleleri ve üye kütle merkezi konumları hesaplanmıştır (Tablo 1).

Üye kütle merkezlerinin doğrusal yer değiştirme verilerinden doğrusal hız ve ivme hesaplanmıştır. Eklem tepki kuvvetleri her üyenin kütle merkezinin ivmeli hareketi kütlesi ile çarpılmış ve ölçülen yer tepki kuvvetinden çıkarılmıştır. Biyomekanik modelden yer tepki kuvvetinin hesaplanmasında barın ivmeli hareketi ve kütlesi (+elin kütlesi) başlangıç değerleri olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan bu kuvvet değerlerine önkolun kütle merkezinin üç boyutlu doğrusal hareket denkleminden hesaplanan kuvvet değeri eklenmiştir.



Şekil 4. Serbset cisim diyagramı.



Sırasıyla üst kol, baş, gövde, üst bacak, alt bacak ve ayak üyeleri için aynı hesaplama yöntemi izlenerek yere uygulanan kuvvet hesaplanmıştır.

Kuvvetlerin hesaplanmasında Newton-Euler denklem sistemleri kullanılmıştır (Eşitlik 4-30). Koparma kaldırışında her bir üyenin kütle merkezinin doğrusal hareket denklemleri aşağıdaki şekilde ifade edildi (Eş.4-30):

$$F_{SBx} = -m_{SB}a_{SBx} \quad (4)$$

$$F_{SBY} = m_{SB}a_{SBY} \quad (5)$$

$$F_{SBz} = m_{SB}a_{SBz} + m_{SB}g \quad (6)$$

$$F_{M6x} = F_{SBx} - m_6a_{x6} \quad (7)$$

$$F_{M6y} = F_{SBY} - m_6a_{y6} \quad (8)$$

$$F_{m6z} = F_{SBz} - m_6a_{z6} + m_6g \quad (9)$$

$$F_{M5x} = F_{M6x} - m_5a_{x5} \quad (10)$$

$$F_{M5y} = F_{M6y} + m_5a_{y5} \quad (11)$$

$$F_{M5z} = F_{M6z} + m_5a_{z5} + m_5g \quad (12)$$

$$F_{M7x} = m_7a_{x7} \quad (13)$$

$$F_{M7y} = m_7a_{y7} \quad (14)$$

$$F_{M7z} = m_7a_{z7} + m_7g \quad (15)$$

$$F_{M4x} = F_{M5x} + F_{M7x} \quad (16)$$

$$F_{M4y} = F_{M5y} + F_{M7y} \quad (17)$$

$$F_{M4z} = F_{M5z} + F_{M7z} \quad (18)$$

$$F_{M3x} = F_{M4x} - m_3a_{x4} \quad (19)$$

$$F_{M3y} = F_{M4y} + m_3a_{y4} \quad (20)$$

$$F_{M3z} = F_{M4z} + m_3a_{z4} + m_3g \quad (21)$$

$$F_{M2x} = F_{M3x} - m_2a_{x3} \quad (22)$$

$$F_{M2y} = F_{M3y} + m_2a_{y3} \quad (23)$$

$$F_{M2z} = F_{M3z} + m_2a_{z3} + m_2g \quad (24)$$

$$F_{M1x} = F_{M2x} - m_1a_{x2} \quad (25)$$

$$F_{M1y} = F_{M2y} + m_1a_{y2} \quad (26)$$

$$F_{M1z} = F_{M2z} + m_1a_{z2} + m_1g \quad (27)$$

$$F_x = F_{M1x} - m_1a_{x1} \quad (28)$$

$$F_y = F_{M1y} + m_1a_{y1} \quad (29)$$

$$F_z = F_{M1z} + m_1a_{z1} + m_1g \quad (30)$$

**Verilerin Analizi:** Koparma tekniğinin evreleri sağ diz açısı referans alınarak belirlendi (Harbili ve Arıtan, 2005). Hesaplanan eklem kuvvetleri anlık (0.005 s aralıklarda) en düşük ve en yüksek değerler olarak verildi. Dinamik modelden hesaplanan yer tepki kuvveti ve ölçülen yer tepki kuvvetinin davranışı karşılaştırıldı.

#### BULGULAR

Eklem kuvvetlerini doğrudan ölçen cihazların olmaması insan vücudunun modellenmesini gerektiren bir sonuç ortaya çıkarmaktadır. İnsan vücudu modelle-

**Tablo 1.** İnsan vücudunu oluşturan üyelerin toplam vücut külesine ve üye kütle merkezi konumunun üye uzunluğuna oranları.

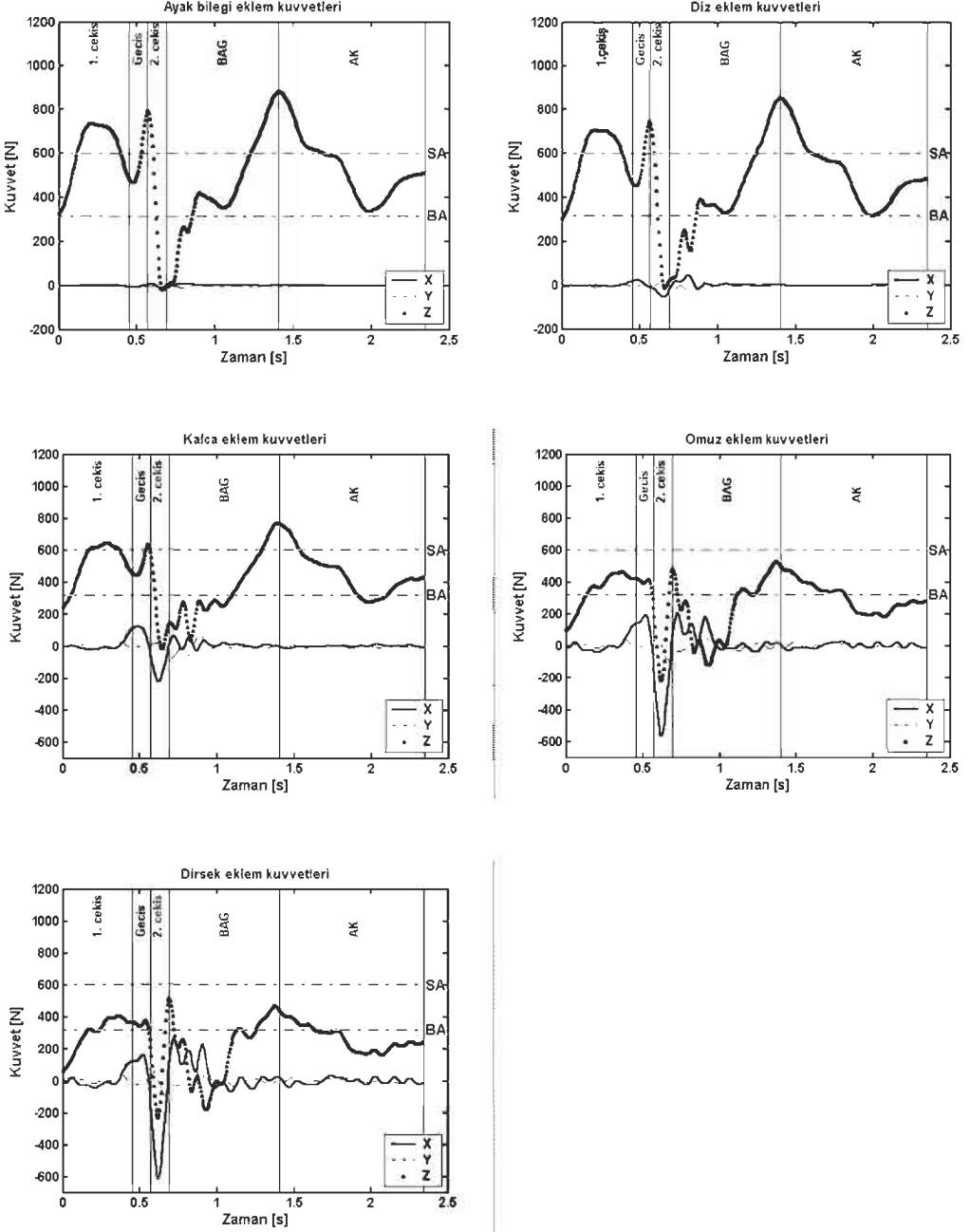
Üye	Relatif kütle m <sub>i</sub> /m (%)	Kütle merkezinin konumu	L <sub>i</sub> /L (%)*
Ayak	1.5	En uzun parmak parmak ucuna	55.1
Alt bacak	4.3	Ayak bileği eksenine	62.9
Üst bacak	10.3	Diz eksenine	62.8
Gövde	50.7	Kalça eksenine	62.0
Üst kol	2.6	Dirsek eklemi eksenine	48.7
Ön kol	1.6	El bileği eksenine	61.0
Baş	7.3	Çene-boyun kesişimine	53.6
El	0.7	—	—

**Tablo 2.** Koparma tekniğinin evrelerinde eklem kuvveti değerleri.

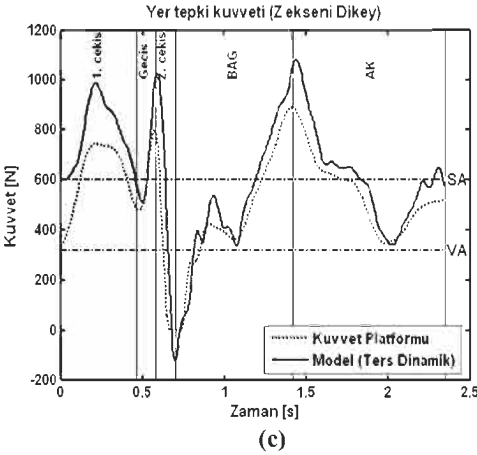
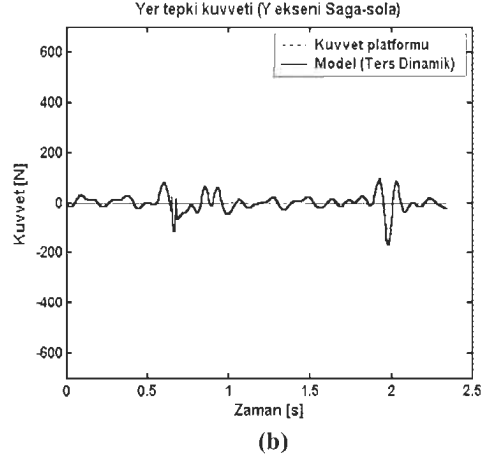
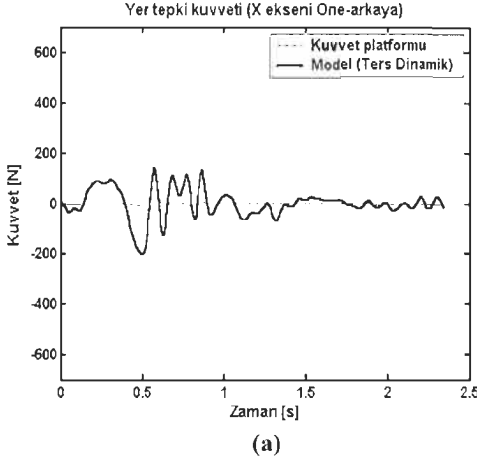
<b>Kuvvet (N)</b>						
	<b>F<sub>x</sub></b>		<b>F<sub>y</sub></b>		<b>F<sub>z</sub></b>	
<b>1.Çekiş</b>	Minimum	Maksimum	Minimum	Maksimum	Minimum	Maksimum
Ayak bileği	3	-5	0	-1	324	735
Diz	-5	18	-8	8	300	705
Kalça	-22	104	-21	25	241	643
Omuz	-31	138	-15	37	95	461
Dirsek	-45	118	-18	39	90	435
<b>Geçiş</b>						
Ayak bileği	4	-5	1	0	470	771
Diz	-6	24	-1	1	452	734
Kalça	-9	121	-7	7	443	629
Omuz	-18	189	-11	8	331	420
Dirsek	-31	160	-21	20	330	406
<b>2.Geçiş</b>						
Ayak bileği	7	-13	-2	2	-16	792
Diz	-7	-55	14	-15	-13	741
Kalça	-15	-219	21	-59	-15	607
Omuz	-3	-563	48	-88	-220	461
Dirsek	37	-611	57	-91	-200	533
<b>BAG</b>						
Ayak bileği	8	-10	3	-8	-3	879
Diz	-18	44	24	-27	20	852
Kalça	-28	65	73	-74	31	768
Omuz	-38	205	63	-64	-121	523
Dirsek	-71	264	-55	75	-151	544
<b>AK</b>						
Ayak bileği	0	2	0	0	338	881
Diz	-2	3	-2	2	316	852
Kalça	12	-14	-8	11	272	764
Omuz	23	-29	-15	21	181	495
Dirsek	32	-41	-16	22	189	468

BAG: Bar altına giriş, AK:Ayağa kalkış,  
X , Y ve Z eksenini negatif kuvvet değerleri, sırasıyla arkaya sağa ve aşağıya doğru olan kuvveti belirtir.

## Koparma Tekniğinin Biyomekaniği



Şekil 5. Koparma kaldırışında 3 boyutlu eklemler kuvvetleri.



**Şekil 6.** (a,b) Ters dinamik analizle modellenen hesaplanan yatay ve (c) dikey eksen yer tepki kuvvetleri (sürekli çizgi), kuvvet platformu ile ölçülen yer tepki kuvvetleri (noktalı çizgi). (VA): Vücut ağırlığı, (SA): Bar ve vücut ağırlığının toplamı olan sistem ağırlığıdır.

melerinde üye kinematiği kullanılarak ters dinamik analizle hesaplanan eklemler kuvvetleri dinamik yapının anlaşılmasını kolaylaştırmaktadır.

Bu çalışmada elde edilen bulgular doğrultusunda koparma tekniğinin 1. çekiş, geçiş, 2. çekiş, bar altına giriş ve ayağa kalkış evrelerinde dış kuvvetlerin eklemlerde oluşturduğu kuvvetin bileşen-

lerinin en küçük ve en büyük değerleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2 ve Şekil 5 incelendiğinde, tüm kaldırış sırasında eklemler kuvvetlerinin yatay bileşenleri ( $F_x, F_y$ ) artmakta, dikey eklemler kuvveti bileşeninin ise birbirine paralel seyrederek en büyük dikey kuvvetin ( $F_z$ ) sırasıyla ayak bileği, diz, kalça, omuz ve dirsek ekleminde etkili olduğu görülmektedir.

**Tablo 3.** Koparma tekniğinin evrelerine göre ölçülen yer tepki kuvveti dikey bileşenin en yüksek değerleri ve dikey bileşenin sistem ağırlığına yüzde oranı

Evreler	Maks. Fz (N)	Fz/Sistem ağırlığı (%)
1.Çekiş	744	120
Geçiş	479	77
2.Geçiş	803	130
BAG	889	142
AK	342	56

Biyomekanik modelden hesaplanan yer tepki kuvvetinin bileşenleri ve kuvvet platformu ile ölçülen yer tepki kuvveti bileşenlerinin karşılaştırılması Şekil 6'da görülmektedir. Koparma tekniğinde barın baş üzerine kaldırılabilmesi ve dikey ekseninde yol kat edebilmesi için haltercinin yere uyguladığı kuvvetin dikey bileşenin yatay bileşenlerine göre daha büyük olması gerekir. Koparmanın tüm evrelerinde dinamik modelden hesaplanan yer tepki kuvveti ile kuvvet platformu ile ölçülen yer tepki kuvvetinin davranışlarının benzer olduğu, ancak modelden hesaplanan kuvvet değerlerinin ölçülen kuvvet değerlerine göre daha yüksek olduğu gözlenmektedir (Şekil 6). Şekil 6c'de hesaplanan ile ölçülen kuvvetin büyüklüğü arasındaki fark açıkça görülmektedir. Ölçülen dikey kuvvet bileşeni 1. çekiş evresinde 744 N tepe değerine ulaşırken, modelden hesaplanan yer tepki kuvvetinin dikey bileşeni 987 N'a ulaşmaktadır. Ölçülen yer tepki kuvveti geçiş evresinde 479 N'a kadar düşerken, benzer düşüş model yer tepki kuvvetinde de görülmektedir (511 N). İkinci çekişte hem ölçülen hem de hesaplanan yer tepki kuvvetinde tepe değerlere ulaşıldığı görülmektedir (sırasıyla, 790 N, 1026 N). İkinci çekişin sonlanarak bar altına girişin başlaması sırasında kuvvet platformu değerleri sıfıra ulaşmakta, model yer tepki kuvvetinde negatif değerler görülmektedir. Birinci çekiş, geçiş ve 2. çekiş evreleri-

ni kapsayan tam çekiş pozisyonundan sonra, halterci barı baş üzerinde sabitlemek için vücudunu bar altına hareket ettirdiğinde, ayaklar tekrar yerle teması sağlamakta ve bu temas yer tepki kuvvetindeki artışı beraberinde getirmektedir (Şekil 6c). BAG evresinde yerçekimi yönünde vücut ağırlığının yere uyguladığı kuvvet ile barın maksimal çekiş yüksekliğine ulaştıktan sonra yön değiştirerek baş üzerinde sabitlenmesine kadar (yaklaşık 30 cm) yerçekimi yönünde ivmeli hareketi sonucu yere uyguladığı kuvvetlerin toplamı (sistem ağırlığının ivmeli hareketi) dikey kuvvette zirve değerlerin görülmesine neden olmaktadır. Bu çalışmada, sistem ağırlığının dikey kuvvet bileşenine oranı değerlendirilmiş ve 1. çekişte dikey yer tepki kuvvetinin sistem ağırlığının % 120'sine ulaştığı, geçiş evresinde sistem ağırlığının % 77'sine düştüğü ve 2. çekişte zirve kuvvet değerlerinin sistem ağırlığının % 130'una ulaştığı bulunmuştur (Tablo 3).

#### **TARTIŞMA**

Bu çalışmada koparma tekniği üç boyutlu bağlantılı katı cisim modeli ile incelenmiştir. Koparma tekniği simetrik bir kaldırış olması nedeni ile vücudun sağ taraf (ayak, alt bacak, üst bacak, üst kol, önkol, gövdenin, başın ve barın yarısı) üyeleri alınmış ve üyeler silindirik katı cisimler olarak modellenmiştir. Üyeler arası üç boyutlu eklem kuvvetleri ölçülen yer

tepki kuvvetinden ters dinamik analizle hesaplanmıştır.

Sistem ağırlığının (Bar + VA) yere uyguladığı kuvvet ile kuvvet platformundan ölçülen yer tepki kuvveti karşılaştırılarak dinamik modelin geçerliği test edilmiştir.

Kaldırış sırasında, kuvvet platformu ile ölçülen dikey yer tepki kuvvetinin barın yerden ayrılması ile birlikte 1. çekiş evresinde arttığı, geçiş evresinde azaldığı ve 2. çekiş evresinde tekrar artış göstererek yüksek kuvvet değerlerine ulaştığı gözlenmiştir.

Garhammer (2002)'a göre 1. çekişte kuvvetteki artışla birlikte sürenin uzaması daha çok barın eylemsizliği ve kütleli ivmeli harekete başlaması ile ilişkilidir. İkinci çekişte vücudun yerden ayrılması ile kuvvet değerleri sıfıra ulaşmakta, BAG evresinde ilk olarak vücudun yerle teması sağlanması ve sonrasında barın maksimal yüksekliğine ulaştıktan sonra yön değiştirerek baş üzerinde sabitlendiği ana kadar (yaklaşık 30 cm) aşağı doğru hareketi yere uygulanan kuvveti, bir başka deyişle sistem ağırlığının yerçekimi yönündeki ivmeli hareketi, dikey kuvvette zirve değerlerin görülmesine neden olmaktadır. Enoka (1979) silkme tekniğinde çekişin dinamik analizini değerlendirdiği çalışmada, çekiş evresinde yer tepki kuvvetinin dikey bileşeni kuvvet platformu ile ölçülmüş ve bara uygulanan kuvvet ters dinamik analiz ile hesaplanarak sistemin (Bar + VA) neden olduğu yer tepki kuvveti ile bara uygulanan kuvvetlerin benzerliği tartışılmıştır. Enoka (1979) silkme tekniğinin 1. çekiş evresinde zirve yer tepki kuvvetinin (Fz) sistem ağırlığının %130'una çıktığı, geçiş evresinde sistem ağırlığının %85'ine düştüğü ve 2. çekişte sistem ağırlığının %150'sine ulaşarak zirve değerler görüldüğünü bildirmektedir. Bu çalışmada, 1. çekişte dikey yer tepki kuvvetinin sistem ağırlığının %120'sine ulaştığı, geçiş evresinde sistem ağırlığının %77'sine düştüğü ve 2. çekişte

zirve kuvvet değerlerinin sistem ağırlığının %130'una ulaştığı bulunmuştur (Tablo 3). Birinci çekiş, geçiş ve 2. çekişte sistem ağırlığı/Fz yüzde oranları arasında paralellik görülmekte, Enoka'nın çalışmasında elde edilen yüzde oranlarının bu çalışmada daha büyük olması koparma ve silkmenin teknik farklılıklarından ve silkmede sistem ağırlığının koparma tekniğinden daha fazla olmasından kaynaklanmaktadır. Sistem ağırlığı artışlarının yer tepki kuvvetine etkisi incelendiğinde, farklı bulguların elde edildiği görülmektedir. Souza ve ark., (2002) bildirdiğine göre Hakkinen ve ark., sistem ağırlığı artırıldığında yer tepki kuvvetlerinin azalacağını vurgulamaktadırlar. Souza ve ark., (2002) "power clean" hareketinde sistem ağırlığı artışlarının (%60 → %70)

1. çekiş ve geçiş evresinde yer tepki kuvvetinde daha büyük değerlerin görülmesine neden olduğunu; 2. çekişte, yer tepki kuvvetinin sistem ağırlığının %70'inde %60'a göre azaldığını bildirmektedir. Bu bulgular sistem ağırlığı artışlarının 2. çekişte barın ivmeli hareketini azalttığını göstermektedir. Ayrıca, 1. çekiş ve 2. çekişin yüzdeleri arasındaki fark, 2. çekişte 1. çekişe göre yere daha büyük kuvvetin uygulandığını göstermektedir. Hem teknikler arasındaki farklılıklar (tutuş ve duruş genişlikleri) hem de sistem ağırlığının dominant kütlesi olan bar ağırlığı artışları, yüzde oranları arasındaki farkın nedenleri olarak düşünülebilir. Enoka (1979) silkmenin çekiş evresinde benzer sonuçlar bulmuş ve 1. çekiş ve geçiş evreleri ile karşılaştırıldığında, 2. çekiş evresinde daha büyük zirve değerlerin görüldüğü belirtilmiştir. Gourgoulis ve ark., (2004)'nın belirttiğine göre, koparma tekniğinin çekişlerinde temel mekanik farklılık 1. çekişin kuvvete, 2. çekişin ise güce dayalı olmasıdır. 1. ve 2. çekişin süre ve kuvvet değerleri, Gourgoulis ve ark., (2004) tarafından belirtilen bulguları destekler nitelik-

tedir. Birinci çekiş ile 2. çekiş arasındaki bağlantıyı sağlayan geçiş evresinde kuvvette düşüş gözlenmektedir. Bu evrenin önemini vurgulayan Garhammer (1980)'ın belirttiğine göre, geçiş evresinde kuvvetteki düşüşle karakterize olan barın negatif ivmelenmesinin oluşturduğu dezavantajı kompanse eden diz fleksiyonu ("double knee bend") kaldırışın dinamiğine iki önemli katkı sağlar. İlki, optimum hareket genişliğini aşan kas grubu olan diz ekstensörlerinin yeniden devreye girmesi ve 2. çekişte dikey yer tepki kuvvetinin büyüklüğündeki artışın sağlanmasıdır. İkincisi, diz fleksiyonunun sonucu olarak moment kolu büyüklüğünün azalması sırt ve diz ekstensör kas torkunu azaltır

**Eklemler kuvvetleri:** Ayak bileği, diz, kalça, omuz ve dirsek eklem kuvvetleri kuvvet platformu ile ölçülen yer tepki kuvvetinin bileşenleri kullanılarak hesaplanmıştır. Yer tepki kuvvetinin büyüklüğü ve yönünü belirleyen kinematik faktörler, bar ve vücut üyelerinin kütleleri ve ivmeli hareketleridir. Şekil 5'de koparmanın tüm evreleri boyunca üç boyutlu eklem kuvvetleri incelendiğinde, dikey yer tepki kuvveti bileşeninin yatay bileşenlerden büyük olduğu görülmektedir. Dikey kuvvet bileşeni ayak bileğinden başlayarak, sırasıyla diz, kalça, omuz ve dirsek ekleminde giderek azalmakta ve negatif değerler görülmektedir.

Öne-arkaya yatay kuvvet bileşeni dikey kuvvet bileşenine göre tam tersi bir eğilim izleyerek, ayak bileğinde çok düşük olan büyüklüğün sırasıyla diz, kalça, omuz ve dirsek eklemlerinde giderek arttığı gözlenmiştir.

Çünkü bara yakın olan üyelerin bar hareketlerinden daha hızlı etkilendiği ve ayak bileği eklemi tüm vücudun destek noktası ve diğer eklemlere göre yatay hareketlerinin daha az oluşu yatay kuvvetlerin etkilerinin daha az görülmesine neden

olmaktadır. Dikey bileşeninin büyüklüğü diz ekleminde ayak bileğine göre daha düşük olmasına rağmen birbirine paralel seyretmekte ve sırasıyla kalça, omuz ve dirsek eklemi dikey kuvvet bileşeninde daha düşük değerler görülmektedir. Özellikle, kalça ekleminde dikey kuvvet bileşeninin büyüklüğünde görülen azalmalar ile omuz ve dirsek ekleminin dikey kuvvet bileşeninde görülen negatif değerler vücudun yerden ayrılarak kuvvet platformu ile temasın yitilmesi sonucu yer tepki kuvvetinin dikey bileşeni büyüklüğünün sıfıra ulaşması ile ilişkilidir. Böylece vücut üyelerinin yerden kopuşla birlikte havaaki hareketleri ve yerçekimi yönünde ivmeli hareketleri bahsedilen eklemlerde kuvvet değerlerinin düşmesine veya negatif değerlerin görülmesine neden olmaktadır.

Öne-arkaya olan yatay kuvvet bileşeninde diz, kalça, omuz ve dirsek ekleminde görülen artışlarda bu sonucu desteklemektedir. Dikey ve yatay kuvvet bileşenlerinde belirgin değişimler, bar altına giriş evresinde görülmektedir. Bu evrede gövdenin, yatayda öne ve dikeyde aşağı ivmeli hareketleri bu eklemlerdeki yatay kuvvet bileşenlerindeki artışlara neden olmaktadır.

**Katı cisim modeli:** Çalışmada, katı cisim dinamik modelin işlerliği yer tepki kuvvetleri karşılaştırılarak sınanmıştır. Koparma tekniğinin tüm evrelerinde, modelden hesaplanan yer tepki kuvveti dikey bileşeni ile kuvvet platformundan ölçülen yer tepki kuvvetinin dikey bileşeni benzer bir davranış göstermiştir (Şekil 6c).

Özellikle, modelden hesaplanan ve kuvvet platformu ile ölçülen yer tepki kuvvetinin dikey bileşeninde artış ve azalışların aynı zaman aralığında görülmesi aradaki benzerliğin en önemli göstergesidir. Ancak, ters dinamik analizle hesaplanan dikey kuvvet bileşeninin büyüklüğü, kuvvet platformundan ölçülen dikey bile-

şenin büyüklüğüne göre daha fazladır. Bunun nedeni üyelerin silindirik, katı cisim, eklemlerin ise sürtünmesiz ve toplu iğne başı olarak kabul edilmesinden kaynaklanmaktadır. Vücut üyelerinin katı cisim kabul edilmesi dikey kuvvet farkının doğmasında en önemli unsur olarak görülmektedir.

Çünkü, bu kabullerin aksine insan vücudunu oluşturan üyeler kas, kemik, yağ vb. dokuların bir araya gelmesinden oluşan şekil değiştirebilen cisimlerdir. Şekil değiştirebilen cisim dinamiğinde, katı cisim kabulünün tersine cisim üzerine etki eden kuvvetler cismi oluşturan parçacıklar arasındaki mesafeleri değiştirir ve cismin şeklinde deformasyon görülür.

Bu nedenle şekil değiştirebilen cisim dinamiğinde, üyeyi oluşturan doku kompozisyonlarının modellenmesinde farklı yaklaşımlar kullanılmaktadır. Cisme etki eden kuvvetin yönü ve büyüklüğü vücut üyesinin ivmeli hareketine neden olabildiği gibi kuvvetin bir kısmının da üye içerisinde ve üyeler arasında sönmeye neden olur. Kaldırış sırasında dokular arasında kuvvetlerin dağılımı (Allard, Stokes ve Blanchi, 1995) ve özellikle kas dokusu, kemik dokusu ve omurgada olduğu gibi kemikler arasına yerleşmiş diskler üyeler arası kuvvetleri söndürerek eklem kuvvetlerinin dolayısı ile yer tepki kuvvetinin azalmasına neden olmaktadır. Bu azalmaya neden olan ve sistem üzerinde etkili olan kuvvetlerin emilmesini sağlayan dokuların başında kas dokusu gelmektedir.

Özellikle, hareket sırasında eklem etki eden kuvvetlerin paylaşımında eklemi çevreleyen kasların birbirine göre farklı fonksiyonları vardır. Asıl hareket ettirici kasların yanında sinerjist kaslar harekete yardımcı olurken antagonist kaslar asıl hareket ettirici kasların fonksiyonlarını kısıtlayıcı yönde hareket ederler. Bu sırada kasların harekete katılma anı ve kasılma miktarı yükün paylaşımı açısından

önemli olmaktadır. Koparma kaldırışında sistem ağırlığının baskın kütlesi olan barın yer tepki kuvvetine dikey yöndeki etkisini kaldırışın farklı anlarında devreye giren kas gruplarının kuvveti dengeleyerek azaltır. Özellikle halter gibi kas kuvvetinin son derece önemli olduğu spor dallarında dış kuvvetlerin vücut üzerinde oluşturduğu şokun sönmümünü sağlayan omurga ve omurgayı destekleyen sırt kas gruplarındaki her bir kasın lif dizilimi, orjini ve sonlandığı yere göre etki eden kuvvetlerin bir kısmının emilerek yere iletilen kuvvetin azalmasına neden olmaktadır.

Kuvvet platformundan ölçülen yer tepki kuvvetinin dikey bileşeni incelendiğinde; 1. çekişin başlangıcında kuvvet platformundan ölçülen dikey kuvvette bar ağırlığının etkili olmadığı, sadece dikey kuvvetteki ilk artışın vücut kütlelerinin ivmeli hareketinden kaynaklandığı görülmektedir. Kuvvet platformunda sistem ağırlığının yere uyguladığı kuvvet ölçüldüğü için vücut ağırlığının üzerine 1. çekişle birlikte bar ağırlığı eklenmekte ve dolayısıyla bar ağırlığının sistem üzerindeki dinamik etkisi farklı dokuların içsel yer değiştirmeleri sayesinde azaltılarak yere aktarılmaktadır. Bu aktarım sırasında etkili olan kuvvetler katı cisimde olduğu gibi doğrudan bir diğer eklem aktarılmamakta, kas dokusu kuvvetleri paylaşmakta ve kuvvetin yönünü kontrol etmektedir.

Katı cisim varsayımından kaynaklı mekanik etkilerin yanında ve katı cisim modellemelerinde kabul gören bir varsayım olması nedeni ile eklemlerin çok küçük bir nokta ("pin joint") ve sürtünmesiz olarak kabul edilmesi insan vücudundaki eklem yapısının temsil edilebilirliğini zorlaştırmaktadır. İnsan vücudundaki eklemlerin yapısı, eklem yüzeylerinin şekli, eklem merkezi konumun değişmesi, eklem sıvıları, ligamanlar, konnektif dokular gibi eklem özgü yapısal formlar hem sürtünmeyi hem de kuvvetlerin eklem yüzeyinde



dağılımını etkilemektedir. Ancak, katı cisim modellerinde bahsedilen eklemlere ait yapısal özellikler modele dahil edilmediği için üyeler arası kuvvetlerin büyüklüğü değişmeksizin doğrudan bitişik üyeye aktarılmaktadır.

Yer tepki kuvvetindeki farklılıkların nedenlerini araştıran çalışmalarda, vücut üyeleri katı cisim yerine sallanan kütle ("wobbling mass model") yaklaşımı ile modellenmektedir. Bu çalışmalarda öne sürülen temel amaç, impakt kuvvetlerinin insan vücudu üzerindeki etkilerini gözlemlemek için deney verisinden ters dinamik analizle hesaplanan eklem kuvvet ve momentin insan vücudunun biyomekanik modelleri olan katı cisim modeli ile sallanan kütle modeline uygulanması ve sonuçların karşılaştırılmasıdır (Gruber ve ark., 1998; Liu ve Nigg, 2000; Nigg ve Liu, 1999; Pain ve Challis, 2006; Wilson, King ve Yeadon, 2006). Gruber ve ark., (1998) şekil değiştirebilen cisimlerde üyenin kemik dışında kalan yumuşak doku bileşenlerinin sallanan parçalar ("wobbling parts") olarak isimlendirildiği ve insan vücudu üye modellerinde sallanan kütle modelinin ("wobbling mass model") gerçeği daha iyi yansıttığını belirtmektedir. İmpaktın yüksek hızda kinematografisi izlendiğinde, insan vücudunu oluşturan her bir üyenin yumuşak parçaları kemiğe göre yerini değiştirir ve periyodik sönüm davranışı ile "sallanmaya" başlar. Sallanan kütle modelinde, üyeyi oluşturan kemik doku katı cisim, yumuşak doku bileşenleri ise yay ve damperle birbirine bağlanan "wobbling" kütleler olarak modellenmektedir. İnsan vücudu üyelerini katı cisim olarak modelleyen ve bu modelden ters dinamik analizle hesaplanan eklem kuvvet ve torklarının, kemik ve yumuşak dokunun farklı mekanik davranışlarının neden olduğu etkileri kapsayan sallanan kütle modeline göre daha yüksek olduğu bulunmuştur. Yumuşak doku hareketlerinin impakt

sırasında önemli bir role sahip olduğu vurgulanmaktadır. Pain ve Challis (2006)'in bildirdiğine göre, aynı kütle ve geometriye sahip katı cisim modeli ile gerçek insan vücudunun sallanan kütle modeli karşılaştırıldığında dikey eklem kuvveti sallanan kütle modelinde 11080 N, 7720 N, 5100 N, katı cisim modelinde ise 17140 N, 13280 N, 7700 N'dur. Belirli bir yükseklikten düşme hareketinin konma evresinde oluşan yer tepki kuvvetinin sallanan kütle modeline göre katı cisim modelinde daima daha fazla olduğu görülmektedir.

Kemiğe göre yer değiştirebilen ve katı cisim olmayan parçalardan dolayı "wobbling mass model" ile gerçek insan vücudunun temsil edilmesinin, katı cisim modelinden kaynaklanan yer tepki kuvveti hatalarını azaltarak eklem kinetiklerini daha iyi yansıtacağı vurgulanmaktadır. Nigg ve Liu (1999)'nun bildirdiğine göre, Cole çalışmasında üç farklı çoklu üye modelini karşılaştırmıştır. Karşılaştırılan modellerden ilki sadece katı cisim üye kütlelerinden oluşmaktadır. İkinci model ise katı üye kütlelerine kas etkisinin eklendiği görülmektedir. Üçüncü modelde ise, yine katı üye kütleleri, ancak kas ve yumuşak doku kütlelerinin modele eklendiği görülmektedir.

Sonuçta, 3. modelin yer tepki kuvvetini diğer iki modelden daha iyi tahmin ettiği bulunmuştur. Ayrıca, eklem kuvvetlerinin hesaplanmasında bir yaklaşım olan doğrudan dinamik analiz ("forward dynamics") yerine ters dinamik analiz ("inverse dynamics") ile daha hızlı hesaplama yapıldığı ancak kas kuvveti hesaplamalarında denklemlerin yetersiz kaldığı vurgulanmaktadır (de Zee ve ark., 2007). de Zee ve ark., (2007) ters dinamik analizde vücut üzerindeki dış kuvvetler ve hareket bilinecek hesaplama yapıldığı için iç kuvvetlerin belirlenmesinde örneğin, kas kuvvetinin belirlenmesinde denklemlerin yetersiz olduğu ve bu yöntemin zayıf kaldığı belirtilmektedir. Bu sorunu fizyolojik kriterlere

dayalı olarak optimizasyon problemi olarak tanımlamanın yaygın olarak kullanılan bir çözüm olduğu vurgulanmaktadır.

Literatür sonuçlarına göre eklem kuvvetlerinin sallanan kütle modelinde katı cisim modeline göre daha düşük olduğu görülmektedir. Özellikle sallanan kütle modelinin sistem yükünün azaltılmasında önemli katkılar sağladığı anlaşılmaktadır. Bu çalışmada, koparma kaldırışı sırasında haltercinin vücut üyeleri katı cisimler olarak modellendiği için yer tepki kuvvetinin büyüklükleri arasındaki fark modeldeki varsayımların doğal bir sonucu olarak görülmektedir.

Sonuç olarak, koparma tekniğine özel sekiz üyeden oluşan katı cisim dinamik modeli geliştirilmiş ve bu modelin kaldırış sırasında sistemin yere uyguladığı kuvvetin hesaplanmasında kullanılabileceği gösterilmiştir.

#### **Yazışma Adresi (Corresponding Address)**

*Dr. Erbil HARBİLİ*

*Selçuk Üniversitesi BESYO*

*Alaeddin Keykubat Kampüsü*

*42003 Selçuklu / KONYA*

*e-posta: eharbili@hotmail.com*

**Yazar Notu:** Bu çalışma, Hacettepe Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü Spor Bilimleri ve Teknoloji Programında yapılan Doktora tezinden üretilmiştir.

#### **KAYNAKLAR**

- Allard, P.A., Stokes, I.A. & Bianchi, J.P. (1995). **Three-Dimensional Analysis of Human Movement**. Champaign: Human Kinetics.
- Bartonietz, K.E.(1996). Biomechanics of the snatch: Toward a higher training efficiency. **NSCA**, 18(3), 24-31.
- Brown, E.W.&Abani,K.(1985). Kinematics and kinetics of the dead lift in adolescent power lifters. **Med Sci Sports Exerc**, 17(5), 554-66.

- Burdett, R.G. (1982). Biomechanics of the snatch technique of highly skilled and skilled weightlifters. **Res Q Exerc Sport**, 53(3), 193-197.
- Enoka, R.M. (1979). The pull in Olympic weightlifting. **Med Sci Sports Exerc**, 11, 131-37.
- Enoka, R.M. (1988). Load and skill-related changes in segmental contributions to a weightlifting movement. **Med Sci Sports Exerc**, 20(2), 178-187.
- Freivalds, A., Chaffin, D.B., Garg, A. & Lee, K.S. (1984). A dynamic biomechanical evaluation of lifting maximum acceptable loads. **J Biomech**, 17(4), 251-62.
- Garhammer, J. (1980). Power production by Olympic weightlifters. **Med Sci Sports Exerc**, 12(1), 54-60.
- Garhammer, J. (1982). Energy flow during Olympic weightlifting. **Med Sci Sports Exerc**, 14(5), 353-360.
- Garhammer, J. (1985). Biomechanical profile of Olympic weightlifters. **Int J Sport Biomech**, 1, 122-30.
- Garhammer, J.A. (1991). Comparison of maximal power outputs between elite male and female weightlifters in competition. **Int J Sport Biomech**, 7, 3-11.
- Garhammer, J. & Takano, B. (1992). Training for weightlifting. In Paavo. Komi (Ed) **Strength and Power in Sport**. (pp. 502-516). Oxford: Blackwell Scientific Publ.
- Garhammer, J., Kauhanen, H. & Hakkinen, K.A. (2002). Comparison of performances by woman at the 1987 and 1998 world weightlifting championships. **Science for Success Congress**. Jyväskylä, Finland. 2-4October.
- Gourgoulis, V., Aggelousis, N., Mavromatis, G. & Garas, A. (2000). Three-dimensional kinematic analysis of the snatch of elite Greek weightlifters. **J Sport Sci**, 18, 643-52.
- Gourgoulis, V., Aggeloussis, N., Antoniou, P., Christoforidis, C., Mavromatis, G.

- & Garas, A. (2002). Comparative 3-Dimensional kinematic analysis of the snatch technique in elite male and female Greek weightlifters. **J Strength Cond Res**, 16(3), 359-66.
- Gourgoulis, V., Aggeloussis, N., Kalivas, V., Antoniou, P. & Mavromatis, G. (2004). Snatch lift kinematics and bar energetics in male adolescent and adult weightlifters. **J Sports Med Phys Fitness**, 44, 126-31,
- Gruber, K., Ruder, H., Denoth, J. & Schneider, K. (1998). A comparative study of impact dynamics: wobbling mass model versus rigid body models. **J Biomech**, 31, 439-444.
- Harbili, E. & Arıtan S. (2005). Elit haltercilerde koparma tekniğinin karşılaştırmalı biyomekanik analizi. **Spor Bilimleri Dergisi**, 16(3), 124-34.
- Isaka, T., Okada, J. & Funato, K. (1996). Kinematics analysis of the barbell during the snatch movement of elite Asian weightlifters. **Int J Sport Biomech**, 12, 508-516.
- Liu W. & Nigg, B.M. (2000). A mechanical model to determine the influence of masses and mass distribution on the impact force during running. **J Biomech**, 33, 219-224.
- Nigg, B.M. & Liu W. (1999). The effect of muscle stiffness and damping on simulated impact force peaks during running. **J Biomech**, 32, 849-856.
- Pain M.T.G. & Challis, J.H. (2006). The influence of soft tissue movement on ground reaction forces, joint torques and joint reaction forces in drop landings. **J Biomech**, 39, 119-124.
- Schilling, B.K., Stone, M.H., O'Braynt, H.S., Fry A.C., Coglianese, R.H. & Pierce, K.C. (2002). Snatch technique of collegiate national level weightlifters. **J Strength Cond Res**, 16(4), 551-555.
- Souza, A.L., Shimada, S.D. & Koontz, A. (2002). Ground reaction forces during the power clean. **J Strength Cond Res**, 16(3), 423-427.
- Tümer, İ. A. (2005). Dikey Sıçramanın Üç Boyutlu Biyomekanik Analizinde Enstrümantasyon. **Yayınlanmamış yüksek lisans tezi**. Hacettepe Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü.
- Wilson C., King, M.A. & Yeadon, M.R. (2006). Determination of subject specific model parameters for viscoelastic elements. **J Biomech**, 39, 1883 – 1890.
- Winter, D.A. (2005). **Biomechanics and Motor Control of Human Movement**. N.Jersey: John Wiley & Sons Inc. de Zee, M., Dalstra, M., Cattaneo, P.M., Rasmussen, J., Svensson, P., Melsen, B. (2007). Validation of a musculo-skeletal model of the mandible and its application to mandibular distraction osteogenesis. **J Biomech**, 40(6), 1192-201.