

KAYA TIRMANIŞINA SONLU ELEMANLAR YAKLAŞIMI

Arif Mithat AMCA, Serdar ARITAN

Hacettepe Üniversitesi Spor Bilimleri ve Teknolojisi Yüksekokulu

ÖZET

Kaya tırmanışı dengenin ön plana çıktığı, statik ve dinamik hamleler içeren, eğime bağlı olarak daha çok vücudun üst üyelerinin kullanıldığı bir spordur. Tırmanıcının vücut pozisyonu, vücut ağırlığının tutamak ve basamaklara aktarılışı, yapılan hareketler esnasında dengenin kontrol edilmesi ve kütle merkezinin konumu kaya tırmanışında önemli olan faktörlerdir. Kaya tırmanışının farklı pozisyonlarında tutamak ve basamaklardaki destekleyici kuvvetlerin, eklemlere binen yüklerin incelenmesi bu aktivite hakkında birçok fikir verecek ve kaya tırmanışındaki mekanik olayların anlaşılmasını sağlayacaktır. Bu çalışmada sonlu elemanlar yöntemi ile oluşturulan bir model yardımıyla farklı vücut pozisyonlarında tutamaklara, basamaklara ve tırmanıcının eklemlerine binen yüklerin hesaplanması ve üst vücut üyelerine en az moment etkileyen pozisyonların belirlenmesi amaçlanmıştır. Modelin yaratılabilmesi için bir tırmanıcının tırmanış duvarı üzerinde hareketsiz dururken görüntüsü alınmıştır. Bu görüntü bilgisayara aktarıldıktan sonra modelde kullanılacak noktalar sayısallaştırılarak eklemler ve vücut üyelerinin konumları belirlenmiştir. Tutamak, basamak ve tırmanıcının eklemlerine binen yüklerin hesaplanabilmesi için 10 iskelet üye ve 6 eklemden oluşan bir tırmanıcı modeli oluşturulmuştur. Bu modelde, el ve ayak tutamakları sabit destek noktaları olarak kabul edilmiştir. Model, sonlu elemanlar yöntemi yaklaşımıyla çözülmüş, tutamak, basamak ve eklemlere etkileyen yatay-dikey kuvvet ve moment değerleri hesaplanmıştır. Tırmanıcının hareket sınırlılıkları dikkate alınarak tutamaklarda hareket edebileceği alan ve bu alan içerisinde üst vücut momentlerinin en az olduğu pozisyonlar eniyileme ile belirlenmiştir.

Anahtar Sözcükler: *Kaya tırmanışı, Sonlu elemanlar yöntemi, Eklem kuvveti, Moment, Eniyileme*

FINITE ELEMENT APPROACH TO ROCK CLIMBING

ABSTRACT

Rock climbing is a sort of sport, which includes both dynamic movements and static conditions. In climbing, upper body is used mostly according to the declination of the wall. One of the most important parts of rock climbing is maintaining the equilibrium during different body positions. Also the position of the body center of mass and the distribution of the body mass to the holds are critical. To analyze the forces on the holds, joint forces and the moments acting to the joints will give very brief information about rock climbing. Furthermore, it may also contribute the understanding of the mechanical events in

climbing. The purpose of this study is to determine the supporting forces on the holds, joint forces and the moments acting to the joints in different human body positions and minimized the upper body moments in the static condition of climbing. For creating the model, a climber's picture climbing on a wall was captured. Then, the picture was transferred into a computer, the joints were digitized and the segments of the body were identified. A climbing model, which had 10 frame segments and 6 joints, was created and solved with finite element method to calculate the forces and moments. Both hand and foot holds were considered as fixed joints in the suggested model and Matlab was used to solve the system of equations. The possible body positions of climber were calculated and upper body moments were minimized.

Key Words: Rock climbing, Finite element method, Joint force, Moment, Optimization

GİRİŞ

Tırmanış, el ve ayakların dik yüzeyler üzerinde hareket ettirilmesini içeren bir sportif aktivitedir. İnsanlar 1700'lü yıllardan beri rekreasyonel amaçlarla dağlara gitmekte ve tırmanışlar yapmaktadır. 1800'lerde güvenlik amacıyla dağlarda ip kullanılmaya başlanmış ve kaya tırmanışı gelişmeye başlamıştır. Kaya tırmanışı, güvenlik için ip ve emniyet malzemeleri kullanılarak dik yüzeylere yapılan tırmanıştır. Kaya tırmanışı, malzemelerin kullanımına, tırmanılan rotanın özelliklerine göre farklı isimlerle alt disiplinlere ayrılmıştır. Açık ve kapalı alanlarda inşa edilmeye başlanan yapay tırmanış duvarlarıyla tırmanıcılara kontrol edilebilen bir alanda tırmanış yapma olanağı sağlanmıştır. Yapay duvarlar tırmanıcılara doğada tırmanacakları rotalar için antrenman yapma ve kendilerini geliştirme olanağı sağlamıştır. Kaya tırmanışı sporunun gelişmesiyle beraber, tırmanış yapan insanlar arasındaki seviyenin belirlenmesi için, açık ve kapalı alanlarda kurulan yapay tırmanış duvarlarında yarışmalar yapılmaya başlanmıştır. 1940'lı yılların sonlarında SSCB'de, belirlenen rotayı en hızlı bir şekilde tırmanmanın hedeflendiği, hız kategorisinde yarışmalar yapılmaya başlanmıştır. 1985'te ise amacın sadece rotayı bitirebilmek olduğu zorluk kategorisindeki ilk yarışma

İtalyanlar tarafından gerçek kayada yapılmıştır. 1988'de Uluslararası Dağcılık Dernekleri Birliği (UIAA) bu yarışmaları kabul etmiştir. UIAA tarafından düzenlenmeye başlanan şampiyonalar ve dünya kupaları ile beraber, ülkeler kendi milli takımlarını oluşturmaya ve performansa yönelik çalışmalar yapmaya başlamıştır. Kaya tırmanışı, statik ve dinamik hareketleri birlikte içeren bir spordur. Kaya tırmanışındaki önemli noktalardan biri farklı pozisyonlarda vücut dengesinin sağlanabilmesidir. Dengenin sağlanması üst ve alt vücut üyelerinin pozisyonuna göre değişiklik göstermektedir (Noe, Martin ve Blanchi, 1997). Özellikle üst vücut dengesinin sağlanmasında ve korunmasında önemli rol oynamaktadır (Noe, Quaine ve Martin, 2001). Tutamak, basamak ve eklemlere etkiyen kuvvetler tırmanıcının vücut pozisyonuna ve tırmanılan duvarın eğimine göre değişmektedir (Noe ve ark., 2001; Noe, 2006; Quaine ve Martin, 1999). Tırmanış sırasında tırmanıcılar vücut ağırlıklarını tutamak ve basamaklara aktarmanın yanı sıra vücut ağırlıklarından dolayı eklemlerinde oluşan momentleri dengelemek için de fazladan kuvvet harcamak zorundadırlar.

Bu çalışmada, tırmanıcı modelinin oluşturulması, kuvvet ve momentlerin he-

saplanabilmesi için sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi, mühendislikte karşılaşılan karmaşık problemlere çözüm elde etmek için kullanılan nümerik bir yöntemdir. Sonlu elemanlar yönteminde, kullanılan elemanların ve şekillerinin çeşitliliği nedeniyle, ele alınan cisimlerin geometrisinin tam olarak temsil edilebilir olması, değişik geometrilere sahip ve farklı malzeme özellikleri gösteren cisimlerin incelenebilmesi ve sınır şartların kolayca uygulanabilir olması bu metodu diğer nümerik metotlardan üstün kılar.

Sonlu elemanlar yöntemi, ilk olarak 1972 yılında Brekelmans tarafından, fiziksel yükler altında insan kemiğine binen yükleri incelemek için, insan ile ilgili çalışmalarda kullanılmıştır (Brekelmans, Poort ve Slooff, 1972; Viceconti, Davinelli, Taddei ve Cappello, 2004). Bu tarihten sonra özellikle ortopedi ile ilgili olan çalışmalarda sonlu elemanlar kullanımı yaygınlaşmıştır (Viceconti ve ark., 2004). Bu çalışmaların çoğunda özel olarak bir kemik ya da bir vücut üyesi üzerinde çalışılmakta ve 3 boyutlu modelleri çıkarılıp çalışmalar yapılmaktadır. Spora özel olarak tüm vücudun modellenip, kuvvet, moment gibi kavramların davranışına bakılan çalışmalar ise literatürde bulunmamaktadır.

Farklı tutamak ve basamak dağılımlarında alınan vücut pozisyonlarında destek noktaları ve eklemlerde oluşacak kuvvet ve momentlerin incelenmesi ve vücut pozisyonunun yorumlanması, bu aktivitenin daha iyi tanınmasını sağlayacak ve mekanik olayların anlaşılmasını kolaylaştıracaktır (Quaine, Martin ve Bianchi, 1997). Bu çalışmada, belirlenen tutamak dağılımı için, tırmanıcının alabileceği vücut pozisyonları hesaplanarak, kollarda oluşacak toplam momentin incelenmesi ve bu momentin en az olacağı vücut pozisyonlarının bulunması amaçlanmaktadır.

YÖNTEM

Sonlu elemanlar yöntemi ve modelin oluşturulması: Çalışmada, modelin oluşturulabilmesi için bir tırmanıcının düz tırmanış duvarı üzerinde hareketsiz dururken görüntüsü alınmıştır. Bu görüntü bilgisayara aktarıldıktan sonra modelde kullanılacak noktalar HUBAG Hareket Analizi yazılımı kullanılarak sayısallaştırılmış, eklemler ve vücut üyelerinin konumları belirlenmiştir (Şekil 1a). Tutamak, basamak ve tırmanıcının eklemlerine binen yüklerin hesaplanabilmesi için 10 üye ve 6 eklemden oluşan bir tırmanıcı modeli oluşturulmuştur (Şekil 1b). Bu modelde üyeler, sonlu elemanlar yönteminde kullanılan dairesel kesitli ve içi dolu 2 boyutlu iskelet elemanlar olarak tanımlanmıştır. Bu üyeler, her iki ucunda da yatay-dikek yer değiştirmeye izin veren ve açısız olarak da hareket edebilen elemanlardır (Şekil 2). Modelde vücut üyeleri arasında kullanılan eklemler her yönde harekete izin veren serbest eklemler olarak tanımlanmıştır. Tırmanıcının el ve ayak tutamakları ise yatay, dikey ve açısız harekete izin vermeyen sabit destek noktaları olarak alınmıştır (Reddy, 1993).

Oluşturulan modeldeki her iskelet üye için kesit alanı (A), uzunluk (L), eylemsizlik (I) ve elastik modülü (E) değerleri literatüre göre belirlenmiştir (Cook, 2001; Cook, Malkus, Plesha ve Witt, 2001; Reddy, 1993). Kesit alanı her üye için gerçek vücut üyelerinden alınan çap değerleri ortalaması kullanılarak hesaplanmıştır. Uzunluk değerleri sayısallaştırma işleminden elde edilen konum değerlerinden hesaplanmıştır. Eylemsizlik değerleri tüm üyeler için Eşitlik 1 ile hesaplanmıştır. İnsan kemikleri için Elastik modülü değerleri kuvvetin uygulanma yönüne, kemiğin yaşına, kuru ya da yaş olmasına ve türüne göre değişmektedir (Buskirk ve Ashman, 1981; Fung, 1993; Özkaya ve Nordin, 1998; Reilly ve

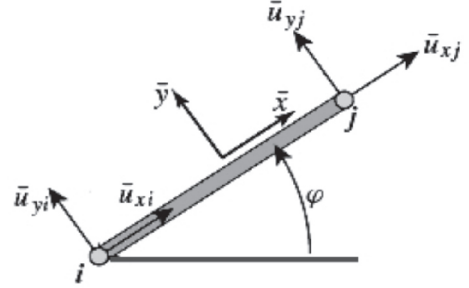


a



b

Şekil 1. Tırmanıcının yapay duvar üzerinde alınmış görüntüsü (a) ve 10 üyeden oluşan tırmanıcı modeli ve kütle ağırlık merkezleri (b).



Şekil 2. Her iki ucunda da 3 serbestlik derecesine sahip bir iskelet eleman ve lokal koordinat eksenindeki hareket yönleri.

Burstein, 1975). Bu çalışmada modeldeki tüm üyeler için elastik modülü 17GPa olarak alınmıştır (Özkaya ve Nordin, 1998).

$$I = \frac{d^4}{64} \quad [E.1]$$

Modeldeki tüm üyeler için lokal koordinat ekseninde eksensel ve bükülme direngenliğini içeren direngenlik matrisleri (K) hesaplanmış ve her üye için direngenlik eşitliği [E.2] yazılmıştır (Cook ve ark., 2001; Reddy, 1993).

Lokal eksen direngenlik matrisleri (K) üyelerin duruş açılarına göre elde edilen dönüşüm matrisleri kullanılarak, genel üye direngenlik matrislerine (K) dönüştürülmüş ve elde edilen genel üye direngenlik matrisleri 63x63 boyutunda tek bir matrisle birleştirilerek tüm sistemi tanımlayan sistem direngenlik matrisi ve sistem direngenlik eşitliği elde edilmiştir.

Sistem direngenlik eşitliği sınır şartlar eklenerek çözülmüş, eklem ve üyelere etkileyen gerilim kuvvetleri, kesme kuvvetleri ve momentler hesaplanmıştır (Cook ve ark., 2001; Reddy, 1993).

Model hareket sınırlarının belirlenmesi: Toplam momentin eniyilemesinin yapılabilmesi için tırmanıcının el ve ayak-

ları sabit iken alabileceği pozisyonların belirlenmesi gerekmektedir. Tırmanıcının hareket alanı, alt ve üst vücut üyelerinin uzunlukları ve eklemlerin izin verdiği hareket açıları ile sınırlıdır. Tırmanıcı modeli, MATLAB ortamında yazılan bir program ile gövde açısı sabit tutularak sağa-sola yukarı-aşağı hareket ettirilmiş, bu hareket sırasında vücut üye uzunlukları ve eklem açılarının durumu hesaba katılarak dirsek ve diz eklemlerinin konumları hesaplanmış, vücudun belirlenen pozisyonu alıp alamayacağı belirlenmiştir.

Üst üye eklemlerindeki toplam momentin eniyilemesi: Kaya tırmanışı sırasında kaslar daha çok izometrik olarak kasılmaktadır. İzometrik kasılmalar, kasın boyunun sabit kaldığı kasılmalardır ve statik kasılmalar olarak da bilinirler (Akgün, 1992). Kasılmaya katılan kasların büyüklüğü kasın oluşturacağı kuvvette ve dayanıklılığında etkili bir parametredir. Kolda bulunan kaslar bacak kaslarına göre daha küçük kas guruplarıdır ve daha kolay yorulurlar.

Modelde sağ-sol el tutamağı, dirsek ve omuzta etkiyen moment değerlerinin toplamı kullanılarak eniyileme yapılmıştır. Toplam momentin en aza indirilmesi için

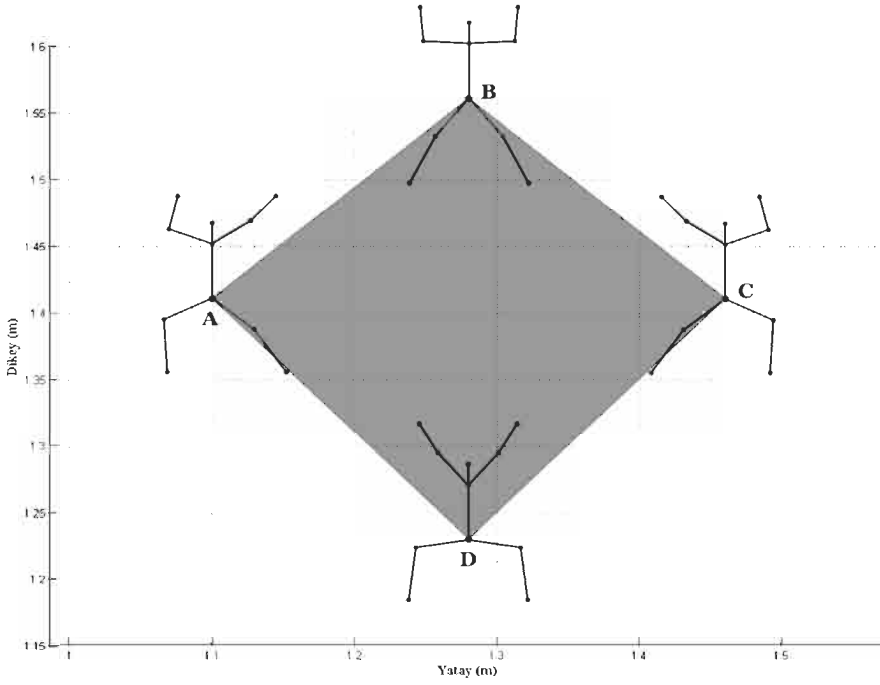
belirlenen hareket alanı içerisinde MATLAB ortamında geliştirilen bir program kullanılarak kısıtsız eniyileme algoritmaları ile çözüme gidilmiştir.

BULGULAR

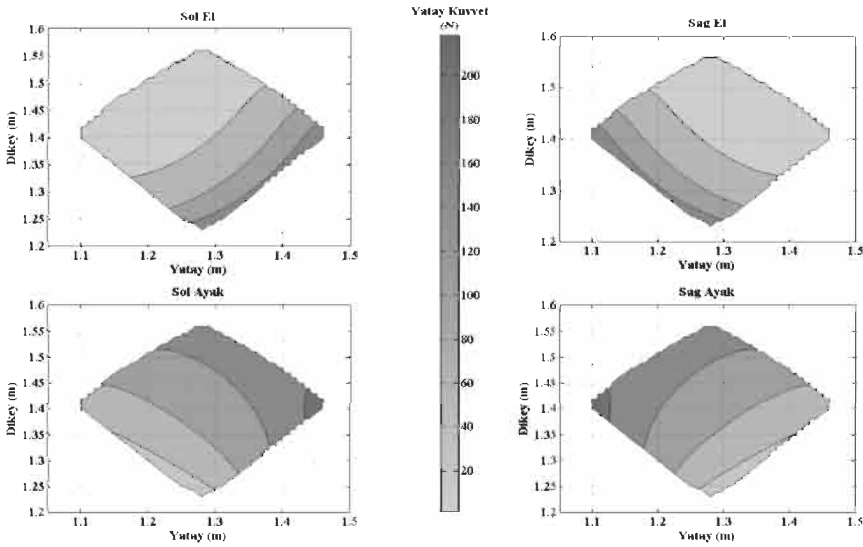
Çalışmada oluşturulan model tırmanıcının kalçasının hareket edebileceği alan ve bu alanın uçlarını belirleyen noktalarda tırmanıcının alması gereken vücut pozisyonu Şekil 3'teki grafikte verilmiştir. Tırmanıcı, koyu renk ile belirtilen alan içerisinde hareket edebilmekte ve bu alanın dışına çıkamamaktadır.

Tırmanıcının, hareket alanı içinde vücut pozisyonlarına göre tutamak ve basamaklarda oluşacak yatay, dikey kuvvetler ve momentlerin mutlak değerleri kontur grafikleriyle gösterilmiştir. Tırmanıcının el ve ayak tutamaklarına binen yatay yüklerin kontur grafiği Şekil 4'te verilmiştir. Sol el tutamağına etkiyen yatay kuvvet, vücudun yukarı doğru hareketlenmesi ile azalmaktadır. Aynı şekilde, bu kuvvet tırmanıcının sola hareketi ile de yine azalma eğilimi göstermektedir (Şekil 4a). Benzer bir şekilde sağ el tutamağına etkiyen yatay kuvvet de vücudun sağa ve yukarıya doğru hareketlenmesi ile azalmaktadır (Şekil 4b). Her iki el içinde yatay kuvvetler, vücut

$$\begin{array}{ccccccc}
 & \frac{EA}{L} & 0 & 0 & \frac{EA}{L} & 0 & 0 \\
 \bar{f}_{xi} & 0 & \frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} & 0 & \frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} & \bar{u}_{xi} \\
 \bar{f}_{yi} & 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} & 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} & \bar{u}_{yi} \\
 M_i & \frac{EA}{L} & 0 & 0 & \frac{EA}{L} & 0 & 0 & \bar{u}_{xj} \\
 \bar{f}_{xj} & 0 & \frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} & 0 & \frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} & \bar{u}_{yj} \\
 \bar{f}_{yj} & 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} & 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} & j \\
 M_j & 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} & 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} &
 \end{array} \quad [E.2]$$



Şekil 3. Tırmanıcının kalçasının hareket alanı ve uç değerlerdeki vücut pozisyonları.



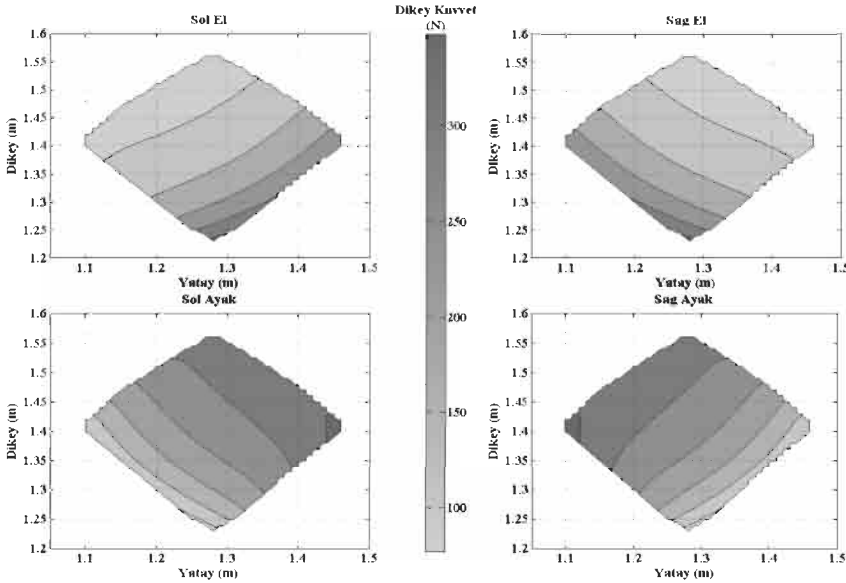
Şekil 4. Tırmanıcının hareket edebileceği alan içerisindeki konumuna göre el ve ayak tutamaklarına etkiyen yatay yük grafiği. a) Sol el tutamağı, b) Sağ el tutamağı, c) Sol ayak basamağı, d) Sağ ayak basamağı.

alabileceği en alçak pozisyona geldiğinde en yüksek değerine ulaşmaktadır. Yatay kuvvetler, ayak basamaklarında sağa-sola harekette eldekine benzer bir değişim göstermektedir. Dikeyde ise el tutamaklarına zıt olarak vücut alçaldıkça basamaklara etkiyen yatay kuvvet azalmaktadır (Şekil 4c ve 4d).

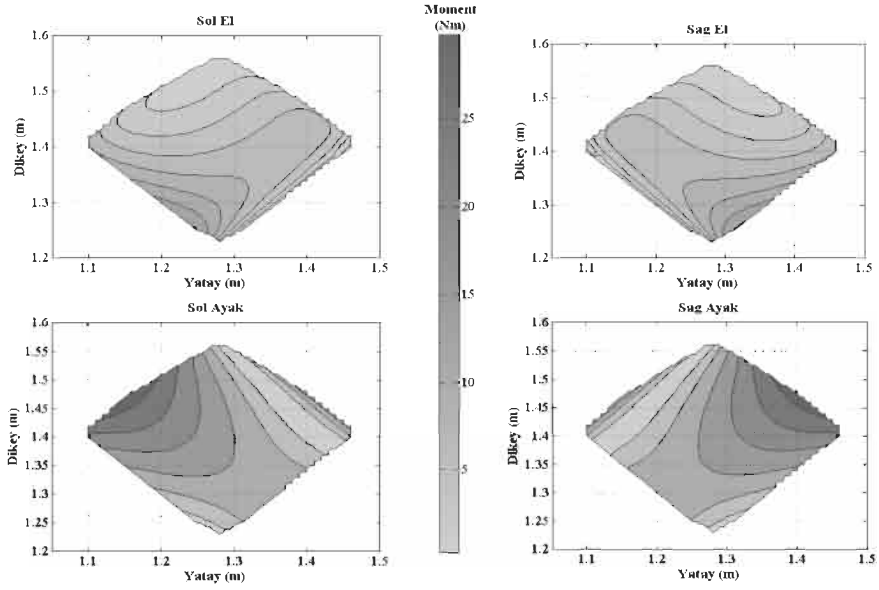
Tırmanıcının vücut pozisyonuna göre el ve ayak tutamaklarına binen dikey yükler kontur grafiği olarak Şekil 5'te verilmiştir. Sol el tutamağına etkiyen dikey kuvvet vücutun sola doğru hareketlenmesi ile azalmakta ve tırmanıcının yukarı doğru hareketi ile de yine azalma eğilimi göstermektedir (Şekil 5a). Benzer bir şekilde, sağ el tutamağına etkiyen dikey kuvvet de vücutun sağa ve yukarıya doğru hareketlenmesi ile azalmaktadır (Şekil 5b). Her iki el için de dikey kuvvetler, yataydakine benzer olarak, vücut alabi-

leceği en alçak pozisyona geldiğinde en yüksek değerine ulaşmaktadır. Ayak basamaklarındaki dikey kuvvetler yatay ekseninde eldekine benzer bir değişim göstermektedir. Dikeyde ise el tutamaklarına zıt olarak vücut alçaldıkça basamaklara etkiyen dikey kuvvet azalmaktadır (Şekil 5c ve 5d).

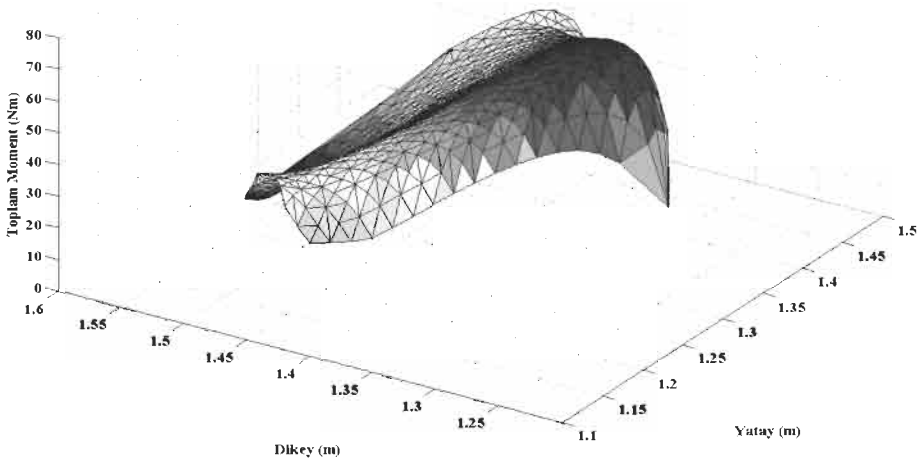
Tırmanıcının vücut pozisyonuna göre el ve ayak tutamaklarına etkiyen momentler kontur grafikleriyle Şekil 6'da gösterilmiştir. Sol el tutamağına etkiyen moment en yüksek değerlerini vücut aşağı inip sola kaydıka almaktadır (Şekil 6a). Benzer bir şekilde, sağ el tutamağına etkiyen moment de en yüksek değerini vücut aşağı inip sağa kaydıka almaktadır (Şekil 6b). Ayaklar için de benzer durum görülmektedir. Vücut sağ ayağa yaklaşır yükseldikçe, sağ ayak basamağına etkiyen moment, sola gidip yükseldikçe de sol ayak-



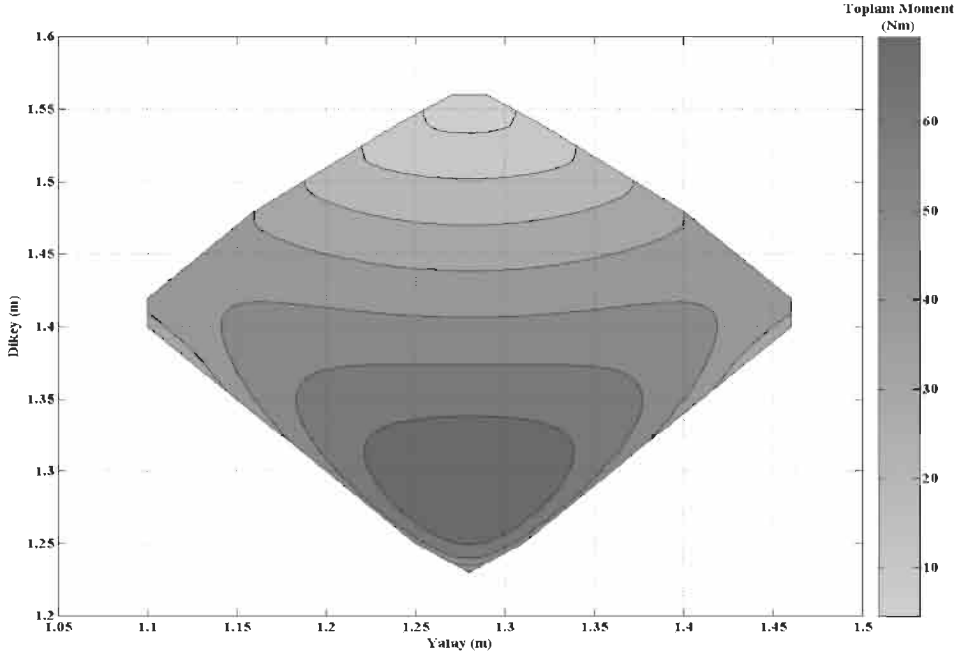
Şekil 5. Tırmanıcının hareket edebileceği alan içerisindeki konumuna göre el ve ayak tutamaklarına etkiyen dikey yük grafiği. a) Sol el tutamağı, b) Sağ el tutamağı, c) Sol ayak basamağı, d) Sağ ayak basamağı.



Şekil 6. Tırmanıcının hareket edebileceği alan içerisindeki konumuna göre el ve ayak tutamaklarına etkileyen moment grafiği. a) Sol el tutamağı, b) Sağ el tutamağı, c) Sol ayak basamağı, d) Sağ ayak basamağı.



Şekil 7. Yatay konum-dikey konum-toplam moment grafiği.



Şekil 8. Tırmanıcının hareket edebileceği alan içerisindeki konumuna göre üst vücut üyelerine etkiyen toplam moment kontur grafiği.

taki moment artmaktadır (Şekil 6c ve 6d).

Modelin, hareket sınırları içerisinde, kollarına etkiyen toplam momentin kalçanın aldığı konuma göre değişimi Şekil 7'de üç boyutlu grafik yardımıyla gösterilmiştir. Grafikten kolayca anlaşıldığı gibi, grafiğin simetrik olduğu ve gövdenin yükseklığı sabit tutulunca toplam momentin sola ve sağa harekette benzer değişimler gösterdiği görülmektedir. Şekil 8'de de moment değişimi kontur grafiği olarak verilmiştir. Kollara etkiyen toplam momentin vücudun yukarı hareketi ile azalmakta aşağı doğru doğru indikçe de artmaktadır.

TARTIŞMA

Tırmanıcılar için vücut pozisyonunu ve dengeyi korumak çok önemlidir. Bu amaçla en büyük kuvvet, vücut momentlerini dengelemek için harcanır. Kollarda

oluşacak momentler alt vücuttakilere göre daha küçük kas grupları ile dengelenmektedir. Bu momentlerin az olması, kasların daha az bir yükü karşılamak için kasılması demektir. Bu da tırmanıcının daha az yorulmasını ve daha uzun süre tırmanabilmesini sağlayacaktır. İdeal olarak tırmanıcının kollarına etkiyen momentlerin en az olduğu pozisyonlar, kolların düz bir konumda yere dik olarak tutulduğu pozisyonlardır. Ancak, tırmanış sırasında tutulan tutamak ve basılan basamakların dağılımı ve vücut üyelerindeki sınırlılıklar her zaman bu ideal pozisyonu almaya imkan vermemektedir. Bu durumda, tırmanıcılar o an için en uygun pozisyonu bulmak zorundadırlar.

Bu çalışmada, sonlu elemanlar yöntemi ile, modeli oluşturulan tutamak dağılımı için, farklı vücut pozisyonlarında tuta-

maklara, basamaklara ve tırmanıcının eklemelerine binen yüklerin hesaplanması ve üst vücut üyelerine en az moment etkiyen pozisyonların belirlenmesi amaçlanmıştır. Eklemelere, destek noktalarına ve üyelere etkiyen kuvvet ve momentlerin hesaplanabilmesi için MATLAB programlama ortamında geliştirilen bir program kullanılarak iki boyutta sonlu elemanlar modeli çözümü gerçekleştirilmiştir. Kollara binen toplam momentlerin eniyilemesi de yine MATLAB programı ile yapılmıştır. Yapılan hesaplamalar, modeli oluşturulan tırmanıcı için, belirlenen tutamak dağılımında, kollara binen toplam momentin en az olduğu pozisyonun gövdenin en yukarıda olduğu pozisyon olduğunu göstermiştir (Şekil 3b). Bu pozisyonda, neredeyse yere dik bir konumda olan ön kollar, gövdenin aşağı doğru hareketlenmesiyle açılmakta ve pozisyonunu kaybetmektedir (Şekil 3d). Kollardaki bu açılma, özellikle el tutamaklarındaki momentlerin artmasına neden olmakta ve toplam momenti artırmaktadır. Toplam momentin en az olduğu pozisyon aynı zamanda vücut ağırlığının büyük bir kısmının ayaklara aktarıldığı pozisyonudur (Şekil 4 ve 5).

Bu çalışma, kaya tırmanışının mekaniğinin anlaşılabilmesi ve bu sporun yorumlanabilmesi için sonlu elemanlar metodu ile yapılan temel bir çalışmadır ve oluşturulacak modeller ile kuvvet, moment dağılımlarının incelenip bu spordaki mekanik olayların anlaşılabilmesini ve performansa yönelik çalışmaların yapılabilmesini göstermiştir. Kaya tırmanışı sporunun ve bu sporun mekaniğinin daha iyi açıklanabilmesi için kullanılan modelin geliştirilmesi, eğimli duvarlar için de bu hesaplamaların yapılarak vücut pozisyonu, kuvvet ve momentlerdeki değişimlerin incelenmesi gerekmektedir. Yapılacak çalışmalarda, üç boyutlu modeller kullanılarak yatay-dikey kuvvetlerin yanı sıra tırmanıcının tutamak ve basamaklara içe-

dışa ne kadar kuvvet uyguladığı da incelenebilir. Ayrıca, duvar üzerindeki tutamaklara yerleştirilen yük hücreleri yardımıyla elde edilecek kuvvet verileri ile EMG ölçümleri birleştirilerek bu sporda performans ve yorgunluğa yönelik çalışmalar da yapılabilir.

Yazışma Adresi (Corresponding Address)

*Dr. Serdar ARITAN
Hacettepe Üniversitesi
Spor Bilimleri ve Teknolojisi Yüksekokulu
Biyomekanik Araştırma Grubu
06800 Beytepe / ANKARA
e-posta: serdar.aritan@hacettepe.edu.tr*

KAYNAKLAR

- Akgün, N. (1992). **Egzersiz Fizyolojisi**. İzmir: Ege Üniversitesi Basımevi.
- Brekelmans, W.A., Poort, H.W. & Slooff, T.J. (1972). A new method to analyse the mechanical behaviour of skeletal parts. **Acta Orthop Scand**, 43 (5), 301-317.
- Cook, R.D., Malkus, D.S., Plesha, M.E. & Witt, R.J. (2001) **Concepts and Applications of Finite Element Analysis** (4th Edition). New York: John Wiley & Sons.
- Cook, R.D. (2001). **Finite Element Modelling for Stress Analysis**. New York: John Wiley & Sons.
- Fung, Y.C. (1993). **Biomechanics: Mechanical Properties of Living Tissues (2nd Edition)**. New York: Springer.
- Noe, F., Martin, L. & Blanche, J.P. (1997). Effect of a leg movement on the organization of the forces at the holds in a climbing position: 3-D kinetic analysis. **Human Mov Sci**, 16, 337-346.
- Noe, F., Quaine, F. & Martin, L. (2001). Influence of steep gradient supporting walls in rock climbing:

- biomechanical analysis. **Gait & Posture**, 13, 86-94.
- Noe, F. (2006). Modifications of anticipatory postural adjustments in a rock climbing task: The effect of supporting wall inclination. **J Electromyogr Kinesiol**, 16, 336-41
- Özkaya, N. & Nordin, M. (1998). **Fundamentals of Biomechanics: Equilibrium, Motion and Deformation (2nd Edition)**. New York: Springer.
- Quaine, F., Martin, L. & Blanche, JP. (1997). The effect of body position and number of support on wall reaction forces in rock climbing. **J Appl Biomech**, 13, 14-23.
- Quaine, F. & Martin, L. (1999). A biomechanical study of equilibrium in sport rock climbing. **Gait & Posture**, 10, 233-239.
- Reddy, J. N. (1993). **An Introduction to the Finite Element Method (2nd Edition)**. New York: McGraw-Hill.
- Reilly, D.T. & Burstein, A.H. (1975). The elastic and ultimate properties of compact bone tissue. **J Biomech**, 8, 393-405.
- Van Buskirk, W.C. & Ashman, R.B. (1981). The elastic moduli of bone, in **Mechanical Properties of Bone, Joint ASME-ASCE Applied Mechanics, Fluids Engineering and Bioengineering Conference**, Colorado: Boulder.
- Viceconti, M., Davinelli, M., Taddei, F. & Cappello, A. (2004). Automatic generation of accurate subject-specific bone finite element models to be used in clinical studies. **J Biomech**, 37, 1597-1605.