

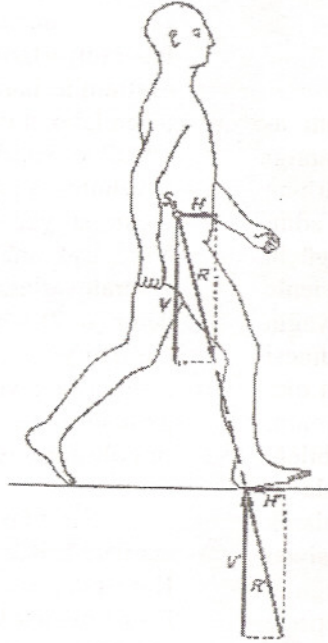
ORTOPEDİDE BİYOMEKANİK YAKLAŞIMLAR

*Prof. Dr. Feza KORKUSUZ**

Biyomekanik, geniş anlamıyla “mekanik kuralların biyolojik ortamlarda geçerliliğini inceleyen bilim dalı” olarak tanımlanabilir. Ortopedi bilimi, inceleme alanı olan kas ve iskelet sisteminin yapısı gereği biyomekanik kavram ve yöntemleri etkili olarak kullanmaktadır. Canlının yaşaması için zorunlu “hareket etme” işlevini yerine getirirken Newton’un üç kanunu; (1) eylemsizlik [*inertia*], (2). hareket [*acceleration; F=ma*] ve (3) reaksiyon [*reaction*] uygulanır (Şekil 1). Örnekleme gerekirse, ayakta duran bir kişinin eylemsizken

*Prof. Dr. Turgut TÜMER***

harekete geçebilmesi için kütleyle doğru orantılı bir kuvveti yaratması (veya kuvvetin dışarıdan uygulanması) gerekir. Hareket sırasında kişinin yere güç aktarmasına karşı oluşan tepkiye “yer reaksiyon kuvveti” adı verilir. Basit anlamda inceleyecek olursak, hareket için oluşturduğumuz her etkiye karşı gelişen tepki kas ve iskelet sistemince yaratılmakta veya karşılanmaktadır. Bu bağlamda, sağlık veya hastalık durumunda kas ve iskelet sisteminde oluşan etki ve tepkinin bilimsel anlamda ölçülmesi gerekmektedir (1, 2).



Şekil 1. Yürüyüş sırasında yer reaksiyon kuvveti.

* Orta Doğu Teknik Üniversitesi Sağlık ve Rehberlik Merkezi, Ankara.

** Orta Doğu Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü, Ankara.

Üst Ekstremitte

Üst ekstremitte, yazı yazmak, beceri sergilemek gibi alt ekstremitteye oranla daha hassas işlerin gerçekleştirilmesinden sorumludur. Bu nedenle üst ekstremitede eklemlerin hareket sınırları daha fazla, kasları sayı olarak daha çok ve motor ünite (hareketi gerçekleştirecek kas başına düşen sinir ucu – nöromusküler kavşak) adedi daha yüksektir. Buna karşılık alt ekstremitte uzun süre ayakta durma, hareket etme ve ağırlık taşıma gibi daha kaba hareketleri gerçekleştirir. Fonksiyon olarak incelendiğinde hem alt hem de üst ekstremitenin eklemlerinin bir bütün içinde ele alınması gerekmektedir. Örneğin el parmaklarının fonksiyonlarını yerine getirebilmeleri kusursuz el bileği, ön kol, dirsek ve omuz fonksiyonuyla bağlantılıdır. Benzer şekilde yürüyüşün gerçekleştirilmesi için alt ekstremitenin tüm eklemlerinin (ayak-ayak bileği-diz-kalça) uyum içinde olmaları gerekir.

Alt Ekstremitte

Alt ekstremitenin en önemli organı ayaaktır. Birçok kemiğin birbiriyle eklem yaptığı ayak, kişi yere basarken oluşan şoku soğurmak üzere elastik bir yapıdayken ileri doğru adım atılması sırasında eklemlerini sabitler ve güçlü bir kuvvet kolu oluşturur (3). Bu nedenle amputasyon düşünülen durumlarda ayağın olabildiğince korunmasına özen gösterilmesi son derece önemlidir (4). Ayağı bir bütün olarak ele aldıktan sonra ayak bileği eklemının yakından incelenmesi gerekir. Ayak bileği eklemi asıl olarak üç kemiğin; (tibia, fibula ve talus) birleşmesinden oluşur. Temel olarak fleksiyon (plantar fleksiyon) ve ekstansiyon (dorsal fleksiyon) hareketi ayak bileğinin horizontal (frontal) eksenini üzerinde gerçekleşirken inversiyon ve eversiyon hareketleri doğrudan subtalar, talokalkaneonaviküler ve kalkaneokuboid eklemlerin katkısıyla talokalkaneal eklemının uzun aksı üzerinde gelişir. Ayak ve ayak bileğini hareketlendiren kasların her iki eksenini hangi yönde geçtikleri bilinmektedir. Özellikle poliyomyelit veya serebral paralizi gibi hastalıklarda yapılacak tendon transferlerinde, transfer edilecek kasın işlev görebilmesi için bu

eksenlere uygun cerrahinin yapılması gerekmektedir.

Diz eklemi, diartrodial menteşe (hinge) tipi olup temel hareketini fleksiyon ve ekstansiyon yönünde göstermektedir (5). Ekstansiyonda hafif bir rotasyonla dizin kilitleniyor olması önemli bir özelliktir ve kişinin çok az enerji harcayarak uzun süre ayakta kalabilmesini sağlar. Alt ekstremitenin mekanik eksenini diz eklemının iç kompartmanından ortaya yakın olarak geçer. Yürüyüşün salınma aşamasında dizde yaklaşık 50-60° lik fleksiyon gerçekleşir. Kişinin merdiven çıkabilmesi veya sandalyede rahat oturabilmesi için en az 90° lik diz fleksiyonunun sağlanması zorunludur.

Yürüyüş

Kişinin geniş anlamda hareketini inceleyen bilime *Kinezyoloji* adı verilir (2). Kinezyolojide hareketin nitelik ve nicelik olarak ölçülmesi, hareket analizi laboratuvarlarında gerçekleştirilir. Üst ekstremitte hareketini nitelik ve nicelik olarak ölçen laboratuvarlar bulunmakla birlikte bunlar özellikle sporla ilgili (örneğin teniste veya beyzolda topa vuruş anının incelenmesi gibi) ölçümleri yapar ve uygulama alanları sınırlıdır. Yürüyüşü nitelik ve nicelik olarak inceleyen laboratuvarlara "Yürüyüş (Gait) Laboratuvarı" denir (6, 7). Ülkemizdeki yeni geliştirilen veya kurulan yürüyüş laboratuvarlarına karşılık yurt dışında tanı ve tedavinin yönlendirilmesi/ değerlendirilmesi amacıyla kurulan ve standartlarını oluşturmuş yürüyüş laboratuvarları vardır.

Bir yürüyüş laboratuvarının temel elemanları 1. Kuvvet platformu (force plate(s)), 2. Kameralar ve 3. Elektromiyografi (EMG)'dir. Bu elemanlardan elde edilen sayısal bilgi, bilgisayarda toplanır ve gelişmiş bir yazılım aracılığıyla işlenir. Bir yürüyüş laboratuvarının işlerliği doğrudan veriyi derleyen bilgisayar yazılımının gelişmişliği ve standardını oluşturmak üzere ölçüm yaptığı normal kişilerin sayısı ile ilişkilidir.

Kuvvet Platformu: İdeal bir yürüyüş laboratuvarında yürüyen kişinin dikkatini çekmeyecek biçimde yere gömülmüş birbirine paralel iki adet kuvvet plağı bulunur. Yürüyüş

sırasında ayak kuvvet plağına bastığında yer reaksiyon kuvvetinin plağa aksiyel etkisi ve

ayak hareketi sırasında plakta 6 yönde oluşan açısal değişiklikler ölçülür (Şekil 2).



(a)



(b)

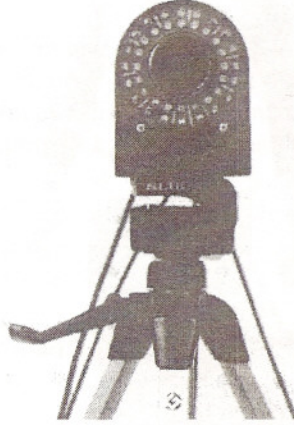
Şekil 2. Yürüyüş laboratuvarında denek. (a) ön-arka ve (b) yan görüntü. Yere gömülmüş kuvvet platformları ve kameralar izlenmektedir. Deneğin üstünde kıızıl ötesi ışığı yansıtan reflektörler yerleştirilmiştir. Bu deneyde EMG ile ölçüm alınmamıştır.

Kameralar (Şekil 3): Yürüyüş laboratuvarında kamera sayısı 2 ile 6 arasında değişmektedir. Kamera sayısı arttıkça harekete ait hata oranı azalmaktadır. Kameraların sani-

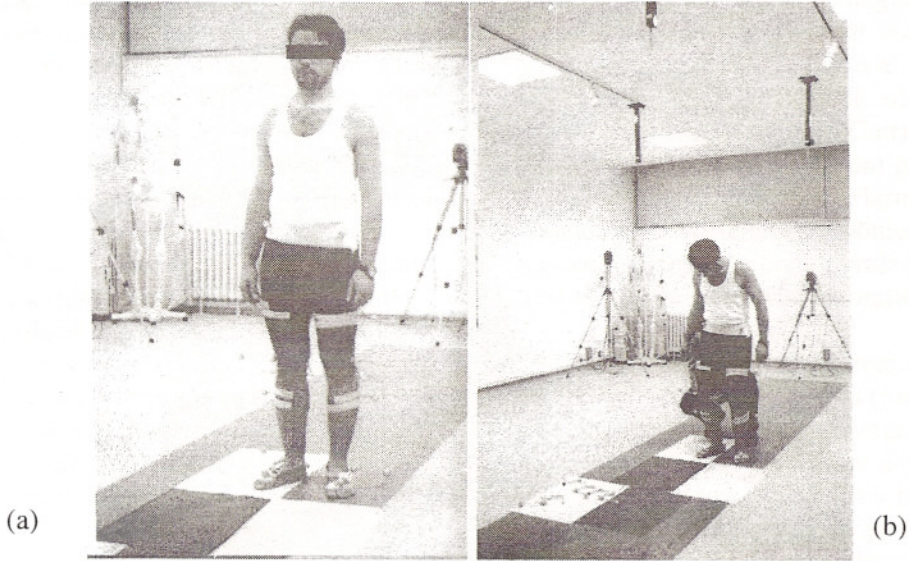
yedeki çekim hızı 25 ile 200 kare arasında değişmektedir. Kameranın çekim hızı arttıkça hızlı hareketlerin analizi kolaylaşmaktadır. Yürüyüş analizine başlamadan önce kameralar-

rın senkronizasyonu sağlanmalıdır. Kişinin yürüyüşü sırasında kameraların çekim yapacağı hacim bilgisayara tanımlanır ve bu hacim içerisinde oluşacak her hareket kaydedilir. Bu hacim genellikle kuvvet plağının içinde bulunduğu alanı taban alır. Hareketin kaydı için yürüyecek kişinin üzerinde anatomik iz dü-

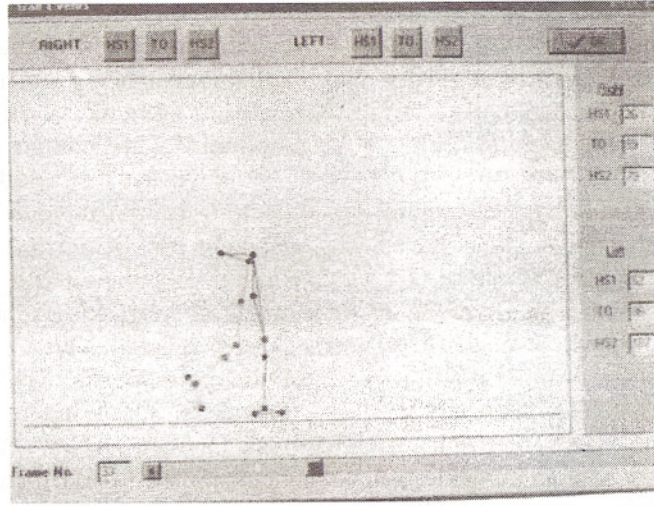
şümleri kızıl ötesi ışına duyarlı reflektörlerle belirlenir (Şekil 4). Ayrıca eklem hareket açılarının belirlenmesinde yine bu iz düşümlerinden yararlanılır. İz düşümlerinin daha sonra bilgisayara tanıtılması gerekir (hangi nokta hangi kemiğe veya ekleme ait) (Şekil 5).



Şekil 3. Kullanılan kameralardan birisinin önden görünüşü. Kameranın odağının çevresinde, kamera ile senkronize kızıl ötesi ışın veren elektronik devreler mevcuttur. Buradan yollanan ışın reflektörden geriye yansarak kamera tarafından kayıt edilmektedir.



Şekil 4. Denek üzerine reflektörlerin yerleştirilmesi (a). Denek yürütülmeden önce eklemlerin hareket merkezinin iz düşümlerini saptamak üzere kameralarca daha önce ölçüm yapılacak hacmin içerisinde hareketsiz görüntü alınır (b). Daha sonra eklemleri belirleyen reflektörler çıkartılarak yürüyüş aşamasına geçilir.



Şekil 5. Yürüyüş analizi için ODTÜ Makine Mühendisliği Yürüyüş Laboratuvarı için geliştirilmiş bilgisayar programının (KISS-Gait) ekran görüntüsü. Alt ekstremitede gerçekleştirilen bir ölçümün verileri incelenmektedir.

EMG: Yürüyüşün hangi aşamasında hangi kas gruplarının aktif olduğunu belirlemek amacıyla kullanılır. İncelemenin yapılacağı ekstremitedeki önemli kas gruplarının üzerine yüzey elektrodu yerleştirilerek EMG ölçümü gerçekleştirilir. EMG verilerinden biyomekanik hesaplamaların yapılması amacıyla yararlanılması söz konusu değildir. Ancak, özellikle cerrahi gerektiren durumlarda veya cerrahi sonrası (örneğin tendon transferi ameliyatı) kas etkinliklerinin yürüyüşü ne yönde etkilediğinin anlaşılması amacıyla EMG verilerinden yararlanır.

Verinin toplanması ve değerlendirilmesi amacıyla iki ayrı bilgisayar yazılımı kullanılır. Elde edilen verilerden eklem biyomekaniği hakkında ayrıntılı bilgi alınır ve matematik modellemeye gidilebilir (8).

Yürüyüşün Temel Verileri

Yürüyüş insanın doğasında vardır ve refleks olarak gerçekleşmektedir. Global yürüme parametrelerini incelediğimizde, ayağın yerde olduğu süreye duruş (*stance*) ve yerden

ayrıldığı süreye de salınım (*swing*) fazı denir. Normal yürüyüşün yaklaşık % 60'lık bölümü duruş ve % 40'lık bölümü de salınımında geçer. Yürüyüşün hızı arttıkça duruş kısalmış salınım artar. Koşu sırasında duruş hemen tamamen kaybolur ve yerini büyük oranda salınımına bırakır. Yürüyüşle ilgili bilinmesi gereken diğer kavramlar Tablo 1'de verilmiştir. Yürüyüşü belirleyen parametrelerden en önemlisi pelvis'te oluşan harekettir. Yürüyüş sırasında pelvis üç yönde hareket etmektedir. Bunlardan birincisi hareket yönüdür ve kalça ekleminde oluşan hareketle paralel horizontal ekseninde 8° lik öne ve arkaya hareket oluşur. Pelvisteki ikinci hareket yer yönünde aşağı-yukarı doğrultudadır. Bu hareketin yoğunluğu sagittal düzlemde 4° - 8° arasındadır. Pelvisteki son hareket lateral yöndeki yer değiştirmedir ve yatay düzlemde 4° dolayında gerçekleşir. Pelvisteki her üç hareketin açısı anatomik yapılarından dolayı kadınlarda erkeklere oranla daha belirgindir. Pelvisteki harekete dizde fleksiyon, ayak bileğinde ve ayakta oluşan hareket eşlik eder.

Tablo 1. Yürüyüşle ilgili bilinmesi gereken kavramlar.

İki adım uzunluğu (<i>stride length</i>):	Kişinin iki ayağı da yerdeyken (<i>double support</i>) bir ayağının ucundan diğerinin arkasına olan uzaklık
Adım uzunluğu (<i>step length</i>):	Kişinin aynı ayağının topuğunun yere değdiği (<i>heel strike</i>) ilk noktayla, aynı ayağın topuğunun ikinci kez değdiği noktalar arasındaki mesafe
Adım sayısı (<i>cadance</i>):	Dakikadaki adım sayısı
Yürüyüş hızı (<i>velocity</i>):	Yürünen mesafenin alındığı süre (m/s)

Yürüyüş sırasında gövdenin öne hareketi dalgasaldır. Vücut ağırlık noktası sagittal ekseninde dalgasal bir salınma gösterir. Baş gövdeyi takip eder ve salınma katılır. Kol hareketleri yürüyüşün kusursuz olmasında önemlidir.

Yürüyüş laboratuvarında hareket nicelik ve nitelik olarak ölçülebilir, ancak küçük hareketlerin kaydedilmesi (örneğin ön çapraz bağ ameliyatı öncesi ve sonrasında dizdeki stabilite) günümüz teknolojiyle olanaksızdır. Bu nedenle yürüyüş laboratuvarının kullanıldığı alanlar nörojenik alt ekstremite rahatsızlıkları (poliyomyelit, serebral paralizi vb.), bu tür hastalıklarda cerrahi tedavi sonrası gerçekleştirilen tendon transferlerinin sonucunun izlenmesi ve ana eklemlerde yürüyüşü bozan hastalıkların tedavi öncesi ve sonrası performanslarının değerlendirilmesi (romatoid artrit, dejeneratif artrit vb.) şeklinde sıralanabilir. Sınırlı kaynak laboratuvarı ve yeni teknolojinin kullanılması açısından yürüyüş laboratuvarında gerçekleştirilecek çalışmalara sınır koymak doğru değildir. Japonya'da santral sinir sistemi hastalıklarıyla omurilikte baskı oluşturan OPLL (*ossification of the posterior longitudinal ligament*) hastalığının ayırıcı tanısında yürüyüş laboratuvarının kullanılması planlanmaktadır.

Yürüyüş Laboratuvarı ve Ortez/Protezler

Ortez veya protez kullanan şahıslarda yürüyüşün nasıl etkilendiğinin araştırılması gerekmektedir. Alt ekstremitte amputasyonlarında seviye yükseldikçe yürüyüş parametrelerinin ters yönde etkilendiği ve kişinin aynı mesafeyi yürüyebilmek için daha fazla enerji harcamak zorunda olduğu bilinmektedir (4). Buna rağmen uygun protezin kullanımıyla yürüyüş, hemen her yaşta büyük oranda restore edilebilmektedir. Mc. Anelly ve arkadaşlarının gerçekleştiren bir çalışmada, 73 yaşında

histiyositoma nedeniyle kalça dezartikülasyonu uygulanan bir erkek hastaya uygun portezin kullanılmasıyla kadansının 44 adım/dk (normali 112 adım/dk) ve çift destek oranının % 47 (normali % 26) olduğu gözlenmiştir (9). Aynı kişinin yürüyüş sırasında oksijen tüketiminin (VO_2) ~ 1.0 m/saniye de 11.0 ml/kg/dk olduğu saptanmıştır. Bu gözlemden çıkan sonuç, ileri yaştaki amputelerin de kalça dezartikülasyon protezini rahatlıkla kullanabildiği yönündedir. Cortes ve arkadaşları 8 trans-tibial amputasyon uygulanmış şahısta dört farklı protezin (SACH, Tek eksen, Greisinger, Dinamik) ayak bileği-ayak hareketi ilişkisi yürüyüş laboratuvarında incelenmiştir (10). Bu çalışmada toplamda 383 normal yürüyüş, 958 ampute yürüyüşüyle karşılaştırılmıştır. Yürüyüş performansına bakıldığında SACH ve dinamik ayağın Greisinger ve tek eksenli ayağa oranla daha üstün olduğu saptanmıştır. Lehmann ve arkadaşları kitle dağılımının diz altı protezlerdeki etkisini 15 gönüllüde araştırmıştır (11). Kitlenin proksimal merkezde yoğunlaşması distal merkezde yoğunlaşmasına oranla daha etkin bir yürüyüş sağlamaktaydı. Proteze rağmen hemen tüm işlev normal ekstremitte tarafından görülmekteydi. Protezin özellikle normal ekstremitedeki push-off ve salınım yavaşlama (deceleration) aşamasını gerçekleştirmediği görüldü. Protezin üretildiği distal parçaların daha hafif bir alışımdan üretilmesinin avantaj sağlayacağı öne sürülmektedir.

Sonuç olarak, yürüyüş laboratuvarlarının, yürüyüşü doğrudan etkileyen alt ekstremitte protez/ortez uygulamalarının başarısını ölçmede veya geliştirmede etkin olarak kullanılabileceği açıktır. Uygulama sonrası yürüyüşün nitelik ve nicelik olarak ölçülmesi gelecekte gelişmiş protezlerin üretilmesinde önemli rol oynayabilir.

KAYNAKLAR

1. **Kai-Nan A, Chao EYS, Kaufman KR** : Analysis of muscle and joint loads. In. Basic Orthopaedic Biomechanics, Eds. Van C. Mow, Wilson C. Hayes, Raven Press, New York, pp: 1-50, 1991.
2. **Wells KF**: Kinesiology. WB Saunders Co. London, 1971.
3. **Günel U, Korkusuz F**: Ayak ve ayak bileğinin biyomekaniği. In, Ayak ve Ayak Bileği Sorunları, Ed. Rıdvan Ege. Bizim Büro Basımevi, Ankara, pp: 47-68, 1997.

4. **Effeney DJ, Krupski WC, Skinner HB:** Amputasyon. In, Çağdaş Cerrahi Tanı ve Tedavi. 2. Baskı, Ed. Lawrence W. Way (Çeviri editörü: Hikmet Akgül), pp: 826-836, 1989.
5. **Korkusuz F :** Diz biyomekanik özellikleri. In, Diz Sorunları, Ed. Rıdvan Ege, Bizim Büro Basımevi, Ankara, pp: 91-98, 1998.
6. **Paul JP:** Concepts in gait analysis. In, Biomechanics of Human Movement, Eds. Necip Berme, Aurelio Cappozzo, Bertec Corp., Worthington, pp: 396-402, 1990.
7. **Hattori T:** Current trends in gait analysis: advanced techniques for data acquisition and analysis. In, Biomechanics in Orthopedics, Eds. Shigeo Niwa, Stephen M. Perren, Tomokazu Hattori, Springer-Verlag, Tokyo, pp: 102-120, 1992.
8. **Tümer ST, Güler HC:** Yürüyüş analizinin temel verileri ve klinik uygulaması. Artroplastisi, Artroskopik Cerrahi 9:158-162, 1998.
9. **McAnelly RD, Refaeian M, O'Connell DG, Powell GD, Walsh NE:** Successful prosthetic fitting of a 73-year-old hip disarticulation amputee patient with cardiopulmonary disease. Arch. Phys. Med. Rehabil. 79:585-588, 1998.
10. **Cortes A, Viosca E, Hoyos JV, Prat J, Sanchez-Lacuesta J:** Optimisation of the prescription for trans-tibial (TT) amputees. Prosthet. Orthot. Int. 21:168-174, 1997.
11. **Lehmann JF, Price R, Okumura R, Questad K, de Lateur BJ, Negretot A:** Mass and mass distribution of below-knee prostheses: effect on gait efficacy and self-selected walking speed. Arch. Phys. Med. Rehabil. 79:162-168, 1998.