

# İNSAN AYAĞI BİYOMEKANİĞİNİN İNCELENMESİ

*Betül GÜLÇİMEN\**

*Sedat ÜLKÜ\**

**Özet:** Bu çalışmada insan ayağının biyomekaniğini anlamamıza yardımcı olan deneysel yöntemler ve sonlu elemanlar yöntemlerinden bahsedilmiştir. Sonlu elemanlar yönteminin kullanıldığı çalışmalardan örnekler verilerek modelleme aşamasından analiz sonuçlarının elde edilmesine kadar gerçekçi sonuçlar elde edebilmek için dikkat edilmesi gereken noktalar irdelenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Biyomekanik, insan ayağı, yürüyüş analizi, sonlu elemanlar yöntemi.

## The Investigation of Human Foot Biomechanics

**Abstract:** In this study, the experimental and finite element methods that help us understand the human foot biomechanics are mentioned. Examples of studies in which finite element method is used are given and from modeling to simulation results the points that should be considered carefully to get accurate results are examined.

**Key Words:** Biomechanics, human foot, gait analysis, finite element method.

## 1. GİRİŞ

Çok hızlı gelişen teknoloji ile beraber mevcut bilim dalları arasındaki sınırların ortadan kalkması yeni pek çok bilim dalının ortaya çıkmasına sebep olmuştur. Bunlardan birisi de mekanik, tıp ve biyoloji bilim dallarının birleştirilmesi ile ortaya çıkan biyomekanik bilim dalıdır. Günümüzde gittikçe daha da önem kazanan ve uygulama alanları genişleyen biyomekaniği; mekaniğin ilkelerini canlılar üzerinde uygulayarak yeni sistemlerin tasarlanması, geliştirilmesi ve analizini sağlayan bilim dalı olarak tanımlayabiliriz.

Biyomekanikte farklı uygulamalar için mekaniğin farklı alt dalları kullanılmaktadır. Örneğin statik prensipleri çeşitli kemik, eklem ve kaslarda oluşan kuvvetleri anlayabilmekte, dinamiğin prensipleri hareketin tanımlanmasında ve spor mekaniğindeki uygulamalarda kullanılmaktadır. Şekil değiştirebilen cisimlerin mekaniği, biyolojik malzemelerin yapılarını ve kuvvet etkisi altındaki davranış biçimlerini, akışkanlar mekaniği ise damarlardaki kan akışını ve ciğerlerdeki hava akışını anlayabilmekte yardımcı olmaktadır.

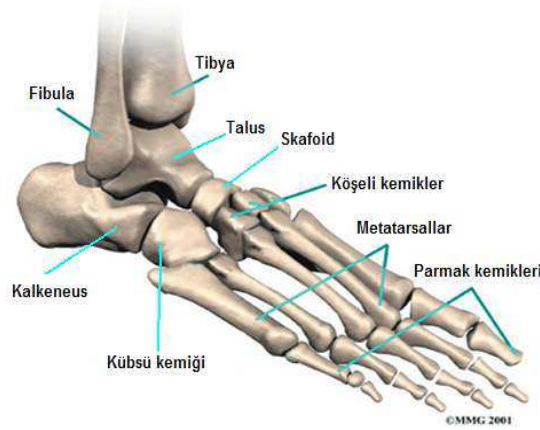
Eğer ayağın normal biyomekanik davranışı tam anlamıyla anlaşılabilirse bu sayede anatomik ve fonksiyonel anormallikler de belirlenebilir. Temel mekanik prensipleri, çok karmaşık bir yapıya sahip insan ayağının biyomekaniğini anlamakta, ayakta oluşan hastalıkların teşhisini yapmakta, bu hastalıkların oluşmasının önlenmesinde veya tedavisinde kullanılacak sistemlerin tasarlanmasında yardımcı olabilmektedir.

## 2. İNSAN AYAĞININ ANATOMİSİ VE FONKSİYONLARI

İnsan iskeletinin en önemli ve en karmaşık bölümü olan ayak, 26 adet kemikten meydana gelmiş bir yapıdır. (Şekil 1) İnsan iskeletinin yaklaşık %25'nin ayakta olduğu düşünülecek olursa ayak biyomekaniğinin ne kadar kompleks ve karmaşık olduğu anlaşılabilir. Ayak yapısını oluşturan kemikleri birbirine bağlayan ligamentlerin, hareketi kontrol eden kasların ve kemik ile kasları birbirine bağlayan tendonların işleyiş biçimleri ve birbirleriyle olan ilişkilerini anlamak ayak biyomekaniğini anlamak açısından büyük önem taşır. Bu elemanlardan herhangi bir tanesinin işlevini yitirmesi veya tam olarak işlevini gerçekleştirememesi durumunda ise ayak da bizim için hayati öneme sahip fonksiyonlarını yerine getiremez.

\* Uludağ Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, 16059, Görükle, Bursa.

Ayağın iki önemli görevi vardır. Bunlardan ilki vücut ağırlığını taşımak, ikincisi de yürüme ve koşma esnasında bir kaldıraç kolu gibi görev yaparak vücudu ön tarafa doğru itmektir. Ayağın tasarımında her bir detayın çok önemli bir amaca hizmet ettiği görülebilir. Örneğin eğer ayak birçok kemik yerine tek parça bir kemikten oluşsaydı, sadece vücut ağırlığını taşıyan ve vücudu ön tarafa iten bir kaldıraç görevi yapardı. Fakat elastik olamayacağı için engebeli yerlerin şekline uyum sağlayamaz ve dolayısıyla vücudun dengesini koruyamazdı. İşte ayakta bulunan 33 adet eklem, ayağa elastikiyet kazandırarak onun bahsettiğimiz bu uyum özelliğine sahip olmasını sağlamaktadır.



Şekil 1:  
Ayakta bulunan kemikler (Medical Multimedia Group LLC)

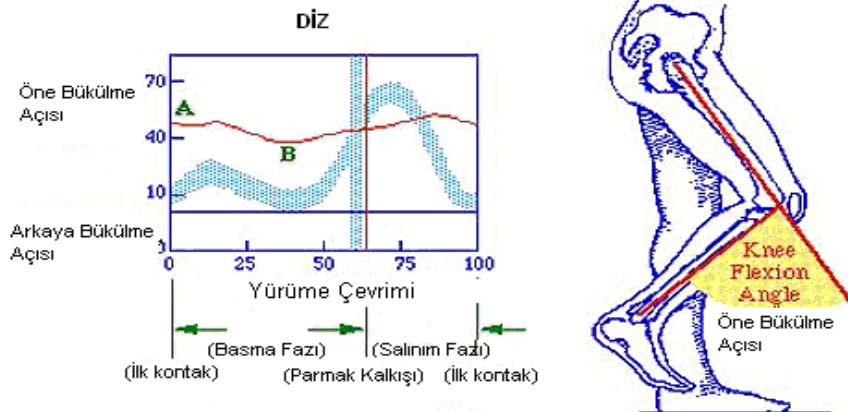
Ayak biyomekaniği ile ilgili çalışmalarda çeşitli deneysel yöntemler ve nümerik yöntem olarak ise sonlu elemanlar yöntemi kullanılmaktadır.

### 3. DENEYSEL YÖNTEMLER

Ayak biyomekaniği üzerine deneysel çalışmaları kadaverik çalışmalar ve klinik çalışmalar olarak gruplanabilir. Klinik çalışma için genel olarak kullanılan yöntem yürüyüş analizleridir. Kadaverik çalışmalarda genel olarak amaç ayağı oluşturan biyolojik uzuvların mekanik özelliklerinin test cihazlarıyla belirlenmesidir.

#### 3.1. Yürüyüş Analizi (Hareket Analizi):

Yürüyüş, canlıların bir yerden başka bir yere gitmek için doğal olarak yaptıkları hareketler bütünüdür. Yürüyüş analizi uzayda yer değiştirmek amacıyla ortaya konan hareketlerin mekanik prensipler doğrultusunda sayısal olarak ifade edilmesidir. (Yavuzer, 2007) Yürüme sırasında topuğun yere değmesinden sonra aynı topuğun yine yere değmesine kadar oluşan olaylar bütününe yürüme çevrimi denir ve bu çevrim basma ve salınım olarak iki faza ayrılır. (Şekil 2)



Şekil 2:  
Yürüyüş Analizi ile diz eklemine ait örnek kinematik dataaların elde edilmesi

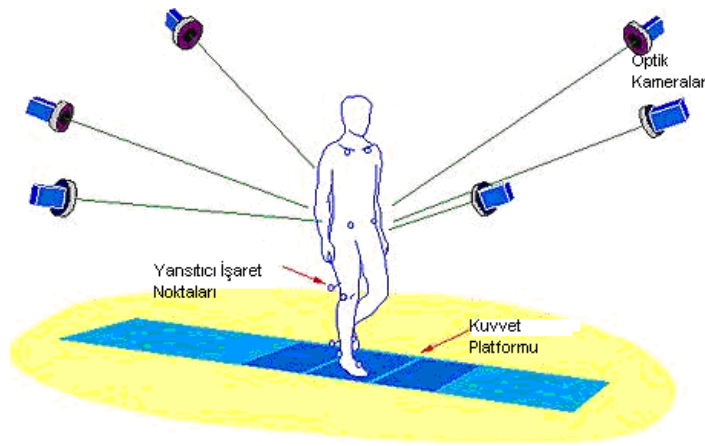
Yürüyüş analizi sistemlerinde kullanılan başlıca birimler: Video kameralar, yansıtıcı işaret noktaları (önceden yerleri belirlenmiş anatomik bölgelere tutturulan özel yansıtıcılar), yer tepki kuvvetlerini ve gerilmeleri ölçmek için kullanılan kuvvet platformları (kuvvet ölçerler) ve kas aktivitelerini değerlendirmek için dinamik elektronöromiyografi (EMG) cihazı olarak sayılabilir.(Şekil 3) Bu üniteler vasıtasıyla yürüme analizi sistemleriyle elde edilen parametreler:

**Zaman mesafe değişkenleri:** Yürüyüş hızı, yürüyüş ritmi, tek ve çift adım uzaklığı ve süresi, çift destek süresi, basma fazı yüzdesidir.

**Kinematik değişkenler:** Sagital, koronal ve transvers düzlemde gövde, pelvis, kalça, diz ve ayak bileğinde oluşan eklem rotasyon açılarıdır. Yansıtıcı malzeme ile kaplanmış küreler vücudun belli noktalarına konmakta, bunların yaydığı ışınlar özel kameralarla tespit edilip bilgisayara aktarılmakta ve bilgisayarın yarattığı animasyonlarla yürüme analizi yapılmaktadır. Elde edilen açılar, özel işaret noktalarının birleştirilmesi ile oluşturulan mekanik modelde pelvis ve kalçanın veya tibia ve ayağın uzayda birbirlerine göre konumunu ifade ederler.

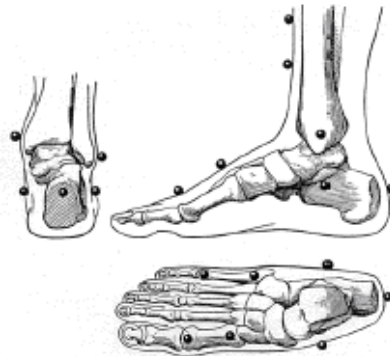
**Kinetik değişkenler:** Yer tepki kuvveti ve oluşan momentler direk olarak kuvvet platformu kullanılarak ölçülür.

**Kas aktiviteleri:** Yürüme sırasında deneklerde kaslara yapıştırılan yüzeysel elektrotlarla kasların aktiviteleri tek tek ölçülerek, ölçümler kablo vasıtasıyla bilgisayara gönderilmektedir. (Yavuzer, 2007, Erdoğan ve Tüzün, 2001)



Şekil 3:  
Yürüyüş Analizi Sistemi

Ayak kinematiği ise yürüyüş analizlerinde ayağın karmaşıklığı yüzünden en çok zorlukla karşılaşılan bölümdür ve genelde yürüyüş analizlerinde ayak tek rijit segment olarak ele alınmıştır. Son zamanlarda ayak ve ayak bileğinin 3 boyutlu kinematiğini incelemekte kullanılmak üzere farklı yansıtıcı işaretleyici nokta takımları geliştirilmeye başlanmıştır ve bu sayede yürüyüş analizi ile ayak ve ayak bileği kinematiği üzerine bilgi edinebilmek mümkün olmuştur. (Şekil 4)



Şekil 4:  
Ayağın farklı anatomik bölgelerine yerleştirilen yansıtıcı işaret noktaları

### 3.2. Kuvvet Platformları (Kuvvet Ölçerler):

Kuvvet platformları yürüyüş yoluna yerleştirilmiş basınç sensörleri sayesinde ayak basıncını algılayarak bilgisayar ortamına aktarırlar. Ayakaltında oluşan maksimum kuvvet, maksimum gerilme, gerilme dağılımı, gerilme merkezi gibi birçok veriyi elde edebilmek mümkündür. Denge halindeki ayakta durma için statik veriler elde edebileceğimiz çalışmaların yanı sıra yürüme, koşma, zıplama vb durumlardaki dinamik (zamana bağlı değişen) verilere de kuvvet platformlarıyla sağlanabilir.

Örneğin kuvvet platformlarıyla elde edilen yer tepki kuvveti değerlerini yürüyüş analizi çalışmalarında diğer hareket analizi verileri ile beraber kullanarak yürüme, koşma gibi fonksiyonları yapabilmemiz için gerekli olan eklem momentlerini hesaplamak mümkündür.

Literatürde kuvvet platformlarıyla ayak altında gerilme dağılımlarının ölçümlendiği birçok çalışma rastlamak mümkündür. Bunlara bölüm 4’de değinilmiştir.

### 3.3. Yürüyüş Analiziyle Yapılan Çalışmalarda Karşılaşılabilecek Zorluklar

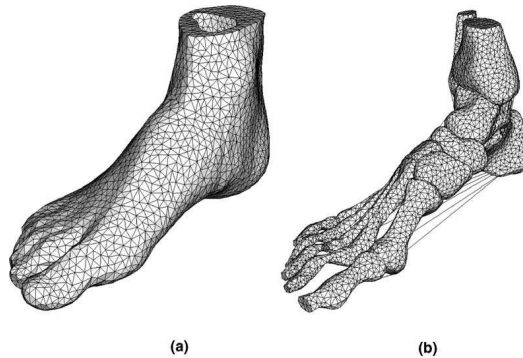
Deneyel yöntemlerde sağlıklı bireylere ait statik ve dinamik (kinematik, kinetik) veriler elde edilir. Elde edilen bu verilerle sağlıklı bireylere ait ölçüm standartları tayin edilir. Bu standartların güvenilir olabilmesi için denek sayısının fazlalığı yapılan ölçümlerin hassasiyet ve doğruluğunu arttıracaktır. Ancak verilerin çokluğu ve hastaya göre farklılık göstermesi bu işi zorlaştırır. Dolayısıyla yürüyüş analizi zor, vakit alan, dikkat ve emek gerektiren bir çalışmadır. Yapılan çalışmalarda ise referans alınan ölçüm standartlarının güvenilir ve onay almış olması teşhis koyarken büyük önem arz eder.

**4. Sonlu Elemanlar Yöntemi:** Günümüzde sonlu elemanlar yönteminin kullanımı biyomekanik çalışmalarında önemli yardımcı bir yöntem olmuştur ve yapılan çalışmalardaki sonlu elemanlar uygulamalarının sayısı giderek artmaya başlamıştır.

Ayak biyomekaniğini ele aldığımızda deneyel yöntemlerle sadece ayak tabanının altında oluşan kuvvet ve gerilme dağılımlarını elde edebiliyorken, sonlu elemanlar yöntemi ile ayağın içinde oluşan gerilme ve deformasyonları tahmin edebilmemiz mümkün olmuştur. Bu da örneğin ayağa gelen aşırı yükten dolayı ayağın içinde hangi bölümünde maksimum gerilme ve deformasyonların oluşacağını tahmin edebilmemizi sağlar.

Sonlu elemanlar modeli yöntemiyle yapılmış çalışmalarda hedeflenenleri şu şekilde sıralanabilir:

- Ayağın normal biyomekanik davranışını simüle etmek, ayak içinde yük taşıyan kemik, ligament, tendon gibi elemanların sağlıklı bir ayakta oluşturduğu gerilme ve deformasyonları saptamak. Bu çalışmalarda oluşturulan modelin doğruluğunu görebilmek için deneyel çalışmalardan faydalanılmıştır. (Şekil 5) Deneyel yöntem olarak kuvvet platformları kullanılan bir çalışmada, kuvvet platformlarından ve sonlu elemanlar modelinden elde edilen normal bası gerilmeleri değerleri karşılaştırılarak yaklaşık sonuçlarla gerçek sonuçlar arasındaki fark irdelenmiş, bu farkların kabul edilebilir tolarenslarda olduğuna karar verildikten sonra bu model ayağın vücut ağırlığını taşıdığı esnadaki statik durumunun simülasyonu için kullanılmıştır.(Cheung ve diğ., 2005)



Şekil 5:

(a) İnsan Ayağı yumuşak dokusunun SE modeli

(b) İnsan Ayağı kemik dokusunun SE modeli (Cheung ve ark.,2005)

- Ayak tabanı altında oluşan yüksek gerilme bölgelerinin elde edilmesi ve bu gerilmeleri diğer bölgelere yayarak daha homojen gerilme dağılımı sağlayan ayakkabı tabanlıkları tasarımlarının yapılması. Özellikle diyabet hastalarında ayak tabanında oluşan gerilmelerin yüksek değerlere ulaşması ayakta doku kaybına ve müdahale yapılmadığı takdirde ayağın kaybına dahi yol açabilmektedir. (Şekil 6) Deneme-yanılma yöntemi veya bazı deneysel çalışmalar sonucu elde edilen verilere dayalı olarak tabanlık tavsiye edilmesi çok sayıda farklı hasta karakteristiğinin olması yüzünden her zaman sağlıklı çözümler verememekte ve aynı zamanda bu çalışmalar uzun zaman almaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi sayesinde farklı geometri, malzeme ve kalınlıktaki tabanlıkların gerilmeleri azaltmadaki etkileri incelenmiştir.(Chen ve diğ.,2003, Cheung ve diğ.,2005, Erdemir ve diğ., 2005,Goske ve diğ., 2006)



Şekil 6:

*Diyabet hastalarında yüksek gerilme sonucu ülser oluşumu (Erdemir ve diğ., 2005)*

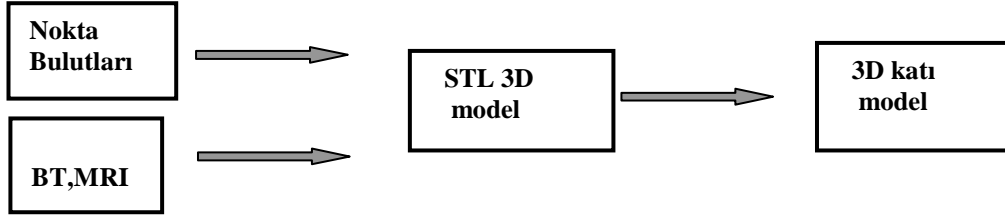
- Sonlu elemanlar modeline farklı sınır şartları uygulanarak çeşitli ayak anormallikleri ve hastalıklarının simule edilmesi ve bu sayede tedavi amaçlı önerilerin getirilmesi. (Cheung ve diğ., 2005, Wu, 2007)
- Statik analizlere ek olarak yürüyüş ve darbe gibi dinamik analizler yapılarak oluşan gerilme ve deformasyonları elde etmek.(Dai ve diğ., 2006, Bandak ve diğ., 2001,Chen ve diğ., 2001.)

#### 4.1. Sonlu Elemanlar Modelinin Oluşturulması

Eğer bir parçanın CAD (Bilgisayar Destekli Tasarım) datası elimizde yoksa veya parçanın geometrisinin karmaşıklığı dolayısıyla CAD yazılımları ile gerçeğe yakın bir şekilde parçayı modelleme imkanımız yoksa **tersine mühendislik yöntemini** kullanarak parçanın 3D (3 boyutlu) bir CAD kopyasını oluşturmak mümkün olmaktadır.

Bu yöntemde 2 farklı yol ile model oluşturma gerçekleştirilebilir.(Şekil 7) Bunlardan birisi dijitalleştirme yoluyla lazer veya temaslı (mekanik) tarayıcılar kullanarak cismin dış yüzeyine ait nokta bulutlarının elde edilmesi ve daha sonra nokta bulutlarından çeşitli yazılımlar kullanılarak STL formatında 3D modelin oluşturulmasıdır. STL (Stereolithography) her türlü 3D geometriyi birbirine bağlı üçgen şeklindeki yüzeylerle ifade eden bir formattır. STL formatındaki modelin katı modele dönüştürülmesi için yine çeşitli yazılımlar mevcuttur.

Diğer alternatif yol ise STL modelin elde edilmesinde, BT (Bilgisayar Destekli Tomografi) veya MRI (Manyetik Rezonans ile Görüntüleme) görüntülerinin kullanılmasıdır. BT ve MRI sayesinde cismin iç yapısına ait özellikler de elde edilebilir. Bu yolda modeli oluşturulacak parçanın veya cismin çekilen BT veya MRI görüntüleri kesit sınırlarının belirleneceği bir programa alınır, her bir görüntüdeki farklı bölgelerin (örneğin biyolojik cisimler için kemik ve yumuşak doku ) sınırları elde edilir. Daha sonra üst üste ötelenmiş bu sınırların çevresi adeta bir duvar gibi örülerek 3D STL modeli elde edilir. Ayağa ait BT ve MR'lar vasıtasıyla bu işlemler sonucu model oluşturmak mümkün olmaktadır.

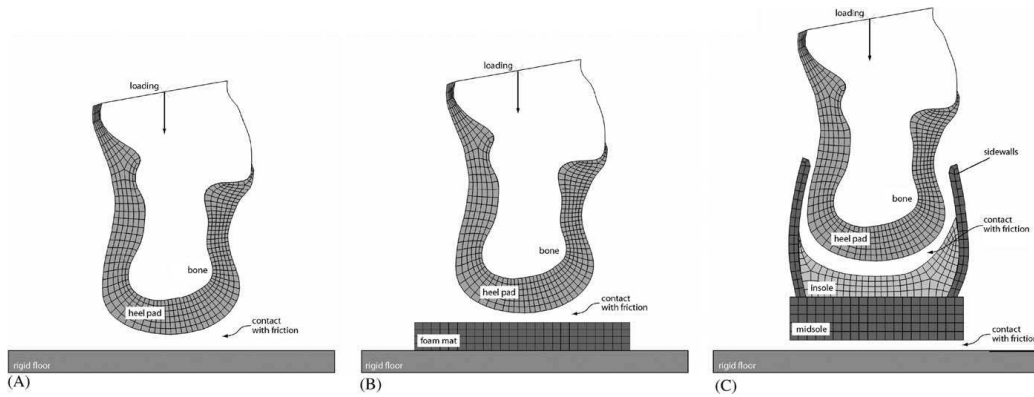


Şekil 7:  
İşlenmemiş datalardan katı model datasına geçiş

#### 4.2. Sonlu Elemanlar Yönteminde Karşılaşılabilecek Zorluklar

Sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan analizlerde elde edeceğimiz sonuçların gerçek sonuçlara yakın değerler olması için, analizde kullanacağımız modelin de olabildiğince gerçeğe yakın modellenmiş olması gerekmektedir. Elde edilen modelin geometrisi, kullanılan malzemenin doğru tanımlanması ve sınır şartlarının gerçeğe uygun olarak uygulanması, sonuçların gerçekliğini etkileyen önemli parametrelerdir.

Literatürdeki çalışmalarda sonlu elemanlar yöntemi ile oluşturulan modellerde model geometrisi ve kullanılan malzeme tanımlamalarında bazı basitleştirmelere gidilmiş ve kabuller yapılmıştır. Örneğin bazı çalışmalarda kemiklerin bir kısmı ayrı ayrı değil de bir bütün olarak modellenmiştir. (Chen ve diğ., 2001) Bazılarında da sadece incelenecek bölgeyi kapsayacak şekilde modelde basitleştirilmelere gidilmiştir. Bu duruma örnek olarak ayağın sadece ilgilenilen bölgeyi içerecek şekilde 2 boyutlu modelinin kullanılması verebilir. (Şekil 8) Ayakta yüksek gerilmelerin oluştuğu metatarsal kemikler, topuk kemiği, ve ayak tabanındaki yumuşak doku, çalışma konularını oluşturmaktadır. (Gefen, 2001, Lemmon ve diğ., 1997, Erdemir ve diğ., 2005, Goske ve diğ., 2006)



Şekil 8:  
Ayak topuğunu içeren 2D sonlu elemanlar modeli (Goske ve diğ., 2006)

Biyolojik cisimlerin malzeme özelliklerinin analiz programlarında doğru bir şekilde tanımlanması da yine önemli bir parametredir. Sonlu elemanlar analizi içeren bazı çalışmalarda ayakta bulunan biyolojik uzuvlar; kemik doku, yumuşak doku, ligamentler, tendonlar gerçekte lineer olmayan malzeme davranışı göstermelerine rağmen lineer elastik malzeme olarak modellenmişlerdir. (Chen ve diğ., 2001)

## 5. SONUÇ VE YORUMLAR

DeneySEL yöntemlerle ayak ve ayak eklemi biyomekaniğe ait çok çeşitli bilgiye ulaşabilmek mümkündür. Bunun yanında ayağın içinde oluşan gerilme ve deformasyon değerlerini deneysel yöntemlerle elde edebilmek mümkün olmamaktadır. İnsan ayağının bilgisayar ortamında üç boyutlu modellenmesi ve deneysel verilerin de yardımıyla, sonlu elemanlar yöntemi gerilme ve deformasyon de-

ğerlerinin hesaplanmasını sağlayarak deneysel yöntemi tamamlayıcı bir yöntem olarak kullanılmaktadır.

Biyomekanik dalında sonlu elemanlar yöntemi kullanan araştırmacıların sayısının artmasına paralel olarak bu alanda modelleme ve analizi kolaylaştıran yeni yazılımlar geliştirilmiş ve daha hızlı bir şekilde çalışmaların yürütülmesine fırsat doğmuştur.

## 6. KAYNAKLAR

1. Bandak, F.A., Tannous, R.E., Toridis, T. (2001) On the development of an osseo-ligamentous finite element model of the human ankle joint, *International Journal of Solids and Structures*, 38, 1681-1697.
2. Chen, W., Tang, F., Ju, C. (2001) Stres distribution of the foot during mid-stance to push-off in barefoot gait: a 3-D finite element analysis, *Clinical Biomechanics*, 16, 614-620.
3. Chen, W., Ju, C., Tang, F. (2003) Effects of total contact insoles on the plantar stress redistribution: a finite element analysis, *Clinical Biomechanics*, 18, 17-24.
4. Cheung, J.T., Zhang M., Leung A.K., Fan Y. (2005) Three-dimensional finite element analysis of the foot during standing- a material sensitivity study, *Journal of Biomechanics*, 38, 1045-1054.
5. Cumhur, M., Yener, N., Tuncel M. (2001) *Temel Anatomi*, Metu Pres, Ankara.
6. Dai, X., Li, Y., Zhang, M., Cheung, J.T. (2006) Effect of sock on biomechanical responses of foot during walking, *Clinical Biomechanics*, 21, 314-321.
7. Erdemir, A., Saucerman, J.J., Lemmon, D., Loppnow, B., Turso, B., Ulbrecht, J.S., Cavanagh, P.R. (2005) Local plantar pressure relief in therapeutic footwear: design guidelines from finite element models, *Journal of Biomechanics*, 38, 1798-1806.
8. Erdoğan, B., Tüzün Ş. (2001) Yaşlılarda Yürüme Kinematiği, *Turkish Journal of Geriatrics*, 4(1), 33-39.
9. Goske, S., Erdemir, A., Petre, M., Budhabhatti, S., Cavanagh, P.R. (2006) Reduction of plantar heel pressures : Insole design using finite element analysis, *Journal of Biomechanics*, 39, 2363-2370.
10. Lemmon, D., Shiang, T.Y., Hashmi, A., Ulbrecht, J., Cavanagh, P.R. (1997) The effect of insoles in therapeutic footwear- a finite element approach, *J. Biomechanics*, 30(6), 615-620.
11. Kaufman, K.R., Morrow, D., Hansen, D., Kitaoka, H.B. (2001) Technique for measurement of foot and ankle kinematics, *GCMAS Sacramento*.
12. Özkaya, N., Nordin, M. (1999) *Fundamentals of biomechanics*, Springer, New York.
13. Wu, L. (2007) Nonlinear finite element analysis for musculoskeletal biomechanics of medial and lateral plantar longitudinal arch of Virtual Chinese Human after plantar ligamentous structure failures, *Clinical Biomechanics*, 22, 221-229.
14. Yavuzer, G. (2007) The use of computerized Gait Analysis in the assesment of neuromusculoskeletal disorders, *Journal of Physical Medicine and Rehabilitation Sciences*, 10(2), 043-045.