

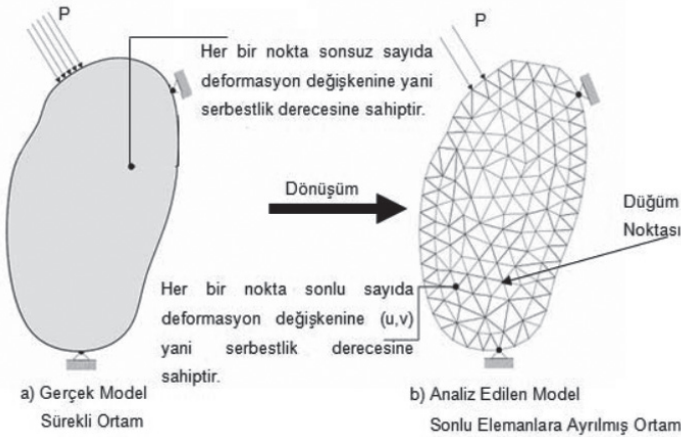
# BÖLÜM 10

## ORTOPEDİK ARAŞTIRMALARDA SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ

Yılmaz GÜVERCİN<sup>1</sup>

### GİRİŞ

Sonlu elemanlar yöntemi, mühendislik problemlerine yaklaşık çözümler elde etmek için kullanılan sayısal bir analiz tekniğidir. Bu yöntemin temel önermesi, bir çözüm bölgesinin analitik olarak modellenebileceği veya ayırık elemanlar topluluğu ile yaklaşık olarak modellenebileceğidir. Yıllar içinde birkaç çeşit sayısal analiz yöntemi geliştirilmiştir. Sonlu eleman modeli (en basit iki boyutlu eleman olan üçgeni kullanarak) bir bölgenin daha iyi bir yaklaşımını verir (Şekil 1). Ayrıca eğri sınır herhangi bir eğimin düz çizgileri ile temsil edildiğinden, sınır şekline daha iyi bir yaklaşım elde edilir. Sonlu elemanlar yönteminin özellikle karmaşık geometri problemler için çok uygun olduğunu ve artık sonlu elemanlar analizi kullanarak çok karmaşık gerilme problemlerine bile sayısal çözümlerin rutin olarak elde edilebileceğini göstermektedir (1).



Şekil 1. Sonlu elemanlar yöntemi (2)

<sup>1</sup> Uzm. Dr., SBÜ Trabzon Kanuni Eğitim ve Araştırma Hastanesi, Ortopedi ve Travmatoloji Kliniği, yilmaz\_guvercin61@hotmail.com

Sonlu elemanlar yöntemi tıp ve mühendislik biliminin koordineli çalışmaları sonucu tıp alanında geniş kullanım alanı bulmuştur. Sonlu elemanlar yöntemi ile ortopedi implant tasarım, geliştirme, ortopedik hastalıkların tedavi metodlarını değerlendirme, tedavi sonuçlarını modifiye etme gibi birçok değişken değerlendirilir. Maliyeti düşük, klinik ya da deneysel çalışmalardan kısa sürede yapılması önemli avantajlarıdır. Bu makalenin amacı okuyucuya ortopedide sonlu eleman yöntemi kullanım alanlarını ana hatlarıyla anlatmak ve okuyucunun sonlu elemanlar yöntemini tanımasıdır.

## **YÖNTEMİN TARİHÇESİ**

Sonlu elemanlar yöntemi ilk olarak 1960 yılında Clough tarafından düzlem elastikiyet problemleri üzerine bir makalede kullanıldığında ortaya çıkmış olsa da, sonlu eleman analizi fikirleri çok daha eskilere dayanmaktadır (3). Üçgen alanlar üzerinde tanımlanan parçalı sürekli fonksiyonları kullanmaya yönelik ilk çabalar, uygulamalı matematik literatüründe 1943'te Courant'ın çalışmasıyla ortaya çıktı. Courant, alt bölgeler üzerinde doğrusal yaklaşım kullanarak bir fonksiyonun değerlerle minimizasyonu fikrini geliştirdi (4). Hrenikoff, süreklilik yapısının elemanlara veya yalnızca sınırlı sayıda düğüm noktasında birbirine bağlı yapısal bölümlere (kirişler) bölüneceğini varsayarak bu zorluğun üstesinden gelinebileceğini düşündü. Hrenikoff'un "çerçeve yöntemini" uygulama girişimleri başarılı oldu ve böylece mühendislik camiasında sonlu eleman tekniklerine tohum filizlenmeye başladı (5).

Hrenikoff'tan kısa bir süre sonra, McHenry ve Newmark bu ayrıklaştırma fikirlerinin daha da geliştirilmesini teklif ederken, Kron ayrık sistemlerin topolojik özelliklerini inceledi (6-9). Argyris ve ekibi, doğrusal yapısal analizi ve otomatik dijital hesaplama çok uygun verimli çözüm tekniklerini kapsamlı bir şekilde kapsayan bir dizi makale yayınladılar (10-14). Düzlem gerilme problemlerinin gerçek çözümü, özellikleri elastikiyet teorisinin denklemlerinden belirlenen üçgen elemanlar vasıtasıyla ilk kez Turner ve ark.nın 1956 tarihli makalesinde verilmiştir (15). Bu araştırmacılar, sonlu eleman özelliklerini belirlemek için günümüzde doğrudan rijitlik yöntemi olarak bilinen yöntemi ilk ortaya koyanlardı. Onların çalışmaları, o dönemde dijital bilgisayarın ortaya çıkmasıyla birlikte, karmaşık düzlem elastikiyet problemlerinin çözümüne giden yolu açtı. 1960 yılında Clough tarafından düzlem elastisite probleminin daha fazla ele alınmasından sonra, mühendisler sonlu elemanlar yönteminin önemini fark etmeye başladılar (3). 1965 yılında, Zienkiewicz ve Cheung, değişken forma dönüştürülebilen tüm alan problemlerine uygulanabilir olduğunu bildirdiğinde, sonlu elemanlar yöntemi daha da geniş bir yorum aldı (16). 1960'dan bu yana sonlu elemanlar yöntemi

mühendislikte yaygın olarak kabul görmüştür. Konuyla ilgili birçok farklı alanda binlerce makale, yüzlerce konferans ve birçok kitap yayınlandı (17-23).

Biomekanik alanında sonlu eleman çalışmalarına 1970'li yıllarda başlanmıştır. Mühendislik ve tıbbın uyumlu çalışmaları sonucunda son yıllarda önemli ilerlemeler ile karşımıza çıkmaktadır. Şöyle ki Pubmed arama motoruna 'finite element model' yazıldığında bulunan makalelerin yaklaşık %70'i son 10 yılda yapılmış, yaklaşık yarısının ise son 5 yılda yapılmış olduğunu görmekteyiz. Bilgisayar teknolojisinin ilerlemesiyle sonlu elemanlar yöntemi (SEY) problemlerin çözümünde güncel ve etkin olmaya devam edecektir.

## **SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ NASIL ÇALIŞIR?**

Sonlu elemanlar bir sürekliliği bir madde kütlesi (katı, sıvı veya gaz) veya sadece bir uzay bölgesi olacak şekilde bölerek ve bilinmeyen alan değişkenini terimlerle ifade ederek sorunu azaltır. Düğümler genellikle bitişik elemanların bağlandığı eleman sınırlarında bulunur. Sınır düğümlerine ek olarak, bir elemanın birkaç iç düğümü de olabilir. Bir problemin sonlu eleman temsili için alan değişkeninin düğüm değerleri bilinmeyenler haline gelir. Bu bilinmeyenler bulunduğu, enterpolasyon fonksiyonları, elemanların birleştirilmesi boyunca alan değişkenini tanımlar. Sonlu elemanlar yöntemini diğer sayısal yöntemlerden ayıran önemli bir özelliği, tüm problemi temsil etmek için onları bir araya getirmeden önce tek tek elemanlar için çözümler formüle etme yeteneğidir. Bunun anlamı, eğer gerilme analizinde bir problemi ele alıyorsak, her bir elemanın kuvvet-yer değiştirme veya rijitlik özelliklerini buluruz ve ardından tüm yapının rijitliğini bulmak için elemanları birleştiririz. Özünde, karmaşık bir problem, büyük ölçüde basitleştirilmiş bir dizi probleme indirgenir. Sonlu elemanlar yönteminin bir başka avantajı, bireysel elemanların özelliklerini formüle etmenin yollarının çeşitliliğidir. Temelde üç farklı yaklaşım vardır. Doğrudan yaklaşım, varyasyon yaklaşımı ve ağırlıklı artıklar yaklaşımıdır (1).

Sonlu elemanlar yönteminin nasıl çalıştığını genel olarak özetlemek gerekirse, adımlar şunlardır: İlk adım, sürekliliği veya çözüm bölgesini elemanlara bölmektir. Sonraki adım, her elemana düğüm atamak ve ardından alan değişkeninin eleman üzerindeki varyasyonunu temsil edecek enterpolasyon fonksiyonunu seçmektir. Daha sonra eleman özelliklerini bulma yani elemanlar ve enterpolasyon fonksiyonları seçildikten sonra, bireysel elemanların özelliklerini ifade eden matris denklemlerinin belirlenmesi. Bunun için üç yaklaşımdan birini kullanabiliriz: doğrudan yaklaşım, değişken yaklaşım veya ağırlıklı artıklar yaklaşımı. Modelenen genel sistemin özelliklerini bulmak için tüm eleman özelliklerini "birleştirmemiz" gerekir. Başka bir deyişle, elemanların davranışını ifade eden matris

denklemlerini birleştirir ve tüm sistemin davranışını ifade eden matris denklemlerini oluştururuz. Sınır koşullarını belirler ve bağımlı değişkenlerin veya düğüm yüklerinin bilinen düğüm değerleri uygulanır ve bir dizi lineer veya lineer olmayan adi diferansiyel denklemi çözmemiz gerekir (1).

## **UYGULAMA ALANI**

Sonlu elemanlar yönteminin uygulamaları, çözülecek problemin doğasına bağlı olarak üç kategoriye ayrılır. Birinci kategoride denge problemleri veya zamandan bağımsız problemler olarak bilinen problemler yer almaktadır. Sonlu elemanlar yönteminin uygulamalarının çoğu bu kategoriye girer, katı mekanik alanındaki denge problemlerinin çözümü için, belirli bir mekanik veya termal yükleme için yer değiştirme dağılımını ve gerilme dağılımını bulmamız gerekir. Benzer şekilde, akışkanlar mekaniğindeki denge problemlerinin çözümü için, kararlı hal koşulları altında basınç, hız, sıcaklık ve yoğunluk dağılımlarını bulmamız gerekir.

İkinci kategoride katı ve akışkanlar mekaniğinin öz değer problemleri vardır. Bunlar, çözümü genellikle katıların ve sıvıların doğal frekanslarının ve titreşim modlarının belirlenmesini gerektiren kararlı hal problemleridir. Hem katı hem de akışkanlar mekaniğini içeren öz değer problemlerinin örnekleri, göller ve barajların etkileşimi göz önüne alındığında inşaat mühendisliğinde ve esnek tanklarda sıvı yakıtların çalkalanması söz konusu olduğunda uzay mühendisliğinde ortaya çıkmaktadır. Öz değer problemlerinin başka bir sınıfı, yapıların kararlılığını ve laminer akışların kararlılığını içerir.

Üçüncü kategori, sürekli ortam mekaniğinin zamana bağlı veya yayılma problemlerinin çokluğudur. Bu kategori, ilk iki kategorideki problemlere zaman boyutu eklendiğinde ortaya çıkan problemlerden oluşmaktadır. Hemen hemen her mühendislik dalı, sonlu elemanlar yönteminin potansiyel bir kullanıcısıdır. Ancak bu yöntemin belirli bir sorunu çözmek için kullanılabilmesi, en pratik çözüm tekniği olduğu anlamına gelmez. Genellikle birkaçı çekicidir ancak inşaat, mekanik ve havacılık mühendisleri yöntemin en sık kullanıcılarıdır. Yapısal analize ek olarak, diğer uygulama alanları arasında ısı transferi, akışkanlar mekaniği, elektromanyetizma, biyomekanik, jeomekanik ve akustik yer alır. Yöntem, iki veya daha fazla disiplin arasında bir bağlantının olduğu multidisipliner problemlerde kabul görmektedir. Örnekler, ısı transferi ve yer değiştirmeler arasında doğal bir bağlantının olduğu termal yapıları ve ayrıca dış akış ile kanadın arasında güçlü bir bağlantının olduğu elastisiteyi içerir. Mühendislik ve tıp alanını birleştiren biyomekanik problemlerin çözümünde de etkin bir yöntemdir. Belirli bir sorunu çözmek için teknikler mevcuttur. Her tekniğin kendi göreceli değerleri vardır ve

hiçbir teknik, tüm problemler için “en iyi” olma ayrıcalığına sahip değildir. Sonlu elemanlar yönteminin olası uygulama yelpazesi tüm mühendislik disiplinlerini kapsar.

Sonlu elemanlar yönteminin tarihine kısa bir bakış, bize erken gelişiminin düzensiz olduğunu gösteriyor. Matematikçiler, fizikçiler ve mühendisler, son yıllarda tıpçılar hepsi sonlu eleman kavramlarıyla uğraştı, ancak ilk başta potansiyel uygulamaların çeşitliliğini ve çokluğunu fark etmediler. 1960’dan sonra bu durum değişti ve gelişme temposu arttı. 1972’de sonlu elemanlar yöntemi, sürekli ortam problemlerinin sayısal çözümünde en aktif ilgi alanı haline geldi ve bugün baskın yöntem olmaya devam ediyor. Sonlu elemanlar yönteminin gücünün bir kısmı, diğer yöntemlerle birlikte ve birçok alanda kullanılabilmesidir.

## **SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİNİN ORTOPEDİDE KULLANIMI**

Son yıllarda SEY ortopedik implant geliştirmede, kemik deformitelerin değerlendirilmesinde, kas-tendon hastalıklarında, bağları ilgilendiren hastalıklarda, kemik tümörleri gibi birçok ortopedik hastalığın değerlendirilmesinde ve tedavilerinin geliştirilmesinde kullanılmaktadır. Ayrıca ortopedik eğitimlerde, ameliyat öncesi planlamalarda kullanılabilir. SEY birçok yönüyle deneysel ve klinik çalışmalardan avantajlıdır. Çünkü hayvan deneyleri veya insan çalışmaları artık pahalı ve etik yönden çok irdelenmektedir. SEY daha ucuzdur ve bir problem hakkında çok varyasyonlu, daha detaylı araştırma olanağı sağlamaktadır (17).

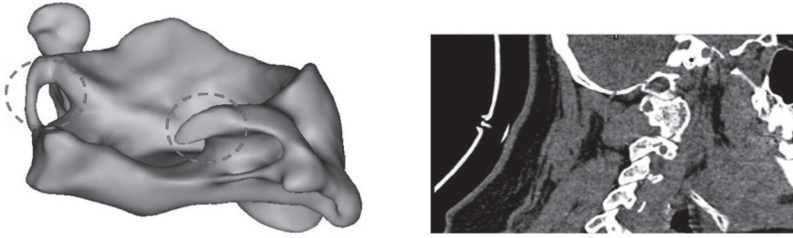
Bir ortopedik problemin çözümü için fazla varyasyonun yapılabilmesi, canlı hayvan veya kadavra kullanımına ihtiyaç duymaması, deneysel çalışmalara göre ucuz olması, etik yönden daha uygun olması, 3 boyutlu insan radyografilerinin kullanımı ile gerçeğe yakın sonuçlar elde edilebilmesi, çalışmanın tekrar edilebilmesi, invaziv çalışmalara göre daha az zaman harcanması, canlı hayvan telef edilmemesi, statik veya dinamik çalışmalar yapılabilmesi avantajlarıdır. Dezavantajları görüntülerin ince kesit olması gerekliliği, birkaç bilgisayar programına ihtiyaç duyulması, bu programları bilen biyomekanik mühendisine ihtiyaç duyulması sayılabilir. SEY analiz çalışmalarında en önemli durum çalışmada çıkan analiz sonuçlarının yorumlanmasını konu hakkında tecrübeli kişilerin yapması gerekliliğidir.

## **ORTOPEDİDE SONLU ELEMANLAR YÖNTEM ÇALIŞMASI AŞAMALARI**

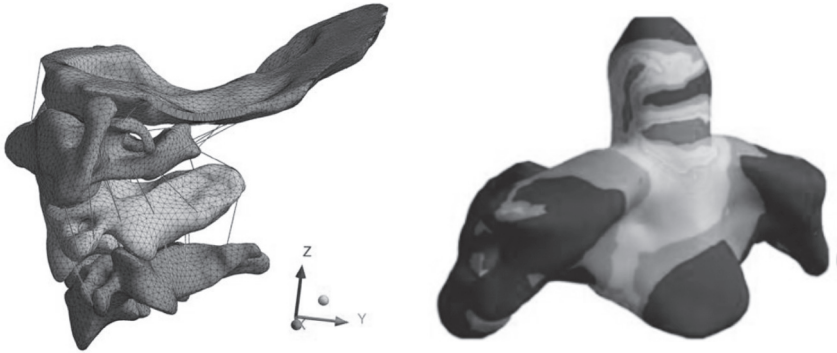
Sonlu eleman yöntem çalışması için önce problemin teorik olarak tasarlanması gereklidir. Ardından problemin olduğu ekstremitenin tomografi

veya manyetik rezonans görüntüsü alınır. Alınan görüntü üç boyutlu olmalıdır. Görüntülerin ince kesit alınması avantajdır. DICOM formundaki görüntülerden oluşan veriler daha sonra yapıların geometrisini yeniden oluşturmak için görüntü işleme programına (Mimics, 3D-Doctor, vd.) aktarılır ve görüntüler bölümlere ayrılır.

Bölgelere ayrılan bu bileşenler, her yapı için katı modeller oluşturmak üzere katı model programı (SolidWorks-, 3-Matic,Catia, vd.) kullanılarak işlenir (Şekil 2). Oluşturulan tüm katı geometrik modelleri SEY dayanan paket programa (ANSYS, ABAQUS, vd.) aktarılır ve analizler yapılır (Şekil 3).



Şekil 2. Tomografi görüntüsü alınması ve katı model elde edilmesi (17)



Şekil 3. Sonlu elemanlar görüntüsü (17)

## SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE NE DEĞERLENDİRİLEBİLİR?

Ortopedide SEY analizi kemik ve yumuşak dokuların değerlendirmesinde kullanılır. Kemik doku kırıkları, kırık tedavisi, implant kullanımı, implant tasarımı, ligaman yaralanma mekanizması, ligaman yaralanma tedavisi, kemik deformiteleri gibi birçok ortopedik durumlarda SEY analizi kullanılabilir (26-32).

Kemik kırıkları sık görülen ortopedik yaralanmalardır. Cerrahi veya konservatif tedavi seçenekleri vardır. Tedaviden sonra kaynamama, yanlış kaynama, gecik-

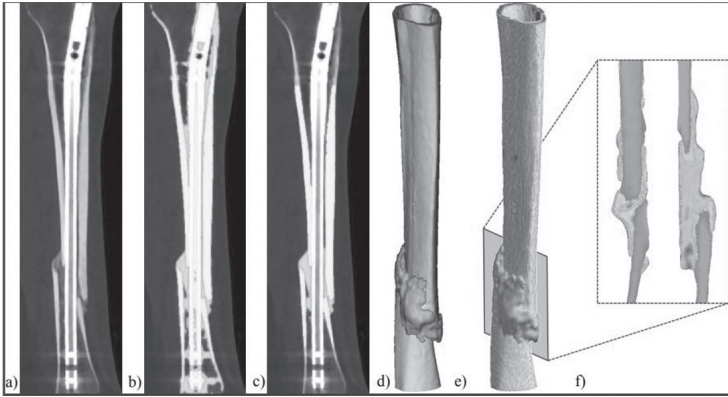
miş kaynama, enfeksiyon, pıhtı oluşumu gibi komplikasyonlar görünebilir. Uzun kemik kırıklarından sonra kaynamama oranı yaklaşık %2 oranında görünür. Kaynamama risk faktörleri net olmamakla birlikte kırık mekanizmasına, kemiğe uygulanan enerjiye, tespite bağlı olabilir (33). Yukarda sayılan durumlar hastaya ek cerrahi girişim gerektirebileceği gibi toplumlara önemli ekonomik yük getirir. Yapılan çalışmalarda orta derece kompresyon ve stabilizasyon ile birçok kırığın kanlanması dolayısıyla kaynaması uyarılabileceği, tersi durumlarda kaynamanın gecikebileceği veya olmayacağı gösterilmiştir. Parçalı kırıklarda parçaların hareketleri, uygun olmayan dizilim gibi nedenler kaymanın kalitesini etkileyebilecek faktörlerdendir (25).

Sonlu eleman çalışmaları ile kırık ve tedavi özellikleri çok yönlü ele alınmaktadır. SEY'de kemikteki veya implanttaki yer değiştirme ve gerilme hesaplanır. Yapılan bu hesaplamalar normal kemik doku ile kıyaslanır ve yorumlanır. Bu değerler deneysel yöntemler veya klinik çalışmalarla bulunamayan benzersiz özelliklerdir. Güvercin Y. ve ark. yaptıkları SEY çalışmasında boyun hareketleri ve boyna uygulanacak kuvvetler ile odontoid kırığı ilişkisini araştırdılar. İnsan boynunun karmaşık yapısından dolayı bu çalışma kadavra ile veya klinik çalışma olarak yapılması çok zordu ve literatürde bu durum belirtilmektedir. Bu çalışmada ayrıca ponticulus ponticus varyasyonlu vertebrada odontoide ve transvers atlantal ligamana binen yükler de hesaplandı. Yazarlar bu çalışmada iki önemli sonuca ulaştılar. Birincisi ponticulus posticus varyantı olan insanlarda odontoid kırığının daha kolay gerçekleşebileceği, ikincisi rotasyon hareketlerinin odontoid üzerinde daha fazla gerilme ve yer değiştirmeye neden olabileceğini bildirdiler. Çalışma üç ayrı kişinin BT görüntüleri kullanılarak sanal ortamda gerçekleştirildi ve klinik çalışmalara yol gösterici çok önemli sonuçlara ulaştı (17). Yukarda da bahsedildiği gibi SEY analizleri yapıldıktan sonra yorumlama gerektirmektedir. Yazarlar bu makalelerinin sonucu olarak yaşlı kişilerde (ponticulus posticus varyasyonu yaşlılarda çok görülür) boyuna gelen travmalarda transvers atlantal ligaman yırtığından çok tip 2 odontoid kırığı riskinin fazla olduğunu, bu travmanın rotasyon hareketi ile olmasının kırık riskini arttırdığını bildirdiler.

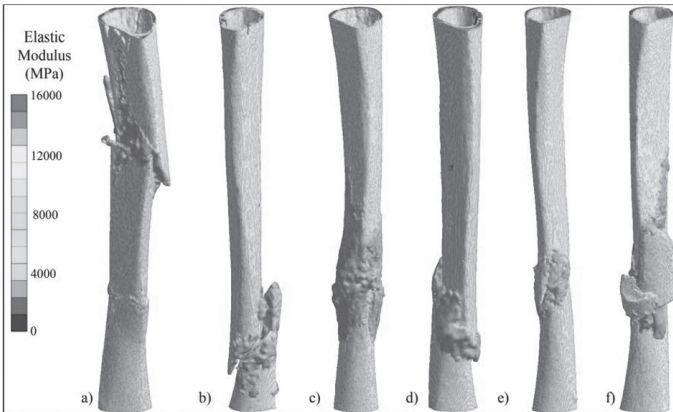
Ortopedide kemik kırıkları ve kullanılan implantlar ile ilgili birçok çalışma literatürde bulunmaktadır. Çünkü kemik kırılması, kaynamaması, yanlış kaynaması önemli problemlerdir ve ek cerrahi gerektirir. Sonuçta uzun süre sakat kalmaya neden olurlar ve önemli ekonomik yük getirirler (24). Yapılan çalışmalarda orta derece kompresyon ve stabilizasyon ile birçok kırığın kanlanmasını ve dolayısıyla kaynamasının uyarılabileceği, tersi durumlarda kaynamanın gecikebileceği veya kaynamanın olmayacağı gösterilmiştir. Parçalı kırıklarda parçaların hareketleri, uygun olmayan dizilim gibi nedenler kaymanın kalitesini etkileyebilecek faktör-

lerdendir (25). SEY'de kemikteki veya implanttaki yer değiştirme ve gerilme hesaplanır. Bu değerler deneysel yöntemler veya klinik çalışmalarla bulunamayan benzersiz özelliklerdir.

Schwarzenberg P. ve ark. yaptıkları çalışmada SEY kullanarak kırık kaynamasını değerlendirdiler. Yazarlar 19 kırık tibia'yı ameliyattan 12 hafta sonra bilgisayarlı tomografi ile taradılar. Burulma testi simülasyonu yaptılar ve sınır koşullarını belirlediler. Yazarlar ameliyattan 12 hafta sonra hastaların %75'inden fazlasında, %85 veya üzerinde kırık kemiğe göre burulma sertliği buldular. Yazarlar burulma sertliğinin kırık kaynaması ile anlamlı şekilde korele olabileceğini, fakat oluşan kallusun kaynama sertliği ile anlamlı şekilde korele olamayacağını bildirdiler (Şekil 4,5,6). Bu makaleden anlaşılacağı gibi kırık kaynamasında kallustan bağımsız kaynama oranı SEY analizi kullanılarak ölçülebilmekte, kaynamama durumları hakkında bilgi sahibi olunabilmektedir (33).

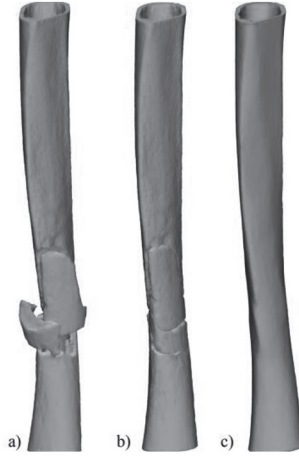


Şekil 4. Sonlu elemanlar görüntüsü (33)



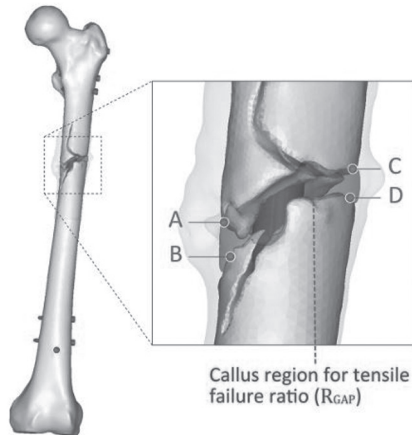
Şekil 5. Elastisite modülü görüntüsü (33)



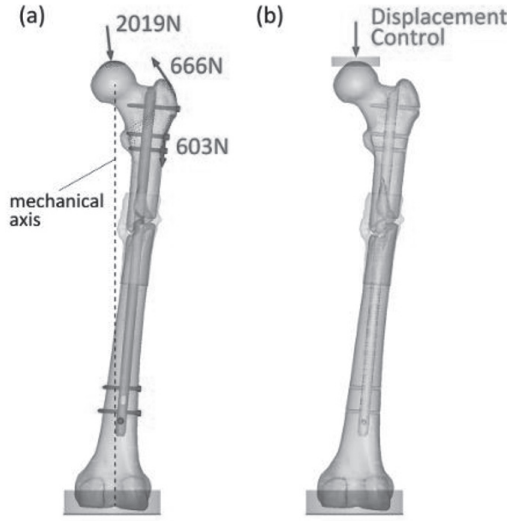


Şekil 6. Sonlu elemanlar sonuç görüntüsü (33)

Kırık kaynamasında SEY kullanımına başka bir örnek verecek olursak Mimata H. ve ark.'nın yaptığı çalışmayı verebiliriz. Bilindiği gibi uzun kemik kırıklarında uygulanan kemik içi çivilemede hastaların takipleri nicel olarak yapılmakta, süre bağımlı yük vermeye ve kemik içi tespitin çıkartılmasına izin verilmektedir. Yazarlar çalışmalarında SEY kullanarak kantitatif ölçümler yaparak kaynamayı değerlendirdiler. Ameliyat sonrası 6,12, ve 15. ayda çektiydikleri Bilgisayarlı Tomografi (BT) görüntülerini kullanarak yaptıkları SEY çalışmasında çekme kopma oranı, çekme kopma riski ve kallus hacmini değerlendirdiler (Şekil 7,8). Yazarlar bu çalışma ile BT tabanlı SEY analizi ile kemik iyileşme sürecini mekanik olarak değerlendirir, kaynamama hakkında bilgi verebilir, revizyon kararında bize yol gösterebilir ve kemik içi tespitin çıkartılma zamanını tahmin edebileceğini bildirdiler (34).



Şekil 7. Katı model görüntüsü (34)

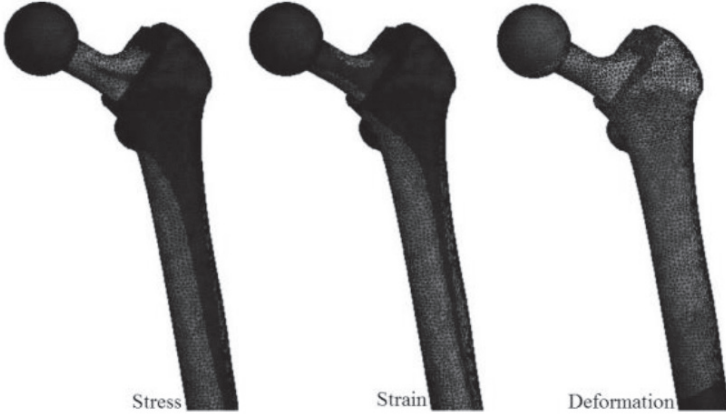


Şekil 8. Sınır şartları görüntüsü (34)

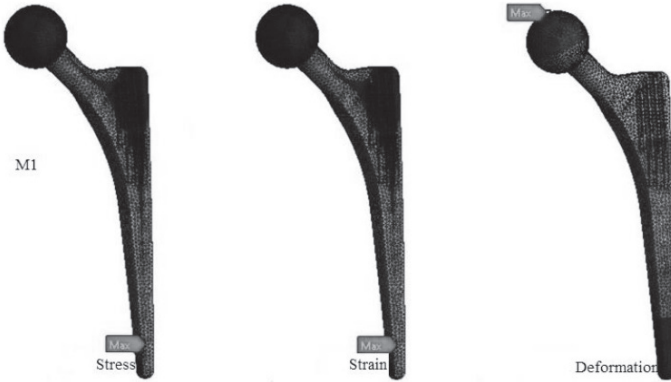
SEY analizi ile kemik kaynaması değerlendirebildiği gibi hasta spesifik görüntüler ile kaynamama da değerlendirilebilir. Doi K. ve ark. yaptıkları SEY çalışmasında kavisli periasetabuler osteotomi yapılan 18 kalçanın ameliyat öncesi ve sonrası tomografi görüntülerini incelediler. Periasetabuler osteotomi öncesi ve sonrası kalça temas alanı, temas basıncı ve iskiyal ramustaki gerilme değerlendirildi. Sonuç olarak kaynamayan modelde iskiyal ramusta gerilme arttı ve buna bağlı olarak periasetabuler osteotomide iskiyal ramusta gerilme kırığına dikkat etmek gerektiği bildirildi (35).

Ortopedi ve biyomekanik mühendisliği bilimleri implant tasarım ve geliştirmede birlikte çalışabilmekte ve bu koordinasyon sonucunda kırık kaynamasından protez fonksiyonunun iyileşmesine kadar çok başarılı kullanılabilen malzeme geliştirilebilmektedir. Tasarım yapılırken planlamadan sonra ilk SEY analizleri yapılmaktadır. SEY İlk olarak total kalça protez tasarımında kullanılmış ve kötü dizaynli modelleri elemiştir. Bu yöntem ile temel model geliştirilmesi, malzeme özelliklerinin analizi, sınır koşullarının belirlenmesi, implantın kemik üzerindeki hareketi, zamana bağlı implant-kemik ara yüzünde hareket gibi birçok özellik ölçülmektedir. Yöntemin bir avantajı da bilgisayar üzerinde canlı dokulara zarar vermeden analizlerin yapılmasıdır. Dokuların biyolojik özelliklerinin belirlenmemesi yöntemin dezavantajı olarak bilinmektedir (36).

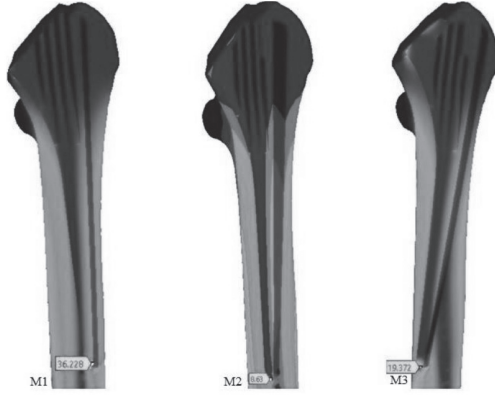
Güvercin Y. ve ark. yaptıkları çalışmada kare kesit total kalça protezinin kemikteki mekanik davranışlarını incelediler ve klinik kullanımı ile karşılaştırdılar. Örnek olarak CLS spotorno stem seçilmiş ve belli yük altında çeşitli stem pozisyonlarında hem femurun hem de stemin mekanik davranışları incelendi. Yazarlar femoral stemin varus pozisyonunda femura daha fazla yük bindirebileceğini, nötral yerleşim dışındaki pozisyonlarda metafizde osteolize neden olabileceğini ve femoral stemin distaline doğru gittikçe gerilme ve deformasyonun arttığını bildirdiler (Şekil 9,10,11). Makaleden de anlaşıldığı gibi yeni nesil protez dizaynında kemikte ve protezde oluşabilecek mekanik değişiklikler sanal olarak ölçülebilmekte ve protez geliştirmede katkısı olmaktadır (19).



Şekil 9. Sonlu elemanlar sonuç görüntüsü (19)



Şekil 10. Sonlu elemanlar sonuç görüntüsü (19)



Şekil 11. Sonlu elemanlar sonuç görüntüsü (19)

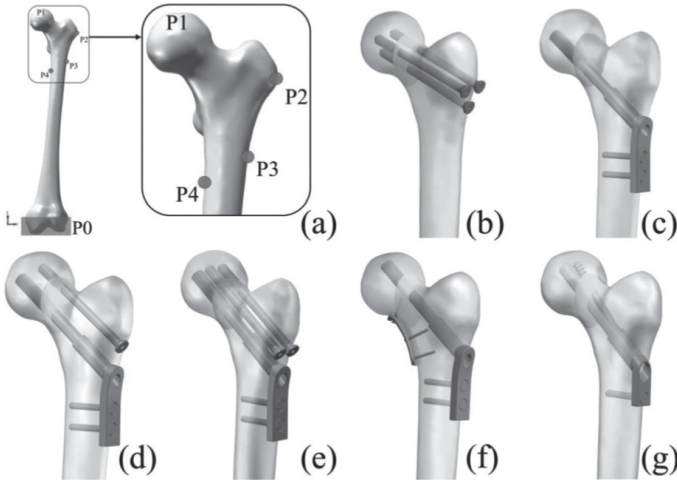
Femur boyun kırıkları ortopedistlerin çok karşılaştıkları yaralanmalardır ve %20-30 oranında kaynamama, yanlış kaynama, avasküler nekroz gibi komplikasyonlara neden olmaktadır. Bu kırıkların tedavisinde kullanılacak implant tasarımları hala tartışılmaktadır ve konu hakkında çok sayıda SEY makalesi vardır. Örneğin Wei Z. ve ark. yaptıkları SEY çalışmasında fizyolojik yükleme koşulları altında Pauwels tip III kırık modelinde birkaç implantın kullanımını biyomekanik olarak incelediler. Çalışmanın sonucunda PFNA'nın implant başarısızlığının önlenmesi, kemik erimesinde azaltma gibi biyomekanik avantajlar gösterdiği ve medial plak kullanmanın implantların başarısızlık riskini azalttığını bildirdiler (37).

Literatür incelendiğinde SEY analizlerinin daha çok ortopedik travmaların araştırılmasında kullanıldığı görülmektedir. Yukarıda örneği verilen femur boyun kırığı modelinde farklı implant kullanımının sonuçları bildirildiği gibi aynı implantın kırıkta oluşturabileceği iyi veya kötü durumlar değişik modifikasyonlar ile incelenebilmektedir. Zhang RY. ve ark. yaptıkları SEY analiz çalışmasında femur boyun kırıkları tedavisinde çok kullanılan kanüllü vidaların yerleşim yerinin tedavi sonuçlarına etkisini incelediler. Pauwels tip III kırık modelinde eğik üçgen şeklinde femur boynuna gönderilen vidalar ile klasik üçgen şeklinde femur boynuna gönderilen vidaları karşılaştırdılar. Yazarlar kırık hattında gerilme ve yer değiştirmeyi femur boynunda geniş alana sahip vidalar ile daha az buldular. Bu bulgular ışığında femur boyun kırıklarında vidaların geniş alanda gönderilmesi kırığı daha iyi stabilize edecektir. SEY analizlerinde bulguların yorumlanması gereklidir ve bunu konu hakkında tecrübeli kişilerin yapması gereklidir. Yukardaki örnekte yorum yapacak olursak geniş alanda femur boynuna gönderilen vidalar kırık kaynamasını artırabilir ve femur boynunun kılmasını engelleyebilir sonucunu çıkartabiliriz (38).

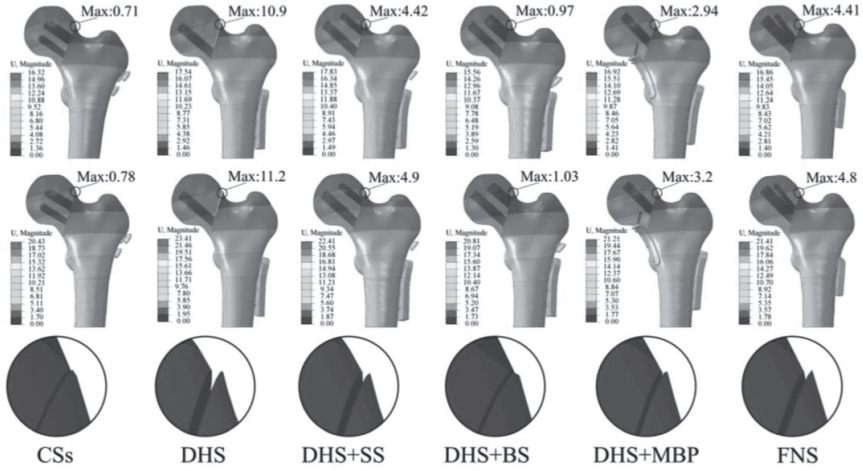
İnsan yaşlandıkça kemik yapısı değişir ve kemiklerde osteoporoz gelişir. Bu durum kemik kırılabilirliğini artırır. Yüksek çözünürlüklü bilgisayarlı tomografi

ile kemik yapısı iyi analiz edilebilir ve çeşitli bilgisayar programları ile dış ortama aktarılıp SEY analizi yapılabilir. Kang S. ve ark. yaptıkları SEY çalışmasında osteoporozlu hastaların bel omurlarında fizyolojik yükü analiz ettiler. Yazarlar bel omurlarının üç eksende fizyolojik yüklenme koşullarında osteoporozlu ve osteoporozsuz kişilerin Von Mises gerilmesine baktılar. Sonuç olarak üç yüklenme koşulunda lomber bölge üzerinde Von Mises gerilmesinin osteoporozlu omurgada daha fazla olduğunu bildirdiler. Bu çalışmadan da anlaşılacağı gibi SEY analizleri ile osteoporoz ve kırık ilişkisi değerlendirilebilir (39).

SEY analizleri ile vücudun dinamik hareketleri incelenebilir. Bu amaçla yürüme, zıplama, koşma gibi hareketler canlandırılabilir ve gerçeğe yakın sonuçlar elde edilebilir. Dinamik hareket esnasında eklemlere binen yük, eklemlerde yer değiştirme ve yorulma gibi testler yapılabilir. Ayrıca ardışık dinamik yük verilerek belli süre ile yürüme koşma tasarlanabilir. Bu süre sonunda kırık hattında oluşan değişiklikler ölçülebilir. Jiang X. ve ark. yaptıkları biyomekanik çalışmada femur boyun kırıklarının tedavisinde farklı fiksasyon metodlarını karşılaştırdılar. Yazarlar Pauwels tip III kırık modelinde 6 farklı fiksasyon yöntemini yürüme ve merdiven çıkma şartlarını kullanarak karşılaştırdılar. Yapılan bu detaylı analizden sonra sadece kanüllü vida kullanan grup ve 2 adet antirotasyon vidalı dinamik kalça vidası ile tespit yapılan grupta kırık hattında yer değiştirme minimal düzeyde bulundu. Bu durum femur boyun kırıklarında zaten çok kullanılan kanüllü vidanın kırık hattını en iyi stabilize etmesini bir kez daha doğrular iken, alternatif olarak çift antirotasyon vidalı dinamik kalça vidası kullanmanın uygunluğunu göstermektedir. Bu çalışmada ilginç olarak en kötü sonuçları olan tespit yöntemi dinamik kalça vidasının yalnız kullanılması bulundu (Şekil 12,13) (40).

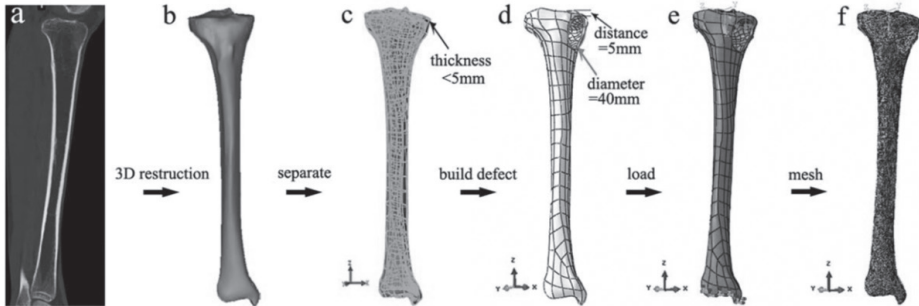


Şekil 12. Katı model görüntüsü (40)

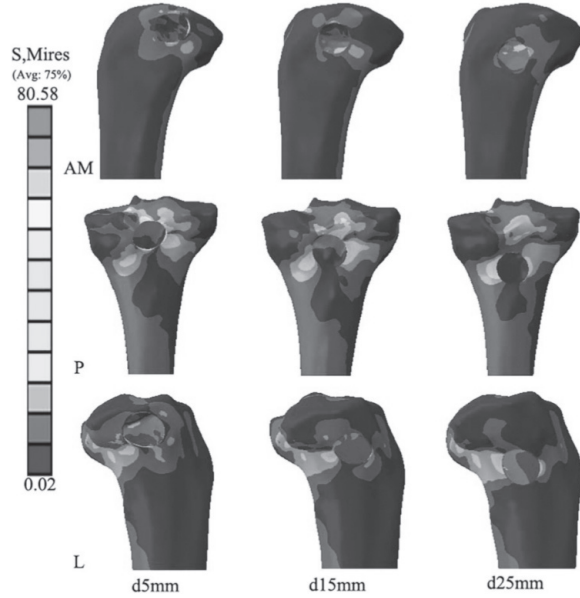


Şekil 13. Sonlu elemanlar sonuç görüntüsü (40)

Kemiklerde primer veya metastatik tümörlere bağlı deformiteler veya kırıklar meydana gelebilir. Tümörlerde SEY analizleri daha çok kemik kırılabilirliğini, risk faktörlerini değerlendirmek için, kemik kırılabilirliğini önlemek için ve kemik tümörlerinde kullanılacak protezi geliştirmek için yapılmaktadır. Örneğin Lin Y. ve ark. tibia üst ucunda oluşabilecek kemik tümörünün kırılabilirliğini araştırdılar. Bunun için sağlam tibia tomografisini dış ortama aktardılar ve sanal ortamda tibia üst ucunda lezyon oluşturdular. Tibia üst ucundaki sanal kitleler ön iç, dış ve arka duvarda 2,3,4,5 cm çapında kortikal kemikte pencere oluşturacak şekilde tasarlandı. Modele yürüme koşullarını tanımlayan yük uygulandı. Sonuç olarak Von Mises gerilmesi her koşulda sağlam modele göre fazla bulundu, 3cm ve daha büyük çaplı modellerde kırılma riski olduğu bildirildi. Duvar özelliklerine bakıldığında ön iç duvarın diğer duvarlara kıyasla kırılmaya daha çok direndiği belirtildi (Şekil 14,15) (41).



Şekil 14. Sonlu elemanlar işlem adımları görüntüsü (41)



Şekil 15. Sonlu elemanlar sonuç görüntüsü (41)

Osteoartrit yaşa bağımlı artışı olan dünyada en yaygın eklem hastalığıdır. SEY çalışmaları osteoartritin etiolojisini açıklamak için yapılabileceği gibi osteoartritte tedavi seçeneklerinin mekanik incelemesi içinde uygun çalışmalardır. Shu L. ve ark. yaptıkları çalışmada sağlam diz eklemine dinamik özelliklerini incelediler ve diz osteoartrit tedavisine katkı sağlamaya çalıştılar. Yazarlar SEY analizi ile diz modeli geliştirdi ve yürüme döngüsü sırasında diz eklemine kinematiklerini incelediler. Yazarlar yürüyüş sırasında medial kıkırdakın %65,7 oranında yük taşıdığını, dış rotasyonda medial pivot hareketinde anterior translasyon olduğunu, kıkırdak temasının %62,5 olduğunu ve kıkırdak- menisküs temasının %37,5 olduğunu bildirdiler (42).

Arab AZE. ve ark. yaptıkları SEY analizinde total diz protezinin (TDP) uzun dönem osteointegrasyonunu incelediler. Yazarlar çalışmalarında femur-protez-tibia bileşenlerine uygulanan yükün hangi şartlarda dengeli olduğunu araştırdılar. Bunun için tibia ve femura yerleştirilen TDP sistemini analiz etmek için sanal model oluşturdular. Bu modele üç eksende kuvvet uyguladılar. Sonuç olarak bu sanal çalışma ile gerilmelerin protez ile birleşen kemik bölgelerine yayıldığı ve daha çok kortikal kemik bölgelerinde olduğu bildirdiler. Yazarlar elde ettikleri sonuçlar ile hastaya özel protezler tasarlamayı önerdiler (43).

SEY analizleri kemik eklem hastalıkları yanında yumuşak dokuyu değerlendirmek için de yapılabilir. Ortopedik yumuşak doku yaralanmaları daha çok bağ,

menisküs, tendon, kas yaralanmalarından oluşmaktadır. Özellikle çok görülen bağ yaralanması olan diz bağ yaralanmaları ile ilgili literatürde çok sayıda SEY analizi vardır. Mesela dizin stabilitesinde önemli role sahip ön çapraz bağ (ÖÇB) yaralanmalarında tünel yerleşimi, kullanılan greftlerin özellikleri, yapısı, dayanıklılığı gibi hastaların iyileşmesini etkileyecek faktörleri belirlemek için SEY analizleri uygun çalışmalardır. Westermann WR. ve ark. yaptıkları SEY analiz çalışmasında günümüzde ÖÇB tamirinde kullanılan greftlerin yerleşimini incelediler. Yazarlar 25 farklı tünel lokalizasyonunda Lachman testi, diz eklem gevşekliği, menisküs gerilmesini, greft yüklenmesini ve eklem kıkırdak temas basıncını incelediler. Çalışmanın sonucu olarak femoral tünelin önde olmasının kıkırdak temas basıncı ve menisküs gerilmesini arttırdığı görüldü. Yazarlar yaptıkları detaylı analiz sonucunda aşırıya kaçmadan posteroinferior femoral tünele yerleştirilecek greftin anatomiye uygun ve fonksiyonel olabileceğini bildirdiler (44).

Menisküsler dizde şok emilimi, yük dağılımı, stabilite gibi önemli fonksiyonlar görür. Menisküs yırtıkları çok görülen yaralanmalardır ve diz osteoartriti için yatkınlık oluştururlar ki diz osteoartriti hastalarının %90'ında menisküs yırtığı vardır. Menisküs yırtıkları veya menisektomi sonrası osteoartrite gidişin mekanik açıdan araştırmak için SEY analizleri kullanılabilir. Li L. ve ark. yaptıkları çalışmada diz eklemine üç boyutlu kemik ve yumuşak doku görüntülerini alarak medial menisküs yırtık modelleri oluşturuldu. Sağlam menisküs modelinde, menisküs yırtık modelinde ve menisektomi modelinde menisküsü değerlendirdiler ve kıkırdağa etkisini araştırdılar. Sonuç olarak en şiddetli kıkırdak hasarı komplike menisküs hasarı olduğunda bulundu ve hasarsız menisküsün olduğu kondilde de basınç artımına neden olduğu bildirildi. Yazarlar ayrıca menisektominin de basınç artımına neden olduğunu belirttiler (45).

İnsan vücudunda tendon yaralanmaları sıkça görülmektedir. Özellikle aşil, rotator manşet, hamstring, patellar tendon, biceps tendonunun uzun başı başta olmak üzere birçok tendon akut veya kronik olarak yaralanabilmektedir. Yaralanma mekanizmalarına baktığımızda ya dejeneratif sürecin bir parçası veya ani gelişen yüklenmeler ve gerilmelere bağlı olmaktadır. SEY çalışmaları ile bu klinik durumlar çok yönlü araştırılabilmektedir. Örneğin Hwang E. ve ark. yaptıkları çalışmada SLAP yırtıklarının ilerlemesinde biceps tendonunun uzun başı üzerindeki gerilimin rolünü incelediler. Bu çalışmada Tip II SLAP lezyonlu omuz modeli oluşturuldu. Biceps tendonuna dört farklı gerilme kuvveti uygulanarak model gerildi. Biceps tendonuna uygulanan yük ile SLAP bölgesindeki gerilmeler incelendi. Yazarlar sonuç olarak SLAP yırtığının ön ve arka kenarlarında en yüksek gerilmenin oluştuğunu bildirdiler. Ayrıca biceps gerilmesinin yırtığın başlamasından çok yırtığın artmasında etkili olabileceğini vurguladılar (46).



Aşıl tendonu vücudun en büyük tendonudur ve yük taşımakta, sporcu performansında çok önemli fonksiyonları vardır. Aşıl tendonu ile ilgili literatürde SEY çalışmaları vardır ve aşıl yaralanmalarına bakılmıştır. Bir makalede aşıl tendonunun aşırı gerilmesi ve sıklığının plantar fasyada gerginliğe neden olduğu bildirilmektedir. Bu makalede yazarlar ayakta duran bir kişide plantar fasyanın yüklenme tepkisini farklı aşıl tendon yükü ile araştırdılar. Çalışmanın sonucunda 350 N kuvvet altında aşıl tendon yükü ve plantar basınç artmaktadır. Bazı şartlarda bu basınç artımı normalin iki katı kadar olmaktadır (47).

## **SONUÇ**

Sonuç olarak SEY analizleri tıp alanında son 20 yılda kullanılmaya başlanmış ve artarak devam etmektedir. Ortopedi ve biyomekanik bilimlerinin koordineli çalışmaları ile tanı, tedavi, implant geliştirme gibi birçok alanda yaygın kullanıma girmiştir. Bu çalışmada SEY analizinin tanımı, tarihçesi, uygulama yöntemi ve günümüzde ortopedide kullanım alanları örneklerle anlatılmıştır.

## **KAYNAKLAR**

1. JAGOTA, V., SETHI, A. P. S., & KUMAR, K. Finite Element Method: An Overview. *Walailak Journal of Science and Technology (WJST)*, 2013;10(1),1-8. Retrieved from <https://wjst.wu.ac.th/index.php/wjst/article/view/499>.
2. Uncuoğlu, E., 2009. Kohezyonsuz Zeminlerdeki Kazıkların Yatay Yük ve Moment Yük Etkisi Altındaki Davranışlarının Analizi, Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana
3. RW Clough. The finite element method in plane stress analysis. In: Proceedings of the nd ASCE Conference on Elektronik Computation, PittsburghASCE C,1960.
4. R Courant. Variational methods for the solutions of problems of equilibrium and vibrations. *Bulletin of the American Mathematical Society*. 1943; 49, 1-23.
5. A Hrenikoff. Solution of problems in elasticity by the framework method. *Journal of Applied Mechanics*. 1941; 8, 169-75.
6. D McHenry. A lattice analogy for the solution of plane stress problems. *Journal of the Institution of Civil Engineers*. 1943; 21, 59-82.
7. NM Newmark. Numerical Methods of Analysis in Engineering. In: LE Grinter (ed.).Macmillan, New York, 1949.
8. G Kron. Tensorial analysis and equivalent circuits of elastic structures. *Journal of the Franklin Institute*. 1944; 238, 399-442.
9. G Kron. Equivalent circuits of the elastic field. *Journal of Applied Mechanics*. 1944; 66, A149-A161.
10. H Argyris. Energy theorems and structural analysis. *Aircraft Engineer*. 1954; 26, 347-94.
11. H Argyris. Energy theorems and structural analysis. *Aircraft Engineer*. 1955; 27, 42-158.
12. H Argyris. The matrix theory of statics. (in German) *Ingenieur Archiv*. 1957; 25, 174-92.
13. JH Argyris. The analysis of fuselages of arbitrary cross-section and taper. *Aircraft Engineer*. 1959; 31, 62-283.
14. JH Argyris and S Kelsey. Energy theorems and structural analysis. Butterworth, London, 1960.
15. J Turner, RW Clough, HC Martin and LC Topp. Stiffness and deflection analysis of complex structures. *Journal of the Aeronautical Sciences*. 1956; 23, 805-54.

16. C Zienkiewicz and YK Cheung. Finite elements in the solution of field problems. *Engineer.* 1965; 220, 507-10.
17. Güvercin Y, Yaylacı M, Dizdar A, et. al. (2022). Biomechanical analysis of odontoid and transverse atlantal ligament in humans with ponticulus posticus variation under different loading conditions: finite element study, *Injury-International Journal of the Care of the Injured*, <https://doi.org/10.1016/j.injury.2022.10.003>.
18. Güvercin Y, Abdioglu A.A, Dizdar A, et.al. Suture button fixation method used in the treatment of syndesmosis injury: A biomechanical analysis of the effect of the placement of the button on the distal tibiofibular joint in the mid-stance phase with finite elements method. *Injury-International Journal of the Care Of the Injured*, <https://doi.org/10.1016/j.injury.2022.05.037>.
19. Güvercin Y., Yaylacı M., Ölmez H, et al. Finite element analysis of the mechanical behavior of the different angle hip femoral stem. *Biomaterials and Biomechanics in Bioengineering.* 2022;6(1), 29-46. <https://doi.org/10.12989/bme.2022.6.1.029>.
20. Yaylacı M. Simulate of edge and an internal crack problem and estimation of stress intensity factor through finite element method. *Advances in Nano Research.* 2022;12(4), 405-414. <https://doi.org/10.12989/anr.2022.12.4.405>.
21. Yaylacı M. The investigation crack problem through numerical analysis. *Structural Engineering and Mechanics.* 2016;57(6), 1143-1156. <https://doi.org/10.12989/sem.2016.57.6.1143>.
22. Yaylacı M, Eyüboğlu A, Adıyaman G. et al. Assessment of different solution methods for receding contact problems in functionally graded layered mediums”, *Mechanics of Materials.* 2021. <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2020.103730>.
23. Yaylacı M, Abanoz M, Uzun Yaylacı E. et al. The contact problem of the functionally graded layer resting on rigid foundation pressed via rigid punch. *Steel and Composite Structures.* 2022;43(5), 661-672. <https://doi.org/10.12989/scs.2022.43.5.661>.
24. Hak DJ, Fitzpatrick D, Bishop JA et al. Delayed union and nonunions: epidemiology, clinical issues, and financial aspects. *Injury.* 2014;45 Suppl 2:S3-7. doi: 10.1016/j.injury.2014.04.002.
25. Claes LE, Meyers N. The direction of tissue strain affects the neovascularization in the fracture-healing zone. *Medical Hypotheses.* 2020;137:109537. doi: 10.1016/j.mehy.2019.109537.
26. Hosseini HS, Pahr DH, Zysset PK. Modeling and experimental validation of trabecular bone damage, softening and densification under large compressive strains. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Material.* 2012;15:93-102. doi: 10.1016/j.jmbbm.2012.06.005.
27. Wang M, Yang N. Three-dimensional computational model simulating the fracture healing process with both biphasic poroelastic finite element analysis and fuzzy logic control. *Scientific Reports.* 2018;8(1):6744. doi: 10.1038/s41598-018-25229-7.
28. Samsami S, Augat P, Rouhi G. Stability of femoral neck fracture fixation: A finite element analysis. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H.* 2019;233(9):892-900. doi: 10.1177/0954411919856138.
29. Huys SEF, Van Gysel A, Mommaerts MY, et al. Evaluation of Patient-Specific Cranial Implant Design Using Finite Element Analysis. *World Neurosurgery.* 2021;148:198-204. doi: 10.1016/j.wneu.2021.01.102.
30. Ren S, Shi H, Liu Z, et al. Finite Element Analysis and Experimental Validation of the Anterior Cruciate Ligament and Implications for the Injury Mechanism. *Bioengineering (Basel).* 2022;9(10):590. doi: 10.3390/bioengineering9100590.
31. Safari M, Shojaei S, Tehrani P, et al. A patient-specific finite element analysis of the anterior cruciate ligament under different flexion angles. *Journal of Back and Musculoskeletal Rehabilitation.* 2020;33(5):811-815. doi: 10.3233/BMR-191505.
32. Brilakis EV, Kaselouris E, Markatos K, et al. Mitchell's osteotomy augmented with bio-absorbable pins for the treatment of hallux valgus: A comparative finite element study. *Journal of Musculoskeletal Neuronal Interactions.* 2019;19(2):234-244.

33. Schwarzenberg P, Maher MM, Harty JA, et al. Virtual structural analysis of tibial fracture healing from low-dose clinical CT scans. *Journal of Biomechanics*. 2019;83:49-56. doi: 10.1016/j.jbiomech.2018.11.020.
34. Mimata H, Matsuura Y, Yano S, et al. Evaluation of bone healing process after intramedullary nailing for femoral shaft fracture by quantitative computed tomography-based finite element analysis. *Clinical Biomechanics (Bristol, Avon)*. 2022;100:105790. doi: 10.1016/j.clinbiomech.2022.105790.
35. Doi K, Kinoshita K, Sakamoto T, et al. Mechanical Influence of Pubic Nonunion on the Stress Distribution After Curved Periacetabular Osteotomy: Patient-Specific Three-Dimensional Finite Element Analysis. *Journal of Arthroplasty*. 2022;37(7):1390-1395. doi: 10.1016/j.arth.2022.02.071. Epub 2022 Feb 23.
36. Taylor M, Prendergast PJ. Four decades of finite element analysis of orthopaedic devices: where are we now and what are the opportunities? *Journal of Biomechanics*. 2015;48(5):767-78. doi: 10.1016/j.jbiomech.2014.12.019.
37. Zeng W, Liu Y, Hou X. Biomechanical evaluation of internal fixation implants for femoral neck fractures: A comparative finite element analysis. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*. 2020;196:105714. doi: 10.1016/j.cmpb.2020.105714.
38. Zhang RY, Li JT, Zhao JX, et al. Comparison of oblique triangular configuration and inverted equilateral triangular configuration of three cannulated screws in treating unstable femoral neck fracture: A finite element analysis. *Injury-International Journal of the Care of the Injured* 2022;53(2):353-361. doi: 10.1016/j.injury.2021.10.029.
39. Kang S, Park CH, Jung H, et al. Analysis of the physiological load on lumbar vertebrae in patients with osteoporosis: a finite-element study. *Scientific Reports*. 2022;12(1):11001. doi: 10.1038/s41598-022-15241-3.
40. Jiang X, Liang K, Du G, et al. Biomechanical evaluation of different internal fixation methods based on finite element analysis for Pauwels type III femoral neck fracture. *Injury-International Journal of the Care of the Injured*. 2022;53(10):3115-3123. doi: 10.1016/j.injury.2022.08.038.
41. Lin Y, Ma L, Zhu Y, et al. Assessment of fracture risk in proximal tibia with tumorous bone defects by a finite element method. *Microscopy Research and Technique*. 2017;80(9):975-984. doi: 10.1002/jemt.22899.
42. Shu L, Yamamoto K, Yoshizaki R, et al. Multiscale finite element musculoskeletal model for intact knee dynamics. *Computers in Biology and Medicine*. 2022;141:105023. doi: 10.1016/j.combiomed.2021.105023.
43. Arab AZE, Merdji A, Benaissa A, et al. Finite-Element analysis of a lateral femoro-tibial impact on the total knee arthroplasty. *Comput Methods Programs Biomed*. 2020;192:105446. doi: 10.1016/j.cmpb.2020.105446.
44. Westermann RW, Wolf BR, Elkins J. Optimizing Graft Placement in Anterior Cruciate Ligament Reconstruction: A Finite Element Analysis. *Journal of Knee Surgery*. 2017;30(2):97-106. doi: 10.1055/s-0036-1581137.
45. Li L, Yang L, Zhang K, et al. Three-dimensional finite-element analysis of aggravating medial meniscus tears on knee osteoarthritis. *Journal of Orthopaedic Translation*. 2019;20:47-55. doi: 10.1016/j.jot.2019.06.007.
46. Hwang E, Hughes RE, Palmer ML, et al. Effects of biceps tension on the torn superior glenoid labrum. *Journal of Orthopaedic Research*. 2015;33(10):1545-51. doi: 10.1002/jor.22888.
47. Cheung JT, Zhang M, An KN. Effect of Achilles tendon loading on plantar fascia tension in the standing foot. *Clinical Biomechanics (Bristol, Avon)*. 2006;21(2):194-203. doi: 10.1016/j.clinbiomech.2005.09.016.