

OMURGA MEKANİĞİNDE KULLANILAN DENEYSEL VE ANALİTİK YÖNTEMLER

Omurga mekaniğinde de tüm yapılarda olduğu gibi hasar durumunu oluşturan sınırların belirlenmesi gerilme veya şekil değiştirme değerlerine bağlıdır. Gerilme veya şekil değiştirme değerleri belli sınırların üzerinde ise yapıda hasarın oluşması kaçınılmazdır. Dolayısıyla omurga mekaniğinde de hasar kriterlerinin belirlenmesinde gerilme ve şekil değiştirme değerlerinin elde edilmesi büyük önem taşımaktadır.

GERİLME VE BİRİM ŞEKİL DEĞİŞİMİ

Herhangi bir yapıya etkiyen kuvvet; yapıda, birim alan başına kuvvet olarak tanımlanan gerilmenin ($N m^{-2}$) oluşmasına yol açar. Kuvvet sonucu meydana gelen deformasyon, birim şekil değiştirme olarak bilinir ve yapının boyunda meydana gelen değişikliğin, yapının orijinal boyuna olan oranı olarak tanımlanır ($\Delta l/l$). Birim şekil değiştirme bir orantı olup, birimsiz ve mikroepsilon ($\mu\epsilon$) mertebelerindedir.

BİRİM ŞEKİL DEĞİŞİMİNİN OMURGADA ÖLÇÜMÜ VE GERİLMENİN HESAPLANMASI

Omurgada birim şekil değişiminin ölçülmesi ile gerilmenin hesaplanması için birbirinden değişik metodlardan yararlanılabilmektedir. Bu yöntemler; deneysel ve analitik yöntemler olmak üzere iki ana sınıfa ayrılır. Deneysel yöntemler kapsamında, optik yöntemler ve elektriksel direnç yöntemleri en çok kullanılanlardır. Bu yöntemlere örnek olarak; strain- gauges ve optik kameraların kullanımı gösterilebilir. Analitik yöntemlere örnek olarak ise; geometrik bağlantılardan yararlanarak yapılan hesaplamalar ve sonlu elemanlar yöntemi (FEA: Finite Element Analysis) analizleri verilebilir.

DENEYSEL YÖNTEMLER

Strain gauges:

Yapılarda uygun bölgelerin üzerine yerleştirilen ve yapıda meydana gelecek olan şekil değişimlerine bağlı olarak elektriksel direnci değişerek ölçüm almaya yardımcı olan küçük elemanlardır. Canlı yapılarda, strain gaugesler genellikle kas yapısını izleyen elektromiyografilerle (EMG) beraber uyumlu olarak kullanılmaktadır. Bunlar dışında, yükleme koşullarını tespit edebilmek amacıyla kuvvet transdüserleri de kullanılmaktadır (örnek olarak Herring & Teng 2000 çalışması). Strain gaugeslerin en önemli avantajı, canlı bir yapının herhangi bir fonksiyonel işlevini gerçekleştirmesi sırasında meydana gelecek olan birim şekil değişimini gerçek zamanlı ölçebilmesidir. Bununla beraber, canlı üzerinde, gaugeslerin yerleştirebildiği bölgeler sınırlı kalmaktadır.

Optik Kameralar:

Birim şekil değiştirmelerin ölçülerek hasar durumunu belirleyen temel parametrelerden biri olan gerilmenin bulunması konusunda son yıllarda optik yöntemlerde kullanılmaktadır. Henüz gelişme aşamasında olan bu yöntemle iki veya üç boyutlu ölçümler yapılabilmektedir. Bu ölçüm sisteminin temel prensibi belli bir yüzeyde yer alan noktaların yer değiştirmelerinin hassas bir kamera sistemi ile dinamik olarak ölçülmesi esasına dayanmaktadır. Belirlenen noktalar arasındaki mesafeler, hassas kamera sistemi ile yükleme sonucunda oluşan yer değiştirmelerin ölçülmesi sonucunda sürekli olarak vektör mekaniği yardımıyla hesaplanır. Hesaplanan yer ve şekil değiştirme verilerinden daha sonra gerilmeler

bulunarak hasar limit değerine ne kadar yaklaştığı belirlenir.

ANALİTİK YÖNTEMLER

Geometrik Yaklaşımlar:

Canlı yapıda uygulanabilecek olan bir diğer alternatif method olarak; elastisite teorisi ve statik denge koşullarından elde edilmiş olan diferansiyel denklem takımlarından yararlanarak yapıda meydana gelmiş olan deplasmanların veya gerilmelerin hesaplanması verilebilir. Bu teknik, ele alınacak olan yapı belirli geometrik formlar ve belirli yüklemeye koşulları ile belirtilebiliyorsa işe yaramaktadır; fakat modeller kompleks geometriler, sınır şartları, yüklemeye koşulları içerdikçe karmaşık hale gelmektedir.

Sonlu Elemanlar Analizi:

Sonlu elemanlar analizi (FEA), birçok kompleks yapının ve karmaşık yüklemeye koşullarının çözümlenebilmesine izin vermesinden dolayı, gerilmelerin ve birim şekil değiştirmelerin bulunmasında çekici bir yöntem olmaktadır. Ayrıca, incelenecek bir model üzerinde değişik yüklemeye senaryolarının tekrar tekrar uygulanabilir olması ve birbirinden farklı malzemelerle çalışabilmeye izin vermesi bu metoda olan ilgiyi arttırmaktadır. Sonlu elemanlar analizleriyle beraber, örneğin omurga üzerine implantasyonu yapılacak yeni tasarlanan bir instrumentasyonun incelenmesi sonucu emniyet açısından ortaya çıkabilecek olan problemlerin öngörülebilmesi mümkün olmaktadır. Bu da daha tasarım aşamasındayken gerekli düzeltmelerin yapılabilmesini, böylelikle ileriki aşamalarda karşılanabilecek sorunların en aza indirilmesini sağlamaktadır. Modellerin büyüklüğü, incelenmek istenen yüklemeye koşullarının karmaşıklığı, modelin nonlinear özellikli parametreleri arttıkça, problemin çözülebilmeye süresinin uzaması ve yüksek maliyetlerle sonuçlanacak yüksek işlem kapasitesine sahip bilgisayarlara ihtiyaç duyulması bu yöntemin desavantajı olarak gösterilebilir. Ayrıca bunlara ek olarak, simülasyonların gerçekleştirilebilmesi kadar analizler sonunda elde edilmiş olan sonuçların da uygun şekilde yorumlanabilmesi için temel mukavemet ve elastisite bilgisi gerekmektedir.

SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİNİN TARİHÇESİ

Sonlu elemanlar yöntemi (FEM), mühendisliğin pek çok dalında kullanılmak üzere olup, sayısal yöntemle mühendislik problemlerinin çözümlenmesine yardımcı olan bir araçtır. Sonlu elemanlar yöntemi metodolojisi,

modellenen yapıyı matematik analizler yardımıyla çözülebilen birçok ayrıklı probleme dönüştürmeye odaklıdır. Bu sayısal yöntemin kökeninde matematiksel sonlu farklar yaklaşımı (Richardson 1910) ve Sürekli Elastik Ortam problemleri bulunmaktadır (Turner at al. 1956); fakat bu yöntemler 1960'lara kadar sonlu elemanlar yönteminde kullanılmamıştır (Clough 1960, Zienkiewicz et al. 2005). 1970 ve 1980'li yıllarda birçok mühendislik dalında (Zienkiewicz 1971) ve Ortopedi dalında (Huisen&Chao 1983) kullanılmaya başlanmıştır. Gün geçtikçe gelişen bilgisayar teknolojisi ve beraberinde daha da artan hesaplama kapasitesiyle beraber sonlu elemanlar yönteminin uygulanabilirliği ilgi çekici hale gelmiştir. Uygulama alanları arasında; otomotiv, uçak, bina, köprü gibi yapıların gerilme ve deformasyonlarının incelenmesinin yanısıra, yumuşak doku mekaniğini de içeren insan kas-iskelet sisteminin biyomekaniğini çalışmaları, ısı transferi ve kan akışı problemlerinin incelenmesi sayılabilmektedir.

Ortopedi dalındaki ilk sonlu elemanlar yöntemi uygulaması, Brekelmans et al ve Rybicki et al. (1972) tarafından, organizmanın kemik yapısı mekanik davranışının belirlenebilmesinde görülmüştür. 1982'li yıllarda yapılan ve özellikle kalça protezinin mekanik incelenmesini içeren çalışmaların yer almasıyla beraber, ilerleyen zamanlarda tıp alanında da sonlu elemanlar analizlerinin pratik uygulamaları hızla artmıştır.

SONLU ELEMANLAR ANALİZİ SIRASINDA İZLENEN ADIMLAR

Sonlu elemanlar yöntemi matematiksel bir teknik olmakla beraber, günümüzde sonlu eleman analizleri için pek çok ticari software paketleri bulunmaktadır (ABAQUS, ANSYS, PATRAN vb.) veya kullanıcılar kendilerine özel kodları yazmaktadırlar.

Sonlu elemanlar analizindeki ilk ve en önemli adımı, ele alınacak yapıyı temsil edecek sanal modelin yaratılması oluşturmaktadır. Modelin yaratılması aşamasında, ilerleyen bölümlerde daha ayrıntılı olacak şekilde anlatılacak yöntemlerden yararlanılmaktadır (bilgisayar destekli çizim programları – CAD vb.).

Ele alınacak model, gerçekte sürekli yapıdadır ve sonsuz sayıda serbestlik derecesine sahiptir. Sonlu elemanlar analizinde; yapı, süreklilik özelliğini yansıtabilecek olan eleman adı verilen sonlu sayıdaki ayrıklı alt bölgelere bölünmektedir. Elemanlar birbirlerine node denilen düğüm noktalarıyla bağlanmıştır. Elde edilen elemanlar ve düğüm noktaları sonlu ağı yapıyı oluşturur (mesh).

Bir yapıdaki gerilme ve şekil değişimlerinin yönlendirilmesi, dağılımı ve şiddeti; uygulanan yüke bağımlı olmasının yanı sıra, geometrik özelliklerden ve malzeme özelliklerinden etkilenmektedir (Young's Modulus, Poisson's oranı..vb.). Etkileden önemli parametrelerden birisi olan malzeme özellikleri, modeli oluşturan yapısal elemanların deneysel yöntemlerle belirlenen değerlerine göre, analiz sırasında oluşturulmuş olan ağısı yapıya atanmaktadır.

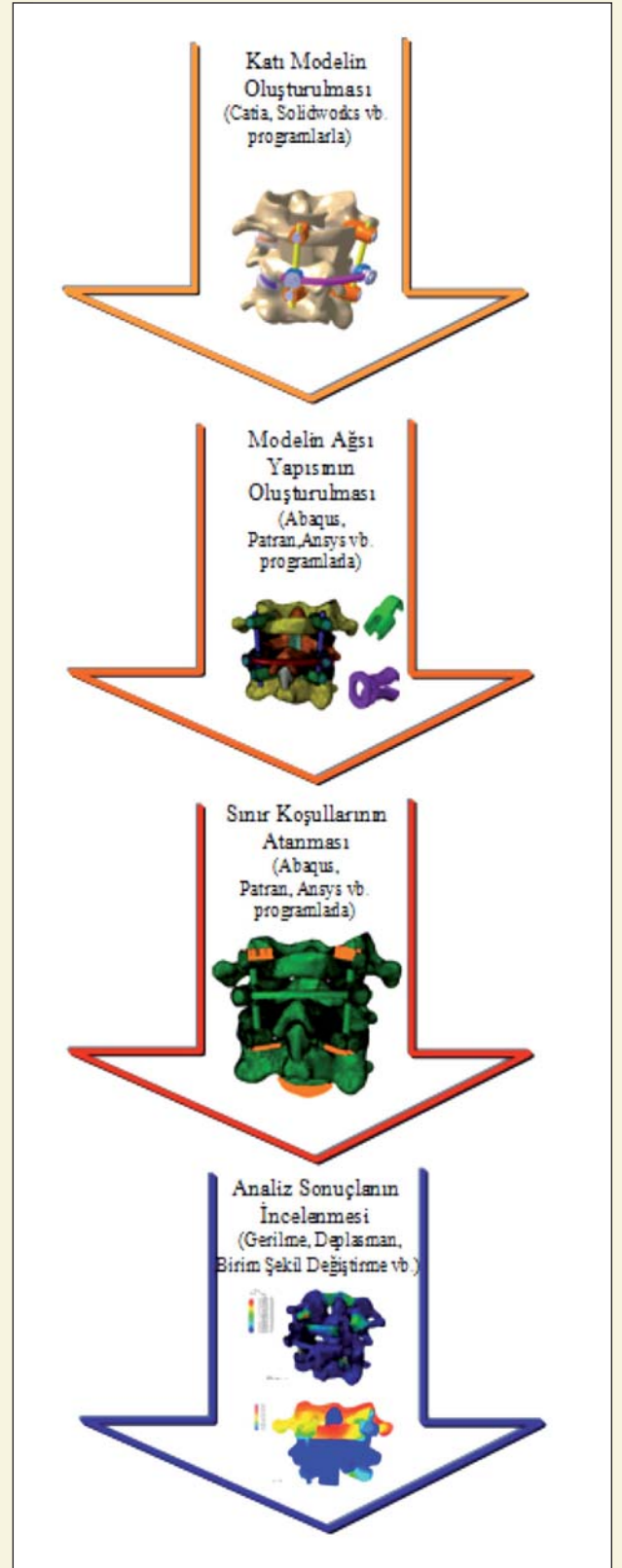
Analizde çözümü aşamasına gelmeden önceki olmazsa olmaz olan adım, sınır şartlarının ve yükleme koşullarının belirlenmesidir. Sınır koşulları, simüle edilmek istenen durumdaki yapıya gerçek koşullarda hangi kuvvetlerin ne kadar ve nasıl etkilediğinin bulunmasından sonra tespit edilebilir. Tüm yükleme koşullarının da simüle edilecek modele yansıtılmasının ardından, analiz çözümü sürecine bırakılır.

Çözümü aşamasında; modelin geometrik özelliği ve önceden malzeme özellikleriyle belirlenmiş olan elastisitesi göz önünde bulundurularak, uygulanmış olan sınır şartları karşılığında düğüm noktalarında meydana gelen deplasmanlar hesaplanır. Düğüm noktalarında hesaplanmış olan deplasmanlarla birlikte de, yapının mekanik davranışını ortaya çıkartacak olan birim şekil değişimi ve gerilme hesaplanır.

Çözümü sürecinin bitmesinin ardından da, pek çok sonlu eleman analiz paket programları, elde edilmiş olan sonuçları grafiksel gösterimlere de izin verebilecek şekilde postprocessinge sahiptir. Sonuçların irdelenmesi sonrasında, analiz modelinin üzerinde sınır şartları olsun, ağısı yapısı olsun herhangi bir değişiklik yapıldığında analiz tekrar tekrar çözümü sürecine bırakılabilir. Gerekli görülürse, analizin sonuçlarının doğruluğunun ve uygunluğunun belirlenebilmesi amacıyla yakınsama testine tabii tutulabilir. Yakınsama testinde ise, birim şekil değiştirme ve gerilme değerleri çözümü sürecinde aynı değerlere yakınsayana kadar modelin ağısı yapısının boyutları her seferinde daha da küçültülerek tekrar tekrar analize verilir.

ANALİZ ÖNCESİ MODELİN OLUŞTURULMASI

Modelin oluşturulması aşamasında sorulması gereken en önemli sorulardan birisi, simüle edilmek istenen yapının kompleksliğinin hangi düzeyde yaratılacak olan modele yansıtılacağı ve daha gerçekçi modelin elde edilebilmesini sağlayabilmek amacıyla hangi yöntemin kullanılacağıdır. Gerçek yapının karmaşıklığı modele



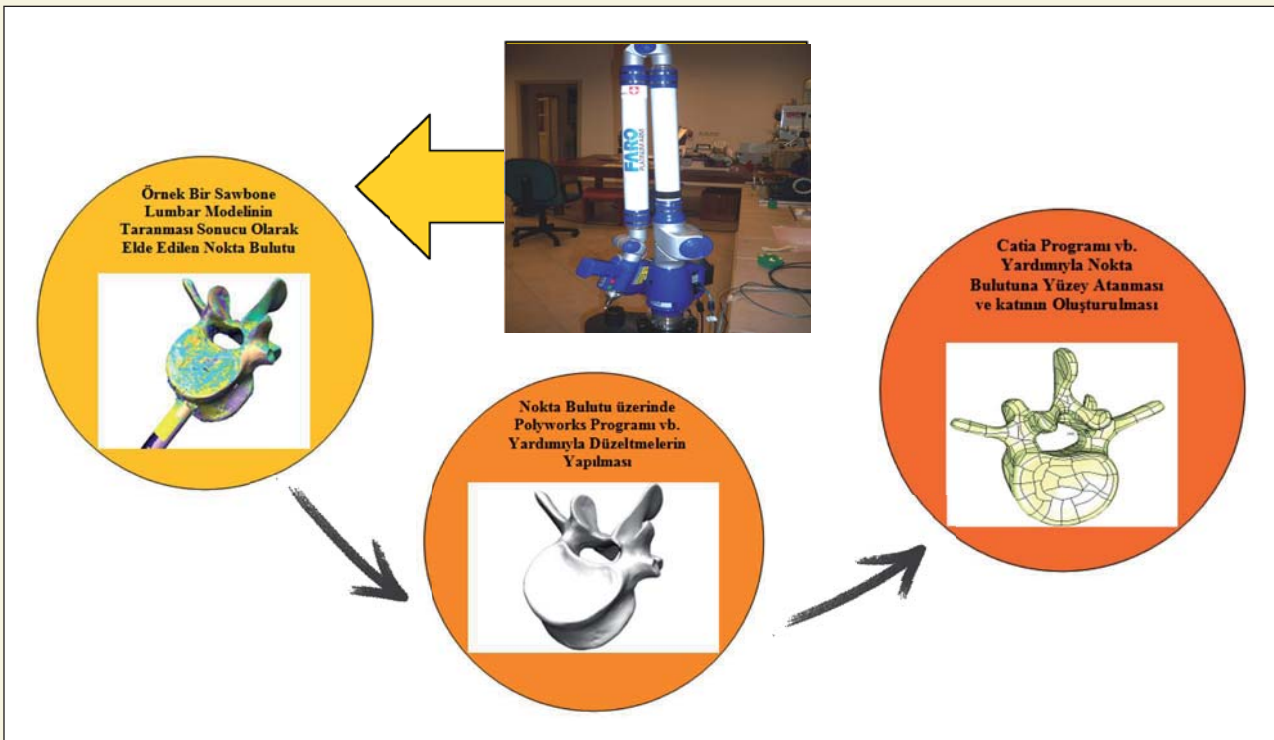
yansıkça gerek modelin ağ yapısının oluşturulması ve gerekse modelin analizi zorlaşmakta ve işlem süresi artmaktadır.

Modelleme aşamasında ilk olarak, modelin 1-,2- veya 3 boyutlu mu olması gerektiğine karar verilmelidir. Kimi incelenmek istenen durumlarda, tek bir düzlemde etkiyecek olan yükleme koşulları vardır. Bu gibi yerlerde 2 boyutlu modelin kullanılması yeterli gelebilirken, düzlem dışından etkiyecek olan yükleme durumlarının (burulma vb.) önem arz ettiği yerlerde 3 boyutlu modellemeye ihtiyaç duyulmaktadır. 2 boyutlu modellere göre 3 boyutlu modeller, analiz aşamasında çok daha fazla eleman muhafaza ettiğinden ve daha fazla serbestlik derecesine sahip olduğundan dolayı analiz çözümü süreleri artmaktadır.

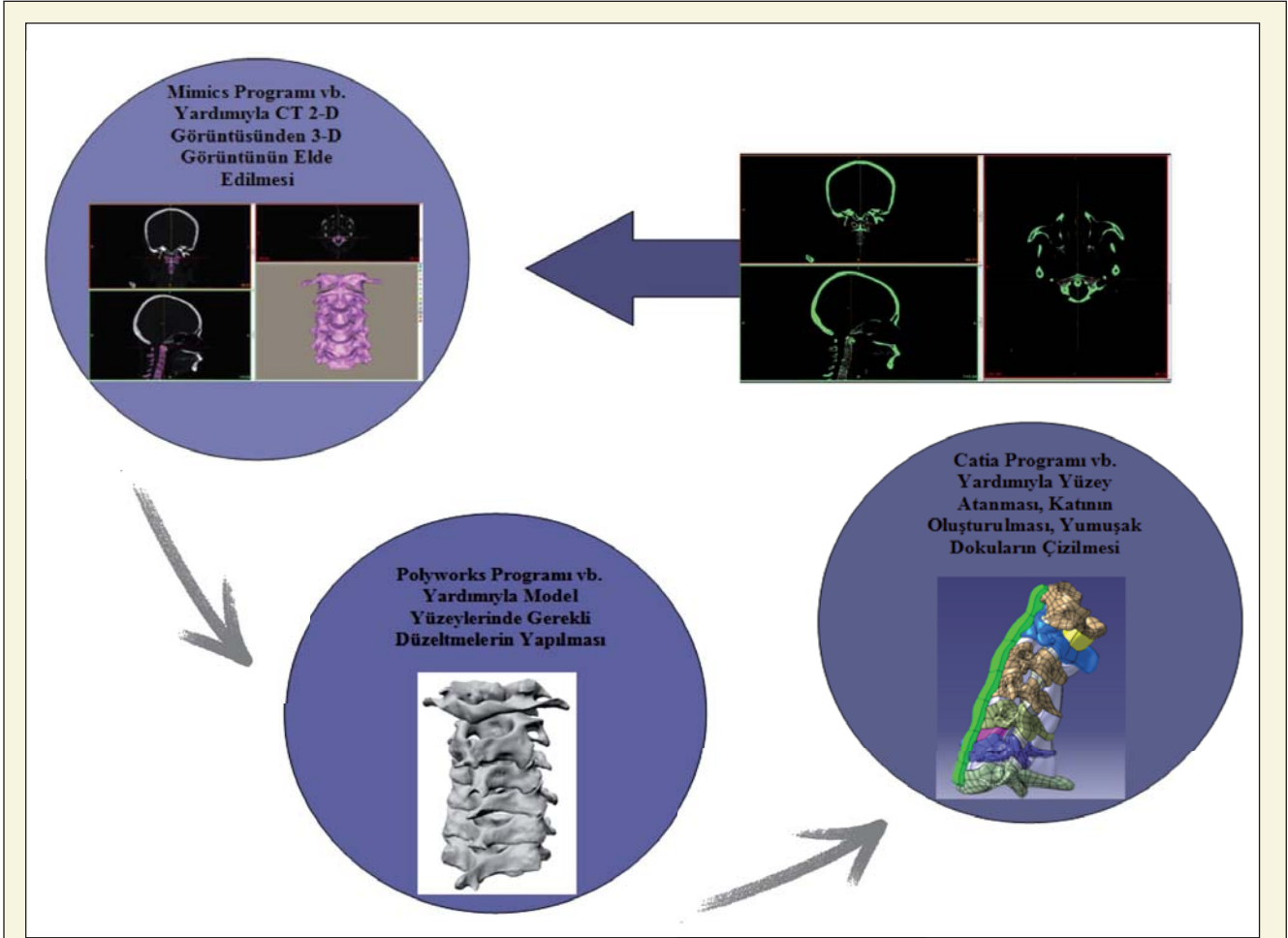
Omurga biyomekaniğinde genel olarak 3 boyutlu modeller kullanılmaktadır. Bu modeller yaratılırken Laser tarayıcılar, CT ve MR görüntüleme tekniklerinden yararlanılabilmektedir. Laser yüzey tarayıcılar kullanılarak elde var olan yapının, örneğin herhangi bir Sawbones omurga modelinin, iç yapısının bilgisinden mahrum olarak dış yüzey bilgileri elde edilebilir. Yüzey taraması sonucu yüzey bilgileri, ilk olarak nokta bulutları halindedir. Bu nokta bulutlarından gerçek modele uygun

olan yüzeylerin yaratılabilmesi için nokta bulutları üzerinde işlem yapabilecek olan Polyworks, Geomagic gibi software programlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Nokta bulutundan yüzeyi oluşmuş hale gelen modelin analiz programında işlev görebilmesi için, yüzey halini katı hale çevirmek gerekir. Bu aşamada da Catia, Solidworks gibi bilgisayar destekli çizim programları (CAD: Computer Aided Design) devreye girmektedir.

Laser tarayıcılarla elde edilecek olan modelin dezavantajı olarak, modelde yer alacak olan elemanların yapısının homojen olarak kabul edilemeyeceği durumlarda iç yapı hakkında bilgi vermemesi gösterilebilir. Bu gibi durumlarda modelleme yöntemi olarak CT veya MR görüntüleri tercih edilebilir. CT görüntüleri 2 boyutlu olup, 3 boyutlu model elde edilebilmek amacıyla Mimics gibi programlar kullanılabilmektedir. CT görüntülerindeki kontrastlar iyi olduğu sürece, paket programların içinde önceden tanınlanmış olan kemiksi ve yumuşak dokuları birbirinden ayırabilme özelliğinin yanısıra, gerekli yerlere müdahalelerin de yapılabilmesiyle 2 boyutlu görüntülerden 3 boyutlu yapı elde edilebilmektedir. Elde edilen modelin daha da kusursuz bir hale getirilebilmesi amacıyla Polyworks, Geomagic gibi programlarla ara işlemlerden geçirilebilir.



Şekil 1: Laser Tarama Yöntemiyle Model Oluşturulması Aşamaları

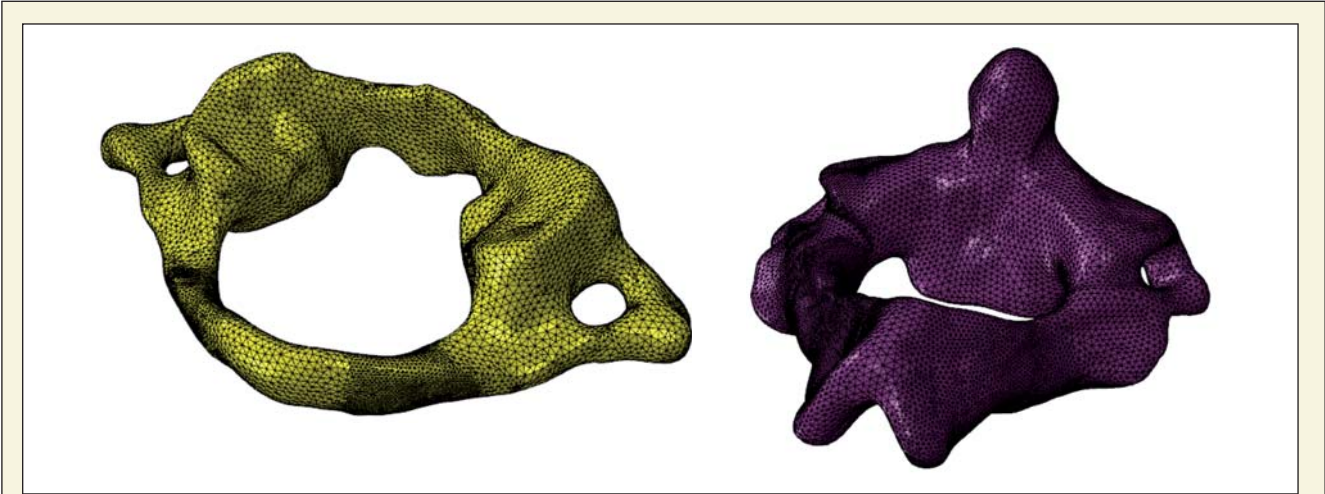


Şekil 2: CT Görüntülerinden Model Oluşturulması Aşamaları.

Katı bir model elde edebilmek için ise, ara işlemlerin ardından CAD programları devreye girmektedir. CT görüntülerinden yararlanıldıysa da yumuşak dokulu yapılar belirgin olmadığından dolayı, CAD programında elde edilen katı modelde yumuşak dokular, bağlar yer alamamaktadır. Bu gibi yapıların model üzerinde yer alması gerekli ise; gerçek yapıda olduğu şekilde, literatürlerde yer alan geometrik özelliklere bağlı kalınarak CAD programlarında yumuşak dokulu yapılar sanal olarak oluşturulabilmektedir. CT görüntülerinden modelleme yapılmasının desavantajı olarak; görüntü çözünürlüklerinin yüksek olmasının gerekliliği gösterilebilir. Görüntü çözünürlüğünün de iyi olması, taranacak olan bölgenin büyüklüğüne, tarayıcı makinasının kalitesine ve kemiksi dokularla yumuşak dokuyu ayırabilecek olan kontrasta bağlıdır. Yüksek çözünürlük için daha fazla sayıda kesit görüntünün alınması gerekir, bu da daha uzun tarama süresini beraberinde getirir.

ANALİZ AŞAMASINDA AĞSI YAPININ OLUŞTURULMASI

Hazırlanmış olan modelde ağsı yapının oluşturulması aşamasında, 2 boyutlu modeller için üçgenel (triangular) ve dörtgenel (quadrilateral) elemanlar veya 3 boyutlu modeller için dörtgenel (tetrahedral) ve kübik (cuboidal) eleman çeşitlerinden hangisinin kullanılacağına karar verilmesi gerekmektedir. Eleman tipinin seçimine ek olarak kullanılacak olan eleman tipinin lineer mi (bir çizgide 2 düğüm noktası bulduran) yoksa kuadratik mi (bir çizgide 3 düğüm noktası bulduran) olacağına karar verilmelidir. Dörtgenel (quadrilateral) ve kübik (cuboidal) elemanlar, üçgenel (triangular) ve dörtgenel (tetrahedral) elemanlara göre, yapıdaki gerilme değerlerini daha doğru şekilde verdiği için dolayı daha çok tercih edilmektedir. Fakat bu tip elemanların pratikte kullanımı sırasında problemler yaşanabilmektedir; özellikle biyomekanik



Şekil 3: Atlas ve Axis Modellerinde Örnek Ağsı Yapı

dalında incelen modeller bilinen kup, kare gibi geometrik özelliklerde olmayıp kompleks yapılar içermektedir ve bu kompleks modellerin ayrıklaştırılabilmesi triangular ve tetrahedral elemanlarla olabilmektedir. Lineer ve kuadratik eleman tipini de kendi aralarında karşılaştırmak gerekirse; genelde kuadratik elemanların kullanımıyla daha doğru gerilme değerleri elde edilebilmektedir çünkü kuadratik bir eleman içinde gerilme ve birim şekil değiştirme değerleri değişim gösterebilmektedir, fakat lineer bir elemanda bu değerler sabit kalmaktadır. Kuadratik elemanların kullanımının desavantajı olarak ise, daha uzun hesaplama sürecine ihtiyaç duyulması söylenebilir.

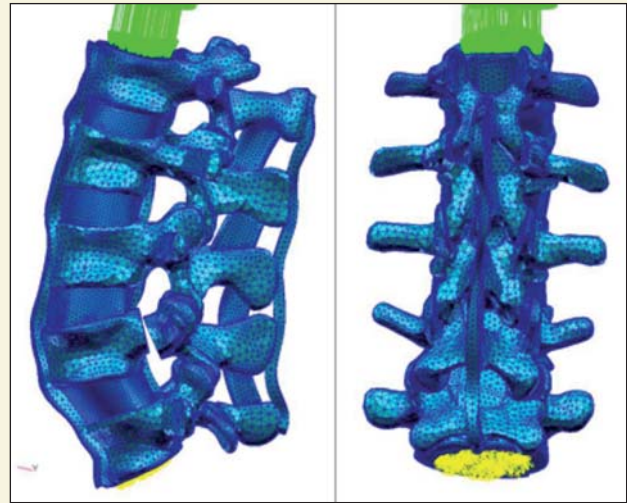
ANALİZ AŞAMASINDA SINIR KOŞULLARININ BELİRLENMESİ

Basit gerilme ve deplasmanların sınırlarını kapsayan ifadeler sınır şartları denir. Cismin sabitlenme yerini, kuvvetin nerden etki ettiğini belirtir. Sınır şartları sonlu elemanlar metodu uygulanan cismin istenilen şartlarına göre belirlenir.

Sınır koşulları dâhilinde elemanların parça ya da sistem boyunca birleştirilerek, lineer veya non-lineer denklem ifadeleri elde edilir. Bu sayede denklemlerin çözümüyle yaklaşık olarak sistemin uygulanan sınır koşullarıyla gösterdiği davranış bulunur.

ANALİZ AŞAMASINDA MALZEME PARAMETRELERİNİN AĞSI YAPIYA ATANMASI

Sonlu elemanlar analizinde sonuçları etkileyebilecek ve göz önünde muhakkak bulundurulması gereken parametrelerden biri yapıların malzeme özelliklerinin

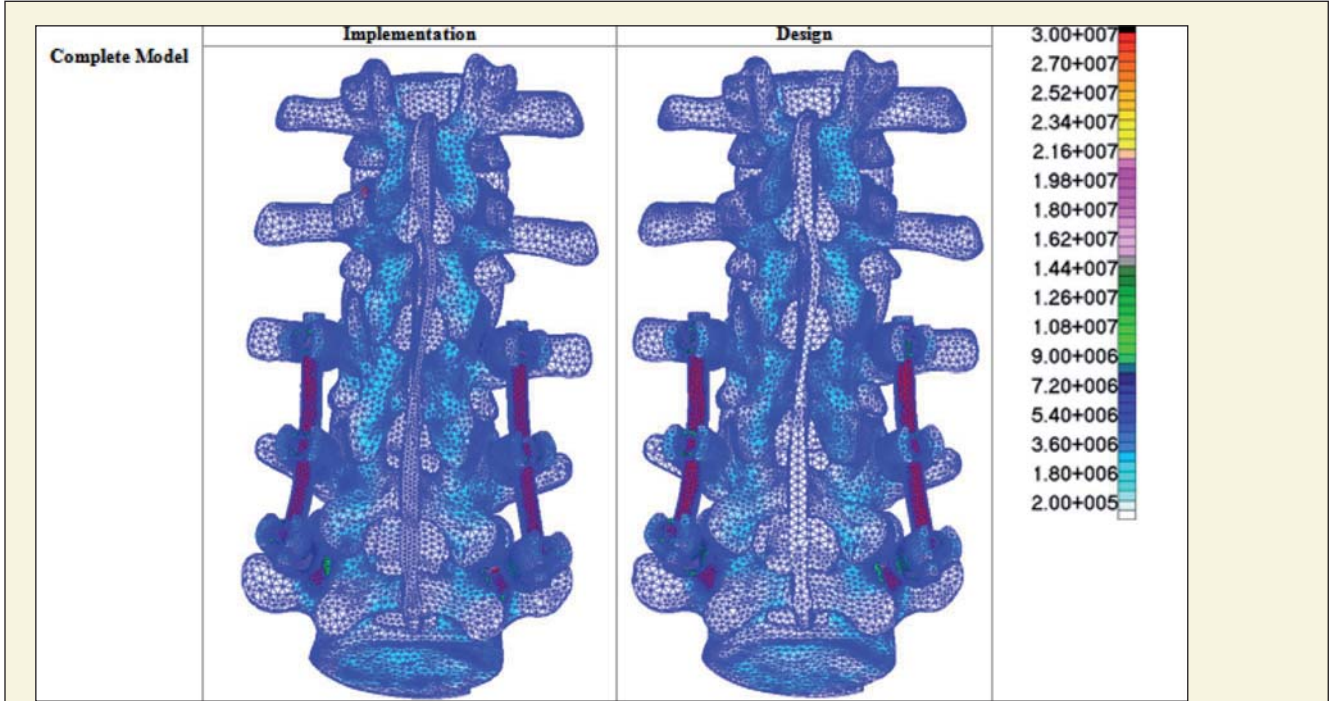


Şekil 4: Lumbar Vertebra Modelinde Örnek Sınır Şartlarının Uygulanması.

belirlenmesidir. Sanal ortamda, analiz programlarına örneğin, kemik ve yumuşak dokunun birbirinden farklı özelliklere sahip olduğunu anlatabilmek (Young Modulus, Poisson oranı, yoğunluk vb.) için deneysel yollarla belirlenmiş olan bu değerlerin ağı yapıya atanması gerekmektedir.

ANALİZ SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Analizin çözümü aşamasında, atanan değişik malzeme özellikleri de göz önünde bulundurularak, sınır şartlarının gerektirdiği şekilde oluşturduğu denklem takımlarını çözer. Çözümde gerilmeler, mukavemet hipotezleri (Von Mises vb.) yardımıyla hesaplanır.



Şekil 5: Lumbar Vertebra Modelinde Von Mises Gerilmeleri.

Tablo 1: Örnek Malzeme Özellikleri

Part	Material Properties			
Name	Elastic Modulus [Pa]	Poisson Ratio [-]	Density[Kg/m ³]	Yield Stree [Pa]
BONE	1,00E+10	0,3	1000	
TRANSVERSE CONNECTOR	8,00E+10	0,3	5407	8,97E+08
SCREW	8,00E+10	0,3	5407	8,97E+08
C1 CLAW	8,00E+10	0,3	5407	8,97E+08
C2 CLAW	2,40E+11	0,3	5407	8,27E+08

REFERANSLAR

1. Rayfield J. E., Finite Element Analysis and Understanding the Biomechanics and Evolution of Living and Fossil Organisms, Annu. Rev. Earth Planet. Sci. 2007. 35:541–76.
2. Huiskes R, Chao EYS. 1983. A Survey of Finite-Element Analysis in Orthopedic Biomechanics—The First Decade. *J. Biomech.* 16:385–409
3. Huiskes R, Hollister SJ. 1993. From Structure to Process, From Organ to Cell: Recent Developments of FE-Analysis in Orthopaedic Biomechanics. *J. Biomech. Eng.*115:520–27
4. Roesler H. 1987. The History of Some Fundamental Concepts in Bone Biomechanics.*J. Biomech.* 20:1025–34
5. T. R. Chandrupatla, A. D. Belegundu, 2002. Introduction to Finite Elements In Engineering, New Jersey: Prentice Hall.
6. C. F. Ross, Finite Element Analysis in Vertebrate Biomechanics, *The Anatomical Record Part A* 283A:253–258 (2005).
7. Beaupre GS, Carter DR. 1992. Finite element analysis in biomechanics.In: Biewener AA, editor. *Biomechanics: structures and systems—a practical approach.* Oxford: IRL Press.