

## İNSAN MANDİBULASINDA SONLU ELEMANLAR METODU KULLANILARAK GERİLME ANALİZİ YAPILMASI

**Abdülkerim İLGÜN ve Hasan Hüsnü KORKMAZ**

Selçuk Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, KONYA

**Sıddık MALKOÇ ve Faruk Ayhan BAŞÇİFTÇİ**

Selçuk Üniversitesi, Dişhekimliği Fakültesi, Ortodonti Anabilim Dalı, KONYA

**Makalenin Geliş Tarihi:** 20.05.2004

**ÖZET:** Bu çalışmada, sonlu elemanlar metodunun biyomekanikte kullanıldığı bir durum için, modelin hazırlanmasının temel aşamaları ve elde edilen sonuçların geçerliliğinin tartışılması amaçlanmıştır. Bir insan mandibulasının sonlu elemanlar programında gerilme analizini yapmak için bilgisayar modeli hazırlanmıştır. Bu amaçla 22 yaşındaki bir erkek mandibulasının bilgisayarlı tomografisi (CT) alınmış, elde edilen görüntüler bilgisayar ortamına aktarılmış ve mandibulanın 3 boyutlu sonlu elemanlar modeli hazırlanmıştır. Çalışmada modelin hazırlanmasında izlenen adımlar detaylı olarak verilmiştir. Sonlu elemanlar metodu (FEM) ile analizde, mandibulanın kabuk ve tuğla-solid elemanlar kullanılarak elde edilen modelleri ile yapılan gerilme karşılaştırması da verilmiştir. Bu modeller değerlendirildiğinde solid ve kabuk elemanlarla yapılan modellerin yaklaşık aynı mekanik davranışı yansıttığı belirlenmiştir. Kabuk elemanlarla hazırlanan modelin kolay elde ediliyor olması nedeniyle daha kullanışlı olduğu görülmüştür.

**Anahtar kelimeler:** Sonlu elemanlar metodu, FEM, distraksiyon osteogenezis, gerilme analizi.

### Stress Analysis of Human Mandible with the Use of Finite Element Method

**ABSTRACT:** In this study use of the finite element method in biomechanics, and an explanation of basic steps of preparing a FEM model of a mandible, a discussion of the validity of results is the objective. A computer FEM model of a mandible is prepared from a real human mandible and stress analysis was conducted. For this purpose CT sections of the mandible of a 22 year old male was obtained and the images were scanned and transferred to the computer. In the study the steps of preparing a FEM model of a human skeleton is explained in detail. By using them a 3 D model of the mandible prepared. One of the models is prepared with solid elements; the other is prepared with shell elements. The same loadings were applied to both of them. The results are compared and it is concluded that there is no important differences between them.

**Key words:** Finite element method, distraction, stresses analysis.

### GİRİŞ

Bir bina, makine yada cismin maruz kaldığı yükler altında, meydana gelebilecek gerilmeleri, gerilmelerin yoğunlaştığı bölgeleri görmek ve o cismin ideal şeklini belirlemek amacıyla gerilme analiz yöntemleri kullanılmaktadır.

Canlı doku ve organlarda gerilme analizi yapmak güç, bazen de imkansızdır. Bu nedenle

gerilme analiz çalışmaları canlı malzemenin bir modeli üzerinde yapılır. Biyolojik malzeme ve tedavi malzemelerinde gerilmelerin analizini sağlayan yöntemler; kırılabilir vernikle kaplama tekniği, fotoelastik kuvvet analiz yöntemi, termografik gerilme analiz yöntemi, gerilim ölçer kullanarak gerilme analiz yöntemi, lazer ışını ile gerilme analiz yöntemi ve bilgisayarda sonlu elemanlar gerilme analiz yöntemi olarak

sıralanabilir. Bu yöntemler arasında mühendislikte karmaşık sistemlerin çözümünde kullanılan sonlu elemanlar metodu avantajları nedeniyle en çok tercih edilen yöntemdir (Eskitaşcıoğlu, 1991).

Sayısal bir analiz yöntemi olan Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM) makine, inşaat, uçak, elektrik gibi pek çok mühendislik alanlarında kullanıldığı gibi tıp ve diş hekimliği ve biyomekanikğin diğer dallarında da kullanılmaktadır.

Sonlu elemanlar yönteminin temel kavramı, sürekli ortamların daha küçük parçalara ayrılarak analitik şekilde model elde edilmesi ve böylece oluşturulan elemanlar ile ifade edilmesi esasına dayanır (Baran, 1995).

Sonlu elemanlar metodunun diğer metotlara göre pek çok avantajları vardır; karmaşık geometriye sahip katılar modellenebilir, gerçekçi malzeme kabulleri ile gerçeğe yakın model oluşturulabilir, istenilen sayıda değişik malzeme ile model oluşturulabilir, gerilme dağılımı ve deplasmanlar duyarlı olarak elde edilebilir, deneysel aracın kontrolü ve sınır şartlarının, uygulanan kuvvetlerin, malzeme özelliklerinin, geometrinin kolayca değiştirilip analizin zahmetsizce gerçekleştirilebilmesi mümkündür. Bu yöntem, 1969 yılından sonra diş hekimliğinde kullanılmaya başlanmış ve birçok çalışma yapılmıştır. Literatürde sabit protezlerde, implantolojide, ortodontide, parsiyel protezlerde, restaratif diş hekimliğinde ve total protezlerde FEM ile ilgili ilginç çalışmalara rastlanmaktadır. FEM'in birçok araştırmacı tarafından fotoelastik ve diğer yöntemlere göre daha avantajlı olduğu belirtilmiştir (Eskitaşcıoğlu, 1991).

Distraksiyon osteogenezis; uygulanan çekim kuvvetiyle, ayrılan kemik segmentlerinin yüzeyleri arasında yeni kemik formasyonunun meydana geldiği biyolojik bir olaydır. Bu teknik ayrılan kemik segmentlerini bağlayan kallus dokusuna distraksiyon kuvvetlerinin uygulanmasıyla başlamakta ve dokular iyice gerilene kadar devam etmektedir. Bu çekim sonucunda oluşan gerilim, distraksiyon

vektörüne paralel olarak yeni kemik formasyonunu stimule etmektedir (Samchukov, 1998).

Distraksiyon osteogenezisi transversal yöndeki mandibular yetmezliklerin düzeltilmesinde de önemli bir tedavi prosedürü olarak günümüzde kullanılmaktadır. Ortodontide distraksiyon osteogenezis tekniği ile mandibula genişletmesi:

- “V” şekilli mandibulalarda
- Ciddi derecede mandibular ön bölgedeki çapraşıklık olgularında
- Mandibulaya bağlı tek taraflı ya da çift taraflı yan çapraz kapanış olgularında
- Gömülü alt ön dişlerin sürdürülmesi gereken olgularda
- Hem alt hem de üst çenenin transversal olarak yetersiz olduğu olgularda kullanılmaktadır (Constanti, 2001).

Bu çalışmanın amacı, sonlu elemanlar metodunun biyomekanikte kullanılması halinde hesap modelinin hazırlanmasında temel aşamalarının sıralanması, ve elde edilen sonuçların geçerliliğinin tartışılması, solid ve kabuk elemanlar kullanılarak oluşturulan 3 boyutlu mandibula modellerinin biyomekanik kuvvetler altındaki mekanik tepkisinin karşılaştırılmasıdır.

## MATERYAL VE METOD

Bu çalışmada, FEM modeli, insan mandibula (alt çene kemiği) (Şekil 1) yetmezliğinde mandibulaya distraktör adı verilen (Şekil 2) ve kemiği uzatmaya yarayan bir aparatın yerleştirilmesi ile mandibulada oluşan gerilmeleri görmek amacıyla oluşturulmuştur.

Bir yapıyı FEM ile analiz etmek için, yapıyı oluşturan malzemelerin elastisite modülü ve poisson oranı gibi, malzeme özellikleri, elemanların kesit özellikleri, yükleme durumları, düğüm noktalarının koordinatları, mesnet şartlarının tanımlı olması gerekmektedir.



Şekil 1. İnsan mandibulasının üstten ve önden görünüşü.  
Figure 1. The view of human mandible from top and front side.



Şekil 2. Distraktör.  
Figure 2. Distractor.

İncelenecek yapının modeli bilgisayar ortamında gerçek boyutlarda hazırlanır ve modeli oluşturacak düğüm noktalarının yerleri tespit edilerek koordinatları hesaplanır. Elemanlar bu düğüm noktaları arasında tanımlanır. Eleman tipleri; çerçeve, kabuk yada solid olabilmektedir. Bir boyutlu elemanlar uçlarında düğüm olan doğru veya eğri elemanlarla, 2 boyutlu elemanlar çerçeve (frame) elemanlarla, yüzey elemanlar kabuklarla, 3 boyutlu elemanlar solid elemanlarla ifade edilmektedir. Sonuç olarak incelenecek yapı düğümler ve bu düğümler arasında tanımlanan sonlu sayıda elemanlara dönüştürülür. Gerçek sistemdeki mesnet şartları idealleştirilerek model üzerinde bazı düğümlere uygulanır. Tüm elemanlar için malzeme özellikleri (elastisite modülü, Poisson oranı) bir "rijitlik" matrisinde ifade edilir. Böylece elemanların dış etkilere karşı vereceği tepki ifade edilmiş olur. Tüm yapı için geçerli rijitlik matrisi eleman matrislerinin belirli bir kurala göre toplanmasıyla elde edilir. Uygulanan dış yükler ve tanımlı mesnet şartlarıyla bu matris bir denklem takımına dönüştürülür. Bu denklem takımında tüm düğümlerin x, y, z yönlerindeki hareketleri ve x, y, z eksenleri etrafındaki dönmeleri bilinmeyenlerdir. Bu denklem;

$$\{K\} \{U\} = \{P\} \quad (1)$$

şeklinde. Burada [K] sistem rijitlik matrisi, {U} bilinmeyen deplasmanlar (yer değiştirmeler), {P} dış yüklerdir. Bu denklem incelenirse yapının dış yüklerle tepkisinin bir yaya benzetildiği görülecektir ve [K] yay sabitine karşılık gelir.

Özetlenirse, verilen bir problemin sonlu elemanlar metodu ile çözmek için sırası ile aşağıdaki işlemlerin uygulanması gerekir:

1. Cismi bir sonlu elemanlar sistemi halinde "parçalama" (bölme).
2. Cismi temsil eden elemanların her birinin eleman rijitlik matrisi ve diğer özelliklerinin çıkarılması
3. Sistem rijitlik matrisi {K} ve düğümlere etkiyen dış kuvvet vektörü {P} 'nin oluşturulması.
4. {U} vektörünü tayin etmek için, belirlenmiş sınır şartlarıyla Denklem (1)'in çözümü.
5. Hesaplanan düğüm yer değiştirmeleri [U] 'dan elemanların zorlanmalarının ve gerilmelerinin hesaplanması.

### İNCELEN MANDUBLA'NIN 3 BOYUTLU MODELİNİN OLUŞTURULMASI

Hazırlanan model Selçuk Üniversitesi, Mühendislik- Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümünde Dr. Hasan Hüsnü KORKMAZ tarafından geliştirilen prosedürle

oluşturulmuştur. Sonlu elemanlar analizinde kullanılacak modeli oluşturacak noktaları tanımlamak için incelenen 22 yaşındaki erkek mandibulanın CT (Computer Tomography) görüntülerinden yararlanılmıştır. Mandibulanın CT datasını bilgisayara 3 boyutlu olarak aktarırken gerekli olacak referans noktaları sağlamak amacı ile kesiti değişmeyen plastik çubuklar mandibulanın yanına yerleştirilmiştir. Mandibuladan 1 mm. ara ile CT kesitleri alınmıştır. Elde edilen kesitler scanner ile taranarak AutoCAD çizim programına aktarılmıştır (Şekil 3).

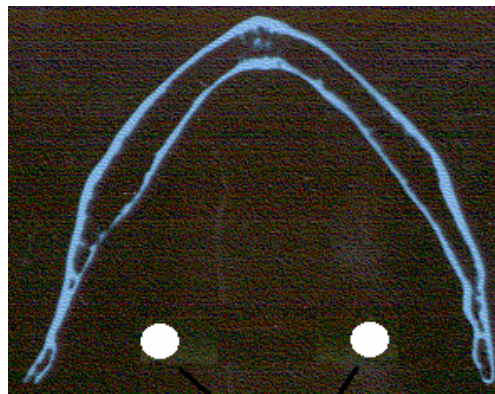
Tüm kesitlerin en dış hattından AutoCad programında çizgi ile geçilerek dış konturlar çizim dosyası haline dönüştürülmüştür. Bu yapılmadan önce şablon olarak kullanılacak yardımcı çizgiler her kesit üzerine referans kesit (plastik çubuğun kesiti) kullanılarak yerleştirilmiştir. Dış kontur çizilirken CT kesitinden belirli olan mandibulanın dış hattı ile bu düzleme yerleştirilmiş olan yardımcı çizgilerin kesişim yerleri tutulmaya çalışılmıştır. Dış kontur çizildikten sonra yardımcı çizgileri mandibula kesitinin dışında kalan parçaları budanmıştır (Şekil 4). Daha sonra bu kapalı dış kontur hattının orta çizgisini temsil eden hat tüm kesitlerde çizilmiştir (budanmadan kalan yardımcı çizgilerin ortaları birleştirilmiştir). Kabuk elemanlarla modelleme yapmak için dış konturlar kaldırılmıştır.

Elde edilen orta çizgiler daha önceden belirlenen referans noktalarından tutulmuş ve 1

mm ara ile üst üste konularak bir geometrik model oluşturulmuştur (Şekil 5).

Bu model "dxf" formatında genel amaçlı ANSYS sonlu elemanlar programına aktarılarak orta konturlar arasına kabuk elemanlar örülmüştür (Şekil 6). Her kabuk elemanın kalınlığı CT görüntülerinin üzerinden ölçülen kalınlıklara uygun olarak atanmıştır (Şekil 7). Programın özelliğinden dolayı bu kalınlıklar grafiksel olarak gösterilemediği için sonuçta elde edilen model mandibulanın ortasından geçen bir kağıt görünümündedir. Model kondil başlarından her yönde sabitlenerek mesnetlenmiştir. Solid elemanlarla modelleme yapmak için dış kontur çizgileri ANSYS sonlu elemanlar programına aktarılarak düğüm noktalarının koordinatları ve düğüm tanımlama numaraları programa tanıtılmış, solid elemanlar bu düğümler arasında kalacak şekilde tanımlanmıştır (Şekil 9). Kullanılan malzemenin elastisite modülü ve poisson oranı literatürde bulunan ortalama değerler alınmıştır (Küçükolbaşı, 2002).

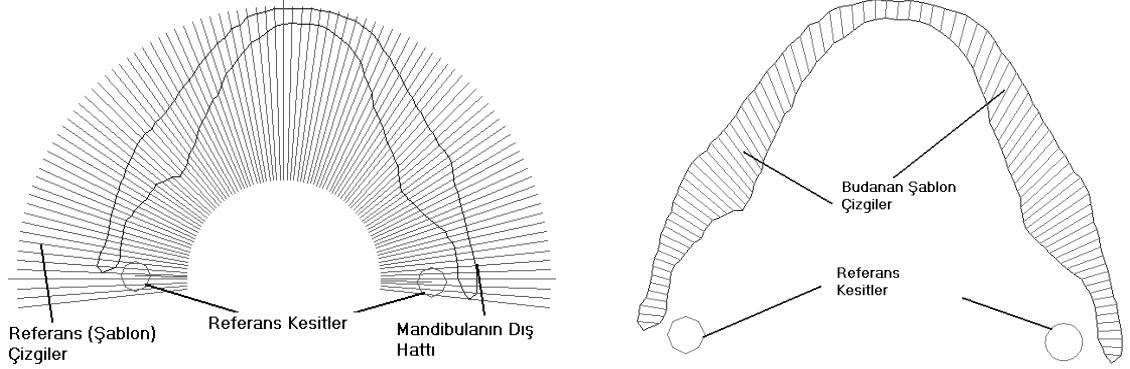
Model üzerinde kesimin yapılıp distraktörün uygulanacağı düzlem tespit edilerek düğümler arası bağ kaldırılmış ve distraktör geometrisine uygun olarak kuvvet uygulama noktaları belirlenmiştir (Şekil 9) . Kesim düzleminde istenilen deplasman elde edilinceye kadar kuvvet artırılarak gerekli kuvvetler deneme-yanılma yoluyla tespit edilmiştir.



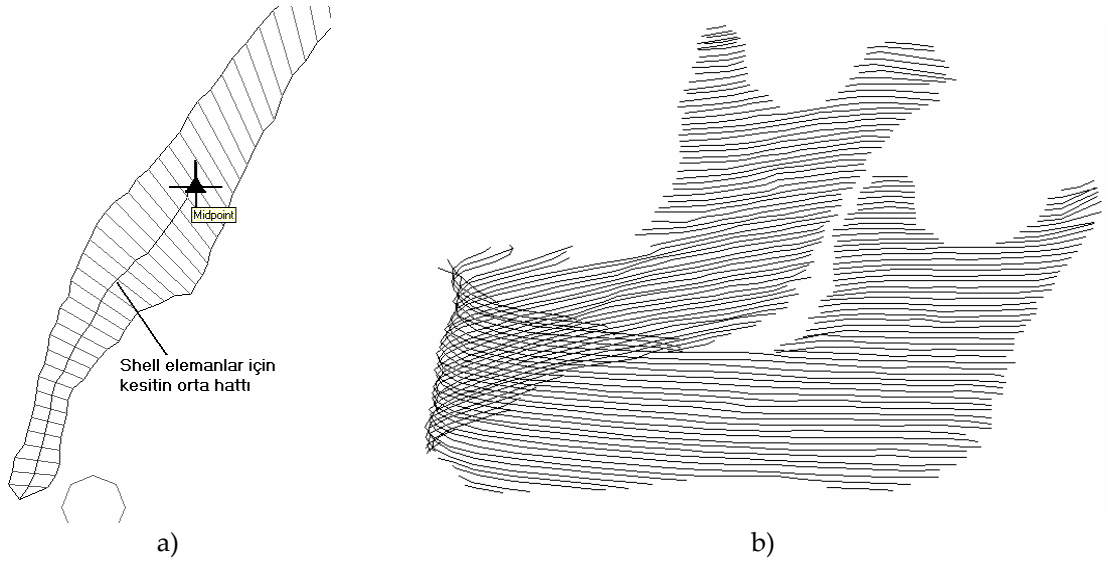
Referans olarak kullanan  
plastığın kesiti

Şekil 3. Mandibulanın 1 er mm ara ile çekilen CT görüntüsü.

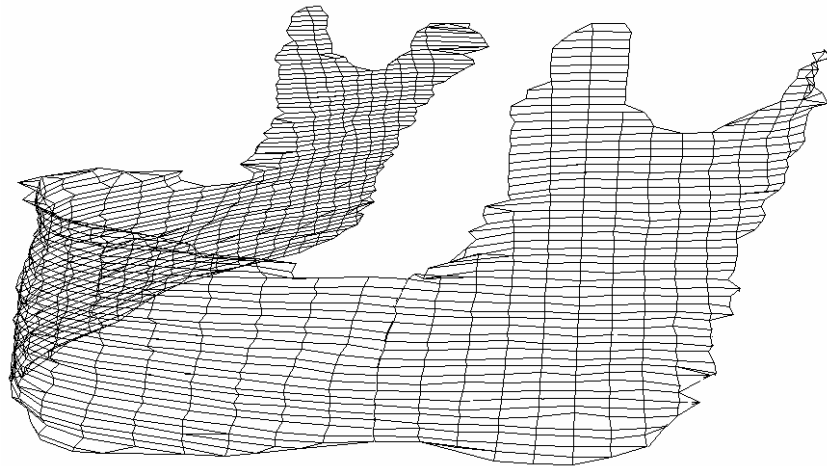
Figure 3. CT images of mandible with 1 mm interval.



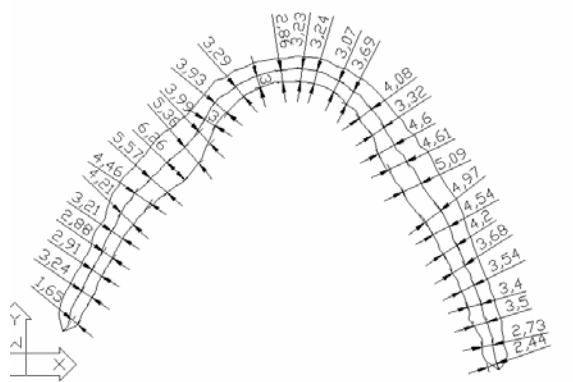
Şekil 4. Mandibulanın dış hattının Autocat programında belirlenmesi.  
Figure 4. Determination of exterior border of mandible with Autocat.



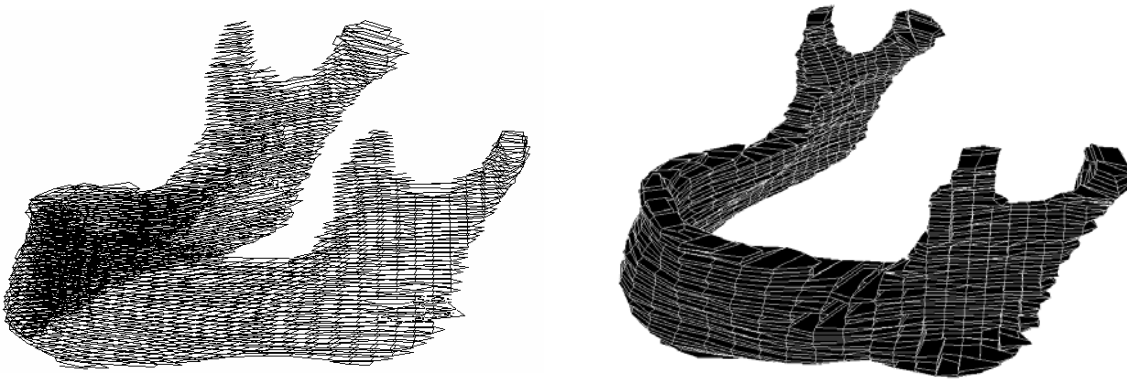
Şekil 5. Kabuk eleman modeli için kesitlerde orta hattın belirlenmesi.  
Figure 5. Determination of middle lines for shade elements.



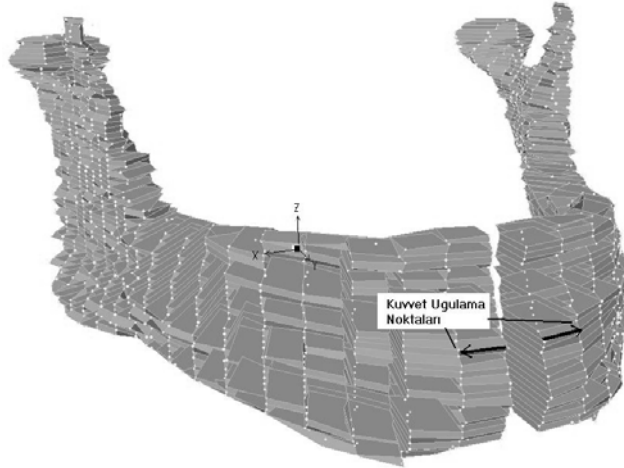
Şekil 6. Mandibulanın 3 boyutlu kabuk modeli.  
Figure 6. 3D shell model of mandible.



Şekil 7. CT kesitleri üzerinden mandibulanın kalınlık değişiminin belirlenmesi.  
Figure 7. Determination of thicknesses of mandible from CT images.



Şekil 8. Mandibulanın 3 boyutlu solid-tuğla modeli.  
Figure 8. 3D model of mandible with solid elements.



Şekil 9. Model üzerinde distraksiyonun yapılacağı kesit.  
Figure 9. Distraction section on the model.

## KABUK VE SOLİD ELEMANLARIYLA OLUŞTURULAN MODEL SONUÇLARI VE TARTIŞMA

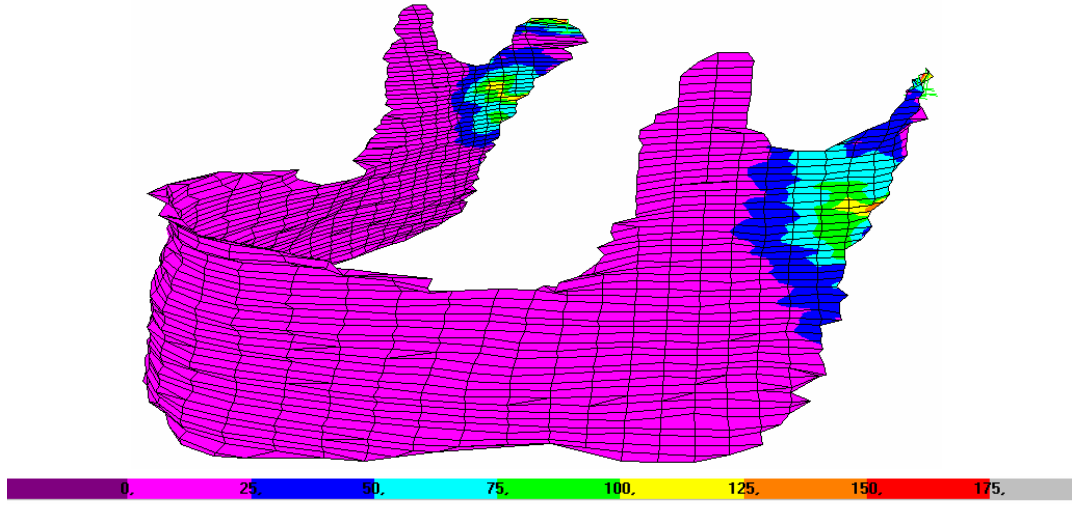
Yukarıda özetlenen şekilde hazırlanan kabuk ve solid elemanlarla oluşturulan mandibula modelleri üzerine orta hatta 10

mm'lik açılma olacak şekilde yük uygulanmıştır. Kabuk eleman modelinde elemanların kalınlıkları CT görüntülerine göre teker teker tespit edilmiş ve elemanlara atanmıştır. Solid-tuğla elemanlar ise üç boyutlu olduğu için tekrar kalınlık atamaya gerek kalmamıştır. Sonuç olarak elde edilen Von-Mises gerilme grafikleri

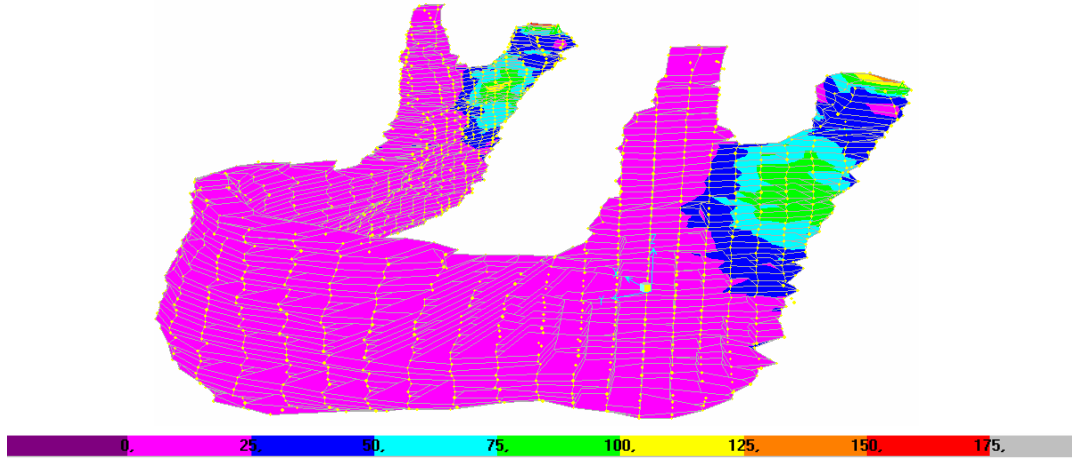


Şekil 10 ve 11’de görüldüğü gibi elde edilmiştir. İki sonuç arasında çok küçük farklılıklar olsa da sonuç olarak gerilme değerleri ve dağılımı, kritik gerilme yığılmalarının yoğunlaştığı bölgeler aynıdır. Görsel olarak solid-tuğla elemanlarla oluşturulan model daha gerçeğe yakın gibi görülse de, solid-tuğla modelin hazırlanması kabuk modele göre daha zordur. Ayrıca solid-tuğla elemanlarla oluşturulan model eğilme-

dönme etkilerini dikkate almaz. Kabuk modelde ise her düğümde 3 adet deplasman yanında 3 adet de dönme serbestlik derecesi vardır. Bu yönüyle solid-tuğla elemanlarla oluşturulan modelde daha fazla eleman kullanılması gerektiği açıktır. Bu ise hem modelin hazırlanması ve hem de çözüm zamanının artması yönünden olumsuzdur.



Şekil 10. Kabuk elemanlarla oluşturulan modelde meydana gelen gerilme dağılımları.  
Figure 10. Stress distribution on model by shell elements.



Şekil 11. Solid elemanlarla oluşturulan modelde meydana gelen gerilme dağılımları.  
Figure 11. Stress distribution on model by solid elements.

## TARTIŞMA ve SONUÇLAR

Sonlu elemanlar metodu sahip olduğu avantajlarının yanı sıra bazı dezavantajlara ve de kabullere sahiptir. Malzemelerin mekanik özellikleri çok kompleks olduğu için bazı kabullerle basitleştirme-idealleştirmeler

yapılmaktadır ve analiz bu idealleştirmelere dayanır. Bu kabuller çözüme mutlaka hatalar yüklemektedir.

İlk kabul malzemenin homojen, izotropik ve doğrusal elastik olduğudur. Fakat gerçek hayatta hiçbir malzeme tam olarak doğrusal elastik değildir. Malzemeler belli bir sınıra kadar

elastik, daha sonrada plastik deformasyon gösterirler. Ancak pratikte diş ve çene dokularını plastik deformasyona öteleyebilecek kuvvetlerin gerçekleşmesi çok zordur (Eskitaşcıoğlu,1991).

Hiçbir malzeme %100 homojen ve de izotrop değildir. Aynı cinsten iki organizmaya ait her bir dokunun iç yapısı ve izotropi özelliği dahi belli sınırlar içinde sayılamayacak kadar çok etkenle sürekli değişebilmektedir. Bu durumda malzeme değerlerini ortalama değer olarak homojen ve izotrop kabul etmek çok geniş bir popülasyon için varılan deney sonuçlarının gerçeğe yaklaşımını etkilemeyecektir. Ayrıca, özellikle biyomekanikle ilgili olarak, malzeme özellikleri ve incelenen canlı dokunun geometrik özellikleri kişiden kişiye değişmektedir.

FEM'de elde edilen analitik sonuçlar oluşturulan modele bağlıdır. Bu nedenle pek çok açıdan gerçeğe en yakın model elde edilmelidir. Bu yönden elde edilecek sonuçların genelleştirilmesi çelişkili gibi görünmektedir. Ancak Işeri ve arkadaşları farklı bir model üzerinde aynı çalışmayı yapan Tanne ve diğ. (1987) ile sonuçlarını karşılaştırmışlar ve farklar olmasına rağmen mekanik tepkinin aynı şekilde tespit edildiği sonucuna ulaşmışlardır (Iseri, 1998).

Iseri ve diğ. göre (1998) kafatası ve mandibula'nın modellenmesinde kabuk elemanların kullanılması gerektiğini çünkü bu elemanların hem membran hem de eğilme etkilerini alabileceğini, Tane (1989)'nin çalışmasında kullandığı solid (tuğla) elemanların eğilme etkisi alamayacağını söylemektedir. Bu nedenle bu çalışmada aynı CT datası üzerinde hem solid hem de kabuk elemanlarla modeller oluşturulmuş ve aynı yüklemeler uygulanmıştır. Her iki model için aynı yüklenme altında oluşan Von-Mises gerilme dağılımının benzer şekilde elde edildiği görülmektedir.

## KAYNAKLAR

- Baran İ., 1995, İki Tip Silindirik Endosteal İmplant Alt Yapı Üzerine Hazırlanmış Üç Değişik Tüberkül Eğimli Kron Tasarımlarında Uygulanan Vertikal Kuvvetlerin Oluşturduğu Gerilmelerin FEM Yöntemi ile İncelenmesi; Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Constanti G, Guerrero C, Rodriguez AM, Legan HL., 2001, Mandibular Widening by Distraction Osteogenesis; Jour. Clin. Ortho. 35:165-173,

Çalışmada mandibula, kondil başlarından tutularak yüklemeler uygulanmıştır. Fakat bu noktalar tam olarak hareketsiz değildir. Bu nedenle koronoid process bölgesinde çok az bir gerilme gözlenmiştir. Ayrıca mandibula'nin hareketini etkileyen kasların ve yumuşak dokunun varlığı da mekanik davranışı değiştirecektir. Bu nedenle kondyle başlarının böyle operasyon sırasındaki gerçek yer değiştirmesi deneysel olarak tespit edilir ve mandibula'ya bağlanan kaslar yaya benzetilerek modellenirse daha gerçekçi sonuçlara ulaşılabilecektir.

Mandibula'nin kemik formasyonunda, iç kısımdaki kemiğin daha yumuşak bir yapıya sahip olduğu bilinmektedir. Modelleme yapılırken bu doku da ayrıca modellenirse daha hassas sonuçlara ulaşılabilir.

Analizin en zor kısmı şüphesiz doğru modeli oluşturmaktır. Analiz sonucunun yorumu da iyi bir yapısal modelin hazırlanması kadar önemlidir. Sonuçların mesuliyeti ve yapıyı doğru olarak idealize etmek kullanıcının sorumluluğundadır. Genel olarak 3 boyutlu sonlu elemanlar analizi 2 boyutlu modellere göre daha gerçekçidir. Bu nedenle bu çalışmada 3 boyutlu model tercih edilmiştir.

Sonlu elemanlar analizinde analizin hassasiyeti kullanılan eleman sayısı ile doğru orantılıdır. Diğer yandan eleman sayısı arttıkça çözülmesi gereken denklem sayısı artacak ve de çözüm zamanı uzayacaktır. Bu nedenle çözüm için gerekli optimum eleman sayısı başlangıçta tespit edilmelidir.

Sonlu elemanlar çalışmalarının sonuçlarının deneysel sonuçlarla desteklenmesi ve korelasyonu gerekmektedir. Bu sonuçların gerçek değerlerle ne derece uygunluk içinde olduğu ancak deneysel çalışmalarla değerlendirilebilir.



- Eskitaşcıoğlu G., 1991, Doğal ve Protetik Restorasyonlu Dişlerde Farklı Sentrik Kontak Tiplerinde Oluşan Fonksiyonel Gerilmelerin Structural Analysis Program ile İncelenmesi; Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Iseri H. A., Tekkaya E., Öztan Ö., Bilgiç S., 1998, Biomechanical Effects Of Rapid Maxillary Expansion On The Craniofacial Skeleton, Studied By The FEM; European Journal of Orthodontics, 347-356.
- Küçükolbaşı, H., 2002, Farklı konumlarda yerleştirilen distraktörlerin aktive edildiklerinde oluşturdukları gerilmelerin sonlu elemanlar gerilme analizi yöntemi (FEM) ile değerlendirilmesi; Selçuk Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü Ağız Diş Çene Hastalıkları ve Cerrahisi Anabilim Dalı, Doktora Tezi, Konya.
- Samchukov ML, Cope JB, Harper RP, Ross JD., 1998, Biomechanical considerations of mandibular lengthening and widening by gradual distraction using a computer model; J Oral Maxillofac Surg. 56: 51-59,.
- Tanne K, Hiraga J, Kuniaki K, Yoshiaki Y, Sakudo M. 1989, Biomechanical effect of anteriorly directed extraoral forces on the craniofacial complex. A study using the finite element method; Am. J. Orthop. and Dentofac. Orthop.; 95-200-7
- Vollmer D., Meyer U., Ulrich J., Vegh A., Piffko J., 2000, Experimental and Finite Element Study of a Human Mandibula; Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery , 91-96.
- ANSYS, rev 5.5 program, Cybernet System, Tokyo, Japan

