

SONLU ELEMANLAR ANALİZİ VE DİŞ HEKİMLİĞİNDE KULLANIM ALANLARI: DERLEME

FINITE ELEMENT ANALYSIS AND AREAS OF USAGE IN DENTISTRY: REVIEW

¹*Mehmet Sinan DOĞAN, ¹Abdullah Emre KARAALİ, ¹Ayşe GÜNAY

¹Dicle Üniversitesi Dişhekimliği Fakültesi Çocuk Dişhekimliği Anabilim Dalı, DİYARBAKIR.

Özet

Bilgisayar teknolojisindeki gelişmelerle birlikte canlı dokular ve materyaller üzerinde meydana gelen stres (gerilim) ve gerinim (strain) hesaplamada sonlu elemanlar analiz (SEA) yönteminin kullanılması yaygınlaşmıştır. Bilgisayar programları aracılığı ile yapılan bu analiz yöntemi ile diğer yöntemlere kıyasla daha detaylı ve gerçeğe daha yakın sonuçlar elde edilebilmektedir.

Sonlu analiz yöntemi ile dental materyaller gibi oldukça komplike geometriye sahip materyallerin analizlerini kolaylıkla yapmak mümkündür. Bu nedenle diş hekimliği araştırmalarında günden güne yaygınlaşan bir kullanım alanına sahiptir.

Bu derlemenin amacı; sonlu eleman analiz yönteminin özellikleri, diş hekimliğindeki kullanım alanları, diğer analiz yöntemlerine göre avantaj ve dezavantajları ile ilgili genel bir bakış sunmaktır.

Anahtar Kelimeler: SEA, elastisite modülü, dental materyal.

Abstract

Finite element method (FEM) has become popular in parallel with the development of computer technology for the calculation of stress and strain on vital tissues and materials. More detailed and realistic results may be obtained with this technique as against other techniques.

It's possible to analyze easily even dental materials which have quite complex geometry via finite element method. Therefore, the usage of FEM in dental researches becomes more common day by day.

The aim of this review is to present a conspectus about the properties of FEM, areas of usage in dentistry, advantages and disadvantages as against other analysis methods.

Key words: FEM, modulus of elasticity, dental material.

Giriş

Sonlu elemanlar analizi (SEA) canlı dokular da dahil olmak üzere tüm materyallerde meydana gelen stres (gerilim) ve gerinimleri (strain) hesaplamada kullanılabilen numeretik bir analiz yöntemidir. SEA yöntemi ile analizi yapılacak canlı ya da cansız yapıların modellenmesi gerçeğe en yakın şekilde yapılarak numeretik olarak ifade edilir. Bilgisayar teknolojisindeki gelişmelerle birlikte araştırmalarda bu analiz yönteminin kullanılması da yaygınlaşmıştır. Bilgisayar üzerinde yapılan bu analiz yöntemi ile, diğer yöntemlere kıyasla daha detaylı ve gerçeğe daha yakın sonuçlar elde edilmektedir. (1, 2)

Sonlu Elemanlar Analizi (SEA), bilgisayar programları yardımı ile çeşitli

mekanik problemlere kabul edilebilir yaklaşımla çözüm arayan bir sayısal analiz yöntemidir. Canlı dokular ve organların, kuvvetler karşısında tepkilerini tespit etmek, gerilme analizi yapmak çok güç, yüksek maliyetli, riskli ve bazen de imkansızdır. (3) Bu nedenle stres analiz çalışmalarının canlı malzemenin gerçeğe yakın olarak hazırlanmış modeli üzerinde yapılması kaçınılmaz hale gelmiştir. Bir cismin üzerine gelen kuvvetlerin yoğun olduğu bölgelerin dağılımlarının görülmesi ve o cismin kuvvetler karşısında daha dirençli ve daha güçlü olabilmesi için nasıl bir yapıda olması gerektiğini önceden tespit etmek için çeşitli kuvvet analizleri yapılır. (4)

Dişhekimliğinde kullanılan kuvvet dağılımı saptama yöntemleri şunlardır:

- 1- Fotoelastik madde ile kuvvet analiz yöntemi
- 2- Kırılgan vernik kaplama tekniği ile kuvvet analiz yöntemi
- 3- Gerilim ölçer ile stres analizi
- 5- Lazer ışınları ile stres analiz yöntemi

*İletişim Adresi

Dr. Mehmet Sinan DOĞAN
Dicle Üniversitesi
Diş hekimliği Fakültesi Çocuk Diş Hekimliği A.D.
21280 Diyarbakır

E-mail: dtlider@hotmail.com

6- Termografik stres analiz yöntemi

7- Sonlu elemanlar stres analiz yöntemi (SEA) (5-8)

SEA ilk olarak 1956 yılında havacılık endüstrisinde kullanılmaya başlanmış ve günümüzde havacılık ve uzay mühendisliği, otomotiv sektörü, biyomedikal, jeoteknik, elektromanyetik, hidrolik ve nükleer enerji mühendisliği alanlarında rutin olarak kullanılmaya devam etmektedir.(9, 10) Bu yöntem sayesinde katı bir cisim olan diş incelenebildiği gibi, bir sıvı olan kan ve damarlardaki akışı da araştırılabilmektedir. (11)

Dental materyaller gibi oldukça komplike geometriye sahip materyallerin analizlerini yapmak oldukça zordur. Sonlu elemanlar analiz yöntemi, bu tür karmaşık geometriye sahip materyallerin analizlerinin kolaylıkla yapılmasına olanak sağlayan bir yöntemdir. (12, 13) 1960'ların sonunda Ledney ve Huang'ın bir diş modelini numeretik olarak oluşturması ile kullanım bulan sonlu elemanlar stres analiz yöntemi, 1970'li yıllarda Farah ve arkadaşlarının yaptığı çalışmalarla diş hekimliğinde yer edinmiştir. (14, 13, 15) Son 20 yıl içerisinde literatürde sonlu elemanlar stres analiz yöntemi ile sıklıkla karşılaşılmaktadır. (16, 17, 18, 19, 20)

Sonlu elemanlar analiz yönteminin temeli, sürekli ortamların daha küçük parçalara ayrılarak analitik şekilde modellenmesi ve böylelikle oluşan parçalar veya elemanlar ile ifade edilmesi esasına dayanmaktadır. (21, 22)

SEA yöntemi ile analizi yapılmak istenen yapı sonlu sayıdaki parçalara bölünerek kuvvet karşısındaki tepkisi sayısal olarak incelenir. Bu yöntemle analiz edilen bir yapının bir, iki veya üç boyutlu analizi yapılabilmektedir. Bilgisayar programı aracılığıyla oluşturulan modelde, belirlenen şiddet, yön ve alandaki kuvvet uygulamasına bağlı olarak ortaya çıkan şekil değişiklikleri, stres dağılımı ve şiddetleri saptanmaktadır. (1, 2)

İki boyutlu sonlu elemanlar analizi uygulama kolaylığından ötürü diş hekimliğinde pek çok çalışmada kullanılmaktadır. (23, 24, 25) İki boyutlu modelin kullanımıyla birlikte diş yapısındaki en ince tabakaların (yapıştırıcı siman, mine tabakası, marjinal uzanan porselen yapısı gibi) daha iyi modellenmesinde başarılı olduğu belirtilmiştir. Ancak iki boyutlu sonlu elemanlar modelinin yetersiz kaldığı durumlar da söz konusudur. İnsan dişi düz ve

simetrik bir yapıda değildir, aksine oldukça düzensiz bir geometriye sahiptir. Aynı zamanda diş yapısındaki farklı materyallerin dağılımı da herhangi bir simetri göstermemektedir. Bundan dolayı güvenilir bir analiz için gerçek boyutları yansıtan üç boyutlu bir model kullanılması tercih edilmelidir. (23, 24, 25)

Sonlu eleman stres analiz yöntemi özellikleri (15)

1. Karmaşık geometriye sahip yapılar için uyumluluk
2. Değişik yapısal problemler için uyumluluk
3. Teorik temellerin güvenilirliği
4. Doğruluğun güvenilirliği
5. Hesaplama verimliliği

Literatür araştırmaları, diş hekimliğinde geçmişten günümüze sonlu elemanlar analiz yönteminin farklı alanlarda kullanıldığını göstermiştir. Bunlardan başlıcaları:

❖ **Oklüzal kuvvetler altında diş dokusu ile dental materyaller arasındaki stres ilişkisi:** Dentin ve mine üzerindeki stres birikimi, yapılacak olan restorasyonun başarısızlığı açısından önemlidir. Kullanılacak olan materyallerin elastik özelliklerinin önceden bilinmesi, oklüzal kuvvetler altında restorasyonun başarısızlığını önlemeye yardımcı olur. (26)

Ayrıca oklüzal kuvvetler altında restorasyonlar ile birlikte doğal dişin biyomekanik dengesinde değişiklik gözlenmektedir. Özellikle rezin esaslı kompozit materyallerle yapılan restorasyonlarda polimerizasyon büzülmesi ve döngüsel yükler restorasyon bağlantısında streslere neden olabilmektedir. Stresler aynı zamanda adeziv yüzey, mine ve dentin kısımlarını da etkileyebilmektedir. Düşük modüllü restoratif materyallerin kullanılması ya da daha esnek adeziv materyallerin kullanılması stres miktarını azaltmaktadır ve böylece kompozit restorasyonların başarısızlık ihtimalleri düşmektedir. Kullanılan adeziv materyallerin kalınlıklarının da bu süreçte etkin oldukları gözlemlenmiştir. Bu amaçlar doğrultusunda SEA ile elde edilen modeller sayesinde kuvvet altında yeni geliştirilen dolgu maddeleri ile diş dokuları arasında oluşabilecek stres miktarı ölçülebilmektedir. (27)

Ayrıca diş ile restorasyon arasında oluşacak stres birikiminin lokalizasyonu SEA modelleme ile belirlenebilmektedir. Bu şekilde farklı restorasyon maddeleri arasında bilgisayar ortamında stres miktarı ölçüp kıyaslanabilmektedir. (28)

❖ **Dental seramik kronlarda direnç ve kırılabilirliğin incelenmesinde:** Dental seramik restorasyonlarda meydana gelen çatlakların sebep olduğu başarısızlıkların incelenmesi amacı ile bilgisayar ortamında klinik koşulları taklit eden modeller elde edilebilmekte ve sonlu elemanlar yöntemi ile analiz yapılabilmektedir. Bu şekilde, seramik restorasyonun tipine göre çatlakların daha çok nerede meydana geldiği belirlenebildiği ve engel olunabilmesi için hangi tip seramik restorasyonun kullanılması gerektiği SEA ile tespit edilebilmektedir. (29)

❖ **Post ve kanal dolgu maddeleri:** Post- kor sistemlerin uzun dönem başarısı; post materyaline, uzunluğuna, kanal duvarlarının kalınlığına, ferrule etkisi olup olmadığına ve diş üzerine gelen yük miktarına bağlıdır. Sonlu elemanlar analiz yöntemi ile hangi post sisteminin dişte en iyi dayanıklılık sağladığı belirlenebilmektedir. Kullanılan post materyallerinin elastisite modülüsleri, post restorasyonlarının stresi dişin tüm yüzeyine dağıtabilmesi açısından önemlidir. Sonlu elemanlar analiz yöntemi ile materyalin elastik özellikleri göz önüne alınarak uygun testler yapılabilmektedir. (30)

❖ **Oral ve maksillofasial yapıların mekaniği ve cerrahisi:** Maksiller protraksiyon esnasında implantların lokalizasyonu ile ortopedik yüklerin yönleri yer değiştirme ve stress dağılımı açısından önemlidir. Bu durum iskeletsel sınıf 3 malokluzyona sahip hastaların prognozlarını etkilemektedir. 3 boyutlu sonlu elemanlar analiz modeli maksiller protraksiyonu taklit edebilir ve kraniomaksiller yapının stress dağılımı ve yer değiştirmesini belirleyebilmektedir. (31)

Ayrıca üst çene genişletme tedavisinin etkileri 3 boyutlu sonlu elemanlar yöntemi ile incelenebilmektedir Farklı dizaynlarda palatal genişleticiler ile yapılan genişletmelerin sonuçları 3 boyutlu analiz metodu ile tespit edilebilmektedir. (32)

❖ **Maksilla ve mandibula kırıkları ile bunların fiksasyonu, osteotomi:** Çene kırıklarında kullanılacak plak tipi ve sayısı sonlu elemanlar analiz yöntemi plaklama sistemini model üzerinde taklit etmek amacı ile belirlenebildiği bildirilmiştir. (33)

Orta yüz travmaları sonucunda oluşan kırıklar ile ilgili araştırmalar kadavra çalışmaları ve sonlu elemanlar yöntemi ile bilgisayar destekli modelleme ile yapılabilmektedir. Kadavra çalışmalarının sonlu elemanlar stress analizine göre daha kısıtlıdır. Sonlu elemanlar analiz yöntemi aracılığı ile orbital duvarlar izole edilip belirlenmiş objeler ile travma modeli oluşturulduktan sonra analizler yapılabilmektedir. (34)

❖ **Temporomandibular eklem mekaniği:** Geniş çene açma hareketi bir alt çene hareket türüdür. Bu hareket kas ve ligamentlerin pozisyon sınırlarını yansıtır. Bunun yanında, çiğneme ve konuşma esnasında kaçınılmaz hareket olarak da kabul edilir. Çenenin maksimum açıklığında kondiler proses artıklar tüberkülün altında konumlanır. Temporomandibular eklem her hangi bir kısımdaki stres birikimi kompleks ve değişkendir. Genel olarak bu durum ses, ağrı ya da başka semptomlar olarak ortaya çıkar. Temporomandibular eklem geniş çene açılımlarındaki karakteristik biyomekaniğini kesin olarak anlayabilmek, hasarları önlemek ve klinik tedavilere yön verebilmek açısından önemlidir. Temporomandibular eklem biyomekaniğini anlamak amacı ile sonlu elemanlar analiz yöntemi önemlidir. Sonlu elemanlar analiz yöntemi, temporomandibular eklem ve çevreleyen dokuların biyomekaniğini, çene açma hareketlerini taklit ederek anlayabilme olanağı sağlamakta faydalı olmaktadır. (35)

❖ **İmplant materyalleri, mini vida ve plak:** Dental implantlar ömürleri boyunca fizyolojik çiğneme ya da parafonksiyonel kuvvetlere karşı koymak zorundadırlar. Parafonksiyonel yükler dental implantlara ekstra yük bindirmekte ve bunun sonucunda yorgunluk meydana gelmektedir. Oluşacak bu yorgunluğun nasıl azaltılabileceği için yapılan çalışmalardan biri de sonlu elemanlar analiz yöntemidir. (36)

❖ Ortodontik tedaviler, dişlerin hareket ettirilmesi, ortodontik apareyler:

Ortodontik apareylerin yapıştırılması tedavinin gidişatı, hızı ve hasta konforu açısından önemlidir. Apareylerin sağlam bir şekilde yapışmasını sağlamak amacı ile doğru bir adeziv materyal kullanılmalıdır aksi takdirde rebonding işlemi sebebi ile tedavi süresi uzayacaktır. Arzulanan diş hareketlerinin sağlanması için iyi bir yapıştırma materyali ve tekniği seçmek gerekmektedir. Sonlu elemanlar yöntemi ile oluşturulan modelin herhangi bir kısmına ve herhangi bir yönde kuvvetler uygulanarak yer değiştirme olup olmadığı kontrol edilebilmekte ve materyalin stres/gerilme oranları belirlenebilmektedir. (37)

❖ Dolgu materyalleri: Sonlu elemanlar analiz yöntemi kullanılarak dolgu materyallerinde kuvvet altında oluşacak stresin miktarı ve yeri incelenebildiği gibi hacimsel değişimler belirlenebilmektedir. (38)

❖ Kron ve köprü protezleri: Çiğneme ve ısırma kuvveti altında farklı maddelerden yapılmış olan kron-köprü protezlerinde oluşan stres miktarı ve yeri sonlu elemanlar analizi ile belirlenebilmekte ve karşılaştırılabilmektedir. (39)

Sonlu elemanlar stres analiz yönteminin sağladığı başlıca avantajlar şunlardır:

1. Düzgün geometrisi olmayan katılar ve farklı malzeme özelliklerine sahip karmaşık yapılara kolaylıkla uygulanabilir
2. Gerçeğine daha yakın özelliklerde modelleme yapılabilir
3. İstenilen sayıda malzeme kullanılarak herhangi bir malzemeye gerek duymadan bilgisayar ortamında yapının matematiksel özelliklerinden faydalanarak modelleme yapılabilmesi
4. Stres, gerinim ve yer değiştirmelerin hassas bir şekilde tespit edilebilmesi. (40-42)

Çok sayıda avantajına rağmen sistemin bazı dezavantajları da mevcuttur.

Bu dezavantajlarından bazıları şunlardır:

1. Modelleri oluşturulan malzemenin izotropik, homojenik ve doğrusal elastisite gibi özelliklerinin varsayımları malzemenin tam bir temsili değildir. (40, 41)
2. Modellenen yapılar ağız içinde statikten ziyade dinamik yükler altındadır. Yapıların analizi bu yöntem kullanılarak dinamik olarak gerçekleştirilebilir ancak uygulama biraz zorlaşacaktır. (41)
3. Yöntemin gerçeği yansıtabilmesi malzemenin sisteme tanıtılan fiziksel özelliklerinin doğruluğuna bağlıdır. Bu nedenle sisteme bilgi aktarımı son derece hassas yapılmalıdır. Aksi takdirde çalışmadan elde edilecek sonuçların doğruluğu tartışılır olacaktır. (40-42)

Konu ile ilgili Temel Kavramlar:

Stres (gerilim): Herhangi bir cisme kuvvet uygulandığında bu kuvvete karşı bir direnç gelişir. Dış kuvvete içeriden uygulanan tepki bu kuvvete eşit ancak zıt yöndedir. Her iki kuvvet cismin tüm alanı üzerinde dağılır. Buna göre cismin içindeki stres, birim alana gelen kuvvet olarak ifade edilir. (43, 44)

Strain (gerinim): herhangi bir cisme gerinim uygulandığında cismin her biriminde birim uzunlukta değişim meydana gelir. Bu değişime gerinim adı verilir. Herhangi bir ölçü birimi yoktur. Stres ve gerinim birbirinden farklı niceliklerdir. Stres yönü ve büyüklüğü olan bir kuvvet, gerinim ise bir değerdir. (43, 44)

Stres ve gerinim tipleri:

1. Çekme stresi: Bir yapıyı uzatmaya çalışan kuvvete karşı olan strestir.
2. Basma stresi: Bir yapıyı sıkıştırmaya çalışan kuvvete karşı olan strestir
3. Makaslama stresi: Bir yapının bir kısmı diğer kısmına paralel olarak kaydırılarak büküldüğü yada deforme edildiğinde ortaya çıkan strestir. (43, 44) Uygulanan kuvvetler sonucunda oluşan stresler iki grupta toplanır. Normal stresler (çekme ve basma stresleri) 'σ' sembolü ile ifade edilir. Makaslama stresleri ise 'τ' sembolü ile ifade edilir. Üç boyutu stres elemanın x, y ve z düzlemlerine bir normal ve iki makaslama stresi etki gösterir. (45)

Makaslama stresleri, $\tau_{xy} = \tau_{yx}$, $\tau_{yz} = \tau_{zy}$, $\tau_{xz} = \tau_{zx}$ olarak ifade edilir. Üç boyutlu stres elemanının stres durumu bu üç bileşenle ifade edilir. (45)

Elastisite modülü: En basit ifadeyle stresin gerinime oranıdır. Young modülüsü olarak da bilinir. Elastisite modülü arttıkça cismin rijiditesi de aynı oranda artış gösterir. (43, 44)

Poisson oranı: Elastik sınır içerisinde yüklemeye dik yöndeki gerinimin yükleme yönündeki gerinime oranıdır. (43)

Asal stres: Bir üç boyutlu elemanda, makaslama stres bileşenleri sıfır olduğu durumda oluşan normal streslere asal stresler adı verilir. Maksimum, orta ve minimum olmak üzere 3 tip asal stres vardır. (45)

Von Mises stres: Çekilebilir özelliği olan maddeler için şekil değişiminin başlama anıdır ve 3 asal stres değerleri ile hesaplanır. Model üzerindeki stres yoğunluğu ve dağılımını değerlendirmeyi sağlar. (44, 45)

Sonlu elemanlar analizi 3 aşamada gerçekleştirilir:

1- Hazırlık Safhası (Preprocessing): Analizin yapılabilmesi için ilk olarak yapının geometrik modelinin oluşturulması gerekmektedir. Model oluşturulduktan sonra alan elemanlara bölünür ve bir ağ modeli oluşturulur. Sonlu elemanlar metodunu kullanarak yapılan bir analiz işleminde ağ oluşturma işlemi sonlu elemanlar metodunun en önemli kısmını oluşturur. Ağ oluşturma işlemi ile düğüm noktalarının ve elemanların koordinatları oluşturulur. Elemanların yapısı mümkün olduğunca basit olmalıdır. Sonuçta cisim, sonlu elemanlar ve onları birbirine bağlayan düğümlerden oluşan bir sistemle yer değiştirmiş olacaktır. Metodun çözümlenmesinde bundan sonraki adım, cismi temsil eden elemanların her biri için eleman matrislerini (element stiffness matrix) tanımlamaktır. Daha sonra eleman matrisleri, parçalara ayrılmış cismin tamamına ait "genel matrisi" (overall=global stiffness matrix) oluşturmak üzere toplanır. Bu toplamada, cismin sonlu eleman modelindeki bütün düğümlerde kuvvetlerin dengesi ve yer değiştirmelerin sürekliliği sağlanır. Bu aşamada

Cilt / Volume 16 · Sayı / Number 2 · 2015

iç kuvvetleri içeren denklemler oluşturulmuştur ancak sınır koşulları (basınç, ısı) dahil edilmemiştir. Sistem denklemleri oluşturulduktan sonra sınır koşulları eklenir. Sınır koşullarını oluşturma var olan terimlere yenilerini ekleyerek veya denklemlerdeki terimlerin yerlerini sağa veya sola doğru kaydırarak gerçekleştirilir. Yer değiştirmelerden de değişimler ve zorlanmalar hesaplanabilir.

2- Çözüm Safhası: Doğrusal veya doğrusal olmayan cebirsel denklemler analitik olarak çözülebildikleri gibi sayısal analiz teknikleriyle bilgisayarda üzerinde de çözülebilmektedir. Malzeme ile ilgili olarak değişik yer değiştirme miktarı veya ısı transferi problemleri ve klasik dalga yayılması problemleri bu denklemlerin sıkça kullanıldıkları alanlardır.

3- Sonuçların değerlendirilmesi safhası: Bu aşamada denklemlerin çözümü tablolar, resimler veya grafikler aracılığı ile sergilenmektedir. (46-48)

Sonlu Elemanlarda Kullanılan Bilgisayar Yazılım Paketleri

Bugün kullanılan sonlu elemanlar analiz programları temelde benzemekle birlikte fonksiyon açısından birbirlerine üstünlükleri vardır. Dişhekimliğinde sonlu elemanlar analizlerinde sık kullanılan programlar SAP 80, SAP 86, SAP 90, ANSYS, NASTRAN, IDEAS, PAFEC 75, MARC VE PATRAN, SOLIDWORKS, PROENGINEER gibi yazılımlardır. (23, 24, 25)

Kaynaklar

1. Sonugelen M, Artunç C. Ağız Protezleri ve Biyomekanik In: Proceedings of the.: Ege Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi Yayınları, 2002: 1-11
2. Geng JP, Tan KB, Liu GR. Application of finite element analysis in implant dentistry: a review of the literature. J Prosthet Dent 2001; 85: 585-98.
3. Magne P. Efficient 3D finite element analysis of dental restorative procedures using micro-CT data. Dental materials, 2007;23:539-548.
4. <http://library.cu.edu.tr/tezler/8565.pdf>
5. Taşkinsel, E., & Gümüş, H. Ö. (2014). Sonlu Elemanlar Stres Analizi Ve Restoratif Diş Hekimliğinde Kullanımı. Atatürk Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi Dergisi, 8(8).
6. Veziroğlu F. Alveolar distraksiyon sonrası yerleştirilen üç farklı tip implantın çevre dokulara etkisinin üç boyutlu modelleme ve sonlu elemanlar analizi ile incelenmesi. Doktora tezi, Gazi Üniversitesi Dişhekimliği Fakültesi, Ağız, Diş, Çene Hastalıkları ve Cerrahisi Anabilim Dalı, Ankara, 2005.

7. Çalış AC. Maksiller posterior bölgede ileri derecede kemik atrofisi görölen durumlarda farklı tasarımlarda implant kullanımının üç boyutlu sonlu elemanlar stres analizi yöntemi ile incelenmesi. Doktora tezi, Hacettepe Üniversitesi Dişhekimliği Fakóltesi, Protetik Diş Tedavisi Anabilim Dalı, Ankara, 2006.
8. Akman H. Mandibulanın sagittal split osteotomisinde kullanılan değişik fiksasyon materyallerinin sonlu elemanlar stres analiz metodu ile incelenmesi. Doktora tezi, Ankara Üniversitesi Dişhekimliği Fakóltesi, Ağız, Diş, Çene Hastalıkları ve Cerrahisi Anabilim Dalı, Ankara, 2002.
9. Srirekha A, Bshetty K. Infinite to finite: an overview of finite element analysis. *Indian J Dent Res* 2010; 21: 425-32.
10. Shetty P, Hegde AM, Rai K. Finite element method - an effective research tool for dentistry. *J Clin Pediatr Dent* 2010; 34: 281-5.
11. Yaman SY. Sonlu elemanlar yöntemi ve dişhekimliğinde uygulamalar Atatürk Üniversitesi Dişhekimliği Fakóltesi Dergisi 1995; 1:87-96.
12. Güler MS, Sen S, Bayındır YS, Güler Ç. İnsan dişi kaplamalarında kullanılan farklı özelliklerdeki yapıştırıcı simanların gerilme etkilerinin sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmesi. *Atatürk Üniv Diş Hek Fak Derg* 2012; 22: 31-9
13. Baiamonte T, Abbate MF, Pizzarello F, Lozada J, James R. The experimental verification of the efficacy of finite element modeling to dental implant systems. *J Oral Implantol* 1996;22:104-10.
14. Ebrahimi F. Finite element analysis-new trends and developments, *Intech*, 2012, s:5-20.
15. Moratal D. Finite element analysis, *Sciyo*, 2010, s:43-103.
16. Geng JP, Tan KB, Liu GR. Application of finite element analysis in implant dentistry: A review of the literature. *Journal of Prosthetic Dentistry* 2001;85:585-98.
17. Wakabayashi N, Ona M, Suzuki T, Igarashi Y. Nonlinear finite element analyses: Advances and challenges in dental applications. *J Dent*. 2008; 36:463-71.
18. Holmgren EP, Seckinger RJ, Kilgren LM, Mante F. Evaluating parameters of osseointegrated dental implants using finite element analysis-a twodimensional comparative study examining the effects of implant diameter, implant shape, and load direction. *J Oral Implantol* 1998;24:80-88.
19. Mackerle, J. Finite Element Modelling and Simulations in Dentistry: A Bibliography. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering* 2004; 7: 277-303.
20. Eskitařođlu G, Yurdukoru B. Dişhekimliğinde sonlu elemanlar stres analiz yöntemi. *A Ü Diş Hek Fak Derg* 1995; 22:201-5.
21. Geng, Jian-Ping, Keson BC Tan, and Gui-Rong Liu. "Application of finite element analysis in implant dentistry: a review of the literature." *The Journal of prosthetic dentistry* 85.6 (2001): 585-598.
22. Craig R (1997) *Restorative Dental Materials*, 10th Ed, The C.V, Mosby Co., St.Louis.
23. COELHO, Carla Santana de Miranda, et al. "Finite element analysis of weakened roots restored with composite resin and posts." *Dental materials journal* 28.6 (2009): 671-678.
24. Darendeliler S, Darendeliler H, Kınođlu T (1992) Analysis of a Central Maxillary Incisor by Using a Three-Dimensional Finite Method, *J Oral Rehab*,19,371-383.
25. Magne P, Douglas WH (1999) Designing Optimization and Evaluation of Bonded Ceramics for the Anterior Dentition: A Finite-Element Analysis, *Quintessence Int*,30,661-672.
26. Wayne, J. S., Chande, R., Porter, H. C., & Janus, C. (2014). Effect of restoration volume on stresses in a mandibular molar: A finite element study. *The Journal of prosthetic dentistry*, 112(4), 925-931.
27. Ausiello, P., Apicella, A., & Davidson, C. L. (2002). Effect of adhesive layer properties on stress distribution in composite restorations—a 3D finite element analysis. *Dental Materials*, 18(4), 295-303.
28. Ausiello, P., Apicella, A., Davidson, C. L., & Rengo, S. (2001). 3D-finite element analyses of cusp movements in a human upper premolar, restored with adhesive resin-based composites. *Journal of biomechanics*, 34(10), 1269-1277.
29. Guazzato, M., Proos, K., Quach, L., & Swain, M. V. (2004). Strength, reliability and mode of fracture of bilayered porcelain/zirconia (Y-TZP) dental ceramics. *Biomaterials*, 25(20), 5045-5052
30. Dejak, B., & Mlotkowski, A. (2011). Finite element analysis of strength and adhesion of cast posts compared to glass fiber-reinforced composite resin posts in anterior teeth. *The Journal of prosthetic dentistry*, 105(2), 115-126.
31. Yan, X., He, W., Lin, T., Liu, J., Bai, X., Yan, G., & Lu, L. (2013). Three-dimensional finite element analysis of the craniomaxillary complex during maxillary protraction with bone anchorage vs conventional dental anchorage. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 143(2), 197-205.
32. Lee, S. C., Park, J. H., Bayome, M., Kim, K. B., Araujo, E. A., & Kook, Y. A. (2014). Effect of bone-borne rapid maxillary expanders with and without surgical assistance on the craniofacial structures using finite element analysis. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 145(5), 638-648.
33. Aquilina, P., Chamoli, U., Parr, W. C., Clausen, P. D., & Wroe, S. (2013). Finite element analysis of three patterns of internal fixation of fractures of the mandibular condyle. *British Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, 51(4), 326-331.
34. Schaller, A., Voigt, C., Huempferner-Hierl, H., Hemprich, A., & Hierl, T. (2012). Transient finite element analysis of a traumatic fracture of the zygomatic bone caused by a head collision. *International journal of oral and maxillofacial surgery*, 41(1), 66-73.
35. Sun, M., Yang, J., Zhou, R., Li, N., Xia, J., & Gu, F. (2015). Mechanical analysis on individualized finite element of temporal-mandibular joint under overlarge jaw opening status. *International journal of clinical and experimental medicine*, 8(6), 9046.
36. Prados-Privado, M., Prados-Frutos, J. C., Manchón, Á., Rojo, R., Felice, P., & Bea, J. A. (2015). Dental Implants Fatigue as a Possible Failure of Implantologic Treatment: The Importance of Randomness in Fatigue Behaviour. *BioMed Research International*, 2015.
37. Avila, A. L., Hecke, M. B., de Oliveira Franco, A. G., Vasco, M. A., Oliveira, D. D., & Tanaka, O. M. (2013). Comparative analysis of adhesive failure of orthodontic resins: An in vitro mechanical test with the finite element method. *European Journal of General Dentistry*, 2(2), 124.
38. Tantıroğın, D., Pfeifer, C. S., Amini, A. N., & Versluis, A. (2015). Simple optical method for measuring free shrinkage. *Dental Materials*, 31(11), 1271-1278.
39. Dejak, B., Mlotkowski, A., & Langot, C. (2012). Three-dimensional finite element analysis of molars with thin-walled prosthetic crowns made of various materials. *Dental Materials*, 28(4), 433-441.
40. Pepper, Darrell W., and Juan C. Heinrich. *The finite element method: basic concepts and applications*. Taylor & Francis, 2005.
41. Oehlers, Deric J., Rudolf Seracino, and Michael F. Yeo. "Effect of friction on shear connection in composite bridge beams." *Journal of Bridge Engineering* 5.2 (2000): 91-98..
42. SAĞASEN HLEM. (2000). İçi boş silindır (hollow cylinder) implant destekli overdenturelarda iki üst yapı türünün kemikteki gerilme dağılımına etkileri. Doktora Tezi, Gazi Üniv. Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Protetik Diş Tedavisi Anabilim Dalı, Ankara
43. CRAIG R. (1997). *Restorative Dental Materials*, 10th Ed, The C.V, Mosby Co., St.Louis.
44. O' BRIEN WJ (1997). *Dental Materials and Their Selection*, 2nd Ed., Quintessence Publishing Co., ABD.
45. Shigley, Joseph Edward. *Shigley's mechanical engineering design*. Tata McGraw-Hill Education, 2011.

46. Burnett, SD. FEM From Concepts to Application , Addison-Wesley Publishing Company, 1988.
47. Öcal T. Boyun Omur Kırıklarının Bilgisayar Ortamında Modellenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilimdalı, Bursa, 2001.
48. Chang, S. H., Lin, C. L., Hsue, S. S., Lin, Y. S., & Huang, S. R. (2012). Biomechanical analysis of the effects of implant diameter and bone quality in short implants placed in the atrophic posterior maxilla. Medical engineering & physics, 34(2), 153-160.