



Aydın Dental Journal

Journal homepage: <http://dergipark.ulakbim.gov.tr/adj>
DOI: 10.17932/IAU.DENTAL.2015.009/dental_v010i2007



Sonlu Elemanlar Analizi ve Endodontideki Uygulamaları

Finite Element Analysis and Appliances in Endodontics

Alper Kabakçı^{1*}, Ayça Yılmaz²

ÖZET

Sonlu Elemanlar Analizi veya Sonlu Elemanlar Yöntemi, bir yapının sonlu sayıda küçük elemana bölünmesi prensibine dayanır. Tasarım optimizasyonunda ve yapısal analizde yaygın olarak kullanılan, ilk olarak havacılık endüstrisinde karmaşık uçak gövdesi yapılarındaki gerilimi incelemek için ortaya çıkan sofistike bir mühendislik aracıdır. Belirli bir soruna sayısal çözüm bulan bu yöntem karmaşık mekanik sistemlerdeki gerilimleri ve gerinimleri analiz etmek için kullanılır. Endodontik amaçlı kullanımda diş ve çevre dokuların ve kullanılan materyallerin mekanik özelliklerinin matematiksel dönüşümünü ve analizini sağlar. Ağırlıklı olarak materyallerin ve dokuların in vivo olarak ölçülemeyen mekanik yönlerini saptamak için yararlıdır. Çeşitli avantajları vardır, gerçek modeller üzerinde yapılan çalışmalarla karşılaştırılabilir ve testler doğrulukla ve etik kaygılar olmadan tekrarlanabilir. Bu makalede Sonlu Elemanlar Analizi yöntemi hakkında bilgi vermek ve bu konuda endodonti alanında yapılan çalışmaların derlenmesi amaçlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Dental stres analizi, Endodonti, Sonlu Elemanlar Analizi

ABSTRACT

Finite Element Analysis or Finite Element Method is based on the principle of dividing a structure into a finite number of small elements. Widely used in design optimization and structural analysis, it is a sophisticated engineering tool that first emerged in the aerospace industry to study stress in complex airframe structures. This method, which finds a numerical solution to a specific problem, is used to analyze stresses and strains in complex mechanical systems. In endodontic use, it provides mathematical transformation and analysis of the mechanical properties of teeth and surrounding tissues and the materials used. It is mainly useful for detecting mechanical aspects of materials and tissues that cannot be measured in vivo. It has several advantages, it is comparable to studies on real models, and tests can be repeated with accuracy and without ethical concerns. This manuscript introduce the finite element analysis and reviews the the studies carried out in the field of endodontics on this subject.

Keywords: Dental Stress Analysis, Endodontics, Finite Element Analysis

¹İstanbul Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye

²Endodonti Anabilim Dalı, Diş Hekimliği Fakültesi, İstanbul Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

*Sorumlu Yazar: Alper Kabakçı, e-posta: alperkabakci@gmail.com, ORCID: 0000-0001-8985-1423, İstanbul Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye

Giriş

Doğadaki her fenomen; biyolojik, jeolojik veya mekanik olsun, fizik yasalarının yardımıyla, cebirsel, diferansiyel veya integral denklemler ile tanımlanabilir. Sonlu Elemanlar Analizi (SEA) veya Sonlu Elemanlar Yöntemi, bir yapıyı analiz etmek için düğüm adı verilen köşe noktaları ile birbirine bağlı sonlu sayıda küçük elemana bölme prensibine dayanan bilgisayar tabanlı sayısal bir yöntemdir.¹⁻⁴ Her elemanın mekanik davranışı, düğümlerin yer değiştirmesi olarak gözlemlenebilir. Bu düğümler, belirli yüklemeye koşullarına tabi tutulduğunda, modelin temsil ettiği yapıya benzer davranışlar gösterir. Bilgisayar analizi yapıldığında, tüm kuvvetleri ve düğümlerin yer değiştirmesini ilişkilendirmek için eşzamanlı olarak birbirine bağlı çok sayıda denklem çözülür. Buradan her elemandaki ve tüm yapıdaki gerilme ve gerinim değerlendirilebilir.⁵ Bu tarz sayısal teknikler, doku tepkilerinin ve dokular arası etkileşimlerin daha iyi anlaşılmasını sağlayabilir.^{5,6}

Dış kuvvetlere karşı gerilim ve gerinimi insan dokuları üzerinde ölçmek imkansız olduğu ve etik kaygılardan dolayı materyallerin insan dokuları üzerindeki mekanik etkilerini değerlendirmek oldukça zor olduğu için bu yöntem oldukça kullanışlıdır.^{5,7,8} Ortamdaki değişkenlerin etkinliği bilimsel olarak değerlendirilebilir ve doğrulanabilir.⁹

Sonlu elemanlar endodontide genellikle diş ve periodontal dokular üzerinde ise mekanik ve termal gerilimin incelenmesinde ya da kullanılan materyallerin mekanik özelliklerinin karşılaştırılmasında kullanılır.

Bu çalışma Sonlu Elemanlar Analizi ve endodontideki uygulama alanlarına odaklanmaktadır.

Sonlu Elemanlar Analizinin Tarihçesi

Bu yöntemi 1940'ların başında biyomekanik sisteme mutlak çözüm elde etmede hesaplama prosedürlerini en aza indirmeyi amacıyla matematikçi Richard Courant geliştirmiştir.¹⁰ Teorinin kökleri, ilk olarak 1909'da tanıtılan Ritz sayısal analiz yöntemine dayanmaktadır.¹¹ Turner ve ark., 1956'da havacılık mühendisliğinde bu sayısal analizlerin daha geniş bir tanımını geliştirerek bu yöntemi tanımlamaya çalıştılar.¹² Ioannis Argyris ve R.W Clough, 1960 yılında 'Sonlu Eleman' terimini icat ettiler.¹³ Diş hekimliğinde ilk kez Thresher ve ark. tarafından fotoelastik gerilim testinin yerini alması amacıyla kullanılmıştır.¹⁴ Farah ve ark. 1974 yılında

restorasyon yapılmış bir molar dişteki gerilim dağılımını incelemiştir.¹⁵ Weinstein ve ark., 1976 yılında implant ve komşu kemik üzerindeki yükleri değerlendirmek için bu tekniği kullanmışlardır.¹⁶ O zamandan beri, bu tekniğin evrimi çok hızlı ve sofistike bir ölçekte ve büyük ölçekli yapısal sistemin analizinde gözlenmiştir.^{5,17,18}

Analizin Aşamaları

Sonlu Elemanlar Analizinin aşamaları 1'de belirtilmiştir.

İşlem Öncesi

Bu aşamada materyal özellikleri atanır.^{5,17}

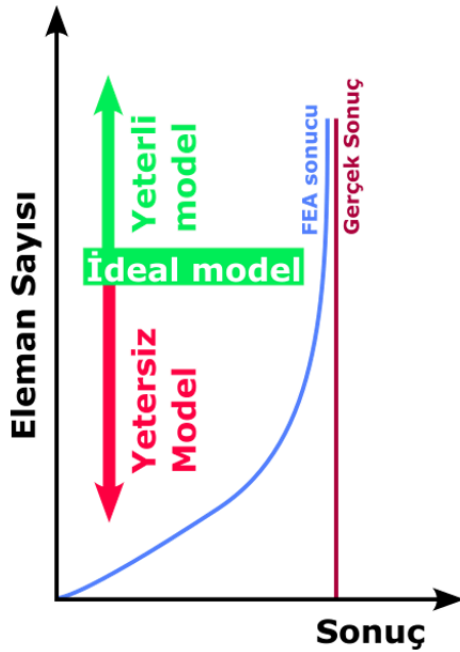
Başlığın Belirlenmesi: İsteğe bağlıdır ancak aynı ana modelin kullanıldığı çoklu senaryoda faydalıdır.

Analiz Tipinin Seçilmesi: Bu aşamada kullanılacak analizin türü seçilir. Örneğin yapısal, akışkanlar dinamiği, termal, elektromanyetik vb.

Modelin Oluşturulması: Uygun ölçü ve ölçü birimlerinde iki veya üç boyutlu model tasarlanır ya da başka bir programda tasarlanmış model içeriye aktarılır. İki ve üç boyutlu modellerin avantaj ve dezavantajları Tablo II'de belirtilmiştir. Bunun dışında lazer tarayıcı ile ya da CBCT ve micro-CT görüntülerinin segmentasyonu ile elde edilebilir.¹⁹⁻²²

Eleman Tipinin Belirlenmesi: Bir, iki ya da üç boyutlu olabilir.

Mesh Uygulaması: Mesh oluşturma, modeli dizi ayrı parçaya veya sonlu elemana bölme işlemidir.²³ Mesh ne kadar küçük olursa sonuç o kadar iyi olur ancak analiz süresi de uzar.^{2,3,24} Eleman sayısı ile sonuç ilişkisi ve ideal model Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Eleman sayısı ve sonuç tutarlılığının ilişkisi

Materyal Özelliklerinin Girilmesi: Bu aşamada materyal özellikleri (young modülü, poisson oranı, özkütle vb.) tanımlanmalıdır.

Yüklerin Uygulanması: Genellikle analiz modeline bir tür yük uygulanır. Yükleme noktasal yük, basınç veya gerilme (yer değiştirme) analizinde yer değiştirme şeklinde olabilir. Yükler bir noktaya, bir kenara, bir yüzeye ve hatta tüm bir gövdeye uygulanabilir.

Sınır Koşullarının Uygulanması: Modele yük uygulanırken oluşturulacak matematiksel problemde sonsuz hızlanmayı durdurmak için en az bir kısıtlama veya sınır koşulu uygulanmalıdır. Bir sınır koşulu her yöne etki edecek şekilde veya yalnızca belirli yönlerde etki edecek şekilde belirtilebilir. Düğümlere, kilit noktalara, alanlara veya çizgilere yerleştirilebilirler.

Çözüm

Bu bölüm tamamen otomatiktir ve mantıksal olarak üç ana bölüme ayrılabilir: ön-çözücü, matematik motoru ve son çözücü. Ön çözücü, işlem öncesinde oluşturulan modeli okur ve modeli matematiksel olarak formüle eder. Sonuçlar çözücüye gönderilir ve sonrasında son çözücü, bileşen veya süreklilik içindeki her düğüm için gerinimleri, gerilimleri vb. hesaplar.

İşlem Sonrası

Burada analiz sonuçları okunur ve yorumlanır. Bunlar sayısal kontur grafiği, tablo, bileşenin deforme şekli veya frekans analizi söz konusu ise mod şekilleri ve doğal frekanslar şeklinde sunulabilir.²

Sonlu Elemanlar Analizinde Kullanılan Programlar

- Abaqus Explicit - SIMULIA by Dassault Systèmes, France.
- Ansys by Ansys Inc., Canonsburg, Pennsylvania, USA.
- Femfat, Magna international, Canada.
- Hypermesh, Altair Engineering, USA.
- Ls-dyna, Ansys Inc., Canonsburg, Pennsylvania, USA.
- Madymo, TASS International, Helmond, The Netherlands.
- Magmasoft, Magma Giebertechologie, Aachen, Germany.
- Nastran, MSC California, USA.
- Star-CD, CD Adaptico, Millville, USA.
- Tosca, Tricentis, Vienna, Austria.
- Uni-Graphics, Siemens PLM, Plano, Texas, USA, vb.²⁵

Sonlu Elemanlar Analizinin Avantajları

- In vivo çalışmalara olan ihtiyacı en aza indirir.
- In vitro testlere göre daha az zaman gerektirir.²⁶
- Laboratuvar testlerine olan ihtiyacı en aza indirir ancak tamamen ortadan kaldırmaz.²⁷
- İnvaziv değildir.
- İç içe olan yapıların görselleştirilmesini sağlar.²⁸
- Kraniofasial yapıların malzeme özelliklerinin ve geometrilerinin analizi daha kolay gerçekleştirilebilir.
- Uygulanan kuvvetin yönü ve büyüklüğü kesin olarak belirlenebilir.²⁹
- Gerilim noktalarının teorik ölçümü mümkündür.
- Değerlendirilen malzemelerin fiziksel özellikleri değişmez.
- Testin tekrarı birden çok kez yapılabilir.^{29,30}
- Hem statik hem de dinamik analizler yapılabilir.
- Teknik zaman açısından verimlidir.³¹
- **Sonlu Elemanlar Analizinin Sınırlamaları**
- SEA'dan elde edilen çözümün gerçekçi olması malzeme özelliklerinin kesin olarak bilinmesine bağlıdır.^{5,23,32,33}
- En büyük dezavantajı çözümün, elemanın tipi, boyutu, sayısı, şekli ve yönelimi gibi eleman

- geometrisine olan duyarlılığıdır.
- SEA’de sonuç olarak büyük miktarda sayısal veri elde edilir ve gerekli sonuçları buradan ayıklamak uzmanlık gerektirir.
 - Girilen yanlış veri ya da bilgi, sonuçların da yanlış olmasına yol açacaktır.
 - İnsan dokularının anatomisinin ve mekanik davranışlarının karmaşıklığı sebebiyle modellenmeleri oldukça zordur.
 - Yapılan çıkarımlar sonuçları değerlendiren kişinin yetkinliğine bağlıdır.
 - Mine, dentin, periodontal ligament, süngerimsi ve kortikal kemiğin standardize edilmiş, doğrulanmış fiziksel özellikleri elde edilemeye kadar SEA’daki ilerleme ve süreç sınırlı olacaktır.
 - Bazı özelliklerin olduğundan farklı kabul edilmesi kaçınılmazdır. Dolayısıyla sonuçlar çalışmayı gerçekleştiren kişiler tarafından belirlenecektir. Tüm dokular anizotropik olmasına rağmen çoğu çalışmada izotropik kabul edilmektedir.³⁴ Spears mine dokusunun anizotropik olarak kabul edilmesi gerektiğini önermiştir. Anizotropik yapıdaki mine yüklerle daha kolay başa çıkabilmektedir. Ayrıca klinik ortamda kas aktiviteleri ve kraniofasiyal oklüzal yükü değiştirmektedir. Kas kuvvetlerinin sonlu elemanlar analizi ile modellenmesi oldukça zordur. Bundan dolayı dişlere dikey ya da oblik kuvvetler uygulanır.^{35,36}
 - SEA zamana bağlı değildir. Canlı bir bileşenin biyolojik dinamikleri, zaman ve yapının maruz kaldığı diğer etkenlerin hesaba katılması zor olduğundan, tıpatıp bir şekilde modellenemez.

Endodontide Sonlu Elemanlar Analizinin Kullanım Alanları

Diş hekimliğinin pek çok alanında, belirli koşullar altında diş ve çevre dokularda oluşan gerilimleri değerlendirmek amacı ile kullanılan sonlu elemanlar analizi yönteminin endodontideki kullanım alanlarını belirlemek ve yapılmış çalışmalarını kategorize etmek amacıyla PubMed adlı sitede yer alan makalelerden yararlanılmıştır. Post materyallerinin karşılaştırıldığı, protetik ve restoratif işlemlerin değerlendirildiği çalışmalar göz ardı edilmiştir.

Kanal Aletleri Üzerindeki Gerilimin İncelenmesi

Gharechahi ve ark. SEA kullanarak farklı kesit tasarımlarına sahip nikel-titanyum (NiTi) kanal eğelerinin farklı kanal anatomilerinde kullanıldığında egede meydana gelen gerilim

dağılımını incelemişlerdir.³⁷ Zhang ve ark. farklı kesit tasarımına, boyuta ve koniklik açısına sahip Ni-Ti döner aletlerin burulma ve bükülme koşulları altındaki gerilim dağılımını SEA ile incelemişlerdir. Bonessio ve ark. SEA’de aynı tasarıma sahip M-Wire ve Ni-Ti alaşımdan oluşan kanal eğelerini burulma analizi ile karşılaştırmıştır.³⁸ Santos ve ark. SEA analizi kullanarak R-fazının Ni-Ti kanal eğelerinin mekanik davranışlarına olan etkisini değerlendirmişlerdir.³⁹

El-Anwar ve ark. yaptığı çalışmada resiprokasyon ve rotasyon hareketlerinin Ni-Ti döner alette oluşturduğu gerilim dağılımını SEA ile incelemişlerdir. Ayrıca çalışmada M-wire ile Ni-Ti alaşım karşılaştırılmış ve koniklik açısının kanal aletindeki gerilim dağılımına etkisi değerlendirilmiştir.⁴⁰

Yuan ve ark. SEA ile paslanmaz çelik #20 K tipi kanal eğesinin üzerinde şekillendirme esnasında oluşan gerilim dağılımını incelemişlerdir.⁴¹

Endodontik Giriş Kaviteilerinin Değerlendirilmesi

Nawar ve ark. yaptığı çalışmada SEA yöntemi ile üst çene küçük azı dışında proksimal bölgeden çürüğe göre açılmış giriş kavitesi ile geleneksel giriş kavitesi uygulanmış dişlerin oklüzal yük altında meydana gelen gerilim dağılımları karşılaştırılmıştır.⁴²

Wang ve ark. yaptığı çalışmada SEA yöntemi ile geleneksel giriş kavitesi, rehberli giriş kavitesi, truss tipi girişi kavitesi ve sınırlandırılmış giriş kavitesi uygulanmış alt çene büyük azı dişlerinin çiğneme kuvvetleri altındaki gerilim dağılımları incelenmiştir.⁴³

Kök Kanalının Şekillendirilmesi Sonucu Dentinde Oluşan Gerilimin İncelenmesi

Nawar ve ark. yaptığı çalışmada SEA ile alt çene büyük azı dişlerinin orta mezial kanalları farklı boyutlarda şekillendirilerek gerilim testine tabi tutulmuş ve optimum şekillendirme boyutu tespit edilmiştir.⁴⁴

Rundquist ve ark. yaptığı çalışmada SEA ile şekillendirilmiş kök kanalının koniklik açısının kök dentini üzerindeki gerilim dağılımına etkisi değerlendirilmiştir.⁴⁵

Kök Kanalının Doldurulması ile Dentinde Oluşan Gerilimin İncelenmesi

Telli ve ark. yaptığı çalışmalarda SEA ile lateral kondensasyon ve vertikal kompaksiyon esnasında

dişlerde meydana gelen gerilim dağılımları incelenmiştir.⁴⁶⁻⁴⁸ Hong ve ark. yaptığı çalışmada SEA ile yine vertikal ve lateral kondensasyon işlemlerinin kök kanalı duvarında oluşturduğu gerilim dağılımları incelenmiştir.⁴⁹

Belli ve ark. yaptığı çalışmada SEA ile farklı tipteki endo-perio lezyona sahip dişlerin farklı kök kanalı dolgu materyalleri ile doldurulması sonucu oklüzal yük altında oluşan gerilim dağılımları karşılaştırılmıştır.⁵⁰

Rezeksiyon İşleminin ve Retrograd Dolgu Materyallerinin Dentin ve Çevre Dokulara Etkisinin İncelenmesi

Gümrükçü ve ark. yaptığı çalışmada SEA ile rezeke edilen kökün uzunluğunun ve rezeksiyon işlemi sonrası kullanılan greft tipinin oklüzal yük altındaki dişin gerilim dağılımına etkileri değerlendirilmiştir.⁵¹ Ashi ve ark. yaptığı çalışmada SEA ile farklı uzunluktaki retrograd kavite preperasyonlarının farklı kalsiyum silikat esaslı materyaller ile doldurulması sonucu köklerde meydana gelen gerilim dağılımı incelenmiştir.⁵²

Yoo ve ark. yaptığı çalışmada SEA ile trephine frez kullanılarak gerçekleştirilmiş minimal invaziv apikal rezeksiyon sonrası kök ucu şeklinin ve kullanılan greftin gerilim dağılımına etkisi değerlendirilmiştir.⁵³

Kök Gelişimini Tamamlamamış Dişlerin Mekanik Özelliklerinin Değerlendirilmesi

Talati ve ark. yaptığı çalışmada SEA ile kök gelişimini tamamlamış ve tamamlamamış üst çene santral kesici dişlerde endodontik tedavi esnasında ve işlem sonrası oklüzal yük altında meydana gelen gerilim dağılımları incelenmiştir.⁵⁴

Anthrayose ve ark. yaptığı çalışmada SEA ile revaskülarizasyon ve apeksifikasyon işlemleri sonrası kök gelişimini tamamlamamış üst çene santral kesici dişlerde çiğneme kuvvetleri esnasında meydana gelen gerilim dağılımları karşılaştırılmıştır.⁵⁵

Demirel ve ark. yaptığı çalışmada SEA ile rejeneratif endodontik tedavi esnasında kullanılan MTA kalınlığının ve kök gelişimi aşamasının travmatik yükler altında üst çene santral kesici dişteki gerilim dağılımına etkisi değerlendirilmiştir.⁵⁶

Eram ve ark. yaptığı çalışmada SEA ile kök kanalı apikal tıkaç olarak ya da tamamen kalsiyum silikat

esaslı materyaller ile doldurulan kök gelişimini tamamlamamış üst çene santral kesici dişlerin kırık oluşumuna karşı direnci karşılaştırılmıştır.⁵⁷

Kök Kırıklarının Yapısını ve Tedavilerini İncelemek

Lertchirakarn ve ark. yaptığı çalışmada SEA ile oklüzal yükler altında oval ve yuvarlak horizontal kesite sahip kök ve kanallara sahip dişlerdeki gerilim dağılımını horizontal kesitler halinde incelemiş ve in vitro testlerde aynı yapıya sahip dişlerde meydana gelen kırık hatları ile karşılaştırılmıştır.^{58,59}

Anantula ve ark yaptığı çalışmada SEA ile horizontal kök kırığına sahip dişin farklı şekillerde tedavi edilmesinin ardından dişe gelen oklüzal kuvvetler sonucu oluşan gerilim dağılımı incelenmiştir.⁶⁰

Zhou ve ark. yaptığı çalışmada SEA kullanılarak kök kanalı tedavisi uygulanmış alt çene birinci büyük azı dişinin farklı tipteki yükler altındayken gerilim dağılımı incelenerek dikey kök kırığının mekanizması anlaşılmasına çalışılmıştır.⁶¹

Travma Sonucu Diş ve Çevre Dokularda Oluşan Gerilimin Değerlendirilmesi

Oskui ve ark. yaptığı SEA ile travma vakalarının incelenmesinde statik ve dinamik analizlerin etkinliği karşılaştırılmıştır.⁶²

Dezzen-Gomide ve ark. yaptığı çalışmada SEA ile kök gelişiminin farklı aşamalarında olan üst çene santral kesici dişlerin çeşitli travma koşulları altında gerilim dağılımları incelenmiştir.⁶³

Vilela ve ark. yaptığı çalışmada SEA ile top çarpması sonucu travmaya uğramış üst çene santral keser dişe komşu olan lateral dişteki gerilim dağılımı dinamik analiz ile incelenmiştir.⁶⁴

Perforasyon Tedavilerinin Karşılaştırılması

Askerbeyli Örs ve ark. yaptığı çalışmada SEA ile farklı çapta furkasyon perforasyonuna sahip alt çene birinci büyük azı dişlerinde ve bu dişlerin furkasyon bölgesinde farklı miktarlarda kemik rezorpsiyonu varlığında diş ve çevre dokularda meydana gelen gerilim dağılımı incelenmiştir.⁶⁵

Özkurt-Kayahan ve ark. yaptığı çalışmada SEA ile direkt kuafaj esnasında kullanılan MTA katmanı kalınlığının oklüzal yük altındaki dişin gerilim dağılımına etkisi değerlendirilmiştir.⁶⁶

Aslan ve ark. yaptığı çalışmada SEA ile farklı şekillerdeki iatrojenik kök perforasyonlarının Biodentine (Septodont, Saint-Maur-des-Fossés, France) ve MTA kullanılarak tamiri sonrası dişin oklüzal yük altındaki gerilim dağılımı incelenmiştir.⁶⁷

Kök Morfolojisinin ve Yapısının Gerilime Olan Etkilerinin Değerlendirilmesi

Çelik ve ark. yaptığı çalışmada SEA ile bilgisayar ortamında tasarlanmış tek köklü, düz ve dilasere köke sahip dişlerin oklüzal yük altında gerilim dağılımları karşılaştırılmıştır.⁶⁸

Oyama ve ark. yaptığı çalışmada SEA ile bilgisayar ortamında tasarlanmış farklı şekillerde kök yapısına sahip üst çene santral kesici dişlerin çeşitli yükler altında gerilim dağılımı incelenmiştir.⁶⁹

Kishen ve ark. yaptığı çalışmada SEA ile dentin yapısındaki tübüllerin ve hidrostatik basıncın yükler altında dentinde oluşan gerilim dağılımına etkisi incelenmiştir.⁷⁰

Tedaviler Esnasında Oluşabilecek Kanal İçerisindeki Olası Sıcaklık Artışının Periodontal Dokular Üzerindeki Termal Etkilerinin Değerlendirilmesi

Er ve ark. yaptığı çalışmada SEA ile devamlı dalga obturasyon tekniği esnasında bilgisayar ortamında dental atlasa göre tasarlanmış üst çene kanin dişinin periodontal ligamentinde meydana gelen sıcaklık değişimine bağlı gerçekleşebilecek olası doku hasarını değerlendirmişlerdir.⁷¹

Zhou ve ark. yaptığı çalışmada SEA ile devamlı dalga obturasyon tekniği esnasında micro-CT ile taranmış alt çene büyük azı dişinin periodontal ligamentinde meydana gelen sıcaklık değişimine bağlı gerçekleşebilecek olası doku hasarını değerlendirmişlerdir.⁷²

Cen ve ark. yaptığı çalışmada SEA ile kök kanalının termoplastik yöntem ile doldurulması esnasında periodontal ligamentte meydana gelen sıcaklık değişimi ve dokunun soğumasında kan dolaşımının etkisi incelenmiştir.²²

Stănuşi ve ark. yaptığı çalışmada SEA ile üst çene büyük azı dişinin palatinal kökünün kanal dezenfeksiyonu esnasında lazer kullanımının kök yüzeyinde meydana getirdiği sıcaklık değişimi incelenmiştir.⁷³

Kök Kanalı Tedavisi Uygulamanın Dentin Üzerindeki Gerilim Miktarına Etkisinin İncelenmesi

Kim ve ark. Self-Adjusting File (ReDent-Nova, Ra'anana, İsrail) ile farklı markalara ait Ni-Ti döner aletlerin şekillendirme esnasında kök dentininde meydana getirdikleri gerilim dağılımını SEA yöntemini kullanarak karşılaştırmışlardır.⁷⁴

Zelic ve ark. yaptığı çalışmada SEA ile kök kanalı tedavisi sonrası oklüzal yükler sonucu meydana gelen gerilim dağılımında giriş kavitesinin ve genişletilmiş kök kanalının rolünü incelemiştir.⁷⁵

Kök Kanalından Kırık Alet Çıkarma İşlemi Esnasında Kaldırılan Dentinin Gerilim Oluşumuna Etkisinin Değerlendirilmesi

Ni ve ark. yaptığı çalışmada SEA ile herhangi bir tedavi uygulanmamış, kök kanalı tedavisi uygulanmış ve apikal üçte birlik bölgeden ultrasonik aletler yardımıyla kırık kanal aleti çıkartma işlemi sonrası kanal tedavisi tamamlanmış dişlerin oklüzal yükler altındaki gerilim dağılımları karşılaştırılmıştır.⁷⁶

Eksternal Servikal Rezorpsiyon Vakalarının ve Tedavi Materyallerinin Değerlendirilmesi

Askerbeyli Örs ve ark. yaptığı çalışmada SEA ile birbirinden farklı Patel sınıflandırmasına sahip eksternal servikal rezorpsiyonu olan üst çene santral dişlerde farklı tedavi seçenekleri uygulandıktan sonra oklüzal yük altında dişlerde meydana gelen gerilim dağılımları incelenmiştir.⁷⁷

Rajawat ve ark. yaptığı çalışmada SEA ile üst çene santral dişlerde pulpa katılımı olmayan farklı Patel sınıflandırmasına sahip eksternal servikal rezorpsiyon kaviteleri farklı materyaller ile restore edilmiş ve oklüzal yük altında dişlerin gerilim dağılımları incelenmiştir.⁷⁸

Rubber Dam Klemplerinin Diş Üzerinde Oluşturduğu Etkinin Değerlendirilmesi

Eskibağlar ve ark. yaptığı çalışmada SEA ile alt çene büyük azı dişine yerleştirilen farklı materyallerden yapılmış rubber dam klemplerinin dişte meydana getirdiği gerilim dağılımı karşılaştırılmıştır.⁷⁹

İç Kök Rezorpsiyonu Vakalarının ve Tedavi Materyallerinin Değerlendirilmesi

Aslan ve ark. yaptığı çalışmada SEA ile kökün farklı üçte birlik kısımlarında rezorpsiyon kavitesine sahip kök kanallarının MTA, güta perka ve MTA-güta

perka kombinasyonu ile doldurulduğu senaryolarda oklüzal yük uygulanan dişte meydana gelen gerilim dağılımları karşılaştırılmıştır.⁸⁰

Yıkama Solüsyonlarına Maruz Kalan Dişlerin Mekanik Özelliklerinin Karşılaştırılması

Durmuş ve ark. yaptığı çalışmada farklı yıkama protokollerine maruz bırakılmış dentin modellerinin elastiklik modülleri in vitro olarak hesaplanmıştır. Ardından elde edilen veriler sonlu elemanlar analizinde kullanılarak farklı elastiklik modüllerine sahip alt çene küçük azı dişlerinin oklüzal yük altındaki gerilim dağılımları karşılaştırılmıştır.⁸¹

Ototransplantasyon Sonrası Donör Diş Üzerindeki Gerilimin Değerlendirilmesi

Kırmalı ve ark. yaptığı çalışmada SEA ile oklüzal yük altındaki alt çene birinci büyük azı dişi, alt çene üçüncü büyük azı dişi, kök kanalı tedavisi uygulanmış alt çene üçüncü büyük azı dişi, ankiloz kök kanalı tedavisi uygulanmış alt çene üçüncü büyük azı dişi, kuronlanmış alt çene üçüncü büyük azı dişi, kuronlanmış kök kanalı tedavisi uygulanmış alt çene üçüncü büyük azı dişi ve kuronlanmış kök kanalı tedavisi uygulanmış ankiloz alt çene üçüncü büyük azı dişine ait gerilim dağılımları karşılaştırılmıştır.⁸²

İn Vitro Kırık Testlerindeki Uygulamaların Niteliklerinin Değerlendirilmesi

Uzunoglu-Özyürek ve ark. yaptığı çalışmada SEA in vitro kırılma dayanıklılığı testlerinde kullanılan cihazın uç boyutunun ve yönünün dişte oluşturacağı gerilim dağılımına etkisi değerlendirilmiştir.⁸³

Sonuç

Sonlu elemanlar analizi, endodontide gerilim dağılımını değerlendirmede doğru bir araçtır. Ancak canlı yapıların yorumlanması biyomekanik özelliklerin farklılığından dolayı kişiden kişiye değişmektedir. Bu nedenle hem deneysel hem de klinik diş hekimliğinde herhangi bir karar vermeden önce bariz eksikliklerin akılda tutulması gerekir. Yapılan deneyler etik açıdan herhangi bir sakınca olmaksızın tekrarlanabilir nitelikte olup, çalışma tasarımları ihtiyaca göre değiştirilebilir. SEA'nın belirli sınırlamaları mevcuttur. Sınırlamalar akılda tutularak SEA araştırmasına klinik değerlendirmeler eşlik etmelidir.

Finansal Kaynak

Bu çalışma sırasında, yapılan araştırma konusu ile ilgili doğrudan bağlantısı bulunan herhangi bir ilaç firmasından, tıbbi alet, gereç ve malzeme sağlayan ve/veya üreten bir firma veya herhangi bir ticari firmadan, çalışmanın değerlendirme sürecinde, çalışma ile ilgili verilecek kararı olumsuz etkileyebilecek maddi ve/veya manevi herhangi bir destek alınmamıştır.

Çıkar Çatışması

Bu makale yazarlarından hiçbirinin makalede bahsi geçen konu veya malzemeyle ilgili herhangi bir ilişkisi, bağlantısı veya parasal çıkar durumu söz konusu değildir.

Yazar Katkısı

Fikir: K.A., Y.A Tasarım: K.A., Y.A Denetleme K.A., Y.A Kaynaklar: ----- Malzemeler: ----- Veri Toplama: K.A., Y.A Analiz: K.A., Y.A Literatür: K.A., Y.A Yazı: K.A., Y.A Eleştirel İnceleme: Y.A.

Kaynaklar

1. Marcián P, Wolff J, Horáčková L, Kaiser J, Zikmund T, Borák L. Micro finite element analysis of dental implants under different loading conditions. *Computers in Biology and Medicine*. 2018;96:157-65.
2. Gokhale N, Deshpande S, Bedekar S, Anand T. Practical finite element analysis. 1st ed: Finite To Infinite; 2008.
3. Zienkiewicz OC, Taylor RL. The finite element method. 5th ed. Oxford ; Boston: Butterworth-Heinemann; 2000.
4. Geramy A, Sharafoddin F. Abfraction: 3D analysis by means of the finite element method. *Quintessence Int*. 2003;34(7):526-33.
5. Geng JP, Tan KB, Liu GR. Application of finite element analysis in implant dentistry: a review of the literature. *J Prosthet Dent*. 2001;85(6):585-98.
6. Tanne K, Sakuda M, Burstone CJ. Three-dimensional finite element analysis for stress in the periodontal tissue by orthodontic forces. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*. 1987;92(6):499-505.
7. Boccaccio A, Uva AE, Fiorentino M, Monno G, Ballini A, Desiate A. Optimal Load for Bone Tissue Scaffolds with an Assigned Geometry. *Int J Med Sci*. 2018;15(1):16-22.
8. Szucs A, Bujtar P, Sandor GK, Barabas J. Finite element analysis of the human mandible to assess the effect of removing an impacted third molar. *J Can Dent Assoc*. 2010;76:a72.
9. Saunders HA. Book Reviews : FINITE ELEMENT ANALYSIS FUNDAMENTALS R.H. Gallagher Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey (1975). The Shock and Vibration Digest. 1977;9:28-.
10. Yettram AL, Wright KW, Pickard HM. Finite element stress analysis of the crowns of normal and restored teeth. *J Dent Res*. 1976;55(6):1004-11.
11. Ritz W. Über eine neue Methode zur Lösung gewisser Variationsprobleme der mathematischen Physik. 1909;1909(135):1-61.
12. Turner MJ. Stiffness and Deflection Analysis of Complex Structures. *Journal of the Aeronautical Sciences*. 1956;23:805-23.
13. Clough RW, editor The Finite Element Method in Plane Stress Analysis 1960.
14. Thresher RW, Saito GE. The stress analysis of human teeth. *J Biomech*. 1973;6(5):443-9.
15. Farah JW, Craig RG. Finite element stress analysis of a restored axisymmetric first molar. *J Dent Res*. 1974;53(4):859-66.
16. Weinstein A, Klawitter J, Anand S, Schuessler R. Stress Analysis of Porous Rooted Dental Implants. *Journal of dental research*. 1976;55:772-7.
17. Mohammed H. Basic Concepts of Finite Element Analysis and its Applications in Dentistry: An Overview. *Journal of Oral Hygiene & Health*. 2014;02.
18. Hatheway A. Review of finite element analysis techniques: capabilities and limitations: SPIE; 1992.
19. Szwedowski TD, Whyne CM, Fialkov JA. Toward characterization of craniofacial biomechanics. *J Craniofac Surg*. 2010;21(1):202-7.
20. Pessoa RS, Muraru L, Junior EM, Vaz LG, Sloten JV, Duyck J, Jaecques SV. Influence of implant connection type on the biomechanical environment of immediately placed implants - CT-based nonlinear, three-dimensional finite element analysis. *Clin Implant Dent Relat Res*. 2010;12(3):219-34.
21. Lu S, Li T, Zhang Y, Lu C, Sun Y, Zhang J, Xu D. Biomechanical optimization of the diameter of distraction screw in distraction implant by three-dimensional finite element analysis. *Computers in Biology and Medicine*. 2013;43(11):1949-54.
22. Cen R, Wang R, Cheung GSP. Periodontal Blood Flow Protects the Alveolar Bone from Thermal Injury during Thermoplasticized Obturation: A Finite Element Analysis Study. *J Endod*. 2018;44(1):139-44.
23. Sreirekha A, Bassetty K. Infinite to finite: an overview of finite element analysis. *Indian J Dent Res*. 2010;21(3):425-32.
24. Van Staden RC, Guan H, Loo YC. Application of the finite element method in dental implant research. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*. 2006;9(4):257-70.
25. Shivakumar S, Kudagi VS, Talwade P. Applications of finite element analysis in dentistry: A review. *Journal of International Oral Health*. 2021;13:415 - 22.
26. Raposo LH, Armstrong SR, Maia RR, Qian F, Geraldeli S, Soares CJ. Effect of specimen gripping device, geometry and fixation method on microtensile bond strength, failure mode and stress distribution: laboratory and finite element analyses. *Dent Mater*. 2012;28(5):e50-62.
27. Vinod B, Saraswathi K. Finite Element Analysis and Its Applications in Dentistry. In: Mahboub B, editor. *Finite Element Methods and Their Applications*. Rijeka: IntechOpen; 2020. p. Ch. 8.
28. SUN J, JIAO T, TIE Y, WANG D. Three-dimensional finite element analysis of the application of attachment for obturator framework in unilateral maxillary defect. *Journal of Oral Rehabilitation*. 2008;35(9):695-9.
29. Gao J, Xu W, Ding Z. 3D finite element mesh generation of complicated tooth model based on CT slices. *Comput Methods Programs Biomed*. 2006;82(2):97-105.
30. Viceconti M, Zannoni C, Testi D, Petrone M, Perticoni S, Quadrani P, et al. The multimod application framework: A rapid application development tool for computer

- aided medicine. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*. 2007;85(2):138-51.
31. Reddy MS, Sundram R, Eid Abdemagyd HA. Application of Finite Element Model in Implant Dentistry: A Systematic Review. *J Pharm Bioallied Sci*. 2019;11(Suppl 2):S85-S91.
 32. Mohammed S, Desai H. Basic concepts of finite element analysis and its applications in dentistry: An overview. *Oral Hyg Health*. 2014;2(156):2332-0702.1000156.
 33. Chandrupatla T, Belegundu A. *Introduction to finite elements in engineering*: Cambridge University Press; 2021.
 34. Doblaré M, García JM, Gómez MJ. Modelling bone tissue fracture and healing: a review. *Engineering Fracture Mechanics*. 2004;71(13):1809-40.
 35. Liu S, Liu Y, Xu J, Rong Q, Pan S. Influence of occlusal contact and cusp inclination on the biomechanical character of a maxillary premolar: A finite element analysis. *The Journal of Prosthetic Dentistry*. 2014;112(5):1238-45.
 36. O'Mahony AM, Williams JL, Spencer P. Anisotropic elasticity of cortical and cancellous bone in the posterior mandible increases peri-implant stress and strain under oblique loading. *Clinical Oral Implants Research*. 2001;12(6):648-57.
 37. Gharechahi M, Moezzi S, Karimpour S. Comparative Analysis of Stress Distribution through Finite-Element Models of 3 NiTi Endodontic Instruments while Operating in Different Canal Types. *J Dent (Shiraz)*. 2023;24(1):60-5.
 38. Bonessio N, Pereira ES, Lomiento G, Arias A, Bahia MG, Buono VT, Peters OA. Validated finite element analyses of WaveOne Endodontic Instruments: a comparison between M-Wire and NiTi alloys. *Int Endod J*. 2015;48(5):441-50.
 39. Santos Lde A, Resende PD, Bahia MG, Buono VT. Effects of R-Phase on Mechanical Responses of a Nickel-Titanium Endodontic Instrument: Structural Characterization and Finite Element Analysis. *ScientificWorldJournal*. 2016;2016:7617493.
 40. El-Anwar MI, Yousief SA, Kataia EM, El-Wahab TM. Finite Element Study on Continuous Rotating versus Reciprocating Nickel-Titanium Instruments. *Braz Dent J*. 2016;27(4):436-41.
 41. Yuan L, Yue L, Wang JD. [A three-dimensional finite element analysis of 0.02 taper 20# stainless steel K files during root canal instrumentation]. *Zhonghua Kou Qiang Yi Xue Za Zhi*. 2007;42(6):346-8.
 42. Nawar NN, Abdelfattah RA, Kataia M, Saber SM, Kataia EM, Kim HC. Effect of Proximal Caries-driven Access on the Biomechanical Behavior of Endodontically Treated Maxillary Premolars. *J Endod*. 2023;49(10):1337-43.
 43. Wang X, Wang D, Wang YR, Cheng XG, Ni LX, Wang W, Tian Y. Effect of access cavities on the biomechanics of mandibular molars: a finite element analysis. *BMC Oral Health*. 2023;23(1):196.
 44. Nawar NN, Elkholy MMA, Ha WN, Saber SM, Kim HC. Optimum Shaping Parameters of the Middle Mesial Canal in Mandibular First Molars: A Finite Element Analysis Study. *J Endod*. 2023;49(5):567-74.
 45. Rundquist BD, Versluis A. How does canal taper affect root stresses? *Int Endod J*. 2006;39(3):226-37.
 46. Telli C, Gülkan P, Günel H. A critical reevaluation of stresses generated during vertical and lateral condensation of gutta-percha in the root canal. *Endod Dent Traumatol*. 1994;10(1):1-10.
 47. Telli C, Gülkan P. Stress analysis during root canal filling by vertical and lateral condensation procedures: a three-dimensional finite element model of a maxillary canine tooth. *Br Dent J*. 1998;185(2):79-86.
 48. Telli C, Gülkan P, Raab W. Additional studies on the distribution of stresses during vertical compaction of gutta-percha in the root canal. *Br Dent J*. 1999;187(1):32-7.
 49. Hong J, Xia WW, Xiong HG. [Analysis of the effect on the stress of root canal wall by vertical and lateral condensation procedures]. *Shanghai Kou Qiang Yi Xue*. 2003;12(5):359-61.
 50. Belli S, Eraslan O, Eskitascioglu G. Effect of Root Filling on Stress Distribution in Premolars with Endodontic-Periodontal Lesion: A Finite Elemental Analysis Study. *J Endod*. 2016;42(1):150-5.
 51. Gümrükçü Z, Kurt S, Köse S. Effect of Root Resection Length and Graft Type Used After Apical Resection: A Finite Element Study. *J Oral Maxillofac Surg*. 2019;77(9):1770.e1-e8.
 52. Ashi T, Richert R, Mancino D, Jmal H, Alkhoury S, Addiego F, et al. Do the Mechanical Properties of Calcium-Silicate-Based Cements Influence the Stress Distribution of Different Retrograde Cavity Preparations? *Materials (Basel)*. 2023;16(8).
 53. Yoo YJ, Perinpanayagam H, Kim M, Zhu Q, Baek SH, Kwon HB, Kum KY. Stress Distribution on Trephine-Resected Root-end in Targeted Endodontic Microsurgery: A Finite Element Analysis. *J Endod*. 2022;48(12):1517-25.e1.
 54. Talati A, Disfani R, Afshar A, Fallah Rastegar A. Finite element evaluation of stress distribution in mature and immature teeth. *Iran Endod J*. 2007;2(2):47-53.
 55. Anthrayose P, Nawal RR, Yadav S, Talwar S, Yadav S. Effect of revascularisation and apexification procedures on biomechanical behaviour of immature maxillary central incisor teeth: a three-dimensional finite element analysis study. *Clin Oral Investig*. 2021;25(12):6671-9.

56. Demirel A, Bezgin T, Sarı Ş. Effects of Root Maturation and Thickness Variation in Coronal Mineral Trioxide Aggregate Plugs Under Traumatic Load on Stress Distribution in Regenerative Endodontic Procedures: A 3-dimensional Finite Element Analysis Study. *J Endod.* 2021;47(3):492-9.e4.
57. Eram A, Zuber M, Keni LG, Kalburgi S, Naik R, Bhandary S, et al. Finite element analysis of immature teeth filled with MTA, Biodentine and Bioaggregate. *Comput Methods Programs Biomed.* 2020;190:105356.
58. Lertchirakarn V, Palamara JE, Messer HH. Patterns of vertical root fracture: factors affecting stress distribution in the root canal. *J Endod.* 2003;29(8):523-8.
59. Lertchirakarn V, Palamara JE, Messer HH. Finite element analysis and strain-gauge studies of vertical root fracture. *J Endod.* 2003;29(8):529-34.
60. Anantula K, Vankayala B, Yadav SS. A three-dimensional finite element analysis of stress distribution in maxillary central incisor with a horizontal mid root fracture after various management protocols. *J Conserv Dent.* 2021;24(5):470-4.
61. Zhou Y, Hu Z, Hu Y, Gao A, Pan X, Tang R, Lin Z. Patterns of stress distribution of endodontically treated molar under different types of loading using finite element models-the exploring of mechanism of vertical root fracture. *J Mech Behav Biomed Mater.* 2023;144:105947.
62. Oskui IZ, Hashemi A, Jafarzadeh H, Kato A. Finite element investigation of human maxillary incisor under traumatic loading: Static vs dynamic analysis. *Comput Methods Programs Biomed.* 2018;155:121-5.
63. Dezzen-Gomide AC, de Carvalho MA, Lazari-Carvalho PC, de Oliveira HF, Cury A, Yamamoto-Silva FP, Silva BSF. A three-dimensional finite element analysis of permanent maxillary central incisors in different stages of root development and trauma settings. *Comput Methods Programs Biomed.* 2021;207:106195.
64. Vilela ABF, Soares PBF, Almeida GA, Veríssimo C, Rodrigues MP, Versluis A, Soares CJ. Three-dimensional finite element stress analysis of teeth adjacent to a traumatized incisor. *Dent Traumatol.* 2019;35(2):128-34.
65. Askerbeyli Örs S, Aksel H, Küçükkaya Eren S, Serper A. Effect of perforation size and furcal lesion on stress distribution in mandibular molars: a finite element analysis. *Int Endod J.* 2019;52(3):377-84.
66. Ozkurt-Kayahan Z, Turgut B, Akin H, Kayahan MB, Kazazoglu E. A 3D finite element analysis of stress distribution on different thicknesses of mineral trioxide aggregate applied on various sizes of pulp perforation. *Clin Oral Investig.* 2020;24(10):3477-83.
67. Aslan T, Esim E, Üstün Y, Dönmez Özkan H. Evaluation of Stress Distributions in Mandibular Molar Teeth with Different Iatrogenic Root Perforations Repaired with Biodentine or Mineral Trioxide Aggregate: A Finite Element Analysis Study. *J Endod.* 2021;47(4):631-40.
68. Celik E, Aydinlik E. Effect of a dilacerated root on stress distribution to the tooth and supporting tissues. *J Prosthet Dent.* 1991;65(6):771-7.
69. Oyama K, Motoyoshi M, Hirabayashi M, Hosoi K, Shimizu N. Effects of root morphology on stress distribution at the root apex. *Eur J Orthod.* 2007;29(2):113-7.
70. Kishen A, Vedantam S. Hydromechanics in dentine: role of dentinal tubules and hydrostatic pressure on mechanical stress-strain distribution. *Dent Mater.* 2007;23(10):1296-306.
71. Er O, Yaman SD, Hasan M. Finite element analysis of the effects of thermal obturation in maxillary canine teeth. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod.* 2007;104(2):277-86.
72. Zhou X, Chen Y, Wei X, Liu L, Zhang F, Shi Y, Wu W. Heat transfers to periodontal tissues and gutta-percha during thermoplasticized root canal obturation in a finite element analysis model. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod.* 2010;110(2):257-63.
73. Stănuși A, Popa DL, Ionescu M, Cumpătă CN, Petrescu GS, Țuculină MJ, et al. Analysis of Temperatures Generated during Conventional Laser Irradiation of Root Canals-A Finite Element Study. *Diagnostics (Basel).* 2023;13(10).
74. Kim HC, Sung SY, Ha JH, Solomonov M, Lee JM, Lee CJ, Kim BM. Stress generation during self-adjusting file movement: minimally invasive instrumentation. *J Endod.* 2013;39(12):1572-5.
75. Zelic K, Vukicevic A, Jovicic G, Aleksandrovic S, Filipovic N, Djuric M. Mechanical weakening of devitalized teeth: three-dimensional Finite Element Analysis and prediction of tooth fracture. *Int Endod J.* 2015;48(9):850-63.
76. Ni N, Ye J, Wang L, Shen S, Han L, Wang Y. Stress distribution in a mandibular premolar after separated nickel-titanium instrument removal and root canal preparation: a three-dimensional finite element analysis. *J Int Med Res.* 2019;47(4):1555-64.
77. Askerbeyli Örs S, Küçükkaya Eren S. Effects of different treatment modalities on biomechanical behavior of maxillary incisors with external invasive cervical resorption at different progression levels. *Dent Traumatol.* 2023;39(6):605-15.
78. Rajawat A, Kaushik M. Stresses in Teeth with External Cervical Resorption Defects Restored with Different Biomimetic Cements: A Finite Element Analysis. *J Endod.* 2023;49(8):995-1003.
79. Eskibağlar M, Erdem S, Kaman MO. Evaluation of the effect of different rubber dam clamps on the mandibular first molar with Finite element analysis. *Comput Methods Biomech Biomed Engin.* 2023:1-10.

80. Aslan T, Üstün Y, Esim E. Stress distributions in internal resorption cavities restored with different materials at different root levels: A finite element analysis study. *Aust Endod J.* 2019;45(1):64-71.
81. Durmus B, Hale AA, Oguz E, Sema B. The effect of different irrigation protocols on elastic modulus of dentine and biomechanics of single-rooted premolar tooth: A nano-indentation and finite element analysis study. *Niger J Clin Pract.* 2019;22(1):101-7.
82. Kırmalı Ö, Türker N, Akar T, Yılmaz B. Finite element analysis of stress distribution in autotransplanted molars. *J Dent.* 2022;119:104082.
83. Uzunoglu-Özyürek E, Küçükkaya Eren S, Eraslan O, Belli S. Critical evaluation of fracture strength testing for endodontically treated teeth: a finite element analysis study. *Restor Dent Endod.* 2019;44(2):e15.