

Post-endodontik Restorasyonlar ve Sonlu Elemanlar Analizi

Edanur Maras¹

Özet

Endodontik olarak tedavi edilen dişler, vital dişlere kıyasla biyomekanik başarısızlıklara daha fazla yatkındır. Bu başarısızlıklar sonucunda dişin prognozu olumsuz etkilenir ve diş kayıpları meydana gelebilir. Bugüne kadar, hangi tekniğin ya da materyalin endodontik olarak tedavi edilmiş dişleri en iyi şekilde restore edebileceği konusunda literatürde herhangi bir fikir birliğine varılamamıştır. Kök kanal dolgulu dişler için geleneksel yaklaşım olan post ve kron gibi restoratif prosedürlere alternatif olarak günümüzde adeziv teknolojilerin gelişmesi ile birlikte vakaya özgü restoratif tekniğin ve materyalin doğru seçimi daha da önem kazanmıştır. Deneysel ve klinik çalışmalarda, gözlemci, ekipman ve diş gibi birçok faktöre bağlı olarak sonuçlarda sapmalar görülebilmektedir. Sonlu elemanlar analizi ile bu faktörlerden kaynaklanan yanlılığın önüne geçilerek karmaşık yapılar ve onların biyomekanik davranışları tespit edilebilir. Bu bölümde, farklı post-endodontik restorasyonların sonlu elemanlar analizi kullanılarak değerlendirildiği çalışmalar gözden geçirilecektir.

1. Endodontik Tedavi Görmüş Dişlerde Prognoz

Endodontik tedavi sonrası olası sonucun öngörülmesi ya da hesaplanması olarak tanımlanan prognostik faktörlerin önceden belirlenmesi, klinik sonuçların iyileştirilmesi adına büyük bir öneme sahiptir. Genel olarak bir dişin tedavi sonucunu, endodontik, restoratif ve periodontal prognoz için gereken biyolojik, klinik ve teknik yaklaşımlar belirlemektedir (Berman & Hargreaves, 2020).

Kök kanal tedavisini takiben periapikal sağlığı ve iyileşmeyi etkileyen faktörler, hasta faktörleri, tedavi faktörleri ve restoratif faktörler olarak üç ana grupta sınıflandırılabilir. Yaş, cinsiyet, hastanın genel sağlık durumu, diş ana-

1 Dr. Öğr. Üyesi, Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi, edanur.maras@erdogan.edu.tr, Orcid: 0000-0001-7905-2935

tomisi, diş ile ilgili klinik tablo, ilk tedaviden sonra geçen süre, işlem öncesi pulpanın ve periapikal dokuların durumu; hasta ile ilgili başarıya etki eden faktörlerdir (Wong, 2004).

İzolasyonun kalitesi, büyütme ve aydınlatma kullanılması, çalışma boyu tespiti, kök kanallarının preperasyonu (prosedürel hatalar, şekillendirmenin koniklik derecesi, kullanılan eğenin tipi, apikal genişliğin belirlenmesi vb.), irrigasyon protokolü, kanal içi medikament kullanımı, kültür testleri, seans sayısı, kanal dolgusu (dolumun kalitesi, kullanılan obturasyon tekniği vb.) ve hekimin becerisi; başarıya etki eden klinisyen kaynaklı tedavi faktörleridir (Lin ve ark., 2005; Wong, 2004).

Koronal restorasyonun tipi, kalitesi, okluzal kontaklar, ilgili dişin protetik amaçlı kullanımı ve takip süreleri, tedavi sonrasında endodontik tedavi başarısına etki eden restoratif faktörler olarak sayılabilir (Matsumoto & Goto, 1970; Orstavik, 2020; Wong, 2004).

Dişin tipi, dişin lokalizasyonu, koronal restorasyon tercihi, post varlığı, operatör deneyimi, hasta cinsiyeti ve kök dolgusunun kalitesi, en sık araştırılan prognostik faktörlerdendir (Ng ve ark., 2010). Bazı prognostik faktörlerin, endodontik tedavi başarısı üzerinde önemli ölçüde etkili olduğu belirlenirken, bazı faktörlerin etkilerinin daha önemsiz düzeylerde olduğu saptanmıştır. Hasta ile ilgili faktörlerden olan periapikal durumun ve restoratif faktörlerin tedavi sonucu üzerinde önemli etkilere sahip olduğu birçok çalışmada gösterilmiştir (Aquilino & Caplan, 2002; Caplan ve ark., 2002; Lazarski ve ark., 2001; Sundqvist, 1976).

2. Post-endodontik Restorasyonlar

Kök kanal tedavisinin tamamlanmasının ardından koronal restorasyonun yerleştirilmesi, endodontik tedavi gören dişlerin yönetiminde son aşamadır. Kök kanal tedavisi yapılan dişlerin yapısı, vital dişlere göre farklılık göstermektedir. Diş yapılarında meydana gelen madde kayıpları, kalan diş dokularının dehidratasyonuna bağlı gelişen mekanik farklılıklar, olası renklemeler, kollajen yapısı ve mineral içeriğindeki değişiklikler, vital dişler ve endodontik tedavili dişler arasındaki majör farklılıklardır. Bu farklılıklara bağlı olarak dişin kırılma direnci artar ve dokunun adezyonu azalır (Berman & Hargreaves, 2020).

Kök kanal tedavisi yapılmış ve periapikal lezyon gelişmiş dişlerden alınan histolojik kesitlerde, başarısızlıkların en sık görülen nedeni olarak mikrobiyal irritanlar gösterilmiştir. Restorasyonda kırılma veya düşme, dişte çatlak veya kırık, sekonder çürük ve preperasyon hataları sonucunda meydana gelen ko-

ronal mikrosızıntılar tedavi prognozunu olumsuz etkilemektedir. Bu nedenle, restoratif faktörler, endodontik tedavi başarısı üzerinde büyük bir öneme sahiptir (Fabricius ve ark., 2006; Nair ve ark., 1990; Ng ve ark., 2007; Ricucci & Siqueira Jr, 2011).

Çeşitli çalışmalarda, sekonder çürük, marjinal uyumsuzluk, desimantasyon ve renk değişikliği olmayan restorasyonlar için “tatmin edici restorasyon” tanımı kullanılmıştır (Hoskinson ve ark., 2002; Ricucci ve ark., 2011). Bu doğrultuda, yapılan bir sistematik incelemeye göre, tatmin edici koronal restorasyonlara sahip dişlerde periapikal iyileşmenin yetersiz restorasyonlu dişlere kıyasla önemli ölçüde daha iyi olduğu tespit edilmiştir (Ng ve ark., 2008). Koronal restorasyonun periapikal lezyon oluşumu ile ilişkisinin radyolojik olarak 1010 vakada incelendiği bir çalışmada, iyi yapılan endodontik tedavi ve koronal restorasyon varlığında başarı oranının %91,4; yetersiz yapılan endodontik tedavi ve koronal restorasyon varlığında başarı oranının %18,1; iyi yapılan endodontik tedavi ve yetersiz yapılan koronal restorasyon varlığında başarı oranının %44,1; yetersiz yapılan endodontik tedavi ve iyi yapılan koronal restorasyon varlığında başarı oranı %67,7 olduğu gözlemlenmiştir. Bu bulgular dahilinde, iyi bir koronal restorasyon varlığında periapikal lezyon gelişiminin anlamlı olarak daha düşük olduğu ve başarılı bir daimi restorasyonun, kanal dolgu kalitesinden daha önemli bir prognostik faktör olduğu bildirilmiştir (Ray & Trope, 1995). Çünkü kök kanal dolgulu dişlerin restorasyonları kalan diş yapısını korur, kök kanal sisteminin tekrar enfekte olmasını önler ve eksik diş yapısını yerine koyarak fonksiyonun devamını sağlar. Ancak daha önce bahsedildiği üzere, endodontik tedavili dişlerde madde kayıpları ve diş yapısında değişiklikler meydana gelmektedir. Bu nedenle eğer uygun restorasyon yapılamazsa bu dişlerde kırıklar, basit bir tüberkül kırığından, çekim gerektiren yıkıcı kök kırıklarına kadar değişebilir. Ayrıca endodontik tedavi esnasında giriş kavitesi tasarımları da dişte madde kayıplarının meydana gelmesine neden olur. Servikal bölgede bulunan diş dokuları, restorasyonun stabilizasyonunu ve retansiyonunu sağlar. Ferrule etkisinin sağlaması sebebiyle özellikle servikal alanda kalan sert doku miktarı ve dişin tümünde bulunan mineralize doku varlığı, dişin kırılmalara karşı direncini artırır. Ayrıca, kronun aksiyal duvarlarının diş çevrelemesini de sağlayarak çekme gerilimlerine karşı diş korur. Bu nedenle, kalan doku miktarına göre kök kanal tedavili dişlerin restorasyonları farklı klinik prosedürler ve materyaller kullanılarak gerçekleştirilmelidir (Barkhordar ve ark., 1989; Berman & Hargreaves, 2020; Helfer ve ark., 1972; Sorensen & Engelman, 1990). Endodontik tedavi için geniş bir kavite tasarımı hazırlanırsa, dişin kırılma dayanımı azalır. Kalan destek duvarlar, dişe oblik, vertikal ve horizontal kuvvetlere karşı direnç sağlar. Duvar sayısının üçten daha az olduğu

dişlerde, koronal yapının oldukça dayanıksızlaştığı bildirilmiştir (Peroz ve ark., 2005).

Direkt ve indirekt restorasyonlar dahil olmak üzere kök kanal tedavisi yapılmış dişlerin restorasyonları çeşitli yöntemler kullanılarak kalan doku miktarına ve periodontal duruma göre gerçekleştirilebilir. Kompozit rezin restorasyonlar, amalgam restorasyonlar, post uygulamaları ve koronal radiküler restorasyonlar kök kanal tedavisinin ardından uygulanabilecek konvansiyonel tedavi yöntemleridir. Küçük defektlerin onarımında direkt kompozit rezinlerin kullanımı önerilmektedir. Aşırı madde kaybı olan endodontik tedavili dişler genel bir kural olarak kron ile restore edilir (Hasanoğlu Aydın, 2012; Tosun ve ark., 2016). Endodontik tedavi görmüş dişler için diğer bir geleneksel restoratif tedavi yaklaşımı olan post uygulamalarında, post uygulamasında, kök kanal sisteminden destek alan post üzerine kor yapısı oluşturularak kaybedilen doku miktarı yerine konmaya çalışılır (Berman & Hargreaves, 2020; El-Damanhoury ve ark., 2015). Buna karşın, adeziv teknolojilerin gelişmesi, günümüzde kullanılan seramiklerin güçlendirilmesi ve asitle pürüzlendirilebilmesi, yeni jenerasyon rezin nanoseramik esaslı kompozitlerin üretimi ve güçlü rezin simanlar ile diş dokusuna bağlanabilme özelliği, özellikle madde kayıpları olan molar dişlerin, post-kor sistemi olmadan restore edilebileceği düşüncesini ortaya çıkarmıştır. Adeziv teknolojideki gelişmeler ve bilgisayar destekli tasarım/bilgisayar destekli üretim (CAD/CAM) ile birlikte kompozit rezin ya da seramiklerden yapılan, daha konservatif yaklaşıma sahip olan endokron veya overlay gibi indirekt restorasyonlar post-kor sistemlerine alternatif olarak gösterilmişlerdir (Berman & Hargreaves, 2020; Einhorn ve ark., 2019; Ramirez-Sebastia ve ark., 2013). Tam kron restorasyonlarda tüberküllerin ve dişin çevre dokularının ortadan kaldırılması gerekirken, onleyler ve endokronlarda kalan diş yapıları korunmaktadır. Endokronlarda, kök kanalı içerisindeki post, kor ve kron yapısı tek bir parçada birleştirilirken, overlayler eksik bir ya da birkaç tüberküli içerisine alır (Göhring & Peters, 2003; Krejci ve ark., 1992; Rocca & Boullaguet, 2008). Onley, overlay ve endokronlar, kompozit rezinden, cam fiber ile güçlendirilmiş kompozit rezinden, feldspatik porselen varyasyonlarından (Cerec, IPS Empress, In-Ceram gibi), zirkonya, alumina ve silika dahil olmak üzere çeşitli seramik sistemlerinden üretilebilmektedirler (Anusavice ve ark., 2012; Denry, 1996).

Restoratif faktörlerin bir diğer önemli bileşeni tercih edilen yapıştırıcı simanlardır. Çinko fosfat ve polikarboksilat gibi geleneksel simanlar, cam iyonomer esaslı simanlar, rezin esaslı simanlar ve self-adeziv simanlar günümüzde restorasyon simantasyonları için kullanılan yapıştırma ajanlarından

bazılarıdır ve bu ajanlar restorasyonların klinik performanslarını etkilerler (Berman & Hargreaves, 2020).

Endodontik tedavi sonrasında dişlerin restore edilebilirliğinin değerlendirilmesinde süreç pek çok faktöre bağlı olarak önemli ölçüde değişebilir. Kalan diş yapısının değerlendirilmesinde klinisyenlere rehberlik edecek bir restore edilebilirlik indeksi mevcut olmasına rağmen, bu uzun vadeli diş sağ kalım verileriyle henüz doğrulanamamıştır (McDonald & Setchell, 2005; Nagasiri & Chitmongkolsuk, 2005; Reeh ve ark., 1989). Ayrıca çalışmalarda restorasyonun sağkalım değerlendirmesinin dişin sağkalım değerlendirilmesine dahil edilmesi, verilerinden elde edilen klinik bulguları karmaşık hale getirmiştir. Bu nedenle, restoratif faktörlerin kök kanal tedavisinden sonra diş sağkalımı üzerindeki etkisinin araştırılması gerekmektedir. Restoratif faktörler, temel olarak, kalan diş yapısının miktarı ve dağılımını, fonksiyondaki diş üzerine gelen oklüzal yük miktarını ve dağılımını ve nihai restorasyonun türünü içerir (Burke & Lucarotti, 2009; Lucarotti ve ark., 2005).

3. Restorasyonların Mekanik Açından Değerlendirilmesi

Yük kapasitesi, deneysel koşullar altında belirli bir süre boyunca kök kanal dolgulu bir dişe uygulanabilecek maksimum stres veya yükü ifade etmektedir. Kırılma direnci, bir materyalin önceden var olan bir çatlakın ilerlemesine ilişkin mekanik özelliğidir. Kök kanal tedavili dişlerin mine, dentin, siman, post ve restorasyon materyali gibi çok sayıda bileşenden oluşması, araştırmalarda genellikle dişin yük kapasitesinin kırılma direncine kıyasla daha yaygın olarak kullanılmasının nedenidir (Ordinola-Zapata & Fok, 2021). Statik yüklenme testi veya monoton bir şekilde artan stres testi yapıların yük kapasitesini test etmek için kullanılan bir yöntemdir (Naumann ve ark., 2009). Statik yüklenme, farklı giriş kavitesi tasarımları planlanan dişlerin yük kapasitesini değerlendirmek için son yıllarda yaygın olarak kullanılmıştır. Yüklenme pozisyonu, yük açısı, restorasyon varlığı, dentinin yaşlı ya da genç olması, sert doku kaybı, kollajen degradasyonu gibi birçok kontrollü ve kontrolsüz faktör statik yük çalışmalarında sonuçları etkileyebilir (Mireku ve ark., 2010). Kök kanal dolgulu dişlerin yorulma davranışının değerlendirilmesi için kullanılan diğer bir teknik, döngüsel stres genliği ile başarısızlığa kadar olan döngü sayısı veya döngüsel yorulma testi arasındaki korelasyonun kullanılmasıdır. Çiğnemenin döngüsel doğası ile diş sert dokularının ve restorasyonlarının gecikmiş başarısızlığı, oral fonksiyonun belirli bir aşamasından sonra meydana gelir. Bu nedenle, kök kanal dolgulu dişlerin dayanıklılığının tahmin edilebilmesi için yorgunluğun anlaşılması gerekmektedir (Arola, 2017; Campbell, 2008). Laboratuvar koşullarında çiğneme sürecinin taklit edilebilmesi için

döngüsel yükleme kullanılmasına rağmen, uzun sürmesinden dolayı bu yöntem endodontik çalışmalarda nadiren kullanılır. Kanal tedavili dişlerin yük kapasitelerinde dinamik yöntem ile statik yükleme arasında önemli farklılıklar mevcuttur. Restore edilmiş dişlerde, statik yüklemelerin neden olduğu kırıklar yükleme noktasına yakın stres yoğunlaşma noktalarından başlarken, döngüsel yorgunluk ise restoratif materyalin altında uzunlamasına çatlaklara neden olabilir. Bazı çalışmalarda ağız boşluğundaki termal değişiklikleri daha iyi taklit etmek için termal döngü, mekanik yükleme ile birleştirilmiştir ve böylece dişlerin yük kapasitesi incelenebilirken yaşlanma süreci de dikkate alınabilmiştir (Lima ve ark., 2021; Lin ve ark., 2021; Naumann ve ark., 2005).

4. Diş Hekimliğinde Sonlu Elemanlar Analizi

Restorasyonlar değerlendirilirken, araştırmacının deney her tekrarlandığında aynı kesin sonucu elde etmesi pek mümkün değildir. Ayrıca çatlaklar gibi önceden var olan kusurlar da sonucun yanlış tespit edilmesine neden olabilir. Boyut ve kompozisyon açısından son derece homojen olan örnekler bile (CAD/CAM restorasyonları gibi), aynı mekanik teste maruz kaldıklarında aynı anda ve aynı yük altında başarısız olmazlar. Araştırmanın rastgele unsurlar içermeyen deterministik modeller üzerinde gerçekleştirilmesi ile her çalışıldığında aynı sonuçlar elde edilebilir. Başka bir ifadeyle deterministik modeller, önceden belirlenmiş belirli koşullar altında tamamen aynı sonuçları üretirler. Sonlu elemanlar analizi (FEA), bu deterministik yaklaşımın bir örneğidir. Sayısal bir yöntem olan FEA, karmaşık yapıları modeller ve mekanik davranışlarını analiz eder (Kinney ve ark., 2003; Park ve ark., 2008; Trivedi, 2014). FEA, bir fiziksel bir modeli, her biri belirli bir geometriye, yapısal ve materyal özelliklerine sahip olan, sonlu boyutlardaki küçük öğelere ayırır. Bilgisayar algoritmaları aracılığıyla bu öğeler birleştirilerek, uygulanan yük ile indüklenen yer değiştirme arasında ilişki kurulur (Choi ve ark., 2014). Bu yöntem ile karmaşık yapıların laboratuvar deneylerinden elde edilmesi zor olan farklı senaryolar altındaki stres dağılımları tespit edilebilir (Trivedi, 2014).

FEA, diş anatomilerinde görülen varyasyonlar, gözlemcilerden kaynaklanan yanlışlık, deney sırasında istenmeden yapılan defektler ve ekipman kalibrasyonları gibi in vivo ve in vitro çalışmaları etkileyen birçok değişken faktörün kontrolünü sağlar (Brankovic ve ark., 2019; Choi ve ark., 2014; Trivedi, 2014). Ayrıca FEA, deneysel araştırmalara kıyasla daha az maliyetli ve daha az zaman alıcıdır. (Chien ve ark., 2021).

Diş hekimliğinde FEA, protez, implantoloji ve ortodonti alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Dişlerin, aletlerin veya yapıların stres dağılımlarının değerlendirilebilmesi için son yıllarda endodonti alanında da kullanılmaya başlanmıştır. FEA ile güvenilir üç boyutlu modeller elde edilerek farklı klinik vakalar için gerçek koşullar daha tekrarlanabilir bir şekilde simüle edilmektedir. Bunun için, konik ışınli bilgisayarlı tomografi (CBCT) veya mikrobilgisayarlı tomografi (mikro-CT) gibi dijital görüntüleme sistemleri kullanılarak dişlerin ve periradiküler dokuların üç boyutlu anatomik modelleri mikrometre düzeyinde elde edilebilmektedir. (Gao ve ark., 2006; Sun ve ark., 2008; Van Staden ve ark., 2006). Kök kanal tedavisi uygulanmış dişlere uygulanan restorasyonlar ile farklı bileşenlerden oluşan düzensiz geometriye sahip kompleks yapılar oluşmaktadır. Bu nedenle, döngüsel yüklemeye altında her bir bileşenin gerilim genliğinin belirlenebilmesi güçtür. Laboratuvar testleri, nesnenin içinde oluşan gerçek gerilimi ve başarısızlık mekanizmalarını tespit etme konusunda yetersizdir. FEA, mekanik performansı gözlemleyebilmenin yanı sıra deneysel sonuçların mekanizmalarını da yorumlamak için iyi bir yöntem olarak kabul edilebilir (Lin ve ark., 2021; Lin ve ark., 2005).

Diş hekimliğinde özellikle stres olmak üzere gerilim, kuvvet ve yer değiştirme gibi çeşitli parametreler FEA ile incelenebilir. En yaygın olarak rapor edilen değerler maksimum ana gerilim ve von Mises değerleridir. Hangi durumda hangi parametrelerin kullanılacağı materyalin mekanik özelliklerine bağlıdır (Trivedi, 2014). Maksimum ana gerilim, üzerinde kesme gerilimi olmayan düzleme dik olan gerilimi ifade eder. Pozitif değerler çekme gerilimlerini, negatif değerler ise basınç gerilimlerini temsil eder (Santos-Filho ve ark., 2014). Von Mises değeri ise, birim hacim başına kesme gerilme enerjisinin materyalin sınır gerilme enerjisi yoğunluğunu aştığı noktada meydana gelen von Mises kriterine dayanan bir tür eşdeğer gerilimdir. Bu parametre esas olarak metaller veya alaşımlar gibi işlenebilir materyallerin başarılarının değerlendirilmesi için kullanılır (Barsanescu & Comanici, 2017). Bu nedenle, mine veya seramik gibi çekme gerilimleri sonucu kırılmaya karşı daha hassas olan kırılğan yapılarda maksimum ana gerilim değerleri tespit edilmelidir. Dentin ise, bükülme altında kırılğan katı bir madde gibi davranırken, basınç altında biçimlendirilebilir bir davranış sergiler. Bu nedenle, dentindeki stres dağılımının analizinde hem maksimum ana gerilim hem de von Mises değerleri kullanılmaktadır (Ivancik & Arola, 2013; Zaytsev ve ark., 2014). Ek olarak diş sert dokularında çatlakların başlamasının ve ilerlemesinin simülasyonu için genişletilmiş FEA kullanılmıştır (Zhang ve ark., 2019).

5. Endodontide Sonlu Elemanlar Analizi

Farklı giriş kavitesi tasarımları, kök kanal preparasyonları ve restoratif prosedürler, endodonti alanında FEA ile araştırılan konulardır. Çalışmalarda genel olarak lineer statik modeller kullanılmıştır. Giriş kavitesi tasarımlarında genel olarak minimal invaziv endodontik kavite geleneksel kavite dizaynları ile karşılaştırılmış ve biyomekanik etkileri incelenmiştir (Roperto ve ark., 2019; Wayne ve ark., 2014; Yuan ve ark., 2018; Zhang ve ark., 2019). Yapılan çalışmalarda genellikle birinci molar veya premolar dişler kullanılmıştır ve 80-800 Newton (N) arasında değişen büyüklüklerde dikey veya oblik yükler uygulanmıştır. Bu çalışmaların sonuçları genel olarak, konservatif endodontik giriş kavitesi tasarımlarının özellikle servikal bölgede olmak üzere dentinde stres konsantrasyonunu azalttığı fikrini desteklemektedir (Ordinola-Zapata ve ark., 2022).

Kök kanal preparasyonlarının dişte meydana getirdiği biyomekanik etkilerin FEA ile incelendiği çalışmalarda temel olarak çignemeyi taklit eden vertikal/oblik ya da guta perka kondansasyonunu taklit eden sıkıştırma kuvvetleri uygulanmıştır ve genellikle kırılma direnci araştırılmıştır (Ordinola-Zapata ve ark., 2022; Palareti ve ark., 2016; Saber ve ark., 2020).

Endodonti alanında yapılan FEA çalışmalarının büyük bir bölümünü farklı koronal defektlere sahip dişlere uygulanan farklı restoratif prosedürlerin biyomekanik etkilerinin incelendiği çalışmalar oluşturmaktadır. Kompozit rezin restorasyonlar, kronlar, metal/fiber postlar, inley, onley, overlay ve endokronlar incelenen restorasyon çeşitleridir. Genellikle molar veya premolar dişler üzerine uygulanan aksiyal/oblik kuvvetler giriş kavite tasarımlarının incelendiği çalışmalara benzer şekilde tek noktadan uygulanmıştır (Ausiello ve ark., 2017; Lin ve ark., 2021; Ordinola-Zapata ve ark., 2022; Pinto ve ark., 2019; Santos-Filho ve ark., 2014).

6. Post-endodontik Restorasyonların Sonlu Elemanlar Analizi ile İncelenmesi

Endodontik tedavi görmüş dişlerin sağkalımları, çürüğün uzaklaştırılması ve giriş kavitesinin açılmasından sonra geriye kalan sağlam diş yapısına ve tercih edilen restoratif yaklaşıma bağlıdır. Kök kanal dolgulu dişlerin restorasyonları için hangi tekniğin ve materyalin ideal olacağı literatürde hala tartışma konusu olmaya devam etmektedir. Koronal madde kaybı olan endodontik tedavili dişlerin restorasyonları için geleneksel olarak, kron, fiber/metal post ve kor konseptleri tercih edilmiştir. Bu tedavi protokollerinin kalan diş yapısını güçlendirdiği düşünülmüştür. Bununla birlikte, post kullanımı ile kronun retansiyonunun arttığı; ancak, yerleştirilmesi için diş dokularında

kayıplar meydana geldiği rapor edilmiştir. (Maravić ve ark., 2022; Ordino-la-Zapata ve ark., 2022).

Biyomimetik bakış açısına göre, biyolojik, fonksiyonel, mekanik, adeziv ve estetik parametreler arasında bir dengenin sağlanabilmesi diş yapısının korunması için büyük bir önem arz etmektedir. İnvaziv restoratif prosedürlerden kaçınılarak koronal dokuların korunması, biyomekanik dengeyi sağlar ve post-endodontik restorasyonlu dişlerin sağkalım oranını artırır. Ayrıca, adeziv tekniklerin gelişmesiyle birlikte klinisyenler için restoratif tedavi seçenekleri genişlemiştir ve post-kor restorasyonlarına ihtiyaç azalmıştır. Lityum disilikat ile güçlendirilmiş seramikler gibi asitle pürüzlendirilebilen, yüksek mekanik dayanıklılığa sahip seramiklerin ortaya çıkışı, adeziv sistemlerin avantajları ile birleştiğinde posterior dişlerin intraradiküler restorasyon gerekmeden tedavileri mümkün kılınmıştır. Bu sayede, onley, overlay veya endokronlar kullanılarak aşırı madde kaybı olan dişler restore edilebilmiştir. Bu prosedürlerin her ne kadar kök dolgulu dişler için başarılı prosedürler oldukları bildirilse de, mevcut literatür post-endodontik restoratif yaklaşımlar konusunda kafa karıştırıcıdır (Aldesoki ve ark., 2022; Couture & Colby, 2003; El-Ma'aite ve ark., 2022; Otto, 2004).

FEA, karmaşık üç boyutlu biyomedikal modellerde stres ve gerilim hesaplamalarındaki kesinliği ve çeşitli olasılıkları nedeniyle günümüzde endodonti alanında sıklıkla kullanılan bir araştırma yöntemidir. CBCT ve mikro-CT gibi modern görüntüleme yöntemleri, FEA'nın doğruluğuna katkıda bulunan karmaşık yapıların yüksek kaliteli üç boyutlu modellerinin elde edilmesi için kullanılmaktadır. Post-endodontik restorasyonların sağkalımlarının ve başarılarının araştırılması amacıyla pek çok çalışmada kavite tasarımlarına, dişlerin biyomekanik davranışlarına ve diş-restorasyon üzerindeki stres dağılımlarına odaklanılmıştır (Aldesoki ve ark., 2022; Maravić ve ark., 2018; Ordino-la-Zapata ve ark., 2022).

Aldesoki ve ark., endodontik tedavi görmüş bir maksiller premolar diş CBCT kullanarak modellermişlerdir ve farklı lityum disilikat endokronlarının biyomekanik davranışlarını incelemişlerdir. Çalışmalarında post+kron, 5 mm pulpa uzantılı butt marjin ve aksiyal uzantılı endokronlar, 3 mm pulpa uzantılı butt marjin ve aksiyal uzantılı endokron restorasyonları tasarlanan 5 modelin her birine ayrı ayrı 100 N'luk aksiyal ve oblik yükler uygulamışlardır. Çalışmanın bulgularına göre, aksiyal uzantılı modellerde butt joint modellere kıyasla von Mises gerilmeleri %15 oranında daha düşük tespit edilmiştir. Ayrıca, 3 mm pulpa uzantılı modellerde 5 mm pulpa uzantılı modellere kıyasla von Mises gerilmeleri benzer şekilde %15 oranında daha az bulunmuştur. Bu sonuç, premolar dişlerin dar tabanları ve geniş oklu-

zo-gingival boyutları ile ilişkilendirilmiştir. Premolar dişlerin molar dişlere kıyasla daha fazla horizontal kuvvetlere maruz kalmaları, daha güçlü bir kaldıraç kuvveti ile karşı karşıya gelmelerine neden olabilir. Bu sebeple, pulpa uzantısının azalması kaldıraç kolunu kısaltacak ve sonuç olarak endokrondaki gerilimleri azaltacaktır (Aldesoki ve ark., 2022). Gaintantzopoulou ve El-Damanhoury, benzer şekilde, endokron preparasyonlarının intradiküler uzantılarının nihai restorasyonun hem marjinal adaptasyonunu hem de internal uyumunu olumsuz etkilediği sonucuna varmışlardır (Gaintantzopoulou & El-Damanhoury, 2016).

Maravić ve ark., endodontik olarak tedavi edilmiş mezial-okluzal-distal (MOD) kaviteye sahip maksiller ikinci premolar dişin bilgisayarlı tomografi (BT) taramalarına dayanarak üç boyutlu modeller oluşturmuşlardır. MOD, MOD+2 mm palatal redüksiyon, MOD+2 mm bukkal ve palatal redüksiyon, MOD+post, MOD+ 2 mm palatal redüksiyon+post, MOD+2 mm bukkal ve palatal redüksiyon+post olmak üzere altı model karşılaştırılmıştır. Post olarak fiberle güçlendirilmiş kompozit postlar tercih edilmiştir. Modellerin okluzal yüzeylerine 150 N'luk bir kuvvet uygulanmıştır. Mine ve dentin için en yüksek von Mises değeri MOD+2 mm palatal redüksiyon grubunda bulunmuştur. Bunun yanında, bu modelde post olmayan diğer modellere kıyasla dolguda daha yüksek gerilim değerleri saptanmıştır. Post olan modellerde ise, yüksek stresli alanlarda daha düşük stres görülmüştür (Maravić ve ark., 2018). Çeşitli çalışmalarda da paralel şekilde, premolar dişlerin kırılma dirençlerinin artırılabilmesi için en az 1.5 mm tüberkül redüksiyonu önerilmektedir (Kantardžić ve ark., 2012; Lin ve ark., 2008). Ek olarak, palatinal redüksiyonun minedeki gerilmeleri önemli ölçüde azalttığı görülmüştür (Kantardžić ve ark., 2012).

Huang ve ark., kompozitle güçlendirilmiş cam fiber post, nanopartüklü rezin seramik post, polimer infiltre seramik ağı sahip post ve zirkonyum post sistemlerini; polietereterketon (PEEK), nanoseramik hibrit kompozit rezin, hibrit rezin kompozit, lösit takviyeli cam seramik, lityum disilikat cam seramik, zirkonyum kron materyallerini; kompozit rezin ve metil metakrilat bazlı simanlarını, endodontik tedavili mandibular birinci premolar diş modelinde FEA kullanarak stres dağılımı açısından karşılaştırmışlardır. PEEK kullanılarak üretilen kronların diğer materyallerle üretilenlere kıyasla servikal bölgede daha az stres oluşturduğu saptanmıştır. Post ucu etrafındaki stres dağılımının simantasyon ajanından etkilendiği ve zirkonnyum post gibi daha yüksek young modülüne sahip materyallerin yerleştirilmesi sırasında metil metakrilat yapıştırma simanının kullanımı post ucundaki stres konsantrasyonunu azaltmıştır. Ayrıca, kronun young modülü büyüdükçe, servikal alanda

dentin ve kron içi stres miktarının arttığı gözlemlenmiştir (Huang ve ark., 2022).

Dartora ve ark., lityum disilikat cam seramik ve polimer infiltre seramik ağ ile elde edilen endokronlarla restore edilen, endodontik olarak tedavi edilmiş mandibular molar dişlerin stres dağılımlarını ve yorulma performanslarını direkt kompozit restorasyonları ile FEA kullanarak karşılaştırmıştır. Gruplar arasında yorulma başarısızlık yükü, kırılmaya kadar olan döngü sayısı ve ortalama sağkalım süresi açısından bir farklılık tespit edilmemiştir. Bununla birlikte, indirekt endokronların direkt kompozit restorasyonlara kıyasla daha yüksek mekanik yapısal güvenilirliğe sahip olduğu ve diş dokularında daha az stres yarattığı tespit edilmiştir. Endokronlar arasında ise, özellikle lityum disilikattan üretilenlerin mekanik yapısal güvenilirliğinin daha fazla olduğu saptanmıştır (Dartora ve ark., 2019).

Gong ve ark., modifiye edilmiş 2 mm kanal içi uzantılı üç farklı endokronu, bir post+kron restorasyonunu ve bir tane rutin endokron tasarımını FEA kullanarak mandibular molar diş modelinde stres açısından karşılaştırmıştır. Ayrıca restoratif materyaller olarak, lityum disilikat cam seramikler ve rezin nanoseramikler kullanılmıştır. Modifiye endokron tasarımlarının preparasyon yöntemine ve diş yapısındaki eksikliklere göre tercih edilebileceği ifade edilmiştir. 4 mm kalınlıkta hazırlanan rezin nanoseramik modifiye endokron, diş üzerinde daha düşük stres oluştururken, lityum disilikat cam seramik modifiye endokronun kalınlığı, stres dağılımını önemli ölçüde etkilememiştir. Lityum disilikat cam seramik modifiye endokron, mine sement sınırının 2 mm koronalinde hazırlandığında, rutin endokron restorasyonuna kıyasla mine sement sınırı çevresinde daha düşük strese neden olmuştur. Post restorasyonun uzatılmış kök kanal duvarına daha fazla stres uygularken, mine sement çevresindeki stresi azalttığı görülmüştür (Gong ve ark., 2022).

Feldspatik seramik (Mark2), lityum disilikat (EMAX) ve Lava ultimate (LU) olmak üzere üç tip restoratif materyalden oluşan, 1 mm kalınlık ve 2 mm derinliğe sahip endokronların direnç kırılmalarını mandibular molar diş modellerinde FEA ile inceleyen Meng ve ark., endokronun okluzal yüzeyindeki farklı yük bölgelerinin, diş dokusunda farklı stres dağılımlarına neden olabileceğini göstermiştir. Çalışmanın bulgularına göre, yükün temas yüzeyinin küçülmesi ile tüm materyallerde stres miktarında artış meydana gelmiştir. LU endokron, yüklerden bağımsız olarak Mark2 ve EMAX restorasyonlara kıyasla daha fazla stresi diş dokusuna aktarmıştır. Ayrıca, ince endokronların rehabilitasyonları sırasında yapılan kanal içi uzantılar ile diş dokularına gelen stresin dağılabileceği bildirilmiştir (Meng ve ark., 2021).

Fiberle güçlendirilmiş kompozitlerin çatlak dişlerde kırılma dayanımı üzerine olan etkileri çeşitli çalışmalarda FEA ile incelenmiştir. Genel olarak, fiberle güçlendirilmiş kompozitlerin endodontik tedavi görmüş dişlerin yorulma direncini iyileştiremediği bildirmiştir. Bununla birlikte, bu kompozitlerin çatlak dişlerde olumlu kırılma oranını ya da başarısızlık modunu olumlu yönde etkilediğini rapor eden çalışmalar da mevcuttur (Karzoun ve ark., 2015; Otero ve ark., 2021; Shi ve ark., 2022).

Zhang ve ark., FEA kullanarak endodontik tedavi görmüş mandibular molar dişlerde EMAX endokron restorasyonlarının butt marjin, okluzal kalınlık ve pulpa odası uzatma derinliklerinin stres dağılımları üzerindeki etkilerini değerlendirdikleri çalışmalarında, düz ve kavisli butt marjinlerin von Mises gerilimlerinin benzer olduğunu; ancak, kavisli yüzeylerde mine için daha fazla adezyon alanı sağlandığını bildirmişlerdir. 1,2, 3 mm okluzal kalınlık ve 1, 2, 3 mm uzatma derinliğinin karşılaştırılması sonucunda, 2 mm okluzal kalınlık ve 2 mm uzatma derinliğinin restorasyonlarda ve diş dokularında en düşük von Mises gerilimi sergilediği gösterilmiştir (Zhang ve ark., 2022).

Tribst ve ark., pulpa odası genişletme açılarının ve dolgu materyallerinin mekanik özelliklerinin lityum disilikat endokronun biyomekanik davranışı üzerindeki etkilerini FEA kullanarak değerlendirmek için endodontik tedavi görmüş maksiller molar dişin modelini oluşturmuşlardır. Dokuz farklı dolgu materyali ve 90°, 6°, 12° ve 18° olmak üzere dört farklı genişletme açısı ile toplamda 36 model elde etmişlerdir. Sonuçlar, dik açılı endokronlar için yük bölgesinde daha fazla stres ile birlikte modeller arasında benzer stres dağılım paternleri göstermiştir. Ek olarak, pulpa odası genişletme açısı ne kadar yüksek olursa, restorasyon ve diş üzerindeki stres pik değeri o kadar yüksek ve siman tabakasındaki stres değeri o kadar düşük olmuştur. Bu nedenle, 6° ve 12° pulpa odası açılarının, adeziv arayüz gerilimleri açısından daha umut verici olduğu öne sürülmüştür. Materyal açısından sonuçlar incelendiğinde, elastik modülü yüksek olan dolgu materyalinin siman tabakasından daha az gerilmelere neden olduğu; ancak, restorasyon ve diş yapılarında daha fazla stres oluşturduğu görülmüştür. Bu doğrultuda, endokron restorasyonlarında kanal ağızlarının kapatılması için rezin siman ve bulk-fill akışkan kompozit rezin gibi esnek dolgu materyallerinin kullanımı önerilmiştir (Tribst ve ark., 2021).

Sonuç

Endodontik tedaviyi takiben diş sert dokularında meydana gelen geniş hacimli madde kayıpları ve kalan diş sert dokularının dehidratasyonuna bağlı

dokuların fiziksel ve mekaniksel özelliklerde ortaya çıkan değişimler birçok bilimsel araştırmada mikro ve makro düzeyde incelenmiştir. Bu araştırmalar, dokulardaki değişimlerin, diş biyomekaniğinde farklılıklara yol açarak restoratif tedavinin klinik başarısının büyük oranda etkilenebileceğini ortaya koymuştur. Endodontik tedavili dişlerde vakaya özgü uygun restoratif protokolün belirlenebilmesi için, diş ve restorasyon üzerindeki stres ve gerilim dağılımları FEA modelleri kullanılarak simüle edilebilir. Bu sayede, post-endodontik restorasyonlarda optimum biyomekanik denge elde edilerek restore edilmiş dişlerin sağkalım ve başarı oranları arttırılabilir. Bununla birlikte, FEA çalışmalarında daha karşılaştırılabilir sonuçlar edilebilmesi için daha fazla değişken dikkate alınmalı ve yöntem daha standardize hale getirilmelidir. Bu tür çalışmalarda yapılan deneylerin statik olması, zaman ve sıcaklık etkisinin dikkate alınmaması ve tüm materyallerin diş dokularına mükemmel bir şekilde bağlandığının varsayılması göz ardı edilmemesi gereken faktörlerdir. Ayrıca, FEA çalışmalarında tüm restoratif materyallerin ve diş dokularının homojen, lineer ve izotropik olduğu kabul edilir. Ancak bu yapıardan bazıları bu özelliklere sahip değildir. Özellikle periodontal ligamentin izotropik olmaması literatürde sıklıkla tartışma konusu olmuştur. Bunun yanında, bazı çalışmalarda siman tabakası değerlendirilen parametrelerden biri olurken bazı çalışmalarda ise bu tabakanın göz ardı edilmesi çalışmalar arasındaki heterojenliğin nedenlerinden birisi olarak gösterilmiştir. Heterojenliğin başka bir sebebi ise, bazı çalışmalarda basitleştirilmiş kemik modelleri üzerinde ölçüm yapılırken, bazı çalışmalarda CBCT kesitlerinden elde edilen gerçekçi bir anatomik model üzerinde değerlendirme yapılması olabilir. FEA, elde edilen modellerin mekanik davranışları hakkında genel bilgiler sağlasa da, basitleştirmelerin, varsayımların ve simüle edilmeyen biyolojik faktörlerin varlığı nedeniyle FEA bulguları klinik sonuçları tam olarak yansıtmayabilir. Bu bilgilere dayanarak, biyomekanik sonuçların klinik davranışlarla doğru bir şekilde ilişkilendirilebilmesi için in vivo araştırmalarla desteklenen FEA çalışmalarının yapılmasına ihtiyaç vardır (Aldesoki ve ark., 2022; Carvalho ve ark., 2018; Dartora ve ark., 2019; Maravić ve ark., 2018).

Referanslar

- Aldesoki, M., Bourauel, C., Morsi, T., El-Anwar, M. I., Aboelfadl, A. K., & Elshazly, T. M. (2022). Biomechanical behavior of endodontically treated premolars restored with different endocrown designs: Finite element study. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, *133*, 105309.
- Anusavice, K. J., Shen, C., & Rawls, H. R. (2012). *Phillips' science of dental materials*. Elsevier Health Sciences.
- Aquilino, S. A., & Caplan, D. J. (2002). Relationship between crown placement and the survival of endodontically treated teeth. *The Journal of prosthetic dentistry*, *87*(3), 256-263.
- Arola, D. (2017). Fatigue testing of biomaterials and their interfaces. *Dental Materials*, *33*(4), 367-381.
- Ausiello, P., Ciaramella, S., Martorelli, M., Lanzotti, A., Zarone, E., Watts, D. C., & Gloria, A. (2017). Mechanical behavior of endodontically restored canine teeth: Effects of ferrule, post material and shape. *Dental Materials*, *33*(12), 1466-1472.
- Barkhordar, R. A., Radke, R., & Abbasi, J. (1989). Effect of metal collars on resistance of endodontically treated teeth to root fracture. *The Journal of prosthetic dentistry*, *61*(6), 676-678.
- Barsanescu, P. D., & Comanici, A. M. (2017). von Mises hypothesis revised. *Acta Mechanica*, *228*, 433-446.
- Berman, L. H., & Hargreaves, K. M. (2020). *Cohen's pathways of the pulp-e-book*. Elsevier Health Sciences.
- Brankovic, M., Kardys, I., Steyerberg, E. W., Lemeshow, S., Markovic, M., Rizopoulos, D., & Boersma, E. (2019). Understanding of interaction (subgroup) analysis in clinical trials. *European journal of clinical investigation*, *49*(8), e13145.
- Burke, F., & Lucarotti, P. (2009). Ten-year outcome of crowns placed within the General Dental Services in England and Wales. *Journal of Dentistry*, *37*(1), 12-24.
- Campbell, F. C. (2008). *Elements of metallurgy and engineering alloys*. ASM international.
- Caplan, D., Kolker, J., Rivera, E., & Walton, R. (2002). Relationship between number of proximal contacts and survival of root canal treated teeth. *International endodontic journal*, *35*(2), 193-199.
- Carvalho, M. A. D., Lazari, P. C., Gresnigt, M., Del Bel Cury, A. A., & Magne, P. (2018). Current options concerning the endodontically-treated teeth restoration with the adhesive approach. *Brazilian oral research*, *32*.

- Chien, P. Y. H., Walsh, L. J., & Peters, O. A. (2021). Finite element analysis of rotary nickel-titanium endodontic instruments: a critical review of the methodology. *European journal of oral sciences*, 129(5), e12802.
- Choi, A. H., Conway, R. C., & Ben-Nissan, B. (2014). Finite-element modeling and analysis in nanomedicine and dentistry. *Nanomedicine*, 9(11), 1681-1695.
- Couture, C., & Colby, T. V. (2003). Histopathology of bronchiolar disorders. *Seminars in respiratory and critical care medicine*,
- Dartora, G., Pereira, G. K. R., de Carvalho, R. V., Zucuni, C. P., Valandro, L. F., Cesar, P. F., Caldas, R. A., & Bacchi, A. (2019). Comparison of endocrowns made of lithium disilicate glass-ceramic or polymer-infiltrated ceramic networks and direct composite resin restorations: fatigue performance and stress distribution. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 100, 103401.
- Denry, I. L. (1996). Recent advances in ceramics for dentistry. *Critical Reviews in Oral Biology & Medicine*, 7(2), 134-143.
- Einhorn, M., DuVall, N., Wajdowicz, M., Brewster, J., & Roberts, H. (2019). Preparation ferrule design effect on endocrown failure resistance. *Journal of Prosthodontics*, 28(1), e237-e242.
- El-Damanhoury, H. M., Haj-Ali, R. N., & Platt, J. A. (2015). Fracture resistance and microleakage of endocrowns utilizing three CAD-CAM blocks. *Operative dentistry*, 40(2), 201-210.
- El-Ma'aita, A., AlRabab'ah, M., Abu Awwad, M., Hattar, S., & Devlin, H. (2022). Endocrowns clinical performance and patient satisfaction: a randomized clinical trial of three monolithic ceramic restorations. *Journal of Prosthodontics*, 31(1), 30-37.
- Fabricius, L., Dahlén, G., Sundqvist, G., Happonen, R. P., & Möller, Å. J. (2006). Influence of residual bacteria on periapical tissue healing after chemomechanical treatment and root filling of experimentally infected monkey teeth. *European journal of oral sciences*, 114(4), 278-285.
- Gaintantzopoulou, M., & El-Damanhoury, H. (2016). Effect of preparation depth on the marginal and internal adaptation of computer-aided design/computer-assisted manufacture endocrowns. *Operative dentistry*, 41(6), 607-616.
- Gao, J., Xu, W., & Ding, Z. (2006). 3D finite element mesh generation of complicated tooth model based on CT slices. *Computer methods and programs in biomedicine*, 82(2), 97-105.
- Gong, Q., Huang, L., Luo, J., Zhang, Y., Meng, Q., Quan, J., & Tong, Z. (2022). The practicability of different preparation of mandibular molar restored by modified endocrown with intracanal extension: Computa-

- tional analysis using finite element models. *Computer methods and programs in biomedicine*, 226, 107178.
- Göhring, T. N., & Peters, O. A. (2003). Restoration of endodontically treated teeth without posts. *American journal of dentistry*, 16(5), 313-317.
- Hasanoğlu Aydın, D. (2012). Cam Seramik Endokronların Biyomekaniksel Özelliklerinin Preklinik ve Klinik Olarak Değerlendirilmesi.
- Helfer, A. R., Melnick, S., & Schilder, H. (1972). Determination of the moisture content of vital and pulpless teeth. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology*, 34(4), 661-670.
- Hoskinson, S. E., Ng, Y.-L., Hoskinson, A. E., Moles, D. R., & Gulabivala, K. (2002). A retrospective comparison of outcome of root canal treatment using two different protocols. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontology*, 93(6), 705-715.
- Huang, L., Nemoto, R., Okada, D., Shin, C., Saleh, O., Oishi, Y., Takita, M., Nozaki, K., Komada, W., & Miura, H. (2022). Investigation of stress distribution within an endodontically treated tooth restored with different restorations. *Journal of Dental Sciences*, 17(3), 1115-1124.
- Ivancik, J., & Arola, D. D. (2013). The importance of microstructural variations on the fracture toughness of human dentin. *Biomaterials*, 34(4), 864-874.
- Kantardžić, I., Vasiljević, D., Blažić, L., & Lužanin, O. (2012). Influence of cavity design preparation on stress values in maxillary premolar: a finite element analysis. *Croatian medical journal*, 53(6), 568-576.
- Karzoun, W., Abdulkarim, A., Samran, A., & Kern, M. (2015). Fracture strength of endodontically treated maxillary premolars supported by a horizontal glass fiber post: an in vitro study. *Journal of endodontics*, 41(6), 907-912.
- Kinney, J., Marshall, S., & Marshall, G. (2003). The mechanical properties of human dentin: a critical review and re-evaluation of the dental literature. *Critical Reviews in Oral Biology & Medicine*, 14(1), 13-29.
- Krejci, I., Lutz, F., & Fülleman, J. (1992). Tooth-colored inlays/overlays. Tooth-colored adhesive inlays and overlays: materials, principles and classification. *Schweizer Monatsschrift für Zahnmedizin = Revue mensuelle suisse d'odonto-stomatologie = Rivista mensile svizzera di odontologia e stomatologia*, 102(1), 72-83.
- Lazarski, M. P., Walker III, W. A., Flores, C. M., Schindler, W. G., & Hargreaves, K. M. (2001). Epidemiological evaluation of the outcomes of nonsurgical root canal treatment in a large cohort of insured dental patients. *Journal of endodontics*, 27(12), 791-796.
- Lima, C., Barbosa, A., Ferreira, C., Ferretti, M., Aguiar, F., Lopes, R., Fidel, S., & Silva, E. (2021). Influence of ultraconservative access cavities on instrumentation efficacy with XP endo Shaper and Reciproc, filling ability

- and load capacity of mandibular molars subjected to thermomechanical cycling. *International endodontic journal*, 54(8), 1383-1393.
- Lin, C.-L., Chang, Y.-H., & Liu, P.-R. (2008). Multi-factorial analysis of a cusp-replacing adhesive premolar restoration: a finite element study. *Journal of Dentistry*, 36(3), 194-203.
- Lin, F., Ordinola-Zapata, R., Xu, H., Heo, Y., & Fok, A. (2021). Laboratory simulation of longitudinally cracked teeth using the step stress cyclic loading method. *International endodontic journal*, 54(9), 1638-1646.
- Lin, L. M., Rosenberg, P. A., & Lin, J. (2005). Do procedural errors cause endodontic treatment failure? *The Journal of the American Dental Association*, 136(2), 187-193.
- Lucarotti, P., Holder, R., & Burke, F. (2005). Outcome of direct restorations placed within the general dental services in England and Wales (Part 3): variation by dentist factors. *Journal of Dentistry*, 33(10), 827-835.
- Maravić, T., Comba, A., Mazzitelli, C., Bartoletti, L., Balla, I., di Pietro, E., Josić, U., Generali, L., Vasiljević, D., & Blažić, L. (2022). Finite element and in vitro study on biomechanical behavior of endodontically treated premolars restored with direct or indirect composite restorations. *Scientific Reports*, 12(1), 12671.
- Maravić, T., Vasiljević, D., Kantardžić, I., Lainović, T., Lužanin, O., & Blažić, L. (2018). Influence of restorative procedures on endodontically treated premolars: Finite element analysis of a CT-scan based three-dimensional model. *Dental Materials Journal*, 37(3), 493-500.
- Matsumoto, M., & Goto, T. (1970). Lateral force distribution in partial denture design. *Journal of Dental Research*, 49(2), 359-364.
- McDonald, A., & Setchell, D. (2005). Developing a tooth restorability index. *Dental update*, 32(6), 343-348.
- Meng, Q., Zhang, Y., Chi, D., Gong, Q., & Tong, Z. (2021). Resistance fracture of minimally prepared endocrowns made by three types of restorative materials: a 3D finite element analysis. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 32, 1-9.
- Mireku, A., Romberg, E., Fouad, A., & Arola, D. (2010). Vertical fracture of root filled teeth restored with posts: the effects of patient age and dentine thickness. *International endodontic journal*, 43(3), 218-225.
- Nagasiri, R., & Chitmongkolsuk, S. (2005). Long-term survival of endodontically treated molars without crown coverage: a retrospective cohort study. *The Journal of prosthetic dentistry*, 93(2), 164-170.
- Nair, P. R., Sjögren, U., Krey, G., Kahnberg, K.-E., & Sundqvist, G. (1990). Intraradicular bacteria and fungi in root-filled, asymptomatic human teeth

with therapy-resistant periapical lesions: a long-term light and electron microscopic follow-up study. *Journal of endodontics*, 16(12), 580-588.

- Naumann, M., Metzdorf, G., Fokkinga, W., Watzke, R., Sterzenbach, G., Bayne, S., & Rosentritt, M. (2009). Influence of test parameters on in vitro fracture resistance of post endodontic restorations: a structured review. *Journal of oral rehabilitation*, 36(4), 299-312.
- Naumann, M., Sterzenbach, G., & Pröschel, P. (2005). Evaluation of load testing of postendodontic restorations in vitro: linear compressive loading, gradual cycling loading and chewing simulation. *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials: An Official Journal of The Society for Biomaterials, The Japanese Society for Biomaterials, and The Australian Society for Biomaterials and the Korean Society for Biomaterials*, 74(2), 829-834.
- Ng, Y. L., Mann, V., & Gulabivala, K. (2010). Tooth survival following non-surgical root canal treatment: a systematic review of the literature. *International endodontic journal*, 43(3), 171-189.
- Ng, Y. L., Mann, V., Rahbaran, S., Lewsey, J., & Gulabivala, K. (2007). Outcome of primary root canal treatment: systematic review of the literature—part 1. Effects of study characteristics on probability of success. *International endodontic journal*, 40(12), 921-939.
- Ng, Y. L., Mann, V., Rahbaran, S., Lewsey, J., & Gulabivala, K. (2008). Outcome of primary root canal treatment: systematic review of the literature—Part 2. Influence of clinical factors. *International endodontic journal*, 41(1), 6-31.
- Ordinola-Zapata, R., & Fok, A. (2021). Research that matters: debunking the myth of the “fracture resistance” of root filled teeth. In (Vol. 54, pp. 297-300).
- Ordinola-Zapata, R., Lin, F., Nagarkar, S., & Perdigão, J. (2022). A critical analysis of research methods and experimental models to study the load capacity and clinical behaviour of the root filled teeth. *International endodontic journal*, 55, 471-494.
- Orstavik, D. (2020). *Essential endodontology: prevention and treatment of apical periodontitis*. John Wiley & Sons.
- Otero, C. A. Y., Bijelic-Donova, J., Saratti, C. M., Vallittu, P. K., Di Bella, E., Krejci, I., & Rocca, G. T. (2021). The influence of FRC base and bonded CAD/CAM resin composite endocrowns on fatigue behavior of cracked endodontically-treated molars. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 121, 104647.
- Otto, T. (2004). Computer-aided direct all-ceramic crowns: preliminary 1-year results of a prospective clinical study. *International Journal of Periodontics & Restorative Dentistry*, 24(5).

- Palareti, G., Legnani, C., Cosmi, B., Antonucci, E., Erba, N., Poli, D., Testa, S., Tosetto, A., Investigators, D., & De Micheli, V. (2016). Comparison between different D-D imer cutoff values to assess the individual risk of recurrent venous thromboembolism: analysis of results obtained in the DULCIS study. *International Journal of Laboratory Hematology*, *38*(1), 42-49.
- Park, S., Quinn, J., Romberg, E., & Arola, D. (2008). On the brittleness of enamel and selected dental materials. *Dental Materials*, *24*(11), 1477-1485.
- Peroz, I., Blankenstein, F., Lange, K.-P., & Naumann, M. (2005). Restoring endodontically treated teeth with posts and cores--a review. *Quintessence international*, *36*(9).
- Pinto, C. L., Bhering, C. L. B., de Oliveira, G. R., Maroli, A., Reginato, V. F., Caldas, R. A., & Bacchi, A. (2019). The influence of post system design and material on the biomechanical behavior of teeth with little remaining coronal structure. *Journal of Prosthodontics*, *28*(1), e350-e356.
- Ramirez-Sebastia, A., Bortolotto, T., Roig, M., & Krejci, I. (2013). Composite vs ceramic computer-aided design/computer-assisted manufacturing crowns in endodontically treated teeth: analysis of marginal adaptation. *Operative dentistry*, *38*(6), 663-673.
- Ray, H., & Trope, M. (1995). Periapical status of endodontically treated teeth in relation to the technical quality of the root filling and the coronal restoration. *International endodontic journal*, *28*(1), 12-18.
- Reeh, E. S., Messer, H. H., & Douglas, W. H. (1989). Reduction in tooth stiffness as a result of endodontic and restorative procedures. *Journal of endodontics*, *15*(11), 512-516.
- Ricucci, D., Russo, J., Rutberg, M., Burleson, J. A., & Spångberg, L. S. (2011). A prospective cohort study of endodontic treatments of 1,369 root canals: results after 5 years. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontology*, *112*(6), 825-842.
- Ricucci, D., & Siqueira Jr, J. F. (2011). Recurrent apical periodontitis and late endodontic treatment failure related to coronal leakage: a case report. *Journal of endodontics*, *37*(8), 1171-1175.
- Rocca, G. T., & Bouillaguet, S. (2008). Alternatives thérapeutiques pour la restauration des dents non-vitales. *Revue d'odonto-stomatologie (Paris)*, *37*(4), 259-272.
- Roperto, R., Sousa, Y. T., Dias, T., Machado, R., Perreira, R. D., Leoni, G. B., Palma-Dibb, R. G., Rodrigues, M. P., Soares, C. J., & Teich, S. (2019). Biomechanical behavior of maxillary premolars with conservative and traditional endodontic cavities. *Quintessence Int*, *50*(5), 350-356.
- Saber, S. M., Hayaty, D. M., Nawar, N. N., & Kim, H.-C. (2020). The effect of access cavity designs and sizes of root canal preparations on the biome-

- chanical behavior of an endodontically treated mandibular first molar: A finite element analysis. *Journal of endodontics*, 46(11), 1675-1681.
- Santos-Filho, P. C. F., Veríssimo, C., Raposo, L. H. A., Pedro Yoshito Noritomi, M., & Martins, L. R. M. (2014). Influence of ferrule, post system, and length on stress distribution of weakened root-filled teeth. *Journal of endodontics*, 40(11), 1874-1878.
- Shi, R., Meng, X., Feng, R., Hong, S., Hu, C., Yang, M., & Jiang, Y. (2022). Stress Distribution and Fracture Resistance of repairing Cracked Tooth with Fiber reinforced Composites and Onlay. *Australian Endodontic Journal*, 48(3), 458-464.
- Sorensen, J. A., & Engelman, M. J. (1990). Ferrule design and fracture resistance of endodontically treated teeth. *The Journal of prosthetic dentistry*, 63(5), 529-536.
- Sun, J., Jiao, T., Tie, Y., & Wang, D. (2008). Three dimensional finite element analysis of the application of attachment for obturator framework in unilateral maxillary defect. *Journal of oral rehabilitation*, 35(9), 695-699.
- Sundqvist, G. (1976). *Bacteriological studies of necrotic dental pulps* [Umeå University].
- Tosun, S., Özsevick, A. S., & Aydın, U. (2016). Restoration of endodontically treated teeth: Endodontik tedavili dişlerin restorasyonu. *European Journal of Therapeutics*, 22(1), 33-38.
- Tribst, J. P. M., Lo Giudice, R., Dos Santos, A. F. C., Borges, A. L. S., Silva-Concílio, L. R., Amaral, M., & Lo Giudice, G. (2021). Lithium disilicate ceramic endocrown biomechanical response according to different pulp chamber extension angles and filling materials. *Materials*, 14(5), 1307.
- Trivedi, S. (2014). Finite element analysis: A boon to dentistry. *Journal of oral biology and craniofacial research*, 4(3), 200-203.
- Van Staden, R., Guan, H., & Loo, Y.-C. (2006). Application of the finite element method in dental implant research. *Computer methods in biomechanics and biomedical engineering*, 9(4), 257-270.
- 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.
- Wong, R. (2004). Conventional endodontic failure and retreatment. *Dental Clinics*, 48(1), 265-289.
- Yuan, K., Niu, C., Xie, Q., Jiang, W., Gao, L., Ma, R., & Huang, Z. (2018). Apical stress distribution under vertical compaction of gutta percha and occlusal loads in canals with varying apical sizes: a three dimensional finite element analysis. *International endodontic journal*, 51(2), 233-239.

- Zaytsev, D., Ivashov, A. S., Mandra, J. V., & Panfilov, P. (2014). On the deformation behavior of human dentin under compression and bending. *Materials Science and Engineering: C*, *41*, 83-90.
- Zhang, Y., Lai, H., Meng, Q., Gong, Q., & Tong, Z. (2022). The synergetic effect of pulp chamber extension depth and occlusal thickness on stress distribution of molar endocrowns: a 3-dimensional finite element analysis. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, *33*(7), 56.
- Zhang, Y., Liu, Y., She, Y., Liang, Y., Xu, F., & Fang, C. (2019). The effect of endodontic access cavities on fracture resistance of first maxillary molar using the extended finite element method. *Journal of endodontics*, *45*(3), 316-321.

