

ENDODONTİ ALANINDA ARAŞTIRMA YÖNTEMLERİ VE YENİLİKÇİ UYGULAMALAR



EDİTÖR
DOÇ. DR. MELİKE GÜLEÇ



DOI: 10.5281/zenodo.18056830

Endodonti Alanında Araştırma Yöntemleri ve Yenilikçi Uygulamalar

Editör

Doç. Dr. Melike Güleç

İmtiyaz Sahibi
Platanus Publishing®

Editör
Doç. Dr. Melike Güleç

Kapak & Mizanpaj & Sosyal Medya
Platanus Yayın Grubu

Birinci Basım
Aralık, 2025

Yayımcı Sertifika No
45813

ISBN
978-625-8513-22-6

©copyright
Bu kitabın yayım hakkı Platanus Publishing'e aittir. Kaynak gösterilmeden alıntı yapılamaz, izin alınmadan hiçbir yolla çoğaltılamaz.

Adres: Natoyolu Cad. Fahri Korutürk Mah. 157/B, 06480, Mamak,
Ankara, Türkiye.

Telefon: +90 312 390 1 118
web: www.platanuspublishing.com
e-mail: platanuskita@gmail.com



Platanus Publishing®

İÇİNDEKİLER

BÖLÜM 1	5
<i>Oksidatif Stres ve Apikal Periodontitis</i>	
Bilge Akdana & Safa Kurnaz	
BÖLÜM 2	21
<i>Endodontide Periapikal Lezyon İyileşmesinde Fraktal Analizi ve PAI Değerlendirmesi</i>	
Hilal Ekmen & Emre Bayram	
BÖLÜM 3	39
<i>Endodontide İrrigasyonun Evrimi: Aktivasyon Yöntemleri ve Yenilikçi Sistemler</i>	
Hazal Faiz Arslanparçası & Mehmet Ali Arslanparçası	
BÖLÜM 4	51
<i>Endodontide Biyoseramikler ve Güncel Uygulamaları</i>	
İbrahim Uysal	
BÖLÜM 5	62
<i>Son İrrigasyon Protokollerinin Kalsiyum Silikat Esaslı Kanal Dolum Patı-Dentin Bağlantısına Etkisi</i>	
Elif Güngörmez & Kübra Yeşildal Yeter & Betül Güneş	
BÖLÜM 6	94
<i>Endodontik Kaynaklı Patolojilerde İleri Cerrahi Yaklaşımlar</i>	
Akif Nalbant & Gamze Ebrar Nalbant	
BÖLÜM 7	108
<i>Advances in Vital Pulp Therapy: Diagnostic Innovations, Regenerative Biology, and Bioceramic-Based Clinical Protocols</i>	
Duygu Değirmencioğlu & Rama Jaber	

BÖLÜM 1

Oksidatif Stres ve Apikal Periodontitis

Bilge Akdana¹ & Safa Kurnaz²

¹ Arş. Gör. Dt., Kütahya Sağlık Bilimleri Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi Endodonti Anabilim Dalı, ORCID: 0009-0006-3292-5317

² Doç. Dr., Kütahya Sağlık Bilimleri Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi Endodonti Anabilim Dalı, ORCID: 0000-0002-8079-7536

GİRİŞ

Apikal periodontitis (AP), periradiküler dokuları etkileyen ve pulpanın bakteriyel enfeksiyonuna bağlı olarak gelişen inflamatuvar bir hastalıktır. Tedavi edilmeyen dental çürüklerin en yaygın ilerlemiş pulpal-periapikal patolojisi olup sıklıkla diş kaybı ile sonuçlanır (Vengerfeldt ve ark., 2017). AP, yaşam kalitesini düşüren ve sağlık sistemi üzerinde kayda değer bir ekonomik yük oluşturan yaygın bir klinik tablodur (Di Filippo ve ark., 2014; Huuemonen ve ark., 2017; Timmerman ve ark., 2017).

Endodontik tedavinin temel hedefi, kök kanal dolgusu uygulanmadan önce kök kanal sistemindeki mikroorganizmaların ortadan kaldırılmasıdır; ancak bazı vakalarda kök kanalında bulunan biyofilmlerin tamamen elimine edilmesi neredeyse imkânsızdır (Vengerfeldt ve ark., 2017). Yetersiz kök kanal tedavisi (KKT) uygulanmış olgularda dahi AP'nin iyileşme gösterebildiği, buna karşılık teknik açıdan başarılı şekilde yapılmış KKT'ye rağmen persistan AP'nin bulgularının devam edebildiği görülmektedir (Seltzer ve Bender, 2003). Dolayısıyla, AP'nin etiyopatogeneze ilişkin mekanizmalar henüz tam olarak aydınlatılamamış olup, mevcut tedavi yaklaşımları her durumda istenen düzeyde başarı sağlayamamaktadır (Nair, 2006; Siqueira Jr ve Rôças, 2009).

Reaktif oksijen türlerinin (ROS) üretimi, patolojik mikroorganizmaların varlığına bağlı konak savunmasının bir bileşeni olarak fagositik hücre infiltrasyonu ve kemik rezorpsiyonunun gerçekleştiği hastalıklarda, temel bir patojenik mekanizma olarak kabul edilmektedir (Dezerega ve ark., 2012). ROS, radikallerin çeşitli organik moleküllerle etkileşime girerek oksidatif doku hasarına neden olan reaksiyonları tetikleyebilir (Vengerfeldt ve ark., 2017). Buna karşılık insan vücudu, peroksidaz sistemiyle birlikte çeşitli proteinler, vitaminler ve ürik asit vb. enzimatik ve enzimatik olmayan öğeleri içeren geniş bir antioksidan savunma mekanizması oluşturmuştur. Bu bileşenler arasında ürik asit, tükürükte bulunan en önemli antioksidan molekül olarak tanımlanmaktadır. Prooksidanların artışı yönündeki dengesizlik ise oksidatif stres olarak adlandırılır (Inchingolo ve ark., 2013; Liskmann ve ark., 2007).

Endodontik enfeksiyon sırasında fagositlerin yüzeyindeki Toll-benzeri reseptörlerin (TLR'ler) mikrobiyal bileşenlere bağlanması, bu hücrelerin aktivasyonunu, fagositozu, ROS sentezini, ayrıca humoral ve hücrel immün yanıtların tetiklenmesini sağlar. Bu süreç, sitokinler ve matriks metalloproteinazlar (MMP'ler) gibi inflamatuvar mediyatörlerin üretimini de uyarır (Hernández-Ríos ve ark., 2017). ROS düzeylerindeki artış, hücrelerin fizyolojik redoks dengesini bozarak oksidatif stres durumuna geçmelerine neden olur (Hernández-Ríos ve ark., 2017). Oksidatif stres, kemik homeostazının bozulmasına, proinflamatuvar mediyatörlerin artmasına ve MMP'lerin aşırı ekspresyonu ile aktivasyonuna yol açan moleküler hasarı ve redoks sinyallemedeki aksaklıkları tetikleyerek apikal dokularda yıkıma neden olur

(Hernández-Ríos ve ark., 2017). Bunun yanı sıra, oksidatif stres, damar duvarında kronik inflamatuvar bir sürecin gelişimi ile karakterize aterosklerozun patogenezinde kritik bir öneme sahiptir (Hernández-Ríos ve ark., 2017). Kronik AP'nin kardiyovasküler hastalıklar (KVH), özellikle de aterogenez riskindeki artışla ilişkili olduğu bildirilmiştir. Bu iki durum arasındaki potansiyel patobiyolojik bağlantılar literatürde giderek daha fazla tartışılmaktadır.

1. Apikal Periodontitis Etiyolojisi

AP, çoğunlukla kök kanalında biyofilmler oluşturan anaerobik bakterilerin neden olduğu pulpal enfeksiyonların bir sonucudur. Endodontik patojenler ve onların ürünleri, konakta immün-inflamatuvar yanıtı tetikler. Konak savunması, enfeksiyonun yayılmasını engellemeye çalışırken periodontal ligament, radiküler sement ve alveoler kemiği içeren apikal periodontal dokularda yıkıma neden olabilecek şekilde enfeksiyonu lokalize etmeye yönelir (Hernández-Ríos ve ark., 2017).

Hastalığın kronik döneminde, radyografik olarak apikal bölgede radyolusent bir alan şeklinde izlenen rezorptif kemik lezyonu gelişir. Histolojik açıdan apikal lezyonlar, granülasyon dokusundan oluşan apikal granülomu ve skuamöz epitel ile çevrili patolojik bir boşluk niteliğindeki radiküler kiste dönüşebilen yapıları içerir. Bu iki lezyonun, aynı patolojik sürecin birbirini izleyen farklı aşamalarını yansıttığı düşünülmektedir (Nair, 2004).

2. Oksidatif Stres

ROS üretimi, normal hücresel metabolizmanın temel bir bileşeni olup hücre sinyalleme ve metabolik süreçlerde rol alarak gen ekspresyonu, hücre proliferasyonu, hücre ölümü, hücresel göç ve inflamasyon gibi çok sayıda biyolojik fonksiyonu düzenler (Xiang ve ark., 2010). Hücrelerde, farklı bölgelerde lokalize çeşitli enzimler tarafından katalize edilen birden fazla ROS üretim yolu bulunmaktadır. Bu enzimler arasında; nitrik oksit sentazlar, mitokondriyal solunum zincirinin elektron taşıma kompleksleri, sitokrom P450 monooksijenazlar, ksantin oksidaz ve NADPH oksidaz yer almakta olup, her biri farklı biyokimyasal reaksiyonlar aracılığıyla ROS oluşumuna katkıda bulunmaktadır. (Shackelford ve ark., 2000).

ROS, oksijenden türeyen serbest radikal ve radikal olmayan türleri kapsar. Serbest radikal türleri, sahip oldukları bir veya daha fazla eşleşmemiş elektron nedeniyle yüksek reaktivite gösterir; bunlara klasik örnekler olarak süperoksit anyonu ve hidroksil radikali verilebilir. Radikal olmayan türler ise oksitleyici özellik taşıyan veya kolaylıkla radikal forma dönüşebilen bileşiklerdir; hidrojen peroksit bu gruba tipik bir örnektir (Chapple, 1997; Trivedi ve Lal, 2017). Ayrıca nitrojen ve klor kökenli reaktif türler de patolojik süreçlerde önemli rol oynayabilir; nitrik oksit ve hipokloröz asit buna örnek olarak verilebilir (Biswas, 2016).

Antioksidanlar, serbest radikallerin zarar verici etkilerini azaltan ve “oksitlenmeye yatkın bir substrata kıyasla daha düşük konsantrasyonlarda bulunduklarında, o substratın oksidasyon sürecini belirgin şekilde yavaşlatan veya tamamen durduran bileşikler” olarak tanımlanmaktadır (Halliwell ve Gutteridge, 2015). Antioksidan savunma mekanizmaları, hücreleri reaktif oksijen türlerinin zararlı etkilerinden korumak amacıyla hem enzimatik hem de enzimatik olmayan süreçleri kapsar.

Başlıca enzimatik antioksidanlar arasında katalaz, tiyol-bağımlı peroksidaz olan glutatyon, süperoksit dismutaz ve peroksidaz ile peroksiredoksinler yer alır. Non-enzimatik antioksidanlar ise; koenzim Q10, ürik asit, tiyol türevi antioksidanlar ve bilirubin vb. metabolik kaynaklı antioksidanları; ayrıca polifenolik bileşikler ve karotenoidler, hem suda hem de yağda çözünebilen vitaminler, tokoferoller, askorbik asit, folik asit ve sistein vb. eser elementleri içeren besinlerden dışarıdan alınan bileşikler kapsar (Carocho ve Ferreira, 2013; Chapple ve Matthews, 2007; Flohé, 2016).

ROS üretimi ve antioksidan sistemler organizmanın doğal işleyişinin sürdürülebilmesi için uyumlu bir denge içinde çalışır. Oksidatif stres ise, “*pro-oksidanlar ve antioksidanlar arasındaki dengenin pro-oksidanların baskın hale gelmesi ile bozulması sonucunda redoks sinyallemesinin aksaması ve/veya moleküler hasarın meydana gelmesi*” şeklinde tanımlanır (Halliwell ve Whiteman, 2004).

Oksidatif stres, lokal periapikal dokularda hasara yol açtığı gibi ateroskleroz, artrit ve kanser gibi çeşitli sistemik hastalıkların patogeneze de katkıda bulunmaktadır (Akalin ve ark., 2008; Akalin ve ark., 2007). Güncel epidemiyolojik veriler, apikal lezyonların genç yetişkinlerde KVH, özellikle de aterogenez riskinde artış ile ilişkili olabileceğini göstermektedir; ancak bu ilişkiyi açıklayan mekanizmalar hâlâ net değildir (Paraskevas ve ark., 2008).

2. Oksidatif Stresin Apikal Periodontitis Üzerindeki Lokal Etkileri

Endodontik enfeksiyon sırasında bakteriyel yapısal motiflerin veya hücrel artıkların fagosit yüzeyindeki TLR'lere bağlanması (Chapple, 1997), ROS oluşumunu artırarak fagosit aktivasyonunu ve fagositozu teşvik eder; ayrıca humoral ve hücrel immün yanıtların başlatılmasını ve sitokinler ile MMP'ler gibi inflamatuvar mediyatörlerin sentezlenmesini uyarır (Dezerega ve ark., 2012; Holden ve ark., 2014; Sima ve Glogauer, 2013). ROS, konakçı organizmanın istilacı patojenlere karşı savunmasında kritik bir mekanizmadır. Dolayısıyla, bakterilerin öldürülmesi ve sindirilmesini sağlayan bakteriyel fagositoz, proteolitik enzim salınımı ve immünomodülatör bileşiklerin üretimiyle birlikte “solunum patlaması” olarak tanımlanan süreç içinde gerçekleşir. Non-mitokondriyal oksidatif metabolizmadaki bu ani yükseliş, NADPH oksidaz kompleksinin aktive olmasıyla süperoksit radikali başta olmak üzere çeşitli ROS türlerinin üretimine neden olur (Babior, 1984).

Oksidanların etkisi sadece patojen eliminasyonu ile sınırlı değildir; aşırı oksidan üretimi DNA ve protein hasarı, enzim ve matriks bileşenlerinin bozulması, proinflatuar sitokinlerin uyarılması, lipit peroksidasyonu ve MMP gibi hidrolitik enzimlerle proteolitik aktiviteyi sınırlayan faktörlerin baskılanması yolu ile doku hasarına yol açabilir (Chapple, 1997; Graves ve ark., 2011). Hücre dışı ortamda aşırı miktarda üretilen hidrojen peroksit, biyolojik membranlardan serbestçe difüze olarak ve hücre içinde ikinci haberci gibi davranarak çeşitli sinyal iletim yollarını aktive edebilir (Çanakçı ve ark., 2006; Lamster ve Novak, 1992; Mody ve ark., 2001).

Enflamasyon ve oksidatif stres arasındaki sıkı etkileşim dikkate alındığında, periodontal ve periapikal doku hasarının patogeneğinde ROS ve antioksidan sistemlerin rolü son yıllarda yeniden ilgi odağı hâline gelmiştir. Çoklu doymamış yağ asitlerinin oksidatif peroksidasyonu sonucu oluşan ürünlerden olan malondialdehit (MDA) düzeylerinin, sağlıklı periodontal dokulara kıyasla periapikal granülomlarda belirgin biçimde arttığı; buna karşılık glutatyon peroksidaz aktivitesinin azaldığı bildirilmektedir. Bu bulgular, bölgedeki oksidatif dengesizliğe işaret etmektedir (Marton ve ark., 1993). Ayrıca apikal granülomlardan elde edilen polimorfonükleer hücrelerde (PMN) hidrojen peroksit ve süperoksit anyon üretiminin arttığı, cerrahi tedavi sonrasında ise değerlerin normal seviyelere döndüğü gösterilmiştir (Minczykowski ve ark., 2001).

Periapikal lezyonlarda ROS seviyelerinin üretim ve eliminasyon süreçlerindeki uyumsuzluk, toplam oksidan durum (TOS) ve toplam antioksidan durum (TAS) ölçümleriyle değerlendirilebilmektedir (Brock ve ark., 2004; Erel, 2005). Apikal lezyonlarda TOS düzeylerinin, sağlıklı periodontal ligament dokusuna kıyasla belirgin şekilde yükseldiği bildirilmiştir. Aynı şekilde, ağız içi dişeti oluğu sıvısının analizinde, asemptomatik AP'li dişlerde TAS düzeylerinin azaldığı, endodontik tedavi sonrasında ise normal değerlerine döndüğü gösterilmiştir (Dezerega ve ark., 2012). Elde edilen bulgular, apikal lezyonlarda ROS üretimindeki artış ve/veya antioksidan savunmadaki yetersizlik sonucu oluşan lokal oksidatif stresin varlığını açıkça ortaya koymaktadır.

Kemik homeostazı, osteoblastlar tarafından gerçekleştirilen kemik yapımı ile osteoklastlar tarafından yürütülen kemik rezorpsiyonu arasındaki dinamik dengeyle sağlanır (Crotti ve ark., 2003; Gaffen ve Hajishengallis, 2008; Hernandez ve ark., 2006; Hofbauer ve Heufelder, 2001; Kawai ve ark., 2006; Nagasawa ve ark., 2007; Ohya ve ark., 2009; Vernal ve ark., 2004). ROS, osteoblastların farklılaşmasını inhibe ederken, osteoklastogenezisi uyararak alveolar kemik oluşumunu olumsuz etkiler (Jakovljevic ve ark., 2016; Mody ve ark., 2001). Periodontal ligament fibroblastlarının doğrudan hidrojen peroksitle maruz kalması, hücre canlılığı, proliferasyon ve osteoblastik farklılaşmayı azaltmaktadır (Kook ve ark., 2016). Buna karşılık, düşük ve sürekli

konsantrasyonlarda hidrojen peroksit uygulanması, osteoblast farklılaşmasını artırmaktadır; bu etkiler ise katalaz tarafından baskılanmaktadır (Choe ve ark., 2012). Bu bulgular, ROS'un kemik oluşumunda doza bağlı iki yönlü bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

Nükleer faktör kappa-B (NF- κ B) ligandının reseptör aktivatörü (RANKL), monosit-makrofaj kökenli öncül hücrelerin osteoklastlara diferansiyasyonunu, matürasyonunu ve yaşam sürelerinin uzamasını teşvik ederek kemik rezorpsiyonuna yol açan temel bir faktördür. RANKL'in, ROS aracılığı ile gerçekleşen osteoklastogeneizde merkezi bir rol oynadığı gösterilmiştir (Hernández-Ríos ve ark., 2017).

Oksidatif non-proteolitik MMP aktivasyonu, periodontal inflamasyonda önemli bir mekanizmadır. ROS, hücre içi sinyalleşmeye ek olarak, periodontal dokularda MMP-8 ve MMP-9'un doğrudan oksidatif aktivasyonunu indükleyebilir (Saari ve ark., 1990). Bu enzimler periodontal ve apikal hastalıkların biyobelirteçleri olup, Tip I kollajenin yıkımında birlikte görev alırlar (Hernández ve ark., 2010; Hernandez Rios ve ark., 2009). Ex vivo çalışmalar (Hernández ve ark., 2010), periodontal yıkımda MMP-8 ve MMP-9'un oksidatif aktivasyonunun baskın olduğunu göstermektedir. Çalışmalarda, kronik AP'de hem apikal lezyonlarda hem de dişeti oluğu sıvısında MMP-9 aktivitesinin artışı ile birlikte yükselmiş oksidatif stres rapor edilmiştir (Belmar ve ark., 2008; Dezerega ve ark., 2012). TOS ile proMMP-9 ve aktif MMP-9 arasındaki güçlü pozitif ilişki, ROS'un AP'nin ilerlemesinde MMP-9'un sentez ve aktivasyonunu da etkileyebileceğini düşündürmektedir.

Deneyisel çalışmalar, özellikle periodontal dokularda, ROS sinyalinin MMP'leri ve çeşitli inflamatuvar mediyatörleri hem indükleyebildiğini hem de aktive edebildiğini ortaya koymaktadır. MMP-2 ve MMP-9'un çeşitli hücresel sistemlerde ROS tarafından aktive edildiği bildirilmiştir (Binker ve ark., 2011; Mori ve ark., 2004; Yoon ve ark., 2002). Bu sistemler arasında, hücreler için toksik etkisi olmayan konsantrasyonlarda hidrojen peroksit uygulanan periodontal ligament fibroblastları da yer almaktadır (Cavalla ve ark., 2015; Osorio ve ark., 2015). Aynı modelde, peroksit stimülasyonu stromal kaynaklı faktör-1 (SDF-1/CXCL12), IL-6 ve vasküler endotelial büyüme faktörü (VEGF) düzeylerini artırmış ve bu etkinin MMP'ler tarafından modüle edildiği gösterilmiştir (Cavalla ve ark., 2015). Benzer şekilde, hidrojen peroksit periodontal ligament fibroblastlarında MAPK aracılı IL-8 sekresyonunu uyarmış, ancak bu etki yüksek ve sitotoksik peroksit dozlarında ortadan kalkmıştır (Lee ve ark., 2008). Bu bulgular, öldürücü olmayan ROS düzeylerinin apikal dokularda proinflamatuvar mediyatörleri ve ekstrasellüler matriks enzimlerini artırarak yıkıcı amplifikasyon döngülerine katkıda bulunduğunu ve sonuçta apikal lezyon gelişimini desteklediğini göstermektedir.

3. Apikal Periodontitisin Oksidatif Stres Üzerine Etkileri

Endodontik enfeksiyon sırasında mikroorganizmaların hücre duvar bileşenleri, özellikle lipopolisakkaritler ve lipoteikoik asit gibi patojen ilişkili moleküler örüntüler (PAMP'ler), fagositlerin yüzeyindeki TLR'lere bağlanarak bu hücrelerde erken immün yanıtın başlatılmasını sağlar (Hernández-Ríos ve ark., 2017). Bu reseptör-ligand etkileşimi, fagositlerin aktivasyonunu artırarak hem mikroorganizmaların fagositozunu hem de NADPH oksidaz aracılığı ile ROS üretimini hızlandırır. TLR aktivasyonu, NF- κ B gibi temel transkripsiyon faktörlerini uyarak humoral ve hücrel immün yanıtların başlatılmasını sağlar; bu yolla proinflamatuar sitokinlerin (ör. IL-6, TNF- α , IL-1 β ,) sentezini artırır. İnflamatuar süreç, MMP'lerin (MMP-2, MMP-8, MMP-9) aşırı ekspresyonunu da teşvik ederek ekstrasellüler matriksin yıkımına ve dokulardaki inflammatuar hasarın ilerlemesine katkıda bulunur (Hernández-Ríos ve ark., 2017).

Üretilen ROS'un fizyolojik seviyeleri aşması, hücrelerin redoks homeostazını bozarak oksidatif strese geçmelerine yol açar; bu süreç lipid peroksidasyonu, protein oksidasyonu ve DNA hasarı gibi hücrel yapının ve fonksiyonun bozulmasına yol açar (Hernández-Ríos ve ark., 2017). Oksidatif stresin artması, apikal dokularda osteoklastogenezisi destekleyen sinyal yollarını (örneğin RANK/RANKL aksı) aktive eder ve kemik homeostazında belirgin bir dengesizliğe yol açar (Hernández-Ríos ve ark., 2017). Oksidatif stres, proinflamatuar mediyatörlerin sürekli olarak yüksek düzeyde salınmasını tetikleyerek kronik inflamasyonun sürmesine ve apikal doku yıkımının ilerlemesine katkı sağlar.

ROS'un rolü ve marjinal periodontitiste tükürük antioksidanlarının koruyucu kapasitesi üzerine yapılan araştırmalar oldukça kapsamlı olmasına rağmen, oksidatif stres ile AP arasındaki ilişkilere yönelik çalışmalar sınırlıdır. Mevcut çalışmalar, AP'li hastaların apikal lezyonlarında belirgin bir prooksidan durum bulunduğunu ve endodontik tedavinin sistemik oksidatif stres düzeyleri üzerindeki etkilerini ortaya koymuştur. (D'aiuto ve ark., 2010; Dezerega ve ark., 2012; Inchingolo ve ark., 2013).

Inchingolo ve arkadaşları (Inchingolo ve ark., 2013) gerçekleştirdikleri araştırmada endodontik tedavinin sistemik oksidatif stres üzerindeki etkilerini değerlendirmiştir. Bu kapsamda, kronik apikal periodontitisli hastalarda endodontik tedavi öncesi oksidatif stres seviyelerinin referans değerlere kıyasla artış gösterip göstermediği değerlendirilmiş; ayrıca tedavi sonrasında bu oksidatif stres seviyelerinin azalarak normal sınırlara dönüp dönmediği araştırılmıştır. Çalışmaya dâhil edilen kronik apikal periodontitisli hastalarda, reaktif oksijen metabolitlerinin tanımlanması (d-ROM) ve biyolojik antioksidan potansiyel (BAP) aracılığı ile belirlenen oksidatif stres düzeylerinin, kontrol grubu ile kıyaslandığında anlamlı derecede yüksek olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, endodontik tedaviyi takiben kronik apikal periodontitisli hastalarda d-ROM

değerlerinde zamana bağlı bir azalma, BAP değerlerinde ise artış gözlenmiştir. Tedavi sonrası 90. günde bu hastalarda oksidatif stres düzeylerinin belirgin biçimde azalacağı ve normal sınırlara yaklaşacağı yönünde bir eğilim ortaya konmuştur.

Vengerfeldt ve arkadaşları (Vengerfeldt ve ark., 2017) yaptıkları çalışmada, çeşitli endodontik patolojilere sahip hastalarda tükürük ve kök kanalı kaynaklı oksidatif stres düzeylerini değerlendirmiştir. Çalışma, primer kronik apikal periodontitisli, tedavi sonrası veya sekonder kronik apikal periodontitisli, akut apikal apseli, irreversible pulpitisli ve sağlıklı bireyden oluşan kontrol grubunu kapsamaktadır. Hem tükürükte hem de endodontik dokularda oksidatif stres belirteçleri olan miyeloperoksidaz (MPO), oksidatif stres indeksi (OSI) ve 8-izoprostan (8-EPI) düzeyleri ölçülerek gruplar arasında karşılaştırma yapılmıştır. En yüksek MPO ve 8-EPI düzeyleri primer kronik apikal periodontitis ve pulpitis olgularında saptanmıştır. OSI değerleri ise sekonder kronik apikal periodontitis hastalarının tükürük örnekleri ile primer kronik apikal periodontitis ve apse hastalarında en yüksek seviyelerde bulunmuştur. Kontrol grubunda ise hem kök kanal içeriğinde hem de tükürükte en düşük oksidatif stres düzeyleri gözlenmiştir. Buna ek olarak, oksidatif stres belirteçleri ile periapikal indeks skorları ve ağrı düzeyleri arasında anlamlı ve pozitif korelasyonlar gözlenmiştir. Oksidatif stresin, endodontik patolojilerde hem lokal (kök kanalı içeriklerinde) hem de sistemik (tükürük) düzeyde belirgin biçimde ortaya çıkan temel bir patomekanizma olduğu görülmektedir. Ayrıca oksidatif stres düzeylerinin, diş ağrısı ve periapikal kemik yıkımı ile anlamlı bir ilişki gösterdiği belirlenmiştir.

Sonuç olarak, ROS seviyelerindeki artış ve sonucunda oluşan oksidatif stres, endodontik enfeksiyonlarda hem inflamatuvar yanıtın düzenlenmesinde hem de periapikal dokuların yıkımında önemli bir patobiyolojik role sahiptir.

4. Apikal Periodontitis ile İlişkili Aterogeneze Oksidatif Stresin Rolü

AP ile sistemik hastalıklar arasındaki ilişki hakkında son yıllarda yeniden araştırmalar yapılmaktadır. Mevcut kanıtlar, kronik AP ile çeşitli kardiyovasküler hastalıklar (KVH) arasında epidemiyolojik bir bağlantı bulunduğunu göstermektedir. Özellikle, AP ile ateroskleroz, koroner arter hastalığı ve endotel disfonksiyonu arasında, marjinal periodontal hastalıklarda gözlemlenenler ile benzer ilişkiler bildirilmiştir (Cotti ve ark., 2011; Liljestrand ve ark., 2016; Pasqualini ve ark., 2012; Petersen ve ark., 2014). Bu ilişkinin temelindeki patofizyolojik mekanizmalar ise hâlen tam olarak aydınlatılamamıştır.

Mevcut çalışmaların çoğu kronik marjinal periodontitisten elde edilse de, sınırlı sayıdaki çalışma ROS'un AP ile ilişkili sistemik komplikasyonlardaki rolünü desteklemektedir. Kronik AP hastalarının periferik kanındaki PMN'lerde sağlıklı kontrollere kıyasla artmış ROS üretimi bildirilmiş; apikal lezyonların cerrahi olarak uzaklaştırılmasını takiben süperoksit düzeyleri belirgin şekilde azalmıştır (Minczykowski ve ark., 2001). Benzer biçimde, kronik AP'li

bireylerde plazmatik oksidan düzeylerinin arttığı, antioksidan potansiyelin ise azaldığı; endodontik tedavinin bu sistemik oksidatif dengeyi kısmen düzelttiği gösterilmiştir (Inchingolo ve ark., 2013). Kronik AP'li genç kadınlarda sağlıklı kontrollere göre serum endotel disfonksiyonu göstergelerinin yükseldiği rapor edilmiştir (Cotti ve ark., 2011).

Oksidatif stres, arter duvarında kronik inflamatuvar süreçlerin geliştiği ateroskleroz patogenezinde belirgin bir role sahiptir (Hernández-Ríos ve ark., 2017). Hastalığın erken dönemlerinde, lezyon gelişimine yatkın bölgelerde düşük yoğunluklu lipoprotein (LDL) partiküllerinin tutulduğu intimal kalınlaşmalar görülür. Bu tutulum, özellikle hiperlipidemi koşullarında LDL'yi oksidatif modifikasyonlara daha duyarlı hale getirir. LDL oksidasyonuna aracılık edebilen başlıca enzimler arasında lipoksijenaz, miyeloperoksidaz ve hemoglobinin peroksidaz benzeri aktivitesi yer almaktadır (Tsimikas ve I Miller, 2011). Bunun yanında, hidrojen peroksit, nitrik oksit ve süperoksitin etkileşimiyle oluşan serbest radikaller LDL'nin enzimatik olmayan oksidasyonunu da gerçekleştirebilir (Tsimikas ve I Miller, 2011). Okside LDL, güçlü bir proinflamatuvar uyarıcı olarak bağışıklık sisteminin çeşitli bileşenleri tarafından tanınmakta ve aterogeneizde merkezi bir rol oynamaktadır (Matsuura ve ark., 2014). Okside LDL, güçlü bir proinflamatuvar uyarıcıdır ve bağışıklık sisteminin birçok bileşeni tarafından tanınarak aterogeneizde merkezi bir rol oynar (Matsuura ve ark., 2014). Okside LDL, CD36 gibi hücrel temizleyici reseptörlere bağlanarak arter duvarındaki makrofajların LDL alımını artırır, köpük hücre oluşumunu indükler ve ROS üretimini yükselterek patolojik süreci pekiştiren bir kısır döngü oluşturur. Ayrıca okside LDL, kompleman sistemi bileşenleri ve C-reaktif protein (CRP) ile etkileşerek proaterojenik okside LDL/CRP komplekslerinin oluşumuna yol açabilir (Miller ve ark., 2011). Okside moleküller aynı zamanda TLR aktive ederek aterosklerotik lezyonlarda inflamasyonu daha da artırır. Bu sinyal iletimi, adaptif bağışıklık yanıtının başlatılabilmesi için dendritik hücrelerin ve makrofajların, ardından T ve B lenfositlerinin aktivasyonunu gerektirir (Huang ve Pope, 2010).

Yapılan çalışmalarda apikal lezyonlar, *Porphyrromonas endodontalis* ve bu bakteriye karşı gelişen serum immünoglobulin G (IgG) antikor düzeyleri arasında anlamlı bir ilişki saptanmıştır. Aynı zamanda, apikal lezyon varlığının koroner arter hastalığı riskiyle ilişkili olduğu, özellikle de apikal lezyonlu ve tedavi edilmemiş dişlere sahip bireylerde bu ilişkinin daha belirgin olduğu bildirilmiştir (Liljestrand ve ark., 2016). *P. endodontalis*'in aterogeneizdeki potansiyel rolü; koroner arterin endotel ve düz kas hücrelerini doğrudan istila edebilmesi ve in vitro ortamda MMP ekspresyonunu artırabilmesi gibi deneysel bulgularla da desteklenmiştir (Dorn ve ark., 2002). Kronik marjinal periodontitis ve apikal periodontitis, hastalık ve sağlık durumlarıyla ilişkili çeşitli antikor yanıtlarını içeren karmaşık immünolojik süreçlerle ilişkilidir.

Oksidatif stres, AP'nin patogeneğinde temel bir rol oynamaktadır. ROS, endodontik bakteriyel tehditlere karşı temel bir konak savunması oluşturmakla birlikte hücrel sinyalleme de modüle eder; ancak oksidan–antioksidan dengesinin bozulması, doğrudan moleküler hasar ve redoks sinyalleşmesi üzerinden apikal lezyonun oluşumu ve ilerlemesine yerel düzeyde katkıda bulunur (Hernández-Ríos ve ark., 2017). Bu süreçler bir arada kemik homeostazının bozulmasına, proinflatuar yanıtların artmasına ve MMP sentezi ile aktivasyonunun yükselmesine yol açar. Ayrıca, AP sırasında ortaya çıkan sistemik oksidatif stres ile ateroskleroz arasındaki bağlantıyı ortaya koyan ilk mekanistik bulgular da sunulmuştur. (Hernández-Ríos ve ark., 2017).

5.Sonuç

Mevcut bulgular, oksidatif stresin AP ve diğer endodontik patolojilerin patogeneğinde, hem lokal hem de sistemik düzeydeki patogeneğinde kritik bir rol aldığını göstermektedir. Kronik apikal periodontitisli hastalarda hem tükürükte hem de kök kanal içeriğinde prooksidan belirteçlerin anlamlı düzeyde arttığı; MPO, 8-EPI ve OSI düzeylerinin özellikle primer kronik apikal periodontitis, pulpitis ve apse olgularında önemli ölçüde arttığı saptanmıştır. Bu parametreler, klinik semptomlar, ağrı şiddeti ve periapikal radyografik bulgularla pozitif korelasyon göstermektedir.

Endodontik tedavinin sistemik oksidatif stres üzerinde iyileştirici etkileri olduğu; tedavi sonrasında prooksidan düzeylerin azaldığı ve antioksidan kapasitenin arttığı ortaya konmuştur. Sağlıklı bireylerde en düşük oksidatif stres seviyelerinin görülmesi, bu belirteçlerin hastalık durumunu yansıtan duyarlı biyogöstergeler olduğunu desteklemektedir.

Genel olarak, oksidatif stres endodontik hastalıkların biyolojik temelinde merkezi bir mekanizma olup hem inflamasyonun şiddetini hem de doku yıkımını etkileyen önemli bir belirleyicidir. Bu nedenle, oksidatif stresin değerlendirilmesi ve modülasyonu, gelecekte tanısal ve terapötik stratejiler açısından değerli bir hedef olabilir.

KAYNAKLAR

- Akalın, F. A., Işıksal, E., Baltacıoğlu, E., Renda, N., & Karabulut, E. (2008). Superoxide dismutase activity in gingiva in type-2 diabetes mellitus patients with chronic periodontitis. *Archives of Oral Biology*, 53(1), 44-52.
- Akalın, F. A., Baltacıoğlu, E., Alver, A., & Karabulut, E. (2007). Lipid peroxidation levels and total oxidant status in serum, saliva and gingival crevicular fluid in patients with chronic periodontitis. *Journal of Clinical Periodontology*, 34(7), 558-565.
- Babior, B. M. (1984). Oxidants from phagocytes: agents of defense and destruction. *Blood*, 64(5), 959-966.
- Belmar, M. J., Pabst, C., Martínez, B., & Hernández, M. (2008). Gelatinolytic activity in gingival crevicular fluid from teeth with periapical lesions. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontology*, 105(6), 801-806.
- Binker, M. G., Binker-Cosen, A. A., Gaisano, H. Y., de Cosen, R. H., & Cosen-Binker, L. I. (2011). TGF- β 1 increases invasiveness of SW1990 cells through Rac1/ROS/NF- κ B/IL-6/MMP-2. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 405(1), 140-145.
- Biswas, S. K. (2016). Does the interdependence between oxidative stress and inflammation explain the antioxidant paradox? *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 2016(1), 5698931.
- Brock, G., Butterworth, C., Matthews, J., & Chapple, I. (2004). Local and systemic total antioxidant capacity in periodontitis and health. *Journal of Clinical Periodontology*, 31(7), 515-521.
- Carocho, M., & Ferreira, I. C. (2013). A review on antioxidants, prooxidants and related controversy: Natural and synthetic compounds, screening and analysis methodologies and future perspectives. *Food and Chemical Toxicology*, 51, 15-25.
- Cavalla, F., Osorio, C., Paredes, R., Valenzuela, M. A., García-Sesnich, J., Sorsa, T., Tervahartiala, T., & Hernández, M. (2015). Matrix metalloproteinases regulate extracellular levels of SDF-1/CXCL12, IL-6 and VEGF in hydrogen peroxide-stimulated human periodontal ligament fibroblasts. *Cytokine*, 73(1), 114-121.
- Chapple, I. (1997). Reactive oxygen species and antioxidants in inflammatory diseases. *Journal of Clinical Periodontology*, 24(5), 287-296.
- Chapple, I. L., & Matthews, J. B. (2007). The role of reactive oxygen and antioxidant species in periodontal tissue destruction. *Periodontology 2000*, 43(1).
- Choe, Y., Yu, J. Y., Son, Y. O., Park, S. M., Kim, J. G., Shi, X., & Lee, J. C. (2012). Continuously generated H₂O₂ stimulates the proliferation and osteoblastic

- differentiation of human periodontal ligament fibroblasts. *Journal of Cellular Biochemistry*, 113(4), 1426-1436.
- Cotti, E., Dessì, C., Piras, A., Flore, G., Deidda, M., Madeddu, C., Zedda, A., Longu, G., & Mercuro, G. (2011). Association of endodontic infection with detection of an initial lesion to the cardiovascular system. *Journal of Endodontics*, 37(12), 1624-1629.
- Crotti, T., Smith, M. D., Hirsch, R., Soukoulis, S., Weedon, H., Capone, M., Ahern, M. J., & Haynes, D. (2003). Receptor activator NF κ B ligand (RANKL) and osteoprotegerin (OPG) protein expression in periodontitis. *Journal of Periodontal Research*, 38(4), 380-387.
- Çanakçı, C. F., Tatar, A., Çanakçı, V., Cicek, Y., Oztas, S., & Orbak, R. (2006). New evidence of premature oxidative DNA damage: mitochondrial DNA deletion in gingival tissue of patients with periodontitis. *Journal of Periodontology*, 77(11), 1894-1900.
- D'aiuto, F., Nibali, L., Parkar, M., Patel, K., Suvan, J., & Donos, N. (2010). Oxidative stress, systemic inflammation, and severe periodontitis. *Journal of Dental Research*, 89(11), 1241-1246.
- Dezerega, A., Madrid, S., Mundi, V., Valenzuela, M. A., Garrido, M., Paredes, R., García-Sesnich, J., Ortega, A. V., Gamonal, J., & Hernández, M. (2012). Pro-oxidant status and matrix metalloproteinases in apical lesions and gingival crevicular fluid as potential biomarkers for asymptomatic apical periodontitis and endodontic treatment response. *Journal of Inflammation*, 9(1), 8.
- Di Filippo, G., Sidhu, S., & Chong, B. (2014). Apical periodontitis and the technical quality of root canal treatment in an adult sub-population in London. *British Dental Journal*, 216(10), E22-E22.
- Dorn, B., Harris, L., Wujick, C., Vertucci, F., & Progulsk-Fox, A. (2002). Invasion of vascular cells in vitro by *Porphyromonas endodontalis*. *International Endodontic Journal*, 35(4), 366-371.
- Erel, O. (2005). A new automated colorimetric method for measuring total oxidant status. *Clinical Biochemistry*, 38(12), 1103-1111.
- Flohé, L. (2016). The impact of thiol peroxidases on redox regulation. *Free Radical Research*, 50(2), 126-142.
- Gaffen, S., & Hajishengallis, G. (2008). A new inflammatory cytokine on the block: re-thinking periodontal disease and the Th1/Th2 paradigm in the context of Th17 cells and IL-17. *Journal of Dental Research*, 87(9), 817-828.
- Graves, D. T., Oates, T., & Garlet, G. P. (2011). Review of osteoimmunology and the host response in endodontic and periodontal lesions. *Journal of Oral Microbiology*, 3(1), 5304.

- Halliwell, B., & Gutteridge, J. M. (2015). *Free Radicals in Biology and Medicine*. Oxford university press.
- Halliwell, B., & Whiteman, M. (2004). Measuring reactive species and oxidative damage in vivo and in cell culture: how should you do it and what do the results mean? *British Journal of Pharmacology*, 142(2), 231-255.
- Hernández-Ríos, P., Pussinen, P. J., Vernal, R., & Hernández, M. (2017). Oxidative stress in the local and systemic events of apical periodontitis. *Frontiers in Physiology*, 8, 869.
- Hernández, M., Gamonal, J., Tervahartiala, T., Mäntylä, P., Rivera, O., Dezerega, A., Dutzan, N., & Sorsa, T. (2010). Associations between matrix metalloproteinase-8 and-14 and myeloperoxidase in gingival crevicular fluid from subjects with progressive chronic periodontitis: A longitudinal study. *Journal of Periodontology*, 81(11), 1644-1652.
- Hernandez, M., Valenzuela, M. A., Lopez-Otin, C., Alvarez, J., Lopez, J. M., Vernal, R., & Gamonal, J. (2006). Matrix metalloproteinase-13 is highly expressed in destructive periodontal disease activity. *Journal of periodontology*, 77(11), 1863-1870.
- Hernandez Rios, M., Sorsa, T., Obregón, F., Tervahartiala, T., Valenzuela, M. A., Pozo, P., Dutzan, N., Lesaffre, E., Molas, M., & Gamonal, J. (2009). Proteolytic roles of matrix metalloproteinase (MMP)-13 during progression of chronic periodontitis: Initial evidence for MMP-13/MMP-9 activation cascade. *Journal of Clinical Periodontology*, 36(12), 1011-1017.
- Hofbauer, L. C., & Heufelder, A. E. (2001). Role of receptor activator of nuclear factor- κ B ligand and osteoprotegerin in bone cell biology. *Journal of Molecular Medicine*, 79(5), 243-253.
- Holden, J. A., Attard, T. J., Laughton, K. M., Mansell, A., O'Brien-Simpson, N. M., & Reynolds, E. C. (2014). Porphyromonas gingivalis lipopolysaccharide weakly activates M1 and M2 polarized mouse macrophages but induces inflammatory cytokines. *Infection and Immunity*, 82(10), 4190-4203.
- Huang, Q., & Pope, R. M. (2010). Toll-like receptor signaling: a potential link among rheumatoid arthritis, systemic lupus, and atherosclerosis. *Journal of Leukocyte Biology*, 88(2), 253.
- Huomonen, S., Suominen, A., & Vehkalahti, M. (2017). Prevalence of apical periodontitis in root filled teeth: findings from a nationwide survey in Finland. *International Endodontic Journal*, 50(3), 229-236.
- Inchingolo, F., Marrelli, M., Annibali, S., Cristalli, M. P., Dipalma, G., Inchingolo, A. D., Palladino, A., Inchingolo, A. M., Gargari, M., & Tatullo, M. (2013). Influence of endodontic treatment on systemic oxidative stress. *International Journal of Medical Sciences*, 11(1), 1.

- Jakovljevic, A., Andric, M., Miletic, M., Beljic-Ivanovic, K., Knezevic, A., Mojsilovic, S., & Milasin, J. (2016). Epstein-Barr virus infection induces bone resorption in apical periodontitis via increased production of reactive oxygen species. *Medical Hypotheses*, 94, 40-42.
- Kawai, T., Matsuyama, T., Hosokawa, Y., Makihira, S., Seki, M., Karimbux, N. Y., Goncalves, R. B., Valverde, P., Dibart, S., & Li, Y.-P. (2006). B and T lymphocytes are the primary sources of RANKL in the bone resorptive lesion of periodontal disease. *The American Journal of Pathology*, 169(3), 987-998.
- Kook, S.-H., Lee, D., Cho, E.-S., Heo, J. S., Poudel, S. B., Ahn, Y.-H., Hwang, J.-W., Ji, H., Kim, J.-G., & Lee, J.-C. (2016). Activation of canonical Wnt/ β -catenin signaling inhibits H₂O₂-induced decreases in proliferation and differentiation of human periodontal ligament fibroblasts. *Molecular and Cellular Biochemistry*, 411(1), 83-94.
- Lamster, I. B., & Novak, M. J. (1992). Host mediators in gingival crevicular fluid: implications for the pathogenesis of periodontal disease. *Critical Reviews in Oral Biology & Medicine*, 3(1), 31-60.
- Lee, Y.-S., Bak, E. J., Kim, M., Park, W., Seo, J. T., & Yoo, Y.-J. (2008). Induction of IL-8 in periodontal ligament cells by H₂O₂. *The Journal of Microbiology*, 46(5), 579-584.
- Liljestrand, J., Mäntylä, P., Paju, S., Buhlin, K., Kopra, K., Persson, G., Hernandez, M., Nieminen, M., Sinisalo, J., & Tjäderhane, L. (2016). Association of endodontic lesions with coronary artery disease. *Journal of Dental Research*, 95(12), 1358-1365.
- Liskmann, S., Vihalemm, T., Salum, O., Zilmer, K., Fischer, K., & Zilmer, M. (2007). Characterization of the antioxidant profile of human saliva in peri-implant health and disease. *Clinical Oral Implants Research*, 18(1), 27-33.
- Marton, I., Balla, G., Hegedus, C., Redl, P., Szilagyi, Z., Karmazsin, L., & Kiss, C. (1993). The role of reactive oxygen intermediates in the pathogenesis of chronic apical periodontitis. *Oral Microbiology and Immunology*, 8(4), 254-257.
- Matsuura, E., Atzeni, F., Sarzi-Puttini, P., Turiel, M., Lopez, L. R., & Nurmohamed, M. T. (2014). Is atherosclerosis an autoimmune disease? *BMC Medicine*, 12(1), 47.
- Miller, Y. I., Choi, S.-H., Wiesner, P., Fang, L., Harkewicz, R., Hartvigsen, K., Boullier, A., Gonen, A., Diehl, C. J., & Que, X. (2011). Oxidation-specific epitopes are danger-associated molecular patterns recognized by pattern recognition receptors of innate immunity. *Circulation Research*, 108(2), 235-248.
- Minczykowski, A., Woszczyk, M., Szczepanik, A., Lewandowski, L., & Wysocki, H. (2001). Hydrogen peroxide and superoxide anion production by

- polymorphonuclear neutrophils in patients with chronic periapical granuloma, before and after surgical treatment. *Clinical Oral Investigations*, 5(1), 6-10.
- Mody, N., Parhami, F., Sarafian, T. A., & Demer, L. L. (2001). Oxidative stress modulates osteoblastic differentiation of vascular and bone cells. *Free Radical Biology and Medicine*, 31(4), 509-519.
- Mori, K., Shibamura, M., & Nose, K. (2004). Invasive potential induced under long-term oxidative stress in mammary epithelial cells. *Cancer Research*, 64(20), 7464-7472.
- Nagasawa, T., Kiji, M., Yashiro, R., Hormdee, D., Lu, H., Kunze, M., Suda, T., Koshy, G., Kobayashi, H., & Oda, S. (2007). Roles of receptor activator of nuclear factor- κ B ligand (RANKL) and osteoprotegerin in periodontal health and disease. *Periodontology 2000*, 43(1).
- Nair, P. (2006). On the causes of persistent apical periodontitis: a review. *International Endodontic Journal*, 39(4), 249-281.
- Nair, P. R. (2004). Pathogenesis of apical periodontitis and the causes of endodontic failures. *Critical Reviews in Oral Biology & Medicine*, 15(6), 348-381.
- Ohya, H., Kato-Kogoe, N., Kuhara, A., Nishimura, F., Nakasho, K., Yamanegi, K., Yamada, N., Hata, M., Yamane, J., & Terada, N. (2009). The involvement of IL-23 and the Th17 pathway in periodontitis. *Journal of Dental Research*, 88(7), 633-638.
- Osorio, C., Cavalla, F., Paula-Lima, A., Díaz-Araya, G., Vernal, R., Ahumada, P., Gamonal, J., & Hernández, M. (2015). H₂O₂ activates matrix metalloproteinases through the nuclear factor kappa B pathway and Ca²⁺ signals in human periodontal fibroblasts. *Journal of Periodontal Research*, 50(6), 798-806.
- Paraskevas, S., Huizinga, J. D., & Loos, B. G. (2008). A systematic review and meta-analyses on C-reactive protein in relation to periodontitis. *Journal of Clinical Periodontology*, 35(4), 277-290.
- Pasqualini, D., Bergandi, L., Palumbo, L., Borraccino, A., Dambra, V., Alovise, M., Migliaretti, G., Ferraro, G., Ghigo, D., & Bergerone, S. (2012). Association among oral health, apical periodontitis, CD14 polymorphisms, and coronary heart disease in middle-aged adults. *Journal of Endodontics*, 38(12), 1570-1577.
- Petersen, J., Glaßl, E.-M., Nasser, P., Crismani, A., Luger, A. K., Schoenherr, E., Bertl, K., & Glodny, B. (2014). The association of chronic apical periodontitis and endodontic therapy with atherosclerosis. *Clinical Oral Investigations*, 18(7), 1813-1823.

- Saari, H., Suomalainen, K., Lindy, O., Konttinen, Y., & Sorsa, T. (1990). Activation of latent human neutrophil collagenase by reactive oxygen species and serine proteases. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 171(3), 979-987.
- Seltzer, S., & Bender, I. (2003). Cognitive dissonance in endodontics. *Journal of Endodontics*, 29(11), 714-719.
- Shackelford, R. E., Kaufmann, W. K., & Paules, R. S. (2000). Oxidative stress and cell cycle checkpoint function. *Free Radical Biology and Medicine*, 28(9), 1387-1404.
- Sima, C., & Glogauer, M. (2013). Macrophage subsets and osteoimmunology: tuning of the immunological recognition and effector systems that maintain alveolar bone. *Periodontology 2000*, 63(1), 80-101.
- Siqueira Jr, J. F., & Rôças, I. N. (2009). Community as the unit of pathogenicity: an emerging concept as to the microbial pathogenesis of apical periodontitis. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontology*, 107(6), 870-878.
- Timmerman, A., Calache, H., & Parashos, P. (2017). A cross sectional and longitudinal study of endodontic and periapical status in an Australian population. *Australian Dental Journal*, 62(3), 345-354.
- Trivedi, S., & Lal, N. (2017). Antioxidant enzymes in periodontitis. *Journal of Oral Biology and Craniofacial research*, 7(1), 54-57.
- Tsimikas, S., & I Miller, Y. (2011). Oxidative modification of lipoproteins: mechanisms, role in inflammation and potential clinical applications in cardiovascular disease. *Current Pharmaceutical Design*, 17(1), 27-37.
- Vengerfeldt, V., Mändar, R., Saag, M., Piir, A., & Kullisaar, T. (2017). Oxidative stress in patients with endodontic pathologies. *Journal of Pain Research*, 2031-2040.
- Vernal, R., Chaparro, A., Graumann, R., Puente, J., Valenzuela, M. A., & Gamonal, J. (2004). Levels of cytokine receptor activator of nuclear factor κ B ligand in gingival crevicular fluid in untreated chronic periodontitis patients. *Journal of Periodontology*, 75(12), 1586-1591.
- Xiang, M., Fan, J., & Fan, J. (2010). Association of toll-like receptor signaling and reactive oxygen species: A potential therapeutic target for posttrauma acute lung injury. *Mediators of Inflammation*, 2010(1), 916425.
- Yoon, S.-O., Park, S.-J., Yoon, S. Y., Yun, C.-H., & Chung, A.-S. (2002). Sustained Production of H₂O₂ Activates Pro-matrix Metalloproteinase-2 through Receptor Tyrosine Kinases/Phosphatidylinositol 3-Kinase/NF- κ B Pathway. *Journal of Biological Chemistry*, 277(33), 30271-30282.

BÖLÜM 2

Endodontide Periapikal Lezyon İyileşmesinde Fraktal Analizi ve PAI Değerlendirmesi

Hilal Ekmen¹ & Emre Bayram ²

¹ Uzm. Dt.,Batman Ağız ve Diş Sağlığı Hastanesi, Orcid: 0000-0003-1141-5984

² Doç. Dr., Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi, Orcid: 0000-0001-7672-250X

1. Apikal Periodontitis; Patogenezi ve Radyografik Görünümü

Apikal periodontitis(AP); dişlerde travma, çürük ile oluşan pulpa hastalıkları sonucu kan damarlarının zarar görebilerek kanal içi mikroorganizmaların periapikal dokulara ulaşması ile oluşan inflamatuvar yanıt ve kemik yıkımı ile karakterize bir hastalıktır(Abbott, 2004; Azuma, Samuel, Gomes-Filho, Dezan-Junior, & Cintra, 2014). Apikal periodontitis oluşumu genel hatlarıyla 4 aşamadan oluşur. İlk olarak pulpa dokusu açığa çıkar, mikroorganizmaların pulpa dokusu içinde ilerlemesi ile doku nekrotik hale gelir, mikroorganizmalar periapikal dokulara ulaşır ve son aşamada periapikal bölgede granülomatöz doku oluşur. Mikroorganizmalar periapikal dokularda yayılırken güçlü bir bağışıklık yanıt ile karşılaşılır. Bölgedeki lokal tahribat histolojik olarak 7 günde, radyolojik olarak ise 15 günde oluşur(Jorge, Tanomaru-Filho, Gonçalves, & Tanomaru, 2008; Tanomaru-Filho, Jorge, Duarte, Gonçalves, & Guerreiro-Tanomaru, 2009). Kemik yıkımının başlaması ile birlikte periradiküler dokularda granülomatöz bir yapı oluşur ve kalın bir polimorfonükleer lökosit (PMN) duvarı ile yer değiştirir (Nair, 1987). Histopatolojik olarak incelendiğinde apikal periodontitisli dişlerde ilgili bölgede; makrofajlar, mononükleer hücreler, lenfosit ve plazma hücreleri bağışıklık yanıtında yaygın olarak bulunmaktadır(Azeredo et al., 2017). Bölgede oluşan bu bariyer yapıları aşabilen mikroorganizmalar kök ucu patolojisini başlatırlar. Apikal bölgedeki patolojinin teşhis aşamasında ayrıntılı röntgen incelemesi şarttır(Alghamdi, Alhaddad, & Abuzinadah, 2020; Kruse, Spin-Neto, Christiansen, Wenzel, & Kirkevang, 2016). Periapikal lezyonların görülen en sık radyolojik belirtisi ilgili bölgede periapikal röntgenlerde izlenen radyolüsent alanlardır(Nair, 1987). Apikal periodontitis akut olan haricinde çoğunlukla semptomsuz ilerlediği için rutin radyografik muayene sırasında periapikal ya da panoramik röntgenlerden teşhis edilir(of Endodontists, 2011). Periapikal filmler apikal doku değerlendirilmesinde birincil basamağı oluşturur. Hem kullanımı pratik hem de değerlendirme yapılması basittir. Dezavantajları, superpozisyonların görülebilmesi ve üç boyutlu olan yapıların iki boyutlu değerlendirilmesi imkanı sunmasıdır(Sameer Patel & Horner, 2009).

Tanısal radyografide diş çevresini saran alveoler kemik süngerimsi kemik yapısından oluştuğu için ağ benzeri bir görüntüye sahiptir. Alveoler kemik mandibulada daha kalın ve düzenli iken maksillada ise daha ince ve düzensiz olan trabeküller ile karakterizedir. Alveolün iç yüzeyini kaplayıp radyografide daha opak görünen alan ise lamina dura olup apikal bölge sağlıklı olduğunda devamlı bir çizgi şeklinde izlenir(De Ferraris, 1999; Lindhe, Karring, & Lang, 2009).

Endodontik tedavinin en temel amacı mümkün olduğunca dişleri ağız içinde tutabilmektir (Siqueira Jr, Rôças, Ricucci, & Hülsmann, 2014). Histopatolojik değerlendirme periapikal lezyonlarda kesin teşhis yöntemi olsada bu hastalıklar genel olarak cerrahi olmayan endodontik tedavi ile iyileştiğinden nadiren yapılır. AP tedavisi olarak cerrahi olmayan kök kanal tedavisi, periapikal cerrahi ya da

bu ikisinin kombinasyonu ile çekim olarak sayılabilir(White & Pharoah, 2014). Başarılı bir endodontik tedavi uygun kök kanalı preparasyonu, kapsamlı irrigasyon protokolü, irrigasyon aktivasyonu ile apikal ve koronal olarak sızdırmaz tıkamaya dayanır(Ingle, Bakland, & Baumgartner, 2007; Walton & Torabinejad, 1996) Apikal periodontitisli dişlere kanal tedavisi sonrası ilgili bölgede mekanik ve kimyasal tahrişe bağlı olarak radyografide periapikal radyolüsentlikte geçici bir artış meydana gelebilir. Mineral kaybı olan alanlarda radyografik yoğunluk kademeli olarak artış göstermeye başlar. Oluşan kemik dokusunun yapısı normalden farklı olabilir. İlerleyen zamanlarda lamina duranın devamlılığı ve konturları ile periodontal ligamentin genişliği normale döner. İyileşme çoğunlukla lezyonun dış sınırlarından başlayıp ortasına doğru ilerler(J. O. Andreasen & Andreasen, 1990). Tedavi sonrası periapikal bölgenin iyileşmesi klinik ve radyografik olarak mümkün olmaktadır. (J. Andreasen & Rud, 1972; Hirsch, Ahlström, Henrikson, Heyden, & Peterson, 1979; Masó, 1999). Bireylerde AP varlığı yaştan ilerlemesi ile artarken oranı %60' lara kadar ulaşmaktadır(Berlin-Broner, Febbraio, & Levin, 2017). AP' li dişlerdeki iyileşme takibini yapabilmek için en az 6 ay ile 12 ay takip edilmelidir. Yapılan bazı çalışmalara göre 6.ay kontrolünde dahil edilen vakaların yarısında iyileşme belirtileri görülmeye başlandığı izlenirken, 12. Ay kontrolünde bu lezyonların %88' inin iyileşme belirtileri gösterdiği bildirilmiştir, ancak endodontide uzun süreli takip oldukça önemli olup lezyonlu dişlerin 4 yıl kadar takip edilmesi gerekmektedir(D Ørstavik, 1996). Endodontik tedavi sonrası yapılan takip seanslarında klinik ve radyografik olarak herhangi bir semptom ve röntgende radyolüsent alan yoksa, diş ve çevre dokular yapılan tedavi sonrası iyileşmiş olarak kabul edilir. Takip süresine bağlı olarak radyografide radyolüsent alan değişmeden kaldıysa, daha da büyüdüyse ya da yeni radyolüsent alanlar eklendiyse klinik olarak semptom olmasa bile bu durumlar ilgili bölgede bir hastalığın işareti olarak kabul edilir(Murphy, Kaugars, Collett, & Dodds, 1991).

Periapikal lezyonun iyileşmesinin önemli adımlarından birisi de sızdırmazlığın önüne geçmek için koronal restorasyonun kalan sağlam diş yapısına ve okluzyona uygun bir şekilde tamamlanmasıdır(Ng, Mann, & Gulabivala, 2011). Periapikal lezyonun iyileşmesi periapikal dokularda onarım ve rejenerasyon yolu ile gerçekleşir, hastanın bağışıklık yanıtı da oldukça önemlidir(Lin & Rosenberg, 2011). Endodontik tedavi sonrası onarılan periapikal doku, inflamatuvar hücreler içermeyen yoğun lifli kollajen dokulardan oluşan periapikal fibröz skar alanlara sahip olabilir(Zmener, Pameijer, & Boetto, 2022). Radyografide bu tip iyileşmeyi tanımlamaya yardımcı olabilecek bazı radyografik özellikler; başlangıç tanı filmine göre radyolüsentliğin azalması, periodontal boşluğa uzanan düzensiz konturlar, görünür iç kemik yapıları olabilir veya olmayabilir ve kök ucu etrafında lamina dura gözlenebilir. Ek tedavi gerektirmez(Karamifar, Tondari, & Saghiri, 2020; Rud, Andreasen, & Jensen, 1972). Periapikal iyileşme sırasında kemiği kaplayan iç tabakadan ve periodontal

ligamentten gelen pluripotent hücrelerin kemik sentezi için osteoblastlara, sement sentezi için sementoblastlara farklılaştığı düşünülmektedir(Kumar, Abbas, & Aster, 2021). Bukkal veya lingual kortikal kemikte perforasyon varsa, iyileşme lezyonun dışından içine doğru başlar(Huumonen & Ørstavik, 2002). Apikal periodontitisi dünya sağlık örgütü beş ana kategoride gruplandırmıştır.

- Akut apikal periodontitis
- Kronik apikal periodontitis
- Akut apikal apse
- Kronik apikal apse
- Kondensing osteitis.

1.1. Akut Apikal Periodontitis

Klinik semptomlar arasında ağrı veya dişin perküsyona duyarlılığı yer alır. İltihap oluşumu ile periradiküler bölgelerde basınç artışına bağlı olarak ağrı daha da şiddetlenir, pü en az direnç ile karşılaştığı bölgeye doğru ilerler. Direnç ile birlikte ilgili bölgedeki rahatsızlık geriler(Alaçam, T., 2012). Hücresel safhada osteoklastlar prostaglandinler tarafından aktive edilir, daha fazla sayıda nötrofil ve makrofaj bölgeye göç eder. Bu olaylar sonucu lokal vaskülarizasyon, osteoklastik kemik rezorpsiyonu ve hücre dışı matriks bozunması daha da yoğun hale gelir(Nair, 1997).

1.2. Kronik Apikal Periodontitis

Kronik apikal periodontitis, mikroorganizmaların kök kanalları içinde kolonize olduğu genellikle sessiz bir dönemi yansıtır(Menzies, Reiter, & Lewis, 2014). Perküsyona şiddetli yanıt olmayıp, hasta tarafından dental anamnezde ağrı bildirilmez. Klinik muayene ile birlikte radyografik değerlendirme de endikasyonun konulması açısından önemlidir. Radyografide kök ucu alanlarında radyolüsent alanlar ile birlikte periodontal ligament aralığında genişleme, lamina duranın izlenememesi ve ilgili bölgede kemik kaybı izlenir(Torabinejad & Missouri, 2009).

1.3. Akut Apikal Apses

Akut apikal apsede periapikal dokulara yüksek oranda lökosit infiltrasyonu olması sonucu dokuda eksuda oluşumu gözlenir. Akut apikal apsesi olan bireylerde aniden bir başlangıç, kendiliğinden ağrı, dişin perküsyon ve basınca karşı hassasiyeti, ilgili dişe komşu bölgelerde şişlik görülebilen semptomlardır(Glickman, 2009). Bölgedeki şişlik lokalize ya da yaygın olabilir. Perküsyon testine yanıt pozitifdir. Bu tablo kronik olan durumların akutlaşması sonucunda da oluşabilmektedir. Radyografik olarak ilgili bölgede kemik kaybı olabilir, olmayabilir. Pulpa testlerine yanıt alınmaz(Torabinejad & Missouri, 2009). Akut apikal apsede etken ortadan kaldırılmazsa kişide ateş, halsizlik, lenf

nodlarında tutulum, trismus gibi sistemik durumlar ortaya çıkarak çok ciddi baş boyun enfeksiyonları meydana gelebilir(Abbott, 2004).

1.4. Kronik Apikal Apse

Kronik apikal absede kök kanalları içindeki irritanlar yavaş yavaş periapikal dokulara doğru hareket ederek iltihap oluşumuna neden olur. Kronik apikal absede sürekli bulunan ya da belirli aralıklarla ortaya çıkan direnaji sağlayan bir fistül yolu bulunur. Fistül yolundan direnaj önlenirse dişte ağrı durumu olabilir. Vitalite testlerine yanıt negatiftir. Perküsyonda her zaman olmamakla birlikte hassasiyet gözlelenebilir. Radyografide kök ucu bölgelerinde kemik kaybı izlenir(Torabinejad & Missouri, 2009).

1.5. Kondensing Osteitis

Kondensing osteitis düşük düzeyli ve uzun süreli bir enfeksiyon sonucu oluşan, güçlü bağışıklık yanıtı olan kök ucu bölgelerinde artmış osteoblastik aktivite olarak tanımlanabilir(Menzies et al., 2014). Kadınlarda ve alt birinci molar dişlerin kök uçlarında yaygın olarak görülmektedir(Eliasson, Halvarsson, & Ljungheimer, 1984). Histolojik olarak incelendiğinde spongioz kemik daha yoğun olan kompakt kemik ile yer değiştirmiş olup radyolojik olarak bakıldığında bölgede radyopak bir alan izlenir(Eliasson et al., 1984).

2. Periapikal İndeks (PAI)

Endodontik tedavinin başarı şansını etkileyen değişkenler arasında periapikal lezyonun oluşumu ve boyutu, yapılan kanal preparasyonu, kök ucuna uygulanan dolum işleminin sızdırmazlığı ve koronal dolgunun kalitesi sayılabilir. Karmaşık bir apikal anatomi ve inatçı mikroorganizma florası periapikal bölgedeki lezyonların iyileşmesini öngörülemez hale getirir(Gulabivala & Ng, 2023). Periapikal radyografiler apikal periodontitisin teşhis aşamasından iyileşme aşamasına kadar önemli kanıtlar sunması sebebiyle endodonti için çok önemli bir kaynaktır(Nair, Sjögren, Figdor, & Sundqvist, 1999; Dag Ørstavik, Kerekes, & Eriksen, 1986). Periapikal radyografiler üç boyutlu olan yapıların iki boyutlu yansımasıdır, bazı klinik ve biyolojik değişiklikler radyografiye yansımayaabilir. Klinik ve radyolojik kriterlerin varlığı ile endodontik tedavi ve AP ilişkisi değerlendirilebilir. Ancak bazı morfolojik değişiklikler, periapikal röntgen açısı, kontrastı, çeken kişilerin farklılığı, AP' yi çevreleyen kemik dokusunun yoğunluğunun farklı olması gibi nedenlerden ötürü radyografik yorumlama değişkenlik gösterebilir(Estrela, Leles, Hollanda, Moura, & Pécora, 2008; Grossman, Shepard, & Pearson, 1964; Lz, 1956; Molven, Halse, & Fristad, 2002). Periapikal indeks (PAI), apikal periodontitisin radyografik olarak değerlendirilmesinde bir puanlama sistemi olarak kullanılmıştır; çünkü görsel bir referans ölçeği sağlar ve apikal bölgedeki sağlık durumu hakkında bilgilendirir. Referans radyografilere ve doğrulanmış histolojik tanıya dayanarak, puanı normal periodonsiyumun radyografik görünümünü, mineral kaybına bağlı

periapikal kemik yapısındaki değişiklikleri ve radyolüsent bir alana sahip periapikal kemik demineralizasyonunu değerlendirir. Kök ucu bölgesini, normal periapikal yapılar veya normal apikal periodonsiyum; periapikal kemik yapısındaki küçük değişiklikler veya periodontal hastalığı düşündüren ancak patognomonik olmayan yapısal değişiklikler; apikal periodontitis karakteristiği olan bir miktar mineral kaybıyla periapikal kemik yapısındaki veya yapısal kemikteki değişiklikler; ve iyi tanımlanmış radyolüsent bir alana veya iyi tanımlanmış radyolüsentliğe sahip periapikal kemik demineralizasyonu; ve yapısal kemiğin genişlemeleri şeklinde alevlenme veya radyolüsent özellikler gösteren periapikal kemiğin demineralizasyonu dahil olmak üzere farklı özelliklere göre sınıflandırır (J. O. Andreasen & Andreasen, 1990; Cotti, 2010). Periapikal lezyonun röntgende nasıl görüldüğüne bağlı olarak 1 ile 5 arasında değişen beş puanlı bir dereceleme sistemidir (Ørstavik, Kerekes, & Eriksen, 1986). Ancak görüntüde oluşan bozulmalar, anatomik gürültü gibi dezavantajlar bulunmaktadır (Huomonen & Ørstavik, 2002; Shanon Patel, Dawood, Mannocci, Wilson, & Pitt Ford, 2009). Son yıllardaki teknolojik yenilikler sayesinde dijital radyografi, dansitometri yöntemleri, konik ışınlı bilgisayarlı tomografi (CBCT), manyetik rezonans görüntüleme, ultrason, nükleer teknikler gibi uygulanabilir teşhis röntgen araçları dental radyolojiye kazandırılmıştır (Arai, Tammissalo, Iwai, Hashimoto, & Shinoda, 1999; Cotton, Geisler, Holden, Schwartz, & Schindler, 2007; Huomonen & Ørstavik, 2002). İki boyutlu radyografilere kıyasla CBCT, periapikal lezyonların tespitinde daha hassas, özgün ve güvenilir olup; çoğu dezavantajı ortadan kaldırır (Tsai, Torabinejad, Rice, & Azevedo, 2012). AP' nin tespiti için röntgenlerin iki boyutlu olması ve üç boyutlu röntgenler göz önüne alındığında yeni periapikal indekslerin geliştirilmesi düşünülmektedir. Yapılan bir çalışmada CBCT üzerinde yeni bir PAI değerlendirmesi bildirilmiştir (Estrela, Bueno, Azevedo, Azevedo, & Pécora, 2008). Bu çalışmaya göre yapılan yeni PAI sınıflaması aşağıda gösterilmektedir.

Skor Mineral Yapıdaki Kantitatif Kemik Değişiklikleri

0 Sağlam periapikal kemik yapıları

- 1 Periapikal radyolüsent alan çapı > 0.5-1 mm
- 2 Periapikal radyolüsent alan çapı > 1-2 mm
- 3 Periapikal radyolüsent alan çapı > 2-4 mm
- 4 Periapikal radyolüsent alan çapı > 4-8 mm
- 5 Periapikal radyolüsent alan çapı > 8 mm

Score (n)

*
+E Periapikal kortikal kemikte genişleme

Score (n)

*
+D Periapikal kortikal kemiğin yok olması şeklinde bildirilmiştir(Estrela, Bueno, et al., 2008).

3. Fraktal Analiz

‘Fraktal’ kelimesi ‘kırık’ anlamına gelen latince ‘fractus’ sözcüğünden türetilmiştir. Fraktal kavramı birbirine benzemeyen ve belirli bir geometrik şekle sahip olmayan karmaşık yapıları tanımlayabilmek için kullanılmaktadır. Belirsiz ve karmaşık şekilleri inceleyen bu yaklaşım tıp ve diş hekimliği alanlarında yaygın kullanım alanına sahiptir(Sánchez & Uzcátegui, 2011). İlk olarak ünlü matematikçi Benoit Mandelbrot tarafından kullanılmıştır(Dr. Fazzalari & Parkinson, 1997; Geraets & Van Der Stelt, 2000). Fraktal geometri karmaşık şekilleri karakterize edebilmek için nicel bir araç sunar ve uygulanabilirliğinin kolaylığı buradan kaynaklanır. Fraktal geometrisine göre her bir parça şekli aslında cismin bütünü temsil etmektedir(Geraets & Van Der Stelt, 2000). Bu noktada karşımıza çıkan nicel parametreye fraktal boyut (FB) adı verilir. FB trabeküler kemik dokusunun kalitesinin dijital radyografiler üzerinde değerlendirilmesine olanak tanıyan matematiksel bir araçtır (Tolga Suer, Yaman, & Buyuksarac, 2016). En önemli konulardan bir tanesi üç boyutlu bir trabeküler yapının iki boyutlu radyografisi üzerinde yapılan FB değerlendirmelerinin güvenilir olup olmadığı yönündedir. Birçok çalışmanın sonucu bu konuya olumlu yanıtlar vermektedir. Yapılan bir çalışmaya göre iki boyutlu radyografiden elde edilen FB ile üç boyutlu trabeküler yapının gözenekliliği ve bağlantısı arasında pozitif bir ilişki olduğu bildirilmiştir(Pothuaud et al., 2000). Yapılan çalışmalara göre FB değerinin pozlama süresine, ışın hizalamasına ve ROI yerleşimindeki değişikliklere duyarlı olmadığı bildirilmiştir(M. K. Shrout, Potter, & Hildebolt, 1997). Yapılan bir başka çalışmaya göre kök içeren ROI alanları ile kök içermeyen ROI alanları karşılaştırılmış ve kök içermeyen ROI alanlarının içerenlere göre önemli ölçüde FB değerleri farklı olduğu bildirilmiştir(M. Shrout, Hildebolt, & Potter, 1997). Fraktal boyutlar çoğunlukla kesirli sayılar olup nadir de olsa tam sayı değerleri alabilirler.

Trabeküler kemik yüzeyinde kemik yapımı ve kemik yıkımı aktivasyonları gerçekleşmektedir(Fazzalari & Parkinson, 1996). Trabeküler kemiğin yüzey alanı oldukça belirsizdir. Hücre aktivasyonuna bağlı olarak osteoklastik aktivite sonucu tırtıklı bir görünüm alır ve yüzey alanı artarken, osteoblastik aktivite sonucu yüzey alanı azalır. Bu sebeplerden dolayı kemikteki trabeküler kalınlığın, sayının hesaplanması oldukça büyük öneme sahiptir(Fazzalari & Parkinson, 1996). Fraktal geometriye göre FB ne kadar büyükse yapı o kadar karmaşıktır, FB ne kadar küçükse trabeküllerin arasındaki boşluk alanlar o kadar fazla olup kemik düzeni seyrek izlenmektedir(Mandelbrot, 1998).

3.1. Fraktal Analizinin Diş Hekimliğinde Kullanım Alanları

Fraktal analizi; ağız diş ve çene cerrahisinde büyük oranda implant cerrahisinde kullanım alanı bulmaktadır. İmplantlar yerleştirilmeden öncesi ile sonrasının karşılaştırıldığı ve alveoler kemikte trabeküler kemik artışının FB ile değerlendirildiği çok sayıda çalışma mevcuttur(Sánchez & Uzcátegui, 2011). Fraktal analizi aynı zamanda yüzey dokusunun karmaşıklığını da değerlendirebilmesi sebebiyle implantların kemikle mekanik uyumluluğunu değerlendirmek için de kullanılabilir. Yapılan bir çalışmaya göre fraktal analizi kullanılarak kemik dolumu gerçekleşmiş olan implant bölgesinin morfolojisi değerlendirilmiştir(Oshida, Hashem, Nishihara, & Yapchulay, 1994).

Endodonti alanında tedavi sonrasında kemik iyileşmesinin değerlendirilmesi kritik öneme sahiptir. Yapılan bazı çalışmalara göre endodonti alanında kök kanal tedavisi öncesi ve sonrası radyografler üzerinde değerlendirilerek periapikal bölgedeki lezyon iyileşmesi fraktal analizi ile değerlendirilmiştir. Tedavi sonrası genel olarak daha yüksek FB değerleri bildirilmiş olup ilgili bölgede kemik yapısında iyileşmenin devam ettiği konusunda fikir vermektedir(de Oliveira et al., 2025). Yapılan bir çalışmaya göre tedavi sonrası 3.ay kontrolünde fraktal boyutunda anlamlı artışlar tespit edilmiştir(Chen et al., 2005). Yapılan bir başka çalışmada lezyon değerlendirmesinde fraktal boyuttaki artış, kontrol grubunda diabetes mellitus(DM) grubundakine göre anlamlı olarak daha yüksek çıkmıştır. DM grubundaki iyileşmenin kontrol grubuna göre daha yavaş olduğu sonucuna varılmıştır(Uğur Aydın, Ocak, Bayrak, Göller Bulut, & Orhan, 2021). Başka bir çalışmaya göre lezyon çapları 2 mm olan dişlerde PAI kullanılarak iyileşme değerlendirilmiş ve mevcut sonuçlarla uyumlu olarak DM hastalarının sağlıklı kontrollere göre daha az periapikal iyileşmeye sahip olduğu bildirilmiştir(Arya et al., 2017). Yapılan çalışmalardan anlaşılabileceği üzere FB boyut farklılıkları sistemik hastalıklardan etkilenmektedir.

Sistemik olan bazı hastalıkların çene kemiklerindeki etkisinin değerlendirilmesinde fraktal analizi kullanılmaktadır(Kurşun-Çakmak & Bayrak, 2018). Ağız içinde yumuşak dokulardan alınan dijital radyograflerde vaskülarizasyonun değerlendirilmesinde kullanılmaktadır(Sánchez & Uzcátegui, 2011).

Periodontoloji alanında kemik kaybı seviyesinin tahmin edilmesinde, kemiğin yapısı ile diş hareketleri arasındaki ilişkinin değerlendirilmesinde kullanım alanı bulmaktadır(Sánchez & Uzcátegui, 2011).

3.2. Fraktal Boyutu Hesaplama Metodları

Fraktal boyut hesaplamasında her birinin kendine özgü yöntemleri olan çok sayıda metod bulunmaktadır. Üç temel başlık altında; metodları kendi aralarında sınıflandırmak gerekirse ; kutu sayma metodları, kesirli Brown hareketi metodları, alan ölçüm metodları olarak sıralanır(Lopes & Betrouni, 2009).

Trabeküler kemik ve kemik iliği boşluk alanlarının incelendiği kutu sayma metodu en çok tercih edilen yöntemdir. Trabeküler kemik için, kutu sayma metodu ile hesaplanan FB değerleri genellikle 1 ile 2 arasındadır. 1'e yakın değerler daha düşük fraktal boyutuna sahip basit yani trabeküller arasında daha boşluklu yapıları temsil ederken, 2' ye yakın değerler daha karmaşık kemik yapılarını temsil etmektedir(Tolga Suer et al., 2016). Kutu sayma metodunda kutular içeren bir ölçek, boyutu hesaplanacak olan trabeküler yapının üzerine yerleştirilir. Boyutları 2-64 piksel arasında değişen kutulardan oluşturulan ölçeklerde trabeküler kemik içeren kutular sayılır. Trabeküler kemik içeren kutu sayısı ile kılavuzdaki toplam kutu boyutunun logaritmik ölçekte grafiği çizilir ve elde edilen doğrunun eğimi ile FB tespit edilir(Demirbaş, Ergün, Güneri, Aktener, & Boyacıoğlu, 2008).

Araştırmacılar fraktal boyut değerini hesaplayabilmek için çeşitli algoritmalar geliştirmiştir(Wojtowicz et al., 2003). Fraktal boyutu dijital görüntüler üzerinden hesaplanır ancak bu görüntülerin öncelikle işlenmesi gerekmektedir. White ve Rudolph tıbbi dijital görüntülerde trabeküler kemiğin morfolojik özelliklerinin ölçülebildiği bir bilgisayar programı tanımlamışlardır(White & Rudolph, 1999). ImageJ 1.3(ImageJ; US National Institutes of Health, Bethesda, MD) programı kullanılmıştır. Dijital görüntü programa aktarıldıktan sonra farklılıkları engellemek için sıkıştırılmış görüntüler kaydedilir. İşlem sırasına göre ilk olarak ilgili alanlar(Region of Interest)(ROI) kırılır. ROI çoğaltılır, bulanık bir Gauss filtresi(sigma= 35 piksel) ile parlaklıktaki büyük ölçekli olan varyasyonlar kaldırılır. ROI orijinal görüntüden çıkarılarak her bir piksele 128 gri değeri eklenir. Sonrasında sıra ile 'Threshold' ile görüntü siyah ve beyaz olmak üzere iki renge dönüştürülür. 'Erode' seçeneği ile parazit alanlar azaltılır. 'Dilate' seçeneği ile bulunan alanlar genişletilir. 'Invert' seçeneği ile trabeküler kemiğin ana hatları ortaya çıkarılır. 'Skeletonize' seçeneği ile trabeküler kemiğin iskeletsel hatları ortaya çıkarılır. Daha sonra bulunan alanlar 2-64 piksel karelere bölünerek bir eğri elde edilir ve bu eğrinin doğrusal regresyonunun negatif eğimi fraktal boyutu verir (Borowska, Szarmach, & Oczeretko, 2015). Kolay uygulanabilirliği sebebiyle kutu sayma metodu en sık tercih edilen yöntem olmuştur(Arsan, Köse, Çene, & Özcan, 2017; Leite et al., 2015; Tolga Suer et al., 2016).

4. Fraktal Analizi ve PAI Arasındaki Korelasyon

Tüm fraktal analizi çalışmalarının zorluğu kabul edilmektedir(M. K. Shrout, Roberson, Potter, Mailhot, & Hildebolt, 1998). Yapılan çalışmalara göre fraktal boyutun belirlenmesi için kullanılan yöntemler arasında da farklılık olduğu bildirilmiştir(Caligiuri, Giger, & Favus, 1994). Yapılan bazı çalışmalara göre periapikal lezyonların sebep olduğu rezorbsiyon ve demineralizasyonun yüzey porozitesini artırarak FB artışına neden olduğu bildirilmiştir(Hua, Nackaerts, Duyck, Maes, & Jacobs, 2009; Saeed, Ibraheem, & Alnema, 2014). Bazı durumlarda röntgenlerde kemik yoğunluğu azalmasına rağmen FB artışı

gözlenebilmektedir, yapılan çalışmalarda bunun nedeni olarak artan demineralizasyon sonucu terminal trabeküllerde artış, ana trabeküllerde ise yıkım olduğu belirtilmiş ve buna bağlı olarak yapının karmaşık hale geldiği bildirilmiştir. Sonuç olarak FB artmıştır(Aktuna Belgin & Serindere, 2020). Literatüre göre fraktal boyut ve trabeküler kemik karmaşıklığı arasında fikir birliği yoktur(Law, Bollen, & Chen, 1996). Bazı çalışmalara göre osteoporotik durumlarda FB artışını trabeküler kemik karmaşıklığına bağlarken(Law et al., 1996); diğerleri hastalıklı durumun trabeküler karmaşıklığını azalttığı ve fraktal boyutunu azalttığı fikrini desteklemektedir(Updike & Nowzari, 2008). Tüm bu sebeplerden dolayı kök kanal tedavisi sonrası FB değerlerindeki artışın yeni oluşan trabeküler paternden mi yoksa dekalsifikasyondan mı kaynaklandığını belirlemek için birçok çalışmada PAI indeksi ile desteklenmiştir(Kurt, Koyuncu, Güleç, & Şimşek, 2024; Tosun, Karataslioglu, Tulgar, & Derindag, 2022; Yilmaz & Duzgun, 2023). Tosun ve ark.nın yaptıkları çalışmaya göre; kök kanal tedavisi sonrası periapikal iyileşmenin değerlendirilmesinde FB ve PAI kullanılmıştır. Bu çalışmaya göre periapikal iyileşmenin değerlendirilmesinde her ikisinin kullanılmasının yararlı olduğu bildirilmiştir(Tosun et al., 2022). Kurt ve ark.nın yaptıkları bir başka çalışmaya göre; tedavi sonrası periapikal röntgenlerdeki FB artışının klinik ve radyografik iyileşme ile paralel seyrettiğini, PAI indeksinde skorların iyileşmeyi yansıttığını, ancak iki yöntemin her zaman birbiri ile aynı anda artış göstermediğini her zaman korelasyon göstermeyebileceğini bildirmiştir(Kurt et al., 2024). Tüm bunlardan yola çıkarak iki yöntemin birbirini destekleyici olduğu söylenebilir. FB nicel bir yöntem iken PAI klinik ve radyografik skorlama yöntemidir.

Kök kanal tedavisini takiben radyografilerde periapikal dokulardaki gelişmeleri değerlendirmek için kullanılan PAI indeksinin en önemli limitasyonu ise elde edilen verilerin öznel olmasıdır(Estrela, Bueno, et al., 2008; Tarcin, Gumru, Iriboz, Turkaydin, & Ovecoglu, 2015).

Yapılan bir çalışmada dijital radyografilerin görüntü çözünürlüğü ve pozlama süresinin periapikal kemiğin FB'si üzerindeki etkisi değerlendirilmiş, FB'nin görüntü çözünürlüğü ve pozlama süresiyle önemli değişiklikler gösterdiği bildirilmiştir. Daha yüksek çözünürlüklü radyografilerden elde edilen görüntülerin FB'leri, daha düşük çözünürlüklü radyografilerden elde edilen FB'lere kıyasla önemli ölçüde daha yüksek bulunmuştur(Baksi & Fidler, 2012). Panoramik radyografiler daha düşük çözünürlüğe sahip olduğu için kemik yapıları periapikal radyografilerde olduğu kadar ayrıntılı göstermemektedir. Yapılan bir çalışmada FB değerleri hem panoramik hem periapikal radyografilerde ölçülmüş; beklendiği gibi FB değerleri panoramik radyografilerde daha düşük gözlenmiştir. Daha düşük çözünürlük nedeniyle, panoramik radyografiler ince trabeküler ayrıntıları gösteremez(Bollen, Taguchi, Hujoel, & Hollender, 2001).

5. Sonuç

Endodontide apikal periodontitis takibinde her ne kadar iki boyutlu röntgenler FB değerlendirmesi için tercih edilse de üç boyutlu görüntüleme teknikleri ve yapay zekanın kullanılarak literatüre daha ileri çalışmaların kazandırılmasına ihtiyaç vardır. Yapılan çalışmalara göre periapikal lezyon takibinde her zaman fraktal analizi ve PAI arasında pozitif yönde korelasyon bulunmamaktadır. Fraktal analizi uygulanması kolay ve maliyetsiz olması sebebiyle yaygın kullanım alanına sahip olsa da lezyon değerlendirmesinde klinik ve histolojik olarak desteklenmelidir.

Referanslar

- Abbott, P. V. (2004). Classification, diagnosis and clinical manifestations of apical periodontitis. *Endodontic topics*, 8(1), 36-54.
- Aktuna Belgin, C., & Serindere, G. (2020). Evaluation of trabecular bone changes in patients with periodontitis using fractal analysis: A periapical radiography study. *Journal of periodontology*, 91(7), 933-937.
- Alghamdi, F., Alhaddad, A. J., & Abuzinadah, S. (2020). Healing of periapical lesions after surgical endodontic retreatment: a systematic review. *Cureus*, 12(2).
- Andreasen, J., & Rud, J. (1972). Correlation between histology and radiography in the assessment of healing after endodontic surgery. *International Journal of Oral Surgery*, 1(3), 161-173.
- Andreasen, J. O., & Andreasen, F. M. (1990). Dental traumatology: quo vadis: Opening remarks at the Second International Conference on Oral Trauma, Stockholm, Sweden, September 21, 1989. *Dental Traumatology*, 6(2), 78-80.
- Arai, Y., Tammsalo, E., Iwai, K., Hashimoto, K., & Shinoda, K. (1999). Development of a compact computed tomographic apparatus for dental use. *Dentomaxillofacial Radiology*, 28(4), 245-248.
- Arsan, B., Köse, T. E., Çene, E., & Özcan, İ. (2017). Assessment of the trabecular structure of mandibular condyles in patients with temporomandibular disorders using fractal analysis. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology and Oral Radiology*, 123(3), 382-391.
- Arya, S., Duhan, J., Tewari, S., Sangwan, P., Ghalaut, V., & Aggarwal, S. (2017). Healing of apical periodontitis after nonsurgical treatment in patients with type 2 diabetes. *Journal of endodontics*, 43(10), 1623-1627.
- Azeredo, S. V., Brasil, S. C., Antunes, H., Marques, F. V., Pires, F. R., & Armada, L. (2017). Distribution of macrophages and plasma cells in apical periodontitis and their relationship with clinical and image data. *Journal of Clinical and Experimental Dentistry*, 9(9), e1060.
- Azuma, M., Samuel, R., Gomes-Filho, J., Dezan-Junior, E., & Cintra, L. T. A. (2014). The role of IL-6 on apical periodontitis: a systematic review. *International endodontic journal*, 47(7), 615-621.
- Baksi, B. G., & Fidler, A. (2012). Image resolution and exposure time of digital radiographs affects fractal dimension of periapical bone. *Clinical oral investigations*, 16(5), 1507-1510.

- Berlin-Broner, Y., Febbraio, M., & Levin, L. (2017). Association between apical periodontitis and cardiovascular diseases: a systematic review of the literature. *International endodontic journal*, 50(9), 847-859.
- Bollen, A., Taguchi, A., Hujoel, P., & Hollender, L. (2001). Fractal dimension on dental radiographs. *Dentomaxillofacial Radiology*, 30(5), 270-275.
- Borowska, M., Szarmach, J., & Oczeretko, E. (2015). Fractal texture analysis of the healing process after bone loss. *Computerized Medical Imaging and Graphics*, 46, 191-196.
- Caligiuri, P., Giger, M. L., & Favus, M. (1994). Multifractal radiographic analysis of osteoporosis. *Medical physics*, 21(4), 503-508.
- Chen, S.-K., Oviir, T., Lin, C.-H., Leu, L.-J., Cho, B.-H., & Hollender, L. (2005). Digital imaging analysis with mathematical morphology and fractal dimension for evaluation of periapical lesions following endodontic treatment. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontology*, 100(4), 467-472.
- Cotti, E. (2010). Advanced techniques for detecting lesions in bone. *Dental Clinics*, 54(2), 215-235.
- Cotton, T. P., Geisler, T. M., Holden, D. T., Schwartz, S. A., & Schindler, W. G. (2007). Endodontic applications of cone-beam volumetric tomography. *Journal of endodontics*, 33(9), 1121-1132.
- De Ferraris, M. E. G. (1999). *Histología y embriología bucodental: Médica panamericana*.
- de Oliveira, C. B., Rocha, T. G., Pintor, A. V. B., Magno, M. B., Abrahão, A. C., Maia, L. C., Visconti, M. A. (2025). Using fractal analysis to assess periapical bone formation after endodontic treatment: A systematic review and meta-analysis. *Imaging science in dentistry*, 55(2), 126.
- Demirbaş, A. K., Ergün, S., Güneri, P., Aktener, B. O., & Boyacıoğlu, H. (2008). Mandibular bone changes in sickle cell anemia: fractal analysis. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontology*, 106(1), e41-e48.
- Dr. Fazzalari, N., & Parkinson, I. (1997). Fractal properties of subchondral cancellous bone in severe osteoarthritis of the hip. *Journal of bone and mineral research*, 12(4), 632-640.
- Eliasson, S., Halvarsson, C., & Ljunghimer, C. (1984). Periapical condensing osteitis and endodontic treatment. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology*, 57(2), 195-199.
- Estrela, C., Bueno, M. R., Azevedo, B. C., Azevedo, J. R., & Pécora, J. D. (2008). A new periapical index based on cone beam computed tomography. *Journal of endodontics*, 34(11), 1325-1331.

- Estrela, C., Leles, C. R., Hollanda, A. C. B., Moura, M. S., & Pécora, J. D. (2008). Prevalence and risk factors of apical periodontitis in endodontically treated teeth in a selected population of Brazilian adults. *Brazilian dental journal*, 19, 34-39.
- Fazzalari, N., & Parkinson, I. (1996). Fractal dimension and architecture of trabecular bone. *The Journal of pathology*, 178(1), 100-105.
- Geraets, W., & Van Der Stelt, P. (2000). Fractal properties of bone. *Dentomaxillofacial Radiology*, 29(3), 144-153.
- Glickman, G. N. (2009). AAE Consensus Conference on Diagnostic Terminology: background and perspectives. *Journal of endodontics*, 35(12), 1619-1620.
- Grossman, L. I., Shepard, L. I., & Pearson, L. A. (1964). Roentgenologic and clinical evaluation of endodontically treated teeth. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology*, 17(3), 368-374.
- Gulabivala, K., & Ng, Y. L. (2023). Factors that affect the outcomes of root canal treatment and retreatment—A reframing of the principles. *International endodontic journal*, 56, 82-115.
- Hirsch, J.-M., Ahlström, U., Henrikson, P.-Å., Heyden, G., & Peterson, L.-E. (1979). Periapical surgery. *International Journal of Oral Surgery*, 8(3), 173-185.
- Hua, Y., Nackaerts, O., Duyck, J., Maes, F., & Jacobs, R. (2009). Bone quality assessment based on cone beam computed tomography imaging. *Clinical oral implants research*, 20(8), 767-771.
- Huunonen, S., & Ørstavik, D. (2002). Radiological aspects of apical periodontitis. *Endodontic topics*, 1(1), 3-25.
- Ingle, J. I., Bakland, L. K., & Baumgartner, J. C. (2007). Ingle's endodontics 6.
- Jorge, E. G., Tanomaru-Filho, M., Gonçalves, M., & Tanomaru, J. M. (2008). Detection of periapical lesion development by conventional radiography or computed tomography. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontology*, 106(1), e56-e61.
- Karamifar, K., Tondari, A., & Saghiri, M. A. (2020). Endodontic periapical lesion: an overview on the etiology, diagnosis and current treatment modalities. *European endodontic journal*, 5(2), 54.
- Kruse, C., Spin-Neto, R., Christiansen, R., Wenzel, A., & Kirkevang, L.-L. (2016). Periapical bone healing after apicectomy with and without retrograde root filling with mineral trioxide aggregate: a 6-year follow-up of a randomized controlled trial. *Journal of endodontics*, 42(4), 533-537.
- Kumar, V., Abbas, A. K., & Aster, J. C. (2021). *Robbins y Cotran. Patología estructural y funcional*: Elsevier Health Sciences.

- Kurşun-Çakmak, E. Ş., & Bayrak, S. (2018). Comparison of fractal dimension analysis and panoramic-based radiomorphometric indices in the assessment of mandibular bone changes in patients with type 1 and type 2 diabetes mellitus. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology and Oral Radiology*, 126(2), 184-191.
- Kurt, Ö., Koyuncu, S., Güleç, M., & Şimşek, E. (2024). Endodontik Tedavi Sonrası Takip Verilerinin Fraktal Boyut Analizi: Retrospektif Bir Çalışma. *Akdeniz Diş Hekimliği Dergisi*, 3(3), 122-129.
- Law, A. N., Bollen, A.-M., & Chen, S.-K. (1996). Detecting osteoporosis using dental radiographs: a comparison of four methods. *The Journal of the American Dental Association*, 127(12), 1734-1742.
- Leite, A. F., de Souza Figueiredo, P. T., Caracas, H., Sindeaux, R., Guimaraes, A. T. B., Lazarte, L., de Melo, N. S. (2015). Systematic review with hierarchical clustering analysis for the fractal dimension in assessment of skeletal bone mineral density using dental radiographs. *Oral radiology*, 31(1), 1-13.
- Lin, L., & Rosenberg, P. (2011). Repair and regeneration in endodontics. *International endodontic journal*, 44(10), 889-906.
- Lindhe, J., Karring, T., & Lang, N. P. (2009). *Periodontología clínica e implantología odontológica*: Ed. Médica Panamericana.
- Lopes, R., & Betrouni, N. (2009). Fractal and multifractal analysis: A review. *Medical image analysis*, 13(4), 634-649.
- Lz, S. (1956). The dependence of the results of pulp therapy on certain factors: an analytic study based on radiographic and clinical follow-up examination. *Acta Odontol Scand*.
- Mandelbrot, B. B. (1998). Is nature fractal? *Science*, 279(5352), 783-783.
- Masó, A. A. (1999). Cicatrización de los procedimientos quirúrgicos en endodoncia. *Odontólogo, Universidad Central de Venezuela*, 2001-2002.
- Menzies, R. A., Reiter, A. M., & Lewis, J. R. (2014). Assessment of apical periodontitis in dogs and humans: a review. *Journal of veterinary dentistry*, 31(1), 8-21.
- Molven, O., Halse, A., & Fristad, I. (2002). Long-term reliability and observer comparisons in the radiographic diagnosis of periapical disease. *International endodontic journal*, 35(2), 142-147.
- Murphy, W. K., Kaugars, G. E., Collett, W. K., & Dodds, R. N. (1991). Healing of periapical radiolucencies after nonsurgical endodontic therapy. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology*, 71(5), 620-624.
- Nair, P. R. (1987). Light and electron microscopic studies of root canal flora and periapical lesions. *Journal of endodontics*, 13(1), 29-39.

- Nair, P. R. (1997). Apical periodontitis: a dynamic encounter between root canal infection and host response. *Periodontology 2000*, 13(1), 121-148.
- Nair, P. R., Sjögren, U., Figdor, D., & Sundqvist, G. (1999). Persistent periapical radiolucencies of root-filled human teeth, failed endodontic treatments, and periapical scars. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontology*, 87(5), 617-627.
- Ng, Y. L., Mann, V., & Gulabivala, K. (2011). A prospective study of the factors affecting outcomes of nonsurgical root canal treatment: part 1: periapical health. *International endodontic journal*, 44(7), 583-609.
- of Endodontists, A. A. (2011). Use of cone-beam computed tomography in endodontics Joint Position Statement of the American Association of Endodontists and the American Academy of Oral and Maxillofacial Radiology. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod*, 111(2), 234-237.
- Ørstavik, D. (1996). Time-course and risk analyses of the development and healing of chronic apical periodontitis in man. *International endodontic journal*, 29(3), 150-155.
- Ørstavik, D., Kerekes, K., & Eriksen, H. (1986). The periapical index: A scoring system for radiographic assessment o apical periododntitis. *Dent Traum*, 2(1), 20-34.
- Ørstavik, D., Kerekes, K., & Eriksen, H. M. (1986). The periapical index: a scoring system for radiographic assessment of apical periodontitis. *Dental Traumatology*, 2(1), 20-34.
- Oshida, Y., Hashem, A., Nishihara, T., & Yapchulay, M. (1994). Fractal dimension analysis of mandibular bones: toward a morphological compatibility of implants. *Bio-medical materials and engineering*, 4(5), 397-407.
- Patel, S., Dawood, A., Mannocci, F., Wilson, R., & Pitt Ford, T. (2009). Detection of periapical bone defects in human jaws using cone beam computed tomography and intraoral radiography. *International endodontic journal*, 42(6), 507-515.
- Patel, S., & Horner, K. (2009). The use of cone beam computed tomography in endodontics. *International endodontic journal*, 42(9).
- Pothuaud, L., Benhamou, C., Porion, P., Lespessailles, E., Harba, R., & Levitz, P. (2000). Fractal dimension of trabecular bone projection texture is related to three-dimensional microarchitecture. *Journal of bone and mineral research*, 15(4), 691-699.
- Rud, J., Andreasen, J., & Jensen, J. M. (1972). Radiographic criteria for the assessment of healing after endodontic surgery. *International Journal of Oral Surgery*, 1(4), 195-214.

- Saeed, S. S., Ibraheem, U. M., & Alnema, M. M. (2014). Quantitative analysis by pixel intensity and fractal dimensions for imaging diagnosis of periapical lesions. *International Journal of Enhanced Research in Science Technology & Engineering*, 3(5), 138-144.
- Sánchez, I., & Uzcátegui, G. (2011). Fractals in dentistry. *Journal of dentistry*, 39(4), 273-292.
- Shrout, M., Hildebolt, C., & Potter, B. (1997). The effect of varying the region of interest on calculations of fractal index. *Dentomaxillofacial Radiology*, 26(5), 295-298.
- Shrout, M. K., Potter, B. J., & Hildebolt, C. F. (1997). The effect of image variations on fractal dimension calculations. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontology*, 84(1), 96-100.
- Shrout, M. K., Roberson, B., Potter, B. J., Mailhot, J. M., & Hildebolt, C. F. (1998). A comparison of 2 patient populations using fractal analysis. *Journal of periodontology*, 69(1), 9-13.
- Siqueira Jr, J. F., Rôças, I. N., Ricucci, D., & Hülsmann, M. (2014). Causes and management of post-treatment apical periodontitis. *Br Dent J*, 216(6), 305-312.
- Tanomaru-Filho, M., Jorge, E., Duarte, M., Gonçalves, M., & Guerreiro-Tanomaru, J. (2009). Comparative radiographic and histological analyses of periapical lesion development. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontology*, 107(3), 442-447.
- Tarcin, B., Gumru, B., Iriboz, E., Turkeydin, D. E., & Ovecoglu, H. S. (2015). Radiologic assessment of periapical health: comparison of 3 different index systems. *Journal of endodontics*, 41(11), 1834-1838.
- Tolga Suer, B., Yaman, Z., & Buyuksarac, B. (2016). Correlation of Fractal Dimension Values with Implant Insertion Torque and Resonance Frequency Values at Implant Recipient Sites. *International Journal of Oral & Maxillofacial Implants*, 31(1).
- Torabinejad, M., & Missouri, R. (2009). Pulp and periapical pathosis.
- Tosun, S., Karataslioglu, E., Tulgar, M. M., & Derindag, G. (2022). Fractal analysis and periapical index evaluation of multivisit nonsurgical endodontic retreatment: A retrospective study. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology and Oral Radiology*, 133(2), 245-251.
- Tsai, P., Torabinejad, M., Rice, D., & Azevedo, B. (2012). Accuracy of cone-beam computed tomography and periapical radiography in detecting small periapical lesions. *Journal of endodontics*, 38(7), 965-970.
- Uğur Aydın, Z., Ocak, M., Bayrak, S., Göller Bulut, D., & Orhan, K. (2021). The effect of type 2 diabetes mellitus on changes in the fractal dimension of

- periapical lesion in teeth after root canal treatment: a fractal analysis study. *International endodontic journal*, 54(2), 181-189.
- Urdike, S. X., & Nowzari, H. (2008). Fractal analysis of dental radiographs to detect periodontitis-induced trabecular changes. *Journal of periodontal research*, 43(6), 658-664.
- Walton, R. E., & Torabinejad, M. (1996). *Principles and practice of endodontics*: WB Saunders.
- White, S. C., & Pharoah, M. J. (2014). *Oral radiology-E-Book: Principles and interpretation*: Elsevier Health Sciences.
- White, S. C., & Rudolph, D. J. (1999). Alterations of the trabecular pattern of the jaws in patients with osteoporosis. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontology*, 88(5), 628-635.
- Wojtowicz, A., Chaberek, S., Kryst, L., Urbanowska, E., Ciechowicz, K., & Ostrowski, K. (2003). Fourier and fractal analysis of maxillary alveolar ridge repair using platelet rich plasma (PRP) and inorganic bovine bone. *International journal of oral and maxillofacial surgery*, 32(1), 84-86.
- Yilmaz, S., & Duzgun, S. (2023). The Quantitative Method for Following Radiologic Healing in Endodontic Retreatment; 1-Year Follow-up Study and Retrospective Analysis. *Cumhuriyet Dental Journal*, 26(4).
- Zmener, O., Pameijer, C. H., & Boetto, A. C. (2022). Noninvasive endodontic periapical biopsy of a periapical fibrous scar: case report. *Journal of endodontics*, 48(3), 375-378.

BÖLÜM 3

Endodontide İrrigasyonun Evrimi: Aktivasyon Yöntemleri ve Yenilikçi Sistemler

**Hazal Faiz Arslanparçası¹ &
Mehmet Ali Arslanparçası²**

¹ Arş. Gör., Harran Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi Endodonti ABD
0009-0002-3172-6966

² Öğr. Gör., Harran Üniversitesi Sağlık Meslek Yüksekokulu, Diş Protez Teknolojisi
Programı, 0009-0001-2753-2096

GİRİŞ

Endodontik tedavinin temel hedefi, kök kanal sistemi içindeki mikroorganizmaların ve bunlara ait ürünlerin uzaklaştırılması, mikrobiyal yükün biyolojik olarak tolere edilebilir bir düzeye indirilmesi ve yeniden kontaminasyonun engellenmesidir. Apikal periodontitis, kök kanalı kaynaklı bir enfeksiyonun sonucu olarak ortaya çıkan ve konağın savunma yanıtını yansıtan kronik inflamatuvar bir süreçtir. Apikal periodontitisin etiyopatogenezinde, kök kanal sistemi ile periradiküler dokular arasındaki dinamik mikrobiyal–immünolojik etkileşimi detaylı biçimde tanımlamış; tedavi başarısındaki en kritik unsurun, kök kanal enfeksiyonunun kontrolü olduğunu vurgulamıştır (Nair 2004).

Son yıllarda, çeşitli analizlerle, endodontik enfeksiyonların kompleks, polimikrobiyal ve çoğunlukla biyofilm formunda seyrettiğini ortaya koymuştur. Siqueira ve ark., hem primer hem de persistan intraradiküler enfeksiyonlarda zorunlu anaerobların baskın olduğu, yüksek tür çeşitliliğine sahip mikrobiyal topluluklar tanımlamış; hastalığın tek bir patojen yerine, “topluluğun kolektif patojenitesi” ile ilişkili olduğu modelini önermiştir (Siqueira Jr. ve Rôças 2022). Bununla uyumlu olarak Ricucci ve Siqueira, apikal periodontitisli dişlerde yaptıkları histobakteriyolojik incelemelerde, kök kanal sisteminin apikal segmenti, istmuslar ve dallanmalar boyunca yaygın intraradiküler biyofilm varlığını göstermiş, bu bulgular apikal periodontitisin biyofilm kaynaklı bir hastalık olarak kabul edilmesini desteklemiştir (Ricucci ve Siqueira 2010).

Biyofilmin karmaşık yapısı ve kök kanal sisteminin morfolojik çeşitliliği, tek başına mekanik şekillendirmenin dezenfeksiyon açısından yetersiz kalmasına yol açmaktadır. Mikrobilgisayarlı tomografi (micro-CT) ve üç boyutlu görüntüleme tekniklerini kullanan çalışmalar, en gelişmiş nikel-titanyum enstrümantasyon sistemleriyle dahi kök kanal duvarlarının önemli bir kısmının (yaklaşık üçte birine varan oranlarda) alet temasından uzak kaldığını göstermiştir (Peters 2004). Bu, kanal sisteminde şekillendirme sonrasında da bakteri, doku artığı ve smear tabakasının önemli ölçüde varlığını sürdürebileceği anlamına gelmektedir. Dolayısıyla, irrigasyon solüsyonları ve bunların etkin uygulanması, endodontik tedavinin mekanik aşamalarını tamamlayan değil, tedavinin ayrılmaz bir bileşeni olan bir adımı haline gelmiştir.

Kök kanal irrigasyonunda kullanılan ajanlar, tarihsel süreçte hipoklorit bazlı solüsyonların keşfi ile başlamış; bunu EDTA ve diğer şelatlayıcılar, klorheksidin ve kombinasyon protokolleri izlemiştir. Son yıllarda ise yüzey aktif madde içeren çözeltiler, zayıflatılmış hipoklorit–şelatlayıcı kombinasyonları (örneğin HEDP temelli sistemler) ve nanopartikül içeren ajanlar gibi çok sayıda yeni formülasyon geliştirilmiştir (Kandaswamy ve Venkateshbabu 2010).

Bununla birlikte irrigasyonun etkinliğini asıl belirleyen faktör yalnızca solüsyonun kimyasal içeriği değildir. Son otuz yılda, irrigantların kök kanal

sistemi içerisinde daha etkin dolaşımını ve penetrasyonunu sağlamak amacıyla çok çeşitli aktivasyon teknikleri geliştirilmiştir. Ultrasonik ve sonik aktivasyon sistemleri, negatif basınçlı irrigasyon cihazları, lazerle indüklenen fotoakustik akım (PIPS, SWEEPS), yeni nesil NiTi “finisher” enstrümanları ve bu teknolojilerin kombine edildiği protokoller, irrigasyonun evriminde önemli dönüm noktaları olarak kabul edilmektedir (Plotino vd. 2016).

Güncel anket çalışmalarında, gerek uzman endodontistler gerekse farklı ülkelerdeki diş hekimliği fakülteleri arasında irrigant ve aktivasyon yöntemi tercihleri incelenmiş; klasik iğne irrigasyonundan daha ileri tekniklere doğru kademeli fakat heterojen bir geçiş olduğu gösterilmiştir (Virdee vd. 2020).

Bu kitap bölümünde, endodontik irrigasyonun evrimini özellikle aktivasyon yöntemleri ve yenilikçi irrigasyon sistemleri ele alınacaktır. Mekanik şekillendirmenin yetersiz kaldığı anatomik alanlarda irrigantların etkinliğini artırmayı amaçlayan ultrasonik ve sonik aktivasyon teknikleri, negatif basınçlı sistemler, lazerle indüklenen fotoakustik akım teknolojileri ayrıntılı olarak incelenecektir. Böylece, modern irrigasyon yaklaşımının biyolojik temeli, cihaz teknolojileri ve klinik yansımaları bütüncül bir çerçevede sunulurken, endodontik dezenfeksiyonda kullanılan aktivasyon yöntemlerinin güncel bilimsel kanıtlar ışığında kapsamlı bir değerlendirmesi sağlanacaktır.

1. MANÜEL İRRİGASYON VE MANÜEL DİNAMİK İRRİGASYON (MDI)

Kök kanal irrigasyonunun en temel formu, irrigantın bir enjektör ve iğne yardımıyla pasif olarak kanala verilmesine dayanan klasik manüel irrigasyondur. Klinik uygulamada bu yöntem, çoğunlukla yandan perfore veya ince çaplı iğnelerle, irrigantın çalışma boyundan kısa olacak şekilde apikal bölgeye kadar iletilmesini ve kanal lümeni boyunca geri akışla birlikte yıkanmayı kapsar. Yöntemin en önemli avantajları; tekniğinin basit olması, ek bir cihaz gerektirmemesi, hemen her klinik şartta uygulanabilmesi ve maliyetinin düşük olmasıdır. Buna karşın, irrigantın pozitif basınçla iletilmesi; apikal ekstrüzyon riskini artırabilmekte, ayrıca istmuslar, lateral kanallar, ovalleşmiş segmentler gibi kompleks anatomik alanlarda solüsyonun etkili şekilde yenilenmesini ve duvarlarla temasını sınırlayabilmektedir (Gomes, Aveiro, ve Kishen t.y.).

Güncel literatürde, manüel irrigasyonunun bu kısıtlılıklarını azaltmak amacıyla, manüel dinamik irrigasyon veya manüel dinamik aktivasyon (Manual Dynamic Irrigation / Manual Dynamic Activation, MDI/MDA) olarak adlandırılan bir yaklaşım tanımlanmıştır. Bu teknikte; kök kanalı şekillendirildikten sonra, çalışma boyuna yakın uyumlu bir ana gutta-perka konur ya da benzer elastik bir taşıyıcı, irrigant ile doldurulmuş kanal içinde kısa genlikli dikey hareketlerle ritmik biçimde ileri-geri hareket ettirilir. Gutta-perka konunun kanal duvarlarına uyumlu olması ve hareketlerin genliğinin birkaç milimetre ile sınırlı tutulması, irrigantın apikal bölgeye doğru yönlendirilmesini, kanal içinde

hidrodinamik bir akım oluşmasını ve kullanılan solüsyonun süratle yenilenmesini sağlar (Gu vd. 2009).

Klinik açıdan bakıldığında MDI, ek bir cihaz gerektirmemesi, öğrenme eğrisinin kısa olması ve hemen her endodontik sistemle kombine edilebilmesi nedeniyle pratik ve maliyeti düşük bir aktivasyon seçeneği olarak öne çıkmaktadır. Ancak ultrasonik, sonik veya lazer tabanlı aktivasyon sistemlerine kıyasla; kanal duvarlarında oluşturduğu akustik enerji düzeyi daha sınırlıdır ve özellikle karmaşık kök kanal anatomilerinde biyofilm ve smear tabakası uzaklaştırma etkinliği her zaman üst düzeyde olmayabilir. Bu nedenle güncel protokoller, manüel dinamik irrigasyonu çoğu zaman yardımcı bir aktivasyon basamağı veya diğer sistemlerle kombine edilen bir ön adım olarak değerlendirmektedir (Gomes vd. t.y.).

2. PASİF ULTRASONİK İRRİGASYON (PUI)

Pasif ultrasonik irrigasyon (PUI), kök kanal sistemindeki irrigantın ultrasonik enerji ile aktive edilmesine dayanan, ancak bu sırada herhangi bir eş zamanlı kök kanal şekillendirmesi yapılmayan bir irrigasyon aktivasyon tekniğidir. Yöntem genellikle ince çaplı, uç kısmı kesici olmayan bir ultrasonik uç ya da pürüzsüz telin (yaklaşık ISO 15–20) irrigantla doldurulmuş ve önceden şekillendirilmiş kanala yerleştirilmesi, ardından bu ucun kanal duvarlarına temas etmeyecek şekilde serbestçe titreştirilmesi esasına dayanır. Böylece ultrasonik enerji doğrudan dentine değil, kanal içindeki sıvıya iletilir ve asıl etkinlik irrigantın hidrodinamik hareketi üzerinden sağlanır (van der Sluis vd. 2007).

Ultrasonik titreşim sonucu kök kanalındaki irrigant içerisinde akustik mikroakım (acoustic microstreaming) ve belirli koşullarda kavitasyon olarak tanımlanan fiziksel olaylar ortaya çıkar. Mikroakım, sıvı parçacıklarının yüksek hızda dairesel ve doğrusal hareketleriyle irrigantın kanal duvarları boyunca kaymasını sağlayarak, özellikle istmuslar ve düzensiz alanlarda biriken debris ve smear tabakasının yerinden ayrılmasına katkıda bulunur. Kavitasyon ise sıvı içerisinde oluşan ve patlayan mikroskobik gaz kabarcıkları aracılığıyla lokal kesme kuvvetleri üretir; bu sayede irrigantın dentin yüzeylerine ve dentin tübüllerine daha derinlemesine nüfuz etmesi mümkün olur. Ultrasonik irrigasyonun kök kanal duvarı temizliği, doku artığı ve bakteriyel yükün azaltılması açısından manüel irrigasyonuna üstünlük sağladığı; hem derlemelerde hem de güncel in vitro çalışmalarla desteklenmiştir (Guerreiro-Tanomaru vd. 2015).

3.SONİK İRRİGASYON VE AKTİVASYON SİSTEMLERİ

Sonik irrigasyon sistemleri, irrigantın düşük frekanslı titreşimle aktive edilmesi ve bu titreşimin polimer uçlar aracılığıyla kanaldaki sıvıda oluşturduğu hidrodinamik akımın kök kanal temizliğini artırması prensibine dayanır. Çalışmalar, sonik aktivasyonun özellikle debris ve smear tabakası uzaklaştırmada

klasik iğne irrigasyona göre anlamlı üstünlük sağladığını göstermektedir (Güngördü, Tufenkci, ve Sarı 2025).

Literatürde, EDDY ve benzer sonik uçların karmaşık kanal anatomilerinde bile debris uzaklaştırmada etkili olduğunu ve sonik aktivasyon ile ultrasonik aktivasyon arasında kalite açısından karşılaştırılabilir sonuçlar alınabileceğini bildirmiştir (Chu vd. 2023). Ayrıca, sonik aktivasyonun smear tabakası ve yumuşak doku artıklarının uzaklaştırılmasında pozitif etkisi; geleneksel irrigasyon yöntemlerine kıyasla daha homojen irrigant akımı ve yenilenmesi sağladığı çeşitli in vitro çalışmalarda da desteklenmiştir (Caron vd. 2010).

Sonik sistemlerin avantajı yalnızca etkin temizleme değil aynı zamanda polimer uçları sayesinde kanal duvarlarına zarar vermeden, metal uçlu ultrasonik sistemlerin olası dentin aşındırması gibi riskleri en aza indirmesidir. Bu nedenle literatürde, sonik irrigasyon genellikle “etkili, güvenli ve erişilebilir alternatif” olarak tanımlanmaktadır (Chu vd. 2023).

Sonuç olarak, mevcut bilimsel veri, sonik irrigasyon ve aktivasyon sistemlerinin, klasik manüel irrigasyona kıyasla kök kanal sisteminin anatomik karmaşıklıkları göz önünde bulundurulduğunda temizlik etkinliğini artıran güvenilir ve pratik bir yöntem olduğunu göstermektedir.

4.NEGATİF BASINÇLI İRRİGASYON SİSTEMLERİ (ENDOVAC)

Negatif basınçlı irrigasyon sistemleri, irrigantın kök kanalına koronal yönden verilmesi ve aynı anda apikalden mikrokanül aracılığıyla aspire edilmesi prensibine dayanır; amaç irrigantın apikal bölgeye güvenli ve etkili bir şekilde ulaşmasını sağlamaktır. Yapılan in vitro çalışmalarda, bu sistemlerin özellikle apikal için temizliği açısından manüel pozitif basınçlı irrigasyona göre üstün olduğu gösterilmiştir.

Yapılan bir çalışmada (Buldur ve Kapdan 2017), EndoVac sistemi, konvansiyonel iğne irrigasyona kıyasla primer alt molarların apikal için smear tabakasını anlamlı biçimde daha etkili temizlemiştir. Geleneksel iğne irrigasyonda apikal bölgeye irrigant ulaşımı ve akışkan yenilenmesi sınırlı olduğundan, smear tabakası ve debris kalma riski yüksektir.

Yayımlanan bir CFD (hesaplamalı akışkan dinamiği) çalışmasında Rahman ve arkadaşları, EndoVac benzeri negatif basınç sistemlerinin kanal içerisinde oluşturduğu sıvı akış desenlerini ve duvar kayma gerilimini (wall shear stress, WSS) analiz etmiş; negatif basınçlı sistemlerin, özellikle apikal bölgede irrigant akışını ve yenilenmesini artırdığını, bunun da smear tabakası uzaklaştırma etkinliğini yükselttiğini rapor etmiştir (Rahman vd. 2023).

Bu bulgular, negatif basınçlı irrigasyon sistemlerinin klasik pozitif basınçlı iğne yöntemlerine kıyasla hem irrigant penetrasyonu hem de smear/debris uzaklaştırma etkinliği açısından belirgin avantaj sağladığı; özellikle apikal için

anatomik zorlukları olan dişlerde dezenfeksiyon başarısını artırabilecek güvenilir bir seçenek olduğu sonucuna varılabilir.

5. MULTİSONİK İRRİGASYON TEKNOLOJİSİ (GENTLEWAVE SİSTEMİ)

GentleWave sistemi, irrigantı kök kanal sistemi içinde çoklu frekanslarda oluşturduğu geniş bant akustik dalgalar ve hidrodinamik kavitasyon yoluyla aktive eden multisonik bir irrigasyon teknolojisidir. Sistem, irrigantı multisonik akustik enerji ile aktive ederek kök kanalı boyunca yoğun kavitasyon ve hidrodinamik akım oluşturur; kavitasyon kabarcıklarının ani içe çökmesiyle (implozyon) meydana gelen akustik alan lateral kanallar, isthmuslar ve diğer kompleks anatomilere ulaşan etkili bir temizleme gücü sağlar.

GentleWave'in irrigantın apikal yönde ekstrüzyonuna neden olmadığını, aksine negatif basınç oluşturarak irrigant ekstrüzyonu riskini azalttığını göstermektedir. Sistem, biyofilm eliminasyonunda PUI'ye kıyasla daha yüksek oranda bakteri DNA'sı azaltımı sağlamıştır. Ayrıca NaOCl'nin dentin tübüllerine penetrasyon derinliği GentleWave ile ultrasonik sistemlere göre belirgin şekilde artmış, kalsifikasyonların, Ca(OH)_2 artıklarının ve pulpal dokunun uzaklaştırılmasında üstün performans göstermiştir. Mikro-CT çalışmalarında minimal preparasyonla bile yüksek kaliteli obtürasyon sağladığı; endodontik tedavilerde %97.3'e varan başarı oranı bildirilmiştir. GentleWave'in, özellikle minimal invaziv şekillendirme protokolleri ile birlikte kullanıldığında karmaşık dallanmaları, isthmus bölgelerini ve dentin tübüllerini etkili biçimde temizleyerek irrigasyonun kapsamını genişlettiği ortaya konmuştur (Coaguillera, Gaeta, ve Faria 2022).

6.XP-ENDO FİNİŞER VE MEKANİK AKTİVASYON SİSTEMLERİ

XP-Endo Finisher, termomekanik işlem görmüş nikel-titanyum alaşımından üretilmiş, kök kanal sisteminin üç boyutlu anatomisine uyum sağlayarak irrigantı mekanik olarak aktive etmeyi hedefleyen bir tamamlayıcı enstrümandır. Oda sıcaklığında düz forma yakın olan bu eğe, kanal içinde vücut ısısına ulaştığında şekil değiştirerek daha geniş bir "süpürme" hareketi yapar ve böylece standart şekillendirme sırasında alet temasının sınırlı olduğu reses ve isthmus bölgelerine irrigant taşınmasını kolaylaştırır.

Yapılan bir çalışmada (Elnaghy, Mandorah, ve Elsaka 2017), eğri kök kanallarında XP-Endo Finisher, EndoActivator'ü karşılaştırdıkları çalışmalarında, XP-Endo Finisher kullanılan grupta debris ve smear tabakası skorlarının diğer gruplara göre anlamlı derecede daha düşük olduğunu bildirmiştir.

Carvalho ve arkadaşları (2019) da XP-Endo Finisher'ın bakteriyel eliminasyona katkısını araştırmış ve irrigantla birlikte kullanıldığında mikrobiyal

yükü azaltabildiğini, ancak tüm vakalarda tek başına belirleyici olmadığını ifade etmiştir (Carvalho vd. 2019).

XP-Endo Finisher, özellikle oval ve kompleks kanallarda, standart şekillendirme sırasında aletin temas etmediği alanlarda irrigantın taşınmasına yardımcı olabilir; ancak her zaman ultrasonik veya sonik sistemlerden üstün değildir ve apikal için tamamen temizlenmesi için tek başına yeterli olmayabilir. Bu nedenle birçok çalışma, XP-Endo Finisher'ın en iyi etkinliği PUI veya sonik aktivasyonla kombine edildiğinde sağladığını vurgulamaktadır.

7.LAZER DESTEKLİ ENDODONTİK AKTİVASYON

Lazerle aktive edilmiş irrigasyon, irrigantın yalnızca pasif veya manuel yolla değil; lazer enerjisi aracılığıyla aktif olarak kanal içinde hareket ettirilmesi prensibine dayanır. Özellikle Photon-Induced Photoacoustic Streaming (PIPS) ve Shock Wave-Enhanced Emission Photoacoustic Streaming (SWEEPS) teknikleri ile, lazer ucu kanal girişinde konumlandırılır; irrigant sıvısı üzerine gelen lazer darbeleri, foto-akustik kaviteasyon ve mikroakış (acoustic streaming) oluşturarak, kanal duvarlarına, dentin tübüllerine ve lateral anatomik yapılara nüfuz eder. Bu sayede, konvansiyonel iğne irrigasyonu veya yalnızca mekanik şekillendirme ile ulaşılamayan alanlarda dahi etkin temizleme potansiyeli ortaya çıkar. PIPS ve SWEEPS teknikleri, Er:YAG lazerin 2940 nm dalga boyunun su molekülleri tarafından yüksek oranda absorbe edilmesi sayesinde güçlü fotoakustik aktivasyon üretir (Mancini vd. 2021).

Son yıllarda yapılan çalışmalar, PIPS ve SWEEPS uygulamalarının kök kanal duvarlarında debris ve smear tabakasını uzaklaştırma etkinliğini klasik irrigasyon yöntemlerine göre anlamlı biçimde artırdığını göstermektedir. Özellikle son in vitro çalışmalardan biri, multispecies biyofilmler üzerinde PIPS ve SWEEPS'in, pasif ultrasonik irrigasyon (PUI), sonik aktivasyon ve konvansiyonel iğne irrigasyonuna kıyasla biyofilm ve dentin tübüllerindeki mikrobiyal yükü en iyi azaltan yöntemler arasında olduğunu göstermiştir (Bao vd. 2024).

Ayrıca, bu lazer-aktive irrigasyon tekniklerinin yalnızca temizlik etkinliğinde değil, dezenfeksiyon açısından da avantaj sağladığı bildirilmektedir. Düşük konsantrasyonlardaki irrigantlarla bile (örneğin seyreltilmiş NaOCl) PIPS / SWEEPS ile yapılan irrigasyonun, bakteri yükünü düşürdüğü ve kimyasal + fiziksel etkinin birlikte çalıştığı mikrobiyal organizmaların uzaklaştırılmasında sinerjik etki oluşturduğu rapor edilmiştir (Lei vd. 2022).

Temizleme ve dezenfeksiyon etkinliğinin yanı sıra, lazerle aktive irrigasyonun bir diğer avantajı da apikal ekstrüzyon riskinin klasik basınçlı irrigasyon yöntemlerine kıyasla daha düşük olabilmesi ihtimalidir. Örneğin SWEEPS ile yapılan bir çalışmada irrigant ekstrüzyonunun anlamlı biçimde artmadığı bildirilmiştir (Bolhari vd. 2023).

Yakın tarihli derlemeler (2023–2024) gösteriyor ki lazer-aktif irrigasyon, ultrasonik aktivasyon ile karşılaştırıldığında çoğu çalışmada eşit ya da daha üstün temizlik ve dezenfeksiyon performansı sunmakta; bu da lazerin, modern endodontik protokollerde geçerli ve güvenilir bir alternatif olduğunu göstermektedir (Badami vd. t.y.).

Diğer bir güncel lazer teknolojisi olan Er,Cr:YSGG (2780 nm) sistemleri, kök kanal irrigasyonunun fotoakustik olarak aktive edilmesi amacıyla kullanılan önemli yöntemlerden biridir. Bu lazerlerin irrigant içinde oluşturduğu ani genişleme–çökme döngüleri, literatürde “mini-tsunami etkisi” olarak tanımlanan güçlü hidrodinamik akımlar meydana getirerek, irrigantın lateral kanallar, istmus ve dentin tübülleri gibi komplike anatomik bölgelere taşınmasını kolaylaştırır. İncelediğimiz vaka raporunda Waterlase iPlus cihazı ile yapılan uygulamada, bu fotoakustik aktivasyonun smear tabakasının uzaklaştırılması, bakterilerin elimine edilmesi ve intrakanal dezenfeksiyonun artırılması üzerinde belirgin etkileri olduğu bildirilmiştir. Lazer enerjisinin dentin içerisine 1000 µm’ye kadar nüfuz ederek *E. faecalis*’i %95 oranında elimine edebildiğini aktarmaktadır. Makalede bu etkinin özellikle RFT2 “radial firing tip” sayesinde çevresel enerji dağılımının artırılmasıyla ortaya çıktığı, ancak bu lazer yaklaşımının mekanik preparasyonun yerini almadığı; irrigasyon aktivasyonu ve final yıkama aşamasında tamamlayıcı bir teknik olarak kullanılması gerektiği vurgulanmaktadır (Hong ve Nguyen t.y.).

Güncel bir mikro-BT analiz çalışması, lazerle aktive irrigasyonun özellikle minimal preparasyon yapılan kök kanallarında obturasyon kalitesine etkisini daha net ortaya koymuştur. Mandibular kesici dişlerde Er,Cr:YSGG lazer aktivasyonunu sonik irrigasyonla karşılaştırmış ve lazer grubunda obturasyon sonrası “unfilled space” miktarının anlamlı şekilde daha düşük olduğunu bildirmiştir (lazer: 10.73 ± 7.10 ; sonik: 17.24 ± 4.52 ; $p=0.0436$). Mikro-BT görüntülemeleri, lazer aktivasyonunun özellikle isthmus ve yan kanal uzantıları gibi güç erişilen anatomik bölgelerde sealer penetrasyonunu artırdığını ve kök kanalının üç boyutlu dolgu bütünlüğünü iyileştirdiğini göstermiştir. Çalışma, bu etkinin Er,Cr:YSGG lazerin irrigant içinde oluşturduğu güçlü hidrodinamik akımlar sayesinde daha fazla debris mobilizasyonu ve irrigant yenilenmesi ile ilişkili olabileceğini vurgulamıştır. Bu bulgu, lazer destekli irrigasyonun yalnızca dezenfeksiyon açısından değil, aynı zamanda obturasyonun uzun dönem başarısı için kritik olan dolgu homojenliği üzerinde de belirgin bir iyileştirici etkisi olabileceğini göstermektedir (Yamaguchi vd. 2025).

SONUÇ

Endodontik irrigasyon protokolleri, kök kanal tedavisinin başarısında en az şekillendirme ve obturasyon kadar belirleyici bir role sahiptir. Geleneksel manuel irrigasyon, irrigantın kimyasal etkisine dayansa da, karmaşık kök kanal anatomilerinde yeterli penetrasyon sağlayamaması modern aktivasyon teknolojilerinin gelişmesine zemin hazırlamıştır. Bu doğrultuda sonik ve

ultrasonik aktivasyon teknikleri irrigantın kinetik enerjisini artırarak apikal bölgeye daha etkili ulaşım sunarken, negatif basınç sistemleri özellikle apikal ekstrüzyon riskini azaltmaları sayesinde güvenli irrigasyonun önemli bileşenleri hâline gelmiştir. Lazer teknolojilerinin endodontiye entegrasyonu ise irrigasyonun evriminde yeni bir aşamayı temsil etmektedir. Er:YAG tabanlı PIPS ve SWEEPS protokolleri, irrigant içinde yüksek enerjili fotoakustik şok dalgaları oluşturarak smear tabakasının ve biyofilmin uzaklaştırılmasında üstün performans göstermektedir. Buna paralel olarak Er,Cr:YSGG lazer sistemleri de (ör. Waterlase iPlus) irrigantın hidrodinamik aktivasyonunu artırarak minimal preparasyon ile uyumlu, etkili bir dezenfeksiyon ve irrigant yenilenmesi sağlamaktadır.

Güncel mikro-BT verilerinin, lazerle aktive irrigasyonun yalnızca temizlik aşamasını değil, aynı zamanda üç boyutlu obturasyonun kalitesini de iyileştirdiğini göstermesi bu teknolojilerin klinik değerini daha da artırmaktadır. Tüm yöntemler birlikte değerlendirildiğinde, modern endodontik irrigasyon yaklaşımı tek bir tekniğe dayalı değil; kimyasal etkinin, hidrodinamik aktivasyonun, güvenli irrigasyonun ve ileri teknolojilerin birbirini tamamladığı çok katmanlı bir protokoldür. Bu nedenle güncel literatür, irrigasyon başarısının artırılması için teknoloji destekli aktivasyon yöntemlerinin, özellikle karmaşık kanal anatomileri ve minimal invaziv preparasyon protokollerinde giderek daha önemli ve kanıta dayalı bir standart hâline geldiğini göstermektedir.

KAYNAKÇA

- Badami, Vijetha, Sneha Akarapu, Hemabhanu Kethineni, Satya Priya Mittapalli, Kasi Reddy Bala, ve Syeda Farha Fatima. t.y. “Efficacy of Laser-Activated Irrigation Versus Ultrasonic-Activated Irrigation: A Systematic Review”. *Cureus* 15(3):e36352. doi:10.7759/cureus.36352.
- Bao, Pingping, He Liu, Lan Yang, Lulu Zhang, Liwei Yang, Nannan Xiao, Jing Shen, Jiayin Deng, ve Ya Shen. 2024. “In Vitro Efficacy of Er:YAG Laser-Activated Irrigation Versus Passive Ultrasonic Irrigation and Sonic-Powered Irrigation for Treating Multispecies Biofilms in Artificial Grooves and Dentinal Tubules: An SEM and CLSM Study”. *BMC Oral Health* 24(1):261. doi:10.1186/s12903-024-04042-x.
- Bolhari, Behnam, Naghmeh Meraji, Rahim Seddighi, Negar Ebrahimi, ve Nasim Chiniforush. 2023. “Effect of SWEEPS and PIPS Techniques on Dye Extrusion in Photodynamic Therapy Procedure After Root Canal Preparation”. *Photodiagnosis and Photodynamic Therapy* 42:103345. doi:10.1016/j.pdpdt.2023.103345.
- Buldur, Burak, ve Arife Kapdan. 2017. “Comparison of the EndoVac System and Conventional Needle Irrigation on Removal of the Smear Layer in Primary Molar Root Canals”. *Nigerian Journal of Clinical Practice* 20(9). doi:10.4103/1119-3077.181351.
- Caron, Gregory, Khan Nham, Francois Bronnec, ve Pierre Machtou. 2010. “Effectiveness of Different Final Irrigant Activation Protocols on Smear Layer Removal in Curved Canals”. *Journal of Endodontics* 36(8):1361-66. doi:10.1016/j.joen.2010.03.037.
- Carvalho, Maria Cristina, Mario Luis Zuolo, Rodrigo Arruda-Vasconcelos, Ariane Cássia Salustiano Marinho, Lidiane Mendes Louzada, Priscila Amanda Francisco, Vanessa Galego Arias Pecorari, ve Brenda Paula Figueiredo de Almeida Gomes. 2019. “Effectiveness of XP-Endo Finisher in the Reduction of Bacterial Load in Oval-Shaped Root Canals”. *Brazilian Oral Research* 33:e021. doi:10.1590/1807-3107bor-2019.vol33.0021.
- Chu, Xiaojun, Shuting Feng, Weiqing Zhou, Shuaimei Xu, ve Xiongqun Zeng. 2023. “Cleaning Efficacy of EDDY Versus Ultrasonically-Activated Irrigation in Root Canals: A Systematic Review and Meta-Analysis”. *BMC Oral Health* 23(1):155. doi:10.1186/s12903-023-02875-6.
- Coaguila-Llerena, Hernán, Eduarda Gaeta, ve Gisele Faria. 2022. “Outcomes of the GentleWave System on Root Canal Treatment: A Narrative Review”. *Restorative Dentistry & Endodontics* 47(1). doi:10.5395/rde.2022.47.e11.
- Elnaghy, Amr M., Ayman Mandorah, ve Shaymaa E. Elsaka. 2017. “Effectiveness of XP-Endo Finisher, EndoActivator, and File Agitation on Debris and Smear

- Layer Removal in Curved Root Canals: A Comparative Study". *Odontology* 105(2):178-83. doi:10.1007/s10266-016-0251-8.
- Gomes, Brenda P. F. A., Emelly Aveiro, ve Anil Kishen. t.y. "Irrigants and Irrigation Activation Systems in Endodontics". *Brazilian Dental Journal* 34(4):1-33. doi:10.1590/0103-6440202305577.
- Gu, Li-sha, Jong Ryul Kim, Junqi Ling, Kyung Kyu Choi, David H. Pashley, ve Franklin R. Tay. 2009. "Review of Contemporary Irrigant Agitation Techniques and Devices". *Journal of Endodontics* 35(6):791-804. doi:10.1016/j.joen.2009.03.010.
- Guerreiro-Tanomaru, Juliane Maria, Gisselle Moraima Chávez-Andrade, Norberto Batista de Faria-Júnior, Evandro Watanabe, ve Mário Tanomaru-Filho. 2015. "Effect of Passive Ultrasonic Irrigation on Enterococcus Faecalis from Root Canals: An Ex Vivo Study". *Brazilian Dental Journal* 26:342-46. doi:https://doi.org/10.1590/0103-6440201300022.
- Güngördü, Zeynep Sena, Pelin Tufenkci, ve Merve Sarı. 2025. "The Effectiveness of Endoactivator, EDDY, Passive Ultrasonic Irrigation, and XP-Endo Finisher R in Removing Filling Materials from Retreated Root Canals". *BMC Oral Health* 25:1656. doi:10.1186/s12903-025-06877-4.
- Hong, Thanh An, ve Tuong Nguyen Nguyen. t.y. "A Laser-Assisted Non-Surgical Endodontic Treatment of a Mandibular First Molar with Two Distal Roots: A Case Report".
- Kandaswamy, Deivanayagam, ve Nagendrababu Venkateshbabu. 2010. "Root Canal Irrigants". *Journal of Conservative Dentistry: JCD* 13(4):256-64. doi:10.4103/0972-0707.73378.
- Lei, Lishan, Fang Wang, Yanhuang Wang, Yijun Li, ve Xiaojing Huang. 2022. "Laser Activated Irrigation with SWEEPS Modality Reduces Concentration of Sodium Hypochlorite in Root Canal Irrigation". *Photodiagnosis and Photodynamic Therapy* 39:102873. doi:10.1016/j.pdpdt.2022.102873.
- Mancini, Manuele, Loredana Cerroni, Pietro Palopoli, Giovanni Olivi, Matteo Olivi, Cristiano Buoni, ve Luigi Cianconi. 2021. "Evaluation of Smear Layer Removal from Conservatively Shaped Canals: Laser Activated Irrigation (PIPS and SWEEPS) Compared to Sonic and Passive Ultrasonic Activation—an Ex Vivo Study". *BMC Oral Health* 21:81. doi:10.1186/s12903-021-01427-0.
- Nair, P. N. R. 2004. "Pathogenesis of Apical Periodontitis and the Causes of Endodontic Failures". *Critical Reviews in Oral Biology and Medicine: An Official Publication of the American Association of Oral Biologists* 15(6):348-81. doi:10.1177/154411130401500604.

- Peters, Ove A. 2004. "Current Challenges and Concepts in the Preparation of Root Canal Systems: A Review". *Journal of Endodontics* 30(8):559-67. doi:10.1097/01.don.0000129039.59003.9d.
- Plotino, Gianluca, Teresa Cortese, Nicola M. Grande, Denise P. Leonardi, Gianni Di Giorgio, Luca Testarelli, ve Gianluca Gambarini. 2016. "New Technologies to Improve Root Canal Disinfection". *Brazilian Dental Journal* 27(1):3-8. doi:10.1590/0103-6440201600726.
- Rahman, Wan Nur Farhana Wan Abdul, Nurul Ain Ramlan, Nik Zarina Nik Mahmood, ve Ahmad Hussein Abdul Hamid. 2023. "Negative Pressure Irrigation Dynamics between Two Needle Designs Using Computational Fluid Dynamics". *The Open Dentistry Journal* 17(1):e187421062304122. doi:10.2174/18742106-v17-e230420-2022-161.
- Ricucci, Domenico, ve José F. Siqueira. 2010. "Biofilms and Apical Periodontitis: Study of Prevalence and Association with Clinical and Histopathologic Findings". *Journal of Endodontics* 36(8):1277-88. doi:10.1016/j.joen.2010.04.007.
- Siqueira Jr., José F., ve Isabela N. Rôças. 2022. "Present Status and Future Directions: Microbiology of Endodontic Infections". *International Endodontic Journal* 55(S3):512-30. doi:10.1111/iej.13677.
- van der Sluis, L. W. M., M. Versluis, M. K. Wu, ve P. R. Wesselink. 2007. "Passive Ultrasonic Irrigation of the Root Canal: A Review of the Literature". *International Endodontic Journal* 40(6):415-26. doi:10.1111/j.1365-2591.2007.01243.x.
- Virdee, Satnam Singh, Vahid Ravaghi, Josette Camilleri, Paul Cooper, ve Phillip Tomson. 2020. "Current Trends in Endodontic Irrigation Amongst General Dental Practitioners and Dental Schools Within the United Kingdom and Ireland: A Cross-Sectional Survey". *British Dental Journal*. doi:10.1038/s41415-020-1984-x.
- Yamaguchi, Megan, Ane Poly, Alexander Huynh, ve Poorya Jalali. 2025. "Impact of Laser and Sonic Activated Irrigation on Obturation Quality in Conservatively Prepared Mandibular Molars: A Micro-CT Analysis". *Clinical Oral Investigations* 29(7):344. doi:10.1007/s00784-025-06373-7.

BÖLÜM 4

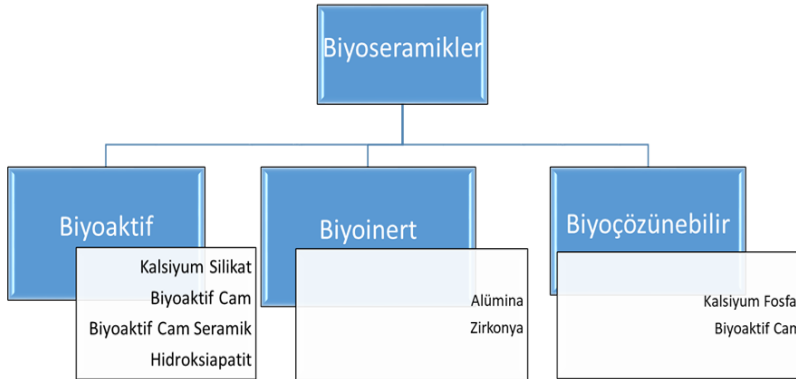
Endodontide Biyoseramikler ve Güncel Uygulamaları

İbrahim Uysal¹

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Dicle Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi Endodonti Anabilim Dalı,
ORCID: 0000-0002-2470-8906

Endodontik tedavilerde kullanılan biyoseramik esaslı kanal dolgu materyalleri üstün kimyasal ve mekanik özelliklere sahip olmalarının yanı sıra biyouyumlu olmaları kök kanal tedavilerinde kullanılan en popüler malzemelerden biri olmasını sağlamıştır. Tüm bu avantajlarına karşın biyoseramikler; uygulama sürelerinin nispeten kısa olması, nihai polimerizasyon sürecinin uzun olması, sınırlı antibakteriyel etkinliğe sahip olması, uygulama sonrası dişlerde renkleşmelere sebep olmasına bağlı olarak özellikle ön grup dişlerde karşılaşılabilen estetik sorunlara yol açabilmesi ve yüksek maliyetli bir materyal olması gibi çeşitli dezavantajlara da sahiptirler (1). Bu derlemede, klinisyenlere kanıta dayalı rehberlik sağlamak amacıyla biyoseramiklerin sızdırmazlık özellikleri, boyutsal stabilite, biyouyumluluk ve antibakteriyel özelliklerin yanı sıra materyale ulaşılabilme olanakları ve yapısal yeni gelişmeleri klinisyenlerin değerlendirmesine sunmak amaçlanmıştır.

Biyoseramik materyaller, alüminyum oksit, zirkonyum, biyoaktif cam, cam seramikler, hidroksiapatit, kalsiyum silikat ve emilebilir kalsiyum fosfat dahil olmak üzere biyouyumlu seramik malzemeler veya metal oksitlerden oluşmaktadır. Biyoseramikler, çevre dokularla tepkimelerine göre biyoetkisiz, biyoaktif ve biyoçözünür malzemeler olarak sınıflandırılabilir (Şekil-1) . Endodontide sıklıkla kullanılan biyoseramikler üstün fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip olan biyoaktif grubuna dahil olan kalsiyum silikat bazlı simanlardır (2). Bunlar kalsiyum silikat, biyoaktif cam, biyoaktif cam seramik ve hidroksiapatit kristallerini ihtiva eder (3). Bunların dışında biyoçözünebilir kalsiyum fosfatlar da dişhekimliğinde geniş kullanım alanına sahip biyoseramik materyallerdendir.



Şekil-1. Biyoseramiklerin sınıflandırılması

Kalsiyum Silikatlar

Endodontide uygulanan ilk biyoseramik materyal olan mineral trioksit agregatı (MTA), dişhekimliği alanında bu sınıfın en popüler materyali konumundadır. İlk olarak 1993 yılında diş hekimliğinde kök ucu dolgu materyali olarak tanıtılmış ve 1997 yılında Gıda ve İlaç Dairesi (FDA) tarafından onaylanmış olan MTA, portland çimentosu esas alınarak geliştirilmiş ve iyi biyouyumluluk ve sızdırmazlık yeteneklerinin yanı sıra gösterdiği yükselen pH özelliği sayesinde antibakteriyel etkinliğe de sahip olan bir materyal olarak piyasaya sürülmüştür (4). Buna karşın uzun sertleşme süresi ve estetik bölgedeki dişlerde renklenme gibi dezavantajların giderilmesi amacıyla içeriğindeki demir, magnezyum oksit ve alüminyum oranları azaltılarak daha estetik sonuçların elde edilebilmesi sağlanmıştır. Böylece biyoseramikler, apeksifikasyonun yanı sıra vital ve devital kök kanal tedavileri, kron-kök perforasyonları ve hatta rejeneratif endodontik tedavilerde dahil olmak üzere endodontide daha geniş bir klinik kullanım alanı kazanmıştır (5). Endosequence (Brasseler, Savannah, GA, ABD), Biodentine (Septodont, Saint-Maur-des-Fossés, Fransa) ve BioAggregate (Innovative Bioceramics, Vancouver, BC, Canada) gibi ürünler trikalsiyum ve dikalsiyum silikat da içeren, sıklıkla bu amaçlarla kullanılan biyoseramik esaslı materyallerdir.

Kalsiyum Fosfatlar

Amorf kalsiyum fosfatlar remineralize edici iyonları serbest bırakma ve açığa çıkmış dentin tübüllerini tıkayarak aşırı dentin duyarlılığını azaltma kabiliyetleri sayesinde diş hekimliğinde en çok kullanılan malzemelerden biridir. Trikalsiyum fosfat malzemeleri çoğunlukla sahip oldukları pürüzlü yüzeyleri sayesinde içinde kemik büyümesine izin veren osteokondüktif malzemeler gibi davranışları için apeksifikasyon tedavisinde sıklıkla kullanılmaktadırlar (6). Literatürde bazı çalışmalarda açık apeksli dişlerin kapatılması konusunda kalsiyum fosfatların kalsiyum hidroksitle benzer etkinlikte olduğunu gösteren çalışmalar olsa da (7,8) yapılan son çalışmalar biyoseramiklerin kalsiyum hidroksite oranla apeksifikasyon tedavisinde daha başarılı sonuçlar sergilediğini göstermektedir (9,10).

Kalsiyum fosfatlar sınıfında yer alan hidroksiapatit ise mine ve dentin dokularında bulunmasının yanı sıra kemikle de entegrasyonu kolaylaştırdığından dolayı geleneksel olarak kemik grefti ve dental implantlarda yüzey kaplama malzemesi olarak kullanılmaktadır (11,12). Hidroksiapatitin biyouyumluluk ve biyoaktivite özellikleri yanı sıra kaybolan minerallerin doğrudan yerine konmasını desteklemesi olumlu özellikleri arasında sayılabilmektedir (13). Hidroksiapatit endodontide ise pulpa kaplama, furkasyon perforasyonunun onarımı ve apikal bariyer oluşumu gibi endodontik tedavilerde klinik ve hayvan çalışmalarında kullanılmıştır (14-16).

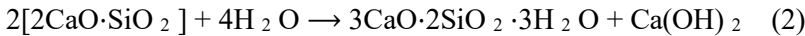
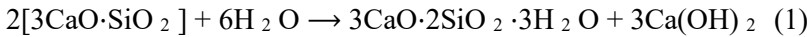
Biyoaktif Camlar

İlk biyoaktif cam, 1969 yılında Larry L. Hench tarafından üretilmiştir (17). Biyoaktif camlar silikat esaslıdır ve yapısı üç boyutlu silika ağlarından oluşmaktadır. Klinik uygulamalarda dokularla, özellikle kemiklerle güçlü kimyasal bağlar oluşturabilirler (18). Yüksek antimikrobiyal özellikleri ve biyouyumluluğu gibi özelliklere sahip olmaları, onları tıp ve diş hekimliğinin farklı alanlarında kullanılan faydalı biyomalzemeler haline getirmiştir (19). Long ve ark. gerçekleştirdikleri çalışmalarında Biyoaktif camların pulpa kapama uygulamalarında kullanıldıklarında MTA'ya oranla daha düşük düzeyde inflamatuvar cevap oluşturduğunu göstermiş ve biyoaktif camların yüksek potansiyele sahip bir kuafaj materyali olabileceğini belirtmiştir (20).

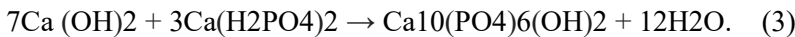
Endodontide Kullanılan Biyoseramiklerin Yapısal Özellikleri

Kalsiyum silikat ve kalsiyum fosfat bazlı biyoseramik malzemelerin fizikokimyasal özellikleri, kök kanal ortamındaki belirli gereksinimleri karşılayacak yeterliliğe sahiptirler. Öncelikle bu malzemelerin biyouyumluluk göstermeleri önemli bir özelliktir ve çevre dokularda olumsuz reaksiyonlara neden olmamasını sağlar. Ayrıca radyoopasiteye sahip olmaları, tedavi sırasında ve sonrası takip sırasında hassas radyografik görüntüleme ve değerlendirme sağlamak için gereklidir (21). Biyoseramiklerin sahip olduğu bir başka özellik olan kontrollü çözünürlük, antimikrobiyal özelliklere sahip kalsiyum ve silikat gibi faydalı iyonların kademeli olarak salınmasını tetikleyebilir ve mineralize doku oluşumunu destekleyebilir. Ancak bu özellik uzun vadede kök kanalındaki kanal dolgusunun yapısal bütünlüğünün kaybına yol açabilir (22). Bu durum, özellikle çözünürlük oranı çok hızlı olduğunda daha da belirginleşir. Endodontik biyoseramiklerin dayanıklılığı, uygun şekilde kontrol edilmezse olumsuz etkilenebilir ve bu da tedavinin etkinliğini olumsuz yönde etkileyebilir. Olası uzun vadeli sorunları azaltmak için, biyoseramiklerin bileşimini optimize etme stratejileri uygulanmıştır. Malzemenin yapısal stabilitesinden ödün vermeden iyonların faydalı salınımını kolaylaştıran kontrollü çözünürlüğe sahip biyoseramik simanların geliştirilmesi, giderek daha yüksek kaliteli ürünlerin ortaya çıkmasını sağlamıştır (23).

Kalsiyum silikatlar polimerizasyon sırasında ortamda su varlığında hidrasyon reaksiyonuna girerler. Bu reaksiyon:



şeklinde gerçekleşebilmektedir. Bu reaksiyonun ardından kalsiyum fosfat çökelme reaksiyonu oluşur:



Su molekülleri ve kalsiyum silikat parçacıkları arasındaki reaksiyonun ardından siman üzerinde bir kalsiyum silikat jel tabakası oluşur ve kalsiyum hidroksitle birleşerek polimerize kalsiyum silikat hidrata dönüşür ve bu yapı mekanik mukavemeti yüksek, güçlü bir özellik kazanır. Sertleşme süresinin 40-120 dakika arası bir zamanda oluşması kalsiyum silikatların en temel kullanım dezavantajlarından biridir (24).

Ayrıca ortamda yeterli miktarda su bulunmadığında süreç sekteye uğrayarak hacimsel büzülme miktarında artış olur. Bu durum, malzemenin zaman içinde çözünmesi hızlandırarak yapısal bozulmaya da neden olmaktadır (25).

Biyoseramiklerin Antibakteriyel Özellikleri

Kalsiyum silikatların sahip olduğu antibakteriyel özelliklerinin esas olarak artan pH'larına, kalsiyum iyon salınımına ve kalsiyum hidroksit oluşturmaya bağlı olduğu düşünülmektedir. (26). Immich ve ark. vital pulpa tedavisinde kullanılan biyoseramik materyallerinin antimikrobiyal özelliklerini inceledikleri çalışmalarında TheraCal LC, Bio-C Repair, Biodentine, Endosequence, MTA Angelus ve MTA ProRoot ürünlerinin hepsinin farklı oranlarda antimikrobiyal etkinliğe sahip olduğu sonucuna varmışlardır (27). Endodontide mevcut biyoseramiklerin geliştirilmesinde antibiyofilm özellikleri ile biyoyoumluluk arasında denge kurma konusu göz önünde bulundurulmaktadır.

Biyoseramiklerin Biyoaktivite ve Biyoyoumluluk Özellikleri

Endodontik uygulamalarda sıklıkla kullanılan kalsiyum silikat simanları, biyoyoumlulukları ve diş yapısı onarımını indükleme özellikleriyle tanınmaktadırlar. Biyoseramikler kök ucu dolgusu ve perforasyon onarımında kullanıldığında, materyal ile hücreler arasındaki etkileşim, iltihabı kontrol etmek ve yara onarımını desteklemek için kritik öneme sahiptir (1) . Özellikle kalsiyum silikat bazlı biyoseramikler başta olmak üzere biyoseramikler reçine bazlı simanlar gibi geleneksel malzemelerle karşılaştırıldığında, sürekli olarak daha olumlu biyoyoumluluk özelliklere sahip oldukları göstermiştir. Jing ve ark. çalışmalarında biyoseramik esaslı bir kanal patı olan iRoot SP (Innovative Bioceramik, Vancouver, BC, Canada) ile yapılan kanal tedavilerinde patın kanal dışına ekstrüzyonunun kök kanal tedavisinin sonucu üzerinde olumsuz bir etkisinin olmadığını ve bunun endodontik tedaviye katkıda bulunabileceğini göstermiştir (28).

Biyoseramik İnovasyonları

Biyoseramiklerin endodontide başlangıçta daha çok perforasyon tamiri ve apikal tıkaç oluşturulması için kullanılmaktaydı. Bununla birlikte, uzun sertleşme koşulları, özellikleri ve potansiyel renk bozulması daha yeni kalsiyum silikat bazlı kompozitlerin geliştirilmesine yol açtı (29).

Biyoseramikler primer kök kanal tedavisinde kemomekanik şekillendirme sonrası etkili bir obturasyon materyali olduğu bilinmektedir. Mükemmel ıslanabilirlikleri ve akışkanlıkları sayesinde kök kanal sistemindeki bütün anatomik varyasyonların üç boyutlu olarak doldurulmasını sağlayarak kanalı dış etkenlerden korumaktadır. Biyoseramikler kök ucu dolgu materyali olarak kullanıldıklarında biyouyumluluk ve apikal sızdırmazlık özellikleri sayesinde doku rejenerasyonunu uyararak periapikal patolojilerin iyileşmesine olanak sağlar. Ayrıca biyoseramikler pulpa dokusunu rejenerasyonunu teşvik etmeyi amaçlayan rejeneratif endodonti prosedürlerinde de sıklıkla kullanılmaktadır (30).

Biyoseramiklerin gelişimiyle ilgili önemli ilerlemelerden biri de nanopartiküllerin biyoseramiklerin formülasyonlarına dahil edilmesidir. Bu durum daha yüksek antibakteriyel etkinlik, biyouyumluluk, fiziksel mukavemet ve akışkanlık özelliklerine sahip olmalarına imkan vermiştir. Böylece kök kanal sistemine direkt olarak uygulanmasını sağlayan enjekte edilebilir bir forma sahip olmuşlardır. Enjekte edilebilir biyoseramiklerin daha çabuk ve ideal uygulanabilmesi sayesinde materyalin klinik performansı artırılmıştır (31).

Biyoseramik materyaller kök hücrelerin odontoblast benzeri hücrelere farklılaşmasını uyararak dentin dokusunun oluşumunu desteklemekte ve pulpanın revaskülarizasyonunu kolaylaştırmaktadır (32).

Biyoseramiklerin Kullanımıyla İlgili Mevcut Sınırlılıklar

Biyoseramik materyallerin endodontik kullanımında mevcut önemli avantajlara karşın bu materyallerin klinik kullanımlarında çeşitli zorluklar bulunmaktadır. Biyoseramik materyallerin uzun sertleşme süresine sahip olmasına bağlı klinisyenin bu materyalleri olarak geleneksel tedavi protokollerini modifiye ederek kullanmaları gerekmektedir. Ayrıca kullanımları sırasında acıcılıkları marka ve ortam şartlarına göre değişkenlik gösterebildiğinden kök kanal sisteminde sızdırmazlığı bozabilecek boşlukların oluşma riski bulunmaktadır (31).

Kanal tedavisinin yenilenmesi gerektiğinde, biyoseramik kanal patlarının dentine iyi yapışmaları sonucu kanaldan uzaklaştırılmalarıyla ilgili zorluklar yaşanabilmektedir. İlâveten biyoseramiklerin diğer kanal patlarına kıyasla daha pahalı olmaları da klinik kullanımları sırasında göz önünde bulundurulması gereken bir diğer husustur (33).

Biyoseramiklerin hidrofilik özelliğe sahip olması materyalin akışkanlığını artırması ve dolayısıyla mikromekanik kenetlenmeyi geliştirmesi olumlu bir durum olsa da kanal içinde standartize olmamış nem varlığı kanal patının kök dentinine uyumunu etkileyebilmektedir (34).

Kaynaklar

1. Dong, X., & Xu, X. (2023). Bioceramics in endodontics: Updates and future perspectives. *Bioengineering*, 10(3), 354.
2. Song, W., et al. (2021). In vitro biocompatibility and bioactivity of calcium silicate-based bioceramics in endodontics. *International Journal of Molecular Medicine*, 48(1), 128.
3. Dawood, A. E., et al. (2017). Calcium silicate-based cements: Composition, properties, and clinical applications. *Journal of Investigative and Clinical Dentistry*, 8(2), e12195.
4. Kot, K., et al. (2022). Alkalizing properties of six calcium-silicate endodontic biomaterials. *Materials*, 15(18), 6482.
5. Parirokh, M., & Torabinejad, M. (2010). Mineral trioxide aggregate: A comprehensive literature review—Part III: Clinical applications, drawbacks, and mechanism of action. *Journal of Endodontics*, 36(3), 400–413.
6. Metsger, D. S., Driskell, T. D., & Paulsrud, J. R. (1982). Tricalcium phosphate ceramic—a resorbable bone implant: Review and current status. *Journal of the American Dental Association*, 105(6), 1035–1038.
7. Koenigs, J. F., Heller, A. L., Brilliant, J. D., Melfi, R. C., & Driskell, T. D. (1975). Induced apical closure of permanent teeth in adult primates using a resorbable form of tricalcium phosphate ceramic. *Journal of Endodontics*, 1(3), 102–106.
8. Roberts, S. C., & Brilliant, J. D. (1975). Tricalcium phosphate as an adjunct to apical closure in pulpless permanent teeth. *Journal of Endodontics*, 1(8), 263–269.
9. Yadav, A., Chak, R. K., & Khanna, R. (2020). Comparative evaluation of mineral trioxide aggregate, biodentine, and calcium phosphate cement in single-visit apexification procedure for nonvital immature permanent teeth: A randomized controlled trial. *International Journal of Clinical Pediatric Dentistry*, 13(Suppl 1), S1.
10. Alyahya, S. A. S., et al. (2022). Comparison between calcium hydroxide and MTA when used for apexification: A systematic review. *Pharmacophore*, 13(2), 115–120.
11. Habibah, T. U., Amlani, D. V., & Brizuela, M. (2018). *Hydroxyapatite dental material*.
12. Tosan, F., et al. (2021). Effects of doping metal nanoparticles in hydroxyapatite in improving the physical and chemical properties of dental implants. *Nanomedicine Research Journal*, 6(4), 327–336.

13. Bordea, I. R., et al. (2020). Nano-hydroxyapatite use in dentistry: A systematic review. *Drug Metabolism Reviews*, 52(2), 319–332.
14. Chohayeb, A. A., Adrian, J. C., & Salamat, K. (1991). Pulpal response to tricalcium phosphate as a capping agent. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology*, 71(3), 343–345.
15. Pissiotis, E., & Spångberg, L. S. (1990). Biological evaluation of collagen gels containing calcium hydroxide and hydroxyapatite. *Journal of Endodontics*, 16(10), 468–473.
16. Singla, M., et al. (2018). Comparison of push-out bond strength of furcation perforation repair materials—Glass ionomer cement type II, hydroxyapatite, mineral trioxide aggregate, and biodentine: An in vitro study. *Contemporary Clinical Dentistry*, 9(3), 410–414.
17. Hench, L. L. (2006). The story of Bioglass®. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 17(11), 967–978.
18. Abbasi, Z., et al. (2015). Bioactive glasses in dentistry: A review. *Journal of Dental Biomaterials*, 2(1), 1–9.
19. Jafari, N., et al. (2022). Biyoaktif camların çeşitli diş hekimliği alanlarındaki uygulamaları. *Biyomalzeme Araştırması*, 26(1), 31.
20. Long, Y., et al. (2017). Evaluation of pulp response to novel bioactive glass pulp capping materials. *Journal of Endodontics*, 43(10), 1647–1650.
21. Jitaru, S., et al. (2016). The use of bioceramics in endodontics—Literature review. *Chujul Medical*, 89(4), 470.
22. de Souza, L. C., et al. (2023). Physicochemical and biological properties of AH Plus bioceramic. *Journal of Endodontics*, 49(1), 69–76.
23. Ramos, R. F., et al. (2025). Properties of bioceramic materials for endodontic use: A narrative review. *Brazilian Journal of Oral Sciences*, 24, e255144.
24. Eskandari, F., et al. (2022). An updated review on properties and indications of calcium silicate-based cements in endodontic therapy. *International Journal of Dentistry*, 2022, 6858088.
25. Torres, F. F. E., et al. (2021). A micro-computed tomographic study using a novel test model to assess the filling ability and volumetric changes of bioceramic root repair materials. *Restorative Dentistry & Endodontics*, 46(1).
26. Janini, A. C. P., et al. (2021). Antimicrobial activity of calcium silicate-based dental materials: A literature review. *Antibiotics*, 10(7), 865.
27. Immich, F., et al. (2024). Evaluation of antimicrobial properties, cell viability, and metalloproteinase activity of bioceramic endodontic materials used in vital pulp therapy. *Journal of Functional Biomaterials*, 15(3), 70.

28. Li, J., et al. (2022). Clinical outcome of bioceramic sealer iRoot SP extrusion in root canal treatment: A retrospective analysis. *Head & Face Medicine*, 18(1), 28.
29. Albernaz Neves, J., et al. (2025). Systematic review and meta-analysis of first and second generation bioceramic materials in primary dentition pulpotomies. *Scientific Reports*, 15(1), 16939.
30. Tomás-Catalá, C. J., et al. (2018). Biocompatibility of new pulp-capping materials NeoMTA Plus, MTA Repair HP, and Biodentine on human dental pulp stem cells. *Journal of Endodontics*, 44(1), 126–132.
31. Joshi, C. (2022). Bioceramic materials in endodontics: Innovations for root canal filling. In *Endodontics Beyond Basics: Navigating New Frontiers in Root Canal Therapy* (p. 20).
32. Chang, S.-W., et al. (2014). Effects of ProRoot MTA, Bioaggregate, and MicroMega MTA on odontoblastic differentiation in human dental pulp cells. *Journal of Endodontics*, 40(1), 113–118.
33. Donnermeyer, D., et al. (2018). Retreatability of three calcium silicate-containing sealers and one epoxy resin-based root canal sealer with four different root canal instruments. *Clinical Oral Investigations*, 22(2), 811–817.
34. Al-Haddad, A. Y., et al. (2017). The effect of moisture conditions on the constitution of two bioceramic-based root canal sealers. *Journal of Dental Sciences*, 12(4), 340–346.

BÖLÜM 5

Son İrrigasyon Protokollerinin Kalsiyum Silikat Esaslı Kanal Dolum Patı-Dentin Bağlantısına Etkisi

**Elif Güngörmez¹ & Kübra Yeşildal Yeter² &
Betül Güneş³**

¹ Arş. Gör. Dt., Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Diş Hekimliği Fakültesi, Endododonti Anabilim Dalı, Orcid: 0009-0006-0918-8304

² Doç. Dr., Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Diş Hekimliği Fakültesi, Endododonti Anabilim Dalı, Orcid: 0000-0002-7450-4119

³ Doç. Dr., Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Diş Hekimliği Fakültesi, Endododonti Anabilim Dalı, Orcid: 0000-0001-7070-3033

A. Giriş

Endodontik tedavi; dental pulpanın veya pulpaya ait artık dokuların uzaklaştırılması, kök kanal boşluğunun kemo-mekanik olarak hazırlanması ve sonrasında kanalın doldurulması aşamalarından oluşur (Tait, Camilleri, & Blundell, 2025). Geçmişte kök kanal sisteminin şekillendirilmesi ve dezenfeksiyonu büyük ölçüde mekanik enstrümantasyona dayandırılmış, irrigasyon ajanlarının rolü ise sınırlı görülmüştür (H Schilder, 1974). Ancak yapılan araştırmalar, mekanik enstrümantasyonla kök kanal duvarlarının tamamına ulaşamadığını ortaya koymuştur (Gergi et al., 2015; Peters, Schönenberger, & Laib, 2001). Bu nedenle mekanik şekillendirmeye ek olarak irrigasyon solüsyonlarının kullanımı klinik bir gereklilik hâline gelmiş ve irrigasyon, endodontik tedavinin ayrılmaz bir basamağı olarak kabul edilmiştir (Gomes, Aveiro, & Kishen, 2023; Peters et al., 2001).

Kök kanalının şekillendirilmesi sırasında dentin üzerinde vital ya da nekrotik pulpa kalıntıları, mikroorganizmalar, kan hücreleri ve dentin partiküllerinden oluşan ince, düzensiz ve amorf bir tabaka oluşur ve bu tabaka smear tabakası olarak adlandırılır (Czonstkowsky, Wilson, & Holstein, 1990). Şekillendirme esnasında erişilemeyen bölgelerde, özellikle isthmuslar, lateral kanallar veya oval şekilli kanallarda smear tabakasının birikimi daha belirgindir (Paqué, Laib, Gautschi, & Zehnder, 2009). Smear tabakasının varlığı, dentin tübül geçirgenliğini azaltarak, kanal duvarı ile kanal dolum patı arasındaki kimyasal ve/veya mekanik bağlanmayı olumsuz yönde etkileyebilir ve adeziv etkileşimi zayıflatabilir (Zehnder, 2006). Bu bağlamda, smear tabakasının uzaklaştırılması, kanal dolum patlarının dentin tübüllerine derinlemesine penetre olmasını destekleyerek, kök kanal sistemine daha etkin bir şekilde bağlanmasını sağlayabilir (Kara Tuncer & Tuncer, 2012).

Kök kanal dolgusunun temel amacı, kanal sistemi içerisinde mevcut enfeksiyonun veya yeniden enfeksiyonun önlenmesi için etkin bir sızdırmazlık sağlamaktır (Pinheiro et al., 2003). Kanal dolum patları, sahip oldukları fizikokimyasal özellikler sayesinde ana kanal ve yan dalların doldurulmasında önemli bir yere sahiptir (Piai et al., 2018). İdeal bir kanal dolum patı, dentin tübüllerine yeterli derecede penetre olmalı ve kanal duvarlarına yüksek bağlanma dayanımı göstermelidir (Nagas et al., 2012; Piai et al., 2018).

Endodontide kullanılmak üzere çinko oksit-öjenol esaslı, öjenolsüz çinko oksit esaslı, cam iyonomer esaslı, silikon esaslı, rezin esaslı (metakrilat ve epoksi reçine esaslı) ve kalsiyum hidroksit esaslı çeşitli kanal dolum patları geliştirilmiştir (Błaszczuk-Pośpiech et al., 2025).

B. Kalsiyum Silikat Esaslı Kanal Dolum Patları

Hidrolik çimentoların üstün sızdırmazlık özellikleri ve biyouyumluluklarından ilham alınarak da kalsiyum silikat esaslı yeni nesil kanal dolum patları geliştirilmiştir (Donnermeyer, Bürklein, Dammaschke, & Schäfer, 2019). Hidrolik çimentolar su ile temas ettiğinde hidratlanan ve çevresel sıvılarla etkileşime giren materyaller olup, inşaat sektöründe yüzyılı aşkın süredir farklı kimyasal yapılarla kullanılmaktadır. Bu grupta diş hekimliğinde ilk pazarlanan materyal mineral trioksit agregattır (MTA). Bu nedenle hidrolik çimentolar sıklıkla MTA veya MTA-benzeri materyaller olarak adlandırılmıştır. “Biyoseramik” terimi de kullanımda olmakla birlikte, materyalin kimyasal yapısını ve klinik davranışlarını tam olarak yansıtmadığı için “hidrolik” teriminin daha uygun olduğu belirtilmektedir (Camilleri, 2020).

Kalsiyum silikat ve/veya kalsiyum fosfat içeren biyoseramik esaslı kanal dolum patları; biyouyumlulukları, alkali pH değerleri, biyolojik ortamlarda kimyasal kararlılıkları ve boyutsal stabilite gibi fiziksel ve biyolojik avantajlarıyla dikkat çekmektedirler (Loushine et al., 2011). Ayrıca alkali pH'larının osteoklast kaynaklı laktik asidi nötralize edebildiği, dişin mineralize bileşenlerinin çözünmesini engellediği ve alkalen fosfatazi aktive ederek sert doku oluşumunu desteklediği bildirilmiştir (Chang, Lee, Kang, Kum, & Kim, 2014).

Bununla birlikte, kalsiyum silikat esaslı kanal dolum patlarının klinik uygulamalarında bazı dezavantajlar da rapor edilmiştir. Hidratasyona dayalı sertleşme mekanizması nedeniyle bu materyallerin su absorpsiyon eğilimi yüksektir ve sertleşme sürecindeki çözünürlük değerleri boyutsal stabilitenin azalmasına yol açabilir (Silva Almeida, Moraes, Morgental, & Pappen, 2017). Ayrıca su bazlı yapıları nedeniyle sıcak vertikal kondenzasyon gibi termoplastik dolum teknikleri, bu kanal dolum patlarının fiziksel özelliklerini olumsuz etkileyerek performans kaybına neden olabilir (Karam et al., 2024). Bununla birlikte, son yıllarda sıcaklık karşısında fiziksel ve kimyasal stabilitesini koruyabilen ve sıcak kanal dolum teknikleriyle uyumlu şekilde kullanılabilen yeni formülasyonlar geliştirilmiştir (Chen et al., 2020).

Sertleşmiş kalsiyum silikat esaslı kanal dolum patlarının uzaklaştırılması da klinik açıdan güçlük oluşturmaktadır; tekrar tedavi sırasında bu materyallerin geleneksel kanal dolum patlarına kıyasla kök kanalından daha zor çıkarılabildiği belirtilmiştir (Sfeir et al., 2021). Ayrıca bu materyallerin uzun dönem klinik başarısına ilişkin kanıtlar hâlen sınırlıdır ve daha kapsamlı prospektif çalışmalara ihtiyaç duyulduğu vurgulanmaktadır (Silva Almeida et al., 2017).

Endodontik tedavinin başarısı açısından, kanal dolum patının dentine olan bağlanma gücü önemli bir faktör olarak öne çıkmaktadır (B. S. Lee, Hsieh, Chi, Lan, & Lin, 2004). Bu bağlanma ilişkisinin anlaşılmasında adezyon ve kohezyon kavramları temel rol oynar. Kohezyon, benzer moleküller veya atomlar arasındaki çekim kuvvetlerini ifade ederken; adezyon, farklı materyallerin ara yüzeyinde gerçekleşen moleküler düzeydeki etkileşimleri kapsar. Diş hekimliğinde adezyon, adherent olan dentin ile adeziv görevi gören kanal dolum patı arasında oluşan karmaşık moleküler etkileşimleri içerir (Marshall, Bayne, Baier, Tomsia, & Marshall, 2010).

a. Kalsiyum Silikat Esaslı Materyallerin Dentine Bağlanma Mekanizması

Kalsiyum silikat esaslı kanal dolum patlarının dentine bağlanma mekanizması ise hem kimyasal hem de mikromekanik süreçlere dayanır. Hidrolik çimentolar temel alınarak geliştirilen bu patlar, hidrasyon ve doku sıvılarındaki fosfatlarla etkileşime girdiklerinde kalsiyum hidroksit [$\text{Ca}(\text{OH})_2$] salınımı yapar ve dentin yüzeyinde kalsiyum fosfat veya kalsiyum karbonat çökmesine neden olur (Prüllage, Urban, Schäfer, & Dammaschke, 2016; Sarkar, Caicedo, Ritwik, Moiseyeva, & Kawashima, 2005). Fosfatla temas sonrası materyalin yüzeyinde hidroksiapatit oluşumu da bildirilmiştir (Prüllage et al., 2016). Bu süreç, trikalsiyum ve dikalsiyum silikat içeren materyallerin biyoaktif potansiyelinin temelini oluşturur (Torabinejad, 2014).

Ayrıca, kalsiyum silikatlar dentin yüzeyinde “mineral infiltrasyon bölgesi” olarak adlandırılan bir ara yüz tabakası meydana getirir. Hidrasyon ürünlerinin alkali ve kostik etkileri, ara yüz dentinin kollajen yapısının parçalanmasına yol açarak yüksek konsantrasyonda Ca^{2+} , OH^- ve CO_3^{2-} iyonlarının geçişine izin veren gözenekli bir yapı oluşturur. Bu durum, bölgede artmış mineralizasyon ile sonuçlanır (Atmeh, Chong, Richard, Festy, & Watson, 2012; Watson, Atmeh, Sajini, Cook, & Festy, 2014). Ara yüz dentininde gelişen bu kimyasal etkileşim ve mikromekanik bağlantı, kalsiyum silikat esaslı kanal dolum patlarının dentine bağlanmasının temel nedenlerinden biri olarak kabul edilmektedir (Atmeh et al., 2012; Kaup, Dammann, Schäfer, & Dammaschke, 2015).

b. Kalsiyum Silikat Esaslı Materyallerin Dentine Bağlanma Mekanizmasına Son İrrigasyonun Etkisi

Kalsiyum silikat esaslı materyallerin dentine bağlanma mekanizması yanında, irrigasyon solüsyonlarının dentin substratının fiziksel ve kimyasal özelliklerini değiştirdiği (Hu, Ling, & Gao, 2010) bilinmekte olup; söz konusu değişiklikler kanal dolum patının dentine adezyonunu (Neelakantan, Subbarao, Subbarao, De-Deus, & Zehnder, 2011) ve dentin tübüllerine penetrasyonunu (Ozasir, Eren,

Gulsahi, & Ungor, 2021) doğrudan etkileyebilmektedir. Bu nedenle, kullanılan kanal dolum patının özellikleriyle uyumlu irrigasyon protokolünün seçilmesi klinik açıdan büyük önem taşımaktadır (Talita Tartari et al., 2023). Ancak tüm bu bilgi birikimine rağmen, güçlü ve kalıcı bir kanal dolum patı– dentin bağlantısının sağlanması günümüzde hâlâ önemli bir zorluk olarak değerlendirilmektedir (Retana-Lobo et al., 2021).

C. Son İrrigasyon

Dentini kanal dolumuna uygun hâle getirebilmek için final irrigasyon uygulanması, endodontik tedavinin temel basamaklarından biri olarak önemini korumaktadır. Bu son irrigasyon, kök kanal şekillendirmesi tamamlandıktan sonra dentin yüzeyindeki debris, smear tabakası ve mikroorganizma kalıntılarını uzaklaştırmaya yönelik son yıkama adımıdır. Kanal dolumu öncesindeki bu kritik aşamada kullanılan irrigasyon solüsyonlarının türü ve uygulama sırası, dentinin yüzey kimyasını doğrudan etkilemektedir (Talita Tartari et al., 2023; Torabinejad, Handysides, Khademi, & Bakland, 2002; Wagner et al., 2017). Ayrıca, kalsiyum silikat esaslı kanal dolum patlarının dentine bağlanma kapasitesi ile dentin tübüllerine penetrasyonunun smear tabakasının etkin şekilde uzaklaştırılmasıyla yakından ilişkili olduğu bildirilmiştir (Emekli, Kaptan, & Tanalp, 2025; Ozasir et al., 2021).

Son İrrigasyon Protokolleri	
Klasik Protokol	NaOCl→ EDTA NaOCl→ EDTA→ CHX/ NaOCl
Devamlı Şelasyon Protokolü	NaOCl + HEDP (1-hidroksi-etiliden-1,1-bifosfonat)
Asit Temelli Protokoller	NaOCl→ Maleik Asit / Sitrik Asit / Fitik Asit/ Glikolik Asit → Distile su
Kombine İrrigasyon Ajanlarını İçeren Protokoller	NaOCl→ QMix, SmearOFF 2-in-1, BioPure MTAD
Diğer	NaOCl→ Kitosan

Tablo 1: Son İrrigasyon Protokolleri

a. **Klasik Son İrrigasyon Protokolü**

Sodyum hipoklorit (NaOCl), kök kanal tedavisi sırasında kullanılan en yaygın irrigasyon solüsyonudur. Endodontide %1–5.25 değişen konsantrasyonlarda kullanılmaktadır (Duncan & El-Karim, 2025). Sodyum hipoklorit, biyofilm oluşturan bakterilere karşı etkinlik göstermektedir (Ruiz-Linares, Aguado-Pérez, Baca, Arias-Moliz, & Ferrer-Luque, 2017). Pulpa dokusu kalıntılarını çözebilme (Naenni, Thoma, & Zehnder, 2004), bakteriyel virülans faktörlerini (örneğin endotoksinler ve lipoteikoik asitler gibi) azaltma yeteneği (Hong et al., 2016) gibi biyolojik etkileri bulunmaktadır. Bir endodontik irrigasyon solüsyonu için diğer bilinen bileşiklerden daha fazla gereksinimi karşıladığı için en ideal solüsyon olarak görülmektedir (Zehnder, 2006).

Smear içinde bulunan organik doku NaOCl çözeltilerinin biyolojik etkisini, doku çözme kapasitesini sınırlar (Slutzky-Goldberg, Hanut, Matalon, Baev, & Slutzky, 2013). Organik artıklar, enflamatuvar eksüda, doku kalıntıları ve mikrobiyal biyokütlenin varlığı NaOCl'nin antibakteriyel etkisini zayıflatır. Bu sınırlamayı aşmak için taze solüsyonla sürekli irrigasyon ve temas süresinin arttırılması önerilir (Basrani & Haapasalo, 2012). İlginç bir şekilde, bazı çalışmalar NaOCl'nin dentinle uzun süreli temasının dentin üzerinde olumsuz etkileri olabileceğini göstermiştir. Yüzde 5.25 konsantrasyonundaki sodyum hipoklorit, dentinin eğilme dayanımını ve elastik modülünü azaltmaktadır. Bu da irrigasyon süresinin artırılmasının bir yandan biyofilmi elimine etmek için gerekli olduğunu, ancak diğer yandan dentine zarar verebileceğini göstermektedir (Prada et al., 2019; Sim, Knowles, Ng, Shelton, & Gulabivala, 2001). Bu nedenle, klinisyenlerin farklı irrigasyon solüsyonlarını kullanırken irrigasyon solüsyonlarının olumlu etkilerini artırırken olumsuz etkilerini en aza indirmeyi göz önünde bulundurmaları gerekir (Bettina R. Basrani; Gevik Malkhassian, 2021). Farklı irrigasyon protokolleri literatürde önerilmiştir. Bu protokoller, irrigasyon ajanlarının birbirleriyle olan kimyasal etkileşimlerini ve dentin üzerindeki biyolojik-mekanik etkilerini dikkate almalıdır. İrrigasyon ajanlarının kombinasyonlarında oluşabilecek olumlu veya olumsuz etkileşimler, klinik etkinliği doğrudan etkileyebileceğinden, bu konuda bilgi sahibi olmak oldukça önemlidir (Bettina R. Basrani; Gevik Malkhassian, 2021).

NaOCl her ne kadar birincil irrigasyon solüsyonu olarak tercih edilse de şekillendirme sırasında oluşan sert doku debrislerini veya smear tabakasının inorganik bileşenlerini çözemez. Bu nedenle, tamamlayıcı olarak bir şelasyon ajanının kullanılması gerekli kabul edilmektedir. Etilendiamintetraasetik asit (EDTA), bu amaçla en yaygın tercih edilen ajandır (Dutner, Mines, & Anderson, 2012; Willershausen et al., 2015). Disodyum tuzunun %15–17'lik çözeltisi nötr veya hafif alkali pH'a sahiptir (~7–8) ve güçlü bir şelatör olup kök kanalı

şekillendirmesinin sonunda uygulandığında hem sert doku debrislerini hem de smear tabakasını çözebilir (Çalt & Serper, 2002; De-Deus et al., 2008; Hülsmann, Heckendorff, & Lennon, 2003).

Bir araştırmada, yaklaşık 2 dakikalık EDTA uygulamasının smear tabakasının uzaklaştırılması için yeterli olduğu, ancak daha kalın smear tabakalarının varlığında bu sürenin artırılmasının gerekebileceği bildirilmiştir (Haapasalo, Shen, Wang, & Gao, 2014). Öte yandan, EDTA'nın yalnızca 1 dakika süreyle uygulanmasının dahi smear tabakasını tamamen ortadan kaldırabildiği, 10 dakikalık EDTA uygulaması sonrasında peritübüler ve intertübüler dentinin çözünmesiyle birlikte aşırı aşındırıcı etkiler ortaya çıktığı; buna bağlı olarak dentin yüzeyinde belirgin erozyon gözlemlendiği dolayısıyla dentin yapısının korunması açısından EDTA'nın uzun süreli kullanımından kaçınılması gerektiği de bildirilmiştir (Çalt & Serper, 2002).

EDTA ve NaOCl birlikte kullanıldığında, EDTA kalsiyum bağlama özelliğini sürdürse de NaOCl'nin doku çözme kapasitesi azalır. Bu nedenle bu iki irrigasyon solüsyonunun klinik olarak art arda fakat karıştırılmadan kullanılması önerilmektedir. EDTA uygulamasından sonra bol NaOCl ile yıkama yapılması önerilmektedir (Bettina R. Basrani; Gevik Malkhassian, 2021). Ancak bu sıralama, dentinde erozyon oluşturarak yapısal bütünlüğü zayıflatır ve vertikal kök kırıklarına zemin hazırlayabilir (Qian, Shen, & Haapasalo, 2011). Buna karşın, bu erozyon dentin yüzeyini daha pürüzlü hale getirerek, özellikle kanal dolum patları açısından bağlanmaya elverişli bir yüzey oluşturabilir (Craig Baumgartner & Mader, n.d.; Qian et al., 2011).

EDTA güçlü bir kalsiyum şelatlayıcıdır ve ortamda bulunan Ca^{2+} iyonlarını hızla bağlar. MTA veya diğer kalsiyum silikat esaslı patlar çözünmeye başladığında yapıdan serbest Ca^{2+} iyonları açığa çıkar. EDTA bu iyonları hızlıca Ca^{2+} -EDTA kompleksine dönüştürerek ortamdan uzaklaştırır. Bu durum, kalsiyum silikat hidrat matriksi oluşumu için gerekli olan serbest Ca^{2+} iyonlarının azalmasına neden olur ve sonucunda hidratasyon reaksiyonları kesintiye uğrar. Böylece hem kalsiyum silikat hidrat matriksi hem de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ oluşumu engellenir. Kanal dolum patının sertleşme, kristalleşme ve yapısal dayanım kazanma süreçleri zayıflar (Y. L. Lee et al., 2007; Nandini, Natanasabapathy, & Shivanna, 2010). Bu nedenle, kalsiyum silikat esaslı kanal dolum patları ile yapılacak dolum öncesinde son irrigasyon protokolünde şelasyon ajanı kullanımının uygun olup olmadığı tartışılmıştır (Tuncel et al., 2015; Zancan, Di Maio, Tomson, Duarte, & Camilleri, 2021)

Kalsiyum silikat esaslı kanal dolum patları, dentinle temas ettiklerinde Ca^{2+} iyonu alışverişine dayalı bir kimyasal bağlanma ve yüzey etkileşimi oluşturur (Y. L. Lee et al., 2007). Bu iyon salınımı ve karşılıklı mineral değişimi, smear

tabakası tamamen kaldırılrsa da kaldırılmasa da belirli düzeyde devam edebildiği için, bu materyallerle yapılan kanal dolumunda şelasyon ajanı kullanımının her durumda zorunlu olmayabileceği düşünülmektedir. Ancak daha net anlaşılabilmesi için bu konuda ek araştırmalar yapılması gerekmektedir (Zancan et al., 2021). Bunun aksine smear tabakası uzaklaştırılmasa dahi kalsiyum silikat kanal dolum patları etkileşimi devam etse de smear tabakasının kaldırılmasının bağlanma ve penetrasyonu arttırdığı bildirilmiştir (Alim Uysal et al., 2021; Emekli et al., 2025).

Üzerinde durulması gereken başka bir konu ise son irrigasyon aşamasında şelasyon ajanının ardından ek bir antimikrobiyal solüsyon (örn. NaOCl veya klorheksidin) kullanımıdır. Smear tabakası kaldırıldıktan sonra dentin tübüllerinde açığa çıkan mikroorganizmaların daha etkili şekilde elimine edilmesini ve kimyasal dezenfeksiyonun güçlendirilmesini amaçlayan, literatürde sıkça vurgulanan bir stratejidir. Bu yaklaşımın hem rezidüel biyofilmin azaltılması hem de kök kanal dolum patlarının bağlanma koşullarının iyileştirilmesi açısından faydalı olabileceği belirtilmiştir (Taşan & Özlek, 2024; Zehnder, 2006).

Farklı irrigasyon protokollerinin smear tabakasının uzaklaştırılması sonrası EndoSequence BC Sealer (Brasseler USA, Savannah, GA, USA) kanal dolum patının bağlanma dayanımı üzerindeki etkilerini değerlendiren çalışmada, dört ayrı protokol karşılaştırılmıştır: EDTA, EDTA/ NaOCl, EDTA/ %2 klorheksidin (CHX), EDTA/salin. Elde edilen sonuçlara göre, farklı irrigasyon protokollerinin uygulanmasına rağmen gruplar arasında bağlanma dayanımı açısından istatistiksel olarak anlamlı bir fark bulunamamıştır (Shokouhinejad, Hoseini, Gorjestani, & Shamshiri, 2013).

BioRoot RCS'nin (Septodont, Saint-Maur-des-Fossés, France) bağlanma dayanımını değerlendiren bir çalışmada, 17% EDTA + 2% CHX protokolü ile 17% EDTA/ 5.25% NaOCl protokolü arasında istatistiksel olarak anlamlı fark bulunamamış ve her iki protokol benzer bağlanma dayanımı göstermiştir (Srivastava, Yadav, Murali Rao, Arun, & Siddique, 2020).

EDTA, yüzey pürüzlülüğünü artırıp (Hu et al., 2010), kollajen fibrillerini açığa çıkararak bir demineralize dentin bölgesi oluşturmaktadır (T. Tartari, Bachmann, et al., 2018). Ancak, açığa çıkan kollajen matrisine yetersiz infiltrasyon olması, konak kaynaklı matriks metalloproteinazların (MMP) etkisiyle zamanla zayıf bir bağlanma yüzeyinin oluşmasına neden olabilir (Bourd-Boittin et al., 2005; Tay et al., 2006). Bu bağ ara yüzünü korumak için, EDTA sonrası CHX uygulaması ile MMP'lerin inhibisyonu önerilmiştir (Gendron, Grenier, Sorsa, & Mayrand, 1999).

Farklı son irrigasyon protokollerinin AH Plus (Dentsply DeTrey, Konstanz, Germany), EndoREZ (Ultradent Products Inc., South Jordan, UT, USA), Tech BioSealer Endo (Isasan S.r.l., Rovello Porro, Italy) kanala dolum patlarının dentin tübül penetrasyonlarını karşılaştıran bir çalışmada, son irrigasyon protokolüne %2 CHX eklenmesinin kanal dolum patlarının dentin tübüllerine penetrasyonunu artırdığı bildirilmiştir. %2 CHX, dentin mikrosertliğini azaltarak dentini daha yumuşak hâle getirmekte; bu durum, lateral kompaksiyon sırasında uygulanan basınçla patın tübüllere daha kolay nüfuz etmesini sağlayabilmektedir. Ayrıca CHX'nin, dentin matriksinde bulunan MMP'ı inhibe ederek matriksin stabilizasyonuna katkıda bulunabileceği rapor edilmiştir (Ozasir et al., 2021).

b. Devamlı Şelasyon Protokolü

Son yıllarda EDTA'ya alternatif olarak daha kontrollü ve daha az agresif şelasyon sağlayan yeni ajanlar araştırılmış ve bu ajanlardan biri de HEDP (1-hidroksi-etiliden-1,1-bifosfonat) olmuştur. HEDP, dentinde EDTA'ya göre daha yumuşak etki gösteren bir şelatör olup dentin duvarlarında minimal değişiklik oluşturmaya rağmen smear tabakasını azaltabilmektedir (Lottanti, Gautschi, Sener, & Zehnder, 2009). NaOCl ile birlikte karıştırılarak kullanılabilen bu ajan, hipokloritin proteolitik veya antimikrobiyal özelliklerini azaltmadan etki gösterebilmekte ve tedavi boyunca kullanılabilir. Bu kullanım şekli “devamlı şelasyon” olarak tanımlanmaktadır (Neelakantan et al., 2012; Zehnder, Schmidlin, Sener, & Waltimo, 2005). Ancak zayıf dekalsifikasyon sağlaması nedeniyle tek başına son irrigasyon ajanı olarak uygun olmadığı, ayrıca kalsiyumu bağlama kapasitesinin solüsyon konsantrasyonuna bağlı olabileceği bildirilmiştir (Zehnder, Schicht, Sener, & Schmidlin, 2005). EDTA'ya kıyasla dentin yüzeyinde daha az pürüzlülük oluşturan HEDP, bifosfonat yapısı nedeniyle yüzey serbest enerjisini artırarak dentin duvarlarının ıslanabilirliğini yükseltmekte; bu durum kanal dolum patının mikro düzensizliklere ve dentin tübüllerine daha iyi nüfuz etmesine katkı sağlamaktadır (Francis & Valent, 2007; T. Tartari, Wichnieski, et al., 2018).

EDTA ve HEDP'nin kalsiyum silikat esaslı kanal dolum patı olan WellRoot ST'nin (Vericom Co., Chuncheon, South Korea) dentine olan bağlanma dayanımlarını karşılaştıran bir çalışmada, şelasyon ajanları arasında anlamlı bir fark bulunamamıştır (Taşan & Özlek, 2024). Buna karşın, son irrigasyonda EDTA, NaOCl+HEDP ve yalnız NaOCl kullanılan bir başka çalışmada TotalFill BC Sealer (Brasseler USA, Savannah, GA, USA) kanal dolum patının bağlanma dayanımı açısından EDTA grubunda anlamlı olarak daha yüksek değerler gösterdiği bildirilmiştir (Sfeir, Bukiet, Hage, El Hachem, & Zogheib, 2023). Bağlanma dayanımını değerlendiren bir diğer çalışmada EndoSequence BC Sealer HiFlow (Brasseler USA, Savannah, GA, USA) ve AH Plus kanal dolum

patları; EDTA, NaOCl+HEDP, NaOCl+HEDP ve NaOCl protokolleri kullanılarak karşılaştırılmış; EDTA/AH Plus grubunda bağlanma dayanımı anlamlı derecede yüksek bulunmuştur. EndoSequence BC HiFlow kullanıldığında ise HEDP ve EDTA gruplarının benzer sonuçlar verdiği rapor edilmiştir. AH Plus ve EndoSequence BC HiFlow arasında anlamlı fark bulunmazken, smear tabakasının uzaklaştırılamamasına bağlı olarak yalnızca NaOCl grubunda bağlanma değerleri anlamlı derecede düşük bulunmuştur (Emekli et al., 2025).

Bu bulguların aksine; EDTA, HEDP, perasetik asit ve distile su ile son irrigasyonun uygulandığı ve bu solüsyonların AH Plus ile iRoot SP (Innovative BioCeramix Inc., Vancouver, BC, Canada) kanal dolum patlarının bağlanma dayanımını değerlendiren başka bir çalışmada, şelasyon ajanları ile distile su grubu arasında herhangi bir fark bulunamamıştır (Tuncel et al., 2015).

Devamlı şelasyon sırasında NaOCl konsantrasyonunun epoksi reçine esaslı AH Plus ve hidrolik kalsiyum silikat esaslı BioRoot RCS'nin bağlanma dayanımına etkisini inceleyen bir çalışmada salin, salin/%9 HEDP, %2.5 NaOCl, %5.25 NaOCl, %2.5 NaOCl/%9 HEDP ve %5.25 NaOCl/%9 HEDP protokolleri değerlendirilmiştir. Sonuçlar, AH Plus'ın en yüksek bağlanma dayanımını %2.5 NaOCl + HEDP grubunda, BioRoot RCS'nin ise en yüksek bağlanma değerlerini %5.25 NaOCl + HEDP grubunda gösterdiğini ortaya koymuştur. Ayrıca aynı çalışmada NaOCl konsantrasyonunun kök kanal duvarının Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi ile değerlendirilen organik içeriği üzerinde doza bağlı bir etkiye sahip olduğu ve bu etkinin her iki kanal dolum patının adezyon özelliklerini etkilediği belirtilmiştir (Ballal, Roy, & Zehnder, 2021).

Devamlı şelasyonun kalsiyum silikat esaslı TotalFill BC Sealer HiFlow (Brasseler USA, Savannah, GA, USA) kanal dolum patının dentin tübüllerine penetrasyonu üzerine etkisini inceleyen bir çalışmada, %5.25 NaOCl / %17 EDTA ile %5.25 NaOCl+ HEDP protokolleri karşılaştırılmış; penetrasyon yüzdesi ve maksimum penetrasyon derinliği açısından anlamlı bir fark bulunamamıştır. Bununla birlikte, sürekli şelasyon protokolünün koronal bölgede daha iyi penetrasyon sağladığı, EDTA protokolünün ise apikal bölgede daha etkin olduğu bildirilmiştir (Hassan & Roshdy, 2023).

Benzer şekilde, Well-Root ST kanal dolum patının üç farklı irrigasyon protokolü (%2.6 NaOCl, %9 HEDP + %2.6 NaOCl ve %2.6 NaOCl/ %17 EDTA) altında penetrasyonunun değerlendirildiği bir çalışmada, en yüksek penetrasyon derinliği ve alanı NaOCl + HEDP grubunda elde edilmiş; bunu NaOCl/ EDTA protokolü izlemiş, yalnızca NaOCl uygulanan grupta en düşük penetrasyon değerleri saptanmıştır. HEDP'nin hafif şelasyon etkisi sayesinde smear tabakası oluşumunu azaltması ve sert doku artıklarının birikmesini engellemesi, kanal

dolum patının dentin tübüllerine daha derin ve homojen şekilde penetre olmasını destekleyen bir mekanizma olarak belirtilmiştir (Gawdat & Bedier, 2022).

c. Asit Temelli Protokoller

NaOCl'nin inorganik içeriği uzaklaştırmadaki zayıf etkisi nedeniyle EDTA gibi alternatif asit temelli şelasyon ajanları son irrigasyon solüsyonu olarak kullanılmaktadır. Sitrik asit (SA), maleik asit (MA), fosforik asit bunlardan bazılarıdır (Baldasso, Roletto, da Silva, Morgental, & Kopper, 2017). NaOCl kullanımından sonra EDTA, MA ve SA ile son irrigasyonun kanal dolum patı penetrasyonunu etkilediği ancak aralarında anlamlı bir fark olmadığı görülmüştür (Kara Tuncer & Tuncer, 2012).

1. Sitrik Asit

Sitrik asit (SA), %1–40 arasında değişen konsantrasyonlarda endodontik uygulamalarda kullanılan bir şelasyon ajanıdır. Kök kanal tedavisinde yardımcı irrigasyon solüsyonu olarak en yaygın kullanılan formu %10'luk çözeltisidir. Yüzde 10 SA'nın smear tabakasının uzaklaştırılmasında son irrigasyon ajanı olarak etkili sonuçlar verdiği gösterilmiş ve bu konsantrasyondaki SA'nın benzer konsantrasyondaki EDTA'ya kıyasla daha üstün olduğunu ortaya koyulmuştur (Machado-Silveiro, González-López, & González-Rodríguez, 2004), ancak iki ajan arasında anlamlı bir fark bulamayan çalışmalar da literatürde bulunmaktadır (Machado et al., 2018; Sreedev et al., 2020).

EDTA, SA ve HEDP'nin WellRoot ST kanal dolum patının dentine olan bağlanma dayanımını karşılaştıran bir çalışmada da, şelasyon ajanları arasında anlamlı bir fark bulunmamıştır (Taşan & Özlek, 2024).

Bio-C Sealer (Angelus, Londrina, PR, Brazil) kanal dolum patı kullanılarak yapılan konfokal lazer mikroskopisi analizinde ise, devamlı ve ardışık şelasyon protokollerinin dentin tübüllerine penetrasyon üzerine etkisi karşılaştırılmıştır. Son irrigasyonda EDTA, NaOCl + HEDP ile devamlı şelasyon ve sitrik asit protokolleri uygulanmıştır. Bulgular, devamlı şelasyon protokolünün (NaOCl + HEDP) koronal, orta ve apikal bölgelerin tamamında anlamlı derecede daha yüksek dentin tübül penetrasyonu sağladığını göstermiştir. Ayrıca sitrik asit grubunun EDTA'ya kıyasla anlamlı ölçüde daha yüksek penetrasyon değerleri oluşturduğu; EDTA'nın ise üç protokol arasında en düşük penetrasyonu sergilediği bildirilmiştir (Gupta, Shetty, Tandale, Srikurmam, & Nihalani, 2024).

2. Maleik asit

Maleik asit (MA), organik bir di-karboksilik asit olup smear tabakasının uzaklaştırılması ve dentin tübüllerinin açılması amacıyla kullanılan bir şelasyon ajanıdır. Genellikle %1–7 konsantrasyonlarda ve yaklaşık 1 dakika süreyle

uygulanır; daha uzun uygulamalarda dentin erozyonu oluşturabileceği bildirilmiştir. EDTA'ya alternatif bir son irrigasyon ajanı olarak kullanılabileceği çeşitli çalışmalarda vurgulanmıştır (Kuruville et al., 2015).

AH Plus, MTA Fillapex (Angelus, Londrina, PR, Brazil), EndoSequence BC kanal dolum patlarının dentin tübüllerine penetrasyonunu değerlendiren bir çalışmada, salin (kontrol grubu), %17 EDTA, %7 MA ve %2.5 NaOCl + %9 HEDP protokolleri karşılaştırılmış ve tüm şelasyon solüsyonlarının kontrol grubuna kıyasla daha yüksek penetrasyon sağladığı rapor edilmiştir (Alim Uysal et al., 2021). Bölgesel değerlendirmede, apikal bölgede en yüksek penetrasyon MA grubunda gözlenmiş; orta ve koronal bölgelerde EDTA ve HEDP gruplarının benzer sonuçlar verdiği bildirilmiştir. Nitekim önceki bir çalışmada da %7 MA'nın apikal smear tabakasını uzaklaştırmada %17 EDTA ve %18 HEDP'ye kıyasla daha etkili olduğu gösterilmiştir (Kuruville et al., 2015). Bu üstün etkinlik, MA'nın yüksek asiditesi ve EDTA'ya göre daha kısa sürede daha güçlü bir demineralizasyon oluşturmasıyla açıklanmaktadır (Ballal, Kandian, Mala, Bhat, & Acharya, 2009).

BioRoot RCS kanal dolum patının dentin tübüllerine penetrasyonunu inceleyen konfokal lazer taramalı mikroskopisi çalışmasında da benzer şekilde %17 EDTA, %10 sitrik asit (SA) ve %7 MA'nın salin kullanılan kontrol grubuna kıyasla penetrasyonu artırdığı belirtilmiştir. Koronal bölgede EDTA en yüksek penetrasyonu oluştursa da istatistiksel olarak anlamlı fark gözlenmemiştir; orta ve apikal bölgelerde ise SA ve özellikle MA'nın anlamlı ölçüde daha yüksek penetrasyon sağladığı saptanmıştır (Shekhar, Mallya, Ballal, & Shenoy, 2023). MA'nın güçlü asidik karakteri (pH 1–1.5) (Ballal et al., 2009), yoğun mineral içerikli ve sklerotik özellikte olan apikal dentinin hem intertübüler hem de peritübüler yapılarında hızlı ve etkili demineralizasyon oluşturmasını sağlar. Sklerotik yapıdaki apikal bölgeye ulaşılmasının güç olması, bu bölgenin daha yüksek mineralizasyon ve daralmış tübül yapısı ile ilişkilidir (Hulsmann, Peters, & Dummer, 2005). MA'nın yüksek asiditesi bu bariyeri aşmada avantaj oluşturur. Ayrıca %7 MA'nın yüzey gerilimi EDTA'ya göre belirgin şekilde daha düşüktür; bu özellik irrigasyon solüsyonunun dar, kompleks ve sklerotik tübüllere daha etkin şekilde nüfuz etmesine olanak tanır. Bu nedenle MA, özellikle apikal bölgede smear tabakası uzaklaştırma ve dentin tübülü penetrasyonu açısından daha avantajlı bir şelasyon ajanı olarak değerlendirilmektedir (Alim Uysal et al., 2021).

3. Paresetik Asit

Perasetik asit (PAA), asetik asit ile hidrojen peroksitin reaksiyonu sonucu oluşan güçlü bir oksidan ve dezenfektandır. %1 konsantrasyondaki PAA, düşük derişimlerde bile antimikrobiyal etkinliğini koruması ve smear tabakasını dentin

yapısında belirgin bir değişikliğe yol açmadan uzaklaştırabilmesi nedeniyle endodontide son irrigasyon ajanı olarak dikkat çekmektedir. Bununla birlikte, daha yüksek konsantrasyonlarda dentin sertliğinde anlamlı azalma oluşturabileceği bildirilmiştir. %1 PAA'nın şelasyon kapasitesi, dentin kalsiyumu üzerindeki etkisi bakımından %17 EDTA'ya kıyasla daha zayıftır (Gaddala, Veeramachineni, & Tummala, 2015; Lottanti et al., 2009).

BioRoot RCS ile doldurulmuş kanallarda üç farklı şelasyon ajanının gutta perkanın bağlanma dayanımı üzerine etkisini değerlendiren diğer bir çalışmada en düşük bağlanma dayanımı %17 EDTA grubunda elde edilmiş olup, EDTA ile PAA arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark bulunmamıştır. PAA'nın asidik yapısı, çözeltide açığa çıkan kalsiyum iyonlarının yeniden çökmesini engelleyerek dentin yüzeyinde daha homojen bir demineralizasyon sağlamaktadır. Bu özellik, PAA'nın şelasyon etkinliğinin %17 EDTA'ya yakın olmasını açıklamaktadır. Elde edilen bağlanma dayanımı sonuçları değerlendirildiğinde, PAA'nın EDTA'ya klinik açıdan uygulanabilir bir alternatif olabileceği öne sürülmektedir (Agarwal, Raghu, Shetty, Gautham, & Souparnika, 2019).

4. Glikolik Asit

Glikolik asit (GA), diğer adıyla hidroksietanoik asit, suda yüksek çözünürlüğe sahip, renksiz ve kokusuz bir irrigasyon ajanı olup alfa hidroksi asitler sınıfına dahildir (Thibault, Wlodarczyk, & Wenck, 1998). pH'sının yaklaşık 2,0 olması, onu EDTA (pH $\approx$ 7) ve malik asitten (pH $\approx$ 4) çok daha asidik bir ajan hâline getirir. GA'nın etkisinin serbest radikallerin uzaklaştırılmasına dayandığı ve kollajen liflerinin oluşumunu indüklediği belirtilmiştir. Ayrıca EDTA ve SA gibi ajanlara benzer şekilde smear tabakasının uzaklaştırılmasında etkilidir. (Kakudo, Kushida, Suzuki, & Kusumoto, 2013) GA'nın EDTA'ya göre daha az sitotoksik olduğu bildirilmiş olup kök kanal tedavilerinde alternatif bir son irrigasyon solüsyonu olarak önerilmektedir (Bello et al., 2019).

Bio-C ve Dia-ProSeal (DiaDent Group International, Cheongju, South Korea) kanal dolum patlarının kullanıldığı bir çalışmada, son irrigasyon olarak %5 GA, %17 GA, %0,2 kitosan, %17 EDTA ve %0,9 salin uygulanmıştır. En yüksek bağlanma dayanımı, kanalların GA ile yıkandığı gruplarda gözlenmiştir (Veeramachineni, Aravelli, & Dundigalla, 2022). Yüzde 5 ve %17 konsantrasyonlarda GA'nın EDTA ve sitrik asitle karşılaştırılabilir düzeyde smear tabakasını uzaklaştırabildiği görülmüştür. Bu durumun, GA'nın düşük pH'sı nedeniyle dentinde daha belirgin demineralizasyon oluşturarak yüzey pürüzlülüğünü artırmasıyla ilişkilendirilebileceği belirtilmiştir (Bello et al., 2019). Yüzde 5 ile %17 GA arasında görülen bağlanma dayanımı farkı istatistiksel olarak anlamlı olmasa da yüksek konsantrasyonun dentin kolajen

yapısında daha fazla hasara neden olarak adezyonu olumsuz etkileyebileceği düşünüldüğünden çalışmada %5 GA önerilmiştir (Veeramachaneni et al., 2022).

5. Fitik Asit

Kimyasal olarak inositol hekza-fosfat (IP6) adıyla bilinen fitik asit, bitkilerde özellikle tahıllar, baklagiller ve yağlı tohumlarda yüksek konsantrasyonda bulunan doğal bir organik asittir. Endodontide kullanım amacı, kök kanal tedavisi sırasında smear tabakasının uzaklaştırılması ve dentin tübüllerinin açılarak kanal dolum patı penetrasyonunun artırılmasıdır. Molekül yapısında çok sayıda fosfat ($-PO_4$) grubu bulunduğundan yüksek negatif yüke sahiptir. Bu özellik, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} ve Zn^{2+} gibi katyonlarla güçlü şekilde kompleks oluşturmaya olanak sağlar ve fitik asidi etkili bir doğal şelasyon ajanı hâline getirir (Nassar et al., 2015).

Yüzde 1 fitik asit ve %17 EDTA uygulamalarının iki farklı kanal dolum patının (AH Plus, EndoSequence BC kanal dolum patları) dentin tübüllerine penetrasyonunu değerlendiren bir çalışmadaki bulgulara göre EDTA grupları en yüksek penetrasyon değerini göstermiş, dentin yüzeyini daha etkin şekilde demineralize ettiği için kanal dolum patı penetrasyonunu belirgin biçimde artırmıştır. Fitik asit ise orta düzeyde etkili bulunmuş, ancak EDTA kadar güçlü bir şelasyon sağlamamıştır (Eskander, Genena, Zaazou, & Moussa, 2021).

6. Elma Sirkesi (Malik Asit)

Elma sirkesinin smear tabakasını etkili bir şekilde uzaklaştırdığı bildirilmiştir (Zandim, Corrêa, Sampaio, & Rossa Júnior, 2004). Yüksek biyouyumluluğu, içerdiği zengin malik asit konsantrasyonuna bağlanmaktadır (Caligiani, Acquotti, Palla, & Bocchi, 2007). Ayrıca, elma sirkesinin endodontide sık karşılaşılan mikroorganizmalara karşı belirgin antimikrobiyal aktivite gösterdiği de rapor edilmiştir (Estrela, Holland, Bernabé, De Souza, & Estrela, 2004).

Uygulanan farklı son irrigasyon solüsyonlarının (%17 glikolik asit, %5 elma sirkesi, %17 EDTA ve salin) biyoseramik esaslı kanal dolum patları EndoSequence BC ve Cerafill RCS'nin (Prevest DenPro, Jammu, India) bağlanma dayanımlarına etkisini değerlendiren bir çalışmada, kanal dolum patı türüne bağlı olarak irrigasyon protokollerinin bağlanma dayanımını anlamlı şekilde değiştirebileceği gösterilmektedir. EndoSequence BC kanal dolum patı grubunda en yüksek bağlanma dayanımı elma sirkesi ile elde edilmiş olup, bunu EDTA takip etmiş ve iki grup arasındaki fark istatistiksel olarak anlamlı bulunamamıştır. Elma sirkesinin içerdiği H^+ iyonlarının şelatlama kapasitesi sayesinde smear tabakasını etkin şekilde uzaklaştırması, dentinal tübülleri açığa çıkararak kanal dolum patının mekanik ve kimyasal bağlanmasını desteklediği düşünülmektedir. Cerafill BC kanal dolum patı kullanıldığında ise EDTA en

yüksek bağlanma dayanımını göstermiş, elma sirkesi ikinci sırada yer almıştır. Bu sonuçlar, elma sirkesinin biyoseramik kanal dolum patlarıyla uyumlu, EDTA'ya alternatif bir son irrigasyon ajanı olarak değerlendirilebileceğini ortaya koymaktadır (Veeramachaneni et al., 2022).

d. Kombine İrrigasyon Ajanlarını İçeren Protokoller

Kök kanal tedavisinde kullanılan kombine irrigasyon solüsyonları QMix 2in1 (Dentsply Sirona, York, PA, USA), SmearClear (SybronEndo, Orange, CA, USA) ve MTAD (Dentsply Sirona, York, PA, USA); şelasyon bileşenleri ile antimikrobiyal ajanları tek bir formülasyonda bir araya getirerek smear tabakasının uzaklaştırılmasını, dentin tübüllerinin açılmasını ve dentin yüzeyinin hazırlanması ile birlikte mikrobiyal dezenfeksiyonun eşzamanlı olarak sağlanmasını amaçlayan irrigasyon seçenekleridir (Nogo-Živanović, Kanjevac, Bjelović, Ristić, & Tanasković, 2019).

QMix 2in1, antimikrobiyal etkisi ve smear tabakasını etkin şekilde uzaklaştırma yeteneği nedeniyle literatürde yaygın olarak tanımlanan kombine bir irrigasyon ajanıdır. İçeriğinde EDTA, CHX, deterjan ve deiyonize su bulunur (Ma, Wang, Shen, & Haapasalo, 2011). Üretici firma, QMix'in %17 EDTA'nın yerine kullanılabilecek bir son irrigasyon solüsyonu olarak geliştirildiğini ve etkinlik için 60–90 saniyelik bir temas süresiyle uygulanmasını önermektedir.

EndoSequence BC kanal dolum patı kullanılarak uygulanan farklı son irrigasyon protokolleri (%2.5 NaOCl, %17 EDTA, %2 CHX ve QMix 2in1) karşılaştırılmış ve QMix grubunun anlamlı derecede en yüksek bağlanma dayanımı değerlerini gösterdiği bildirilmiştir (Gundogar, Sezgin, Erkan, & Ozyilmaz, 2019). QMix'in smear tabakasını uzaklaştırma etkinliğinin %17 EDTA ile karşılaştırılabilir olduğu (Dai et al., 2011), buna ek olarak EDTA ve CHX uygulamalarında görülebilen bazı olumsuzlukları ortadan kaldırdığı ve kök kanalında kalan NaOCl ile reaksiyona girmediği belirtilmektedir (Aranda-Garcia et al., 2013).

TotalFill BC kanal dolum patı kullanılarak %17 EDTA, QMix ve kitosan nanopartiküllerinin dentin tübül penetrasyonu üzerindeki etkilerini konfokal lazer mikroskopisi ile değerlendiren bir çalışmada hem %17 EDTA hem de QMix, smear tabakasını etkin biçimde uzaklaştırmıştır ve bu iki solüsyon arasında anlamlı bir fark bulunamamıştır (Aydın, Özyürek, Keskin, & Baran, 2019).

e. Diğer

Kitosan

Kitosan, kabuklu deniz hayvanlarının dış iskeletlerinde bulunan kitinin alkali deasetilasyonu ile elde edilen, toksik olmayan katyonik bir biyopolimerdir (Sinha

et al., 2004). Biyouyumluluğu, biyolojik olarak parçalanabilirliği, biyoadeziv özellikleri, düşük toksisite profili, geniş spektrumlu antimikrobiyal etkileri ve şelat oluşturma kapasitesi sayesinde diş hekimliğinde farklı kullanım alanları sunmaktadır (Dasilva, Finer, Friedman, Basrani, & Kishen, 2013; Roshdy, Kataia, & Helmy, 2019).

Kitosanın dentin kollajenine güçlü şekilde bağlanmasının, açığa çıkmış ve demineralize olmuş dentin dokusunun yeniden mineralizasyonunu desteklediği düşünülmektedir. Bunun nedeni, kitosanın fonksiyonel fosfat gruplarının kalsiyum iyonlarına bağlanarak mineral kristallerinin oluşumu için uygun bir yüzey sağlaması ve böylece kalsiyum fosfat tabakasının oluşumunu kolaylaştırmasıdır (Xu, Neoh, Lin, & Kishen, 2011). Ayrıca kitosan uygulamasının, dentin yüzeyini kollajenaz kaynaklı yıkıma karşı daha dirençli hâle getirdiği bildirilmiştir (Shrestha, Friedman, & Kishen, 2011). Dentin erozyonuna yol açmadan smear tabakasını uzaklaştırdığı ve dentin tübüllerini açtığı gösterilmiştir (Silva, Guedes, Pécora, & da Cruz-Filho, 2012). Bu özellikleri nedeniyle, toksik etkileri bilinen EDTA'ya alternatif bir irrigasyon ajanı olarak önerilmektedir (Spanó et al., 2009).

BioRoot RCS ile doldurulan kök kanallarında üç farklı şelasyon ajanının (%0,2 kitosan, %17 EDTA ve %1 PAA) bağlanma dayanımı üzerindeki etkisinin değerlendirildiği bir çalışmada en yüksek bağlanma dayanımı %0,2 kitosan grubunda elde edilirken, en düşük değer %17 EDTA grubunda rapor edilmiştir. Bu sonuçların, %0,2 kitosanın, %17 EDTA'nın belirgin dekalsifiye edici etkisine neden olmadan smear tabakasını uzaklaştırabilme avantajına sahip olmasıyla açıklanabileceği ifade edilmiştir. Kitosan, kök dentinine adsorbe olabilen ve dentin tübüllerine daha derin nüfuz edebilen hidrofilik bir polimerdir; bünyesindeki serbest hidroksil ve amino grupları nedeniyle katyonik özellik gösterir ve dentindeki kalsiyum iyonlarıyla iyonik etkileşime girerek kanal dolum patının bağlanmasını destekleyen daha uygun bir yüzey oluşturur. Bu mekanizmalar, kitosan grubunda gözlenen daha yüksek bağlanma dayanımı değerlerini açıklayabilir (Agarwal et al., 2019).

TotalFill BC kanal dolum patı kullanılarak %17 EDTA, QMix ve kitosan nanopartiküllerinin dentin tübülü penetrasyonu üzerindeki etkileri konfokal lazer mikroskopisi ile değerlendirilmiştir. Kitosan nanopartikül grubunda dentin tübülü penetrasyonu diğer iki gruba kıyasla belirgin derecede daha düşük çıkmıştır; bu sonuç, kitosan nanopartiküllerin smear tabakasını kaldırma kapasitesinin sınırlı olmasına bağlanmaktadır. Bununla birlikte, kitosan nanopartiküller antimikrobiyal etkileri, biyouyumlulukları ve dentinle etkileşim özellikleri nedeniyle endodontide gelecekte kullanılabilecek alternatif irrigasyon ajanları arasında değerlendirilmektedir (Aydın et al., 2019).

D. Endodontide Kolajen Çapraz Bağlayıcı Ajanlar

Kolajen çapraz bağlayıcı ajanlar, kolajen fibrillerin yıkımını engelleyerek dentin substratının fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerini iyileştirmeyi hedefler. Bu ajanlar, dentindeki tip I kolajenin yıkımından sorumlu olan MMP'ler ve sistein katepsinler gibi endojen proteazları inhibe eder (Liu et al., 2013).

a. Geleneksel Sentetik Ajanlar

Proantosiyanidin gibi sentetik olarak türetilmiş çapraz bağlayıcı ajanlar, dentinin biyomodifikasyonunda kullanılmaktadır. Bu ajanlar, dentin-kanal dolum patı ara yüzeyinde stabil ve dayanıklı bir hibrit tabaka oluşumuna katkıda bulunur. Bununla birlikte, dentin substratı ile yeterli biyouyumluluğa sahip olmamaları önemli bir sınırlılık olarak bildirilmektedir (Cai, Palamara, & Burrow, 2018).

b. Doğal Kaynaklı Ajanlar

1. Kajun Cevizi Kabuğu Özütü (CNSL)

CNSL, doğal kaynaklı bir kolajen çapraz bağlayıcı ajan olarak literatürde önerilmektedir. Avantajları arasında düşük konsantrasyonlarda yüksek antioksidan etki, düşük sitotoksisite ve dentin ile iyi biyouyumluluk yer alır. Mekanizması, MMP-2 ve MMP-9 enzimlerini inhibe ederek demineralize dentinin sertliğini artırmak ve yıkıma karşı direncini yükseltmektir (Moreira et al., 2017).

2. Yeşil Çaydan Elde Edilen Epigallocatechin Gallate (EGCG)

EGCG, kolajenin stabilitesini artıran doğal bir ajan olarak kullanılır. Mekanizması kolajenaz enzimini inhibe etmek, enzimin aktif bölgesini korumak ve hidrojen bağları ile hidrofobik etkileşimler oluşturarak kolajen yapısında daha fazla çapraz bağlanma sağlamaktır (Jung et al., 2011).

Biyoseramik esaslı Bio-C ve Hybrid Root (Sun Medical, Japonya) kanal dolum patlarının bağlanma dayanımı, farklı kolajen çapraz bağlayıcı ajanların uygulanmasıyla değerlendirilmiştir. Kök kanalları %5,25 NaOCl, %17 EDTA ve %2 CHX ile irrigate edildikten sonra, CNSL (kaju cevizi kabuğu özütü, etil alkol-su 1:1) ve EGCG (1 mg/mL) uygulanmıştır. Bu uygulamalar, NaOCl ve EDTA'ya maruz kalan dentinde meydana gelen kolajen biyodegradasyonuna karşı dentin matriksini stabilize ederek bağlanma dayanımını artırmayı hedeflemiştir (Govindarajan et al., 2022). Çalışmada, bağlanma dayanımı en yüksek CNSL + biyoseramik kanal dolum patı grubunda gözlenmiştir. EGCG'nin daha düşük dayanım göstermesi, CNSL'ye kıyasla sınırlı kolajen stabilizasyonu, daha düşük tübüler penetrasyon ve mikromekanik bağlanma kapasitesi ile ilişkilendirilmiştir. Ayrıca EGCG'nin %17 EDTA sonrası 5 dakika

uygulanmasının, NaOCl ile muamele edilen dentinin bağlanma dayanımını anlamlı şekilde artırdığı bildirilmiştir (Pheenithicharoenkul & Panichuttra, 2016).

E. Kök Kanal Kurulama Yöntemlerinin Etkisi

Son irrigasyon sonrası kök kanalı kurulama yöntemlerinin, dentin nem düzeyini değiştirerek dentin- kanal dolum patı adezyonunu etkileyebileceği çeşitli çalışmalarla gösterilmiştir.

Root SP biyoseramik kanal dolum patının bağlanma dayanımı, dentin nem durumuna göre değerlendiren bir çalışma gerçekleştirilmiş ve dentin grupları; normal nem (paper point ile), %95 etanol ile kurutulmuş, %70 izopropanol ile kurutulmuş ve tam kuru (58 °C’de en az 6 saat termostatlı etüvde) olarak sınıflandırılmıştır. Sonuçlar, en yüksek itme bağlanma dayanımının normal nem koşullarında gözlemlendiğini ($2,04 \pm 0,03$ MPa), en düşük dayanımın ise tam kuru dentin grubunda olduğunu ($0,68 \pm 0,04$ MPa) göstermiştir. Aşırı kuruluk, kanal dolum patı ile dentin arasındaki bağlanmayı olumsuz etkilemiştir. iRoot SP hidrofilik bir kanal dolum patı olup, dentin tübüllerindeki nem, sertleşme reaksiyonu için gereklidir; bu nedenle normal nem koşulları hidrasyon için en uygun ortamı sağlamaktadır. Tam kurutmada ise hidrasyon için gerekli suyu ortadan kaldırdığı için en düşük bağlanma dayanımı değeri gözlenmiştir (Wang, Bai, Wang, & Liang, 2023).

Başka bir çalışmada Bio-C kanal dolum patı ve AH Plus kanal dolum patlarının farklı kanal kurutma protokolleri altında bağlanma dayanımı ve adeziv ara yüzeyi incelenmiştir. Bio-C kanal dolum patı üreticisi, kanalın aşırı kurumaya neden olmadan paper point ile kurutulmasını önermektedir; ancak kurutma protokolü hakkında herhangi bir standart uygulanmamıştır. Çalışma sonuçlarına göre, Bio-C kanal dolum patı en yüksek bağlanma dayanımı değerini hafif nemli kanallarda göstermiştir. Hidrofilik ve kalsiyum silikat esaslı bir kanal dolum patı olan Bio-C, hafif nemli ortamlarda sertleşme reaksiyonu için gerekli suyu ortamdan sağlayarak kalsiyum silikat hidrat fazının ve hidroksiapatit oluşumunun düzgün ilerlemesini sağlar. Tam kuru kanallarda bu reaksiyon sınırlı kalmakta ve bağlanma gücü düşmektedir. Buna karşılık, AH Plus en yüksek bağlanma dayanımını kuru kanallarda göstermiştir. Hidrofobik ve organik bileşenler içeren AH Plus için nem, monomer dönüşümünü azaltmakta ve tam polimerizasyonu engelleyerek bağlanma dayanımını düşürmektedir. Kuru kanal, mekanik ve kimyasal bağlanmayı maksimuma çıkarmaktadır (Pelozo et al., 2023).

iRoot SP biyoseramik esaslı kanal dolum patının bağlanma dayanımı farklı kanal kurutma protokolleri altında değerlendiren bir diğer çalışmada (Kadı, Özlek, & Saed, 2025), kanallar dört gruba ayrılmıştır: hafif nemli (paper point ile kurutma), kuru (%95 etanol ile 10 saniye), nemli (tek paper point ile 5 saniye) ve

ıslak (tamamen nemli bırakılmış). Sonuçlar, en yüksek bağlanma dayanımı değerinin kuru grup (%95 etanol ile kurutulan) ve hafif nemli gruplarda (paper point ile görünür kuruluk sağlanmış) elde edildiğini göstermiştir; iki grup arasında istatistiksel olarak anlamlı fark bulunamamıştır. Bu durum, paper point ile etkin kurutmanın klinik olarak yeterli bağlanma dayanımı sağlayabileceğini ve etanol kullanımına benzer sonuçlar verebileceğini göstermektedir. Yarı kuru ve ıslak gruplar ise anlamlı derecede düşük bağlanma dayanımı sergilemiştir. Yarı kuru grupta yalnızca tek paper point kullanımı nedeniyle dentin yüzeyinde kalan nem, kanal dolum patının tübüllere penetrasyonunu ve adezyonunu olumsuz etkilemiştir. Islak grupta ise dentin tamamen nemli olduğundan, kanal dolum patı suyu yerinden çıkaramayabilir ve bağlanmayı bozabilir (Kadı et al., 2025).

F. Sonuç

Literatür incelendiğinde, kalsiyum silikat esaslı materyallerin dentinle bağlanmasının hem kimyasal hem de mikromekanik süreçlere dayandığı, Ca^{2+} iyonu alışverişi ve mineral infiltrasyon bölgesinin oluşumunun bu bağlanmanın temelini oluşturduğu görülmektedir. Smear tabakasının varlığı, dentin tübülleri penetrasyonu sınırlasa da, kalsiyum silikat esaslı patlar, iyon alışverişi yoluyla kısmi bağlanmayı sürdürebilmektedir. Bununla birlikte, smear tabakasının etkin şekilde uzaklaştırılması, bağlanma dayanımını ve penetrasyonu artırarak klinik başarının optimize edilmesine katkı sağlamaktadır.

Klasik NaOCl/ EDTA protokolü, smear tabakasının uzaklaştırılmasında etkili olmakla birlikte, EDTA'nın güçlü kalsiyum şelasyon kapasitesi, kalsiyum silikat patlarının hidratasyon ve kristalleşme süreçlerini sınırlayabilir. Bu durum, bağlanma dayanımının azalma riskini gündeme getirmektedir. Öte yandan, HEDP kullanılarak gerçekleştirilen devamlı şelasyon protokolleri, NaOCl'nin antimikrobiyal ve proteolitik etkilerini korurken dentin yüzeyinde daha kontrollü dekalsifikasyon sağlayarak, kalsiyum silikat esaslı patın tübüllere penetrasyonunu desteklemektedir. Literatürde, EDTA, HEDP ve çeşitli asit temelli ajanların (sitrik asit, maleik asit, perasetik asit, glikolik asit) karşılaştırıldığı çalışmalarda, genel olarak tüm şelasyon ajanlarının bağlanma ve penetrasyonu artırdığı, ancak bölgesel farklılıkların ve materyal özelliklerinin etkili olduğu saptanmıştır.

Asit temelli protokoller, özellikle apikal bölgelerde güçlü demineralizasyon sağlayarak sklerotik dentin üzerinde avantaj yaratmaktadır. Maleik asit ve glikolik asit gibi düşük pH'lı ajanlar, dar ve kompleks anatomili kanallarda bile etkin smear tabakası temizliği ve dentin tübülü penetrasyonu sağlamaktadır. Sürekli şelasyon ve hafif asidik ajanların kombinasyonu, koronal ve orta kanal bölgelerinde daha homojen penetrasyon elde edilmesini desteklerken, apikal

bölgede anatomik daralma ve dentinin daha sklerotik yapısı nedeniyle penetrasyonun sınırlı olabildiği bildirilmektedir. Kanal dolum patlarının bağlanma dayanımı, dentin nem düzeyi ve kurutma protokolüne bağlı olarak değişmektedir; hidrofilik biyoseramik patlar hafif nemli ortamlarda daha iyi bağlanma sağlarken, hidrofobik reçine bazlı patlar kuru kanallarda daha yüksek dayanım göstermektedir. Bununla birlikte, aşırı nem veya aşırı kuruluk adezyonu olumsuz etkilemekte olup, bu alanda net çıkarımlar yapabilmek için daha fazla ve kapsamlı çalışmaya ihtiyaç vardır.

Sonuç olarak, kalsiyum silikat esaslı kanal dolum patlarının dentin adezyonunda, son irrigasyon protokolünün seçimi kritik bir rol oynamaktadır. Protokol seçiminde, hem dentin yapısının korunması hem de smear tabakasının etkin şekilde uzaklaştırılması gözetilmelidir. Sürekli şelasyon protokolleri ve düşük pH'lı asit temelli ajanlar, özellikle penetrasyon ve mikromekanik adezyon açısından avantaj sağlarken, klasik NaOCl-EDTA kombinasyonunun kontrollü uygulanması hâlâ geçerli bir yöntemdir.

Buna rağmen, farklı irrigasyon protokollerinin kalsiyum silikat esaslı kanal dolum patlarının dentine bağlanma kapasitesi ve dentin tübüllerine penetrasyonu üzerindeki etkilerini daha net ortaya koymak için ek çalışmalara ihtiyaç vardır.

Referanslar:

- Agarwal, S., Raghu, R., Shetty, A., Gautham, P., & Souparnika, D. (2019). An in vitro comparative evaluation of the effect of three endodontic chelating agents (17 ethylenediamine tetraacetic acid, 1 peracetic acid, 0.2 chitosan) on the push out bond strength of gutta percha with a new bioceramic sealer (BioRoot RCS). *Journal of Conservative Dentistry*, 22(5). doi:10.4103/JCD.JCD_90_20
- Alim Uysal, B. A., Kotan, G., Guneser, M. B., Dincer, A. N., Senturk, H., & Rafiqi, A. M. (2021). Investigation of the effect of different chelation solutions on penetration of resin-based and bioceramic sealers with a novel method. *Microscopy Research and Technique*, 84(7). doi:10.1002/jemt.23717
- Aranda-Garcia, A. J., Kuga, M. C., Vitorino, K. R., Chávez-Andrade, G. M., Hungaro Duarte, M. A., Bonetti-Filho, I., ... Reis Só, M. V. (2013). Effect of the root canal final rinse protocols on the debris and smear layer removal and on the push-out strength of an epoxy-based sealer. *Microscopy Research and Technique*, 76(5), 533–537. doi:10.1002/jemt.22196
- Atmeh, A. R., Chong, E. Z., Richard, G., Festy, F., & Watson, T. F. (2012). Dentin-cement interfacial interaction: Calcium silicates and polyalkenoates. *Journal of Dental Research*, 91(5). doi:10.1177/0022034512443068
- Aydın, Z. U., Özyürek, T., Keskin, B., & Baran, T. (2019). Effect of chitosan nanoparticle, QMix, and EDTA on TotalFill BC sealers' dentinal tubule penetration: a confocal laser scanning microscopy study. *Odontology*, 107(1). doi:10.1007/s10266-018-0359-0
- Baldasso, F. E. R., Roletto, L., da Silva, V. D., Morgental, R. D., & Kopper, P. M. P. (2017). Effect of final irrigation protocols on microhardness reduction and erosion of root canal dentin. *Brazilian Oral Research*, 31. doi:10.1590/1807-3107BOR-2017.vol31.0040
- Ballal, N. V., Kandian, S., Mala, K., Bhat, K. S., & Acharya, S. (2009). Comparison of the Efficacy of Maleic Acid and Ethylenediaminetetraacetic Acid in Smear Layer Removal from Instrumented Human Root Canal: A Scanning Electron Microscopic Study. *Journal of Endodontics*, 35(11). doi:10.1016/j.joen.2009.07.021
- Ballal, N. V., Roy, A., & Zehnder, M. (2021). Effect of sodium hypochlorite concentration in continuous chelation on dislodgement resistance of an epoxy resin and hydraulic calcium silicate sealer. *Polymers*, 13(20). doi:10.3390/polym13203482
- Basrani, B., & Haapasalo, M. (2012). Update on endodontic irrigating solutions. *Endodontic Topics*, 27(1), 74–102. doi:10.1111/etp.12031
- Bello, Y. D., Porsch, H. F., Farina, A. P., Souza, M. A., Silva, E. J. N. L., Bedran-Russo, A. K., & Cecchin, D. (2019). Glycolic acid as the final irrigant in

- endodontics: Mechanical and cytotoxic effects. *Materials Science and Engineering C, 100*. doi:10.1016/j.msec.2019.03.016
- Bettina R. Basrani; Gevik Malkhassian. (2021, April 5). Update on Irrigation Disinfection.
- Błaszczyk-Pośpiech, A., Struzik, N., Szymonowicz, M., Sareło, P., Wiśniewska-Wrona, M., Wiśniewska, K., ... Wawrzyńska, M. (2025, September 1). Endodontic Sealers and Innovations to Enhance Their Properties: A Current Review. *Materials*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). doi:10.3390/ma18184259
- Bourd-Boittin, K., Fridman, R., Fanchon, S., Septier, D., Goldberg, M., & Menashi, S. (2005). Matrix metalloproteinase inhibition impairs the processing, formation and mineralization of dental tissues during mouse molar development. *Experimental Cell Research, 304*(2). doi:10.1016/j.yexcr.2004.11.024
- Cai, J., Palamara, J. E. A., & Burrow, M. F. (2018). Effects of Collagen Crosslinkers on Dentine: A Literature Review. *Calcified Tissue International*. doi:10.1007/s00223-017-0343-7
- Caligiani, A., Acquotti, D., Palla, G., & Bocchi, V. (2007). Identification and quantification of the main organic components of vinegars by high resolution ¹H NMR spectroscopy. *Analytica Chimica Acta, 585*(1). doi:10.1016/j.aca.2006.12.016
- Çalt, S., & Serper, A. (2002). Time-dependent effects of EDTA on dentin structures. *Journal of Endodontics, 28*(1). doi:10.1097/00004770-200201000-00004
- Camilleri, J. (2020). Classification of Hydraulic Cements Used in Dentistry. *Frontiers in Dental Medicine, 1*. doi:10.3389/fdmed.2020.00009
- Chang, S. W., Lee, S. Y., Kang, S. K., Kum, K. Y., & Kim, E. C. (2014). In vitro biocompatibility, inflammatory response, and osteogenic potential of 4 root canal sealers: Sealapex, sankin apatite root sealer, MTA Fillapex, and iroot SP root canal sealer. *Journal of Endodontics, 40*(10). doi:10.1016/j.joen.2014.04.006
- Chen, B., Haapasalo, M., Mobuchon, C., Li, X., Ma, J., & Shen, Y. (2020). Cytotoxicity and the Effect of Temperature on Physical Properties and Chemical Composition of a New Calcium Silicate-based Root Canal Sealer. *Journal of Endodontics, 46*(4). doi:10.1016/j.joen.2019.12.009
- Craig Baumgartner, J., & Mader, C. L. (n.d.). *A Scanning Electron Microscopic Evaluation of Four Root Canal Irrigation Regimens*.
- Czonstkowsky, M., Wilson, E. G., & Holstein, F. A. (1990). The Smear Layer in Endodontics. *Dental Clinics of North America, 34*(1), 13–25. doi:10.1016/S0011-8532(22)01160-0

- Dai, L., Khechen, K., Khan, S., Gillen, B., Loushine, B. A., Wimmer, C. E., ... Tay, F. R. (2011). The effect of QMix, an experimental antibacterial root canal irrigant, on removal of canal wall smear layer and debris. *Journal of Endodontics*, 37(1). doi:10.1016/j.joen.2010.10.004
- Dasilva, L., Finer, Y., Friedman, S., Basrani, B., & Kishen, A. (2013). Biofilm formation within the interface of bovine root dentin treated with conjugated chitosan and sealer containing chitosan nanoparticles. *Journal of Endodontics*, 39(2). doi:10.1016/j.joen.2012.11.008
- De-Deus, G., Zehnder, M., Reis, C., Fidel, S., Fidel, R. A. S., Galan, J., & Paciornik, S. (2008). Longitudinal Co-site Optical Microscopy Study on the Chelating Ability of Etidronate and EDTA Using a Comparative Single-tooth Model. *Journal of Endodontics*, 34(1), 71–75. doi:10.1016/j.joen.2007.09.020
- Donnermeyer, D., Bürklein, S., Dammaschke, T., & Schäfer, E. (2019). Endodontic sealers based on calcium silicates: a systematic review. *Odontology*. doi:10.1007/s10266-018-0400-3
- Duncan, H. F., & El-Karim, I. (2025). Endodontic S3-level clinical practice guidelines: the European Society of Endodontology process and recommendations. *British Dental Journal*, 238(7). doi:10.1038/s41415-025-8335-x
- Dutner, J., Mines, P., & Anderson, A. (2012). Irrigation trends among american association of endodontists members: A web-based survey. *Journal of Endodontics*, 38(1). doi:10.1016/j.joen.2011.08.013
- Emekli, G. E., Kaptan, R. F., & Tanalp, J. (2025). Evaluation of the effects of traditional irrigation solutions and etidronic acid on the bond strength of endodontic sealers. *BMC Oral Health*, 25(1). doi:10.1186/s12903-025-05678-z
- Eskander, M., Genena, S., Zaazou, A., & Moussa, S. (2021). Effect of phytic acid and ethylenediaminetetraacetic acid on penetration depth of bioceramic and resin sealers. *Australian Endodontic Journal*, 47(3), 506–511. doi:10.1111/aej.12513
- Estrela, C., Holland, R., Bernabé, P. F. E., De Souza, V., & Estrela, C. R. A. (2004). Antimicrobial potential of medicaments used in healing process in dogs' teeth with apical periodontitis. *Brazilian Dental Journal*, 15(3). doi:10.1590/s0103-64402004000300003
- Francis, M. D., & Valent, D. J. (2007). *Historical perspectives on the clinical development of bisphosphonates in the treatment of bone diseases*. In *Journal of Musculoskeletal Neuronal Interactions* (Vol. 7).
- Gaddala, N., Veeramachineni, C., & Tummala, M. (2015). Effect of Peracetic Acid as a Final Rinse on Push Out Bond Strength of Root Canal Sealers to Root

- Dentin. *Journal of Clinical and Diagnostic Research*, 9(5). doi:10.7860/JCDR/2015/12254.5960
- Gawdat, S. I., & Bedier, M. M. (2022). Influence of dual rinse irrigation on dentinal penetration of a bioceramic root canal sealer: A Confocal microscopic Analysis. *Australian Endodontic Journal*, 48(3). doi:10.1111/aej.12599
- Gendron, R., Grenier, D., Sorsa, T., & Mayrand, D. (1999). Inhibition of the activities of matrix metalloproteinases 2, 8, and 9 by chlorhexidine. *Clinical and Diagnostic Laboratory Immunology*, 6(3). doi:10.1128/cdli.6.3.437-439.1999
- Gergi, R., Osta, N., Bourbouze, G., Zgheib, C., Arbab-Chirani, R., & Naaman, A. (2015). Effects of three nickel titanium instrument systems on root canal geometry assessed by micro-computed tomography. *International Endodontic Journal*, 48(2). doi:10.1111/iej.12296
- Gomes, B. P. F. A., Aveiro, E., & Kishen, A. (2023). Irrigants and irrigation activation systems in Endodontics. *Brazilian Dental Journal*, 34(4). doi:10.1590/0103-6440202305577
- Govindarajan, J., Hemasathya, B. A., Reddy, B. N., Nathan, S., Sankar, S., & Subramani, S. K. (2022). Comparative Assessment of Novel Collagen Cross-linking Agents on Push-out Bond Strength of Two Different Sealers: An In Vitro Study. *Journal of Contemporary Dental Practice*, 23(11). doi:10.5005/jp-journals-10024-3439
- Gundogar, M., Sezgin, G. P., Erkan, E., & Ozyilmaz, O. Y. (2019). The influence of the irrigant QMix on the push-out bond strength of a bioceramic endodontic sealer. *European Oral Research*. doi:10.26650/eor.2018.446
- Gupta, K., Shetty, S. S., Tandale, A. B., Srikrumam, M., & Nihalani, H. (2024). Comparative evaluation of continuous and sequential chelation on the dentinal tubule penetration of bioceramic-based sealer – A confocal laser scanning microscopic study. *Journal of Conservative Dentistry and Endodontics*, 27(9), 935–941. doi:10.4103/JCDE.JCDE_288_24
- H Schilder. (1974). Cleaning and shaping the root canal. *Dent Clin North Am.*, 2(18), 26996.
- Haapasalo, M., Shen, Y., Wang, Z., & Gao, Y. (2014). Irrigation in endodontics. *British Dental Journal*, 216(6), 299–303. doi:10.1038/sj.bdj.2014.204
- Hassan, R., & Roshdy, N. N. (2023). Effect of continuous chelation on the dentinal tubule penetration of a calcium silicate-based root canal sealer: a confocal laser microscopy study. *BMC Oral Health*, 23(1). doi:10.1186/s12903-023-02995-z
- Hong, S. W., Baik, J. E., Kang, S. S., Kum, K. Y., Yun, C. H., & Han, S. H. (2016). Sodium Hypochlorite Inactivates Lipoteichoic Acid of *Enterococcus faecalis*

- by Deacylation. *Journal of Endodontics*, 42(10). doi:10.1016/j.joen.2016.06.018
- Hu, X., Ling, J., & Gao, Y. (2010). Effects of irrigation solutions on dentin wettability and roughness. *Journal of Endodontics*, 36(6). doi:10.1016/j.joen.2010.03.007
- Hülsmann, M., Heckendorff, M., & Lennon, Á. (2003). Chelating agents in root canal treatment: Mode of action and indications for their use. *International Endodontic Journal*. doi:10.1111/j.1365-2591.2003.00754.x
- Hulsmann, M., Peters, O. A., & Dummer, P. M. H. (2005). Mechanical preparation of root canals: shaping goals, techniques and means. *Endodontic Topics*, 10(1). doi:10.1111/j.1601-1546.2005.00152.x
- Jung, I. H., Yun, J. H., Cho, A. R., Kim, C. S., Chung, W. G., & Choi, S. H. (2011). Effect of (-)-epigallocatechin-3-gallate on maintaining the periodontal ligament cell viability of avulsed teeth: A preliminary study. *Journal of Periodontal and Implant Science*, 41(1). doi:10.5051/jpis.2011.41.1.10
- Kadı, G., Özlek, E., & Saed, Y. M. K. (2025). Effect of Different Drying Protocols on the Bond Strength of a Bioceramic Root Canal Sealer. *Australian Endodontic Journal*. doi:10.1111/aej.70032
- Kakudo, N., Kushida, S., Suzuki, K., & Kusumoto, K. (2013). Effects of glycolic acid chemical peeling on facial pigment deposition: Evaluation using novel computer analysis of digital-camera-captured images. *Journal of Cosmetic Dermatology*, 12(4). doi:10.1111/jocd.12062
- Kara Tuncer, A., & Tuncer, S. (2012). Effect of different final irrigation solutions on dentinal tubule penetration depth and percentage of root canal sealer. *Journal of Endodontics*, 38(6). doi:10.1016/j.joen.2012.03.008
- Karam, M., Faraj, M., Mhanna, R., Khalil, I., Habib, M., Makhoulf, M., & Zogheib, C. (2024). Effect of heat application on the physicochemical properties of new endodontic sealers: an in vitro and SEM study. *Odontology*, 112(2). doi:10.1007/s10266-023-00871-4
- Kaup, M., Dammann, C. H., Schäfer, E., & Dammaschke, T. (2015). Shear bond strength of Biodentine, ProRoot MTA, glass ionomer cement and composite resin on human dentine ex vivo. *Head and Face Medicine*, 11(1). doi:10.1186/s13005-015-0071-z
- Kuruvilla, A., Jaganath, B. M., Krishnegowda, S. C., Ramachandra, P. K. M., Johns, D. A., & Abraham, A. (2015). A comparative evaluation of smear layer removal by using edta, etidronic acid, and maleic acid as root canal irrigants: An in vitro scanning electron microscopic study. *Journal of Conservative Dentistry*, 18(3). doi:10.4103/0972-0707.157266

- Lee, B. S., Hsieh, T. T., Chi, D. C. H., Lan, W. H., & Lin, C. P. (2004). The role of organic tissue on the punch shear strength of human dentin. *Journal of Dentistry*, 32(2). doi:10.1016/j.jdent.2003.09.001
- Lee, Y. L., Lin, F. H., Wang, W. H., Ritchie, H. H., Lan, W. H., & Lin, C. P. (2007). Effects of EDTA on the hydration mechanism of mineral trioxide aggregate. *Journal of Dental Research*, 86(6). doi:10.1177/154405910708600609
- Liu, Y., Chen, M., Yao, X., Xu, C., Zhang, Y., & Wang, Y. (2013). Enhancement in dentin collagen's biological stability after proanthocyanidins treatment in clinically relevant time periods. *Dental Materials*, 29(4). doi:10.1016/j.dental.2013.01.013
- Lottanti, S., Gautschi, H., Sener, B., & Zehnder, M. (2009). Effects of ethylenediaminetetraacetic, etidronic and peracetic acid irrigation on human root dentine and the smear layer. *International Endodontic Journal*, 42(4). doi:10.1111/j.1365-2591.2008.01514.x
- Loushine, B. A., Bryan, T. E., Looney, S. W., Gillen, B. M., Loushine, R. J., Weller, R. N., ... Tay, F. R. (2011). Setting properties and cytotoxicity evaluation of a premixed bioceramic root canal sealer. *Journal of Endodontics*, 37(5). doi:10.1016/j.joen.2011.01.003
- Ma, J., Wang, Z., Shen, Y., & Haapasalo, M. (2011). A new noninvasive model to study the effectiveness of dentin disinfection by using confocal laser scanning microscopy. *Journal of Endodontics*, 37(10). doi:10.1016/j.joen.2011.06.018
- Machado, R., Garcia, L. da F. R., da Silva Neto, U. X., Cruz Filho, A. de M. da, Silva, R. G., & Vansan, L. P. (2018). Evaluation of 17% EDTA and 10% citric acid in smear layer removal and tubular dentin sealer penetration. *Microscopy Research and Technique*, 81(3). doi:10.1002/jemt.22976
- Machado-Silveiro, L. F., González-López, S., & González-Rodríguez, M. P. (2004). Decalcification of root canal dentine by citric acid, EDTA and sodium citrate. *International Endodontic Journal*, 37(6). doi:10.1111/j.1365-2591.2004.00813.x
- Marshall, S. J., Bayne, S. C., Baier, R., Tomsia, A. P., & Marshall, G. W. (2010). A review of adhesion science. *Dental Materials*, 26(2). doi:10.1016/j.dental.2009.11.157
- Moreira, M. A., Souza, N. O., Sousa, R. S., Freitas, D. Q., Lemos, M. V., De Paula, D. M., ... Feitosa, V. P. (2017). Efficacy of new natural biomodification agents from Anacardiaceae extracts on dentin collagen cross-linking. *Dental Materials*, 33(10). doi:10.1016/j.dental.2017.07.003
- Naenni, N., Thoma, K., & Zehnder, M. (2004). Soft Tissue Dissolution Capacity of Currently Used and Potential Endodontic Irrigants. *Journal of Endodontics*, 30(11), 785–787. doi:10.1097/00004770-200411000-00009

- Nagas, E., Uyanik, M. O., Eymirli, A., Cehreli, Z. C., Vallittu, P. K., Lassila, L. V. J., & Durmaz, V. (2012). Dentin moisture conditions affect the adhesion of root canal sealers. *Journal of Endodontics*, 38(2). doi:10.1016/j.joen.2011.09.027
- Nandini, S., Natanasabapathy, V., & Shivanna, S. (2010). Effect of Various Chemicals as Solvents on the Dissolution of Set White Mineral Trioxide Aggregate: An In Vitro Study. *Journal of Endodontics*, 36(1). doi:10.1016/j.joen.2009.09.005
- Nassar, M., Hiraishi, N., Tamura, Y., Otsuki, M., Aoki, K., & Tagami, J. (2015). Phytic acid: An alternative root canal chelating agent. *Journal of Endodontics*, 41(2). doi:10.1016/j.joen.2014.09.029
- Neelakantan, P., Subbarao, C., Subbarao, C. V., De-Deus, G., & Zehnder, M. (2011). The impact of root dentine conditioning on sealing ability and push-out bond strength of an epoxy resin root canal sealer. *International Endodontic Journal*, 44(6), 491–498. doi:10.1111/j.1365-2591.2010.01848.x
- Neelakantan, P., Varughese, A. A., Sharma, S., Subbarao, C. V., Zehnder, M., & De-Deus, G. (2012). Continuous chelation irrigation improves the adhesion of epoxy resin-based root canal sealer to root dentine. *International Endodontic Journal*, 45(12), 1097–1102. doi:10.1111/j.1365-2591.2012.02073.x
- Nogo-Živanović, D., Kanjevac, T., Bjelović, L., Ristić, V., & Tanasković, I. (2019). The effect of final irrigation with MTAD, QMix, and EDTA on smear layer removal and mineral content of root canal dentin. *Microscopy Research and Technique*, 82(6). doi:10.1002/jemt.23239
- Ozasir, T., Eren, B., Gulsahi, K., & Ungor, M. (2021). The Effect of Different Final Irrigation Regimens on the Dentinal Tubule Penetration of Three Different Root Canal Sealers: A Confocal Laser Scanning Microscopy Study in Vitro. *Scanning*, 2021. doi:10.1155/2021/8726388
- Paqué, F., Laib, A., Gautschi, H., & Zehnder, M. (2009). Hard-Tissue Debris Accumulation Analysis by High-Resolution Computed Tomography Scans. *Journal of Endodontics*, 35(7). doi:10.1016/j.joen.2009.04.026
- Pelozo, L. L., Souza-Gabriel, A. E., Alves dos Santos, G. N., Camargo, R. V., Lopes-Olhê, F. C., Sousa-Neto, M. D., & Mazzi-Chaves, J. F. (2023). Canal Drying Protocols to Use with Calcium Silicate-based Sealer: Effect on Bond Strength and Adhesive Interface. *Journal of Endodontics*, 49(9). doi:10.1016/j.joen.2023.07.015
- Peters, O. A., Schönenberger, K., & Laib, A. (2001). Effects of four Ni-Ti preparation techniques on root canal geometry assessed by micro computed tomography. *International Endodontic Journal*, 34(3). doi:10.1046/j.1365-2591.2001.00373.x

- Pheenithicharoenkul, S., & Panichuttra, A. (2016). Epigallocatechin-3-gallate increased the push out bond strength of an epoxy resin sealer to root dentin. *Dental Materials Journal*, 35(6). doi:10.4012/dmj.2016-137
- Piai, G. G., Duarte, M. A. H., Nascimento, A. L. do, Rosa, R. A. da, Marcus Vinicius Reis, S., & Vivan, R. R. (2018). Penetrability of a new endodontic sealer: A confocal laser scanning microscopy evaluation. *Microscopy Research and Technique*, 81(11). doi:10.1002/jemt.23129
- Pinheiro, E. T., Gomes, B. P. F. A., Ferraz, C. C. R., Sousa, E. L. R., Teixeira, F. B., & Souza-Filho, F. J. (2003). Microorganisms from canals of root-filled teeth with periapical lesions. *International Endodontic Journal*, 36(1). doi:10.1046/j.1365-2591.2003.00603.x
- Prada, I., Micó-Muñoz, P., Giner-Lluesma, T., Micó-Martínez, P., Muwaquet-Rodríguez, S., & Albero-Monteagudo, A. (2019). Update of the therapeutic planning of irrigation and intracanal medication in root canal treatment. A literature review. *Journal of Clinical and Experimental Dentistry*. doi:10.4317/jced.55560
- Prüllage, R. K., Urban, K., Schäfer, E., & Dammaschke, T. (2016). Material Properties of a Tricalcium Silicate-containing, a Mineral Trioxide Aggregate-containing, and an Epoxy Resin-based Root Canal Sealer. *Journal of Endodontics*, 42(12). doi:10.1016/j.joen.2016.09.018
- Qian, W., Shen, Y., & Haapasalo, M. (2011). Quantitative analysis of the effect of irrigant solution sequences on dentin erosion. *Journal of Endodontics*, 37(10). doi:10.1016/j.joen.2011.06.005
- Retana-Lobo, C., Tanomaru-Filho, M., Guerreiro-Tanomaru, J. M., Benavides-García, M., Hernández-Meza, E., & Reyes-Carmona, J. (2021). Push-Out Bond Strength, Characterization, and Ion Release of Premixed and Powder-Liquid Bioceramic Sealers with or without Gutta-Percha. *Scanning*, 2021. doi:10.1155/2021/6617930
- Roshdy, N. N., Kataia, E. M., & Helmy, N. A. (2019). Assessment of antibacterial activity of 2.5% NaOCl, chitosan nano-particles against *Enterococcus faecalis* contaminating root canals with and without diode laser irradiation: an in vitro study. *Acta Odontologica Scandinavica*, 77(1). doi:10.1080/00016357.2018.1498125
- Ruiz-Linares, M., Aguado-Pérez, B., Baca, P., Arias-Moliz, M. T., & Ferrer-Luque, C. M. (2017). Efficacy of antimicrobial solutions against polymicrobial root canal biofilm. *International Endodontic Journal*, 50(1). doi:10.1111/iej.12598
- Sarkar, N. K., Caicedo, R., Ritwik, P., Moiseyeva, R., & Kawashima, I. (2005). Physicochemical basis of the biologic properties of mineral trioxide

aggregate. *Journal of Endodontics*, 31(2).
doi:10.1097/01.DON.0000133155.04468.41

- Sfeir, G., Bukiet, F., Hage, W., El Hachem, R., & Zogheib, C. (2023). Impact of Final Irrigation Protocol on the Push-Out Bond Strength of Two Types of Endodontic Sealers. *Materials*, 16(5). doi:10.3390/ma16051761
- Sfeir, G., Zogheib, C., Patel, S., Giraud, T., Nagendrababu, V., & Bukiet, F. (2021). Calcium silicate-based root canal sealers: A narrative review and clinical perspectives. *Materials*. doi:10.3390/ma14143965
- Shekhar, S., Mallya, P. L., Ballal, V., & Shenoy, R. (2023). To evaluate and compare the effect of 17% EDTA, 10% citric acid, 7% maleic acid on the dentinal tubule penetration depth of bio ceramic root canal sealer using confocal laser scanning microscopy: an in vitro study. *F1000Research*, 11. doi:10.12688/f1000research.127091.2
- Shokouhinejad, N., Hoseini, A., Gorjestani, H., & Shamshiri, A. R. (2013). The effect of different irrigation protocols for smear layer removal on bond strength of a new bioceramic sealer. *Iranian Endodontic Journal*, 8(1).
- Shrestha, A., Friedman, S., & Kishen, A. (2011). Photodynamically crosslinked and chitosan-incorporated dentin collagen. *Journal of Dental Research*, 90(11). doi:10.1177/0022034511421928
- Silva Almeida, L. H., Moraes, R. R., Morgental, R. D., & Pappen, F. G. (2017, April 1). Are Premixed Calcium Silicate-based Endodontic Sealers Comparable to Conventional Materials? A Systematic Review of In Vitro Studies. *Journal of Endodontics*. Elsevier Inc. doi:10.1016/j.joen.2016.11.019
- Silva, P. V., Guedes, D. F. C., Pécora, J. D., & da Cruz-Filho, A. M. (2012). Time-dependent effects of chitosan on dentin structures. *Brazilian Dental Journal*, 23(4). doi:10.1590/S0103-64402012000400008
- Sim, T. P. C., Knowles, J. C., Ng, Y. L., Shelton, J., & Gulabivala, K. (2001). Effect of sodium hypochlorite on mechanical properties of dentine and tooth surface strain. *International Endodontic Journal*, 34(2). doi:10.1046/j.1365-2591.2001.00357.x
- Sinha, V. R., Singla, A. K., Wadhawan, S., Kaushik, R., Kumria, R., Bansal, K., & Dhawan, S. (2004). Chitosan microspheres as a potential carrier for drugs. *International Journal of Pharmaceutics*. doi:10.1016/j.ijpharm.2003.12.026
- Slutzky-Goldberg, I., Hanut, A., Matalon, S., Baev, V., & Slutzky, H. (2013). The effect of dentin on the pulp tissue dissolution capacity of sodium hypochlorite and calcium hydroxide. *Journal of Endodontics*, 39(8). doi:10.1016/j.joen.2013.04.040
- Spanó, J. C. E., Silva, R. G., Guedes, D. F. C., Sousa-Neto, M. D., Estrela, C., & Pécora, J. D. (2009). Atomic Absorption Spectrometry and Scanning

- Electron Microscopy Evaluation of Concentration of Calcium Ions and Smear Layer Removal With Root Canal Chelators. *Journal of Endodontics*, 35(5). doi:10.1016/j.joen.2009.02.008
- Sreedev, C. P., Raju, I., Kumaravadivel, K., Mathew, S., Thangavel, B., & Natesan Thangaraj, D. (2020). Influence of Different Types of Root Canal Irrigation Regimen on Resin-based Sealer Penetration and Pushout Bond Strength. *Cureus*. doi:10.7759/cureus.7807
- Srivastava, A., Yadav, D. S., Murali Rao, H., Arun, A., & Siddique, R. (2020). Evaluation of push-out bond strength of BioRoot RCS and AH plus after using different irrigants: An in vitro study. *Journal of Conservative Dentistry*, 23(1). doi:10.4103/JCD.JCD_223_20
- Tait, C., Camilleri, J., & Blundell, K. (2025). Non-surgical endodontics - obturation. *British Dental Journal*, 238(7), 487–496. doi:10.1038/s41415-025-8562-1
- Tartari, T., Bachmann, L., Zancan, R. F., Vivan, R. R., Duarte, M. A. H., & Bramante, C. M. (2018). Analysis of the effects of several decalcifying agents alone and in combination with sodium hypochlorite on the chemical composition of dentine. *International Endodontic Journal*, 51, e42–e54. doi:10.1111/iej.12764
- Tartari, T., Wichnieski, C., Bachmann, L., Jafelicci, M., Silva, R. M., Letra, A., ... Bramante, C. M. (2018). Effect of the combination of several irrigants on dentine surface properties, adsorption of chlorhexidine and adhesion of microorganisms to dentine. *International Endodontic Journal*, 51(12). doi:10.1111/iej.12960
- Tartari, Talita, Wichnieski, C., Silva, R. M., Letra, A., Duarte, M. A. H., & Bramante, C. M. (2023). Final irrigation protocols can be used to promote stable long-term bond strength of AH Plus to dentin. *Journal of Applied Oral Science*, 31. doi:10.1590/1678-7757-2023-0005
- Taşan, A., & Özlek, E. (2024). Effects of ethylenediaminetetraacetic acid, citric acid, and etidronic acid on root dentin mineral content and bond strength of a bioceramic-based sealer: A scanning electron microscopy-energy dispersive spectroscopy study. *Journal of Dental Research, Dental Clinics, Dental Prospects*, 18(1), 37–43. doi:10.34172/joddd.40798
- Tay, F. R., Pashley, D. H., Loushine, R. J., Weller, R. N., Monticelli, F., & Osorio, R. (2006). Self-Etching Adhesives Increase Collagenolytic Activity in Radicular Dentin. *Journal of Endodontics*, 32(9). doi:10.1016/j.joen.2006.04.005
- Thibault, P. K., Wlodarczyk, J., & Wenck, A. (1998). A double-blind randomized clinical trial on the effectiveness of a daily glycolic acid 5% formulation in the treatment of photoaging. *Dermatologic Surgery*, 24(5). doi:10.1111/j.1524-4725.1998.tb04209.x

- Torabinejad, M. (2014). *Mineral Trioxide Aggregate: Properties and Clinical Applications*. *Mineral Trioxide Aggregate: Properties and Clinical Applications*. doi:10.1002/9781118892435
- Torabinejad, M., Handysides, R., Khademi, A. A., & Bakland, L. K. (2002). Clinical implications of the smear layer in endodontics: A review. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontics*, 94(6). doi:10.1067/moe.2002.128962
- Tuncel, B., Nagas, E., Cehreli, Z., Uyanik, O., Vallittu, P., & Lassila, L. (2015). Effect of endodontic chelating solutions on the bond strength of endodontic sealers. *Brazilian Oral Research*, 29(1). doi:10.1590/1807-3107BOR-2015.vol29.0059
- Veeramachaneni, C., Aravelli, S., & Dundigalla, S. (2022). Comparative evaluation of push-out bond strength of bioceramic and epoxy sealers after using various final irrigants: An in vitro study. *Journal of Conservative Dentistry*, 25(2). doi:10.4103/jcd.jcd_10_22
- Wagner, M. H., da Rosa, R. A., de Figueiredo, J. A. P., Duarte, M. A. H., Pereira, J. R., & Só, M. V. R. (2017). Final irrigation protocols may affect intraradicular dentin ultrastructure. *Clinical Oral Investigations*, 21(7), 2173–2182. doi:10.1007/s00784-016-2006-x
- Wang, J. S., Bai, W., Wang, Y., & Liang, Y. H. (2023). Effect of different dentin moisture on the push-out strength of bioceramic root canal sealer. *Journal of Dental Sciences*, 18(1). doi:10.1016/j.jds.2022.06.025
- Watson, T. F., Atmeh, A. R., Sajini, S., Cook, R. J., & Festy, F. (2014). Present and future of glass-ionomers and calcium-silicate cements as bioactive materials in dentistry: Biophotonics-based interfacial analyses in health and disease. *Dental Materials*, 30(1). doi:10.1016/j.dental.2013.08.202
- Willershausen, I., Wolf, T. G., Schmidtman, I., Berger, C., Ehlers, V., Willershausen, B., & Briseño, B. (2015). Survey of root canal irrigating solutions used in dental practices within Germany. *International Endodontic Journal*, 48(7). doi:10.1111/iej.12360
- Xu, Z., Neoh, K. G., Lin, C. C., & Kishen, A. (2011). Biomimetic deposition of calcium phosphate minerals on the surface of partially demineralized dentine modified with phosphorylated chitosan. *Journal of Biomedical Materials Research - Part B Applied Biomaterials*, 98 B(1). doi:10.1002/jbm.b.31844
- Zancan, R. F., Di Maio, A., Tomson, P. L., Duarte, M. A. H., & Camilleri, J. (2021). The presence of smear layer affects the antimicrobial action of root canal sealers. *International Endodontic Journal*, 54(8). doi:10.1111/iej.13522
- Zandim, D. L., Corrêa, F. O. B., Sampaio, J. E. C., & Rossa Júnior, C. (2004). The influence of vinegars on exposure of dentinal tubules: a SEM evaluation.

Pesquisa Odontológica Brasileira = Brazilian Oral Research, 18(1).
doi:10.1590/s1806-83242004000100012

Zehnder, M. (2006, May). Root Canal Irrigants. *Journal of Endodontics*.
doi:10.1016/j.joen.2005.09.014

Zehnder, M., Schicht, O., Sener, B., & Schmidlin, P. (2005). Reducing surface tension in endodontic chelator solutions has no effect on their ability to remove calcium from instrumented root canals. *Journal of Endodontics*, 31(8).
doi:10.1097/01.don.0000152300.44990.6d

Zehnder, M., Schmidlin, P., Sener, B., & Waltimo, T. (2005). Chelation in root canal therapy reconsidered. *Journal of Endodontics*, 31(11).
doi:10.1097/01.don.0000158233.59316.fe

BÖLÜM 6

Endodontik Kaynaklı Patolojilerde İleri Cerrahi Yaklaşımlar

Akif Nalbant¹ & Gamze Ebrar Nalbant²

¹ Arş. Gör., Kırıkkale Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi Periodontoloji Anabilim Dalı,
ORCID: 0009-0007-4123-5008

² Arş. Gör., Kırıkkale Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi Endodonti Anabilim Dalı,
ORCID: 0009-0000-0783-9069

1. Giriş

Endodontik tedavi başarısızlığı sonucunda ortaya çıkan periapikal lezyonlar, çoğu zaman konservatif kanal tedavisi veya yeniden tedavi ile çözülebilir. Bununla birlikte bazı vakalarda cerrahi olmayan yaklaşım yeterli olmaz veya anatomik komplikasyonlar tedaviyi zorlaştırır. Böyle durumlarda endodontik cerrahi yaklaşımlar, dişin korunması ve patolojik odakların ortadan kaldırılması için kritik bir rol oynar. Apikal rezeksiyon, kök amputasyonu ve bunun varyantları olarak hemiseksiyon ve biküspidizasyon gibi prosedürler ile dişin fonksiyonel ömrünün uzatması hedeflenir (Corbella, Walter ve Tsisis, 2023).

Bu ileri cerrahi yaklaşımlar, güncel endodonti ve periodontoloji literatüründe diş koruyucu alternatifler olarak yer almakta olup, doğru vaka seçimi, kapsamlı diagnostik değerlendirme ve uygun tekniğin uygulanması ile uzun dönem diş sağkalımını destekleyebilmektedir. Literatürde kök rezeksiyonu ve hemiseksiyon gibi işlemlere ait uzun dönem sağkalım oranlarının yüksek olduğu bildirilmiştir ki bu durum bu tekniklerin çekim öncesi değerlendirilmesi gereken seçenekler olduğunu güçlü şekilde vurgulamaktadır (Megarbane, Kassir, Mokbel ve Naaman, 2018).

2. Peri-radiküler Cerrahi

Apikal rezeksiyon, endodontik cerrahi alanına giren bir prosedürdür. Genellikle kök kanal tedavisinin başarısız olduğu ya da periapikal lezyonun devam ettiği durumlarda başvurulacak bir tedavi seçeneğidir. Bu işlemde enfekte olmuş veya tedavi edilemeyen apikal bölge ve kök ucunun yaklaşık 2–3 mm'lik kısmı cerrahi olarak çıkartılır. Ardından retrograd dolgu yerleştirilerek apikal bölge sızdırmaz hale getirilir (van der Meer ve Stegenga, 2004). Endikasyonları şunlardır:

- Kök kanal tedavisine rağmen iyileşmeyen periapikal lezyonlar
- Kanal içi post, kırık alet veya obstrüksiyon nedeniyle retreatment yapılamaması
- Apikal bölgede apikal delta, lateral kanallar gibi anatomik zorluklar
- Kanal sistemine ulaşamayan anatomik zorluklar
- Tekrarlanan enfeksiyonlara bağlı semptomlar
- Diş kökünde kırık, perforasyon veya yapı bozuklukları gibi cerrahi dışı tedavilerin yetersiz kaldığı durumlar

Kontrendikasyonları ise:

- Onarılamayacak kron/kök oranı

- Şiddetli periodontal destek kaybı
- Kontrolsüz sistemik hastalıklar
- Cerrahiye izin vermeyen anatomik yapılar

Apikal rezeksiyon tekniklerinden konvansiyonel cerrahi sıklıkla uygulanmakla birlikte günümüzde mikroskopik cerrahi, ultrasonik uçlar ve MTA gibi biyolojik uyumlu dolgu materyalleri gibi gelişmelerle başarı oranları artmıştır (Öğütü ve Karaca, 2018a). Modern apikal mikrocerrahi ile daha hassas ve kontrollü rezeksiyonlar yapılabilmekte, çevre dokulara minimum travma uygulanmaktadır (Sánchez-Herrera, Facchera, Palma-Carrió ve Pérez-Leal, 2025).

Klinik çalışmalar göstermektedir ki apikal cerrahi ile tedavi edilen dişlerde yüksek başarı oranları elde edilebilmektedir. Örneğin, bir klinik çalışmada modern cerrahi teknikler ve uygun kök-uç dolgu materyalleri ile yapılan apikal cerrahide başarı oranı %88,4 olarak rapor edilmiştir (Öğütü ve Karaca, 2018b). Bu vakalarda başarı, hem klinik hem de radyografik iyileşmenin bir arada değerlendirilmesiyle belirlenir. Bu takip genellikle 1 yıl veya daha uzun sürelidir (von Arx, 2011).

Retrospektif analizlerde ise cerrahi sonrası iyileşme oranlarının çoğu olguda yüksek olduğu ve periapikal kemik dokusunun yeniden yapılandığı bildirilmiştir. 1980 ve 1990'larda yapılan retrospektif çalışmalar, 1 yıl sonra klinik iyileşme oranlarını %95'in üzerinde rapor etmiştir (Özbayrak ve Akyüz, 2013). Buna karşın cerrahi prosedürler tüm vakalar için uygun değildir; özellikle sistemik sağlık durumu, lezyonun genişliği ve diş tipi gibi faktörler sonuçları etkileyebilir (Liao ve diğerleri, 2019).

Apikal rezeksiyon, her ne kadar etkili bir seçenek olsa da cerrahi olmayan kanal tedavisi/retreatment ile karşılaştırıldığında bazı durumlarda ikinci bir kanal tedavisi daha faydalı olabilir. Sistematik derlemeler, cerrahi ve cerrahi olmayan yaklaşımlar arasında net bir üstünlük göstermekte zorlanmaktadır; kararı etkileyen birçok değişken olduğu vurgulanmaktadır (Bucchi, Rosen ve Taschieri, 2023). Ayrıca, bazı çalışmalar kanal tedavisi veya retreatment gibi konservatif yöntemlerin mümkün olduğu hallerde öncelikle değerlendirilmesini önermektedir (van der Meer ve Stegenga, 2004).

Apikal rezeksiyon, özellikle daha önce başarılı bir kanal tedavisi yapılamamış veya periapikal lezyonların devam ettiği vakalarda diş koruyucu bir cerrahi tedavi seçeneğidir. Modern cerrahi teknikler ve mikroskopik uygulamalar başarı oranlarını artırmış, apikal bölge iyileşmesini optimize etmiştir. Ancak tedavi

planlamasında klinik ve radyografik veriler, hastanın genel durumu ve diğer tedavi seçenekleri titizlikle değerlendirilmelidir.

3. Kök Rezeksiyon Teknikleri

Kök rezeksiyonu, endodontik cerrahi kapsamında uygulanan ve enfekte, tedavi edilemeyen veya anatomik olarak erişilemeyen kök ucunun cerrahi olarak uzaklaştırılmasını içeren bir işlemdir. En yaygın uygulama şekli apikal rezeksiyon (apisektomi) olup, çok köklü dişlerde bazı durumlarda selektif kök rezeksiyonu da uygulanabilmektedir. Temel amaçları şunlardır:

- İnatçı periapikal enfeksiyonun elimine edilmesi
- Apikal delta ve lateral kanalların uzaklaştırılması
- Kök kanal sisteminin apikalden sızdırmazlığının sağlanması
- Dişin ağızda fonksiyonel olarak korunması

Apikal rezeksiyon, genellikle cerrahi olmayan kanal tedavisinin veya retreatment uygulamasının başarısız olduğu vakalarda endikedir (Kim ve Kratchman, 2006a).

Konvansiyonel apikal rezeksiyon tekniğinde önce tam kalınlık flep kaldırılır. Kortikal kemik penceresi açılır. Kök ucunun yaklaşık 2-3 mm'lik kısmı kesilir. Periapikal granülasyon dokusu temizlenir. Retrograd kavite hazırlandıktan sonra kök ucu dolgusu yerleştirilir. Konvansiyonel teknikte genellikle 45°'lik kök rezeksiyonu açısı kullanılır fakat bu yaklaşım dentin tübüllerinin daha fazla açığa çıkmasına ve sızıntıya neden olabilmektedir (Gilheany, Figdor ve Tyas, 1994).

Günümüzde altın standart olarak kabul edilen teknik apikal mikrocerrahidir. Temel özellikleri arasında dental operasyon mikroskobu kullanımı, minimal osteotomi, kök ucunun 0-10° açıda rezeksiyonu, ultrasonik retropreparasyon, biyouyumlu kök ucu dolgu materyalleri bulunmaktadır. Geleneksel yöntemle kıyasla daha az kemik kaybı, daha iyi görüş, daha yüksek başarı oranı görüldüğü bildirilmiştir (Pinto, Marques, Pereira, Palma ve Santos, 2020). Ultrasonik uçlar ile retropreparasyon tekniğinde kök kanal eksenine boyunca daha derin ve merkezi bir kavite oluşturmaya olanak tanır. Minimal dentin kaybı ve perforasyon riski sağlar. Ultrasonik retropreparasyon ile mikrocerrahi birlikte kullanıldığında başarıyı anlamlı şekilde artırdığı bildirilmektedir (Sumi, Hattori, Hayashi ve Ueda, 1996).

3.1. Kök Amputasyonu

Çok köklü bir dişin etkilenen veya hasarlı bir kökünün cerrahi olarak çıkarılması işlemidir. Amaç, dişin geri kalan sağlıklı köklerini ve kronunu

koruyarak dişi kaybetmemektir. Bu işlem genellikle endodontik ve periodontal problemlerin ortak yönetimi çerçevesinde yapılır (Guess, Kratchman ve Karabucak, 2025). Persistan apikal periodontitis lezyonlarında kök kanal tedavisi veya retreatment gerekli olabilir. Bazen sadece kanal tedavisi yeterli olmaz, bu durumlarda cerrahi olarak problemlili kök çıkarılabilir (Corbella ve diğlereri, 2023). Lateral ya da strip perforasyonların olduğu durumlarda özellikle distobukkal kök gibi anatomik olarak zayıf bölgelerde perforasyon varsa, ilgili kökün amputasyonu dişin korunmasını sağlar (Alkahtany, 2021a). Endodontik-periodontal lezyonlarda periapikal ve furkasyon sorunlarının eşlik ettiği kombine lezyonlarda enfekte kök çıkarılarak protetik tedaviye uygun bir diş sağlanabilir. Vertikal kök kırıkları gibi durumlarda kırık kök segmenti varsa amputasyon ile kırık kısmın çıkarılması düşünölebilir (Chen ve diğlereri, 2024).

Cerrahiye karar vermeden önce detaylı klinik ve radyografik muayene sonrası anesteziyi takiben tam kalınlık flep kaldırılır. Patolojik olarak etkileniş kök belirlendikten sonra hasarlı kök alveol kemiğinden serbestleştirilir. Cerrahi olarak çıkarılır. Kök yüzeyi şekillendirmesi ve temizliği yapılır. Gerekirse MTA veya benzeri biyouyumlu materyal ile kaplama yapıldıktan sonra flep kapatılıp periodontal iyileşme beklenir (Alkahtany, 2021b).

Amputasyondan önce başarılı bir endodontik tedavi yapılması önemlidir (Smukler ve Tagger, 1976). Endodontik-periodontal lezyonlarda ilk aşama endodontik tedavi, ardından periodontal cerrahi düşünölmelidir (Chen ve diğlereri, 2024).

3.2. Biküspidizasyon

Biküspidizasyon, özellikle alt çene molar dişler gibi çok köklü bir dişin köklerinin ayrılmasıyla iki ayrı diş gibi fonksiyon gösterecek şekilde cerrahi olarak bölünmesidir. Bu işlemdede, molar dişin mesial ve distal kökleri arasından sert dokuda bir kesi yapılır. Her iki kök segmenti ayrı birer diş gibi bırakılır ve her biri restoratif olarak yeniden yapılandırılır. Biküspidizasyon genellikle sınıf II ya da III furkasyon lezyonları olan alt çene molar dişlerde, periodontal tedavinin tek başına yeterli olmadığı durumlarda uygulanır. Klinik ve radyografik muayene sonrası biküspidizasyona karar verildikten sonra her iki kök ayrılmadan önce kanal tedavisi yapılır. Lokal anestezi altında moların furkasyon seviyesinden vertikal bir sert doku kesisi ile ikiye ayrılır. Kesi sonrası kökler arasındaki alanın temizliği ve kök yüzeylerinin düzeltilmesi yapılır, cep derinlikleri azaltılır. Her iki kök segmenti ayrı bir fonksiyonel diş gibi restore edilir. Okluzal kontaklar yeniden düzenlenir ve biyomekanik dağılım optimize edilir (Nadig ve Sujatha, 2013).

3.3. Hemiseksiyon

Hemiseksiyon, özellikle çok köklü molar dişlerde bir kökün ve bağlı koronal kısmının çıkarılması işlemidir. Bu işlem, sadece tedavi edilemeyecek düzeyde hasarlı veya enfekte olmuş kök çıkartılarak dişin diğer sağlıklı kısmını korumayı hedefler (Green, 1986). Tek bir kökte ileri vertikal kemik kaybı, sınıf III furkasyon defektleri gibi vakalarda uygulanır (Taori, Nikhade ve Mahapatra, 2022). Endodontik tedavi başarısızlığı veya Ulaşılması zor bir yerleşim ya da kanal içinde alet kırılması gibi kontrol edilemeyen kök içi komplikasyonlarda etkilenen kök alınabilir (Ateeq-ur-Rehman ve Munir, 2022). Köklerin kaynaşmış olması, kalan kökün endodontik tedavi için uygun olmaması, kalan kökün protetik planlamada yeri olmaması gibi durumlar hemiseksiyon tedavisi için engel olabilir (Taori ve diğerleri, 2022).

Klinik ve radyografik muayene sonrası hemiseksiyona karar verilen diş lokal anesteziyi takiben tam kalınlık flep kaldırılır. Dişin furkasyon bölgesinde sert dokuda vertikal kesi yapılır ve hasarlı kök ile koronal kısım birlikte çıkarılır. Kalan kök yüzeyi düzeltilir ve periodontal temizliği yapılır. Flep kapatılır. Kalan diş segmenti için işlem öncesi uygun planlama yapılması önemlidir (Sharma, Sharma, Ahad, Gupta ve Mishra, 2018).

4. Kasıtlı Replantasyon

Replantasyon, dental bir yaralanma sonucu dişin soketinden uzaklaşması veya kaza eseri yanlış bir dişin çekilmesi ile alveol soketinden uzaklaşmış bir dişin tekrar alveol soketine yerleştirilmesidir. Transplantasyon, bir diş germi veya dişin kendi alveol soketinden çıkarılıp, mevcut diş eksikliğini gidermek amacıyla aynı veya farklı bir bireydeki farklı bir sokete yerleştirilmesidir. Kasıtlı replantasyon, tedavi amacıyla bir dişin bilerek soketten uzaklaştırılması ve gerekli kök kanal tedavisi ve yüzey manipülasyonları yapıldıktan sonra alveol soketine yeniden yerleştirilmesidir (American Association of Endodontists, 2020).

Tarihte ilk replantasyon vakaları yanlışlıkla çekilen dişlerin hızlıca alveol soketine yerleştirilmesi ile on altıncı yüzyılda Ambrose Pare, on sekizinci yüzyılda Pierre Fauchard tarafından gerçekleştirilmiştir (Grossman, 1966). Bir dişin kasıtlı olarak soketten uzaklaştırıp tekrar yerleştirilmesi fikri ise ilk olarak Mouton tarafından ortaya atılmıştır. Mouton şiddetli dental ağrısı olan hastalarda, diş kuvvetlice hareket ettirip soketinden bir miktar uzaklaştırarak tedavi uygulamıştır. Kasıtlı replantasyon, endodontik kaynaklı hastalıkların tedavisinde uygulanan en eski tedavilerden biridir. Enflame bir diş kasıtlı olarak çekip yeniden yerleştirmek ise on sekizinci yüzyılda Bourdet tarafından gerçekleştirilmiştir (Grossman, 1966; Weinberger, 1948).

1877 yılında Amerika'da Diş ve Ağız Biliminin Tarihi adlı kitapta kasıtlı replantasyon, hastalıklı dişlerin çekilmesi, ağız dışarısında doldurulması ve

sokete tekrar yerleştirilmesi olarak tanımlanmıştır. Bu tarihte bile kasıtlı replantasyonla ilgili çok sayıda vaka raporu olduğu, ancak başarıdan söz etmek için yeterince zaman geçmediği vurgulanmıştır (American Academy of Dental Science (Boston ve Dexter, 1876).

Kasıtlı replantasyonun, travmatik yaralanma sonucu uygulanan basit replantasyondan farkı, tedavi süresi ve uygulama basamaklarıdır. Travmatik avülsiyon sonucu diş replantasyonu, hastanın mümkün olan en kısa sürede kliniğe başvurusu ve dişin sokete yerleştirilmesi şeklinde ilerlerken; kasıtlı replantasyonda diş çekildikten dakikalar sonra soketine yerleştirilir (Counsell, 1964).

Kasıtlı replantasyon başlangıçta daimi dişlerde uygulanmış, 1960'lı yıllarda bazı araştırmacılar süt dişlerinde de kasıtlı replantasyonun diş çekimi sonrası apekslerinin tıkanarak uygulanabileceğini, süt diş köklerinin zaten belli bir süre sonra rezorbe olacağı için prognozu olumsuz etkilemeyeceğini savunmuşlardır (Eisenberg, 1965; Grossman, 1966).

Endikasyonları (Asgary, Alim Marvasti ve Kolahdouzan, 2014; Grossman, 1966) :

- Kök kanal tedavisinde enstrümantasyon sırasında bir aletin kırılmış olması.
- Pulpa taşı gibi kalsifikasyonların varlığında kalsifiye dokuyu uzaklaştırıp kök kanallarının apikaline ilerlemek mümkün olmadığında,
- Kökte ortograd yolla restore edilemeyecek boyutta iatrojenik perforasyon varlığında,
- Apikal cerrahi endikasyonu bulunan dişlerde mental foramen, mandibular kanal, maksiller sinüs gibi anatomik yapılara yakınlık nedeniyle apikal cerrahinin uygulanamayacağı dişlerde,
- Perforasyona sebep olan internal ve eksternal rezorpsiyon vakalarında ortograd olarak tedavi edilemeyen durumlarda,
- Taşkın doldurulmuş kök kanal tedavisi varlığında,
- Kurvatürlü kök kanallarında çalışma boyuna erişilemeyip yeterli şekillendirme ve dezenfeksiyonun yapılamadığı durumlarda,
- Apikal dallanmalar nedeniyle temizlenemeyen alan varlığında,
- Tedavi sırasında kök apeksi dışına taşıp periapikal dokuda serbestçe duran yabancı cisim varlığında,
- Endodontik tedavi tekrarı sırasında mevcut kırık alet nedeniyle apikal dokulara ulaşılamayan durumlarda,
- Kanaldan uzaklaştırılamayan fiber post varlığında, kasti replantasyon uygulanabilir.

Kontrendikasyonları (Abduljabbar ve Faydhi, 2019; Cho, Lee ve Kim, 2017) :

- Dişin replante edilebileceği uygun/sağlıklı bir soketin olmadığı durumlarda,
- Dişin çekilmesi sırasında krunun kırılma ihtimalinin yüksek olduğu durumlarda,
- Aşırı dilasere köklere sahip dişler gibi atravmatik çekimin mümkün olmadığı dişlerde,
- Restore edilemeyecek boyutta kron kaybı olan dişlerde, kasıtlı replantasyon kontrendikedir.

İşlem Basamakları

Kasıtlı replantasyon endikasyonu koyulan diş anestezi altında atravmatik olarak çekilir. Diş çekimi sırasında periodontal ligament (PDL) hasarının en az seviyede tutulması tedavi başarısı için en önemli adımlardan birisidir (Emmertsen ve Andreasen, 1966). Bazı araştırmacılar kasıtlı replantasyon amacıyla diş çekimi sırasında PDL hasarına sebep olmamak için dental elevatörlerin kullanılmaması gerektiğini bildirmiştir (Niemczyk, 2001; Nosonowitz ve Stanley, 1984). Diş çekimi yapıldıktan sonra diş, PDL'ye zarar vermemek için kron kısmından nazikçe tutulur. Ulaşılamayan ve temizlenemeyen apikal kanal dallanmalarını uzaklaştırmak için apikalden 3mm rezeksiyon yapılır (Dumsha ve Gutmann, 1985). Kök rezeksiyonunun 3mm'den yapılmasının apikal dallanmaların %98'ini, lateral kanalların ise %93 ünü elimine ettiği gösterilmiştir (Kim ve Kratchman, 2006b).

Kök ucu rezeksiyonunun ardından retrograd kavite preperasyonu yapılır. İdeal bir kavide 3mm derinliğinde kanal anatomik yapısına uyumlu olarak paralel duvarlara sahip olmalıdır. Kök ucu preperasyonu yüksek hızlı el aletleri ve ultrasonik uçlar yardımıyla yapılabilir (Carr ve Murgel, 2010). Kök ucu preperasyonu için ultrasonik uçların el aletlerinden daha verimli olduğu ancak bunların kullanımında da mikroçatlak riskinin artmış olduğu bildirilmiştir (Abedi, Van Mierlo, Wilder-Smith ve Torabinejad, 1995). Kavite uygun dolgu materyaliyle örtülür. Amalgam, süper etoksi benzoik asit, mineral trioksit agregat (MTA) ve biodentin gibi çeşitli kök ucu dolgu materyalleri bu materyallere örnek olarak verilebilir. Üstün sızdırmazlık gösteren MTA ve biodentin gibi biyoseramik esaslı biyouyumlu materyallerin keşfi ile amalgamların kullanımı bırakılmıştır (Torabinejad, 1996; Nair ve diğerleri, 2011; Shokouhinejad ve diğerleri, 2012). Bazı araştırmacılar diş sokete yerleştirilmeden önce soketin apikal kısmının küretajını önerirken (Guy ve Goerig, 1984; Kingsbury ve

Weisenbaugh, 1971), bazı araştırmacılar ise soket küretajının sakıncalı olduğunu, sadece cerrahi aspiratörlerle soketteki pıhtının dikkatlice uzaklaştırılması gerektiğini bildirmişlerdir (Dumsha ve Gutmann, 1985; Kim ve Kratchman, 2006b; Niemczyk, 2001). Diş sokete yerleştirildikten sonra dişin kapanışını kontrol etmek ve yerine tam olarak yerleşmesi için hastanın kuvvetlice ısırması istenir (Dumsha ve Gutmann, 1985; Grossman, 1966). İşlem sonrası bazı araştırmacılar 4 haftaya kadar uzayabilen splint yapılmasını önerirken (Dumsha ve Gutmann, 1985; Grossman, 1966), bazı yazarlar dişte çok fazla mobilite olmadığı sürece splint yapılmamasını önermiştir (Kingsbury ve Weisenbaugh, 1971; Koenig, Nguyen ve Barkhordar, 1988). Literatürde çok sayıda başarılı kasıtlı replantasyon vaka raporu bulunmaktadır (Chaniotis ve Kouimtzis, 2021; Cotter ve Panzarino, 2006; Herrera, Leonardo, Herrera, Miralda ve Bezerra da Silva, 2006).

5. Sonuç

Apikal rezeksiyon, hemiseksiyon, biküspidizasyon, kök amputasyonu ve kasıtlı replantasyon tedavileri, endodontik tedavi ile iyileşme göstermemiş dişlerin tedavisinde, destekleyici ileri cerrahi yöntemleri olarak uygulanabilir.

Referanslar

- Abduljabbar, F. ve Faydhi, S. A. (2019). Intentional replantation of endodontically treated second premolar with chronic apical abscess. *Saudi Endodontic Journal*, 9(3), 222. doi:10.4103/sej.sej_117_18
- Abedi, H. R., Van Mierlo, B. L., Wilder-Smith, P. ve Torabinejad, M. (1995). Effects of ultrasonic root-end cavity preparation on the root apex. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontology*, 80(2), 207-213. doi:10.1016/S1079-2104(05)80204-5
- Alkahtany, M. (2021a). Saving a Natural Tooth in the Implant Era: A Case Report on Noninvasive Surgical Root Amputation. *The Journal of Contemporary Dental Practice*, 22(8), 947-950.
- Alkahtany, M. (2021b). Saving a Natural Tooth in the Implant Era: A Case Report on Noninvasive Surgical Root Amputation. *The Journal of Contemporary Dental Practice*, 22(8), 947-950.
- American Academy of Dental Science (Boston, M. ve Dexter, J. E. (1876). *A history of dental and oral science in America*. Philadelphia : S. S. White. <http://archive.org/details/historyofdentalo00amer adresinden erişildi>.
- American Association of Endodontists. (2020). *Glossary of Endodontic Terms*. AAE. <https://www.aae.org/specialty/clinical-resources/glossary-endodontic-terms/> adresinden erişildi.
- Asgary, S., Alim Marvasti, L. ve Kolahdouzan, A. (2014). Indications and Case Series of Intentional Replantation of Teeth. *Iranian Endodontic Journal*, 9(1), 71-78.
- Ateeq-ur-Rehman ve Munir, B. (2022). Hemisection as an Alternative Treatment for Mandibular Molars with Separated Instrument: A Case Report: *Journal of University Medical & Dental College*, 13(3), 453-455. doi:10.37723/jumdc.v13i3.719
- Bucchi, C., Rosen, E. ve Taschieri, S. (2023). Non-surgical root canal treatment and retreatment versus apical surgery in treating apical periodontitis: A systematic review. *International Endodontic Journal*, 56 Suppl 3, 475-486. doi:10.1111/iej.13793
- Carr, G. B. ve Murgel, C. A. F. (2010). The Use of the Operating Microscope in Endodontics. *Dental Clinics of North America*, 54(2), 191-214. doi:10.1016/j.cden.2010.01.002
- Chaniotis, A. ve Kouimtzis, T. H. (2021). Intentional replantation and Biodentine root reconstruction. A case report with 10-year follow-up. *International Endodontic Journal*, 54(6), 988-1000. doi:10.1111/iej.13475
- Chen, B., Zhu, Y., Lin, M., Zhang, Y., Li, Y., Ouyang, X., ... Yan, F. (2024). Expert consensus on the diagnosis and therapy of endo-periodontal lesions.

- Cho, S.-Y., Lee, S.-J. ve Kim, E. (2017). Clinical Outcomes after Intentional Replantation of Periodontally Involved Teeth. *Journal of Endodontics*, 43(4), 550-555. doi:10.1016/j.joen.2016.11.024
- Corbella, S., Walter, C. ve Tsesis, I. (2023). Effectiveness of root resection techniques compared with root canal retreatment or apical surgery for the treatment of apical periodontitis and tooth survival: A systematic review. *International Endodontic Journal*, 56 Suppl 3, 487-498. doi:10.1111/iej.13808
- Cotter, M. R. ve Panzarino, J. (2006). Intentional Replantation: A Case Report. *Journal of Endodontics*, 32(6), 579-582. doi:10.1016/j.joen.2005.08.004
- Counsell, L. A. (1964). INTENTIONAL REIMPLANTATION OF TEETH; REPORT OF TWO CASES. *Oral Surgery, Oral Medicine, and Oral Pathology*, 18, 681-685. doi:10.1016/0030-4220(64)90069-6
- Dumsha, T. C. ve Gutmann, J. L. (1985). Clinical guidelines for intentional replantation. *The Compendium of Continuing Education in Dentistry*, 6(8), 604, 606-608.
- Eisenberg, M. D. (1965). REIMPLANTATION OF A DECIDUOUS TOOTH. *Oral Surgery, Oral Medicine, and Oral Pathology*, 19, 588-590. doi:10.1016/0030-4220(65)90399-3
- Emmertsen, E. ve Andreasen, J. O. (1966). Replantation of Extracted Molars a Radiographic and Histological Study. *Acta Odontologica Scandinavica*, 24(3), 327-346. doi:10.3109/00016356609028225
- Gilheany, P. A., Figdor, D. ve Tyas, M. J. (1994). Apical dentin permeability and microleakage associated with root end resection and retrograde filling. *Journal of Endodontics*, 20(1), 22-26. doi:10.1016/s0099-2399(06)80022-1
- Green, E. N. (1986). Hemisection and root amputation. *Journal of the American Dental Association* (1939), 112(4), 511-518. doi:10.14219/jada.archive.1986.0050
- Grossman, L. I. (1966). Intentional replantation of teeth. *The Journal of the American Dental Association*, 72(5), 1111-1118. doi:10.14219/jada.archive.1966.0125
- Guess, G., Kratchman, S. ve Karabucak, B. (2025). Root Amputation/Root Resection: An Efficient, Effective Means to Save a Multirooted Tooth. *Compendium of Continuing Education in Dentistry (Jamesburg, N.J.: 1995)*, 46(2), 72-76.
- Guy, S. C. ve Goerig, A. C. (1984). *Intentional Replantation: Technique and Rationale*. Quintessence Publishing Co, Inc.
- Herrera, H., Leonardo, M. R., Herrera, H., Miralda, L. ve Bezerra da Silva, R. A. (2006). Intentional replantation of a mandibular molar: Case report and 14-

- year follow-up. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontology*, 102(4), e85-e87. doi:10.1016/j.tripleo.2006.02.008
- Kim, S. ve Kratchman, S. (2006a). Modern endodontic surgery concepts and practice: A review. *Journal of Endodontics*, 32(7), 601-623. doi:10.1016/j.joen.2005.12.010
- Kim, S. ve Kratchman, S. (2006b). Modern Endodontic Surgery Concepts and Practice: A Review. *Journal of Endodontics*, 32(7), 601-623. doi:10.1016/j.joen.2005.12.010
- Kingsbury, B. C. ve Weisenbaugh, J. M. (1971). Intentional Replantation of Mandibular Premolars and Molars -. *The Journal of the American Dental Association*. [https://jada.ada.org/article/S0002-8177\(71\)35022-6/abstract](https://jada.ada.org/article/S0002-8177(71)35022-6/abstract) adresinden erişildi.
- Koenig, K. H., Nguyen, N. T. ve Barkhordar, R. A. (1988). Intentional replantation: A report of 192 cases. *General Dentistry*, 36(4), 327-331.
- Liao, W.-C., Lee, Y.-L., Tsai, Y.-L., Lin, H.-J., Chang, M.-C., Chang, S.-F., ... Jeng, J.-H. (2019). Outcome assessment of apical surgery: A study of 234 teeth. *Journal of the Formosan Medical Association = Taiwan Yi Zhi*, 118(6), 1055-1061. doi:10.1016/j.jfma.2018.10.019
- Megarbane, J.-M., Kassir, A. R., Mokbel, N. ve Naaman, N. (2018). Root Resection and Hemisection Revisited. Part II: A Retrospective Analysis of 195 Treated Patients with Up to 40 Years of Follow-up. *The International Journal of Periodontics & Restorative Dentistry*, 38(6), 783-789. doi:10.11607/prd.3797
- Nadig, P. L. ve Sujatha. (2013). Bicuspidization: A Case Report. *RGUHS Journal of Dental Sciences*, 5(2). <https://rjds.journalgrid.com/view/article/rjds/12433873> adresinden erişildi.
- Nair, U., Ghattas, S., Saber, M., Natera, M., Walker, C. ve Pileggi, R. (2011). A comparative evaluation of the sealing ability of 2 root-end filling materials: An in vitro leakage study using *Enterococcus faecalis*. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontology*, 112(2), e74-e77. doi:10.1016/j.tripleo.2011.01.030
- Niemczyk, S. P. (2001). Re-inventing intentional replantation: A modification of the technique. *Practical procedures & aesthetic dentistry*, 13(6), 433-9; quiz 440.
- Nosonowitz, D. M. ve Stanley, H. R. (1984). Intentional replantation to prevent predictable endodontic failures. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology*, 57(4), 423-432. doi:10.1016/0030-4220(84)90163-4

- Öğütlü, F. ve Karaca, İ. (2018a). Clinical and Radiographic Outcomes of Apical Surgery: A Clinical Study. *Journal of Maxillofacial and Oral Surgery*, 17(1), 75-83. doi:10.1007/s12663-017-1008-9
- Öğütlü, F. ve Karaca, İ. (2018b). Clinical and Radiographic Outcomes of Apical Surgery: A Clinical Study. *Journal of Maxillofacial and Oral Surgery*, 17(1), 75-83. doi:10.1007/s12663-017-1008-9
- Özbayrak, T. ve Akyüz, N. (2013). APIKAL REZEKSİYON YAPILMIŞ DIŞLERİN KLİNİK VE RADYOLOJİK OLARAK İNCELENMESİ-CLINICAL and RADIOLOGICAL EXAMINATION of APICAL RESECTIONED TEETH. *Journal of Istanbul University Faculty of Dentistry*, 24(4), 167-172.
- Pinto, D., Marques, A., Pereira, J. F., Palma, P. J. ve Santos, J. M. (2020). Long-Term Prognosis of Endodontic Microsurgery-A Systematic Review and Meta-Analysis. *Medicina (Kaunas, Lithuania)*, 56(9), 447. doi:10.3390/medicina56090447
- Sánchez-Herrera, G., Facchera, M., Palma-Carrió, C. ve Pérez-Leal, M. (2025). Approaches in apical microsurgery: Conventional vs. guided. A systematic review. *Oral and Maxillofacial Surgery*, 29(1), 76. doi:10.1007/s10006-025-01372-0
- Sharma, S., Sharma, R., Ahad, A., Gupta, N. D. ve Mishra, S. K. (2018). Hemisection as a Conservative Management of Grossly Carious Permanent Mandibular First Molar. *Journal of Natural Science, Biology, and Medicine*, 9(1), 97-99. doi:10.4103/jnsbm.JNSBM_53_17
- Shokouhinejad, N., Nekoofar, M. H., Razmi, H., Sajadi, S., Davies, T. E., Saghiri, M. A., ... Dummer, P. M. H. (2012). Bioactivity of EndoSequence root repair material and bioaggregate. *International Endodontic Journal*, 45(12), 1127-1134. doi:10.1111/j.1365-2591.2012.02083.x
- Smukler, H. ve Tagger, M. (1976). Vital root amputation. A clinical and histological study. *Journal of Periodontology*, 47(6), 324-330. doi:10.1902/jop.1976.47.6.324
- Sumi, Y., Hattori, H., Hayashi, K. ve Ueda, M. (1996). Ultrasonic root-end preparation: Clinical and radiographic evaluation of results. *Journal of Oral and Maxillofacial Surgery: Official Journal of the American Association of Oral and Maxillofacial Surgeons*, 54(5), 590-593. doi:10.1016/s0278-2391(96)90639-4
- Taori, P., Nikhade, P. P. ve Mahapatra, J. (2022). Hemisection: A Different Approach From Extraction. *Cureus*, 14(9), e29410. doi:10.7759/cureus.29410
- Torabinejad, M. (1996). Root end filling materials: A review. *Dental Traumatology*. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1600-9657.1996.tb00510.x> adresinden erişildi.

- van der Meer, W. J. ve Stegenga, B. (2004). [Root canal retreatment or surgical apicoectomy?]. *Nederlands Tijdschrift Voor Tandheelkunde*, 111(11), 430-434.
- von Arx, T. (2011). Apical surgery: A review of current techniques and outcome. *The Saudi Dental Journal*, 23(1), 9-15. doi:10.1016/j.sdentj.2010.10.004
- Weinberger, B. W. (1948). *An introduction to the history of dentistry: With medical & dental chronology & bibliographic data*. C.V. Mosby Co. <https://cir.nii.ac.jp/crid/1970586434808048569> adresinden erişildi.

BÖLÜM 7

Advances in Vital Pulp Therapy: Diagnostic Innovations, Regenerative Biology, and Bioceramic-Based Clinical Protocols

Duygu Değirmencioğlu³ & Rama Jaber⁴

³ Assistant Professor, Istanbul Medipol University, Faculty of Dentistry, Department of Endodontics, 0000-0001-9452-5200

⁴ PhD Student, Istanbul Medipol University, Faculty of Dentistry, Department of Endodontics, 0009-0005-5695-5505

Vital pulp therapies are applied to repair exposed pulp tissue and to maintain the vitality of the pulp. These treatments have two primary objectives:

1. To preserve the vitality of the pulp tissue in both primary and permanent teeth
2. To stimulate the formation of protective hard tissue (Kakodkar, Bhargava, & Mulay, 2025). The history of vital pulp therapy dates back to 1756, when Philipp Pfaff placed a small piece of gold over an exposed pulp in an attempt to promote healing (Asgary & Nosrat, 2025).

Until the late 19th century, numerous materials were used empirically based on the belief that pulp healing could be achieved through acid cauterization or thermal cauterization. Later, attention shifted toward the use of disinfectant medicaments (Capping & Dammaschke, 2024). The first scientific study in this field was conducted by Dätwyler in 1921, in which he compared different pulp-capping materials and found zinc oxide–eugenol to be the most successful (Qutieshat & Al Harthy, 2023). Between 1928 and 1930, Hermann investigated the effects of calcium hydroxide on vital pulp tissue and demonstrated that it is a biocompatible material. Calcium hydroxide maintained its popularity as a vital pulp therapy agent until the mid-20th century (Hanna & Prichard, 2020). In 1922, Rebel, drawing on similar antiseptic treatment experiences, emphasized that the exposed pulp was a condemned organ destined for necrosis. He asserted that once an unaffected vital pulp became exposed, healing was impossible and that the pulp should thereafter be regarded as a lost tissue (Castellucci, 2023). However, despite Rebel's assertions, it was later understood that the dental pulp possesses the capacity for recovery and repair. Major advances in vital pulp therapy have replaced the earlier perspective of the pulp as a condemned organ with the modern understanding that an exposed pulp has predictable potential for healing and regeneration (Kahler, Taha, Lu, & Saoud, 2023).

Diagnostic Criteria for Vital Pulp Therapies

According to the current AAE diagnostic terminology, vital pulp is classified into three categories: normal pulp, reversible pulpitis, and irreversible pulpitis, the latter further divided into symptomatic and asymptomatic forms (Abbott, 2024). Traditionally, establishing a pulpal diagnosis requires the clinician to interpret the patient's pain history and to clinically assess the pulpal status using thermal tests (such as cold testing) and the electric pulp test. These tests assist in determining pulpal sensitivity. Tests aimed at determining true pulp vitality such as measurements of pulpal oxygen tension are not yet clinically available (Patro, Meto, Mohanty, Chopra, & Panda, 2022). A primary response elicited during pulp sensitivity testing that indicates a more severe pulpal inflammation is described as an exaggerated, prolonged reaction to cold stimuli. This is explained by the activation of C fibers and the inflammation-induced mechanism of

hypersensitivity(Sooratgar et al., 2021). Additionally, percussion testing helps differentiate pulpal conditions from symptomatic apical periodontitis. The presence of percussion pain, representing mechanical allodynia, may suggest that the pulp has undergone irreversible damage (Shah & Chong, 2022). Intraoral radiographs obtained from the suspected teeth are used to evaluate root development and hard-tissue alterations. Historically, clinical test results have not shown strong correlation with the histological status of the pulp (Raoof, Vazavandi, Parizi, & Hatami, 2022). The traditional view that vital pulp therapies are consistently successful only in cases of reversible pulpitis is now evolving. [4–6] Pulpitis can be interpreted as a condition graded both temporally and spatially. The terms used for this grading include: initial, mild, moderate, severe pulpitis (Kahler et al., 2023). Ongoing studies aim to better define pulpal status by understanding the role of inflammatory mediators. For example, Point-of-Care Testing (POCT) using dentinal fluid (without pulp exposure) or pulpal blood (without exposure) can help identify biomarkers associated with tissue degradation such as MMP-9 (Harikrishnan, Nesamani, & Sherin, 2025). In the absence of molecular biological tests in clinical practice, the direct visualization of the pulp under a surgical microscope provides valuable information regarding the suitability of the case for vital pulp therapy (Kahler et al., 2023). Additionally, direct observation of the pulp tissue during and after achieving hemostasis offers further insight into the pulpal condition. The direct clinical visualization of the pulp indicates that even symptomatic pulps may be considered candidates for vital pulp therapy (Duncan, 2022). According to current concepts, in cases of irreversible pulpitis, once the causative stimulus (e.g., caries) is removed, the pulp tissue no longer retains the capacity for healing. Pulpectomy and root canal treatment are therefore required. Moreover, even when clinical diagnosis correlates with the histological condition, the clinical pattern of symptoms does not necessarily reflect the regenerative capacity of the tissue (D. Ricucci, Siqueira Jr, Li, & Tay, 2019). Mature teeth diagnosed with irreversible pulpitis and exhibiting radiographic rarefaction have been successfully treated—without the need for root canal therapy or conventional orthograde treatments—through clinical interventions using calcium silicate–based cements (Iaculli & Rodríguez-Lozano, 2022). For all vital pulp therapy procedures, rubber dam isolation, the use of sterile instruments, complete removal of caries, and a well-sealed restoration that prevents bacterial leakage are essential. If these requirements cannot be fulfilled, root canal treatment or extraction should be considered (Capping & Dammaschke, 2024).

The Importance of Age in Vital Pulp Therapies

With increasing age, the pulp becomes more fibrotic and cell-poor, leading to a reduced capacity for repair. However, studies have shown that patient age plays only a minor role in determining treatment success (Moretto, Kopper, & Münchow, 2025). Similarly, factors such as tooth position, as well as the size and

location of the pulpal exposure, also exert only minor influence—comparable to that of age (Asgary & Dianat, 2024). Clinically, early treatment failures (occurring within days or weeks) are multifactorial. Misdiagnosis of the pulpal condition, failure to remove necrotic tissue, or inability to identify necrotic areas are common causes. An incorrect pulpal diagnosis, by overlooking the degree of pulpal inflammation, leads to postoperative pain associated with irreversible pulpitis and pulpal necrosis (Donnermeyer, Dammaschke, Lipski, & Schäfer, 2023). The emergence of new bioactive materials and the adoption of modified treatment protocols have made teeth with deep caries, traumatic injuries, or mechanical exposures candidates for contemporary vital pulp therapy (Al-Ali & Camilleri, 2022). Outcomes vary depending on case selection, the choice of hemostatic agents, the selection of pulp-capping materials, and the placement of a permanent, well-sealed restoration that maintains coronal integrity (Capping & Dammaschke, 2024). The objective of vital pulp therapy is to avoid root canal treatment or, when inevitable, to delay root canal therapy and more advanced restorative procedures (Duncan, 2022).

Procedures That Promote the Formation of a Mineralized Tissue Barrier

According to the AAPD (*American Academy of Pediatric Dentistry*), indirect pulp capping is a procedure performed on teeth with deep carious lesions that show no signs or symptoms of pulpal degeneration (American Academy of Pediatric, 2023). Indirect pulp treatment is indicated in permanent teeth with a normal pulp or with reversible pulpitis, provided that no signs or symptoms of irreversible inflammation are present (Rahaju & Rohadi, 2025). Clinically, because it typically involves the excavation of a deep carious lesion, the procedure is often described in the terminology as the “treatment of deep carious lesions (Lars Bjørndal, 2008). However, the broader and more accurate term is “treatment of dentin near the pulp,” since indirect pulp capping may also be applied in non-carious teeth following dental trauma (Kunert & Lukomska-Szymanska, 2020). Leaving a thin layer of dentin over the pulp introduces a risk of irreversible inflammation due to the possibility of bacterial penetration through the dentinal tubules (Nemen, 2024). To stimulate tertiary dentin formation, the dentin adjacent to the pulp must be disinfected, and a sealing material that prevents bacterial microleakage must be placed (R. Islam et al., 2023). To prevent microbial contamination, cavity disinfection should be performed before excavation using 1–5% sodium hypochlorite (NaOCl) or 2% chlorhexidine (CHX). After caries removal, the cavity should be cleaned again with water spray in conjunction with NaOCl or CHX (Bin-Shuwaish, 2016). NaOCl remains the gold standard due to its tissue-dissolving capability and broad-spectrum antimicrobial activity. CHX may be used in cases where NaOCl is contraindicated, but lacks tissue-dissolution capacity (Cai, Chen, Li, & Jiang, 2023). When sodium hypochlorite is used, potential damage to vital tissues is not considered a significant concern. Indirect pulp capping materials should eliminate

any potential residual microorganisms, neutralize acidic tissues resulting from the carious lesion, remineralize dentin, and stimulate the pulp to form tertiary dentin (Qureshi, E, Nandakumar, Pratapkumar, & Sambashivarao, 2014). Due to the disadvantages associated with aqueous calcium hydroxide suspensions, the use of calcium silicate cements is recommended as an alternative option (Qureshi et al., 2014).

Direct Pulp Capping

Direct pulp capping involves the placement of a dental material directly over a mechanically or traumatically exposed vital pulp, with the aim of sealing the pulpal exposure, preserving pulp vitality, and stimulating reparative dentin formation (Ahlawat et al., 2022). It is performed when pulp exposure occurs during caries removal, trauma, or tooth preparation (R. Islam et al., 2023). However, in pulp exposures resulting from trauma or caries, the degree of inflammation plays a key role in determining the prognosis (Sharma, Durga, & Wadhwa). According to the AAE definition, the pulp beneath a caries-induced exposure is inflamed to a variable and unknown extent (American Academy of Pediatric, 2023). The most significant advancement in direct pulp capping is accurate diagnosis and the removal of acutely inflamed or necrotic tissue (Arnold, Naumova, & Goulioumis, 2019). Unlike root canal therapy, direct pulp capping is a noninvasive and cost-effective procedure (Colloc & Tomson, 2025). Recent studies recommend selective caries removal and intentionally leaving affected dentin in the tooth (Kettle et al., 2025). Three clinical trials have directly compared selective versus non-selective caries removal. Two of these studies evaluated 1- and 5-year outcomes, while the third compared 1-year data. In the second study, two-step caries removal was compared with one-step caries removal, direct pulp capping, and partial pulpotomy (Figundio et al., 2023). After 5 years, pulp vitality was maintained in 60% of cases treated with two-step caries removal. During the same period, vitality was preserved in only 6% of cases treated with direct pulp capping and 11% of those treated with partial pulpotomy. The low success rate was attributed to inadequate disinfection after pulp exposure, the use of Dycal as the capping material, and the extended reliance on temporary restorations (Lone Bjørndal et al., 2017). However, in the third study, indirect pulp capping performed after complete caries removal demonstrated a 100% success rate at 12 months. These findings show that in indirect pulp capping procedures, calcium silicate-based cements are preferable to slowly setting calcium hydroxide cements, which fail to provide reliable short- or long-term pulpal protection (Herbst, Pitchika, Herbst, Kosan, & Schwendicke, 2025). A representative clinical case illustrating the radiographic appearance before and after direct pulp capping is presented in **Figure 1**.



Figure 1. Preoperative and postoperative radiographs of direct pulp capping in a 30-year-old patient with reversible pulpitis.

A: *Preoperative radiograph.* Deep carious lesion approaching the pulp chamber in a mandibular molar. The periodontal ligament space and periapical structures appear normal, consistent with a diagnosis of reversible pulpitis.

B: *Postoperative radiograph following direct pulp capping.* A bioceramic material (MTA) has been placed over the exposure site, showing a stable radiopaque layer beneath the coronal restoration. No periapical pathology is evident, and pulp vitality has been preserved.

Partial Pulpotomy (Shallow or Cvek Pulpotomy)

Partial pulpotomy is the removal of a small portion of the vital coronal pulp while preserving the remaining coronal and radicular pulp tissues (Careddu & Duncan, 2021). During clinical treatment, when pulp exposure occurs as a result of caries removal or trauma, the decision to remove a small or larger portion of the coronal pulp is made following direct visual assessment. The use of a dental operating microscope is strongly recommended in this evaluation (D. Ricucci et al., 2019). Approximately 2–3 mm of coronal pulp is removed from the exposed area using a small round bur under continuous irrigation. If hemostasis cannot be achieved within 5–10 minutes despite the direct application of NaOCl, complete removal of the coronal pulp may be required (Taha & Albakri, 2024). NaOCl plays a critical diagnostic role in distinguishing irreversible pulpitis from reversible pulpitis in the coronal pulp, thereby guiding the decision between partial pulpotomy, full pulpotomy, or pulpectomy (Kahler et al., 2023). In a recent study evaluating MTA and calcium hydroxide pulpotomies, MTA demonstrated superior performance in mature permanent teeth (Jassal, Nawal, Yadav, & Talwar, 2023). It should be noted that the larger volume of capping material required in pulpotomy procedures increases the risk of tooth discoloration when using bismuth oxide–containing calcium silicate cements (Taha & Albakri, 2024). Partial pulpotomy and direct pulp capping are similar procedures, but they differ in the amount of vital pulp remaining after treatment (Singh, Taneja, & Fatima, 2023). Additionally, partial pulpotomy is also preferred as an elective treatment procedure in teeth with anatomical anomalies

such as dens evaginatus and dens invaginatus (Lerdrungroj, Banomyong, & Songtrakul, 2023). According to the AAE (*American Association of Endodontists*), complete pulpotomy is defined as the removal of the coronal portion of the vital pulp while preserving the vitality of the radicular pulp. Similar to the Cvek pulpotomy, it may also be performed as an emergency procedure to provide temporary relief of symptoms. In this procedure, all coronal pulp tissue is removed, and the remaining vital pulp is sealed at the level of the canal orifices. Following successful hemostasis, the treatment is managed similarly to direct pulp capping (Careddu, Lappin, & Duncan, 2024). The AAPD states that pulpotomy is performed in teeth with extensive caries in which the pulp is exposed either cariously or mechanically, provided that no radicular pathology is present. However, recent studies have prompted an update to this definition (Coll, Dhar, Chen, & Crystal, 2024). Numerous studies have shown that in adult teeth diagnosed with irreversible pulpitis, pulpotomy performed using calcium silicate cements can result in the healing of radicular lesions (Tzanetakakis & Koletsi, 2023). It is now well established that pulpotomy can be performed not only in primary teeth and immature permanent teeth, but also in mature permanent teeth (Q. Li, Pu, Zheng, Sun, & Shao, 2025). Additionally, some studies have reported that the use of calcium silicate cements in pulpotomy procedures is effective in reducing pain and maintaining normal tooth function (Haro & Conde, 2025).

Materials for Vital Pulp Therapy

The essential prerequisites for successful vital pulp therapy are the removal of harmful stimuli, control of infection, and the use of a biocompatible capping material. The presence or absence of microorganisms is the key determinant of pulpal healing (Kahler et al., 2023). Tissue responses following pulp-capping procedures—such as collagen synthesis and secretion—generally resemble those observed in connective tissue injuries (Alsofi, Khalil, Binmadi, Al-Habib, & Alharbi, 2022). Microorganisms, bacterial toxins (e.g., lipopolysaccharides), and many restorative materials can damage exposed pulp through dentinal tubules and induce irritation. For this reason, both the pulp and the surrounding dentin must be covered with an appropriate material (Dammashke, 2024).

Hemostatic Profile as a Prognostic Indicator

Recent clinical evidence indicates that the color, quality, and controllability of pulpal bleeding serve as valuable intra-operative prognostic indicators during vital pulp therapy. Studies demonstrate that bright red bleeding that can be controlled within a few minutes is generally associated with a healthy or reversibly inflamed pulp, while dark, viscous bleeding that persists beyond approximately 4–10 minutes is more frequently linked to advanced irreversible inflammation or hyperemic pulp. Although hemostasis time is not a perfect stand-alone diagnostic tool, multiple investigations confirm that prolonged bleeding and discolored, sluggish hemorrhage correlate with poorer outcomes following

partial pulpotomy or direct pulp capping .Therefore, hemostasis characteristics are widely regarded as one of the most practical and clinically relevant intra-operative indicators when deciding between partial pulpotomy, complete pulpotomy, or pulpectomy in teeth with deep caries and symptomatic presentations (Asgary & Shamszadeh, 2025).

Pulp-Capping Materials

- They must create an artificial barrier that prevents microbial penetration between the vital pulp and the oral cavity.
- They must be non-toxic to the pulp.
- They should exhibit antimicrobial properties.
- They must induce pulpal cell activity to promote hard-tissue regeneration and maintain pulpal vitality. (Rajasekar, Abdalla, Huang, & Neelakantan, 2025)

Aqueous Calcium Hydroxide Suspensions

Calcium hydroxide was used for many years as a universal material in vital pulp therapy. However, long-term studies have revealed several disadvantages (Domenico Ricucci, Rôças, Alves, & Siqueira, 2023).

Advantages:

Calcium hydroxide, due to its initially high alkaline pH, stimulates fibroblasts and enzymatic systems. It neutralizes low-pH acids, exhibits antibacterial properties, and contributes to the pulp tissue's defense mechanisms and reparative capacity (Kiran, 2025).

Disadvantages:

It demonstrates poor marginal adaptation to dentin, undergoes degradation and dissolution over time, and can cause resorption in primary teeth. Histologically, it has been shown to exhibit cytotoxicity in cell cultures and to induce apoptosis in pulp cells. Additionally, both calcium hydroxide and calcium silicate-based cements have been reported to produce tunnel defects around the pulp exposure site within the hard-tissue barrier. Tunnel defects are critical when evaluating the seal and quality of the dentin bridge, as these pathways allow bacterial penetration into the pulp (Silva, Pinto, Riche, & Siqueira, 2025).

Fast-Setting Calcium Hydroxide Cements

Compared with aqueous calcium hydroxide suspensions, other calcium hydroxide combinations—such as calcium salicylate ester cements, liners, and putties—have been found to be less suitable for pulp capping because they release lower amounts of hydroxyl ions. Their antimicrobial effects are also weaker (Vu, 2020). In addition, materials such as Dycal, Life, and Kerr Hawe (Bioggio, Switzerland) undergo long-term degradation and dissolution. They demonstrate weaker hard-tissue regeneration and are associated with more frequent inflammatory responses (Dogheim,

Alsamolly, & Noaman, 2021). Fast-setting calcium hydroxide cements based on calcium salicylate esters are not recommended for direct pulp capping or pulpotomy procedures (Dammashke, 2024).

Light-Cured Liners and Cements

To compensate for the disadvantages of conventional calcium hydroxide preparations, light-cured liners and cements containing calcium hydroxide were developed (e.g., *Ultradent Plus*, Ultradent, South Jordan; *Calcimol LC*, VOCO, Cuxhaven, Germany) (Dammashke, 2024). Despite containing composite components, these materials do not possess adequate mechanical strength. Their specific calcium hydroxide-related effects are minimal, and their pH levels are relatively low. Due to their composite content, they also exhibit cytotoxicity (Taghvaei, Ghavami-Lahiji, Evazalipour, & Sadeghpour Galouyak, 2023).

TheraCal LC (Bisco, Schaumburg, IL)

According to the manufacturer, the indication spectrum of this product is similar to that of MTA and calcium silicate cements (CSCs). It contains 45% Portland cement CEM III and 45% composite resin, which allows it to be light-cured, thereby facilitating clinical application (Garcia-Mota, Hardan, & Bourgi, 2022). However, the monomers within its composition are known to be cytotoxic in in-vitro studies. Following pulp capping, hard-tissue formation requires an increase in the cell-cycle activity during tissue healing (Panda, Govind, Sahoo, & Pattanaik, 2023). All light-cured liners, including TheraCal, cause damage to pulpal stem cells when placed in direct contact with the pulp (Moradi, Abbasi, & Bahador, 2023).

The hydration of TheraCal does not fully occur because the material lacks sufficient moisture. Consequently, calcium hydroxide is not released, and only very small amounts of calcium ions are liberated (Elbanna, Atta, & Sherief, 2022). For these reasons, photopolymerizable calcium hydroxide or calcium silicate-containing materials are not recommended for indirect or direct pulp capping (Moradi et al., 2023).

Composite Resins, Dentin Adhesives, and Resin-Modified Glass Ionomer Cements

In the early 1980s, adhesive systems were explored as potential agents for direct pulp capping in cases of carious or mechanically induced pulp exposure. However, these materials did not promote reparative dentin formation and were not biocompatible. They elicited undesirable histological reactions in the pulp tissue, including cytotoxic effects on pulpal cells and subclinical adhesive failure at the pulpal surface (Panda et al., 2023). Applying a thin 0.5-mm layer of dentin adhesive to dentin caused chronic inflammation and dilation of blood vessels within the pulp. Unpolymerized or partially polymerized adhesive components induce apoptosis in pulp cells, as the residual monomers exhibit cytotoxicity

(Ersöz, Aydın, Oktay, Çal, & Karaoğlu, 2025). Even in deep cavities where the pulp is not exposed, these materials pose problems. The remaining dentin thickness may be insufficient, dentinal tubular fluid may interfere with polymerization, and the placement of a thick composite layer can prevent adequate light penetration, further compromising polymerization (Hassan & Khier, 2024). All of these factors lead to an increase in residual monomers and their diffusion toward the pulp. Several clinical studies have shown that dentin adhesives can cause pulpal necrosis in deep cavities (Gözetici-Çil, Çetin, Bittar, & Özcan, 2024). Dentin adhesives and composite resins are not biocompatible and therefore should not be used for indirect or direct pulp capping (Moradi et al., 2023). However, when MTA or other calcium silicate cements are applied directly over the pulp, hydrophilic resins and resin-modified glass ionomer cements may be used in combination with light-cured composites to provide an effective coronal seal (Tavakoli, Araghi, Fathi, & Jalalian, 2024).

MTA

MTA was introduced as a pulp-capping agent in the mid-1990s by Torabinejad and colleagues. Most clinical data on its use in vital pulp therapy concerns ProRoot MTA. It is a hydraulic calcium silicate powder that contains various oxide components, including calcium oxide, ferric oxide, silicon oxide, sodium and potassium oxides, magnesium oxide, and aluminum oxide (Silva, Pinto, Riche, & Siqueira, 2023). MTA stimulates reparative dentinogenesis by activating hard-tissue-forming cells and promoting matrix formation and mineralization. It induces the secretion of growth factors and cytokines from the surrounding dentin, thereby facilitating reparative hard-tissue formation (Galler, Weber, Korkmaz, & Widbiller, 2023). It is not adversely affected by tissue fluids or blood. During setting, the release of calcium ions increases, and signaling molecules associated with reparative barrier formation—such as VEGF, macrophage colony-stimulating factor, TGF- β , and IL-1 β and IL-1 α —are released (Dai, Chen, & Guo, 2024). Compared with calcium hydroxide-based agents, MTA provides superior marginal adaptation. In addition, MTA forms an adherent interfacial layer similar in composition to hydroxyapatite. This layer can be examined using x-ray diffraction, energy-dispersive x-ray analysis, and scanning electron microscopy (SEM) (Radwanski, Piwonski, Szmeczyk, & Sauro, 2023). MTA promotes the migration of progenitor cells (such as fibroblasts) from the central pulp toward the exposure site and stimulates their proliferation and differentiation into odontoblast-like cells (Spagnuolo, De Luca, Iaculli, Barbato, & Valletta, 2023). MTA is biocompatible, non-cytotoxic, exhibits antibacterial activity, and has a surface morphology conducive to reparative calcific bridge formation (Martins, Coelho, & Moreira, 2023). In cases of mechanically exposed healthy pulp or partially inflamed pulp, MTA stimulates the release of dentin matrix components required for hard-tissue repair (Yaemkleebua & Osathanon, 2019). The main disadvantage of MTA is its

potential to cause discoloration in hard tissues. The heavy metals used for radiopacity (particularly **bismuth oxide**) are responsible for this discoloration. When MTA comes into contact with **NaOCl** or blood components, oxidation of these metals leads to visible staining (Luna-Cruz, Aguiar, & Limoeiro, 2024). Other calcium silicate cements contain fewer heavy metals and therefore exhibit minimal discoloration. Radiopacifying agents such as **zirconium oxide** or **tantalum oxide** are particularly color-stable and do not contribute to staining (Lin et al., 2022).

Calcium Silicate Cements

BioAggregate (Innovative Bioceramix, Vancouver, BC, Canada), Biodentine (Septodont, Saint-Maur-des-Fossés, France), MTA-Angelus (Angelus, Londrina PR, Brazil), MTA Bio, MTA Branco (Angelus), Endocem MTA (Maruchi, Wonju-si, Gangwon-do, South Korea), and EndoSequence BC Root Repair Material (Brasseler USA, Savannah, GA) are among the widely known calcium silicate cements.

(Chang, Gaudin, Tolar, Oh, & Moon, 2022). More than 40 different calcium silicate cements have been identified, including EndoBinder, iRoot BP, MicroMega MTA, MTA Bio, MTA Plus, NeoMTA Plus, RetroMTA, Tech Biosealer Capping, TheraCal LC, CEM Cement (calcium-enriched mixture), Grey MTA Plus, MEDCEM MTA, EndoCem Zr, Channels MTA, DiaRoot BioAggregate, and Harvard MTAm (Parirokh & Torabinejad, 2018). The primary components of MTA and newer calcium silicate cements are tricalcium silicate and dicalcium silicate, which are also the main constituents of Portland cement (Mahmoud et al., 2022). Hydraulic tricalcium silicates support the formation of a reparative barrier by rapidly gaining strength upon hydration and by upregulating transcription factors involved in the repair process (X. Li et al., 2018). During the setting reaction of calcium silicate cements, silicon is released in addition to calcium hydroxide (Andrei et al., 2021). The exact role of silicon in hard-tissue formation is still not fully understood; however, it is known to play a role in the early stages of mineralization (X. Li et al., 2018). It has been demonstrated in vitro that silicon can remineralize demineralized dentin (Vilhena, Grecco, González, & D'Alpino, 2023) Both MTA and BioAggregate exhibit antimicrobial activity against *E. Faecalis* (Bolhari, Sooratgar, Pourhajibagher, Chitsaz, & Hamraz, 2021).

Biodentine does not show genotoxic or cytotoxic effects. It is a biocompatible material when placed beneath restorative materials. Biodentine stimulates biomineralization and accelerates hard-tissue formation. (Çelikel, Şimşek Derelioğlu, Şengül, & Okkay, 2024) In one study, indirect pulp capping with Biodentine resulted in the healing of reversible pulpitis (Drouri, El Merini, Sy, & Jabri, 2023). EndoSequence BC root repair material can also be used for pulp capping. It exhibits low toxicity and

shows antibacterial activity against *E. faecalis* (Wang, Shen, & Haapasalo, 2021). Recent and past studies comparing new CSC formulations have shown that in carious pulp exposures of permanent teeth, clinical and radiographic success rates range from 83.4% to 100% over follow-up periods of 1 to 7.4 years (Harms, Schäfer, & Dammaschke, 2019). One study demonstrated that, compared with other restorative materials, clinical outcomes were negatively affected when teeth were restored with glass ionomer cement (GIC) (Lipski et al., 2018). For this reason, GIC should not be used as the definitive restorative material in direct pulp treatments. Hemostasis that cannot be achieved within more than 10 minutes should be evaluated in favor of pulpotomy or pulpectomy. However, the critical factor in this decision is the complete removal of all necrotic tissue (Baranwal et al., 2025). Pulpotomies performed with MTA/CSCs do not exhibit complications such as internal resorption, which have been reported with calcium hydroxide, formocresol, and ferric sulfate pulpotomies (Yildiz & Tosun, 2014). Pulpotomy performed with calcium silicate materials in permanent teeth represents a minimally invasive alternative to conventional root canal treatment.

Temporary vs. Definitive Restorations

Placement of a permanent restoration at the same appointment is ideal. Studies show that failure rates increase by 3–6 times when teeth remain sealed with a temporary restoration for longer than 2–3 weeks. (R. Islam et al., 2023; Polyák, Szalai, Komora, & Vág, 2025)

Treatment Recommendations

1. After adequate local anesthesia is achieved, the clinical crown is disinfected with NaOCl or CHX under rubber dam isolation. Optical magnification (dental operating microscope) is recommended. Cavity outlines should be prepared using a high-speed handpiece with water cooling.

2. Caries should be removed under the microscope using a caries-detecting dye and slow-speed rotary instruments.

3. The cavity and exposure site should be soaked with 1.5%–5.25% NaOCl. Bleeding can typically be controlled by placing a cotton pellet moistened with NaOCl under moderate pressure for 5 minutes. If bleeding persists, the tissue should be considered necrotic, and the bleeding tissue must be removed with a diamond round bur until healthy, bleeding pulp is exposed. Hemostasis that cannot be achieved within more than 10 minutes should be evaluated in favor of pulpotomy or pulpectomy; however, the critical factor is the thorough removal of all necrotic tissue.

4. MTA or a calcium silicate cement (CSC) should be prepared according to the manufacturer's instructions.

5. A 1.5–3 mm layer of the material should be applied over the exposure site, extending onto the surrounding dentin.

6. Excess material should be removed, and the cavity gently dried with a dry cotton pellet. An appropriate bonding surface must be prepared on the peripheral dentin.

The total-etch technique with phosphoric acid is not recommended, as rinsing may displace MTA or CSC. The CSC should be firmly sealed, or a flowable composite/RMGIC should be applied tightly over the cement.

7. Over the CSC, a light-cured flowable compomer, RMGIC, self-etching self-bonding flowable composite, or a flowable composite used in combination with a self-etch dentin adhesive may be placed.

8. The cavity walls should be conditioned with 34%–37% phosphoric acid gel for 60 seconds, rinsed, and followed by application of a dentin adhesive (a fourth-generation two-bottle system is recommended). Avoid using single-bottle self-etch adhesive systems.

9. Apply composite resin using an incremental (layering) technique.

10. Pulp vitality should be reassessed at a 7–10-day follow-up appointment using a cold test. Radiographic evaluation should be performed within the first year only if vitality tests are negative or symptoms persist. Afterwards, assessments may be conducted annually or every two years.

When microbial challenges are absent, dental pulp treated with CSCs demonstrates remarkable regenerative capacity, regardless of patient age. With advances in pulp biology and dental materials, modifications in treatment protocols allow

Failure Mechanisms in Vital Pulp Therapy for more effective preservation of the pulp.

Failures in vital pulp therapy are most frequently attributed to microleakage, which remains the leading long-term cause of pulpal breakdown; inadequate adhesive protocols, use of glass ionomer cement (GIC) as the only definitive restoration, and insufficient isolation significantly increase bacterial penetration and ultimately jeopardize pulpal healing (Ajaj & Alsulaiman, 2023; Kalantzis, Gioti, Sofia, Kodonas, & Gogos, 2024). Another major factor is inadequate hemostasis, where persistent, dark, or viscous bleeding often indicates deeper irreversible inflammation; when bleeding cannot be controlled predictably, postoperative pain, persistent symptoms, or pulpal necrosis are far more likely to occur (Taha & Albakri, 2024; Taha & Khazali, 2017). Material-related failures also account for a substantial proportion of unsuccessful cases—materials such as calcium hydroxide exhibit dissolution over time, poor marginal adaptation, and formation of porous “tunnel defects,” which allow bacterial leakage and

reinfection of the pulp space (Rafiqul Islam et al., 2023). Lastly, operator-related errors such as over-excitation of dentin, overheating during cavity preparation, contamination of the exposure site, or improper placement of bioceramic materials can compromise the biological environment necessary for healing and substantially reduce the success rates of VPT procedures (Duncan, 2022). Collectively, these findings highlight that long-term VPT success depends not only on biomaterial selection but also on strict adherence to biological, operative, and restorative principles.

The clinical success of vital pulp therapy depends on multiple interacting factors, including the biological status of the pulp, the ability to achieve predictable hemostasis, the quality of the coronal seal, the choice and handling of biomaterials, and operator-related variables. The following table provides an integrated overview of the most critical indicators and their prognostic significance, allowing clinicians to rapidly determine the most appropriate VPT procedure in various clinical scenarios. Major predictors of treatment success and failure are summarized in **Table 1**.

Clinical Indicator	What It Suggests About Pulp Status	Recommended VPT Procedure	Prognostic Value	Key Evidence
Bleeding stops within 1–5 minutes, bright red, clean	Healthy or reversible inflammation	Direct pulp capping or partial pulpotomy	Excellent prognosis	Taha & Albakri 2024; Kahler et al. 2023
Bleeding requires 5–10 minutes to control	Moderate inflammation, but tissue still vital	Partial or full pulpotomy	Good prognosis if CSC used	Duncan 2022; Ricucci et al. 2019
Bleeding persists >10 minutes, dark/viscous, sluggish	Deep irreversible inflammation	Full pulpotomy or pulpectomy	Reduced prognosis, higher failure risk	Taha & Khazali 2017; Asgary & Shamszadeh 2025
Clear visualization of necrotic tissue during access	Nonvital coronal pulp	Pulpectomy	Poor VPT candidacy	Ricucci et al. 2019
Microleakage risk (poor seal, GIC used alone, inadequate bonding)	High chance of reinfection	Avoid direct pulp capping unless CSC + proper bonding used	Major long-term failure cause	Ajaj & Alsulaiman 2023; Lipski et al. 2018
Calcium hydroxide planned as capping agent	Risk of dissolution, tunnel defects	Prefer calcium silicate cements (MTA/Biodentine)	Lower success if Ca(OH) ₂ used	Silva et al. 2025; Ricucci et al. 2023
Operator-related errors (over-excitation, overheating, contamination)	Compromised pulp healing environment	Strict isolation + CSC protocol required	Significantly reduces success	Duncan 2022
CSC (MTA/Biodentine) placed with immediate definitive restoration	Proper seal + bioceramic activation	Any VPT procedure	Highest success rates	Harms et al. 2019; Colloc & Tomson 2025

Table 1. Key Clinical Determinants of Success and Failure in Vital Pulp Therapy

This table summarizes the major biological, material-related, and operator-dependent factors that influence the outcome of vital pulp therapy. Hemostasis characteristics, coronal seal integrity, material selection, and procedural accuracy are presented as primary clinical predictors guiding the decision between direct pulp capping, partial pulpotomy, full pulpotomy, or pulpectomy.

References

- Abbott, P. V. (2024). Pulp, root canal and peri-radicular conditions: the need for re-classification. *Iranian Endodontic Journal*, 19(3), 158–165. Retrieved from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC11287045/>
- Ahlawat, M., Grewal, M. S., Goel, M., Bhullar, H. K., Saurabh, & Nagpal, R. (2022). Direct Pulp Capping with Mineral Trioxide Aggregate and Biodentine in Cariously Exposed Molar Teeth: 1-Year Follow-up - An In vivo Study. *J Pharm Bioallied Sci*, 14(Suppl 1), S983–s985. doi:10.4103/jpbs.jpbs_837_21
- Ajaj, R., & Alsulaiman, M. (2023). Assessment of Decision-Making and Material Selection for Vital Pulp Therapy in Deep Carious Lesions: A Study at the Faculty of Dentistry, King Abdulaziz University. *Cureus*, 15(10), e47463. doi:10.7759/cureus.47463
- Al-Ali, M., & Camilleri, J. (2022). The scientific management of deep carious lesions in vital teeth using contemporary materials—A narrative review. *Frontiers in Dental Medicine*. doi:10.3389/fdmed.2022.1048137
- Alsofi, L., Khalil, W., Binmadi, N. O., Al-Habib, M. A., & Alharbi, H. (2022). Pulpal and periapical tissue response after direct pulp capping with EndoSequence Root Repair Material and low-level laser application. *BMC Oral Health*, 22, 523. doi:10.1186/s12903-022-02099-0
- American Academy of Pediatric, D. (2023). Guideline on pulp therapy for primary and immature permanent teeth. *Pediatric Dentistry Reference Manual*, 45(6), 337–345. Retrieved from <https://www.aapd.org/research/oral-health-policies--recommendations/pulp-therapy/>
- Andrei, M., Vacaru, R. P., Coricovac, A., Ilinca, R., Didilescu, A. C., & Demetrescu, I. (2021). The Effect of Calcium-Silicate Cements on Reparative Dentinogenesis Following Direct Pulp Capping on Animal Models. *Molecules*, 26(9). doi:10.3390/molecules26092725
- Arnold, W., Naumova, E., & Goulioumis, V. (2019). Pulp Biology of Deciduous and Permanent Teeth. In (pp. 13–22).
- Asgary, S., & Dianat, O. (2024). Invasive Cervical Root Resorption: A Comprehensive Review on Pathogenesis, Diagnosis, and Treatment. *Iran Endod J*, 19(1), 2–12. doi:10.22037/iej.v19i1.44246
- Asgary, S., & Nosrat, A. (2025). Vital Pulp Therapy: Evidence-Based Techniques and Outcomes. *Iran Endod J*, 20(1), e2. doi:10.22037/iej.v20i1.47141
- Asgary, S., & Shamszadeh, S. (2025). Hemostasis in Vital Pulp Therapy for Children and Adolescents: Does Duration Matter? A Systematic Review of Randomized Clinical Trials. *Journal of Clinical Pediatric Dentistry*, 49(2), [Pages not provided]. doi:[DOI not available]

- Baranwal, H. C., Mittal, N., Vijul, Swetha, B., Raju, G., & Azeez, M. F. (2025). Outcome of full pulpotomy versus partial radicular pulpotomy in mature permanent teeth with symptomatic irreversible pulpitis using Biodentine - A randomized controlled trial. *J Conserv Dent Endod*, 28(9), 937–942. doi:10.4103/jcde.Jcde_468_25
- Bin-Shuwaish, M. S. (2016). Effects and Effectiveness of Cavity Disinfectants in Operative Dentistry: A Literature Review. *J Contemp Dent Pract*, 17(10), 867–879. doi:10.5005/jp-journals-10024-1946
- Bjørndal, L. (2008). Indirect Pulp Therapy and Stepwise Excavation. *Pediatric Dentistry*, 30(3), 225–229. Retrieved from <https://www.aapd.org/globalassets/media/publications/archives/225-9.pdf>
- Bjørndal, L., Reit, C., Bruun, G., Markvart, M., Kjaeldgaard, M., Näsman, P., & Fransson, H. (2017). Treatment of deep caries lesions in adults: 5-year results of a randomized controlled trial using stepwise excavation or direct complete excavation. *Journal of Dental Research*, 96(7), 747–753. doi:10.1177/0022034517697082
- Bolhari, B., Sooratgar, A., Pourhajibagher, M., Chitsaz, N., & Hamraz, I. (2021). Evaluation of the Antimicrobial Effect of Mineral Trioxide Aggregate Mixed with Fluorohydroxyapatite against *E. faecalis* In Vitro. *The Scientific World Journal*, 2021(1), 6318690. doi:<https://doi.org/10.1155/2021/6318690>
- Cai, C., Chen, X., Li, Y., & Jiang, Q. (2023). Advances in the Role of Sodium Hypochlorite Irrigant in Chemical Preparation of Root Canal Treatment. *BioMed Research International*, 2023(1), 8858283. doi:<https://doi.org/10.1155/2023/8858283>
- Capping, D. P., & Dammaschke, T. (2024). Vital Pulp Treatment Modalities. In *Vital Pulp Treatment* (pp. 84–102): Springer.
- Careddu, R., & Duncan, H. F. (2021). A prospective clinical study investigating the effectiveness of partial pulpotomy after relating preoperative symptoms to a new and established classification of pulpitis. *International Endodontic Journal*, 54(10), 1681–1694. doi:10.1111/iej.13629
- Careddu, R., Lappin, M., & Duncan, H. F. (2024). Vital pulp treatment modalities: pulpotomy – partial and complete. In *Vital Pulp Treatment*: Wiley-Blackwell.
- Castellucci, A. (2023). Endo Tribune: The exposed pulp is a lost organ. *Endo Tribune*. Retrieved from <https://epaper-dental-tribune.s3.eu-central-1.amazonaws.com/92732-749c0055/epaper.pdf>
- Chang, S. W., Gaudin, A., Tolar, M., Oh, S., & Moon, S. Y. (2022). Physicochemical and biological properties of four calcium silicate-based endodontic cements. *Journal of Dental Sciences*. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1991790222000630>

- Coll, J. A., Dhar, V., Chen, C. Y., & Crystal, Y. O. (2024). Use of Vital Pulp Therapies in Primary Teeth. *Pediatric Dentistry*, 46(1), 29–38. Retrieved from <https://www.ingentaconnect.com/content/aapd/pd/2024/00000046/00000001/art00003>
- Colloc, T. N. E., & Tomson, P. L. (2025). Vital pulp therapies in permanent teeth: what, when, where, who, why and how? *British Dental Journal*, 238(7), 458–468. doi:10.1038/s41415-025-8560-3
- Çelikel, P., Şimşek Derelioğlu, S., Şengül, F., & Okay, U. (2024). The Role of Graphene and Biodentine™ on Proliferation and Odontoblastic Differentiation of Pulp Stem Cells. *Current Research in Dental Sciences*, 34(4), 291–296. doi:10.17567/currresdentsci.1433057
- Dai, Y., Chen, J., & Guo, W. (2024). Immune responses around biomaterials for vital pulp therapy. *European Cells and Materials*, 47, 239–258. Retrieved from <https://www.ecmjournal.org/papers/vol047/pdf/v047a13.pdf>
- Dammaschke, T. (2024). Vital pulp treatment modalities: direct pulp capping. In *Vital Pulp Treatment*: Wiley.
- Dogheim, A. Y., Alsamolly, W., & Noaman, K. (2021). The inflammatory response of pulp tissue after different direct pulp capping materials at different storage time. *Al-Azhar Journal of Dental Science & Medicine*, 4(2), 45–52. Retrieved from https://ajdsm.journals.ekb.eg/article_182344.html
- Donnermeyer, D., Dammaschke, T., Lipski, M., & Schäfer, E. (2023). Effectiveness of diagnosing pulpitis: A systematic review. *International Endodontic Journal*, 56(S3), 296–325. doi:<https://doi.org/10.1111/iej.13762>
- Drouri, S., El Merini, H., Sy, A., & Jabri, M. (2023). Evaluation of Direct and Indirect Pulp Capping With Biodentine in Vital Permanent Teeth With Deep Caries Lesions. *Cureus*, 15(5), e39374. doi:10.7759/cureus.39374
- Duncan, H. F. (2022). Present status and future directions—Vital pulp treatment and pulp preservation strategies. *International Endodontic Journal*. doi:10.1111/iej.13688
- Elbanna, A., Atta, D., & Sherief, D. I. (2022). In vitro bioactivity of newly introduced dual-cured resin-modified calcium silicate cement. *Dental Research Journal*, 19, Article 1. doi:10.4103/1735-3327.359282
- Ersöz, B., Aydın, N., Oktay, E. A., Çal, İ. K., & Karaoğlu, S. (2025). Effects of universal adhesives on dentin matrix proteins, matrix metalloproteinases and cytokine release of human pulp cells. *Odontology*. doi:10.1007/s10266-025-01107-3
- Figundio, N., Lopes, P., Tedesco, T. K., Fernandes, J. C. H., Fernandes, G. V. O., & Mello-Moura, A. C. V. (2023). Deep Carious Lesions Management with Stepwise, Selective, or Non-Selective Removal in Permanent Dentition: A

- Systematic Review of Randomized Clinical Trials. *Healthcare*, 11(16), 2338. doi:10.3390/healthcare11162338
- Galler, K. M., Weber, M., Korkmaz, Y., & Widbiller, M. (2023). Inflammatory response mechanisms of the dentine–pulp complex and the periapical tissues. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(3), 1480. doi:10.3390/ijms24031480
- Garcia-Mota, L. F., Hardan, L., & Bourgi, R. (2022). Light-cured calcium silicate-based cements as pulp therapeutic agents: a meta-analysis of clinical studies. *Journal of Evidence Based Dental Practice*, 22(3), 101652. doi:10.1016/j.jebdp.2022.101652
- Gözetici-Çil, B., Çetin, T., Bittar, A., & Özcan, M. (2024). Clinical outcomes of selective removal to soft dentin versus firm dentin for deep caries lesions: a randomized controlled trial up to 5 years. *Clinical Oral Investigations*. doi:10.1007/s00784-024-06109-z
- Hanna, S. N., & Prichard, J. (2020). Vital pulp therapy: An insight over the available literature and future expectations. *European Endodontic Journal*, 5(2), 54–64. Retrieved from https://jag.journalagent.com/eurendodj/pdfs/EEJ-44154-REVIEW_ARTICLES-IBRAHIM.pdf
- Harikrishnan, N., Nesamani, R. K., & Sherin, S. A. (2025). Effect of Simvastatin on Expression of Interleukins 6 & 10 and Matrix Metalloproteinase-9 When Used as an Intracanal Medicament in Teeth with Symptomatic Apical Periodontitis. *Journal of Translational Medicine*. doi:10.1186/s12967-025-06579-z
- Harms, C. S., Schäfer, E., & Dammaschke, T. (2019). Clinical evaluation of direct pulp capping using a calcium silicate cement-treatment outcomes over an average period of 2.3 years. *Clin Oral Investig*, 23(9), 3491–3499. doi:10.1007/s00784-018-2767-5
- Haro, H. P. V., & Conde, A. D. E. (2025). The Impact of Vital Pulp Therapy on Normal Root Development in Immature Teeth: A Case Report. *Iranian Endodontic Journal*. Retrieved from <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12318324/>
- Hassan, K. A., & Khier, S. E. (2024). The first composite increment: Dependency on placement technique for interaction behavior with maturing dentin-adhesive bond at pulpal floors in deep occlusal cavities. *Saudi Journal of Oral Sciences*, 11(2). Retrieved from <https://journals.lww.com/sjed/ layouts/15/oaks.journals/downloadpdf.aspx?an=02267492-202411020-00002>
- Herbst, S., Pitchika, V., Herbst, C., Kosan, E., & Schwendicke, F. (2025). Effectiveness of calcium hydroxide compared to hydraulic calcium silicate cements for direct pulp capping in managing deep caries in vital permanent

- teeth: A systematic review and meta-analysis. *International Endodontic Journal*, 58. doi:10.1111/iej.14256
- Iaculli, F., & Rodríguez-Lozano, F. J. (2022). Vital pulp therapy of permanent teeth with reversible or irreversible pulpitis: an overview of the literature. *Journal of Clinical Medicine*, 11(14), 4016. doi:10.3390/jcm11144016
- Islam, R., Islam, M. R. R., Tanaka, T., Alam, M. K., Ahmed, H. M. A., & Sano, H. (2023). Direct pulp capping procedures - Evidence and practice. *Jpn Dent Sci Rev*, 59, 48–61. doi:10.1016/j.jdsr.2023.02.002
- Islam, R., Islam, M. R. R., Tanaka, T., Alam, M. K., Ahmed, H. M. A., & Sano, H. (2023). Direct pulp capping procedures – Evidence and practice. *Japanese Dental Science Review*, 59, 48–61. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jdsr.2023.02.002>
- Jassal, A., Nawal, R. R., Yadav, S., & Talwar, S. (2023). Outcome of partial and full pulpotomy in cariously exposed mature molars with symptoms indicative of irreversible pulpitis: a randomized controlled trial. *International Endodontic Journal*, 56(2), 213–222. doi:10.1111/iej.13872
- Kahler, B., Taha, N. A., Lu, J., & Saoud, T. M. (2023). Vital pulp therapy for permanent teeth with diagnosis of irreversible pulpitis: Biological basis and outcome. *Australian Dental Journal*. doi:10.1111/adj.12997
- Kakodkar, R. J., Bhargava, K. Y., & Mulay, S. A. (2025). Comparative Evaluation of Calcium Ion Release of Two Commercially Available Pulp Capping Agents at Different Time Periods: An In-Vitro Study. *Endo Press*.
- Kalantzis, N., Gioti, M., Sofia, F., Kodonas, K., & Gogos, C. (2024). The management of deep carious lesions and the exposed pulp in fully developed and immature teeth with irreversible pulpitis: a questionnaire-based study among Greek dentists. *Clin Oral Investig*, 28(7), 359. doi:10.1007/s00784-024-05756-6
- Kettle, J., Marshman, Z., Hamilton, A., El-Yousfi, S., Baker, S. R., Banerjee, A., . . . Clarkson, J. E. (2025). Dentists' perspectives on selective caries removal for the management of deep carious lesions in permanent teeth. *BMC Oral Health*, 25(1), 362. doi:10.1186/s12903-025-05699-8
- Kiran, A. (2025). *Crosstalk Between Redox, pH, and TGF- β 1 Signaling Mediates Calcium Hydroxide-Induced Reparative Dentin*. ProQuest Dissertations Publishing, Retrieved from <https://search.proquest.com/openview/f5b0f6c8522ca8eb3de2c2a971aa38f/1?pq-origsite=gscholar&cbl=18750&diss=y>
- Kunert, M., & Lukomska-Szymanska, M. (2020). Bio-inductive materials in direct and indirect pulp capping—a review article. *Materials*, 13(5), 1204. doi:10.3390/ma13051204

- Lerdrungroj, K., Banomyong, D., & Songtrakul, K. (2023). Current management of dens evaginatus teeth based on pulpal diagnosis. *Journal of Endodontics*, 49(8), 987–994. doi:10.1016/j.joen.2023.06.004
- Li, Q., Pu, Y. F., Zheng, J. J., Sun, W., & Shao, X. (2025). Outcomes and risk factors of pulpotomy in mature permanent teeth with complicated crown fractures: A 12–60-month prospective clinical study. *Journal of Dental Sciences*. doi:10.1016/j.jds.2025.10.008
- Li, X., Pedano, M. S., Camargo, B., Hauben, E., De Vleeschauwer, S., Chen, Z., . . . Van Meerbeek, B. (2018). Experimental tricalcium silicate cement induces reparative dentinogenesis. *Dent Mater*, 34(9), 1410–1423. doi:10.1016/j.dental.2018.06.016
- Lin, H. N., Wang, L. C., Chen, M. S., Chang, P. J., Lin, P. Y., & Fang, A. (2022). Discoloration Improvement by Mechanically-Milled Binary Oxides as Radiopacifier for Mineral Trioxide Aggregates. *Materials*, 15(22), 7934. doi:10.3390/ma15227934
- Lipski, M., Nowicka, A., Kot, K., Postek-Stefańska, L., Wysoczańska-Jankowicz, I., Borkowski, L., . . . Drożdżik, A. (2018). Factors affecting the outcomes of direct pulp capping using Biodentine. *Clin Oral Investig*, 22(5), 2021–2029. doi:10.1007/s00784-017-2296-7
- Luna-Cruz, S. M., Aguiar, B. A., & Limoeiro, A. G. (2024). Tooth discoloration induced by calcium-silicate-based materials: analysis of an experimental cement. *Brazilian Dental Journal*. Retrieved from <https://repositorio.usp.br/item/003224940>
- Mahmoud, O., Al-Afifi, N. A., Farook, M. S., Ibrahim, M. A., Al Shehadat, S., & Alsaegh, M. A. (2022). Morphological and Chemical Analysis of Different Types of Calcium Silicate-Based Cements. *International Journal of Dentistry*, 2022, 6480047. doi:10.1155/2022/6480047
- Martins, M. D., Coelho, F. H., & Moreira, M. S. (2023). Cytotoxicity, biocompatibility and osteoinductive profile of an MTA-hydrogel-based cement: An in vitro and animal study. *International Endodontic Journal*. doi:10.1111/iej.13929
- Moradi, Z., Abbasi, M., & Bahador, A. (2023). Evaluation of cytotoxicity and antibacterial activity of different pulp capping liners. *Biomaterial Investigations in Dentistry*. doi:10.1080/26415275.2023.2287019
- Moretto, C., Kopper, P. M. P., & Münchow, E. A. (2025). Association between patient age and vital pulp therapy outcomes: A systematic review and meta-analysis of prognostic studies. *International Endodontic Journal*. doi:10.1111/iej.14223

- Nemen, L. (2024). Preventive endodontics in mature teeth: the importance of avoiding root canal treatment. *ePublications VU*. Retrieved from <https://epublications.vu.lt/object/elaba:210541804/>
- Panda, P., Govind, S., Sahoo, S. K., & Pattanaik, S. (2023). Analysis of pulp tissue viability and cytotoxicity of pulp capping agents. *Journal of Clinical Medicine*, 12(2), 539. doi:10.3390/jcm12020539
- Parirokh, M., & Torabinejad, M. (2018). Mineral trioxide aggregate and other bioactive endodontic cements: An updated overview – Part II: Other clinical applications and complications. *International Endodontic Journal*, 51(3), 284–317. doi:10.1111/iej.12843
- Patro, S., Meto, A., Mohanty, A., Chopra, V., & Panda, A. K. (2022). Diagnostic Accuracy of Pulp Vitality Tests and Pulp Sensibility Tests for Assessing Pulpal Health in Permanent Teeth: A Systematic Review and Meta-Analysis. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(15), 9599. doi:10.3390/ijerph19159599
- Polyák, M., Szalai, E., Komora, P., & Vág, J. (2025). Six-Month Treatment Outcomes of Vital Pulp Therapy in Adults Using Biomaterials: A Prospective Cohort Pilot Study. *Applied Sciences*, 15, 4276. doi:10.3390/app15084276
- Qureshi, A., E, S., Nandakumar, Pratapkumar, & Sambashivarao. (2014). Recent advances in pulp capping materials: an overview. *J Clin Diagn Res*, 8(1), 316–321. doi:10.7860/jcdr/2014/7719.3980
- Qutieshat, A., & Al Harthy, N. (2023). Antimicrobial irrigation solutions in root canal treatment: A glance at the past, the present, and the future. *The Open Dentistry Journal*, 17, e187421062306010. Retrieved from <https://opendentistryjournal.com/VOLUME/17/ELOCATOR/e187421062306010/>
- Radwanski, M., Piwonski, I., Szmeczyk, T., & Sauro, S. (2023). Microstructural and Elemental Characterization of Calcium Silicate-Based Sealers. *Nanomaterials*, 13(10), 756. doi:10.3390/nano13100756
- Rahaju, A., & Rohadi, F. I. (2025). Endodontic Management of Irreversible Pulpitis in Mandibular Second Molar: Case Report. *Journal of Health and Dental Sciences*. Retrieved from <https://jhds.fkg.unjani.ac.id/index.php/jhds/article/view/753>
- Rajasekar, V., Abdalla, M. M., Huang, M., & Neelakantan, P. (2025). Next-generation biomaterials for vital pulp therapy: Exploring biological properties and dentin regeneration mechanisms. *Bioengineering*, 12(3), 248. doi:10.3390/bioengineering12030248
- Raoof, M., Vazavandi, E., Parizi, M. T., & Hatami, N. (2022). Clinical, Radiological, and Histological Correlation in Diagnosis of Pulpitis. *Dental Research Journal*, 19(1), 25. Retrieved from

- Ricucci, D., Rôças, I. N., Alves, F. R. F., & Siqueira, J. F. (2023). Outcome of direct pulp capping using calcium hydroxide: A long-term retrospective study. *Journal of Endodontics*, 49(1), 29–36. doi:10.1016/j.joen.2022.10.014
- Ricucci, D., Siqueira Jr, J. F., Li, Y., & Tay, F. R. (2019). Vital pulp therapy: Histopathology and histobacteriology-based guidelines to treat teeth with deep caries and pulp exposure. *Journal of Dentistry*, 86, 25–32. doi:10.1016/j.jdent.2019.06.003
- Shah, P. K., & Chong, B. S. (2022). Endodontic Diagnosis. In *Endodontic Advances and Evidence-Based Clinical Guidelines*: Wiley.
- Sharma, R., Durga, K., & Wadhwa, H. Vital Pulp Therapy for Traumatic Pulpal Exposure in Permanent Teeth: A Path to Healing? Insights From Existing Systematic Reviews. *Dental Traumatology*, n/a(n/a). doi:<https://doi.org/10.1111/edt.70016>
- Silva, E. J. N. L., Pinto, K. P., Riche, F. N. S. J., & Siqueira, J. F. (2023). A meta-analysis of calcium silicate-based cements and calcium hydroxide as promoters of hard tissue bridge formation. *International Endodontic Journal*. doi:10.1111/iej.14210
- Silva, E. J. N. L., Pinto, K. P., Riche, F. N. S. J., & Siqueira, J. F. (2025). A meta-analysis of calcium silicate-based cements and calcium hydroxide as promoters of hard tissue bridge formation. *International Endodontic Journal*. doi:10.1111/iej.14210
- Singh, D. V. V., Taneja, S., & Fatima, S. (2023). Comparative evaluation of treatment outcome of partial pulpotomy using different agents in permanent teeth—a randomized controlled trial. *Clinical Oral Investigations*, 27, 1597–1605. doi:10.1007/s00784-023-05136-6
- Sooratgar, A., Ahmadi, Z., Asadi, Y., Dibaji, F., Shamshiri, A. R., & Afkhami, F. (2021). Evaluation of Secondary Thermal Hyperalgesia Resulting from Pulpal Inflammation in Patients with Symptomatic Irreversible Pulpitis. *Journal of Endodontics*, 47(6), 902–905. doi:<https://doi.org/10.1016/j.joen.2021.02.010>
- Spagnuolo, G., De Luca, I., Iaculli, F., Barbato, E., & Valletta, A. (2023). Regeneration of dentin-pulp complex: Effect of calcium-based materials on hDPSCs differentiation and gene expression. *Dental Materials*. doi:10.1016/j.dental.2023.04.013
- Taghvaei, N., Ghavami-Lahiji, M., Evazalipour, M., & Sadeghpour Galouyak, S. (2023). Ion release, biocompatibility, and bioactivity of resin-modified calcium hydroxide cavity liners. *BMC Oral Health*, 23, 423. doi:10.1186/s12903-023-03723-3

- Taha, N. A., & Albakri, S. W. (2024). Outcome and prognostic factors for partial and full pulpotomy in the management of spontaneous symptomatic pulpitis in carious mature permanent teeth: a randomized clinical trial. *Journal of Endodontics*, 50(5), 604–612. doi:10.1016/j.joen.2024.01.003
- Taha, N. A., & Khazali, M. A. (2017). Partial Pulpotomy in Mature Permanent Teeth with Clinical Signs Indicative of Irreversible Pulpitis: A Randomized Clinical Trial. *J Endod*, 43(9), 1417–1421. doi:10.1016/j.joen.2017.03.033
- Tavakoli, M., Araghi, S., Fathi, A., & Jalalian, S. (2024). Comparison of coronal sealing of flowable composite, resin-modified glass ionomer, and mineral trioxide aggregate in endodontically treated teeth: An in-vitro study. *Dental Research Journal*, 21(1), Article 13. doi:10.4103/1735-3327.401108
- Tzanetakis, G. N., & Koletsi, D. (2023). Clinical and radiographic outcome of partial pulpotomy using two different calcium silicate materials in mature permanent teeth with symptoms of irreversible pulpitis: A randomized clinical trial. *International Endodontic Journal*, [Volume Not Provided]([Issue Not Provided]), [Start Page Not Provided]–[End Page Not Provided]. doi:10.1111/iej.13955
- Vilhena, F. V., Grecco, S. D. S., González, A. H. M., & D'Alpino, P. H. P. (2023). Regenerative and Protective Effects on Dental Tissues of a Fluoride-Silicon-Rich Toothpaste Associated with a Calcium Booster: An In Vitro Study. *Dent J (Basel)*, 11(6). doi:10.3390/dj11060153
- Vu, T. T. (2020). *Comparative evaluation of mineral trioxide aggregate and acemannan for partial pulpotomy in permanent teeth with incomplete root formation*. Chulalongkorn University, Retrieved from <https://digital.car.chula.ac.th/cgi/viewcontent.cgi?article=1477&context=chulaetd>
- Wang, Z., Shen, Y., & Haapasalo, M. (2021). Antimicrobial and Antibiofilm Properties of Bioceramic Materials in Endodontics. *Materials*, 14(24), 7594. doi:10.3390/ma14247594
- Yaemkleebua, K., & Osathanon, T. (2019). Analysis of hard tissue regeneration and Wnt signalling in dental pulp tissues after direct pulp capping with different materials. *International Endodontic Journal*, 52(7), 1020–1029. doi:10.1111/iej.13162
- Yildiz, E., & Tosun, G. (2014). Evaluation of formocresol, calcium hydroxide, ferric sulfate, and MTA primary molar pulpotomies. *Eur J Dent*, 8(2), 234–240. doi:10.4103/1305-7456.130616

