

Modern ENDODONTİDE GÜNCEL YAKLAŞIMLAR

TEKNOLOJİLER, MATERYALLER VE
KLİNİK UYGULAMALAR



İLERİ
TEKNOLOJİLER



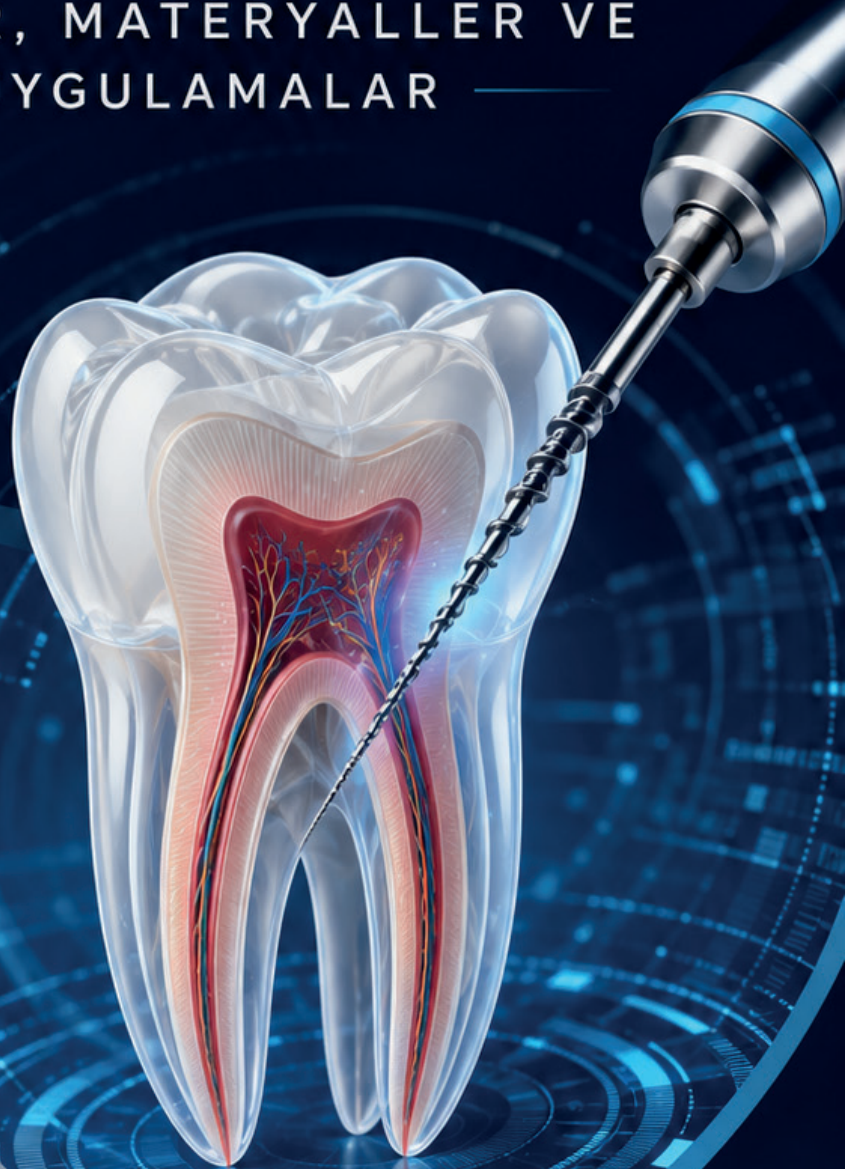
YENİ NESİL
MATERYALLER



KANITA DAYALI
YAKLAŞIMLAR



KLİNİK
UYGULAMALAR



Fatma Begüm PEKER

Hümeysra ÇAPKIN

İmtiyaz Sahibi / Yaşar Hız
Yayına Hazırlayan / Gece Kitaplığı

Birinci Basım / HAZİRAN 2026 - Ankara
ISBN / 978-625-321-143-1

© copyright

Bu kitabın tüm yayın hakları Gece Kitaplığı'na aittir.
Kaynak gösterilmeden alıntı yapılamaz, izin almadan hiçbir yolla çoğaltılamaz.

Gece Kitaplığı

Kızılay Mah. Fevzi Çakmak 1. Sokak
Ümit Apt No: 22/A Çankaya/ANKARA
0312 384 80 40
www.gecekitapligi.com / gecekitapligi@gmail.com

Baskı & Cilt

Bizim Büro
Sertifika No: 42488

MODERN ENDODONTİDE GÜNCEL YAKLAŞIMLAR TEKNOLOJİLER, MATERYALLER VE KLİNİK UYGULAMALAR

Fatma Begüm PEKER¹ , Hümeysra ÇAPKIN²

gece
kitaplığı

¹ Dr.Öğr.Üyesi, Bezmialem Vakıf Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi, Endodonti Anabilim Dalı, <https://orcid.org/0000-0003-2956-729X>

² Uzm.Dt., Özel Klinik, <https://orcid.org/0009-0009-6029-5780>

İÇİNDEKİLER

BÖLÜM 1

ENDODONTİDE KALSİYUM SİLİKAT ESASLI KÖK KANAL PATLARI: FİZİKOKİMYASAL ÖZELLİKLER, BİYOLOJİK DAVRANIŞ VE KLİNİK PERSPEKTİFLER	7
---	----------

BÖLÜM 2

CERRAHİ OLMAYAN YENİDEN KÖK KANAL TEDAVİSİ: ENDİKASYONLAR, GÜNCEL TEKNİKLER, KLİNİK BAŞARIYI ETKİLEYEN FAKTÖRLER ..	45
--	-----------

BÖLÜM 3

KÖK KANAL İRRİGASYONU VE AKTİVASYON SİSTEMLERİ: GÜNCEL YAKLAŞIMLAR VE KLİNİK ÖNERİLER	65
--	-----------

BÖLÜM 4

ELEKTRONİK APEKS BULUCULAR: TEMEL PRENSİPLER, GÜNCEL TEKNOLOJİLER VE KLİNİK UYGULAMALAR	97
--	-----------

BÖLÜM 1

**ENDODONTİDE KALSİYUM SİLİKAT
ESASLI KÖK KANAL PATLARI:
FİZİKOKİMYASAL ÖZELLİKLER,
BİYOLOJİK DAVRANIŞ VE KLİNİK
PERSPEKTİFLER**

1. Giriş

Çok sayıda teknolojik gelişmeye rağmen, kök kanal tedavisinin amacı hâlâ kök kanal boşluğunun uygun şekilde dezenfekte edilmesi ve üç boyutlu olarak doldurulması yoluyla apikal periodontitisin önlenmesi ve iyileştirilmesidir (Ng et al., 2008). Kök kanal dolgusu, mikroorganizmaların ve bunların yan ürünlerinin sızmasını (difüzyonunu) önler; katı materyallerin kullanımından, kök kanal patları ile birlikte kullanılan güta-perka konlarına kadar çeşitli modifikasyonlara maruz kalmıştır (Rossi-Fedele & Ahmed, 2017). Çinko oksit-öjenol, epoksi rezin, cam iyonomer ve silikon esaslı patlar gibi çeşitli kök kanal patı türleri geliştirilmiştir (Zhou et al., 2013). Son on yılda, genellikle “biyoseramik” patlar olarak adlandırılan kalsiyum silikat esaslı patlar (KSEP) piyasaya sürülmüş ve özellikleri, çinko oksit-öjenol esaslı ile epoksi rezin esaslı patların özellikleriyle karşılaştırılarak kapsamlı bir şekilde incelenmiştir (Camilleri, 2017; Luiza Helena Silva Almeida et al., 2017). Piyasada birçok farklı formülasyonu mevcuttur. Geleneksel kök kanal patlarının aksine KSEP'ler, kendilerine özgü bir sertleşme sürecine sahip, hidrolik (suyla sertleşen) ve higroskopik (nem çeken) özelliktedir (Lim et al., 2020). KSEP'ler, özellikle biyouyumluluk, antimikrobiyal özellikler ve biyoaktivite dahil olmak üzere pek çok dikkat çekici özellik sergiler (Camps et al., 2015; M. Collado-González et al., 2017; Güven et al., 2013; Morgental et al., 2011; Mukhtar-Fayyad, 2011; Singh et al., 2016). Bununla birlikte, KSEP'lerin boyutsal stabilitesi çalışmalar arasında çelişkili sonuçlar göstermiştir; bazı çalışmalar sertleşme sırasında büzülme göstermezken, diğerleri hafif bir genleşme olduğunu ortaya koymuştur (Luiza Helena Silva Almeida et al., 2017; Zhou et al., 2013). Sertleşme esnasındaki mineral tabakası oluşumu, biyolojik ortamda dentin duvarları ile kimyasal bir bağ kurarak bu patların tıkama (sızdırmazlık) yeteneklerine katkıda bulunur (Camilleri, 2017; Lim et al., 2020; Luiza Helena Silva Almeida et al., 2017).

Bugüne kadar, laboratuvar çalışmaları KSEP'lerin fizikokimyasal ve biyolojik özellikleri açısından olumlu sonuçlar göstermiş olsa da (Borges et al., 2012; da Silva et al., 2017; Khalil et al., 2016; Vouzara et al., 2018; Xuereb et al., 2015; Zamparini et al., 2019), KSEP'lerin klinik sonuçlarını ele alan yalnızca birkaç kısa vadeli araştırma yayımlanmıştır (Bardini et al., 2021; Chybowski et al., 2018; Zavattini et al., 2020). Dahası, yakın tarihli bir anket, klinik uygulamada KSEP kullanım yöntemlerinin değişken olduğunu ve üretici tavsiyelerinden ziyade pratisyen hekimlerin alışkanlıklarına ya da bu patlar hakkındaki mevcut kanıtlara dayandığını ortaya koymuştur (Guivarc'h et al., 2020). Bu durum, KSEP'lerin hatalı kullanım olasılığına dikkat çekmekte; bu da dolguyu ve dolayısıyla kök kanal tedavisinin başarısını olumsuz

etkileyebilmektedir. Ayrıca bu durum, KSEP'ler üzerine yapılan temel araştırmalar ile bunların klinik uygulamaları arasındaki bir bilgi boşluğunu gözler önüne sermekte ve bu iki yönü birbirine daha iyi bağlama ihtiyacını haklı çıkarmaktadır. Zaman içinde KSEP formülasyonlarının sayısı hızla artmaktadır, bu nedenle bunların spesifik özelliklerini ve klinik perspektiflerini daha iyi anlamak büyük önem taşımaktadır.

ProRoot® Mineral trioksit agregat (MTA) (Dentsply Sirona, Ballaigues, İsviçre) veya Biodentine (Septodont, Saint-Maur-des-Fossés, Fransa) gibi kalsiyum silikat esaslı materyallerin reolojik özellikleri, obturasyon (kanal dolumu) amacıyla gütaperka ile birlikte bir kök kanal patı olarak kullanılmaya uygun değildi. Bu nedenle, son 10 yılda bu amaca yönelik özel kök kanal patı formülasyonları geliştirilmiştir. Bu patlar, çoğu üretici tarafından pazarlama amacıyla genellikle “biyoseramikler” olarak adlandırılmaktadır. Ancak bu terim yeterince kapsayıcı değildir (Lim et al., 2020). Gerçekten de kimyasal olarak biyoseramikler, bileşim açısından geniş bir biyomateryal ailesini temsil eder ve dahası, uygulanma aşamalarında bir sinterleme adımını içerir (Eliaz & Metoki, 2017). Bu sebeple, söz konusu yeni kök kanal patı ailesi, hidrofilik yapıları, kimyasal bileşimleri ve sertleşme reaksiyonları nedeniyle “kalsiyum silikat esaslı patlar” (KSEP) veya “hidrolik kalsiyum silikat esaslı patlar” olarak tanımlanmalıdır (Prati & Gandolfi, 2015). KSEP'ler genellikle sentetik kalsiyum silikattan veya Portland/MTA'dan formüle edilir. Her bir formülasyona dahil edilen katkı maddelerine bağlı olarak KSEP'lerin özelliklerinin büyük ölçüde değişebileceğini (Camilleri, 2015) ve bunun da potansiyel olarak endikasyonlarını ve klinik uygulamalarını etkileyebileceğini vurgulamak büyük önem taşımaktadır.

2. Kalsiyum Silikat Esaslı Kök Kanal Patları

2.1. Fizikokimyasal Özellikler

2.1.1. Sertleşme Reaksiyonu ve Sertleşme Süresi

Geleneksel patların aksine, KSEP'ler hidroliktir ve sertleşme sürecinin tetiklenmesi için suya ihtiyaç duyarlar. Suyun varlığında kalsiyum silikatlar, kalsiyum hidroksit Ca(OH)_2 oluşumuna yol açan bir kalsiyum silikat hidrat jeli (CSH, $\text{CaO.SiO}_2.\text{H}_2\text{O}$) meydana getirir (Torres et al., 2020). Başta CSH kaynaklı silikon (Si^{+4}) ile kalsiyum hidroksit disosiasyonundan (ayrışmasından) kaynaklanan kalsiyum (Ca^{+2}) ve hidroksil (OH^-) iyonları olmak üzere gerçekleşen iyon değişimleri, KSEP'lerin biyolojik özelliklerine katkıda bulunur (Camps et al.,

2015; M. Collado-González et al., 2017; Güven et al., 2013; Mukhtar-Fayyad, 2011). Bu iyonlar farklı etkiler sağlar; Si^{+4} ve Ca^{+2} biyomineralizasyonu teşvik ederken, OH^- iyonları ortamın pH'ını yükselterek antimikrobiyal özellikler kazandırır. Son olarak, fosfat varlığında yapılan mikroskobik incelemeler, kalsiyum fosfat oluşumu nedeniyle KSEP'lerin dentin duvarında “mineral infiltrasyon zonu” olarak bilinen bir ara yüzey tabakası oluşturduğunu; bunun da materyal yüzeyinde apatit öncüllerini ve hidroksiapatit çökmesini indüklediğini göstermiştir (Koutroulis et al., 2019; Prati & Gandolfi, 2015; Tanomaru-Filho et al., 2017).

Sertleşme süresi, materyal örneğinin yüzeyinde oluşturulan girintilerin (indentasyonların) analiz edilmesiyle değerlendirilir; bu girintiler görünmez hale geldiğinde sertleşme süresi kaydedilebilir (Association, 2000; Standardization, 2012). Genel olarak KSEP'lerin, AH Plus® (Dentsply Sirona, York, PA, ABD) gibi geleneksel formülasyonlara kıyasla daha kısa bir sertleşme süresine sahip olduğu bildirilmiştir (Mendes et al., 2018; Zhou et al., 2013). Bununla birlikte, sadece formülasyona değil, aynı zamanda kök kanalındaki neme de bağlı olarak uzamış sertleşme süreleri de vurgulanmıştır (Cristiane Lopes Zordan-Bronzel et al., 2019); zira kök kanalı tamamen kuru olduğunda sertleşme süresinin uzama eğiliminde olduğu kaydedilmiştir (Xuereb et al., 2015). Bu durum, klinik çalışmalar ile laboratuvar çalışmaları arasındaki sertleşme sürelerinin neden farklılık gösterdiğini açıklamaktadır ve patlarla temas eden az miktardaki sıvılar bile bu süreleri etkileyebilir (Al-Haddad & Che Ab Aziz, 2016). Örneğin, in vitro koşullarda BioRoot™ RCS'nin (Septodont, Saint-Maur-des-Fossés, Fransa) sertleşme süresinin 6 saatten daha kısa olduğu, buna karşın MTA Fillapex®'in (Angelus, Londrina, Brezilya) bir hafta içinde tamamen sertleşmediği gösterilmiştir (Prüllage et al., 2016). Sertleşmenin gerçekleşmemesi durumu, BioRoot™ RCS'yi de inceleyen ve temas ortamının (kültür ortamı) gözlenen sertleşme süreleri üzerinde bir etkisi olduğunu belirten başka bir çalışmada da (Kebudi Benezra et al., 2018) bildirilmiştir. Buna tezat olarak, farklı koşullar simüle edildiğinde (artırılmış sıvı alımı ile), hem EndoSequence® BC Sealer™ (Brasseler USA, Savannah, GA, ABD) hem de MTA Fillapex® için sertleşme süresi 3 saatten daha kısa bulunmuştur ki bu süre epoksi veya çinko oksit-öjenol esaslı patlardan çok daha kısadır (Zhou et al., 2013). EndoSequence® BC Sealer™ ile EndoSequence® BC Sealer™ HiFlow (Brasseler USA, Savannah, GA) ürünlerini karşılaştıran başka bir çalışma, her iki formülasyon için de 4 saatlik benzer başlangıç sertleşme süreleri bildirmiştir (Chen et al., 2020). Değişkenlik gösterse de bu değerler, geleneksel patların (çinko oksit-öjenol ve rezin esaslı) değerlerinden genellikle daha düşük kalmaktadır. Son olarak, kök kanal dolumu sırasında ısı uygulanmasının HiFlow® ve Endosequence® BC Sealer™ gibi önceden karıştırılmış (premixed) KSEP'ler için uzamış

bir sertleşme süresiyle sonuçlandığı, BioRoot™ RCS için ise sertleşme sürecinin daha hızlı olduğu gösterilmiştir; bu durum formülasyonun pat özellikleri üzerindeki etkisini bir kez daha vurgulamaktadır (Aksel et al., 2021).

2.1.2. Akışkanlık (Gereç Akıcılığı)

Kök kanal dolumu için uygun olmayan bir akışkanlığa/kıvama sahip olan ilk kalsiyum silikat esaslı materyallerin aksine (Torabinejad et al., 2018), KSEP'lerin akışkanlığı, patın kök kanal boşluğundaki dallanmalara (ramifikasyonlara) ve düzensizliklere iyi bir şekilde dağılmasına imkan tanınmalıdır. Akışkanlık değerleri, karıştırılmış materyal örneğinin iki cam plak arasına yerleştirilmesi ve üzerine bir kütle uygulanmasıyla incelenir. Deneyin sonunda, örneğin çapı belirlenerek materyalin akış kapasitesi değerlendirilir; bu değerin 17 mm'den büyük veya en az bu değere eşit olması gerekir (Association, 2000; Standardization, 2012) (ANSI/ADA, 2000; ISO 6876, 2012). Mevcut çalışmalar arasında MTA Fillapex®, EndoSequence® BC Sealer™ ve Endoseal MTA® (Maruchi, Wonju, Kore) ürünlerinin beklenen minimum değerleri karşıladığı (Candeiro et al., 2012; Kebudi Benezra et al., 2018; Lee et al., 2017; Tanomaru-Filho et al., 2017; Zhou et al., 2013) ve genellikle en yüksek akışkanlık değerlerinin MTA Fillapex® için bildirildiği gösterilmiştir. Bununla birlikte, BioRoot™ RCS asgari standardın biraz altında (16 mm) sonuçlarla karakterize edilmiş olsa da (Khalil et al., 2016), 21 mm'nin üzerindeki değerlerle standart gereksinimleri karşıladığı ancak bu değerin ısı uygulamasıyla azaldığı da belirtilmiştir (Heran et al., 2019). HiFlow® formülasyonu, EndoSequence® BC Sealer™ ürününe kıyasla daha yüksek bir akışkanlık sergilemiş, ancak bu değer ısı uygulamasıyla düşüş göstermiştir (Chen et al., 2020). Genel olarak mevcut literatüre dayanarak, KSEP'lerin akışkanlığının, başta AH Plus® gibi epoksi rezin esaslı patlar olmak üzere geleneksel patlarla genel anlamda karşılaştırılabilir düzeyde olduğu kabul edilmelidir.

2.1.3. Islatılabilirlik (Islatma Yeteneği)

Kök kanal patlarının, dentin duvarlarına karşı iyi bir ıslatma yeteneği ve adezyon (tutunma) göstermesi gerekir (Ha et al., 2018). Islatılabilirlik, patların yayılma kapasitesini ve hem ana hem de yan kanalların yanı sıra dentin tübüllerine de nüfuz edebilme kabiliyetini yansıtır (Mulay et al., 2017). KSEP'ler hidrofilik (su seven) yapıda oldukları için, bu durum nemli kök kanalı duvarlarında iyi bir yayılma yeteneği sağlayabilir (Luiza Helena Silva Almeida et al., 2017). Bu durum, EndoSequence® BC Sealer™ ve EndoSeal MTA® ürünlerinin AH Plus®'a

kıyasla en iyi ıslatma yeteneğini ve adezyonu sergilediğini gösteren yakın tarihli bir çalışma ile doğrulanmıştır (Ha et al., 2018).

2.1.4. Film Kalınlığı

Test edilen materyalin film kalınlığı, pat örneğinin iki cam lam arasına yerleştirilmesi ve bir yük uygulanmasıyla basınç altında belirlenir. ISO 6876/2012 ve ANSI/ADA no 57 standartlarına göre, test koşullarının nihai bir sonucu olarak patlar için film kalınlığının 50 µm'yi aşmaması gerekmektedir (Association, 2000; Standardization, 2012). AH Plus® ile karşılaştırıldığında genel olarak daha yüksek değerler sunsalar da, EndoSequence® BC Sealer™ HiFlow®, Endoseal MTA® ve MTA Fillapex® gibi çeşitli formülasyonlar bu özelliğe uygunluk göstermektedir (Chen et al., 2020; Kebudi Benezra et al., 2018; Zhou et al., 2013). Dahası, BioRoot™ RCS en yüksek film kalınlığı değerlerini sergilemiş (Kebudi Benezra et al., 2018) ve diğer çalışmalar da bu özelliği standart değerlerin biraz üzerinde tanımlamıştır (Heran et al., 2019; Khalil et al., 2016). Burada da BioRoot™ RCS, EndoSequence® BC Sealer™ ve EndoSequence® BC Sealer™ HiFlow® için ısı uygulamasıyla film kalınlığı değerlerinin arttığı bildirilmiştir (Chen et al., 2020; Heran et al., 2019). Ayrıca, KSEP'lere ait bu niteliğin, materyallerin daha iyi boyutsal stabiliteleri ve soğuk hidrolik kondansasyon (SHK) gibi pat odaklı obturasyon teknikleriyle birlikte kullanımları perspektifinde değerlendirilmesi gerektiği düşünülebilir.

2.1.5. Boyutsal Stabilité

KSEP'lerin boyutsal stabilitesi, özellikle pat film kalınlığı arttığında sertleşme sırasında büzülme (büzülme eğilimi) gösteren çinko oksit-öjenol esaslı patlar olmak üzere, geleneksel patlara kıyasla genel olarak daha iyidir (De-Deus et al., 2006; Georgopoulou et al., 1995; Trope et al., 2015). Bu parametrenin en güncel ISO standardında artık yer almadığını belirtmek gerekir. İlk olarak MTA esaslı formülasyonlar için gösterildiği gibi, KSEP'ler % 0.2'ye kadar hafif bir higroskopik genleşme sergileyebilir; ancak bu durum tüm formülasyonlar için vurgulanmamıştır (Trope et al., 2015).

Lee ve arkadaşları (2017); AH Plus®, AD Seal® (Meta Biomed, Cheongju, Kore) ve Radic-Sealer® (Seul, Kore) ile KSEP formülasyonu olan Endoseal MTA® arasındaki boyutsal stabiliteyi karşılaştırmıştır. AH Plus® ve Endoseal MTA®'nın en az boyutsal değişim gösteren materyaller olduğu, özellikle Endoseal MTA®'nın değerlerinin 30 gün sonra bile AH Plus®'tan

daha düşük kaldığı ortaya konmuştur. Diğer iki rezin esaslı formülasyon ise önerilenden daha yüksek değerlere sahip bulunmuştur (Lee et al., 2017). Başka bir çalışmada, AH Plus® ile TotalFill BC Sealer arasında hacimsel değişim açısından anlamlı bir fark bildirilmemiştir (Tanomaru-Filho et al., 2017). Öte yandan MTA Fillapex®, sertleşme sırasında hafif bir büzülme göstermiştir (bu durum formülasyondaki rezin varlığından kaynaklanıyor olabilir); buna karşın EndoSequence® BC Sealer™ % 0.1'in altında da olsa bir genleşme sergilemiştir (Zhou et al., 2013). EndoSequence® BC Sealer™'in genleşmesi, KSEP'in enzimlerle doğrudan temasından etkilenebilmektedir (Marashdeh et al., 2019). Buna tezat olarak, mikro-BT (mikro bilgisayarlı tomografi) kullanılarak daha yüksek bir hacimsel kayıp da bildirilmiş (Cristiane Lopes Zordan-Bronzel et al., 2019), ancak PBS (fosfat tamponlu salin) kullanımıyla bu kaybın daha az düzeyde gerçekleştiği görülmüştür (Torres et al., 2020). KSEP'lerin bu daha iyi boyutsal stabilitesi, özellikle tek kon tekniği olmak üzere soğuk hidrolik kondansasyon ile birlikte kullanılmalarına olanak tanıyan temel gerekçe olarak sıklıkla vurgulanmaktadır. Bu husus, KSEP'lerin çözünürlüğü de dikkate alınarak değerlendirilmelidir.

2.1.6. KSEP'lerin Çözünürlüğü (Solubilitesi)

Genel olarak KSEP'lerin çözünürlüğü, standartların belirlediği kriterleri (%3'ten az olma şartını) her zaman karşılayamasa da geleneksel patlara kıyasla daha yüksek değerler göstermiştir (Association, 2000; Standardization, 2012). Çalışmalar, KSEP'lerin epoksi rezin esaslı patlara göre sistematik olarak daha yüksek bir çözünürlük sergilediğini bildirmektedir (Chen et al., 2020; Kebudi Benezra et al., 2018; Marashdeh et al., 2019; Poggio et al., 2017; Prüllage et al., 2016; Tanomaru-Filho et al., 2017; Torres et al., 2020; Zhou et al., 2013; Cristiane Lopes Zordan-Bronzel et al., 2019). Bununla birlikte, bazı çalışmalar ISO 6876/2012 ve ANSI/ADA önerilerine uygun çözünürlük değerleri rapor ederken, diğerleri etmemiştir. Gerçekten de, ilgili standart test için su kullanılması önerse de çözünürlük değerleri; sertleşme koşulları ve temas sıvısı (su, PBS, kültür ortamı) gibi deneysel şartlara bağlı olarak büyük ölçüde farklılık gösterebilir. Örneğin; BioRoot™ RCS ve MTA Fillapex® için bildirilen çözünürlüğün standart önerilerini karşıladığı (%3'ün altında olduğu) ve PBS kullanımının BioRoot™ RCS çözünürlüğünü daha da düşürdüğü belirtilmiştir (Prüllage et al., 2016). Modifiye edilmiş bir örnek sertleşme yöntemi kullanan ve ağırlık kaybı gereksinimlerini karşılayan Zhou ve arkadaşlarının (2013) çalışmasında da MTA Fillapex® ve EndoSequence® BC Sealer™ için benzer bir durum gözlenmiştir (Zhou et al., 2013). Başka bir çalışma ise EndoSequence® BC Sealer™ ve EndoSequence® BC Sealer™ HiFlow formülasyonları için

düşük çözünürlük oranlarına işaret etmiştir (Chen et al., 2020). Ayrıca, EndoSequence® BC Sealer™'in çözünürlüğü, Esteraz enzimi gibi biyolojik sıvılarla temas ettiğinde PBS'ye kıyasla daha yüksek bulunmuş, ancak her iki koşulda da ISO standart gerekliliklerine uygun kalmıştır (Marashdeh et al., 2019). Öte yandan, klasik veya farklı deney koşullarını kullanan diğer çalışmalar, daha önce bahsedilen KSEP formülasyonları için standart gereksinimlerin çok üzerinde (sıklıkla %10'un üzerinde) çözünürlük değerleri rapor etmiştir (Kebudi Benezra et al., 2018; Poggio et al., 2017; Tanomaru-Filho et al., 2017; Torres et al., 2020; Cristiane Lopes Zordan-Bronzel et al., 2019).

KSEP'lerin çözünürlüğünün incelenmesi önemli bir tartışma konusudur. Nitekim KSEP'lerin yüksek çözünürlüğü, uzun vadeli tıkama (sızdırmazlık) yeteneklerini tehlikeye atabilir (Camilleri, 2017). Ancak mikroskopik analizler, dentin dokusu içine mineral birikimini ve bir infiltrasyon zonunun oluştuğunu göstermiştir ki (Torres et al., 2020) bu durum yukarıdaki endişeyi sorgulanır hale getirebilir. Aslında, KSEP'lerin biyolojik özelliklerinin tam olarak bu çözünürlükleri ve buna bağlı iyon salınımı ile açıklanabileceğine dikkat edilmelidir (Donnermeyer et al., 2019); bu durum KSEP'ler ile dentin duvarları arasında spesifik bir etkileşime (mineral infiltrasyon zonu) yol açar. Ayrıca, KSEP'lerin ait olduğu kimyasal sınıf nedeniyle çözünürlük değerleri gerçekte olduğundan daha yüksek hesaplanıyor olabilir; bu durum, yüksek çözünürlük değerleri ile boyutsal değişimlere ilişkin nispeten daha düşük değerler arasında bazen görülen çelişkileri açıklayabilir (Tanomaru-Filho et al., 2017; Cristiane Lopes Zordan-Bronzel et al., 2019). Bu çelişkili sonuçlar, KSEP'lerin hidrofilik doğasından ötürü çözünürlük ölçümlerinde ortaya çıkan sapmalarla (bias) açıklanabilir. Dahası, sıvı ortamlar (kültür ortamı kullanımı) çözünürlük sonuçlarını güçlü bir şekilde etkileyebildiğinden (Kebudi Benezra et al., 2018), endodontik patların in vivo (klinik) uygulamalarının, in vitro (laboratuvar) test koşullarına kıyasla sulu sıvılarla özellikle daha sınırlı bir temasa sahip olması nedeniyle nispeten daha farklı sonuçlar doğurabileceği hipotezi kurulabilir.

2.1.7. Adezyon–Dentin Duvarlarıyla Etkileşim

KSEP'lerin (Kalsiyum Silikat Esaslı Patlar) dentin duvarlarına olan adezyonu ve bu duvarlarla etkileşimi; push-out (bağlanma) testi, filtrasyon deneyleri veya mikroskopik analizlerle incelenmiştir. Daha önce de belirtildiği gibi KSEP'ler, dentin duvarlarında “mineral infiltrasyon zonu” olarak bilinen spesifik bir arayüzey tabakası oluştururlar (Donnermeyer et al., 2019). Patın hidrasyon ürünleri, sahip oldukları alkalik etkiler nedeniyle arayüzeydeki dentinin kollajen yapısını değiştirir (Pane et al., 2013). Bu değişim, yüksek konsantrasyonlardaki Ca^{+2} ,

OH⁻, ve CO₃²⁻ iyonlarının difüzyonunu kolaylaştıran gözenekli bir yapının oluşmasına yol açarak bu bölgedeki mineralizasyonu destekler (Xuereb et al., 2015). Bu kimyasal ve mikromekanik etkileşim (uzantı benzeri yapılar), KSEP ile dentin arasındaki adezyonun değerlendirilmesindeki temel gerekçeyi temsil eder (Donnermeyer et al., 2019; Oliveira et al., 2016).

Laboratuvar çalışmaları; MTA Fillapex®, TotalFill® BC Sealer™ ve BioRoot™ RCS ile karşılaştırıldığında AH Plus® için daha yüksek push-out bağlanma dayanımı (POBD) değerleri saptamıştır (Carvalho et al., 2017; Donnermeyer, Dornseifer, et al., 2018). Öte yandan Tuncel ve arkadaşları (2015), AH Plus® ile iRoot SP® (IBC, Burnaby, BC, Kanada) ürünlerinin POBD değerlerini karşılaştırmış ve iRoot SP®'nin anlamlı derecede daha iyi sonuçlar verdiğini görmüştür (Tuncel et al., 2015). KSEP'ler ve geleneksel patlar, dentin duvarlarına bağlanma dayanımı ve adezyon açısından değişken sonuçlar sergilemiştir; ancak sadece tek bir çalışma KSEP'ler ile rezin esaslı patlar arasında hiçbir fark olmadığını göstermiştir (Shokouhinejad et al., 2013). Farklı KSEP formülasyonları arasında ve kullanılan kök kanal dolum tekniğine bağlı olarak da bazı varyasyonlar ortaya konmuştur; Delong ve arkadaşları (2015), sıcak obturasyon teknikleri kullanıldığında en düşük adezyonun MTA Plus® (Prevest, Jammu, Hindistan) ile elde edildiğini göstermiştir. Bununla birlikte, her iki pat da tek kon (SC) tekniğiyle kullanıldığında BC Sealer®, MTA Plus®'a göre daha yüksek bağlanma dayanımı değerlerine sahip olmuştur (DeLong et al., 2015).

2.1.8. Güta-Perka ile Pat Arasındaki Adezyon

KSEP'ler hidrofilik (su seven) materyallerdir, güta-perka konlarının yüzeyi ise hidrofobiktir (su iten); bu nedenle söz konusu arayüzey, potansiyel mikroorganizma sızıntısı açısından soru işareti barındırmaya devam etmektedir (Guivarc'h et al., 2020). Bazı üreticiler, KSEP ile güta-perka arasındaki adezyonu artırmak için farklı stratejiler önermiştir. Önceden karıştırılmış (premixed) formülasyonlarla birlikte, “biyoseramik” nanopartiküller ile önceden emprenye edilmiş özel güta-perka konlarının kullanılması önerilirken; Septodont firması, BioRoot™ RCS formülasyonuna organik bir polimer (povidon) dahil ettiğini iddia etmiştir. Mevcut tek çalışma, bu özel güta-perka konları ile ilgili KSEP'ler arasındaki arayüzeyin tatmin edici olmadığını göstermiştir (Mohamed Eltair et al., 2018). Dahası, herhangi bir obturasyon tekniğinden önce dezenfeksiyon amacıyla güta-perkanın sodyum hipoklorit ile temas etmesinin güta-perka konlarını degrade ettiği (yapısını bozduğu) gösterilmiştir (Valois et al., 2005). Bu durum, özel kaplamalı güta-perka konlarının sodyum hipoklorite batırıldığında iddia edilen faydasını

kaybedip kaybetmeyeceği sorusunu akla getirmektedir. Bilgimiz dahilinde, bu özel önceden emprenye edilmiş güta-perka konlarının kullanımını destekleyen mevcut bir bilimsel kanıt bulunmamaktadır. Benzer şekilde, BioRoot™ RCS'ye dahil edilen povidonun etkisi de henüz araştırılmamıştır.

2.1.9. Mikrosertlik

Mikrosertlik, materyallerin belirli bir yük altında deformasyona karşı gösterdiği direnci yansıtır. Bu özellik ISO/ADA gerekliliklerinin bir parçası değildir ve bu nedenle nadiren araştırılmıştır. Mikrosertlik, materyalin sertleşmesinin dolaylı bir ölçümü olarak kullanılabilir (Yang et al., 2018). Patların mikrosertliğini değerlendirmek için Vickers sertlik testi kullanılır. Mikrosertlik, cerrahi olmayan bir kök kanal yenileme tedavisi (retreatment) gerektiğinde KSEP'lerin uzaklaştırılabilmesini etkileyebilir (Guivarc'h et al., 2020; Yang et al., 2018).

2.1.10. Radyopasite (Radyoopaklık)

ISO 6876 standardı, ANSI/ADA 57 numaralı şartnamede olduğu gibi, 1 mm kalınlığındaki kök kanal patı örneği için minimum radyopasiteyi 3 mm alüminyum (Al) eşdeğeri olarak belirlemiştir (Association, 2000; Standardization, 2012). KSEP formülasyonlarına genellikle iki temel radyoopasite ajanı dahil edilir: Portland/MTA esaslı formülasyonlar çoğunlukla bizmut oksit içerirken (Chang, 2018; Parirokh & Torabinejad, 2010), diğer KSEP'lerin formülasyonlarında genellikle zirkonyum oksit yer alır (Torabinejad et al., 2018). Genel olarak, tüm KSEP formülasyonlarında standart şartnamelere uyulmaktadır (Jafari & Jafari, 2017). Farklı KSEP formülasyonları, ISO standartlarına kıyasla daha yüksek radyopasite sergilemiştir. Bu durum BioRoot™ RCS (Khalil et al., 2016), EndoSequence® BC Sealer™, EndosealMTA® ve MTA Fillapex® için ortaya konmuştur (Lee et al., 2017). Üretici talimatlarına göre, TotalFill® BC Sealer HiFlow™, standart TotalFill® BC Sealer™ ürününe kıyasla %20 oranında ek bir radyopasite gösterebilir (FKG Dentaire kataloğu, La Chaux-De-Fonds, İsviçre).

2.2. Biyolojik Özellikler

Daha önce de sunulduğu üzere, KSEP'lerin biyolojik özellikleri, CSH ve kalsiyum hidroksit oluşumuna yol açan bir hidrasyon reaksiyonuna dayanır. Gerçekten de hidrasyonun yan ürünleri olan OH⁻, Ca⁺² ve Si⁺⁴ iyonları; ortamın alkalizasyonunu ve hücre metabolizmasını, özellikle de hücre farklılaşmasını (diferansiyasyonunu) ve doku mineralizasyonunu modüle

etmede rol oynar (An et al., 2015; Han et al., 2013; Shi et al., 2015) Bir biyomateryal olarak KSEP formülasyonlarının özellikle genotoksik ve sitotoksik olmaması, aynı zamanda antimikrobiyal özellikler sergilemesi ve spesifik kullanımlarında uygun konakçı yanıtını indüklemesi gerekir. Biyouyumluluğa dayanan bu kapasiteler, diğer standartların yanı sıra ISO 10993 standart serisi aracılığıyla çerçevelendirilir ve değerlendirilir (Standardization, 2018). Ayrıca, çoğunlukla in vitro koşullarda incelenen bu özelliklerin kullanılan protokollere göre değişiklik gösterdiğini vurgulamak önemlidir. Nitekim biyomateryalin durumu (taze karıştırılmış/sertleşmiş), temas türü (doğrudan temas/ekstreler ve ilgili seyreltmeler) ve seçilen hedef organizmalar (hücre hatları/primer hücre kültürü, planktonik bakteri suşları/organize biyofilmler), klinik kullanımı az veya çok isabetli bir şekilde yansıtacaktır.

2.2.1. Genotoksisite ve Sitotoksisite

Genotoksisite, DNA kırılmalarını veya çekirdek bölünmesi anomalilerini incelemek amacıyla çeşitli protokoller kullanılarak değerlendirilir. Gamma-H2AX odak deneyi (foci assay) kullanılan bir çalışmada, iRoot SP® için hafif bir artış hariç olmak üzere, sertleşmemiş KSEP formülasyonları (BioRoot™ RCS, iRoot SP®, MTA Fillapex®) ile geleneksel patlar (epoksi ve metakrilat esaslı) arasında genotoksisite açısından bir fark vurgulanmamış; buna karşın BioRoot™ RCS'nin periodontal ligament (PDL) hücreleri üzerinde daha az genotoksik olduğu ortaya konmuştur (Eldeniz et al., 2016). Bununla birlikte, bir çinko oksit-öjenol formülasyonu (Tubliseal) ile karşılaştırıldığında, L929 fare fibroblastları üzerinde uygulanan kuyruklu yıldız deneyi (comet assay - DNA kırılmaları) sonucunda iRoot SP® ve EndoSequence® BC Sealer™'in en az genotoksik patlar olduğu gösterilmiştir (Nair et al., 2018). Ayrıca, insan diş eti fibroblast kültürleri sertleşmemiş EndoSequence® BC Sealer™'a maruz bırakıldığında, mikronükleus deneyi kullanılarak yapılan değerlendirmede AH Plus'a kıyasla daha düşük bir genotoksisite potansiyeline yol açmıştır (Candeiro et al., 2016). Son olarak, sertleşmiş MTA Fillapex® ve AH Plus® formülasyonlarının, kullanılan konsantrasyona ve inkübasyon süresine bağlı olmakla birlikte, V79 fibroblastları üzerinde yapılan mikronükleus deneyiyle klasik MTA formülasyonuna kıyasla daha genotoksik olduğu gösterilmiştir (Bin et al., 2012).

Buna paralel olarak sitotoksisite, sertleşmemiş biyomateryal örnekleri kullanılarak PDL hücreleri üzerinde incelenmiş ve BioRoot™ RCS, iRoot SP® ve MTA Fillapex®'in, AH Plus® gibi diğer rezin esaslı patlara kıyasla daha düşük bir etki gösterdiği ortaya konmuştur. Ancak MTA Fillapex®'in, BioRoot™ RCS'den üç kat daha sitotoksik olduğu belirlenmiştir (Eldeniz et al., 2016). Hem taze karıştırılmış hem de sertleşmiş pat örneğini insan PDL hücreleri üzerinde

değerlendiren başka bir çalışmada, BioRoot RCS'nin hem sertleşmiş hem de taze karıştırılmış koşullarda en az sitotoksik pat olduğu, hatta hücre proliferasyonuna (çoğalmasına) izin verdiği gösterilmiştir (Jung et al., 2019). Buna tezat olarak AH Plus®'ın taze karıştırılmış durumda sitotoksik olduğu ancak sertleşmeden sonra sitotoksik olmadığı görülürken; MTA Fillapex ve Pulp Canal Sealer (PCS) hem taze hem de sertleşmiş durumlarda sitotoksik olarak karakterize edilmiştir (Jung et al., 2019). Diş eti fibroblastları üzerinde AH Plus, MTA Fillapex® ve EndoSequence® BC Sealer™ karşılaştırıldığında benzer sonuçlar elde edilmiş ve taze/sertleşmiş koşullarda EndoSequence® BC Sealer™ için daha yüksek hücre canlılığına işaret edilmiştir (Zhou et al., 2015). Aksine, AH Plus® taze karıştırıldığında daha sitotoksik bulunmuş, MTA Fillapex®'in ise her iki koşulda da sitotoksik olduğu bildirilmiştir (Zhou et al., 2015). Sertleşmiş biyomateryal örnekleri kullanılarak L929 fare fibroblastlarında yapılan MTT deneyiyle, çinko oksit-öjenol formülasyonunun EndoSequence® BC Sealer™ ve iRoot SP®'ye kıyasla daha sitotoksik olduğu gösterilmiştir (Nair et al., 2018). İzole edilmiş PDL hücreleri üzerinde sertleşmiş biyomateryal ile doğrudan temas kullanılarak, BioRoot™ RCS için mevcut hücre sayısının, bir çinko oksit-öjenol (PCS) patına kıyasla çok daha fazla olduğu kanıtlanmıştır (Camps et al., 2015). Bu durum, pat ekstreleri kullanılarak yapılan hücre proliferasyonu çalışmalarında da gösterilmiş ve PCS kullanımıyla daha büyük bir düşüşe yol açtığı belirlenmiştir (Camps et al., 2015). Bu sonuçlar, insan PDL fibroblastları üzerinde pat ekstresi kullanan ve PCS ile karşılaştırıldığında BioRoot™ RCS ekstrelerinin kullanımıyla hücre proliferasyonunda bir artış olduğunu gösteren başka bir çalışmada da doğrulanmıştır (Jeanneau et al., 2019). Ayrıca, bir fare osteoblast öncü hücre hattında adenoazin trifosfat lüminesans deneyi kullanılarak KSEP sitotoksitesinin çok daha düşük olduğu da vurgulanmıştır (Giacomino et al., 2019). Gerçekten de AH Plus®'ın, EndoSequence® BC Sealer™ ve ProRoot ES (Dentsply Tulsa Dental Specialties, Tulsa, OK, ABD) ürünlerinden yüz kat daha düşük konsantrasyonlarda bile sitotoksik olduğu ortaya çıkmıştır (Giacomino et al., 2019). Sitotoksosite, Collado-Gonzalez ve arkadaşları tarafından yapılan ve sertleşmiş biyomateryal örneğinin etkilerini değerlendiren iki çalışmada insan PDL kök hücrelerinde (PDLKÜ) de incelenmiş; MTA Fillapex®, Endoseal MTA® ve AH Plus®'ın genel bir sitotoksosite gösterdiğine işaret edilirken, BioRoot™ RCS yüksek düzeyde biyouyumlu olarak karakterize edilmiştir (M. Collado-González et al., 2017; Mar Collado-González et al., 2017). Benzer bulgular, TotalFill® BC Sealer™'in MTA Fillapex® ve AH Plus®'a kıyasla daha düşük bir sitotoksosite indüklediği sonucuna varan Rodríguez-Lozano ve arkadaşları tarafından da insan PDLKÜ'lerinde bildirilmiştir (Rodríguez-Lozano et al., 2017). Son olarak, yakın zamanda sertleşmiş biyomateryallerden elde edilen pat eluatları (özütleri) kullanılarak PDLKÜ'ler

üzerinde yapılan çalışmada, AH Plus®'ın aksine EndoSequence® BC Sealer™ ve EndoSequence® BC Sealer™ HiFlow formülasyonlarının sitotoksik olmadığı gösterilmiştir (Rodríguez-Lozano et al., 2020).

2.2.2. Antimikrobiyal Aktivite

KSEP'lerin antimikrobiyal aktivitesi, daha önce de belirtildiği gibi, büyük ölçüde hidroksil iyonu salınımına bağlı olarak ortamın pH'ını artırabilme yetenekleriyle ilişkilidir. Nitekim birçok çalışma, geleneksel pat formülasyonlarına kıyasla KSEP kullanımıyla pH artışı yaşandığını vurgulamıştır (Candeiro et al., 2012; Khalil et al., 2016; Siboni et al., 2017; Urban et al., 2018; Zamparini et al., 2019; Zhou et al., 2013). Geleneksel patların aksine KSEP'ler, zaman içinde kalıcı olan bir alkalizasyona (ortamın bazikleşmesine) yol açar; ancak bu özelliğin MTA Fillapex® durumunda bazen daha düşük olduğu bildirilmiştir. KSEP'lerin antimikrobiyal aktivitesinin değerlendirilmesi; farklı protokoller, mikroorganizma suşları, temas türleri ve mikroorganizma organizasyon modelleri kullanılarak yaygın bir şekilde çalışılmıştır. Örneğin, planktonik mikroorganizmalar üzerinde doğrudan temas testi ve dentin üzerinde bir biyofilm modeli için sertleşmiş materyal örneği kullanıldığında, TotalFill BC Sealer®'ın hem *E. faecalis* hem de *C. albicans*'a karşı daha etkili olduğu gösterilmiştir (C. L. Zordan-Bronzel et al., 2019). Diğer birçok formülasyonla karşılaştırıldığında, doğrudan temas testi kullanılarak yapılan bir çalışmada, AH Plus®'ın aksine iRoot SP®'nin karıştırmadan hemen sonra, hatta 3 gün sonra bile *E. faecalis*'e karşı hızlı ve belirgin bir etkinlik sergilediği ortaya konmuştur (Zhang et al., 2009). KSEP'lerin antibakteriyel etkisiyle ilgili olarak Candeiro ve arkadaşları (2016), 7 güne kadar uygulanan doğrudan temas testinde EndoSequence® BC Sealer™ ve AH Plus®'ın *E. faecalis*'e karşı benzer bir antibakteriyel etki gösterdiğini bulmuştur [69]. Hem planktonik durumda hem de simüle edilmiş tek türden oluşan (mono-spesifik) biyofilmlerde birden fazla bakteri suşuna karşı yapılan değerlendirmede, TotalFill BC Sealer® ve AH Plus®'ın antibakteriyel aktiviteye sahip olduğu rapor edilmiştir (Kapralos et al., 2018). Bununla birlikte, AH Plus® ilk gün boyunca tüm planktonik ve biyofilm bakteri suşlarına karşı yüksek antibakteriyel aktivite sergilerken, bu özellik daha uzun sürelerde dramatik bir şekilde azalmıştır. TotalFill BC Sealer® kullanımı, planktonik suşlar üzerinde 7 güne kadar antibakteriyel etki gösterirken, mono-spesifik biyofilmlerde, özellikle de *S. aureus* ve *E. faecalis*'e karşı etkisi daha düşük kalmıştır (Kapralos et al., 2018). Enfekte bir kök modelinde *E. faecalis*'in 8 haftalık biyofilmini kullanan Bukhari ve Karabucak; AH Plus® ile karşılaştırıldığında, EndoSequence® BC Sealer™'ın 1. günden itibaren ve 2 haftaya kadar olan

süreçte daha üstün bir antibakteriyel etki gösterdiğini kanıtlamıştır (Bukhari & Karabucak, 2019). Antibakteriyel özellik ayrıca; BioRoot™ RCS, MTA Fillapex® ve AH Plus® için *E. faecalis*'e karşı bir agar difüzyon testi ve tübül içi enfeksiyon modeli vasıtasıyla, kullanılan son yıkama solüsyonuna (irriganta) bağlı olarak da incelenmiştir. Formülasyonların, EDTA kullanımından sonra PBS kullanımına kıyasla daha yüksek antimikrobiyal etki sergilediği ve en yüksek aktiviteyi BioRoot™ RCS'nin gösterdiği sonucuna varılmıştır (Arias-Moliz & Camilleri, 2016).

Genel olarak KSEP'ler, geleneksel patlara benzer veya onlardan daha yüksek antimikrobiyal özellikler sunmuştur. Ancak, antimikrobiyal özelliklerin değerlendirilmesinde bir standardizasyon eksikliği olduğuna dikkat çekilmiştir (Camilleri et al., 2020). Dahası, klinisyenin endodontik patların antibakteriyel özelliklerine güvenmek yerine, kök kanalının dezenfeksiyonu ve temizliği işlemlerine bel bağlaması gerektiği vurgulanmalıdır.

2.2.3. Biyoaktivite

Bir biyomateryal biyouyumlu olarak nitelendirilebilse de, biyoaktif bir özelliğe sahip olması; rejeneratif (yenileyici) basamakların indüklenmesi, inflamasyonun kontrol altına alınması veya her ikisi birden yoluyla doku iyileşmesini sağlayan metabolik/hücreye özgü olayları uyarma yeteneğini ifade eder. Kök kanal patları özelinde ele alındığında; mezenkimal kök hücre migrasyonu (göçü), büyüme faktörü salgılanması ve hücre farklılaşması gibi süreçler periapikal iyileşmede rol oynarken, hücrelerin pro-inflamatuar faktör salgılamasının/ekspresyonunun modüle edilmesi veya bağışıklık hücrelerinin bölgeye çekilmesi gibi mekanizmalar periapikal inflamasyonun ortadan kalkmasıyla ilişkilidir.

Jung ve arkadaşları (2018) yaptıkları iki çalışmada; PCS, AH Plus® ve MTA Fillapex ile karşılaştırıldığında, yalnızca BioRoot™ RCS'nin hem PDL hücrelerinin hem de osteoblastların hücre metabolizması üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir (Jung et al., 2019; Jung et al., 2018). Ayrıca, insan PDLKÜ (periodontal ligament kök hücresi) aktivitesi ve migrasyonu; bir çizik yara iyileşmesi deneyi (scratch wound healing assay) ve tip I kollajene adezyon yöntemi kullanılarak, sertleşmiş TotalFill BC Sealer®, MTA Fillapex® ve AH Plus® pat eluatları ile değerlendirilmiştir (Rodríguez-Lozano et al., 2017). Sonuçlar, TotalFill BC Sealer® kullanımıyla en olumlu yanıtların elde edildiğini, MTA Fillapex® kullanımının ise AH Plus® ile karşılaştırıldığında bile en az olumlu sonuçları doğurduğunu göstermiştir (Rodríguez-Lozano et al., 2017). Bahsi geçen tüm bu hücre popülasyonları periapikal doku

rejenerasyonunda esastır ve bunların metabolizmasındaki/aktivitesindeki bozulmalar rejenerasyon sürecini olumsuz etkileyebilir. Rejenerasyon ve inflamasyon süreçlerinde lipopolisakkarit (LPS) ile uyarılmış PDL fibroblastlarının rolü incelendiğinde; BioRoot™ RCS'nin, PCS'nin aksine, PDL kök hücre göçünü bozmadığı ve bağışıklık hücrelerinin (THP-1 modeli) göçünü ve aktivasyonunu kontrol altında tuttuğu kanıtlanmıştır. Dahası bu çalışma, ELISA yöntemiyle BioRoot™ RCS'nin PDL fibroblast büyüme faktörü (TGF-Beta1) salınımını indüklediğini ve pro-inflamatuar sitokin (IL-6) salınımını azalttığını vurgulamıştır (Jeanneau et al., 2019). BioRoot™ RCS kullanımının, insan PDLKÜ'lerinin mezenkimal karakterini ve migrasyon yeteneğini değiştirmede gösterilmiştir (M. Collado-González et al., 2017). Dahası, BioRoot™ RCS ekstrelerinin kullanımıyla PDL hücrelerinin anjiyojenik/osteojenik büyüme faktörü salınımlarının (VEGF, FGF, BMP-1) arttığı ortaya konmuştur (Camps et al., 2015). Salgılanmanın yanı sıra, bir fare osteoblast öncü hücre hattı tarafından osteojenik faktör ekspresyonunun; floresan ve RT-PCR (DMP-1, ALP) yöntemleri kullanılarak EndoSequence® BC Sealer™ ve ProRoot ES tarafından artırıldığı, buna karşın AH Plus® kullanımının bu osteojenik potansiyeli zayıflattığı gösterilmiştir (Giacomino et al., 2019). Bununla birlikte, seyreltilmiş materyal ekstreleri kullanıldığında, EndoSequence® BC Sealer™, MTA Fillapex® ve AH Plus®'ın her ikisi de, LPS ile indüklenen bir inflamasyon durumundan sonra bir osteoblast hücre hattının osteojenik potansiyelini artırmıştır (Lee et al., 2019). Ayrıca osteojenik potansiyele ek olarak, qPCR yöntemiyle EndoSequence® BC Sealer™ ve HiFlow formülasyonlarının, insan PDLKÜ mineralizasyonunu ve sementojenik belirteç ekspresyonlarını (ALP, CEMP, RUNX2 ve CAP) uyarabildiği, AH Plus®'ın ise uyaramadığı gösterilmiştir (Rodríguez-Lozano et al., 2020). İnflamasyon süreciyle ilgili olarak, iRoot® SP kullanımının makrofaj canlılığı, sitokin ekspresyonu ve makrofaj polarizasyonu üzerindeki etkileri incelenmiştir (Yuan et al., 2018; Zhu et al., 2017). Gerçekten de inflamatuvar reaksiyon karmaşık bir süreçtir; genellikle zararlı olduğu düşünülse de rejenerasyon basamaklarının uygulanması için gereklidir ve burada makrofaj polarizasyonu önemli bir rol oynar. Nitekim makrofaj M1 fenotipi pro-inflamatuar (inflamasyonu artıran) olarak kabul edilirken, M2 fenotipine dönüşüm anti-inflamatuar (inflamasyonu baskılayan) olarak işlev görür (Yunna et al., 2020). Zhu ve arkadaşları, iRoot® SP'nin bir makrofaj modeli (RAW 264.7) için sitotoksik olmadığını ve hem pro- hem de anti-inflamatuar sitokin ekspresyonlarını (IL-1b, TNF-a, IL-10, IL-12p40) indüklediğini göstermiştir. Dahası, bu KSEP formülasyonunun kullanımı, M1 ve M2 makrofaj belirteç ekspresyonunda bir artışa yol açmış ve M1/M2 makrofaj fenotip dengesini azaltarak bu patin iyileşme süreçlerini destekleyebileceğini göstermiştir (Zhu et al., 2017). Benzer sonuçlar, LPS ile indüklenen bir inflamasyon durumu simülasyonundan sonra aynı

olaylar üzerinde iRoot® SP'nin etkilerini inceleyen Yuan ve arkadaşları tarafından da elde edilmiştir. Bu çalışma da iRoot® SP'nin mRNA inflamasyon faktörü ekspresyonları ve M1/M2 makrofaj fenotip dengesi üzerinde potansiyel bir etkisi olduğunu bulmuştur (Yuan et al., 2018).

Birlikte değerlendirildiğinde, tüm bu in vitro çalışmalar, KSEP'lerin geleneksel patlarla karşılaştırıldığında umut verici biyolojik özellikler sunduğunu açıkça ortaya koymuştur. Uygun bir endodontik klinik protokolün yanı sıra KSEP'lerin, gelişmiş biyouyumlulukları ve belirli düzeydeki biyoaktiviteleri sayesinde apikal periodontitis vakalarında iyileşme sürecini destekleyebileceği hipotezi kurulabilir. Ancak, formülasyonlardaki katkı maddelerinin bu özellikleri değiştirebileceği göz önünde bulundurulmalıdır. Nitekim literatürde MTA Fillapex® formülasyonu ile daha çelişkili sonuçlar elde edilmiştir. Bu durum sıklıkla, formülasyonlarında salisilik tipte rezinöz bileşiklerin bulunması ve madde sızıntısı (leaching) ile açıklanabileceği gibi (Assmann et al., 2015; Tavares et al., 2013; Zhou et al., 2015), silikat hidrasyon reaksiyonunun bozulması ve kalsiyum hidroksit oluşumunun azalması veya hiç gerçekleşmemesiyle de ilişkilidir (Camilleri, 2015).

2.3. Obtürasyon (Kanal Dolumu) Kalitesi

Obtürasyonun temel amacı, kök kanal sisteminde sızıntıyı ve yeniden enfeksiyon oluşumunu önlemektir (Sundqvist et al., 1998); mikrosızıntı ise boşlukların (gap) veya deliklerin (void) meydana gelmesi nedeniyle oluşabilir (Adib et al., 2004; Yanpiset et al., 2018). Klinik bir yaklaşımda postoperatif (tedavi sonrası) radyografi, obtürasyon kalitesinin değerlendirilmesine yardımcı olurken; in vitro (laboratuvar) ortamda kök kanal dolum kalitesini ölçebilecek pek çok laboratuvar yöntemi mevcuttur: boya penetrasyonu, boya difüzyonu, bakteriyel ve endotoksin infiltrasyonu, elektrokimyasal analizler, mikroskopi veya 3 boyutlu (3D) değerlendirmeler (Jafari & Jafari, 2017). Boşluklar sıklıkla araştırma konusu olmaktadır; çünkü bu alanlar, kalıntı bakterilerin yeniden çoğalabileceği ve yan ürünlerini salgılayabileceği alanları temsil ederek kök kanal tedavisinin uzun vadeli başarısını tehlikeye atar (Brosco et al., 2010; Tabassum & Khan, 2016).

Apikal doğrusal boya penetrasyonu kullanarak apikal sızdırmazlık yeteneğini değerlendiren ve AH Plus®, Endosequence BC® Sealer™ ile MTA Fillapex® ürünlerini karşılaştıran bir çalışma; EndoSequence BC® Sealer™ ile birlikte kullanılan tek kon (SC) tekniği için en düşük apikal sızıntı değerini göstermiştir (Mohamed El Sayed & Al Hussein, 2018). Literatürde daha önce de gösterildiği gibi, boya tekniklerine ait sonuçlar çelişkili olmaya devam etmekte ve

büyük bir değişkenliğe yol açmaktadır. Boya penetrasyonu çalışmalarıyla ilgili önemli bir husus, kök kanal obturasyon materyali içindeki boşluklarda hapsolan havanın sıvı hareketine müdahale edebilmesidir (Jafari & Jafari, 2017; Wu et al., 1994).

Farklı pat türlerinin mikrosızıntısını değerlendiren bir çalışma, Endosequence BC® Sealer™ grubunun en az boya sızıntısı gösterdiğini, en yüksek sızıntının ise çinko oksit-öjenol esaslı patta gözlemlendiğini ortaya koymuştur (Ballullaya et al., 2017).

Yine de, kök kanal dolum tekniği, film kalınlığı, akışkanlık ve ıslatılabilirlik dahil olmak üzere pek çok faktör boşlukların oranını etkileyebilir. Oval kök kanallarında, özellikle bu boşluk soğuk hidrolik kondansasyon (SHK) ile doldurulduğunda ve bilhassa tek kon (SC) tekniği veya soğuk lateral kompaksiyon kullanıldığında boşluk (void) görülme sıklığının daha yüksek olduğu bildirilmiştir (Penha da Silva et al., 2021; Santos-Junior et al., 2021). Başka bir çalışmada, oval şekilli kök kanallarında beş farklı obturasyon tekniğinin dolum kalitesi; optik nümerik mikroskopi, SEM (taramalı elektron mikroskopisi) ve enerji dağılımlı X-ışınları (EDX) kullanılarak değerlendirilmiştir (Mancino et al., 2021). Bu çalışmada, gütaperka ile dolgulu alanların, pat ile dolgulu alanların, boşluk alanlarının oranları ve dentin tübüllerinin içine sızan pat/güta uzantıları (*tags*) incelenmiştir. Patın türünden bağımsız olarak, sıcak güta-perka obturasyon tekniği kullanıldığında obturasyon kalitesinin, tek kon (SC) tekniğinin kullanımına kıyasla genel olarak daha iyi olduğu görülmüştür. Konfokal mikroskopik değerlendirmeye dayanan yakın tarihli bir çalışma, sıcak dikey kondansasyon kullanımının, tek kon (SC) tekniğine kıyasla KSEP'lerin dentin tübüllerine penetrasyonunu (nüfuz etmesini) artırdığını göstermiştir (Eid et al., 2021). KSEP'ler kullanılsa bile tek kon (SC) tekniğinin doğasında var olan sınırlılıklar, bir mikro-BT (mikro bilgisayarlı tomografi) çalışmasında da ortaya konmuştur (Celikten et al., 2015).

Güta-perka, pat ve boşlukları birbirinden ayırt ederek dolum kalitesini incelemede mikro-BT'nin en güvenilir teknik olduğu öne sürülmüştür. Bu teknik, boşluk/gözeneklilik (porozite) görülme sıklığının (apikal, orta veya koronal üçlülerde) değerlendirilmesine ve bunların türlerinin (iç, dış veya kombine) tanımlanmasına olanak tanır (Germain et al., 2018; Milanovic et al., 2020). Bir çalışmada, tek kon (SC) tekniği kullanılarak EndoSequence® BC Sealer™ ile AH Plus® arasında obturasyon sonrası kalan boşluklar değerlendirilmiştir. EndoSequence® BC Sealer™, apikal üçlüde AH Plus®'a kıyasla daha düşük bir boşluk oranı göstermiştir; ancak yazarlar bu farkın muhtemelen kök kanalı anatomisindeki varyasyonlardan kaynaklandığını vurgulamıştır (Celikten et al., 2016). Yakın tarihli bir çalışma, açık ve kapalı gözeneklilik

oranlarının zaman içinde değişebileceğini göstermiştir (Milanovic et al., 2020). Başlangıçta MTA Fillapex® için AH Plus®'a kıyasla anlamlı derecede daha yüksek açık ve toplam gözeneklilik bulunmuştur. 6 ay sonra, açık ve toplam gözeneklilik yüzdesi BioRoot™ RCS ve MTA Fillapex®'te artarken, AH Plus® ve EndoSequence® BC Sealer™'da azalmıştır. Bu bulgular, BioRoot™ RCS ve MTA Fillapex®'in AH Plus®'a kıyasla daha yüksek olan çözünürlükleri ile açıklanmıştır. EndoSequence® BC Sealer™'ın BioRoot™ RCS'ye kıyasla apatit oluşturma konusundaki daha iyi yeteneği, saklama sürecinden 6 ay sonra EndoSequence® BC Sealer™ için gözenekliliğin azalmasını açıklayabilir (Milanovic et al., 2020).

Geleneksel patlarla karşılaştırıldığında KSEP'ler, mikro-BT kullanılarak boşluk sıklığı değerlendirildiğinde genel olarak benzer sonuçlar göstermiştir (Roizenblit et al., 2020). Bununla birlikte, boşluk görülme sıklığı her zaman kök kanalı anatomisi ve kullanılan obtürasyon tekniği perspektifinde değerlendirilmelidir.

2.4. Yenilenilebilirlik (Uzaklaştırılabilirlik / Retreatment Potansiyeli)

Cerrahi olmayan kök kanal yenileme tedavisi (retreatment); apikal açıklığın (patensinin) yeniden sağlanması, ardından tüm kök kanal sisteminin temizlenmesi ve doldurulması amacıyla kök kanal dolgu maddesinin uzaklaştırılmasını ifade eder (AAE 2012). Bu nedenle yenilenilebilirlik, dolgu maddelerinde aranan özelliklerden biridir (Uzunoglu et al., 2015; Yürüker et al., 2016). Günümüzde kök kanal sistemindeki dolgu maddelerinin tamamen uzaklaştırılmasını sağlayan hiçbir teknik bulunmamaktadır (Yürüker et al., 2016). Buna ek olarak; uygulanan dolum tekniği ve gütaperka ile birlikte kullanılan patın türü gibi pek çok faktör yenilenilebilirliği etkileyebilir (Uzunoglu et al., 2015; Yürüker et al., 2016).

KSEP'lerin sertleştikten sonra sert bir yapıya büründüğü (Donnermeyer, Bunne, et al., 2018) ve dentin ile olan arayüzeylerinde hidroksiapatit kristalleri oluşturduğu bilinmektedir (Agrafioti et al., 2015). Bunun yanı sıra, dentin tübüllerinin içine nüfuz etme yeteneğine de sahiptirler. Bu özellikler, yenileme tedavisi işlemlerini zorlaştırabilir (Kim et al., 2015). Dolgu maddelerinin uzaklaştırılmasını incelemek için; mikro-bilgisayarlı tomografi (mikro-BT), konik ışınlı bilgisayarlı tomografi (KIBT/CBCT), radyografi, dişlerin boyuna bölünmesi ve SEM ile doğrudan görselleştirme, konfokal mikroskopi, stereomikroskopi veya dijital kameralar ile dişlerin şeffaflaştırılması gibi farklı yöntemler kullanılmıştır (Kim et al., 2015; Madani et al., 2015; Simsek et al., 2014; Suk et al., 2017). Kök kanal dolum kalitesinin değerlendirilmesinde

güvenilir olduğu halihazırda gösterilmiş olan mikro-BT, invaziv olmayan bir yöntemdir ve kalan dolgu maddesi hacminin başlangıçtaki hacimle karşılaştırılmasına olanak tanır. Kalan dolgu maddesini görselleştirmenin ve ölçmenin yanı sıra, dentin tübüllerinin içindeki patın penetrasyon derecesini değerlendirmek veya açık tübül sayısını nicelleştirmek için SEM ve konfokal mikroskopisi de kullanılabilir (Kim et al., 2015; Simsek et al., 2014).

Ersev ve arkadaşları (2012), dört kök kanal patının (Hybrid Root SEAL, EndoSequence® BC Sealer™, Activ GP sistemi ve AH Plus®) yenilenilebilirliğini karşılaştırmış ve farklı patlar veya kullanılan teknikler arasında anlamlı bir fark bulamamıştır (Ersev et al., 2012). Birçok araştırmada gösterildiği gibi, hiçbir teknik dolgu maddesinin tamamen uzaklaştırılmasını sağlayamamıştır. Şimşek ve arkadaşları (2014); R-endo döner aletleri veya ESI ultrasonik uçlarının kullanımından sonra, lateral kompaksiyon tekniğiyle doldurulmuş düz küçük azı dişlerinde (premolar) iRoot® SP, AH Plus® ve MM Seal®'in uzaklaştırılmasının ardından açılan tübül sayılarını SEM kullanarak karşılaştırmıştır. Benzer şekilde, hiçbir grup dolgu maddesinin tamamen uzaklaştırıldığını göstermemiş, en fazla kalıntı apikal üçlüde tespit edilmiştir (Simsek et al., 2014).

Kim ve arkadaşları (2015) da SEM analizi kullanarak kalan materyal miktarını karşılaştırdıklarında EndoSequence® BC Sealer™ ve AH Plus® arasında anlamlı bir fark bulamamıştır (Kim et al., 2015). Uzunoglu ve arkadaşlarına (2015) göre, SEM ile değerlendirildiğinde, iRoot® SP ile uygulanan tek kon (SC) tekniğinin ardından, AH-26® ile uygulanan tek kon tekniğine veya AH-26® (DeTrey, Dentsply Maillefer, ABD) ile uygulanan lateral kompaksiyona kıyasla daha fazla dolgu maddesi kalıntısı gözlenmiştir (Uzunoglu et al., 2015). Ek olarak, Suk ve arkadaşları (2017), EndoSequence® BC Sealer™ ve AH Plus®'ın uzaklaştırılabilirliğinde anlamlı bir fark bulamamıştır. Bu çalışmada, uzaklaştırılması en kolay patın MTA Fillapex® olduğu belirlenmiştir (Suk et al., 2017).

Hess ve arkadaşları (2011), 20 dereceden daha az eğrime sahip kanallarda AH Plus®'ın EndoSequence® BC Sealer™'a kıyasla daha iyi uzaklaştırılabildiğini kaydetmiştir (Hess et al., 2011). SEM analizinde bu KSEP'e ait daha fazla kalıntı apikal üçlüde bulunmuş; BC Sealer ve çalışma boyutuna (WL) kadar yerleştirilen ana konun kullanıldığı örneklerin %20'sinde, BC Sealer ve çalışma boyutunun kısa kalacak şekilde yerleştirilen ana konun kullanıldığı örneklerin ise %70'inde apikal açıklık yeniden sağlanamamıştır. Agrafioti ve arkadaşları (2015), düz kanallarda Total Fill® BC Sealer™, MTA Fillapex® ve AH Plus®'ın yenilenilebilirliğini karşılaştırmıştır (Agrafioti et al., 2015). Yazarlar, güta-perka konları çalışma boyutuna (WL)

yerleştirildiğinde, vakaların %100'ünde çalışma boyutuna ulaşıldığını ve apikal açıklığın yeniden sağlandığını göstermiştir. Oltra ve arkadaşları (2017), mikro-BT görüntüleme kullanarak BC Sealer ve AH Plus®'ın yenilenilebilirliğini karşılaştırmış ve AH Plus® kullanımının daha az kalıntı dolgu maddesi ile ilişkili olduğunu, kloroform kullanımının ise BC Sealer'ın uzaklaştırılmasına yardımcı olabileceğini bulmuştur (Oltra et al., 2017). Öte yandan Donnermeyer ve arkadaşları (2018), BioRoot™ RCS, MTA Fillapex® ve Endo CPM (Egeo, Buenos Aires, Arjantin) ile karşılaştırıldığında AH Plus® kullanımının daha fazla kalıntı ile ilişkili olduğunu saptamıştır (Donnermeyer, Bunne, et al., 2018).

Çalışmalar arasındaki çelişkili sonuçlar (Donnermeyer, Bunne, et al., 2018; Oltra et al., 2017), farklı metodolojilerin uygulanmasıyla, özellikle de güta-perka konunun uyumlandırıldığı uzunluk ve diş örneğinin anatomisi ile ilişkili olabilir. Hess ve arkadaşları (2011) tarafından yürütülen çalışmada, güta-perka konuları kasıtlı olarak apikal foramenin kısa kalacak şekilde yerleştirilmiştir. Bu yöntemin, cerrahi olmayan bir yenileme tedavisinin en gerçekçi senaryosunu temsil ettiğini belirtmek gerekir. Bu durum, yenileme tedavisi sonucunu açıkça tehlikeye atabilir (Hess et al., 2011). Diğer çalışmalarda ise güta-perka konuları tam çalışma boyutuna (WL) yerleştirilmiştir. Bu farklı protokol, kök kanal dolgu maddesinin uzaklaştırılmasından sonra apikal açıklığı yeniden sağlayabilme yeteneğini güçlü bir şekilde etkileyebilir. Nitekim güta-perka konunun tam çalışma boyutuna kadar gönderilmesiyle, konun kolayca uzaklaştırılmasının ardından apikal açıklık rahatlıkla yeniden sağlanabilmektedir. Ancak bu durumlar, yenileme tedavisi endikasyonlarının büyük çoğunluğuna uymamaktadır. Gerçekten de, apikal periodontitisin genellikle yetersiz kalitede ve kısa yapılmış obturasyon (kanal dolgusu) vakalarında teşhis edildiği iyi bilinmektedir (Hess et al., 2011).

Diğer taraftan; kanal eğriliği ve enine kesit gibi kök kanalı anatomisi de yenilenilebilirliği etkileyebilir. Hess ve arkadaşları (2011) mandibular molarların mezial kanallarını kullanırken, Agrafioti ve arkadaşları (2015) tarafından yapılan çalışmada ön dişlere ait düz kanallar değerlendirilmiştir (Agrafioti et al., 2015; Hess et al., 2011).

Ayrıca, kullanılan obturasyon tekniği de sonuçları etkileyebilir. Üreticiler genellikle KSEP'lerin tek kon (SC) tekniğiyle kullanılmasını önermektedir ve bazı çalışmalar bu patların sürekli dalga kondansasyonu (continuous wave condensation) ile kullanılmasının bağlanma dayanımlarını azaltabileceğini göstermiştir (DeLong et al., 2015). Bu durum, Agrafioti ve arkadaşları (2015) ile Kim ve arkadaşları (2015) tarafından yürütülen çalışmalarda KSEP'ler

ile rezin esaslı patlar arasında hiçbir fark bulunmamasını açıklayabilir (Agrafioti et al., 2015; Kim et al., 2015).

Yenileme tedavisi süresiyle ilgili olarak da çelişkili sonuçlar elde edilmiştir. Şimşek ve arkadaşları (2014); iRoot® SP, MM Seal ve AH Plus®'ı uzaklaştırırken çalışma boyutuna (WL) ulaşma süresinde istatistiksel bir fark bulamamıştır (Simsek et al., 2014). Benzer bulgular, EndoSequence® BC Sealer™ ve AH Plus®'ın uzaklaştırılma sürelerini karşılaştıran Kim ve arkadaşları (2015) tarafından da elde edilmiştir (Kim et al., 2015). Uzunoglu ve arkadaşları (2015), dolgu maddesi güta-perka ve MTA Fillapex®'ten oluştuğunda, benzer sonuçlar gösteren AH Plus® ve iRoot® SP'ye kıyasla daha hızlı bir yenileme tedavisi süresi rapor etmiştir (Uzunoglu et al., 2015). Donnermeyer ve arkadaşları (2018) ise KSEP' lerin (BioRoot™ RCS ve Endo CPM) uzaklaştırılmasının AH Plus®'a göre daha hızlı olduğunu bulmuştur (Donnermeyer, Bunne, et al., 2018).

Sonuç olarak, çoğu ex vivo çalışma, KSEP' lerin uzaklaştırılmasının mümkün olduğunu ve vakaların çoğunda apikal açıklığın yeniden kazanılabildiğini göstermiştir. Bununla birlikte, birçok çalışmada metodolojik sapmalar (bias) gözlenebilmektedir ve yenileme tedavisi endikasyonlarını ve koşullarını daha iyi simüle eden ileri çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır.

3. KSEP'lerin Klinik Perspektifleri ve Kullanım Alanları

3. 1. Kök Kanalı Anatomisi

Soğuk hidrolik kondansasyon (SHK) ve soğuk lateral kompaksiyonun, patın türünden bağımsız olarak, özellikle geniş ve oval kanallarda sıcak güta-perka obturasyon tekniklerine kıyasla boşluk (void) görülme sıklığını artırdığı bilinmektedir (Celikten et al., 2015; Hirai et al., 2020; Keleş et al., 2014; Mancino et al., 2021). Ancak dar, uzun ve eğri kanallarda sıcak dikey kondansasyon kullanımı tartışmaya açık olabilir; çünkü ısı plugger'ının (ısı taşıyıcısının) uygun seviyeye (çalışma boyutunun 4 mm gerisine) kadar ilerletilmesi bazen imkansız olabilmektedir. Bu durumda, apikal üçlüdeki güta-perka ısıtılmaz ve eritilemez, dolayısıyla bu bölgenin obturasyonu tek kon (SC) tekniği gibi işlev görür (Venturi et al., 2002). Bu tür anatomilerde KSEP' ler ile birlikte SHK kullanılması, KSEP' lerin fizikokimyasal ve biyolojik özelliklerinden yararlanırken kök kanalı obturasyonunu daha kolay ve daha hızlı hale getirir.

3. 2. Operatif Erişilebilirlik

Kısıtlı bir erişimle (sınırlı ağız açılması/arka grup dişler) karşı karşıya kalındığında, SHK ve KSEP kullanımının, termoplastikleştirilmiş güta-perka obturasyon tekniklerinin kullanımına kıyasla obturasyon işlemini daha kolay ve daha hızlı hale getireceğini vurgulamak genel bir kabuldür. Gerçekten de SHK kullanıldığında, teknik zorluklar yalnızca patın kanal içine yerleştirilmesi ve güta-perka konlarının yerleştirilmesi ile sınırlı kalmaktadır.

3.3. Biyolojik Açıdan Değerlendirmeler

Daha önce de belirtildiği gibi, KSEP'lerin geleneksel patlara kıyasla en büyük avantajı biyolojik özellikleridir. Yakın tarihli uluslararası bir anket, bunların klinik kullanımını gerekçelendiren en yaygın nedenin bu özellikler olduğunu ortaya koymuştur (Guivarc'h et al., 2020). In vitro çalışmaların bulgularına dayanarak, KSEP'lerin antibakteriyel aktivitesi ve biyomineralizasyon yeteneği periapikal iyileşmeyi uyarma ve geliştirme potansiyeline sahip olabilir; bu nedenle apikal periodontitis vakalarında kullanım için uygun olmalıdır. Benzer şekilde, KSEP'lerin alkalizasyon yeteneği ve kalsiyum hidroksit oluşturma kabiliyeti, bunları eksternal inflamatuvar kök rezorbsiyonu vakalarında kullanım için ilgi çekici hale getirebilir.

Son olarak, periapikal bölgeye pat taşırılması (ekstrüzyon) uygun olmasa ve bunun istemsizce gerçekleşmesi gerekse de, obturasyon sırasında bir pat "pufu" (hafif taşma) oluşumunu tahmin etmek ve kontrol etmek zor olabilir (Scarparo et al., 2009). Bu derlemede vurgulanan ve geleneksel patların özelliklerine kıyasla daha üstün olan KSEP biyolojik özellikleri dikkate alındığında, KSEP'lerin aşağıdaki durumlarda kullanılması tercih edilebilir:

- **Kökler ile maksiller sinüs arasında ilişki bulunması:** Özellikle çinko oksit-öjenol esaslı ve formaldehit esaslı patların önerilmediği immünokompromize (bağışıklık sistemi baskılanmış) hastalar için bu durum geçerlidir (Guivarc'h et al., 2020).
- **Kökler ile nervus alveolaris inferior (alt alveolar sinir) arasında ilişki bulunması:** KSEP'ler daha biyouyumludur ve bunların soğuk hidrolik kondansasyon (SHK) ile birlikte kullanılması termal sinir yaralanmalarının önüne geçer.
- **Yapay bir kanal açılması (basamak/perforasyon) sonucu oluşan orta veya apikal kök kanalı perforasyonları:** KSEP'lerin SHK ile birlikte kullanılması, kök kanalının ve perforasyonun aynı anda doldurulmasına olanak tanırken, biyolojik özelliklerinden de yararlanılmasını sağlar.

- **Radyoterapi veya bifosfonat gibi anti-resorptif ilaç tedavilerine bağlı olarak osteonekroz riski yüksek olan hastalar:** Bu tür durumlarda kemik agresyon (yıkım) faktörlerinin azaltılması uygun bir yaklaşım olduğundan KSEP kullanımı avantajlıdır.

Bununla birlikte, biyolojik yönler açısından bakıldığında, in vitro çalışmaların bulgularından doğrudan klinik sonuçlara yönelik bir çıkarım yapmanın (doğrudan klinik uygulamaya aktarmanın) doğru olmadığı vurgulanmalıdır. Gerçekten de periapikal bölgenin iyileşmesi yalnızca pat seçimiyle ilgili olmayıp, hastanın bağışıklık sistemi de dahil olmak üzere çok sayıda karmaşık mekanizmayı içerir (Holland et al., 2017).

4. KSEP'lerin Klinik Uygulama Prensipleri

4.1. KSEP'ler Her Türlü Güta-Perka ile Birlikte Kullanılabilir mi?

Güta-perka ile KSEP arayüzeyini ele alan bilimsel yayınlar tarandığında, KSEP kullanımı için özel olarak geliştirilmiş ve önceden emprenye edilmiş güta-perka konlarının üstünlüğünü kanıtlayan net bir bilimsel veri bulunmamaktadır. Bununla birlikte, tercih edilen güta-perkanın türü ve yapısal kimyasal bileşenleri, KSEP ile kon arasında oluşacak arayüzey kalitesinin ve uyumunun değişkenlik göstermesine neden olabilmektedir (De-Deus et al., 2021; M. Eltair et al., 2018; Guivarc'h et al., 2020).

4.2. KSEP Kullanımı Son Yıkama Protokolünü ve Kanal Kurutma Yöntemini Etkiler mi?

Kanal içi nem varlığı, klasik patların sertleşme aşamalarını ve dentin çeperlerine tutunma (adezyon) güçlerini olumsuz yönde etkilemektedir (Zmener et al., 2008). Klasik patların bu yapısına tezat olarak KSEP'ler, hem sertleşme süreçlerini hem de biyolojik aktivitelerini belirleyen hidrasyon reaksiyonunu başlatabilmek için suya gereksinim duyarlar (L. H. Silva Almeida et al., 2017). Üretici firmaların beyanlarına göre, önceden karıştırılmış (premixed) formülasyonların sertleşmesi, dentin tübüllerinde kalan nem sayesinde tetiklenmektedir (L. H. Silva Almeida et al., 2017). Bu doğrultuda, dolum öncesinde kanal içinin aşırı kurutulmasından (desikasyon) kaçınılmalı ve kanal hafifçe nemli bırakılacak şekilde kurulanmalıdır (Nagas et al., 2012). Restoratif diş hekimliğindeki "ıslak bağlanma" (wet-bonding) uygulamalarından da bilindiği üzere, bu nem dengesini klinik ortamda hassas biçimde kontrol etmek oldukça güçtür (Kanca, 1992). Aşırı kurutmanın önüne geçebilmek adına, tek bir steril kağıt kon (peypır) yerleştirmeden önce kanal içinin mikro-aspiratör yardımıyla boşaltılması faydalı bir yaklaşım

olabilir (Nagas et al., 2012). Bu gerekçelerle, KSEP tercih edilen vakalarda işlem sonunda kanalın alkol (etanol) ile yıkanması kesinlikle önerilmemektedir (Nagas et al., 2012).

Kanalın bir miktar nemli kalması gerektiği göz önüne alındığında, son kullanılan yıkama solüsyonu (irrigant) ile KSEP arasındaki olası kimyasal etkileşimler göz ardı edilmemelidir. Nitekim literatürdeki çeşitli araştırmalar; klinik pratiklerde yaygın olarak kullanılan solüsyonların büyük kısmının (NaOCl, CHX, EDTA) KSEP' ler üzerinde olumsuz etkiler yaratabileceğini ortaya koymuştur (Arias-Moliz & Camilleri, 2016; Razmi et al., 2016). Bu etkileşimlerin klinik başarı üzerindeki kesin yansımaları henüz tamamen netleşmemiş olsa da, kanal kurutma aşamasına geçmeden önce son yıkama ajanı kalıntılarını uzaklaştırmak amacıyla kanalın steril su ile durulanması rasyonel bir yaklaşım olarak kabul edilmektedir.

4.3. KSEP ve SHK Kombinasyonunda Boşluk Oluşumu Nasıl En Aza İndirilir?

Daha önce de vurgulandığı üzere, pat ile dentin duvarı ya da pat ile gütaperka arayüzeyinde meydana gelen açık gözeneklilikler (porozite), kanal içinde sağ kalan mikroorganizmaların çoğalabileceği ve apikal bölgeye sızabileceği riskli alanlar yaratır (Milanovic et al., 2020; Ortiz & Jimeno, 2018).

Tek kon (SC) tekniğiyle yapılan dolular, özellikle geniş veya oval anatomiye sahip kök kanallarında sıcak dolum yöntemlerine kıyasla daha yüksek oranda boşluk (void) oluşumuna zemin hazırlar (Mancino et al., 2021). Ancak bilimsel çalışmalarda da gösterildiği üzere, kullanılan patın cinsi ne olursa olsun, incelenen hiçbir dolum tekniği tamamen "boşluksuz" bir sızdırmazlık sunamamaktadır (Pedullà et al., 2020; Zogheib et al., 2016). Soğuk hidrolik kondansasyon (SHK), özellikle de tek kon yöntemi uygulandığında, tedavi yaklaşımı gütaperkadan ziyade patın özelliklerine odaklanır (pat odaklı obtürasyon konsepti). Kanal içine patın hangi yöntemle yerleştirildiğinin boşluk oranları üzerinde doğrudan etkisi olabileceği düşünülse de, mevcut yayınların çoğunda bu uygulama detaylarına nadiren değinilmektedir. Kanal anatomisine ve ürünün formülasyonuna bağlı olarak KSEP' lerin kanal içerisine uygulanmasında şu yöntemlerden yararlanılabilir:

- Ana konun (master cone) KSEP ile kaplanarak tam çalışma boyutuna yavaş bir hareketle yerleştirilmesi. Bu yöntem, geniş veya oval kanallarda patın homojen dağılması için tek başına yetersiz kalabilir; böyle durumlarda pat dağılımını desteklemek amacıyla yardımcı konlar (aksesuar konlar) sürece dahil edilebilir.

- Ana kon yerleştirilmeden önce, patın düşük devirli (yaklaşık 700–800 rpm) bir Lentülo spirali veya esnek enjeksiyon uçları vasıtasıyla kanal içine zerk edilmesi.

Ayrıca, patın sonik ya da ultrasonik yöntemlerle veya farklı ajitasyon teknikleriyle aktive edilmesinin, KSEP'lerin kök kanal boşluğundaki dağılım kalitesini artırabileceği belirtilmektedir (Kim et al., 2018). Ancak bu uygulamaların etkinliğine dair mevcut bilimsel kanıt düzeyinin henüz zayıf olduğunu da belirtmek gerekir.

4.4. KSEP'ler Termoplastikleştirilmiş Gütä-Perka Obturasyon Teknikleriyle Birlikte Kullanılabilir mi?

Daha önce ifade edildiği üzere, tek kon (SC) yönteminin daha yüksek oranda boşluk (void) oluşumuyla ilişkili olması, KSEP'lerin termoplastikleştirilmiş gütä-perka dolum teknikleriyle kombine edilmesini mantıklı bir seçenek haline getirebilir. Böyle bir yaklaşım, birçok endodonti uzmanı tarafından halihazırda uygulanan bu tekniklerin avantajları ile KSEP'lerin gelişmiş niteliklerini bir araya getirecektir. Ancak bu durum, ısının KSEP'lerin özellikleri üzerindeki etkisini sorgulamayı gerektirir; nitekim literatürdeki çeşitli araştırmalar test edilen formülasyonlara göre farklı bulgular ortaya koymuştur. Sıcaklık artışı (özellikle 100 °C'nin üzeri), KSEP'lerin akışkanlık, sertleşme süresi ve dentin duvarlarına bağlanma gibi fiziksel özelliklerinde değişimlere yol açabilmektedir. Mevcut bilgilere dayanarak, Endosequence® BC Sealer™ HiFlow® ve EndoSequence® BC Sealer™ formülasyonlarının ısı eşliğinde kullanılabileceği gösterilmiş olsa da, tüm KSEP'ler için bu durum geçerli değildir. Örneğin, BioRoot™ RCS'nin sıcak gütä-perka obturasyon yöntemleriyle birlikte kullanılması kontrendikedir. Bu nedenle, ısının her bir KSEP formülasyonu üzerindeki net etkilerini açığa kavuşturacak yeni çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu değerlendirmeler yapılırken, cihaz ekranında görünen değerden çok daha düşük olduğu bildirilen ısı plugger'ının (taşıyıcısının) gerçekte iletmediği sıcaklık seviyesi de hesaba katılmalıdır. Son olarak, laboratuvar çalışmalarında geleneksel patların da ısı uygulamasından olumsuz etkilendiği bildirilmiş olmasına rağmen, bu patlar on yıllardır termoplastikleştirilmiş gütä-perka teknikleriyle yaygın biçimde kullanılmış ve tatmin edici klinik sonuçlar vermiştir. Bu durum, in vitro araştırmaların bulguları ile klinik başarıyı belirleyen parametrelerin karmaşıklığı arasında bir bilgi boşluğu (gap) olduğunu göstermektedir.

4.5. KSEP Kullanımı Cerrahi Olmayan Kanal Yenileme Tedavilerini Zorlaştırır mı?

Literatür verileri, yenileme tedavilerinde (retreatment) KSEP' lerin uzaklaştırılmasının güç olabileceğini ortaya koymaktadır. Formik asit ve kloroform endodontiste yardımcı olabilse de, KSEP' lerin çözünerek uzaklaştırılması için geliştirilmiş özel bir solvent henüz mevcut değildir. Yukarıda da değinildiği gibi, KSEP' lerin yenilenilebilirliğini inceleyen araştırmalar, bir önceki tedavide yapılan dolgunun tam çalışma boyutuna (WL) ulaştığı durumlarda apikal açıklığın (patensinin) başarıyla yeniden kazanılabildiğini göstermiştir. Ne var ki, cerrahi olmayan yenileme tedavilerine çoğunlukla kanal dolgusunun kısa kaldığı olgularda ihtiyaç duyulur. KSEP' lerin sahip olduğu yüksek akışkanlık yeteneği, materyalin güta-perka konunun ötesine geçerek apikal bölgeye sızmasına neden olabilir. Kanalin uç kısmında sadece KSEP' in bulunması ve bu materyalin sert yapısı, özellikle eğri kök kanallarında apikal açıklığa ulaşmayı çok daha zorlu hale getirebilir; bu durum apikal üçlüye erişimi engelleyerek basamak (ledge) oluşumu gibi prosedürel hatalarla sonuçlanabilir. Ayrıca, yenileme tedavilerinin bir diğer amacı da kanalı tekrar doldurmadan önce eski dolgu malzemelerinin tamamını uzaklaştırmak ve kök kanal sistemini dezenfekte etmektir. Bununla birlikte, dolgu materyalinin tamamen ortadan kaldırılması imkansız olup, literatürde sunulan tüm teknikler (her dolgu malzemesinde olduğu gibi) KSEP' leri kök kanalından ancak kısmi olarak uzaklaştırabilmiştir.

5. Sonuçlar

Bu derleme yazısı, kalsiyum silikat esaslı patların (KSEP) yapısal nitelikleri ile klinik yansımalarını ele almayı ve mevcut bilimsel veriler ışığında mantıklı kullanım alanları (endikasyonlar) sunmayı hedeflemiştir. Gerçekleştirilen bu çalışma, klinisyenlerin vakaya uygun kök kanal patı seçimi yapmalarına katkı sağlayabilir ve KSEP' lerin bilinçli kullanımına zemin hazırlayabilir. Geleneksel patlarla kıyaslandığında KSEP' ler, genel performans kriterleri açısından başarılı sonuçlar ortaya koymuştur; ancak farklı KSEP formülasyonları arasında belirgin yapısal farklılıkların olabileceği göz ardı edilmemelidir. Bu materyallerin en ayırt edici özelliği, klasik patlara kıyasla daha üstün olduğu kanıtlanan dikkat çekici biyolojik aktiviteleridir. Bununla birlikte, KSEP' lerin sahip olduğu çözünürlük (solubilite) özelliğinin klinik başarı üzerindeki uzun vadeli etkilerinin gelecekte yapılacak araştırmalarla daha net bir şekilde aydınlatılması gerekmektedir. Benzer şekilde, piyasadaki mevcut KSEP formülasyonlarının kendilerine özgü nitelikleri bulunabileceğinden, hekimlerin doğru bir klinik uygulama için bu spesifik detayları göz önünde bulundurması önem arz etmektedir. Son olarak, KSEP' lerin bu kendilerine has reaksiyonel davranışları ve yapısal doğası dikkate alınarak,

klirik pratiklerde sıklıkla uygulanan rutin endodontik tedavi protokollerinin hafifçe gözden geçirilmesi ve güncellenmesi gerekmektedir.

KAYNAKÇA

- Adib, V., Spratt, D., Ng, Y. L., & Gulabivala, K. (2004). Cultivable microbial flora associated with persistent periapical disease and coronal leakage after root canal treatment: a preliminary study. *International Endodontic Journal*, 37(8), 542-551.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2591.2004.00840.x>
- Agrafioti, A., Koursoumis, A. D., & Kontakiotis, E. G. (2015). Re-establishing apical patency after obturation with Gutta-percha and two novel calcium silicate-based sealers. *Eur J Dent*, 09(04), 457-461. <https://doi.org/10.4103/1305-7456.172625>
- Aksel, H., Makowka, S., Bosaid, F., Guardian, M. G., Sarkar, D., & Azim, A. A. (2021). Effect of heat application on the physical properties and chemical structure of calcium silicate-based sealers. *Clinical Oral Investigations*, 25(5), 2717-2725.
<https://doi.org/10.1007/s00784-020-03586-w>
- Al-Haddad, A., & Che Ab Aziz, Z. A. (2016). Bioceramic-Based Root Canal Sealers: A Review. *Int J Biomater*, 2016, 9753210. <https://doi.org/10.1155/2016/9753210>
- An, S., Gao, Y., Huang, Y., Jiang, X., Ma, K., & Ling, J. (2015). Short-term effects of calcium ions on the apoptosis and onset of mineralization of human dental pulp cells in vitro and in vivo. *Int J Mol Med*, 36(1), 215-221.
<https://doi.org/10.3892/ijmm.2015.2218>
- Arias-Moliz, M. T., & Camilleri, J. (2016). The effect of the final irrigant on the antimicrobial activity of root canal sealers. *Journal of Dentistry*, 52, 30-36.
<https://doi.org/10.1016/j.jdent.2016.06.008>
- Assmann, E., Böttcher, D. E., Hoppe, C. B., Grecca, F. S., & Kopper, P. M. P. (2015). Evaluation of Bone Tissue Response to a Sealer Containing Mineral Trioxide Aggregate. *Journal of Endodontics*, 41(1), 62-66.
<https://doi.org/10.1016/j.joen.2014.09.019>
- Association, A. N. S. I. A. D. (2000). ANSI/ADA Standard No. 57: Endodontic Sealing Materials. In: Chicago, IL.
- Ballullaya, S. V., Vinay, V., Thumu, J., Devalla, S., Bollu, I. P., & Balla, S. (2017). Stereomicroscopic Dye Leakage Measurement of Six Different Root Canal Sealers. *J Clin Diagn Res*, 11(6), Zc65-zc68. <https://doi.org/10.7860/jcdr/2017/25780.10077>
- Bardini, G., Casula, L., Ambu, E., Musu, D., Mercadè, M., & Cotti, E. (2021). A 12-month follow-up of primary and secondary root canal treatment in teeth obturated with a hydraulic sealer. *Clinical Oral Investigations*, 25(5), 2757-2764.
<https://doi.org/10.1007/s00784-020-03590-0>
- Bin, C. V., Valera, M. C., Camargo, S. E., Rabelo, S. B., Silva, G. O., Balducci, I., & Camargo, C. H. (2012). Cytotoxicity and genotoxicity of root canal sealers based on mineral trioxide aggregate. *J Endod*, 38(4), 495-500.
<https://doi.org/10.1016/j.joen.2011.11.003>
- Borges, R. P., Sousa-Neto, M. D., Versiani, M. A., Rached-Júnior, F. A., De-Deus, G., Miranda, C. E. S., & Pécora, J. D. (2012). Changes in the surface of four calcium silicate-containing endodontic materials and an epoxy resin-based sealer after a solubility test. *International Endodontic Journal*, 45(5), 419-428.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2591.2011.01992.x>
- Brosco, V. H., Bernardineli, N., Torres, S. A., Consolaro, A., Bramante, C. M., de Moraes, I. G., Ordinola-Zapata, R., & Garcia, R. B. (2010). Bacterial leakage in obturated root canals; part 2: a comparative histologic and microbiologic analyses. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology and Endodontics*, 109(5), 788-794. <https://doi.org/10.1016/j.tripleo.2009.11.036>

- Bukhari, S., & Karabucak, B. (2019). The Antimicrobial Effect of Bioceramic Sealer on an 8-week Matured *Enterococcus faecalis* Biofilm Attached to Root Canal Dentinal Surface. *Journal of Endodontics*, 45(8), 1047-1052. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2019.04.004>
- Camilleri, J. (2015). Sealers and Warm Gutta-percha Obturation Techniques. *Journal of Endodontics*, 41(1), 72-78. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2014.06.007>
- Camilleri, J. (2017). Will Bioceramics be the Future Root Canal Filling Materials? *Current Oral Health Reports*, 4(3), 228-238. <https://doi.org/10.1007/s40496-017-0147-x>
- Camilleri, J., Arias Moliz, T., Bettencourt, A., Costa, J., Martins, F., Rabadijeva, D., Rodriguez, D., Visai, L., Combes, C., Farrugia, C., Koidis, P., & Neves, C. (2020). Standardization of antimicrobial testing of dental devices. *Dent Mater*, 36(3), e59-e73. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2019.12.006>
- Camps, J., Jeanneau, C., El Ayachi, I., Laurent, P., & About, I. (2015). Bioactivity of a Calcium Silicate-based Endodontic Cement (BioRoot RCS): Interactions with Human Periodontal Ligament Cells *In Vitro*. *Journal of Endodontics*, 41(9), 1469-1473. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2015.04.011>
- Candeiro, G. T. d. M., Correia, F. C., Duarte, M. A. H., Ribeiro-Siqueira, D. C., & Gavini, G. (2012). Evaluation of Radiopacity, pH, Release of Calcium Ions, and Flow of a Bioceramic Root Canal Sealer. *Journal of Endodontics*, 38(6), 842-845. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2012.02.029>
- Candeiro, G. T. M., Moura-Netto, C., D'Almeida-Couto, R. S., Azambuja-Júnior, N., Marques, M. M., Cai, S., & Gavini, G. (2016). Cytotoxicity, genotoxicity and antibacterial effectiveness of a bioceramic endodontic sealer. *International Endodontic Journal*, 49(9), 858-864. <https://doi.org/10.1111/iej.12523>
- Carvalho, N. K., Prado, M. C., Senna, P. M., Neves, A. A., Souza, E. M., Fidel, S. R., Sassone, L. M., & Silva, E. J. N. L. (2017). Do smear-layer removal agents affect the push-out bond strength of calcium silicate-based endodontic sealers? *International Endodontic Journal*, 50(6), 612-619. <https://doi.org/10.1111/iej.12662>
- Celikten, B., C. F. U., A. I. O., Tufenkci, P., Misirli, M., K. O. D., & Orhan, K. (2015). Micro-CT assessment of the sealing ability of three root canal filling techniques. *J Oral Sci*, 57(4), 361-366. <https://doi.org/10.2334/josnusd.57.361>
- Celikten, B., Uzuntas, C. F., Orhan, A. I., Orhan, K., Tufenkci, P., Kursun, S., & Demiralp, K. Ö. (2016). Evaluation of root canal sealer filling quality using a single-cone technique in oval shaped canals: An In vitro Micro-CT study. *Scanning*, 38(2), 133-140. <https://doi.org/10.1002/sca.21249>
- Chang, S. W. (2018). Chemical Composition and Porosity Characteristics of Various Calcium Silicate-Based Endodontic Cements. *Bioinorganic Chemistry and Applications*, 2018(1), 2784632. <https://doi.org/10.1155/2018/2784632>
- 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), 531-538. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2019.12.009>
- Chybowski, E. A., Glickman, G. N., Patel, Y., Fleury, A., Solomon, E., & He, J. (2018). Clinical Outcome of Non-Surgical Root Canal Treatment Using a Single-cone Technique with Endosequence Bioceramic Sealer: A Retrospective Analysis. *Journal of Endodontics*, 44(6), 941-945. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2018.02.019>
- Collado-González, M., García-Bernal, D., Oñate-Sánchez, R. E., Ortolani-Seltenerich, P. S., Lozano, A., Forner, L., Llena, C., & Rodríguez-Lozano, F. J. (2017). Biocompatibility of three new calcium silicate-based endodontic sealers on human periodontal ligament

- stem cells. *International Endodontic Journal*, 50(9), 875-884.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1111/iej.12703>
- Collado-González, M., Tomás-Catalá, C. J., Oñate-Sánchez, R. E., Moraleda, J. M., & Rodríguez-Lozano, F. J. (2017). Cytotoxicity of GuttaFlow Bioseal, GuttaFlow2, MTA Fillapex, and AH Plus on Human Periodontal Ligament Stem Cells. *Journal of Endodontics*, 43(5), 816-822. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2017.01.001>
- da Silva, E. J. N. L., Zaia, A. A., & Peters, O. A. (2017). Cytocompatibility of calcium silicate-based sealers in a three-dimensional cell culture model. *Clinical Oral Investigations*, 21(5), 1531-1536. <https://doi.org/10.1007/s00784-016-1918-9>
- De-Deus, G., Gurgel-Filho, E. D., Magalhães, K. M., & Coutinho-Filho, T. (2006). A laboratory analysis of gutta-percha-filled area obtained using Thermafil, System B and lateral condensation. *International Endodontic Journal*, 39(5), 378-383.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1365-2591.2006.01082.x>
- De-Deus, G., Oliveira, D. S., Cavalcante, D. M., Simões-Carvalho, M., Belladonna, F. G., Antunes, L. S., Souza, E. M., Silva, E., & Versiani, M. A. (2021). Methodological proposal for evaluation of adhesion of root canal sealers to gutta-percha. *Int Endod J*, 54(9), 1653-1658. <https://doi.org/10.1111/iej.13549>
- DeLong, C., He, J., & Woodmansey, K. F. (2015). The Effect of Obturation Technique on the Push-out Bond Strength of Calcium Silicate Sealers. *Journal of Endodontics*, 41(3), 385-388. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2014.11.002>
- Donnermeyer, D., Bunne, C., Schäfer, E., & Dammaschke, T. (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.
<https://doi.org/10.1007/s00784-017-2156-5>
- Donnermeyer, D., Bürklein, S., Dammaschke, T., & Schäfer, E. (2019). Endodontic sealers based on calcium silicates: a systematic review. *Odontology*, 107(4), 421-436.
<https://doi.org/10.1007/s10266-018-0400-3>
- Donnermeyer, D., Dornseifer, P., Schäfer, E., & Dammaschke, T. (2018). The push-out bond strength of calcium silicate-based endodontic sealers. *Head & Face Medicine*, 14(1), 13. <https://doi.org/10.1186/s13005-018-0170-8>
- Eid, D., Medioni, E., De-Deus, G., Khalil, I., Naaman, A., & Zogheib, C. (2021). Impact of Warm Vertical Compaction on the Sealing Ability of Calcium Silicate-Based Sealers: A Confocal Microscopic Evaluation. *Materials*, 14(2), 372.
<https://www.mdpi.com/1996-1944/14/2/372>
- Eldeniz, A. U., Shehata, M., Högg, C., & Reichl, F. X. (2016). DNA double-strand breaks caused by new and contemporary endodontic sealers. *International Endodontic Journal*, 49(12), 1141-1151. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/iej.12577>
- Eliaz, N., & Metoki, N. (2017). Calcium Phosphate Bioceramics: A Review of Their History, Structure, Properties, Coating Technologies and Biomedical Applications. *Materials*, 10(4), 334. <https://www.mdpi.com/1996-1944/10/4/334>
- Eltair, M., Pitchika, V., Hickel, R., Kühnisch, J., & Diegritz, C. (2018). Evaluation of the interface between gutta-percha and two types of sealers using scanning electron microscopy (SEM). *Clin Oral Investig*, 22(4), 1631-1639.
<https://doi.org/10.1007/s00784-017-2216-x>
- Eltair, M., Pitchika, V., Hickel, R., Kühnisch, J., & Diegritz, C. (2018). Evaluation of the interface between gutta-percha and two types of sealers using scanning electron microscopy (SEM). *Clinical Oral Investigations*, 22(4), 1631-1639.
<https://doi.org/10.1007/s00784-017-2216-x>
- Ersev, H., Yilmaz, B., Dinçol, M. E., & Dağlaroğlu, R. (2012). The efficacy of ProTaper Universal rotary retreatment instrumentation to remove single gutta-percha cones

- cemented with several endodontic sealers. *International Endodontic Journal*, 45(8), 756-762. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1365-2591.2012.02032.x>
- Georgopoulou, M. K., Wu, M.-K., Nikolaou, A., & Wesselink, P. R. (1995). Effect of thickness on the sealing ability of some root canal sealers. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology and Endodontics*, 80(3), 338-344. [https://doi.org/10.1016/S1079-2104\(05\)80392-0](https://doi.org/10.1016/S1079-2104(05)80392-0)
- Germain, S., Meetu, K., Issam, K., Alfred, N., & Carla, Z. (2018). Impact of the Root Canal Taper on the Apical Adaptability of Sealers used in a Single-cone Technique: A Micro-computed Tomography Study. *J Contemp Dent Pract*, 19(7), 808-815.
- Giacomino, C. M., Wealleans, J. A., Kuhn, N., & Diogenes, A. (2019). Comparative Biocompatibility and Osteogenic Potential of Two Bioceramic Sealers. *Journal of Endodontics*, 45(1), 51-56. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2018.08.007>
- Guivarc'h, M., Jeanneau, C., Giraud, T., Pommel, L., About, I., Azim, A. A., & Bukiet, F. (2020). An international survey on the use of calcium silicate-based sealers in non-surgical endodontic treatment. *Clinical Oral Investigations*, 24(1), 417-424. <https://doi.org/10.1007/s00784-019-02920-1>
- Güven, E. P., Taşlı, P. N., Yalvac, M. E., Sofiev, N., Kayahan, M. B., & Sahin, F. (2013). In vitro comparison of induction capacity and biomineralization ability of mineral trioxide aggregate and a bioceramic root canal sealer. *International Endodontic Journal*, 46(12), 1173-1182. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/iej.12115>
- Ha, J.-H., Kim, H.-C., Kim, Y. K., & Kwon, T.-Y. (2018). An Evaluation of Wetting and Adhesion of Three Bioceramic Root Canal Sealers to Intraradicular Human Dentin. *Materials*, 11(8), 1286.
- Han, P., Wu, C., & Xiao, Y. (2013). The effect of silicate ions on proliferation, osteogenic differentiation and cell signalling pathways (WNT and SHH) of bone marrow stromal cells. *Biomater. Sci.*, 1, 379-392. <https://doi.org/10.1039/C2BM00108J>
- Heran, J., Khalid, S., Albaaj, F., Tomson, P. L., & Camilleri, J. (2019). The single cone obturation technique with a modified warm filler. *Journal of Dentistry*, 89, 103181. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jdent.2019.103181>
- Hess, D., Solomon, E., Spears, R., & He, J. (2011). Retreatability of a Bioceramic Root Canal Sealing Material. *Journal of Endodontics*, 37(11), 1547-1549. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2011.08.016>
- Hirai, V. H. G., Machado, R., Budziak, M. C. L., Piasecki, L., Kowalczyk, A., & Neto, U. X. d. S. (2020). Percentage of Gutta-Percha-, Sealer-, and Void-Filled Areas in Oval-Shaped Root Canals Obturated with Different Filling Techniques: A Confocal Laser Scanning Microscopy Study. *Eur J Dent*, 14(01), 008-012. <https://doi.org/10.1055/s-0040-1701543>
- Holland, R., Gomes, J. E. F., Cintra, L. T. A., Queiroz Í, O. A., & Estrela, C. (2017). Factors affecting the periapical healing process of endodontically treated teeth. *J Appl Oral Sci*, 25(5), 465-476. <https://doi.org/10.1590/1678-7757-2016-0464>
- Jafari, F., & Jafari, S. (2017). Composition and physicochemical properties of calcium silicate based sealers: A review article. *J Clin Exp Dent*, 9(10), e1249-e1255. <https://doi.org/10.4317/jced.54103>
- Jeanneau, C., Giraud, T., Laurent, P., & About, I. (2019). BioRoot RCS Extracts Modulate the Early Mechanisms of Periodontal Inflammation and Regeneration. *Journal of Endodontics*, 45(8), 1016-1023. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2019.04.003>
- Jung, S., Libricht, V., Sielker, S., Hanisch, M. R., Schäfer, E., & Dammaschke, T. (2019). Evaluation of the biocompatibility of root canal sealers on human periodontal ligament cells ex vivo. *Odontology*, 107(1), 54-63. <https://doi.org/10.1007/s10266-018-0380-3>

- Jung, S., Sielker, S., Hanisch, M. R., Libricht, V., Schäfer, E., & Dammaschke, T. (2018). Cytotoxic effects of four different root canal sealers on human osteoblasts. *PLoS One*, 13(3), e0194467. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0194467>
- Kanca, J., III. (1992). Improving Bond Strength Through Acid Etching of Dentin and Bonding to Wet Dentin Surfaces. *The Journal of the American Dental Association*, 123(9), 35-43. <https://doi.org/10.14219/jada.archive.1992.0248>
- Kapralos, V., Koutroulis, A., Ørstavik, D., Sunde, P. T., & Rukke, H. V. (2018). Antibacterial Activity of Endodontic Sealers against Planktonic Bacteria and Bacteria in Biofilms. *Journal of Endodontics*, 44(1), 149-154. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2017.08.023>
- Kebudi Benezra, M., Schembri Wismayer, P., & Camilleri, J. (2018). Interfacial Characteristics and Cytocompatibility of Hydraulic Sealer Cements. *Journal of Endodontics*, 44(6), 1007-1017. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2017.11.011>
- Keleş, A., Alcin, H., Kamalak, A., & Versiani, M. A. (2014). Micro-CT evaluation of root filling quality in oval-shaped canals. *International Endodontic Journal*, 47(12), 1177-1184. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/iej.12269>
- Khalil, I., Naaman, A., & Camilleri, J. (2016). Properties of Tricalcium Silicate Sealers. *Journal of Endodontics*, 42(10), 1529-1535. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2016.06.002>
- Kim, H., Kim, E., Lee, S.-J., & Shin, S.-J. (2015). Comparisons of the Retreatment Efficacy of Calcium Silicate and Epoxy Resin-based Sealers and Residual Sealer in Dentinal Tubules. *Journal of Endodontics*, 41(12), 2025-2030. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2015.08.030>
- Kim, J.-A., Hwang, Y.-C., Rosa, V., Yu, M.-K., Lee, K.-W., & Min, K.-S. (2018). Root Canal Filling Quality of a Premixed Calcium Silicate Endodontic Sealer Applied Using Gutta-percha Cone-mediated Ultrasonic Activation. *Journal of Endodontics*, 44(1), 133-138. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2017.07.023>
- Koutroulis, A., Kuehne, S. A., Cooper, P. R., & Camilleri, J. (2019). The role of calcium ion release on biocompatibility and antimicrobial properties of hydraulic cements. *Scientific Reports*, 9(1), 19019. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-55288-3>
- Lee, B.-N., Hong, J.-U., Kim, S.-M., Jang, J.-H., Chang, H.-S., Hwang, Y.-C., Hwang, I.-N., & Oh, W.-M. (2019). Anti-inflammatory and Osteogenic Effects of Calcium Silicate-based Root Canal Sealers. *Journal of Endodontics*, 45(1), 73-78. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2018.09.006>
- Lee, J. K., Kwak, S. W., Ha, J.-H., Lee, W., & Kim, H.-C. (2017). Physicochemical Properties of Epoxy Resin-Based and Bioceramic-Based Root Canal Sealers. *Bioinorganic Chemistry and Applications*, 2017(1), 2582849. <https://doi.org/https://doi.org/10.1155/2017/2582849>
- Lim, M., Jung, C., Shin, D.-H., Cho, Y.-b., & Song, M. (2020). Calcium silicate-based root canal sealers: a literature review. *Restor Dent Endod*, 45(3), e35. <https://doi.org/10.5395/rde.2020.45.e35>
- Madani, Z. S., Simdar, N., Moudi, E., & Bijani, A. (2015). CBCT Evaluation of the Root Canal Filling Removal Using D-RaCe, ProTaper Retreatment Kit and Hand Files in curved canals. *Iran Endod J*, 10(1), 69-74.
- Mancino, D., Kharouf, N., Cabiddu, M., Bukiet, F., & Haïkel, Y. (2021). Microscopic and chemical evaluation of the filling quality of five obturation techniques in oval-shaped root canals. *Clinical Oral Investigations*, 25(6), 3757-3765. <https://doi.org/10.1007/s00784-020-03703-9>
- Marashdeh, M. Q., Friedman, S., Lévesque, C., & Finer, Y. (2019). Esterases affect the physical properties of materials used to seal the endodontic space. *Dental Materials*, 35(8), 1065-1072. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.dental.2019.04.011>

- Mendes, A. T., Silva, P. B. D., Só, B. B., Hashizume, L. N., Vivan, R. R., Rosa, R. A. D., Duarte, M. A. H., & Só, M. V. R. (2018). Evaluation of Physicochemical Properties of New Calcium Silicate-Based Sealer. *Braz Dent J*, 29(6), 536-540.
<https://doi.org/10.1590/0103-6440201802088>
- Milanovic, I., Milovanovic, P., Antonijevic, D., Dzeletovic, B., Djuric, M., & Miletic, V. (2020). Immediate and Long-Term Porosity of Calcium Silicate-Based Sealers. *J Endod*, 46(4), 515-523. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2020.01.007>
- Mohamed El Sayed, M. A. A., & Al Hussein, H. (2018). Apical dye leakage of two single-cone root canal core materials (hydrophilic core material and gutta-percha) sealed by different types of endodontic sealers: An in vitro study. *J Conserv Dent*, 21(2), 147-152. https://doi.org/10.4103/jcd.Jcd_154_17
- Morgental, R. D., Vier-Pelisser, F. V., Oliveira, S. D., Antunes, F. C., Cogo, D. M., & Kopper, P. M. P. (2011). Antibacterial activity of two MTA-based root canal sealers. *International Endodontic Journal*, 44(12), 1128-1133.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1365-2591.2011.01931.x>
- Mukhtar-Fayyad, D. (2011). Cytocompatibility of new bioceramic-based materials on human fibroblast cells (MRC-5). *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology and Endodontics*, 112(6), e137-e142.
<https://doi.org/10.1016/j.tripleo.2011.05.042>
- Mulay, S., Ajmera, K., & Jain, H. (2017). The Wetting Ability of Root Canal Sealers After Using Various Irrigants. *Journal of Orofacial Sciences*, 9(2).
https://journals.lww.com/joro/fulltext/2017/09020/the_wetting_ability_of_root_canal_sealers_after.8.aspx
- 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), 240-244.
<https://doi.org/10.1016/j.joen.2011.09.027>
- Nair, A. V., Nayak, M., Prasada, L. K., Shetty, V., Kumar, C. N. V., & Nair, R. R. (2018). Comparative Evaluation of Cytotoxicity and Genotoxicity of Two Bioceramic Sealers on Fibroblast Cell Line: An in vitro Study. *J Contemp Dent Pract*, 19(6), 656-661.
- Ng, Y. L., Mann, V., Rahbaran, S., Lewsey, J., & Gulabivala, K. (2008). Outcome of primary root canal treatment: systematic review of the literature – Part 2. Influence of clinical factors. *International Endodontic Journal*, 41(1), 6-31.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1365-2591.2007.01323.x>
- Oliveira, D. S., Cardoso, M. L., Queiroz, T. F., Silva, E. J. N. L., Souza, E. M., & De-Deus, G. (2016). Suboptimal push-out bond strengths of calcium silicate-based sealers. *International Endodontic Journal*, 49(8), 796-801.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1111/iej.12519>
- Oltra, E., Cox, T. C., LaCourse, M. R., Johnson, J. D., & Paranjpe, A. (2017). Retreatability of two endodontic sealers, EndoSequence BC Sealer and AH Plus: a micro-computed tomographic comparison. *Restor Dent Endod*, 42(1), 19-26.
<https://doi.org/10.5395/rde.2017.42.1.19>
- Ortiz, F. G., & Jimeno, E. B. (2018). Analysis of the porosity of endodontic sealers through micro-computed tomography: A systematic review. *J Conserv Dent*, 21(3), 238-242.
https://doi.org/10.4103/jcd.Jcd_346_17
- Pane, E. S., Palamara, J. E. A., & Messer, H. H. (2013). Critical Evaluation of the Push-out Test for Root Canal Filling Materials. *Journal of Endodontics*, 39(5), 669-673.
<https://doi.org/10.1016/j.joen.2012.12.032>

- Parirokh, M., & Torabinejad, M. (2010). Mineral Trioxide Aggregate: A Comprehensive Literature Review—Part I: Chemical, Physical, and Antibacterial Properties. *Journal of Endodontics*, 36(1), 16-27. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2009.09.006>
- Pedullà, E., Abiad, R. S., Conte, G., La Rosa, G. R. M., Rapisarda, E., & Neelakantan, P. (2020). Root fillings with a matched-taper single cone and two calcium silicate-based sealers: an analysis of voids using micro-computed tomography. *Clin Oral Investig*, 24(12), 4487-4492. <https://doi.org/10.1007/s00784-020-03313-5>
- Penha da Silva, P. J., Marceliano-Alves, M. F., Provenzano, J. C., Dellazari, R. L. A., Gonçalves, L. S., & Alves, F. R. F. (2021). Quality of Root Canal Filling Using a Bioceramic Sealer in Oval Canals: A Three-Dimensional Analysis. *Eur J Dent*, 15(03), 475-480. <https://doi.org/10.1055/s-0040-1722095>
- Poggio, C., Dagna, A., Ceci, M., Meravini, M. V., Colombo, M., & Pietrocola, G. (2017). Solubility and pH of bioceramic root canal sealers: A comparative study. *J Clin Exp Dent*, 9(10), e1189-e1194. <https://doi.org/10.4317/jced.54040>
- Prati, C., & Gandolfi, M. G. (2015). Calcium silicate bioactive cements: Biological perspectives and clinical applications. *Dental Materials*, 31(4), 351-370. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.dental.2015.01.004>
- 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), 1784-1788. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2016.09.018>
- Razmi, H., Bolhari, B., Karamzadeh Dashti, N., & Fazlyab, M. (2016). The Effect of Canal Dryness on Bond Strength of Bioceramic and Epoxy-resin Sealers after Irrigation with Sodium Hypochlorite or Chlorhexidine. *Iranian Endodontic Journal*, 11(2), 129-133. <https://doi.org/10.22037/iej.v11i2.10819>
- Rodríguez-Lozano, F. J., García-Bernal, D., Oñate-Sánchez, R. E., Ortolani-Seltenerich, P. S., Forner, L., & Moraleda, J. M. (2017). Evaluation of cytocompatibility of calcium silicate-based endodontic sealers and their effects on the biological responses of mesenchymal dental stem cells. *Int Endod J*, 50(1), 67-76. <https://doi.org/10.1111/iej.12596>
- Rodríguez-Lozano, F. J., López-García, S., García-Bernal, D., Tomás-Catalá, C. J., Santos, J. M., Llena, C., Lozano, A., Murcia, L., & Forner, L. (2020). Chemical composition and bioactivity potential of the new Endosequence BC Sealer formulation HiFlow. *Int Endod J*, 53(9), 1216-1228. <https://doi.org/10.1111/iej.13327>
- Roizenblit, R. N., Soares, F. O., Lopes, R. T., dos Santos, B. C., & Gusman, H. (2020). Root canal filling quality of mandibular molars with EndoSequence BC and AH Plus sealers: A micro-CT study. *Australian Endodontic Journal*, 46(1), 82-87. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/aej.12373>
- Rossi-Fedele, G., & Ahmed, H. M. A. (2017). Assessment of Root Canal Filling Removal Effectiveness Using Micro–computed Tomography: A Systematic Review. *Journal of Endodontics*, 43(4), 520-526. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2016.12.008>
- Santos-Junior, A. O., Tanomaru-Filho, M., Pinto, J. C., Tavares, K., Torres, F. F. E., & Guerreiro-Tanomaru, J. M. (2021). Effect of obturation technique using a new bioceramic sealer on the presence of voids in flattened root canals. *Braz Oral Res*, 35, e028. <https://doi.org/10.1590/1807-3107bor-2021.vol35.0028>
- Scarpato, R. K., Grecca, F. S., & Fachin, E. V. (2009). Analysis of tissue reactions to methacrylate resin-based, epoxy resin-based, and zinc oxide-eugenol endodontic sealers. *J Endod*, 35(2), 229-232. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2008.10.025>

- Shi, M., Zhou, Y., Shao, J., Chen, Z., Song, B., Chang, J., Wu, C., & Xiao, Y. (2015). Stimulation of osteogenesis and angiogenesis of hBMSCs by delivering Si ions and functional drug from mesoporous silica nanospheres. *Acta Biomater*, 21, 178-189. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2015.04.019>
- Shokouhinejad, N., Gorjestani, H., Nasseh, A. A., Hoseini, A., Mohammadi, M., & Shamshiri, A. R. (2013). Push-out bond strength of gutta-percha with a new bioceramic sealer in the presence or absence of smear layer. *Australian Endodontic Journal*, 39(3), 102-106. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1747-4477.2011.00310.x>
- Siboni, F., Taddei, P., Zamparini, F., Prati, C., & Gandolfi, M. G. (2017). Properties of BioRoot RCS, a tricalcium silicate endodontic sealer modified with povidone and polycarboxylate. *International Endodontic Journal*, 50(S2), e120-e136. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/iej.12856>
- Silva Almeida, L. H., Moraes, R. R., Morgental, R. D., & Pappen, F. G. (2017). Are Premixed Calcium Silicate-based Endodontic Sealers Comparable to Conventional Materials? A Systematic Review of In Vitro Studies. *J Endod*, 43(4), 527-535. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2016.11.019>
- Silva Almeida, L. H., Moraes, R. R., Morgental, R. D., & Pappen, F. G. (2017). Are Premixed Calcium Silicate-based Endodontic Sealers Comparable to Conventional Materials? A Systematic Review of In Vitro Studies. *Journal of Endodontics*, 43(4), 527-535. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2016.11.019>
- Simsek, N., Keles, A., Ahmetoglu, F., Ocak, M. S., & Yologlu, S. (2014). Comparison of different retreatment techniques and root canal sealers: a scanning electron microscopic study. *Braz Oral Res*, 28. <https://doi.org/10.1590/1807-3107bor-2014.vol28.0006>
- Singh, G., Gupta, I., Elshamy, F. M. M., Boreak, N., & Homeida, H. E. (2016). In vitro comparison of antibacterial properties of bioceramic-based sealer, resin-based sealer and zinc oxide eugenol based sealer and two mineral trioxide aggregates. *Eur J Dent*, 10(03), 366-369. <https://doi.org/10.4103/1305-7456.184145>
- Standardization, I. O. f. (2012). ISO 6876:2012 Dentistry—Root Canal Sealing Materials. In (Vol. Geneva, Switzerland).
- Standardization, I. O. f. (2018). *ISO 10993-1:2018 Biological Evaluation of Medical Devices—Part 1: Evaluation and Testing within a Risk Management Process*.
- Suk, M., Bago, I., Katić, M., Šnjarić, D., Munitić, M. Š., & Anić, I. (2017). The efficacy of photon-initiated photoacoustic streaming in the removal of calcium silicate-based filling remnants from the root canal after rotary retreatment. *Lasers in Medical Science*, 32(9), 2055-2062. <https://doi.org/10.1007/s10103-017-2325-4>
- Sundqvist, G., Figdor, D., Persson, S., & Sjögren, U. (1998). Microbiologic analysis of teeth with failed endodontic treatment and the outcome of conservative re-treatment. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology and Endodontics*, 85(1), 86-93. [https://doi.org/10.1016/S1079-2104\(98\)90404-8](https://doi.org/10.1016/S1079-2104(98)90404-8)
- Tabassum, S., & Khan, F. R. (2016). Failure of endodontic treatment: The usual suspects. *Eur J Dent*, 10(1), 144-147. <https://doi.org/10.4103/1305-7456.175682>
- Tanomaru-Filho, M., Torres, F. F. E., Chávez-Andrade, G. M., de Almeida, M., Navarro, L. G., Steier, L., & Guerreiro-Tanomaru, J. M. (2017). Physicochemical Properties and Volumetric Change of Silicone/Bioactive Glass and Calcium-Silicate-based Endodontic Sealers. *Journal of Endodontics*, 43(12), 2097-2101. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2017.07.005>
- Tavares, C. O., Böttcher, D. E., Assmann, E., Kopper, P. M. P., de Figueiredo, J. A. P., Grecca, F. S., & Scarparo, R. K. (2013). Tissue Reactions to a New Mineral Trioxide

- Aggregate–containing Endodontic Sealer. *Journal of Endodontics*, 39(5), 653-657. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2012.10.009>
- Torabinejad, M., Parirokh, M., & Dummer, P. M. H. (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. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/iej.12843>
- Torres, F. F. E., Zordan-Bronzel, C. L., Guerreiro-Tanomaru, J. M., Chávez-Andrade, G. M., Pinto, J. C., & Tanomaru-Filho, M. (2020). Effect of immersion in distilled water or phosphate-buffered saline on the solubility, volumetric change and presence of voids within new calcium silicate-based root canal sealers. *International Endodontic Journal*, 53(3), 385-391. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/iej.13225>
- Trope, M., Bunes, A., & Debelian, G. (2015). Root filling materials and techniques: bioceramics a new hope? *Endodontic Topics*, 32(1), 86-96. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/etp.12074>
- 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. *Braz Oral Res*, 29. <https://doi.org/10.1590/1807-3107BOR-2015.vol29.0059>
- Urban, K., Neuhaus, J., Donnermeyer, D., Schäfer, E., & Dammaschke, T. (2018). Solubility and pH Value of 3 Different Root Canal Sealers: A Long-term Investigation. *Journal of Endodontics*, 44(11), 1736-1740. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2018.07.026>
- Uzunoglu, E., Yilmaz, Z., Sungur, D. D., & Altundasar, E. (2015). Retreatability of Root Canals Obturated Using Gutta-Percha with Bioceramic, MTA and Resin-Based Sealers. *Iran Endod J*, 10(2), 93-98.
- Valois, C. R. A., Silva, L. P., & Azevedo, R. B. (2005). Structural Effects of Sodium Hypochlorite Solutions on Gutta-Percha Cones: Atomic Force Microscopy Study. *Journal of Endodontics*, 31(10), 749-751. <https://doi.org/10.1097/01.don.0000158012.01520.e5>
- Venturi, M., Pasquantonio, G., Falconi, M., & Breschi, L. (2002). Temperature change within gutta-percha induced by the System-B Heat Source. *Int Endod J*, 35(9), 740-746. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2591.2002.00553.x>
- Vouzara, T., Dimosiari, G., Koulaouzidou, E. A., & Economides, N. (2018). Cytotoxicity of a New Calcium Silicate Endodontic Sealer. *Journal of Endodontics*, 44(5), 849-852. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2018.01.015>
- Wu, M. K., De Gee, A. J., & Wesselink, P. R. (1994). Leakage of four root canal sealers at different thicknesses. *International Endodontic Journal*, 27(6), 304-308. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1365-2591.1994.tb00273.x>
- Xuereb, M., Vella, P., Damidot, D., Sammut, C. V., & Camilleri, J. (2015). In Situ Assessment of the Setting of Tricalcium Silicate–based Sealers Using a Dentin Pressure Model. *Journal of Endodontics*, 41(1), 111-124. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2014.09.015>
- Yang, D.-K., Kim, S., Park, J.-W., Kim, E., & Shin, S.-J. (2018). Different Setting Conditions Affect Surface Characteristics and Microhardness of Calcium Silicate-Based Sealers. *Scanning*, 2018(1), 7136345. <https://doi.org/https://doi.org/10.1155/2018/7136345>
- Yanpiset, K., Banomyong, D., Chotvorarak, K., & Srisatjaluk, R. L. (2018). Bacterial leakage and micro-computed tomography evaluation in round-shaped canals obturated with bioceramic cone and sealer using matched single cone technique. *Restor Dent Endod*, 43(3), e30. <https://doi.org/10.5395/rde.2018.43.e30>
- Yuan, Z., Zhu, X., Li, Y., Yan, P., & Jiang, H. (2018). Influence of iRoot SP and mineral trioxide aggregate on the activation and polarization of macrophages induced by

- lipopolysaccharide. *BMC Oral Health*, 18(1), 56. <https://doi.org/10.1186/s12903-018-0511-9>
- Yunna, C., Mengru, H., Lei, W., & Weidong, C. (2020). Macrophage M1/M2 polarization. *European Journal of Pharmacology*, 877, 173090. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ejphar.2020.173090>
- Yürüker, S., Görduysus, M., Küçükaya, S., Uzunoğlu, E., Ilgın, C., Gülen, O., Tuncel, B., & Görduysus, M. Ö. (2016). Efficacy of Combined Use of Different Nickel-Titanium Files on Removing Root Canal Filling Materials. *Journal of Endodontics*, 42(3), 487-492. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2015.11.019>
- Zamparini, F., Siboni, F., Prati, C., Taddei, P., & Gandolfi, M. G. (2019). Properties of calcium silicate-monobasic calcium phosphate materials for endodontics containing tantalum pentoxide and zirconium oxide. *Clinical Oral Investigations*, 23(1), 445-457. <https://doi.org/10.1007/s00784-018-2453-7>
- Zavattini, A., Knight, A., Foschi, F., & Mannocci, F. (2020). Outcome of Root Canal Treatments Using a New Calcium Silicate Root Canal Sealer: A Non-Randomized Clinical Trial. *Journal of Clinical Medicine*, 9(3), 782. <https://www.mdpi.com/2077-0383/9/3/782>
- Zhang, H., Shen, Y., Ruse, N. D., & Haapasalo, M. (2009). Antibacterial Activity of Endodontic Sealers by Modified Direct Contact Test Against *Enterococcus faecalis*. *Journal of Endodontics*, 35(7), 1051-1055. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2009.04.022>
- Zhou, H.-m., Du, T.-f., Shen, Y., Wang, Z.-j., Zheng, Y.-f., & Haapasalo, M. (2015). *In Vitro* Cytotoxicity of Calcium Silicate-containing Endodontic Sealers. *Journal of Endodontics*, 41(1), 56-61. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2014.09.012>
- Zhou, H.-m., Shen, Y., Zheng, W., Li, L., Zheng, Y.-f., & Haapasalo, M. (2013). Physical Properties of 5 Root Canal Sealers. *Journal of Endodontics*, 39(10), 1281-1286. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2013.06.012>
- Zhu, X., Yuan, Z., Yan, P., Li, Y., Jiang, H., & Huang, S. (2017). Effect of iRoot SP and mineral trioxide aggregate (MTA) on the viability and polarization of macrophages. *Arch Oral Biol*, 80, 27-33. <https://doi.org/10.1016/j.archoralbio.2017.03.010>
- Zmener, O., Pameijer, C. H., Serrano, S. A., Vidueira, M., & Macchi, R. L. (2008). Significance of Moist Root Canal Dentin with the Use of Methacrylate-based Endodontic Sealers: An *In Vitro* Coronal Dye Leakage Study. *Journal of Endodontics*, 34(1), 76-79. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2007.10.012>
- Zogheib, C., Hanna, M., Pasqualini, D., & Naaman, A. (2016). Quantitative volumetric analysis of cross-linked gutta-percha obturators. *Ann Stomatol (Roma)*, 7(3), 46-51. <https://doi.org/10.11138/ads/2016.7.3.046>
- Zordan-Bronzel, C. L., Esteves Torres, F. F., Tanomaru-Filho, M., Chávez-Andrade, G. M., Bosso-Martelo, R., & Guerreiro-Tanomaru, J. M. (2019). Evaluation of Physicochemical Properties of a New Calcium Silicate-based Sealer, Bio-C Sealer. *Journal of Endodontics*, 45(10), 1248-1252. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2019.07.006>
- Zordan-Bronzel, C. L., Tanomaru-Filho, M., Rodrigues, E. M., Chávez-Andrade, G. M., Faria, G., & Guerreiro-Tanomaru, J. M. (2019). Cytocompatibility, bioactive potential and antimicrobial activity of an experimental calcium silicate-based endodontic sealer. *International Endodontic Journal*, 52(7), 979-986. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/iej.13086>

BÖLÜM 2

**CERRAHİ OLMAYAN YENİDEN KÖK
KANAL TEDAVİSİ:
ENDİKASYONLAR, GÜNCEL
TEKNİKLER, KLİNİK BAŞARIYI
ETKİLEYEN FAKTÖRLER**

Giriş

Birincil kök kanal tedavisinin uzun dönem başarı oranlarının literatürde %78 ile %91 arasında değiştiği bildirilmekle birlikte, bazı vakalarda tedavi başarısızlıklarıyla karşılaşmaya devam edilmektedir (Ricucci et al., 2011; Sjögren et al., 1990). Endodontik tedavi başarısızlığı, inatçı veya sekonder mikrobiyal enfeksiyonlar, gözden kaçan kanal anatomileri, yetersiz kemo-mekanik preparasyon, koronal mikrosızıntı, yetersiz kanal dolumu ve çeşitli iyatrojenik komplikasyonlar gibi biyolojik ve teknik faktörlerle ilişkilendirilmektedir (Tabassum & Khan, 2016). Özellikle kök kanal sisteminde mikroorganizmaların varlığını sürdürmesi veya sekonder enfeksiyonun gelişmesi, apikal periodontitisin devam etmesinde ya da yeniden gelişmesinde temel etiyolojik faktör olarak kabul edilmektedir (Bucchi et al., 2023).

Başarısız kök kanal tedavilerinin yönetiminde cerrahi olmayan yeniden kök kanal tedavisi, endodontik cerrahi girişimler ve diş çekimi olmak üzere üç temel tedavi seçeneği mevcuttur. Hangi tedavi yaklaşımının tercih edileceği dişin prognozu, tedavi edilebilirlik potansiyeli ve mevcut bilimsel kanıtların ortaya koyduğu klinik sonuçlar dikkate alınarak belirlenmelidir (Friedman, 2002).

Amerikan Endodonti Birliği (American Association of Endodontists, AAE) tarafından yayımlanan Endodontik Terimler Sözlüğü 'ne göre cerrahi olmayan yeniden kök kanal tedavisi, mevcut kök kanal dolgusunun uzaklaştırılmasını takiben kök kanal sisteminin temizlenmesi, şekillendirilmesi ve uygun bir kanal dolgu materyali ile yeniden doldurulmasını içeren bir tedavi prosedürü olarak tanımlanmaktadır (American Association of Endodontists, 2020). Cerrahi olmayan yeniden kök kanal tedavisi minimal invaziv yapısı, düşük maliyetli oluşu ve yüksek başarı potansiyeli nedeniyle çoğu vakada ilk tercih edilen yaklaşım olarak kabul edilmektedir (Işık & Aydın, 2024).

1. Endodontik Tedavi Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Endodontik tedavilerin sonuçlarının değerlendirilmesi uzun yıllardır literatürde tartışılan konular arasında yer almaktadır. Bu durumun temel nedeni, periapikal iyileşme sürecinin biyolojik olarak karmaşık ve bireyler arasında değişkenlik gösterebilen bir yapıya sahip olmasıdır (Holland et al., 2017; Mosquera-Barreiro et al., 2024). Periapikal dokulardaki iyileşmenin büyük ölçüde tedaviden sonraki ilk yıl içerisinde gerçekleştiği kabul edilmekle birlikte, bazı vakalarda iyileşme süreci yıllar boyunca devam edebilmekte ve tam iyileşmenin görülebilmesi için dört ila on yıla varan uzun dönem takipler gerekebilmektedir (Azim et al., 2016; Ng et al., 2011a, 2011c).

Periapikal dokularda meydana gelen iyileşme, mikrobiyal yükün azaltılması ile konağın immün yanıtı ve onarıcı mekanizmaları arasındaki dinamik etkileşim sonucunda gerçekleşen karmaşık biyolojik bir süreçtir (Segura-Egea et al., 2023). Diyabet, kardiyovasküler hastalıklar, kronik inflamatuvar bağırsak hastalıkları, HIV enfeksiyonu ve sigara kullanımı gibi sistemik durumların immün yanıtı, kemik metabolizmasını ve mikrovasküler dolaşımı etkileyerek periapikal dokuların onarım kapasitesini azaltabileceği bildirilmektedir ("Influence of systemic diseases on post-endodontic repair," 2024).

Periapikal iyileşme sürecinin bireyler arasında önemli farklılıklar gösterebilmesi, endodontik tedavi sonuçlarının değerlendirilmesine yönelik standart kriterlerin geliştirilmesini gerekli kılmıştır. Bu doğrultuda Avrupa Endodonti Derneği (European Society of Endodontology, ESE), kök kanal tedavilerinin sonuçlarının değerlendirilmesine ilişkin kılavuzlar yayımlamış ve endodontide başarı ile başarısızlık kavramlarının tanımlanmasına yönelik ölçütler ortaya koymuştur. ESE kriterlerine göre kök kanal tedavisinin sonucu en erken bir yıllık takip sonrasında değerlendirilmelidir (European Society of, 2006). Tedavi sonrası dönemde ağrı, şişlik ve diğer klinik semptomların bulunmaması, fistül varlığının olmaması, dişin fonksiyonunu sürdürebilmesi ve periodontal ligament aralığının radyografik olarak normal görünüm sergilemesi başarılı tedavinin göstergeleri arasında kabul edilmektedir. Buna karşılık enfeksiyon belirtilerinin devam etmesi, yeni bir periapikal lezyonun ortaya çıkması veya mevcut lezyonun boyutunda artış gözlenmesi başarısızlık göstergeleri arasında yer almaktadır (European Society of, 2006). Radyografik incelemelerde periapikal lezyonun aynı boyutta kalması veya hacminde yalnızca sınırlı bir küçülme görülmesi durumunda ise sonuç “belirsiz” olarak nitelendirilmekte ve dört yıla kadar uzayabilen takip süresi önerilmektedir (European Society of, 2006).

Endodontik tedavi sonuçlarının yalnızca radyografik iyileşmeyle değerlendirilmesinin bazı sınırlılıklar taşıdığı öne sürülmüştür (Van Nieuwenhuysen et al., 1994). Bu nedenle Amerikan Endodonti Birliği (AAE), tedaviye odaklanan geleneksel başarı-başarısızlık yaklaşımı yerine, hastanın klinik durumunu ve iyileşme sürecini esas alan bir değerlendirme modeli önermiştir. Bu sınıflamaya göre endodontik tedavi uygulanmış dişler iyileşmiş/fonksiyonel, iyileşmekte olan ve iyileşmemiş olmak üzere üç grupta ele alınmaktadır (Messer & Yu, 2013). Özellikle klinik olarak asemptomatik ve fonksiyonunu sürdüren dişlerde, radyografik iyileşme tam olarak sağlanmamış olsa bile, gereksiz müdahalelerden kaçınılarak konservatif bir yaklaşımının sürdürülmesi önerilmektedir (Yu et al., 2012).

Endodontik tedavinin uzun dönem başarısının değerlendirilmesinde periapikal iyileşmenin yanı sıra koronal restorasyonun kalitesi ve koronal sızdırmazlığın korunması da kritik öneme sahiptir. Nitekim çeşitli çalışmalarda, ideal koronal restorasyona sahip dişlerde periapikal iyileşme oranlarının ideal olmayan restorasyonlu dişlere kıyasla anlamlı düzeyde daha yüksek olduğu gösterilmiştir (Gillen et al., 2011).

Cerrahi olmayan yeniden kök kanal tedavisine ilişkin karar verme süreci, çok yönlü bir klinik ve radyografik değerlendirme gerektirmektedir. Bu değerlendirme sonucunda elde edilen bulgular, yeniden kök kanal tedavisinin endikasyonunun belirlenmesinde ve en uygun tedavi yaklaşımının seçilmesinde temel rol oynamaktadır.

2. Cerrahi Olmayan Yeniden Kök Kanal Tedavisinde Klinik Karar Verme Süreci ve Tedavi Sonucunu Etkileyen Faktörler

Endodontik tedavi başarısızlıklarının büyük çoğunluğunda enfeksiyonun ve buna eşlik eden inflamatuvar sürecin devam ettiği kabul edilmektedir (Hoen & Pink, 2002). Bu nedenle yeniden kök kanal tedavisi kararı, başarısızlığın olası nedenlerinin ayrıntılı biçimde değerlendirilmesini gerektirmektedir. Klinik karar verme süreci ayrıntılı anamnez, detaylı klinik muayene ve uygun görüntüleme yöntemlerinden elde edilen bulguların birlikte yorumlanmasına dayanmalıdır (Babić et al., 2019; Zanza et al., 2023).

Klinik ve Radyografik Değerlendirme

Klinik inceleme sırasında sert ve yumuşak dokuların değerlendirilmesi, palpasyon ve perküsyon testleri, periodontal muayene, çürük varlığının incelenmesi ve olası çatlak veya kırıkların belirlenmesi gerekmektedir. Ayrıca mevcut restorasyonların durumu, koronal mikrosızıntı ve önceki endodontik tedavinin teknik kalitesi dikkate alınmalıdır (Dioguardi et al., 2022).

Radyografik değerlendirme ise mevcut periapikal durumun belirlenmesi, önceki tedavinin kalitesinin değerlendirilmesi ve yeniden tedavi gereksiniminin ortaya konulmasında temel tanısal araçlardan biridir (Huomonen & Ørstavik, 2002; Ng et al., 2011c).

Günümüzde cerrahi olmayan yeniden kök kanal tedavisine ilişkin tanısal değerlendirmede en yaygın kullanılan görüntüleme yöntemlerini iki boyutlu radyografiler oluşturmaktadır (Huomonen & Ørstavik, 2002). İntraoral periapikal ve panoramik radyografiler, düşük

maliyetleri, kolay uygulanabilir olmaları ve düşük radyasyon dozları nedeniyle rutin klinik uygulamada yaygın olarak tercih edilmektedir (Deshpande & Bhargava, 2014).

Kök kanal tedavili dişlerin periapikal durumunun radyografik olarak değerlendirilmesinde en yaygın kullanılan sistemlerden biri Ørstavik ve arkadaşları tarafından geliştirilen Periapikal İndeks (PAI) skorlamasıdır (Ørstavik, 1996; Ørstavik & Hørsted-Bindslev, 1993). İki boyutlu periapikal radyografilerle yapılan değerlendirmelere dayanan bu sistem, periapikal dokuların durumunu beş kategoride sınıflandırmakta ve genellikle PAI 1–2 skorları sağlıklı ya da başarılı, PAI 3–5 skorları ise hastalıklı ya da başarısız olarak yorumlanmaktadır (Kirkevang et al., 2015; Marending et al., 2005).

Son yıllarda üç boyutlu görüntüleme yöntemlerinin gelişmesiyle birlikte, özellikle karmaşık endodontik vakalarda konik ışınli bilgisayarlı tomografinin (CBCT) kullanımı giderek yaygınlaşmıştır (Bhatt et al., 2021). CBCT' nin, periapikal lezyonların saptanmasında iki boyutlu radyografilere göre daha yüksek tanısal değere sahip olduğu ve periapikal radyolusensinin belirlenmesinde duyarlılığı %50–70 oranında artırabildiği bildirilmiştir (Aminoshariae et al., 2018; Patel et al., 2007; Venskutonis et al., 2014).

CBCT, gözden kaçan kanalların belirlenmesine, kök kanal morfolojisinin ve kanal konfigürasyonlarının ayrıntılı olarak değerlendirilmesine ve anatomik varyasyonların saptanmasına olanak sağlamaktadır (Venskutonis et al., 2014). Lezyonun boyutu, lokalizasyonu ve çevre anatomik yapılarla ilişkisi üç boyutlu olarak değerlendirilebildiğinden tedavi planlaması daha öngörülebilir hale gelmektedir (Patel et al., 2007). Çeşitli çalışmalarda, CBCT ile elde edilen ek bilgilerin yeniden kök kanal tedavisi planlanan olguların yaklaşık %60'ından fazlasında başlangıç tanısını veya tedavi planını değiştirebildiği gösterilmiştir (Ee et al., 2014).

Bununla birlikte, daha yüksek radyasyon maruziyeti, maliyet ve görüntü artefaktları gibi dezavantajları nedeniyle CBCT' nin rutin kullanımı önerilmemektedir (Venkatesh & Elluru, 2017). Tüm bu bilgiler doğrultusunda görüntüleme yöntemi seçimi vaka bazlı yapılmalı, beklenen tanısal yarar ile radyasyon riski birlikte değerlendirilmelidir.

Prognostik Faktörler

Birincil ve ikincil kök kanal tedavilerinin sonuçlarını etkileyen faktörlerin belirlenmesi amacıyla literatürde birçok çalışma gerçekleştirilmiştir (Ng, Mann, & Gulabivala, 2008; Ng et al., 2007; Ng, Mann, Rahbaran, et al., 2008). Bu faktörleri mevcut kanıtlar ışığında preoperatif,

intraoperatif ve postoperatif faktörler olmak üzere üç ana grupta inceleyen en güncel değerlendirme Gulabivala ve arkadaşları tarafından 2023 yılında yayımlanmıştır (Gulabivala & Ng, 2023). Bu çalışmaya göre;

Preoperatif faktörler, hastaya ve dişe ait faktörleri kapsamaktadır. Bunlar arasında hastanın yaşı, sistemik sağlık durumu, dişin anatomik özellikleri ve konumu, preoperatif pulpal ve periapikal durum ve operatörün deneyimi yer almaktadır. Özellikle preoperatif apikal periodontitis varlığı ve lezyonun boyutu, tedavi sonucunu etkileyen en önemli prognostik değişkenler arasında kabul edilmektedir.

İntraoperatif faktörler, giriş kavitesinin hazırlanması, kök kanal sisteminin bulunması ve şekillendirilmesi, irrigasyon protokolleri, kanal içi medikament kullanımı, kök kanal dolgusunun kalitesi ve apikal sonlanma düzeyi gibi tedavi sürecine ait değişkenleri kapsamaktadır. Kök kanal sisteminin etkin şekilde dezenfekte edilmesi ve uygun apikal kontrolün sağlanması, tedavi başarısının temel belirleyicileri arasında yer almaktadır.

Postoperatif faktörler ise koronal restorasyonun kalitesi, restorasyonun zamanlaması, kalan diş dokusunun miktarı ve post uygulamaları gibi değişkenlerden oluşmaktadır. Koronal mikrosızıntının önlenmesi yeniden enfeksiyon riskinin azaltılmasında kritik öneme sahiptir.

Yeniden kök kanal tedavilerinde başarıyı etkileyen faktörlerin büyük bölümü primer kök kanal tedavileri ile benzerlik göstermektedir (Sainudeen et al., 2024). Bununla birlikte, önceki tedavi girişimine bağlı olarak oluşan kanal morfolojisindeki değişiklikler, iyatrojenik komplikasyonlar ve mevcut restorasyonun neden olduğu engeller yeniden tedavilere özgü prognostik faktörler arasında yer almaktadır (Signor et al., 2021). Özellikle kök kanal sisteminin doğal anatomisinin önceki tedavi sırasında değiştirilmiş olması, yeniden kök kanal tedavisinin başarısını önemli ölçüde azaltabilmektedir (Gorni & Gagliani, 2004). Tedavi öncesinde başarısızlığın nedenlerinin doğru şekilde belirlenmesi ve prognozun kapsamlı olarak değerlendirilmesi, uygun tedavi yaklaşımının seçilmesi ve tedavi başarısının öngörülebilmesi açısından kritik önem taşımaktadır.

3. Klinik Prosedürler

Cerrahi olmayan yeniden kök kanal tedavisinde klinik uygulamalar, kök kanal sistemine yeniden erişimin sağlanması ve enfeksiyonun ortadan kaldırılmasına yönelik bir dizi ardışık

işlemi kapsamaktadır (Del Fabbro et al., 2016). Bu bölümde tedavinin temel klinik aşamaları ele alınacaktır.

Koronal Restorasyonların Uzaklaştırılması

Kök kanal tedavisi uygulanan dişlerin büyük çoğunluğu protetik restorasyonlarla ve bazı durumlarda da kanal içi postlarla restore edilmektedir (Frankenberger et al., 2024). Cerrahi olmayan yeniden kök kanal tedavisi sırasında ise kök kanal sistemine ideal erişim sağlamak amacıyla pulpa odası ve kron üzerindeki tüm restoratif materyallerin uzaklaştırılması önerilmektedir. (Marinho et al., 2026).

Bazı durumlarda mevcut restorasyonun korunması amacıyla endodontik giriş kavitesi restorasyonun üzerinden açılabilir ancak bu yaklaşımın tercih edilebilmesi için restorasyonun marjinal uyumunun yeterli olması, mikrosızıntı meydana gelmemiş olması ve biyolojik açıdan kabul edilebilir özelliklere sahip olması gerekmektedir (Abusteit et al., 2022).

Koronal restorasyonların uzaklaştırılması aşamasında karşılaşılan en önemli teknik güçlüklerden biri, kanal içerisinde bulunan postların güvenli şekilde uzaklaştırılmasıdır (Gesi et al., 2003). Post sistemleri, morfolojik özelliklerine göre paralel ve konik, materyal özelliklerine göre metal ve fiber, retansiyon mekanizmalarına göre ise aktif ve pasif postlar olarak sınıflandırılmaktadır (Varatharajan et al., 2021).

Aktif retansiyonlu postların uzaklaştırılmasında temel amaç, çevresindeki kor materyalini kontrollü biçimde elimine ederek postun gevşetilmesini sağlamaktır (Dominici et al., 2005). Bu amaçla sıklıkla ultrasonik sistemlerden yararlanılmakta ve işlem boyunca oluşabilecek ısı artışının periodontal dokular üzerindeki olumsuz etkilerini önlemek için yeterli soğutma sağlanması önerilmektedir (Budd et al., 2005).

Fiber postların kök kanal sisteminden uzaklaştırılması ise metal postlara göre farklılık göstermektedir. Kanal içerisinde adeziv sistemlerle güçlü şekilde bağlanmaları nedeniyle bu postlar çoğunlukla frezler, özel post uzaklaştırma sistemleri veya ultrasonik uçlar kullanılarak kontrollü biçimde aşındırılmaktadır (Haupt et al., 2018).

Fiber postların uzaklaştırılmasında en yaygın kullanılan yöntem ultrasonikler olmakla birlikte, yıllar içerisinde Egger Post Removal Kit, Masseran Kit, Auto Abdicator Sistemi, Gonon ve Ruddell post çıkarma sistemleri ile DT Post Removal Kit gibi farklı yöntemler de önerilmiştir (Castrisos & Abbott, 2002; Haupt et al., 2022).

Post uzaklaştırılması sırasında kullanılan yöntemlere bağlı olarak iyatrojenik komplikasyonlar, periodontal dokularda ısı artışına bağlı hasar, dentin kaybı ve dentinde mikroçatlak oluşumu gibi riskler göz önünde bulundurulmalıdır (Dominici et al., 2005; Haupt et al., 2018).

Bununla birlikte, uygun ekipman, yeterli soğutma ve büyütme sistemlerinin kullanıldığı durumlarda post uzaklaştırma işlemlerinin yüksek başarı oranlarıyla gerçekleştirilebildiği ve klinik açıdan güvenilir bir prosedür olduğu bildirilmektedir (Pelozo et al., 2025). Bu nedenle, kanal içi post varlığında mevcut tekniklerle postların güvenli şekilde uzaklaştırılabilmesi ve kök kırığı riskinin düşük olması nedeniyle cerrahi yaklaşımlardan önce cerrahi olmayan yeniden kök kanal tedavisi seçeneği öncelikli olarak değerlendirilmelidir (Zanza et al., 2023).

Kanal Ağızlarının Lokalizasyonu ve Gözden Kaçan Kanal Anatomilerinin Tespiti

Endodontik enfeksiyonların etiolojisinde mikroorganizmalar temel rol oynadığından, kök kanal sistemindeki bakterilerin ve bunlara ait yan ürünlerin etkin kemo-mekanik dezenfeksiyon ile uzaklaştırılması uzun dönem tedavi başarısı açısından kritik öneme sahiptir (Ricucci & Siqueira, 2010). Bu nedenle gözden kaçan kanal anatomileri, primer endodontik tedavi başarısızlığının en önemli nedenlerinden biri olarak kabul edilmektedir. Mashyakhy ve arkadaşları, gözden kaçan kanalların bulunduğu dişlerin %90'ında apikal periodontitis saptarken, Baruwa ve arkadaşları bu oranı %82,6 olarak bildirmiştir (Baruwa et al., 2020; Mashyakhy et al., 2021).

Yapılan çalışmalarda gözden kaçan kanalların en sık maksiller birinci molarlardaki ikinci mesiobukkal kanal (MB2) olduğu ve tedavi edilmemiş kanalların periapikal patoloji gelişme riskini belirgin şekilde artırdığı gösterilmiştir (Baruwa et al., 2020; Colakoglu et al., 2023; Mashyakhy et al., 2021).

Mandibular birinci molarlardaki mid mesial kanal prevalansının, kullanılan görüntüleme yöntemi ve incelenen popülasyona bağlı olarak değişmekle birlikte, yaklaşık %7–22 arasında olduğu bildirilmektedir (Bhatti et al., 2022; Pertek Hatipoğlu et al., 2023). Özellikle genç bireylerde daha yüksek sıklıkta görüldüğü belirtilen bu anatomik varyasyon, yeniden kök kanal tedavisi sırasında göz önünde bulundurulması gereken önemli bir anatomik yapı olarak kabul edilmektedir (Nosrat et al., 2015).

Gözden kaçabilen anatomik varyasyonlar yalnızca molar dişlerle sınırlı değildir. Martins ve arkadaşlarının CBCT çalışmalarını içeren sistematik derleme ve meta analizde, mandibular

santral kesicilerde ikinci kanal prevalansını %20,4, lateral kesicilerde %25,3 ve kaninlerde %5,9 olarak bildirilmiştir (Martins et al., 2020). Bu bulgular, özellikle kanal yenileme işlemlerinde mandibular anterior dişlerde ikinci kanal varlığının araştırılması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Premolar dişlerde görülen kök kanal morfolojisindeki varyasyonlar da bu dişlerde tedaviyi zorlaştıran anatomik faktörler arasında yer almaktadır. İlave kanalların gözden kaçması, söz konusu dişlerde tedavi başarısızlığı ile ilişkili önemli nedenlerden biri olarak kabul edilmektedir. (Ahmad & Alenezi, 2016; Kottoor et al., 2013)

Kök kanal sisteminin morfolojik ve anatomik çeşitliliği göz önünde bulundurulduğunda, aksesuar kanalların doğru şekilde saptanabilmesi için öncelikle kök kanal anatomisinin doğru değerlendirilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu amaçla özellikle kök kanal sisteminin üç boyutlu yapısını tam olarak ortaya koyan konik ışınli bilgisayarlı tomografi (CBCT) kullanımının önemli katkılar sağlayabileceği belirtilmektedir (Karabucak et al., 2016).

Ayrıca loop ve dental operasyon mikroskobu gibi yüksek büyütme sağlayan optik sistemlerin kullanılması, gözden kaçan kanalların tespit edilmesini kolaylaştırmaktadır (Karapinar-Kazandag et al., 2010).

Mevcut Kök Kanal Dolgu Materyallerinin Uzaklaştırılması

Mevcut kök kanal dolgu materyallerinin kök kanal sisteminden güvenli, başarılı ve etkili bir şekilde uzaklaştırılması, cerrahi olmayan yeniden kök kanal tedavisinin kritik basamaklarından biridir (Duncan & Chong, 2008).

Kök kanal dolgu materyallerinin uzaklaştırılması, kullanılan önceki dolgu tekniğine, dolgu materyalinin özelliklerine ve kök kanal anatomisine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Tek kon güta-perka ile doldurulmuş kanallardaki dolgu materyallerinin uzaklaştırılması, iyi kondanse edilmiş soğuk lateral kompaksiyon veya sıcak vertikal kompaksiyon teknikleriyle doldurulmuş kanallara kıyasla genellikle daha kolay olduğu kabul edilmektedir (Khedmat et al., 2016).

Klinik açıdan değerlendirildiğinde, kök kanal dolgu materyallerinin kök kanal sisteminden tamamen uzaklaştırılması oldukça güç bir işlemdir. Bu amaçla çeşitli manuel ve motorla çalışan aletler, irrigasyon solüsyonları, çözücüler ve farklı uzaklaştırma teknikleri kullanılmaktadır (Duncan & Chong, 2008). Dentinin tübüler yapısı, isthmuslar ve lateral kanallar gibi anatomik zorluklar nedeniyle iyi kondanse edilmiş güta-perka ve kanal patlarının kök kanalından

tamamen uzaklaştırılması çoğu vakada mümkün olmamaktadır (Barreto et al., 2016; Campello et al., 2019). Bu nedenle kalan mikroorganizmaların çoğalmasını önlemek ve kanal sistemi içerisinde hapsedilmesini sağlamak amacıyla, etkin dezenfeksiyon ve ideal yeniden dolum işlemleri büyük önem taşımaktadır (Ørstavik, 2006).

Bununla birlikte, ilave iyatrojenik komplikasyonlara yol açmaksızın mümkün olan en yüksek düzeyde dolgu materyali uzaklaştırılması, kanal sistemine erişimi artırarak daha etkili dezenfeksiyon ve yeniden dolum işlemlerine olanak sağlayabilmekte ve böylece tedavi sonucunu olumlu yönde etkileyebilmektedir (Ng et al., 2011b).

Kök kanal dolgu materyallerinin, mekanik olarak uzaklaştırılması günümüzde en yaygın kullanılan yöntem olmaya devam etmektedir. Bu amaçla üretici firmalar yeniden kök kanal tedavisinde kullanılmak üzere farklı nikel-titanyum (NiTi) sistemler geliştirmiştir (Yılmaz & Helvacıoğlu Yiğit, 2014). Paslanmaz çelik el eğelerine kıyasla üstün mekanik ve metalürjik özelliklere sahip olan NiTi sistemler, dolgu materyallerinin daha etkili ve daha hızlı uzaklaştırılmasını sağlamakta, işlem süresini kısaltmakta ve kanal içerisinde daha az artık materyal bırakmaktadır (Giuliani et al., 2008).

Sundukları birçok avantaja rağmen NiTi sistemler, kanal şekillendirme ve yeniden tedavi prosedürleri sırasında dentinde mikroçatlak oluşumu gibi yapısal defektlere neden olabilmektedir (Varghese et al., 2023). Ayrıca preparasyon ve genişletme işlemleri sonucunda oluşan dentin hasarının, ilerleyen dönemlerde vertikal kök kırıkları gibi istenmeyen klinik sonuçlara zemin hazırlayabileceği düşünülmektedir (Çitak & Özyürek, 2017).

Kök kanal dolgu materyallerinin uzaklaştırılmasında önerilen diğer yöntemler ultrasonik sistemler ve lazer uygulamalarıdır. Özel olarak tasarlanmış ultrasonik uçlar, güta-perkanın yumuşatılması ve dolgu materyallerinin uzaklaştırılmasında yardımcı rol oynamaktadır (Kızıлтаş Gül et al., 2025).

Er: YAG lazer uygulamaları da dolgu materyallerinin uzaklaştırılması amacıyla önerilmiş olmakla birlikte, bu konuda elde edilen sonuçlar çelişkilidir. Bazı çalışmalar lazer kullanımının olumlu sonuçlar sağladığını bildirirken, bazı araştırmalar ultrasonik sistemlere kıyasla daha düşük etkinlik gösterdiğini ve kök dentininde termal hasar ile yanık oluşumuna neden olabileceğini göstermiştir (Gorduysus et al., 2017). Bu nedenle lazer uygulamalarının etkinliği ve güvenilirliği konusunda daha fazla klinik ve deneysel çalışmaya ihtiyaç vardır.

Kullanılan esas kanal dolgu materyali uzaklaştırma yöntemlerine ek olarak, temizleme ve dezenfeksiyon etkinliğini artırmak amacıyla çeşitli yardımcı protokoller de önerilmektedir. Bunlar arasında sonik aktivasyon, pasif ultrasonik irrigasyon, lazer aktivasyonu, multisonik aktivasyon ve XP-endo Finisher veya Self-Adjusting File gibi sistemlerle ek kanal şekillendirmesi yer almaktadır (Zanza et al., 2023). Bu yöntemlerin yeniden kök kanal tedavisinin uzun dönem başarısına etkisi ve hangi protokolün üstün olduğu henüz net olarak ortaya konulamamıştır. Bu nedenle konuya ilişkin ileri klinik araştırmalara ihtiyaç duyulmaktadır.

Kanal İçi Medikament Kullanımı ve İrrigasyon Aktivasyon Yöntemleri

Mevcut kanal içi medikamentler arasında kalsiyum hidroksit $[Ca(OH)_2]$, antimikrobiyal özellikleri ve bakteriyel endotoksinleri etkisiz hâle getirebilme kapasitesi sayesinde uzun yıllardır standart ajan olarak kabul edilmektedir (Zou et al., 2024). Sahip olduğu avantajlara rağmen, kanal içerisinde özellikle *Enterococcus faecalis* ve *Candida albicans* gibi dirençli mikroorganizmaların bulunduğu durumlarda bakterileri tamamen elimine edememesi önemli bir sınırlılık olarak kabul edilmektedir (van der Waal et al., 2016; Waltimo et al., 1999).

Bu nedenle kalsiyum hidroksitin etkinliğini arttırmak amacıyla klorheksidin (CHX) gibi diğer medikamentlerle kombinasyonları araştırılmıştır (Sirén et al., 2004). CHX, özellikle *E. Faecalis* ve *C. albicans*'a karşı etkinliği gösterilmiş geniş spektrumlu güçlü bir antimikrobiyal ajandır (Lima et al., 2001). Kalsiyum hidroksit ve CHX kombinasyonunun, yeniden kök kanal tedavilerinde mikrobiyal yükün azaltılması ve enfeksiyon kontrolünün sağlanması açısından umut verici sonuçlar ortaya koyduğu gösterilmiştir (Chowdhury et al., 2025).

Bununla birlikte mevcut kanıtlar, cerrahi olmayan yeniden kök kanal tedavisinde kanal içi medikament kullanımıyla tedavinin tek veya çok seanslı gerçekleştirilmesinin klinik sonuçlar üzerinde belirgin bir üstünlük oluşturmadığını ortaya koymaktadır (Karaoğlu et al., 2022; Sathorn et al., 2008; Wong et al., 2015).

Cerrahi olmayan yeniden kök kanal tedavisinde enfeksiyonun kontrol altına alınabilmesi ve rezidüel mikroorganizmaları uzaklaştırabilmesi için etkili bir irrigasyon aktivasyonu büyük önem taşımaktadır. Kimyasal ajanlarla birlikte kullanılan geleneksel iğne irrigasyonu (Conventional Needle Irrigation, CNI) günümüzde en yaygın yaklaşım olmaya devam etse de bu yöntem kök kanal sisteminin tam olarak dezenfekte edilmesinde çoğu zaman yetersiz kalmaktadır (Düzgün et al., 2026). Bu nedenle irrigasyonun etkinliğini artırmak amacıyla çeşitli irrigasyon aktivasyon yöntemleri geliştirilmiştir (Gomes et al., 2023).

Günümüzde sonik, ultrasonik ve lazer destekli aktivasyon sistemleri, irrigasyon solüsyonlarının kanal sistemi içerisindeki penetrasyonunu artırmak ve ulaşılması güç bölgelerdeki debris, biyofilm ve rezidüel dolgu materyallerinin uzaklaştırılmasını kolaylaştırmak amacıyla kullanılmaktadır (Anjo et al., 2004; Cavenago et al., 2014; Tachinami & Katsuumi, 2010).

Özellikle pasif ultrasonik irrigasyon yöntemi, oluşturduğu akustik akım ve kavitasyon etkileri sayesinde irrigasyon ajanlarının dentin yüzeyleriyle temasını artırmakta ve geleneksel irrigasyon yöntemlerine kıyasla daha etkili temizlik sağlayabilmektedir (Sabins et al., 2003). Bu nedenle ultrasonik aktivasyon, yeniden kök kanal tedavisinde en sık kullanılan yardımcı irrigasyon tekniklerinden biri olarak kabul edilmektedir (Plotino et al., 2016).

Sonik aktivasyon sistemleri ise daha düşük frekanslarda çalışmakla birlikte, oluşturdukları üç boyutlu salınım hareketi sayesinde irrigasyon solüsyonlarının kanal içerisinde etkin dolaşımını sağlamaktadır (Wigler et al., 2024). Bu amaçla geliştirilen EDDY gibi polimer uçlu sistemlerin, dentin yüzeyinde ilave preparasyona neden olmadan irrigasyon etkinliğini artırabildiği bildirilmiştir (Chu et al., 2023).

Lazer destekli irrigasyon yöntemleri arasında yer alan foton kaynaklı fotoakustik akım (Photon-Induced Photoacoustic Streaming; PIPS) tekniği, irrigasyon solüsyonları içerisinde güçlü hidrodinamik hareketler oluşturarak kanal sisteminin temizlenmesini amaçlamaktadır (Arslan et al., 2014). Yapılan çalışmalar, bu yöntemin kök kanal sistemindeki irrigasyon aktivasyon derinliğini arttırmada umut verici sonuçlar ortaya koyduğunu göstermiştir (Chu et al., 2023). Bununla birlikte, farklı irrigasyon aktivasyon yöntemlerinin yeniden kök kanal tedavilerindeki klinik üstünlüğünü ortaya koyan yeterli kanıt henüz bulunmamakta olup, bu alanda daha fazla klinik araştırmaya ihtiyaç duyulmaktadır.

Sonuç

Cerrahi olmayan yeniden kök kanal tedavisi, uygun endikasyonlarda dişin uzun yıllar fonksiyonda kalmasına olanak sağlayan etkili ve konservatif bir tedavi yaklaşımıdır. Başarılı bir tedavi için, önceki tedavide başarısızlığa neden olan biyolojik ve teknik faktörlerin ortadan kaldırılması gerekmektedir. Kök kanal anatomisinin ayrıntılı olarak değerlendirilmesi, kanal dolgu materyalinin sökülmesi, etkin dezenfeksiyonun sağlanması ve tüm bu işlemler sırasında modern endodontik teknolojilerden yararlanılması tedavi sonucunu doğrudan etkileyen unsurlar arasında yer almaktadır. Bununla birlikte mevcut verilerin uzun dönem klinik araştırmalarla desteklenmesi gerekmektedir.

KAYNAKÇA

- Abusteit, O. E., Hosney, S., ElSheshtawy, A. S., & Zapata, R. O. (2022). Outcome of Endodontic Treatment through Existing Full Coverage Restorations: An Endodontic Practice Case Series. *J Endod*, 48(3), 388-395. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2021.11.008>
- Ahmad, I. A., & Alenezi, M. A. (2016). Root and Root Canal Morphology of Maxillary First Premolars: A Literature Review and Clinical Considerations. *J Endod*, 42(6), 861-872. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2016.02.017>
- American Association of Endodontists. (2020). *Glossary of Endodontic Terms*. American Association of Endodontists.
- Aminoshariae, A., Kulild, J. C., & Syed, A. (2018). Cone-beam Computed Tomography Compared with Intraoral Radiographic Lesions in Endodontic Outcome Studies: A Systematic Review. *Journal of Endodontics*, 44(11), 1626-1631. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2018.08.006>
- Anjo, T., Ebihara, A., Takeda, A., Takashina, M., Sunakawa, M., & Suda, H. (2004). Removal of two types of root canal filling material using pulsed Nd:YAG laser irradiation. *Photomed Laser Surg*, 22(6), 470-476. <https://doi.org/10.1089/pho.2004.22.470>
- Arslan, H., Capar, I. D., Saygili, G., Gok, T., & Akcay, M. (2014). Effect of photon-initiated photoacoustic streaming on removal of apically placed dentinal debris. *Int Endod J*, 47(11), 1072-1077. <https://doi.org/10.1111/iej.12251>
- Azim, A. A., Griggs, J. A., & Huang, G. T. J. (2016). The Tennessee study: factors affecting treatment outcome and healing time following nonsurgical root canal treatment. *International Endodontic Journal*, 49(1), 6-16. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/iej.12429>
- Babić, B., Barun, J., Jukić Krmek, S., Kotarac Knežević, A., Salarić, I., & Ivanišević Malčić, A. (2019). Clinical and Radiographic Assessment of Cases Referred to Endodontic Surgery. *Acta Stomatol Croat*, 53(2), 132-140. <https://doi.org/10.15644/asc53/2/5>
- Barreto, M. S., Rosa, R. A., Santini, M. F., Cavenago, B. C., Duarte, M. A., Bier, C. A., & Só, M. V. (2016). Efficacy of ultrasonic activation of NaOCl and orange oil in removing filling material from mesial canals of mandibular molars with and without isthmus. *J Appl Oral Sci*, 24(1), 37-44. <https://doi.org/10.1590/1678-775720150090>
- Baruwa, A. O., Martins, J. N. R., Meirinhos, J., Pereira, B., Gouveia, J., Quaresma, S. A., Monroe, A., & Ginjeira, A. (2020). The Influence of Missed Canals on the Prevalence of Periapical Lesions in Endodontically Treated Teeth: A Cross-sectional Study. *Journal of Endodontics*, 46(1), 34-39.e31. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2019.10.007>
- Bhatt, M., Coil, J., Chehroudi, B., Esteves, A., Aleksejuniene, J., & MacDonald, D. (2021). Clinical decision-making and importance of the AAE/AAOMR position statement for CBCT examination in endodontic cases. *International Endodontic Journal*, 54(1), 26-37. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/iej.13397>
- Bhatti, U. A., Muhammad, M., Javed, M. Q., & Sajid, M. (2022). Frequency of middle mesial canal in mandibular first molars and its association with various anatomic variables. *Aust Endod J*, 48(3), 494-500. <https://doi.org/10.1111/aej.12607>
- Bucchi, C., Rosen, E., & Taschieri, S. (2023). Non-surgical root canal treatment and retreatment versus apical surgery in treating apical periodontitis: A systematic review. *International Endodontic Journal*, 56(S3), 475-486. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/iej.13793>
- Budd, J. C., Gekelman, D., & White, J. M. (2005). Temperature rise of the post and on the root surface during ultrasonic post removal. *Int Endod J*, 38(10), 705-711. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2591.2005.01002.x>

- Campello, A. F., Almeida, B. M., Franzoni, M. A., Alves, F. R. F., Marceliano-Alves, M. F., Rôças, I. N., Siqueira, J. F., Jr., & Provenzano, J. C. (2019). Influence of solvent and a supplementary step with a finishing instrument on filling material removal from canals connected by an isthmus. *Int Endod J*, 52(5), 716-724. <https://doi.org/10.1111/iej.13047>
- Castrisos, T., & Abbott, P. V. (2002). A survey of methods used for post removal in specialist endodontic practice. *International Endodontic Journal*, 35(2), 172-180. <https://doi.org/https://doi.org/10.1046/j.1365-2591.2002.00466.x>
- Cavenago, B. C., Ordinola-Zapata, R., Duarte, M. A., del Carpio-Perochena, A. E., Villas-Bôas, M. H., Marciano, M. A., Bramante, C. M., & Moraes, I. G. (2014). Efficacy of xylene and passive ultrasonic irrigation on remaining root filling material during retreatment of anatomically complex teeth. *Int Endod J*, 47(11), 1078-1083. <https://doi.org/10.1111/iej.12253>
- Chowdhury, K., Antony, S. D. P., Solete, P., Elango, P. K., Sanghavi, A., & Muskan, S. (2025). Effectiveness of calcium hydroxide as an intracanal medicament in endodontic retreatment: A systematic review of clinical outcome. *J Conserv Dent Endod*, 28(9), 849-858. https://doi.org/10.4103/jcde.Jcde_397_25
- Chu, X., Feng, S., Zhou, W., Xu, S., & Zeng, X. (2023). Cleaning efficacy of EDDY versus ultrasonically-activated irrigation in root canals: a systematic review and meta-analysis. *BMC Oral Health*, 23(1), 155. <https://doi.org/10.1186/s12903-023-02875-6>
- Colakoglu, G., Kaya Buyukbayram, I., Elcin, M. A., Garip Berker, Y., & Ercalik Yalcinkaya, S. (2023). Association between second mesiobuccal canal and apical periodontitis in retrospective cone-beam computed tomographic images. *Australian Endodontic Journal*, 49(1), 20-26. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/aej.12672>
- Çitak, M., & Özyürek, T. (2017). Effect of different nickel-titanium rotary files on dentinal crack formation during retreatment procedure. *Journal of Dental Research, Dental Clinics, Dental Prospects*, 11, 90-95. <https://doi.org/10.15171/joddd.2017.017>
- Del Fabbro, M., Corbella, S., Sequeira-Byron, P., Tsesis, I., Rosen, E., Lolato, A., & Taschieri, S. (2016). Endodontic procedures for retreatment of periapical lesions. *Cochrane Database Syst Rev*, 10(10), Cd005511. <https://doi.org/10.1002/14651858.CD005511.pub3>
- Deshpande, A., & Bhargava, D. (2014). Intraoral Periapical Radiographs with Grids for Implant Dentistry. *J Maxillofac Oral Surg*, 13(4), 603-605. <https://doi.org/10.1007/s12663-013-0499-2>
- Dioguardi, M., Stellacci, C., La Femina, L., Spirito, F., Sovereto, D., Laneve, E., Manfredonia, M. F., D'Alessandro, A., Ballini, A., Cantore, S., Lo Muzio, L., & Troiano, G. (2022). Comparison of Endodontic Failures between Nonsurgical Retreatment and Endodontic Surgery: Systematic Review and Meta-Analysis with Trial Sequential Analysis. *Medicina (Kaunas)*, 58(7). <https://doi.org/10.3390/medicina58070894>
- Dominici, J. T., Clark, S., Scheetz, J., & Eleazer, P. D. (2005). Analysis of heat generation using ultrasonic vibration for post removal. *J Endod*, 31(4), 301-303. <https://doi.org/10.1097/01.don.0000140573.72922.c9>
- Duncan, H. F., & Chong, B. S. (2008). Removal of root filling materials. *Endodontic Topics*, 19(1), 33-57. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1601-1546.2011.00257.x>
- Düzgün, S., Akyüz, İ. E., Çiçek, M., & Yavuz, B. (2026). Evaluation of irrigation activation techniques for root canal filling material removal in retreatment of 3D-printed curved canals. *BMC Oral Health*. <https://doi.org/10.1186/s12903-026-08605-y>
- Ee, J., Fayad, M. I., & Johnson, B. R. (2014). Comparison of Endodontic Diagnosis and Treatment Planning Decisions Using Cone-beam Volumetric Tomography Versus Periapical Radiography. *Journal of Endodontics*, 40(7), 910-916. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2014.03.002>

- European Society of, E. (2006). Quality guidelines for endodontic treatment: consensus report of the European Society of Endodontology. *International Endodontic Journal*, 39(12), 921-930. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1365-2591.2006.01180.x>
- Frankenberger, R., Becker, S., Beck-Broichsitter, B., Albrecht-Hass, S., Behrens, C. J., Roggendorf, M. J., & Koch, A. (2024). 40-Year Outcome of Old-School, Non-Surgical Endodontic Treatment: Practice-Based Retrospective Evaluation. *Dent J (Basel)*, 12(4). <https://doi.org/10.3390/dj12040090>
- Friedman, S. (2002). Considerations and concepts of case selection in the management of post-treatment endodontic disease (treatment failure). *Endodontic Topics*, 1(1), 54-78. <https://doi.org/https://doi.org/10.1034/j.1601-1546.2002.10105.x>
- Gesi, A., Magnolfi, S., Goracci, C., & Ferrari, M. (2003). Comparison of two techniques for removing fiber posts. *J Endod*, 29(9), 580-582. <https://doi.org/10.1097/00004770-200309000-00009>
- Gillen, B. M., Looney, S. W., Gu, L. S., Loushine, B. A., Weller, R. N., Loushine, R. J., Pashley, D. H., & Tay, F. R. (2011). Impact of the quality of coronal restoration versus the quality of root canal fillings on success of root canal treatment: a systematic review and meta-analysis. *J Endod*, 37(7), 895-902. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2011.04.002>
- Giuliani, V., Cocchetti, R., & Pagavino, G. (2008). Efficacy of ProTaper Universal Retreatment Files in Removing Filling Materials during Root Canal Retreatment. *Journal of Endodontics*, 34(11), 1381-1384. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2008.08.002>
- Gomes, B., Aveiro, E., & Kishen, A. (2023). Irrigants and irrigation activation systems in Endodontics. *Braz Dent J*, 34(4), 1-33. <https://doi.org/10.1590/0103-6440202305577>
- Gorduysus, M. O., Al-Rubai, H., Salman, B., Al Saady, D., Al-Dagistani, H., & Muftuoglu, S. (2017). Using erbium-doped yttrium aluminum garnet laser irradiation in different energy output levels versus ultrasonic in removal of root canal filling materials in endodontic retreatment. *Eur J Dent*, 11(03), 281-286. https://doi.org/10.4103/ejd.ejd_111_17
- Gorni, F. G. M., & Gagliani, M. M. (2004). The Outcome of Endodontic Retreatment: A 2-yr Follow-up. *Journal of Endodontics*, 30(1), 1-4. <https://doi.org/10.1097/00004770-200401000-00001>
- 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(S2), 82-115. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/iej.13897>
- Haupt, F., Pfitzner, J., & Hülsmann, M. (2018). A comparative in vitro study of different techniques for removal of fibre posts from root canals. *Aust Endod J*, 44(3), 245-250. <https://doi.org/10.1111/aej.12230>
- Haupt, F., Riggers, I., Konietzschke, F., & Rödiger, T. (2022). Effectiveness of different fiber post removal techniques and their influence on dentinal microcrack formation. *Clinical Oral Investigations*, 26(4), 3679-3685. <https://doi.org/10.1007/s00784-021-04338-0>
- Hoen, M. M., & Pink, F. E. (2002). Contemporary Endodontic Retreatments: An Analysis based on Clinical Treatment Findings. *Journal of Endodontics*, 28(12), 834-836. <https://doi.org/10.1097/00004770-200212000-00010>
- Holland, R., Gomes, J. E. F., Cintra, L. T. A., Queiroz Í, O. A., & Estrela, C. (2017). Factors affecting the periapical healing process of endodontically treated teeth. *J Appl Oral Sci*, 25(5), 465-476. <https://doi.org/10.1590/1678-7757-2016-0464>
- Huumonen, S., & Ørstavik, D. (2002). Radiological aspects of apical periodontitis. *Endodontic Topics*, 1(1), 3-25. <https://doi.org/https://doi.org/10.1034/j.1601-1546.2002.10102.x>
- Influence of systemic diseases on post-endodontic repair. (2024). *Research, Society and Development*, 13(4), e3613445392. <https://doi.org/10.33448/rsd-v13i4.45392>

- Işık, M., & Aydın, Z. U. (2024). Effect of different obturation techniques on treatment results in single-visit non-surgical endodontic retreatment: randomized controlled clinical study. *BMC Oral Health*, 24(1), 1449. <https://doi.org/10.1186/s12903-024-05240-3>
- Karabucak, B., Bunes, A., Chehoud, C., Kohli, M. R., & Setzer, F. (2016). Prevalence of Apical Periodontitis in Endodontically Treated Premolars and Molars with Untreated Canal: A Cone-beam Computed Tomography Study. *J Endod*, 42(4), 538-541. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2015.12.026>
- Karaoğlu, F., Miçoogulları Kurt, S., & Çalışkan, M. K. (2022). Outcome of single- versus two-visit root canal retreatment in teeth with periapical lesions: A randomized clinical trial. *International Endodontic Journal*, 55(8), 833-843. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/iej.13758>
- Karapinar-Kazandag, M., Basrani, B. R., & Friedman, S. (2010). The operating microscope enhances detection and negotiation of accessory mesial canals in mandibular molars. *J Endod*, 36(8), 1289-1294. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2010.04.005>
- Khedmat, S., Azari, A., Shamshiri, A. R., Fadae, M., & Bashizadeh Fakhar, H. (2016). Efficacy of ProTaper and Mtwo Retreatment Files in Removal of Gutta-percha and GuttaFlow from Root Canals. *Iran Endod J*, 11(3), 184-187. <https://doi.org/10.7508/iej.2016.03.007>
- Kirkevang, L. L., Ørstavik, D., Wenzel, A., & Væth, M. (2015). Prognostic value of the full-scale Periapical Index. *International Endodontic Journal*, 48(11), 1051-1058. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/iej.12402>
- Kızıldaş Gül, A., Hisar, T. M., & Miçoogulları, S. (2025). Kök Kanal Tedavisi Yenilemelerinde Ultrasonik Uç Kullanımı [Use of Ultrasonic Tips in Root Canal Retreatment]. *Selcuk Dental Journal*, 12(1), 157-165. <https://doi.org/10.15311/selcukdentj.1481781>
- Kottoor, J., Albuquerque, D., Velmurugan, N., & Kuruvilla, J. (2013). Root anatomy and root canal configuration of human permanent mandibular premolars: a systematic review. *Anat Res Int*, 2013, 254250. <https://doi.org/10.1155/2013/254250>
- Lima, K. C., Fava, L. R., & Siqueira, J. F., Jr. (2001). Susceptibilities of Enterococcus faecalis biofilms to some antimicrobial medications. *J Endod*, 27(10), 616-619. <https://doi.org/10.1097/00004770-200110000-00004>
- Marending, M., Peters, O. A., & Zehnder, M. (2005). Factors affecting the outcome of orthograde root canal therapy in a general dentistry hospital practice. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology and Endodontics*, 99(1), 119-124. <https://doi.org/10.1016/j.tripleo.2004.06.065>
- Marinho, T. M. B., Paranhos, L. R., dos Santos, A. C. B. C., Miranda-e-Paulo, D., de Brito Júnior, R. B., da Costa Ribeiro, J. M., & Matos, F. d. S. (2026). Selective Nonsurgical Endodontic Retreatment: Relevant Aspects for Clinical Application—A Scoping Review. *Australian Endodontic Journal*, n/a(n/a). <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/aej.70063>
- Martins, J. N. R., Marques, D., Leal Silva, E. J. N., Caramês, J., Mata, A., & Versiani, M. A. (2020). Influence of Demographic Factors on the Prevalence of a Second Root Canal in Mandibular Anterior Teeth – A Systematic Review and Meta-Analysis of Cross-Sectional Studies Using Cone Beam Computed Tomography. *Archives of Oral Biology*, 116, 104749. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.archoralbio.2020.104749>
- Mashyakh, M., Hadi, F. A., Alhazmi, H. A., Alfaifi, R. A., Alabsi, F. S., Bajawi, H., Alkahtany, M., & AbuMelha, A. (2021). Prevalence of Missed Canals and Their Association with Apical Periodontitis in Posterior Endodontically Treated Teeth: A CBCT Study. *International Journal of Dentistry*, 2021(1), 9962429. <https://doi.org/https://doi.org/10.1155/2021/9962429>

- Messer, H. H., & Yu, V. S. H. (2013). Terminology of endodontic outcomes. *International Endodontic Journal*, 46(3), 289-291. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/iej.12014>
- Mosquera-Barreiro, C., Ruíz-Piñón, M., Sans, F. A., Nagendrababu, V., Vinothkumar, T. S., Martín-González, J., Martín-Biedma, B., & Castelo-Baz, P. (2024). Predictors of periapical bone healing associated with teeth having large periapical lesions following nonsurgical root canal treatment or retreatment: A cone beam computed tomography-based retrospective study. *Int Endod J*, 57(1), 23-36. <https://doi.org/10.1111/iej.13993>
- Ng, Y. L., Mann, V., & Gulabivala, K. (2008). Outcome of secondary root canal treatment: a systematic review of the literature. *International Endodontic Journal*, 41(12), 1026-1046. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1365-2591.2008.01484.x>
- Ng, Y. L., Mann, V., & Gulabivala, K. (2011a). A prospective study of the factors affecting outcomes of non-surgical root canal treatment: part 2: tooth survival. *International Endodontic Journal*, 44(7), 610-625. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1365-2591.2011.01873.x>
- Ng, Y. L., Mann, V., & Gulabivala, K. (2011b). A prospective study of the factors affecting outcomes of nonsurgical root canal treatment: part 1: periapical health. *Int Endod J*, 44(7), 583-609. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2591.2011.01872.x>
- Ng, Y. L., Mann, V., & Gulabivala, K. (2011c). A prospective study of the factors affecting outcomes of nonsurgical root canal treatment: part 1: periapical health. *International Endodontic Journal*, 44(7), 583-609. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1365-2591.2011.01872.x>
- Ng, Y. L., Mann, V., Rahbaran, S., Lewsey, J., & Gulabivala, K. (2007). Outcome of primary root canal treatment: systematic review of the literature – Part 1. Effects of study characteristics on probability of success. *International Endodontic Journal*, 40(12), 921-939. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1365-2591.2007.01322.x>
- Ng, Y. L., Mann, V., Rahbaran, S., Lewsey, J., & Gulabivala, K. (2008). Outcome of primary root canal treatment: systematic review of the literature – Part 2. Influence of clinical factors. *International Endodontic Journal*, 41(1), 6-31. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1365-2591.2007.01323.x>
- Nosrat, A., Deschenes, R. J., Tordik, P. A., Hicks, M. L., & Fouad, A. F. (2015). Middle mesial canals in mandibular molars: incidence and related factors. *J Endod*, 41(1), 28-32. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2014.08.004>
- Orstavik, D. (1996). Time-course and risk analyses of the development and healing of chronic apical periodontitis in man. *Int Endod J*, 29(3), 150-155. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2591.1996.tb01361.x>
- Ørstavik, D. (2006). Materials used for root canal obturation: Technical, biological and clinical testing. *Endodontic Topics*, 12, 25-38. <https://doi.org/10.1111/j.1601-1546.2005.00197.x>
- Orstavik, D., & Hörsted-Bindslev, P. (1993). A comparison of endodontic treatment results at two dental schools. *Int Endod J*, 26(6), 348-354. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2591.1993.tb00768.x>
- Patel, S., Dawood, A., Ford, T. P., & Whaites, E. (2007). The potential applications of cone beam computed tomography in the management of endodontic problems. *International Endodontic Journal*, 40(10), 818-830. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1365-2591.2007.01299.x>
- Pelozo, L. L., Tirapelli, C., Mazzi-Chaves, J. F., Sousa-Neto, M. D., & Souza-Gabriel, A. E. (2025). Enhanced and safe removal of a novel experimental fiber-colored post: an in vitro micro-CT study. *Clin Oral Investig*, 29(10), 453. <https://doi.org/10.1007/s00784-025-06545-5>

- Pertek Hatipoğlu, F., Mağat, G., Hatipoğlu, Ö., Taha, N., Alfirjani, S., Abidin, I. Z., Lehmann, A. P., Alkhawas, M. A. M., Buchanan, G. D., Kopbayeva, M., Surendar, S., Javed, M. Q., Madfa, A. A., Donnermeyer, D., Krmek, S. J., Bhatti, U. A., Palma, P. J., & Brochado Martins, J. F. (2023). Assessment of the Prevalence of Middle Mesial Canal in Mandibular First Molar: A Multinational Cross-sectional Study with Meta-analysis. *J Endod*, 49(5), 549-558. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2023.02.012>
- Plotino, G., Cortese, T., Grande, N. M., Leonardi, D. P., Di Giorgio, G., Testarelli, L., & Gambarini, G. (2016). New Technologies to Improve Root Canal Disinfection. *Braz Dent J*, 27(1), 3-8. <https://doi.org/10.1590/0103-6440201600726>
- Ricucci, D., Russo, J., Rutberg, M., Burleson, J. A., & Spångberg, L. S. W. (2011). A prospective cohort study of endodontic treatments of 1,369 root canals: results after 5 years. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontology*, 112(6), 825-842. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tripleo.2011.08.003>
- Ricucci, D., & Siqueira, J. F., Jr. (2010). Biofilms and Apical Periodontitis: Study of Prevalence and Association with Clinical and Histopathologic Findings. *Journal of Endodontics*, 36(8), 1277-1288. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2010.04.007>
- Sabins, R. A., Johnson, J. D., & Hellstein, J. W. (2003). A Comparison of the Cleaning Efficacy of Short-Term Sonic and Ultrasonic Passive Irrigation after Hand Instrumentation in Molar Root Canals. *Journal of Endodontics*, 29(10), 674-678. <https://doi.org/10.1097/00004770-200310000-00016>
- Sainudeen, S., Rani, P., Batra, D., Vedula, B. D., Vaybase, V. A., Mitthra, S., & Mustafa, M. (2024). Factors Influencing the Success of Endodontic Retreatment: Insights from a Retrospective Study. *J Pharm Bioallied Sci*, 16(Suppl 3), S2391-s2393. https://doi.org/10.4103/jpbs.jpbs_283_24
- Sathorn, C., Parashos, P., & Messer, H. (2008). The prevalence of postoperative pain and flare-up in single- and multiple-visit endodontic treatment: a systematic review. *International Endodontic Journal*, 41(2), 91-99. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1365-2591.2007.01316.x>
- Segura-Egea, J. J., Cabanillas-Balsera, D., Martín-González, J., & Cintra, L. T. A. (2023). Impact of systemic health on treatment outcomes in endodontics. *International Endodontic Journal*, 56(S2), 219-235. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/iej.13789>
- Signor, B., Blomberg, L. C., Kopper, P. M. P., Augustin, P. A. N., Rauber, M. V., Rodrigues, G. S., & Scarparo, R. K. (2021). Root canal retreatment: a retrospective investigation using regression and data mining methods for the prediction of technical quality and periapical healing. *J Appl Oral Sci*, 29, e20200799. <https://doi.org/10.1590/1678-7757-2020-0799>
- Sirén, E. K., Haapasalo, M. P., Waltimo, T. M., & Ørstavik, D. (2004). In vitro antibacterial effect of calcium hydroxide combined with chlorhexidine or iodine potassium iodide on *Enterococcus faecalis*. *Eur J Oral Sci*, 112(4), 326-331. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0722.2004.00144.x>
- Sjögren, U., Hägglund, B., Sundqvist, G., & Wing, K. (1990). Factors affecting the long-term results of endodontic treatment. *Journal of Endodontics*, 16(10), 498-504. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0099-2399\(07\)80180-4](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0099-2399(07)80180-4)
- Tabassum, S., & Khan, F. R. (2016). Failure of endodontic treatment: The usual suspects. *Eur J Dent*, 10(1), 144-147. <https://doi.org/10.4103/1305-7456.175682>
- Tachinami, H., & Katsuumi, I. (2010). Removal of root canal filling materials using Er:YAG laser irradiation. *Dent Mater J*, 29(3), 246-252. <https://doi.org/10.4012/dmj.2008-079>
- van der Waal, S. V., Connert, T., Crielaard, W., & de Soet, J. J. (2016). In mixed biofilms *Enterococcus faecalis* benefits from a calcium hydroxide challenge and culturing. *Int Endod J*, 49(9), 865-873. <https://doi.org/10.1111/iej.12542>

- Van Nieuwenhuysen, J. P., Aouar, M., & D'Hoore, W. (1994). Retreatment or radiographic monitoring in endodontics. *International Endodontic Journal*, 27(2), 75-81. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2591.1994.tb00234.x>
- Varatharajan, P., Krishnamurthy, M., V, N., Leburu, A., & R, M. (2021). RECENT ADVANCES IN POST SYSTEMS -A REVIEW. *Thai Moogambigai Journal Of Periodontics and Dental Science*, 2, 58-65. https://doi.org/10.37841/tmjpd_2020_V2_I3_04
- Varghese, E., Awasthi, N., Kakarla, P., Mailankote, S., Mishra, D., & John, N. K. (2023). Evaluation of Root Dentin Damage during Retreatment Procedure using Various Engine-Driven Retreatment File Systems-A Micro-CT Study. *J Pharm Bioallied Sci*, 15(Suppl 1), S434-s437. https://doi.org/10.4103/jpbs.jpbs_490_22
- Venkatesh, E., & Elluru, S. V. (2017). Cone beam computed tomography: basics and applications in dentistry. *J Istanbul Univ Fac Dent*, 51(3 Suppl 1), S102-s121. <https://doi.org/10.17096/jiufd.00289>
- Venskutonis, T., Plotino, G., Juodzbalys, G., & Mickevičienė, L. (2014). The Importance of Cone-beam Computed Tomography in the Management of Endodontic Problems: A Review of the Literature. *Journal of Endodontics*, 40(12), 1895-1901. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2014.05.009>
- Waltimo, T. M., Orstavik, D., Sirén, E. K., & Haapasalo, M. P. (1999). In vitro susceptibility of *Candida albicans* to four disinfectants and their combinations. *Int Endod J*, 32(6), 421-429. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2591.1999.00237.x>
- Wigler, R., Srour, Y., Wilchfort, Y., Metzger, Z., & Kfir, A. (2024). Debris and Smear Layer Removal in Curved Root Canals: A Comparative Study of Ultrasonic and Sonic Irrigant Activation Techniques. *Dent J (Basel)*, 12(3). <https://doi.org/10.3390/dj12030051>
- Wong, A. W., Tsang, C. S., Zhang, S., Li, K. Y., Zhang, C., & Chu, C. H. (2015). Treatment outcomes of single-visit versus multiple-visit non-surgical endodontic therapy: a randomised clinical trial. *BMC Oral Health*, 15, 162. <https://doi.org/10.1186/s12903-015-0148-x>
- Yılmaz, A., & Helvacioğlu Yiğit, D. (2014). Retreatment with Nickel-Titanium Rotary Instruments [Nikel-titanyum döner alet sistemleri ile retreatment]. *Journal of Istanbul University Faculty of Dentistry*, 48(1), 71-78. <https://dergipark.org.tr/en/pub/jiufd/article/111739>
- Yu, V. S. H., Messer, H. H., Yee, R., & Shen, L. (2012). Incidence and Impact of Painful Exacerbations in a Cohort with Post-treatment Persistent Endodontic Lesions. *Journal of Endodontics*, 38(1), 41-46. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2011.10.006>
- Zanza, A., Reda, R., & Testarelli, L. (2023). Endodontic Orthograde Retreatments: Challenges and Solutions. *Clin Cosmet Investig Dent*, 15, 245-265. <https://doi.org/10.2147/ccide.S397835>
- Zou, X., Zheng, X., Liang, Y., Zhang, C., Fan, B., Liang, J., Ling, J., Bian, Z., Yu, Q., Hou, B., Chen, Z., Wei, X., Qiu, L., Chen, W., He, W., Xu, X., Meng, L., Zhang, C., Chen, L., . . . Yue, L. (2024). Expert consensus on irrigation and intracanal medication in root canal therapy. *Int J Oral Sci*, 16(1), 23. <https://doi.org/10.1038/s41368-024-00280-5>

BÖLÜM 3

KÖK KANAL İRRİGASYONU VE
AKTİVASYON SİSTEMLERİ: GÜNCEL
YAKLAŞIMLAR VE KLİNİK ÖNERİLER

1.GİRİŞ VE TARİHSEL PERSPEKTİF

Endodontik tedavinin başarısında kök kanal sisteminin etkin şekilde şekillendirilmesi, temizlenmesi ve dezenfeksiyonunun temel öneme sahip olduğu uzun yıllardır kabul edilmektedir. Kök kanal tedavisinin erken dönemlerinde enfeksiyon kontrolü büyük ölçüde mekanik preparasyona dayanmaktaydı. Ancak kök kanal sisteminin karmaşık anatomik yapısı, lateral kanallar, isthmuslar, apikal deltalar ve düzensiz yüzeyler nedeniyle yalnızca mekanik enstrümantasyonun yeterli olmadığı zamanla anlaşılmıştır (Schilder, 1974). Yüksek çözünürlüklü bilgisayarlı tomografi çalışmaları, mekanik preparasyon sonrasında kök kanal duvarlarının yaklaşık %36'sının şekillendirilmeden kaldığını göstermiştir (Peters, 2004). Bu bulgular, kimyasal irrigasyonun endodontik tedavinin ayrılmaz bir parçası haline gelmesine zemin hazırlamıştır.

Kanal irrigasyonuna ilişkin ilk uygulamalar 20. yüzyılın başlarında hidrojen peroksit ve çeşitli antiseptik ajanların kullanılmasıyla başlamıştır. Takip eden yıllarda, organik dokuları çözebilme kapasitesi ve geniş antimikrobiyal etkinliği nedeniyle sodyum hipoklorit (NaOCl) giderek ön plana çıkmış ve günümüzde halen altın standart irrigasyon solüsyonu olarak kabul edilmektedir (Cobankara et al., 2010). NaOCl'nin dokuları çözebilme özelliği, hipokloröz asit (HOCl) ve hipoklorit iyonlarının (OCI^-) organik materyallerle reaksiyona girerek amino asit yıkımı ve protein denatürasyonuna neden olmasına dayanmaktadır (Jungbluth et al., 2011; Liolios et al., 1997). Bununla birlikte, yüksek konsantrasyonlarda kullanıldığında sitotoksik etkiler göstermesi ve periapikal dokularla teması durumunda ciddi komplikasyonlara yol açabilmesi nedeniyle optimum kullanım protokolleri günümüzde de tartışılmaya devam etmektedir (Arias-Moliz et al., 2009; X. Petridis et al., 2019; Wang et al., 2020).

Kök kanal dezenfeksiyonunda kullanılan bir diğer önemli ajan olan klorheksidin, özellikle güçlü antimikrobiyal etkisi ve dentin yüzeylerine bağlanarak uzun süreli antimikrobiyal aktivite gösterebilmesi (substantivite) nedeniyle endodontide yer edinmiştir (Heling et al., 1992; Poppolo Deus & Ouanounou, 2022). Bununla birlikte, organik dokuları çözme özelliğinin bulunmaması nedeniyle NaOCl'nin yerini alamamış, daha çok tamamlayıcı veya alternatif irrigasyon protokollerinde değerlendirilmiştir (Heling et al., 1992; Poppolo Deus & Ouanounou, 2022).

İrrigasyonun gelişim sürecinde yalnızca mikroorganizmaların uzaklaştırılması değil, aynı zamanda enstrümantasyon sırasında oluşan smear tabakasının eliminasyonu da önemli bir hedef

haline gelmiştir. Bu amaçla kullanılan etilendiamintetraasetik asit (EDTA), dentindeki kalsiyum iyonlarıyla şelasyon oluşturarak smear tabakasının uzaklaştırılmasını sağlayan en yaygın şelatörlerden biri olarak klinik uygulamada yerini almıştır (De-Deus et al., 2008; George et al., 2005). EDTA'nın smear tabakasını kaldırarak dentin tübüllerini açığa çıkarması, irriganların ve kanal dolgu materyallerinin dentinle etkileşimini artırmakta, ayrıca biyofilm matriksini etkileyerek dezenfeksiyon sürecine katkı sağlamaktadır (Busanello et al., 2019). Ancak uzun süreli kullanımı dentin mikrosertliğinde azalmaya neden olabileceğinden kontrollü uygulanması önerilmektedir (Hottel et al., 1999).

Zaman içerisinde yalnızca irrigasyon solüsyonlarının kimyasal özelliklerinin değil, bu solüsyonların kök kanal sistemi içerisinde nasıl dağıldığının da tedavi başarısını etkilediği anlaşılmıştır. Geleneksel şırınga-irrigasyon yöntemlerinin özellikle apikal bölgelerde ve anatomik açıdan ulaşılması güç alanlarda yetersiz kalabildiğinin gösterilmesi, irrigasyon aktivasyon sistemlerinin geliştirilmesine öncülük etmiştir (Boutsioukis, 2018). Son yirmi yılda sonik, ultrasonik ve lazer destekli irrigasyon sistemleri klinik uygulamaya girmiştir. Bu sistemlerin temel amacı irriganların akışını artırmak, duvarlarla temasını optimize etmek, organik doku çözünmesini ve smear tabakası uzaklaştırılmasını geliştirmek ve sonuç olarak mikrobiyal yükü daha etkin şekilde azaltmaktır (Boutsioukis & Arias-Moliz, 2022; Huffaker et al., 2010; Kasić et al., 2017).

Günümüzde endodontik irrigasyon alanında çok sayıda in vitro çalışma, klinik araştırma, sistematik derleme ve meta-analiz yayımlanmıştır. Bununla birlikte irrigan konsantrasyonu, hacmi, uygulama süresi ve aktivasyon yöntemleri konusunda literatürde halen çelişkili sonuçlar bulunmaktadır (Arias-Moliz et al., 2009; Du et al., 2014; Xenos Petridis et al., 2019; Wang et al., 2020). Bu durum, klinisyenlerin en uygun irrigasyon protokolünü belirlemesini zorlaştırmaktadır. Son yıllarda kanıta dayalı diş hekimliği yaklaşımının yaygınlaşmasıyla birlikte, mevcut bilgilerin sentezlenmesine yönelik sistematik derlemeler ve meta-analizler artış göstermiştir. Ancak aynı konuda çok sayıda derlemenin bulunması, elde edilen kanıtların bütüncül olarak değerlendirilmesini gerekli kılmıştır (Aromataris et al., 2015).

Bu tarihsel gelişim süreci, kök kanal irrigasyonunun basit bir yıkama işlemi olmaktan çıkarak biyolojik, kimyasal ve fiziksel prensiplerin birlikte değerlendirildiği kapsamlı bir dezenfeksiyon stratejisine dönüştüğünü göstermektedir. Güncel yaklaşım, uygun irrigan seçiminin etkili aktivasyon yöntemleriyle desteklenmesi ve mevcut bilimsel kanıtlar doğrultusunda klinik kararların verilmesi esasına dayanmaktadır (Aromataris et al., 2015;

Boutsioukis & Arias-Moliz, 2022; Huffaker et al., 2010; Kasić et al., 2017). Bu nedenle kök kanal irrigasyonu ve aktivasyon sistemlerine ilişkin güncel bilgilerin değerlendirilmesi, klinik uygulamalarda daha öngörülebilir ve başarılı sonuçların elde edilmesine katkı sağlayacaktır.

2. GELENEKSEL İRRİGASYON AJANLARI VE ETKİ MEKANİZMALARI (tez)

2.1. Sodyum Hipoklorit (NaOCl)

Sodyum hipoklorit, kök kanal irrigasyonunda en yaygın kullanılan ajan olup hem antimikrobiyal etkinliği hem de organik dokuları çözebilme kapasitesi nedeniyle günümüzde altın standart irrigant olarak kabul edilmektedir. Kanal preparasyonu sırasında lubrikasyon sağlayarak enstrümantasyonu kolaylaştırmakta, nekrotik ve vital pulpa kalıntılarının uzaklaştırılmasına katkıda bulunmakta ve smear tabakasının organik bileşenlerini çözebilmektedir. Ayrıca geniş spektrumlu antimikrobiyal etkisi sayesinde kök kanal sistemindeki mikrobiyal yükün azaltılmasında önemli rol oynamaktadır (Mohammadi, 2008). Klinik uygulamada %0,5 ile %10 arasında değişen konsantrasyonlarda kullanılabilmekte olup, proteolitik etkinliğinin kullanılan konsantrasyonla yakından ilişkili olduğu bildirilmektedir (Zhu et al., 2013).

2.2. Klorheksidin Glukonat (CHX)

Klorheksidin glukonat, güçlü antimikrobiyal özelliklere sahip katyonik bir bisbiguanid bileşiğidir. Dentin ve mine yüzeylerine bağlanabilme özelliği sayesinde uzun süreli antimikrobiyal etki gösterir. “Substantivite” olarak tanımlanan bu özellik, irrigasyon sonrasında bile mikroorganizmalar üzerinde baskılayıcı etkinliğin devam etmesini sağlar (Delany et al., 1982). Organik doku çözme kapasitesinin bulunmamasına rağmen düşük toksisite profili ve geniş antibakteriyel spektrumu nedeniyle endodontide alternatif veya tamamlayıcı bir irrigant olarak kullanılmaktadır. Klinik uygulamalarda genellikle %0,2 ile %2 arasındaki konsantrasyonlarda tercih edilmektedir (White et al., 1997).

2.3. Serum Fizyolojik

Serum fizyolojik (%0,9 NaCl), biyolojik olarak uyumlu ve dokular üzerinde irritan etkisi bulunmayan bir irrigasyon solüsyonudur. Ancak antimikrobiyal aktivite göstermemesi ve organik ya da inorganik dokuları çözme kapasitesinin olmaması nedeniyle tek başına etkili bir kök kanal irrigantı olarak kabul edilmez. Endodontide daha çok farklı irrigasyon

solüsyonlarının birbirleriyle istenmeyen kimyasal reaksiyonlarını önlemek amacıyla arak yıkama solüsyonu olarak kullanılmaktadır (Hariharan et al., 2010).

2.4. Hidrojen Peroksit (H_2O_2)

Hidrojen peroksit uzun yıllardır dezenfeksiyon ve sterilizasyon amacıyla kullanılan oksitleyici bir ajandır. Endodontik uygulamalarda pulpa odasındaki kan ve doku artıklarının uzaklaştırılmasına yardımcı olmakla birlikte, sodyum hipoklorite kıyasla daha düşük antimikrobiyal etkinlik ve doku çözme kapasitesine sahiptir (Sedgley, 2004). Möller, 1966 yılında %30'luk hidrojen peroksitin mekanik temizliği takiben diş yüzeylerinin dezenfeksiyonu amacıyla kullanılabileceğini bildirmiştir. Hidrojen peroksitin sodyum hipoklorit ile ardışık kullanımı sonucunda açığa çıkan oksijenin özellikle anaerob mikroorganizmalar üzerinde olumsuz etki oluşturabileceği öne sürülmüştür (Shiozawa, 2000).

2.5. MTAD®

MTAD; doksisisiklin (%3), sitrik asit ve Tween-80 içeren yüzey aktif bir deterjanın kombinasyonundan oluşan asidik karakterli bir irrigasyon ajanıdır. Torabinejad ve arkadaşları tarafından 2003 yılında kök kanal sisteminin dezenfeksiyonu ve smear tabakasının uzaklaştırılması amacıyla geliştirilmiş ve daha sonra ticari olarak BioPure MTAD adıyla kullanıma sunulmuştur. MTAD'ın smear tabakasının eliminasyonunda etkili olduğu gösterilmiş olmakla birlikte, organik dokuları çözebilme özelliği bulunmamaktadır (Shabahang & Torabinejad, 2003).

2.6. Setreksidin

Setreksidin, %0,2 klorheksidin glukonat ile %0,2 setrimet kombinasyonundan oluşan bir irrigasyon solüsyonudur (D'Arcangelo et al., 1999). Formülasyonda bulunan setrimet, yüzey gerilimini azaltarak irrigantın kanal sistemi boyunca daha etkin yayılmasını sağlar. Bunun yanında antiseptik etkinliği destekleyerek mikrobiyal eliminasyonu artırabilir. Yapılan çalışmalar, setreksidinin yüksek düzeyde kanal dezenfeksiyonu sağlayabildiğini ve smear tabakasının uzaklaştırılmasına katkıda bulunabileceğini göstermektedir (Onçağ et al., 2003).

2.7. İyot-Potasyum İyodür (IKI)

İyot içeren bileşikler, tıpta ve diş hekimliğinde uzun yıllardır kullanılan dezenfektanlar arasında yer almaktadır. İyot-potasyum iyodür solüsyonları geniş antimikrobiyal etkiye sahip olup, canlı dokularla temaslarında birçok irrigasyon ajanına göre daha iyi biyouyumluluk gösterebilmektedir (Molander et al., 1999). Bununla birlikte, diş sert dokularında renklenmeye neden olabilmeleri klinik kullanımlarını sınırlandıran önemli dezavantajlardan biridir.

2.8. Sitrik Asit

Sitrik asit, özellikle smear tabakasının inorganik bileşenlerinin uzaklaştırılması amacıyla kullanılan şelatör ajanlardan biridir. Endodontik uygulamalarda %1 ile %50 arasında değişen konsantrasyonlarda kullanılabilir. Antimikrobiyal özelliklere sahip olmasına rağmen, temel kullanım amacı kanal duvarlarında oluşan smear tabakasının çözünmesini sağlayarak dentin tübüllerinin açığa çıkmasına yardımcı olmaktır (Machado-Silveiro et al., 2004).

2.9. Etilendiamintetraasetik Asit (EDTA)

EDTA, kök kanal tedavisinde smear tabakasının uzaklaştırılması için en yaygın kullanılan şelasyon ajanıdır. Dentin içerisindeki kalsiyum iyonlarıyla reaksiyona girerek inorganik yapının çözünmesini sağlar ve böylece dentin tübüllerinin açılmasına katkıda bulunur. Genellikle sodyum hipoklorit ile birlikte kullanılan EDTA, irrigasyonun etkinliğini artırsa da bu iki ajan arasındaki kimyasal etkileşim nedeniyle sodyum hipokloritin serbest klor miktarında azalma meydana gelebilmektedir. Bunun sonucunda NaOCl'nin hem doku çözme kapasitesinin hem de antimikrobiyal etkinliğinin azalabileceği bildirilmiştir (Grawehr et al., 2003).

3. İRRİGASYONDA FİZİKSEL VE GEOMETRİK SINIRLAMALAR

3.1. Anatomik Sınırlılıklar, Geometrik Alan ve Yüzey Gerilimi Faktörü

Kök kanal irrigasyonunun etkinliği yalnızca kullanılan irrigasyon solüsyonunun kimyasal özelliklerine bağlı değildir. Irrigasyonun başarısı, irrigantın kök kanal sisteminin tüm bölgelerine ulaşabilmesi, bu bölgelerde yeterli süre kalabilmesi ve uzaklaştırılan doku artıkları ile mikroorganizmaları kanal dışına taşıyabilecek uygun akış dinamiklerini oluşturabilmesine bağlıdır. Bununla birlikte kök kanal sisteminin karmaşık anatomik yapısı ve irrigasyon solüsyonlarının fiziksel özellikleri, dezenfeksiyonun etkinliğini sınırlandıran önemli faktörler

arasında yer almaktadır (Boutsioukis et al., 2009; Gao et al., 2009; Moser & Heuer, 1982; Nair, 2004; Schilder, 1974; Sedgley, 2004; Sedgley et al., 2005).

Kök kanal sistemi, uzun yıllar boyunca radyografik değerlendirmeler ve iki boyutlu laboratuvar modelleri temel alınarak incelenmiştir. Ancak bu yöntemlerin kanal anatomisinin gerçek karmaşıklığını yansıtmada yetersiz kaldığı gösterilmiştir. Plastik bloklar üzerinde gerçekleştirilen çalışmalar, standartlaştırılmış kanal boyutları sağlamalarına rağmen insan dentininin fiziksel özelliklerini taklit edememekte ve yalnızca iki boyutlu kanal eğriliklerini temsil edebilmektedir (Thompson & Dummer, 1997). Benzer şekilde, kök kesitleri üzerinde yapılan analizler de yalnızca belirli seviyelerde bilgi sağlayabilmekte ve kanal sisteminin üç boyutlu organizasyonunu tam olarak ortaya koyamamaktadır (Bramante et al., 1987; Portenier et al., 1998).

Mikro-bilgisayarlı tomografi teknolojisinin endodontik araştırmalarda kullanılmaya başlanmasıyla birlikte kök kanal sisteminin üç boyutlu morfolojisi ayrıntılı olarak değerlendirilebilir hale gelmiştir (Bjørndal ve ark., 1999; Rhodes ve ark., 1999). Peters ve arkadaşlarının geliştirdiği analiz yöntemleri sayesinde preparasyon öncesi ve sonrası kanal hacmi, yüzey alanı ve geometrik değişiklikler üç boyutlu olarak karşılaştırılabilmiş, böylece kök kanal sisteminin düşünüldüğünden çok daha kompleks bir yapıya sahip olduğu ortaya konmuştur (Peters et al., 2000). Daha sonraki mikro-bilgisayarlı tomografi çalışmaları, mekanik preparasyon sonrasında kanal duvarlarının önemli bir bölümünün enstrümanlarla temas etmeden kaldığını ve özellikle oval kanallar, istmuslar, lateral kanallar ve apikal delta bölgelerinde temizlenemeyen alanların varlığını sürdürdüğünü göstermiştir (Peters, 2004; Peters et al., 2001).

Bu anatomik karmaşıklık, irrigasyonun önemini artıran temel nedenlerden biridir. Mekanik preparasyon sırasında şekillendirilemeyen bölgelerde mikroorganizmalar, nekrotik doku kalıntıları ve biyofilm yapıları varlıklarını sürdürebilmektedir. Bu nedenle irrigasyon solüsyonlarının yalnızca ana kanal boşluğuna değil, aynı zamanda enstrümantasyonun ulaşamadığı alanlara da nüfuz etmesi gerekmektedir. Ancak kanal çapındaki daralmalar, kanal eğrilikleri, düzensiz kesit geometrileri ve anatomik varyasyonlar irrigantın bu bölgelere ulaşmasını önemli ölçüde güçleştirmektedir (Boutsioukis et al., 2009; Gao et al., 2009; Moser & Heuer, 1982; Sedgley et al., 2005).

İrrigasyon etkinliğini etkileyen bir diğer önemli unsur ise kök kanal sisteminin geometrik özellikleridir. Kanalin çapı, konikliği, uzunluğu ve kesit şekli, irrigantın kanal içerisinde oluşturacağı akış modelini doğrudan etkilemektedir. Dar ve uzun kanallarda akış direnci artarken, geniş ve konik preparasyonlarda irrigant değişimi daha etkin gerçekleşebilmektedir. Pozitif basınçlı şırınga irrigasyonunda irrigantın etkili değişim bölgesinin genellikle iğne ucunun yaklaşık 1–1,5 mm ötesiyle sınırlı olduğu gösterilmiştir (Boutsioukis et al., 2009; Gao et al., 2009; Sedgley et al., 2005). Bu nedenle apikal bölgeye yeterli miktarda irrigant ulaştırılabilmesi için hem uygun preparasyon geometrisinin oluşturulması hem de uygun irrigasyon tekniklerinin kullanılması gerekmektedir (Hsieh et al., 2007; Huang et al., 2008; Ram, 1977; Usman et al., 2004; Zehnder, 2006).

İrrigasyon solüsyonlarının fiziksel özellikleri de penetrasyon kapasitesini belirleyen önemli faktörler arasındadır. Bunlardan biri olan yüzey gerilimi, bir sıvının yüzey molekülleri arasındaki çekim kuvvetlerini ifade etmektedir. Yüksek yüzey gerilimine sahip irrigasyon solüsyonları, dar anatomik alanlara, düzensiz yüzeylere ve dentin tübüllerine nüfuz etmekte daha fazla güçlük yaşayabilmektedir. Buna karşılık yüzey geriliminin azaltılması, irrigantın dentin yüzeyini daha iyi ıslatmasına ve ulaşılması güç bölgelere daha etkin şekilde yayılmasına katkı sağlayabilmektedir. Bu nedenle bazı irrigasyon ajanlarına yüzey aktif maddeler eklenerek akış özelliklerinin iyileştirilmesi amaçlanmıştır.

Sonuç olarak kök kanal sisteminin anatomik karmaşıklığı, geometrik özellikleri ve irrigasyon solüsyonlarının fiziksel davranışları, kanal dezenfeksiyonunun başarısını doğrudan etkileyen faktörlerdir. Mekanik preparasyonun tek başına tüm kanal yüzeylerine ulaşamaması ve irrigant penetrasyonunun çeşitli fiziksel engellerle sınırlandırılması, irrigasyon aktivasyon sistemlerinin geliştirilmesinin temel gerekçelerinden birini oluşturmaktadır. Bu sınırlamaların en önemlilerinden biri, özellikle apikal bölgede irrigant değişimini engelleyen ve “vapor lock” olarak adlandırılan gaz kilidi fenomenidir.

3.2. Vapor Lock (Gaz Kilidi) Fenomeni ve Apikal Akış Dinamikleri

Kök kanal irrigasyonunun etkinliği yalnızca kullanılan irrigasyon solüsyonunun kimyasal özelliklerine değil, aynı zamanda kanal içerisinde oluşturulan akış dinamiklerine de bağlıdır. Geleneksel pozitif basınçlı şırınga irrigasyonunda irrigantın etkili şekilde yer değiştirebildiği alanın, iğne ucunun yaklaşık 1–1,5 mm ötesiyle sınırlı olduğu gösterilmiştir (Boutsioukis et al., 2009; Gao et al., 2009; Sedgley et al., 2005). Bu nedenle irrigasyonun apikal bölgeye etkin

şekilde ulaşabilmesi için kanal preparasyonunun yeterli genişlikte olması ve irrigasyon iğnesinin çalışma boyuna mümkün olduğunca yakın yerleştirilebilmesi gerekmektedir (Hsieh et al., 2007; Huang et al., 2008; Usman et al., 2004; Zehnder, 2006).

Klinik koşullarda kök kanal sistemi, apikal foramen tarafından çevre dokularla sınırlandırılmış kapalı bir sistem olarak davranmaktadır. Bu durumda irrigasyon sırasında apikal bölgede sıkışmış bir hava kabarcığı oluşabilmekte ve bu durum "vapor lock" veya gaz kilidi fenomeni olarak adlandırılmaktadır. Apikal bölgede hapsolan bu hava kabarcığı, irrigasyon solüsyonunun kanalın son kısmına ulaşmasını ve burada sürekli olarak yenilenmesini engelleyerek etkin temizliği sınırlandırmaktadır. Gaz kilidinin bulunduğu bölgede akışkan hareketinin son derece sınırlı olduğu ve bir tür "ölü su bölgesi" (dead-water zone) olduğu bildirilmiştir. Bu bölgede irrigantın yenilenememesi nedeniyle debrislerin uzaklaştırılması yetersiz kalmakta ve özellikle apikal 1 mm içerisinde anlamlı miktarda artık materyal birikimi gözlenmektedir. Ayrıca şelasyon ajanları veya asidik irrigantların kullanımı sonrasında ortaya çıkan demineralize kollajen matriksinin, yeterli türbülans oluşmadığında debris partiküllerini tutarak temizleme etkinliğini daha da azaltabileceği belirtilmiştir (Tay et al., 2007).

Pozitif basınçlı irrigasyon sistemlerinde gözlenen bu sınırlamalar, sonik, ultrasonik ve negatif basınçlı irrigasyon sistemlerinin geliştirilmesinin temel nedenlerinden biri olmuştur (de Gregorio et al., 2009; Fukumoto et al., 2006; Gu et al., 2009; Gutarts et al., 2005; Nielsen & Craig Baumgartner, 2007; Townsend & Maki, 2009; van der Sluis et al., 2007). Bu sistemlerin temel amacı, apikal bölgede oluşan hava kilidini ortadan kaldırmak, irrigantın sürekli yenilenmesini sağlamak ve böylece kanal sisteminin özellikle erişimi zor bölgelerinde daha etkili temizleme elde etmektir. Ayrıca iyi uyumlu bir güta-perka konisi ile gerçekleştirilen manuel dinamik aktivasyonun da apikal bölgede sıkışan hava kabarcığını yer değiştirebildiği ve irrigasyon etkinliğini artırabildiği bildirilmiştir (Huang et al., 2008; McGill et al., 2008a).

3.2. Vapor Lock (Gaz Kilidi) Fenomeni ve Apikal Akış Dinamikleri

Vapor lock (gaz kilidi) fenomeni, kök kanal sisteminin kapalı uçlu yapısından kaynaklanan ve irrigasyon etkinliğini sınırlandıran önemli bir fiziksel engeldir. Kapalı uçlu mikrokannallarda sıvının ilerlemesi sırasında havanın kanalın son kısmında hapsolması, akışkanlar mekaniğinde iyi bilinen bir olgudur (Migoun & Azouni, 1996; Migun & Shnip, 2002). Kök kanal tedavisi sırasında irrigasyon işlemleri dakikalar içerisinde gerçekleştirildiğinden, apikal bölgede

hapsolan hava irrigasyon solüsyonunun bu bölgelere ulaşmasını ve yeterli dezenfeksiyon sağlamasını engelleyebilmektedir (Pesse et al., 2005).

Senia ve arkadaşları, sodyum hipokloritin apeks 30 numaraya kadar genişletilmiş kanallarda dahi çalışma boyuna 3 mm'den daha fazla yaklaşmadığını göstermiştir (Senia et al., 1971). Bu durumun, sodyum hipokloritin organik dokularla reaksiyona girmesi sonucu oluşan gaz kabarcıklarının apikal bölgede birleşerek bir hava kilidi oluşturmamasından kaynaklandığı düşünülmektedir (Schoeffel, 2008). Oluşan bu gaz tabakası irrigantın apikal bölgeye ulaşmasını ve burada yenilenmesini sınırlandırmaktadır.

Vapor lock fenomeni yalnızca irrigant penetrasyonunu azaltmakla kalmaz, aynı zamanda sonik ve ultrasonik aktivasyon sistemlerinin etkinliğini de olumsuz etkileyebilir. Akustik akım ve kavitasyon gibi mekanizmalar yalnızca sıvı ortamda meydana gelebildiğinden, aktivasyon ucunun hava boşluğuna ulaşması durumunda bu etkiler ortadan kalkmaktadır (Schoeffel, 2008).

Apikal bölgede oluşan gaz kilidinin azaltılması amacıyla çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bunlardan biri, çalışma boyuna uyumlu bir güta-perka konisinin kısa ileri-geri hareketlerle kullanıldığı manuel dinamik aktivasyon tekniğidir. Bu yöntem, apikal bölgede hapsolan havanın yer değiştirmesine yardımcı olarak irrigasyon solüsyonunun çalışma boyuna ulaşmasını kolaylaştırabilmektedir (Huang et al., 2008; McGill et al., 2008b).

4. GÜNCEL İRRİGASYON AKTİVASYON SİSTEMLERİ

Kök kanal sisteminin anatomik karmaşıklığı, apikal bölgede irrigant değişiminin sınırlı olması, yüzey gerilimi ve vapor lock fenomeni gibi fiziksel engeller, geleneksel irrigasyonun tek başına her zaman yeterli temizlik sağlayamamasına neden olmaktadır. Bu sınırlamalar, irrigasyon solüsyonlarının kanal içerisinde daha etkin dağılımını sağlamak, apikal ve enstrümente edilmemiş alanlara ulaşmasını artırmak ve debris uzaklaştırılmasını kolaylaştırmak amacıyla farklı irrigasyon aktivasyon yöntemlerinin geliştirilmesine yol açmıştır. Aktivasyon sistemlerinin temel hedefi, irrigantın yalnızca kanal içerisine verilmesini değil, aynı zamanda kanal duvarları boyunca etkili bir akış oluşturmalarını ve biyofilm, smear tabakası ve doku artıklarının uzaklaştırılmasını desteklemektir.

4.1. Manuel Aktivasyon Teknikleri

4.1.1. İğne/Kanül ile Şırınga İrrigasyonu

Pasif ultrasonik irrigasyon sistemlerinin endodonti pratiğine girmesinden ve yaygınlaşmasından önce, şırınga ve iğne/kanül aracılığıyla yapılan konvansiyonel irrigasyon, solüsyonların kök kanal sistemine ulaştırılmasında temel ve standart yöntem olarak kabul edilmiştir (van der Sluis et al., 2006). Günümüzde de gerek genel diş hekimleri gerekse endodonti uzmanları tarafından klinik rutin içerisinde sıklıkla tercih edilen bu teknik, farklı çap, esneklik ve geometrik tasarımlardaki metal iğneler veya kanüller vasıtasıyla irriganın kanal içerisine verilmesine dayanır. Bu uygulama klinik senaryoya göre tamamen statik/pasif biçimde gerçekleştirilebileceği gibi, iğnenin kanal içerisinde apiko-koronal yönde yukarı-aşağı hareket ettirilmesiyle sınırlı düzeyde bir mekanik ajitasyon ve sıvı sirkülasyonu sağlama amacıyla da yürütülebilir.

Endodontik irrigasyon iğneleri, sıvı hidrodinamiğini doğrudan etkileyen uç tasarımlarına (tip design) göre temel olarak iki farklı kategoride sınıflandırılır (Kahn et al., 1995):

- **Açık uçlu (open-ended) iğneler:** Solüsyonu doğrudan en uç kısımdan, yüksek bir itme gücüyle kanala deşarj eder.
- **Kapalı uçlu ve yan delikli (side-vented) iğneler:** Irrigantın kanal duvarlarındaki hidrodinamik aktivasyonunu ve türbülansını artırırken, solüsyonun apikal foramen den taşma (apikal ekstrüzyon) riskini majör düzeyde azalttığı bildirilmiştir (Hauser et al., 2007).

Güvenli ve biyolojik sınırlara saygılı bir irrigasyon protokolü için iğnenin kök kanalı içerisinde sıkışmadan (binding oluşturmada), serbest ve gevşek bir şekilde hareket edebilmesi klinik açıdan kritiktir. İğnenin dar kanal duvarlarına sıkı bir şekilde adapte olması veya kilitlemesi, irriganın koronal yöne doğru güvenli geri akışını (reflux) tamamen engeller. Bu durum, kanal içinde kontrolsüz bir hidrolik basınç artışına yol açarak solüsyonun periapikal dokulara taşma ve hipoklorit kazası yaratma riskini ciddi ölçüde artırır. Buna karşılık iğnenin kanal lümeninde gevşek konumlandırılması, irriganın koronal yönde rahatça geri akışına izin vererek, enstrümantasyon talaşlarının ve debrisin koronale doğru mekanik olarak taşınmasını kolaylaştırır ve apikal ekstrüzyon riskini minimize eder.

Klinik Değerlendirme ve Sınırlılıklar: Konvansiyonel şırınga irrigasyonunun literatürde kabul gören başlıca avantajları; klinisyene irrigasyon iğnesinin kanal içerisindeki penetrasyon derinliğini milimetrik olarak ayarlama ve uygulanan toplam irrigan hacmini görece kolay bir şekilde kontrol etme olanağı sağlamasıdır (van der Sluis et al., 2006). Ancak, bu yöntemin kök kanalının anatomik olarak karmaşık bölgelerinde oluşturduğu mekanik yıkama (flushing) etkisi oldukça sınırlıdır. Konvansiyonel şırınga-irrigasyon protokolleri sonrasında, kanal sisteminin ulaşılması güç uzantıları, ismusları, lateral ramifikasyonları ve enstrümente edilmemiş anatomik bölgelerinde yoğun miktarda debris ve inatçı bakteri biyofilminin varlığını sürdürdüğü mikro-BT ve histolojik çalışmalarla gösterilmiştir (Nair et al., 2005; Wu & Wesselink, 2001). Bu temizlik yetersizliği ve debridman eksikliği özellikle apikal üçlü bölgesinde çok daha belirgindir.

Şırınga-iğne irrigasyonunda aktif kimyasal solüsyonun kanal içerisindeki hidrodinamik ilerleme ve yenilenme mesafesi, doğrudan iğne ucunun ulaştığı konumla ilişkilidir. Akışkanlar mekaniği üzerine yapılan çalışmalarda, konvansiyonel şırınga irrigasyonu sırasında irrigasyon solüsyonunun iğne ucundan yalnızca **yaklaşık 1 mm** daha ileriye (apikale) ulaşabildiği ve bu sınırın ötesinde durağan bir bölge yarattığı gösterilmiştir (Ram, 1977). Bu bulgu kitap bölümümüzün ana temasını oluşturan aktivasyon ihtiyacını doğrulamaktadır; zira dar veya aşırı kıvrımlı kök kanallarında irrigasyon iğnesinin ucu anatomik engeller nedeniyle çoğunlukla apikal bölgeye güvenle yaklaştırılamamakta, bu da apikal üçüncüde yetersiz dezenfeksiyona ve tedavi başarısızlıklarına zemin hazırlamaktadır.

4.1.2. Fırça Destekli Manuel Aktivasyon Sistemleri

Fırça (brush) sistemleri, irrigasyon solüsyonlarını kök kanal sistemine taşımak amacıyla kullanılan doğrudan birer primer enjeksiyon yöntemi değildir. Bu sistemler daha ziyade, kanal duvarlarında mekanik enstrümantasyon sonrasında hapsolan debrislerin uzaklaştırılması, irrigasyon solüsyonlarının mekanik olarak aktive edilmesi ve irriganın karmaşık kanal anatomisi içerisindeki homojen dağılımının iyileştirilmesi amacıyla geliştirilmiş yardımcı/sekonder aktivasyon mekanizmaları olarak değerlendirilmektedir. Fırça destekli sistemlerin temel klinik amacı; özellikle kemomekanik preparasyon aşaması tamamlandıktan sonra kanal duvarlarında, ismuslarda veya girintilerde kalan organik doku artıklarının ve inorganik smear tabakasının fiziksel olarak fırçalanarak uzaklaştırılmasını desteklemektir.

Bu fırçalama felsefesi doğrultusunda endodonti pazarına sunulan dikkat çekici sistemlerden biri, dış yüzeyi mikroskobik fırça kılları ile kaplanmış 30-gauge çapında bir irrigasyon iğnesi olan **NaviTip FX**'tir (Ultradent Products Inc., South Jordan, UT, ABD). NaviTip FX, aktif kimyasal irrigantın lümene enjekte edilmesi esnasında, eş zamanlı olarak iğne gövdesindeki fırça yapısı sayesinde kanal duvarlarının mekanik olarak fırçalanmasına (scrubbing) olanak tanımaktadır. Literatürde yer alan çalışmalarda, NaviTip FX ile gerçekleştirilen fırça destekli irrigasyon protokollerinin, standart fırçasız düz NaviTip iğnelere kıyasla özellikle kök kanalının koronal üçlüsünde istatistiksel olarak çok daha yüksek bir temizlik seviyesi sağladığı bildirilmiştir (Al-Hadlaq et al., 2006). Bununla birlikte, aynı üstünlük kök kanalının orta ve apikal üçlülerinde elde edilememiş ve buralardaki temizlik farklılıklarının istatistiksel olarak anlamlı olmadığı gösterilmiştir (Al-Hadlaq et al., 2006). Apikal bölgedeki bu etkinlik kaybının; fırça kıllarının dar apikal anatomide kanal duvarlarıyla yeterli esneklikte ve dinamikte temas kuramaması ve klinik uygulamada sistemin çoğunlukla dinamik bir hareket yerine pasif/statik şekilde konumlandırılmasıyla ilişkili olabileceği düşünülmektedir. Araştırmacılar, pasif bekletme yerine aktif ve agresif bir fırçalama hareketiyle (brushing motion) kombine edilmesi durumunda sistemin apikal debridman etkinliğinin de artırılabilirliğini ileri sürmüşlerdir (Al-Hadlaq et al., 2006).

Klinik Riskler ve Dezavantajlar: Her ne kadar fırçalama etkisi teorik olarak avantajlı görünse de, fırça destekli manuel aktivasyon sistemlerinin klinik rutin içerisinde göz ardı edilmemesi gereken bazı majör dezavantajları ve güvenlik riskleri bulunmaktadır. Kök kanalının sahip olduğu anatomik düzensizlikler, resesler ve yüksek yüzey pürüzlülükleri ile temas eden fırça kıllarında aşırı friksiyona bağlı olarak kopmalar ve kırılmalar meydana gelebilmekte; bu kopan plastik/naylon parçaların karmaşık kanal geometrisi içerisinde (özellikle apikalde) yabancı cisim olarak kalma riski doğmaktadır. En kritik klinik problem ise, bu fırça kıllarının çoğunlukla **radylüsent** karakterde olmasıdır. Radyografik olarak görünmeyen bu plastik mikro parçaların klinik muayenede fark edilmesi son derece zordur; hatta cerrahi operasyon mikroskobu (DOM) altında çalışılsa dahi derin apikal alanlarda tespit edilip kanaldan elimine edilmeleri her zaman mümkün olmamaktadır (Al-Hadlaq et al., 2006).

Kanal içi debridman kalitesini ve mekanik temizliği artırmak amacıyla tasarlanan bir diğer spiral fırça sistemi ise **Endobrush**'tır (C&S Microinstruments Ltd., Markham, Ontario, Kanada) (Keir et al., 1990). Endodontik kullanım morfolojisine uygun olarak geliştirilen bu sistem, bükülmüş bir merkezi paslanmaz çelik tel yapısı üzerine helis şeklinde yerleştirilmiş

nylon kıllardan oluşan spiral bir fırça tasarımına sahiptir. Klinik uygulama protokolünde Endobrush, kanal içerisinde önceden belirlenmiş çalışma boyutuna (working length) kadar dikkatlice ilerletilmekte; ardından kendi eksenini etrafında yaklaşık 90 derecelik bir rotasyon hareketi ile birlikte koronal yöne doğru 2-3 mm'lik ileri-geri (piston) hareketler uygulanarak kanal duvarları mekanik olarak kazınmaktadır.

4.1.3. Manuel Dinamik İrrigasyon (MDA)

Manuel dinamik irrigasyon (MDA), irrigasyon solüsyonlarının kök kanal sistemi içerisindeki hidrodinamik dolaşımını ve akışkanlığını artırmak amacıyla klinikte sıklıkla başvuru alan, oldukça basit, pratik ve maliyet-etkin bir aktivasyon yöntemidir. Bu yöntemin temel klinik prensibi; aktif kimyasal irriganın kök kanal duvarları ve dentin tübülleriyle olan doğrudan temas yüzeyini artırmak ve özellikle anatomik kısıtlamaların en yoğun olduğu apikal üçüncü bölgede solüsyonun etkin bir şekilde deşarj edilmesini/yenilenmesini sağlamaktır. Daha önceki bölümlerde de vurgulandığı üzere, kök kanal sisteminde mikrobiyal eliminasyonun tam olarak gerçekleştirilebilmesi için irriganın yalnızca ana kanal lümeninde kalması yeterli değildir; mekanik şekillendirme enstrümanlarının fiziksel olarak ulaşamadığı anatomik varyasyonlara ve lateral ağ yapılarına da sızması gerekmektedir. Ancak kök kanalının ucu kapalı mikrokanal (closed-ended) tasarımı sebebiyle özellikle apikal bölgede hapsolan ve bir bariyer oluşturan **vapor lock (hava kilidi / gaz embolisi)** fenomeni, konvansiyonel yöntemlerle irriganın bu kritik alanlara ulaşmasını ve taze solüsyonla yer değiştirmesini majör düzeyde sınırlandırmaktadır (Schoeffel, 2008).

Manuel dinamik irrigasyon tekniğinde bu fiziksel bariyeri aşmak adına, ana şekillendirme eğesiyle ve kanalın çalışma boyuyla (working length) tam uyumlu, uygun çaptaki bir **ana güta-perka konisi** kullanılır. İrrigasyon solüsyonu ile tamamen doldurulmuş kök kanalı içerisine yerleştirilen bu koni, apiko-koronal doğrultuda kısa, hızlı ve ritmik ileri-geri hareketlerle manipüle edilir. Genellikle **2–3 mm'lik vertikal genlikte** hidrodinamik hareketler kullanılarak gerçekleştirilen bu klinik uygulama, kanal içi sıvıda güçlü bir yer değiştirme (displacement) ve taze irrigan akışı meydana getirir (Caron, 2007). Literatürde yer alan mikroskobik ve kantitatif çalışmalar, bu dinamik koni aktivasyonunun, aktif kimyasal ajanların apikal dezenfeksiyon bölgesine kesintisiz bir şekilde taşınmasını kolaylaştırdığını ve kanal içerisinde statik yöntemlere kıyasla çok daha etkin bir sıvı değişimi (fluid exchange) oluşturduğunu doğrulamaktadır (Caron, 2007).

Klinik Etkinlik ve Etki Mekanizmaları: McGill ve arkadaşları ile Huang ve meslektaşları tarafından yürütülen karşılaştırmalı serilerde; manuel dinamik irrigasyon protokollerinin hem hiçbir aktivasyon yapılmayan statik irrigasyondan hem de bazı otomatik dinamik irrigasyon cihazlarından klinik olarak daha yüksek bir debridman başarısına sahip olabildiği ortaya konmuştur (Huang et al., 2008; McGill et al., 2008b). Özellikle otomatik olarak pozitif basınçlı solüsyon deşarjı ve aspirasyon yapan **RinsEndo** (Dürr Dental, Bietigheim-Bissingen, Almanya) sistemi ile mikro-BT ve histolojik düzeyde karşılaştırıldığında; el ile uygulanan manuel dinamik aktivasyonun apikal alandaki irrigan değişimi ve kritik enstrümantasyon talaşlarının (debris) uzaklaştırılması açısından istatistiksel olarak çok daha başarılı sonuçlar verdiği bildirilmiştir (Huang et al., 2008; McGill et al., 2008b).

Literatürde, bu basit manuel yöntemin yüksek klinik etkinliğini ve apikal hava kilidini parçalama kabiliyetini açıklayan iki temel fiziksel mekanizma öne sürülmektedir:

- **Hidrodinamik Basınç Dalgalanmaları:** Çalışma boyunca tam uyumlu ana güta-perka konisinin kanal lümenindeki piston benzeri ileri-geri hareketi, kök kanalı içerisinde ardışık ve belirgin pozitif-negatif hidrolik basınç değişiklikleri meydana getirir (McGill et al., 2008b). Bu dinamik basınç dalgalanmaları, sıvının yüzey gerilimini kırarak irriganın daha önce vapor lock nedeniyle temas edemediği kör noktalara ve mikroskobik tübül ağlarına mekanik olarak itilmesini kolaylaştırır.
- **Yüksek Stroklu Frekans ve Türbülans:** Manuel olarak gerçekleştirilen bu koni hareketlerinin frekansı klinik uygulamada oldukça yüksektir. Deneyimli bir klinisyen tarafından **yaklaşık 30 saniyelik bir sürede 100 strok (yaklaşık 3,3 Hz frekans)** uygulanabilmektedir. Bu yüksek uygulama frekansı, bazı mekanik veya otomatik sistemlerin oluşturduğu hidrodinamik basınç frekanslarından çok daha yüksek değerlere ulaşarak kanal içi solüsyonda daha fazla mikroskobik girdap ve türbülans (turbulent flow) oluşmasına doğrudan katkıda bulunur.

4.2. Mekanik Destekli Aktivasyon Sistemleri

Manuel aktivasyon yöntemlerinin büyük ölçüde operatör becerisine bağımlı olması (operatöre bağımlı yapı) ve klinikte standardizasyon güçlüklerini beraberinde getirmesi, irrigasyon solüsyonlarının daha kontrollü, homojen ve etkin bir şekilde aktive edilmesini sağlayan mekanik destekli sistemlerin geliştirilmesine yol açmıştır. Bu mekanik sistemler; aktif irriganın kök kanal anatomisi içerisindeki devingenliğini ve dolaşımını artırmak, kritik apikal

debridmanı destekleyerek debris uzaklaştırılmasını maksimize etmek ve özellikle geleneksel yöntemlerle ulaşılması güç olan karmaşık anatomik bölgelerde temizleme etkinliğini daha standardize bir yaklaşımla geliştirmek amacıyla tasarlanmıştır.

4.2.1. Döner Fırça Sistemleri

Döner fırça sistemleri, kök kanallarına enjekte edilen irrigasyon solüsyonlarının mekanik/fiziksel debridman etkisini artırmak ve enstrümantasyon sonrasında kanal duvarlarında hapsolan rezidüel debrislerin eliminasyonunu desteklemek amacıyla literatüre kazandırılmıştır. Bu sistemlerdeki temel klinik mekanizma; motor gücüyle döndürülen fırça kılıplarının kanal düzensizliklerine ve reseslerine mekanik olarak temas etmesini (scrubbing) sağlamak, böylece preparasyon sonrasında yüzeyde kalan inorganik ve organik artıkları koronal yöne doğru sürükleyerek kanal dışına taşımaktır.

- **Tarihsel Gelişim ve İlk Prototipler:** Bu alandaki ilk inovatif sistemlerden biri, Ruddle tarafından tanımlanan döner mikro-fırça (rotary micro-brush) sistemidir (Ruddle, 2001). Bu sistem, merkezi bir metal tel çekirdek etrafına helis şeklinde yerleştirilmiş çok sayıda mikro fırça kılından oluşan konik bir çalışma ucuna sahiptir. Klinik debridman aşamasında endodontik motor yardımıyla yaklaşık **300 rpm** hızla döndürülen bu fırça, kanal duvarlarındaki mikroskobik düzensizliklere adapte olarak rezidüel debrislerin koronale doğru mekanik olarak süpürülmesine katkı sağlamaktadır (Ruddle, 2001). Bununla birlikte, bu ilk prototip patentinin alınmasının ardından endodonti pazarında geniş çaplı bir ticari kullanıma ve popüleriteye ulaşamamıştır.
- **Güncel Klinik Uygulamalar ve CanalBrush:** Günümüzde döner fırça felsefesiyle ticari olarak klinisyenlerin kullanımına sunulan en popüler sistemlerden biri **CanalBrush**'tır (Coltene Whaledent, Langenau, Almanya). Tamamı polipropilen materyalinden üretilmiş olan bu oldukça esnek mikro-fırça, klinik senaryoya göre manuel olarak da manipüle edilebilmekle birlikte, asıl etkinliğini düşük hızlı bir piyasemen/angldruva yardımıyla yaklaşık **600 rpm** hızda çalıştırıldığında göstermektedir. Weise ve arkadaşlarının yürüttüğü mikroskobik çalışmalarda, CanalBrush'ın uygun bir şelatör veya antimikrobiyal irrigasyon solüsyonu ile kombine edilerek kullanıldığında, simüle edilmiş kanal uzantıları ile anatomik düzensizliklerden debrislerin uzaklaştırılmasında istatistiksel olarak oldukça etkili olduğu kanıtlanmıştır (Weise et al., 2007).

Klinik Sınırlılıklar ve Değerlendirme: Döner fırça sistemleri, kanal duvarlarıyla doğrudan, aktif bir mekanik temas kurabilmeleri yönüyle teorik olarak avantajlı görünse de klinik kullanım alanları oldukça sınırlıdır. Bu mekanik sistemlerin gerçek temizleme ve aktivasyon etkinliği, doğrudan kök kanalının preparasyon sonrasındaki nihai çapına ve fırçanın apikal alandaki anatomik erişilebilirliğine (accessibility) bağlıdır. Dar, aşırı kıvrımlı veya apikal preparasyon boyutu küçük tutulmuş kanallarda polipropilen kılların apikal üçüncüye deforme olmadan ve kilitlenmeden ulaşması fiziksel olarak oldukça güçtür. (Ayrıca, manuel fırçalarda olduğu gibi döner hareket esnasında da kılların koparak kanal içinde saklı birer radyolüsent yabancı cisim olarak kalma riski klinik birer sınırlılık olarak göz önünde bulundurulmalıdır).

4.2.2. Döner Enstrümantasyon Sırasında Sürekli İrrigasyon

Kök kanallarında irrigasyon etkinliğini artırmak amacıyla endodonti literatürüne kazandırılan bir diğer mekanik yaklaşım, kanal preparasyonu adımı devam ederken eş zamanlı olarak irrigasyon solüsyonunun sürekli (continuous) olarak verilmesidir. Bu entegre debridman felsefesi doğrultusunda geliştirilen sistemlerin başında **Quantec-E** irrigasyon sistemi (SybronEndo, Orange, CA, ABD) gelmektedir. Sistem, mekanik döner enstrümantasyon süreçleri esnasında, irrigasyon solüsyonunu kesintisiz ve senkronize bir biçimde kanal içerisine ileten pompa kontrollü özel bir mekanizmaya sahiptir (Walters et al., 2002).

Teorik açıdan döner enstrümantasyon sırasında sürekli irrigasyon yapılması;

- Kanal içerisinde birim zamanda çok daha fazla irrigan hacmi oluşturulmasını sağlar,
- Aktif solüsyonun dinamik kanal duvarlarıyla olan temas süresini uzatır,
- İrrigasyon solüsyonunun anatomik olarak daha derin (apikal) bölgelere ulaşmasını kolaylaştırır.

Bu hidrodinamik avantajlar neticesinde, sürekli irrigasyon yaklaşımından geleneksel şırınga irrigasyonuna kıyasla klinik olarak çok daha etkili bir temizleme ve debridman performansı sağlaması beklenmektedir. Ancak, bu teorik avantajlar klinik ve laboratuvar çalışmalarında her zaman doğrulanamamıştır.

Setlock ve arkadaşları tarafından yapılan kantitatif değerlendirmelerde, Quantec-E sisteminin özellikle kök kanalının koronal üçlüsünde daha temiz kanal duvarları sağladığı ve daha etkin bir debris uzaklaştırılması gerçekleştirebildiği bildirilmiştir (Setlock et al., 2003). Bununla birlikte, biyofilm ve smear tabakasının en kritik olduğu orta ve apikal üçüncü bölgelerde

geleneksel yöntemlere kıyasla benzer bir üstünlük gösterilememiştir (Setlock et al., 2003). Benzer şekilde Walters ve meslektaşları da Quantec-E sistemi ile gerçekleştirilen sürekli irrigasyon protokollerinin, konvansiyonel şırınga-iğne irrigasyonuna göre anlamlı ve klinik olarak ayırt edici bir üstünlük sağlamadığını rapor etmişlerdir (Walters et al., 2002).

Klinik Değerlendirme ve Sonik/Ultrasonik Sistemlere Geçiş Köprüsü: Elde edilen tüm bu mikroskobik ve klinik bulgular, kök kanal sistemindeki dezenfeksiyon kalitesini artırmak için sadece irrigasyon hacminin artırılmasının ya da solüsyonun sürekli kanala deşarj edilmesinin tek başına yeterli olmadığını açıkça ortaya koymaktadır. Irrigantın nihai etkinliği açısından; kanal içindeki **sıvı hareketi (fluid movement)**, **akış dinamikleri (flow dynamics)** ve **aktif bir ajitasyon/aktivasyon mekanizmasının** varlığı çok daha kritik bir öneme sahiptir. Bu nedenle endodontideki güncel araştırmalar, solüsyonun yalnızca kanala verilmesine değil, aynı zamanda kanal anatomisi içerisinde enerjik bir şekilde hareket ettirilmesine ve türbülans yaratılmasına odaklanmıştır. Bu doğrultuda geliştirilen ve sıvıyı fiziksel olarak dalgalandırma prensibiyle çalışan **sonik ve ultrasonik aktivasyon sistemleri**, günümüz kanıta dayalı endodonti pratiğinde irrigasyon aktivasyonu alanında en yaygın ve en güvenilir kabul gören yöntemler arasında yer almaktadır.

4.2.3. Sonik Aktivasyon Sistemleri

Sonik irrigasyon sistemleri, kök kanal preparasyonu sonrasında irrigasyon solüsyonlarının karmaşık internal anatomi içerisinde çok daha dinamik ve enerjik hareket etmesini sağlamak amacıyla literatüre kazandırılmış fiziksel aktivasyon yöntemleridir. Bu sistemlerin temel çalışma felsefesi; aktif kimyasal solüsyonun kanal lümenine pasif olarak enjekte edilmesiyle yetinilmeyip, kanal boyunca güçlü bir hidrodinamik akış ve dalgalanma hareketi oluşturulmasına dayanır. Sonik aktivasyonun ana klinik hedefleri; irrigantın kök kanal duvarları ve mikroskobik dentin tübüleriyle olan doğrudan temas yüzeyini/süresini artırmak, enstrümantasyon talaşlarının (debris) mekanik olarak süpürülerek uzaklaştırılmasını kolaylaştırmak ve geleneksel şırınga irrigasyonunun "vapor lock" (hava kilidi) nedeniyle ulaşamadığı apikal üçüncü gibi erişilmesi güç anatomik bölgelere solüsyonun penetrasyonunu sağlamaktır.

- **Frekans ve Amplitüd Dinamikleri:** Sonik sistemler, yüksek frekanslı ultrasonik cihazlara kıyasla belirgin şekilde daha düşük frekans aralıklarında çalışmaktadır. Genellikle **1–6 kHz** frekans aralığında titreşim üreten bu sistemler, ultrasonik

aktivasyona göre sıvı içerisinde daha düşük kesme gerilimleri (shear stresses) meydana getirmelerine rağmen, fiziksel olarak çok daha yüksek genlikli (amplitüdlü) uç hareketleri üretebilmektedir (Ahmad et al., 1987). Sonik cihazlarda çalışma ucunun (akustik ucun) makroskobik ileri-geri hareket amplitüdünün daha geniş olması, kök kanalı içerisindeki durgun irrigasyon solüsyonunun mekanik olarak dalgalandırılmasına ve yer değiştirmesine majör düzeyde katkı sağlamaktadır.

- **Titreşim Paternleri ve Akış Karakteristiği:** Sonik ve ultrasonik sistemler arasındaki en temel ayırt edici fiziksel farklardan biri cihazların titreşim paternidir (wave pattern). Sonik cihazlarda, elastik aktivasyon ucunun gövdeye bağlantı bölgesine yakın kısmında minimum salınımın gözlemlendiği bir düğüm (node) bölgesi bulunurken; serbest uç kısmında maksimum salınımın ve mekanik enerjinin gerçekleştiği bir karın (antinode) bölgesi konumlanmaktadır (Walmsley et al., 1989). Klinik uygulama esnasında sonik ucun dar kanal duvarları ile temas etmesi sonucu lateral (yanal) salınım hareketlerinin fiziksel olarak kısıtlandığı durumlarda, uca ait titreşim dalgaları büyük ölçüde longitudinal (boylamsal) yönde seyretmeye başlar. Bu boylamsal titreşim modunun, dar anatomik alanlarda yük altında kalındığında dahi yüksek deplasman amplitüdlerini koruyabilmesi sebebiyle, apikal kök kanalı temizliği ve debridman kalitesi açısından klinisyene önemli bir avantaj sağladığı bildirilmiştir (Walmsley et al., 1989).

Tarihsel Süreç ve Karşılaştırmalı Klinik Etkinlik: Sonik aktivasyon protokollerinin kök kanal dezenfeksiyonunda ve smear tabakasının eliminasyonunda oldukça etkili birer klinik yaklaşım olduğu çok sayıda in vitro ve ex vivo çalışma ile desteklenmiştir (Pitt, 2005). Tarihsel süreç incelendiğinde, Tronstad ve arkadaşları 1985 yılında sonik sistemlerin endodontik tedavi mekaniklerindeki klinik kullanımını literatürde ilk kez bildiren araştırmacılar olmuştur (Tronstad et al., 1985). Bu öncü çalışmanın ardından gerçekleştirilen çağdaş araştırmalar; sonik aktivasyon mimarisinin solüsyonların hidrodinamik yıkama etkinliğini belirgin şekilde artırabildiğini ve kök kanal sistemindeki mikroorganizmalar ile dentin talaşlarının uzaklaştırılmasına yüksek düzeyde katkı sağladığını kantitatif olarak ortaya koymuştur (Jensen et al., 1999; Ruddle, 2008; Sabins et al., 2003; Tronstad et al., 1985).

Buna karşılık, literatürde sonik ve ultrasonik aktivasyon sistemlerinin debridman performanslarının doğrudan karşılaştırıldığı çalışmalarda farklı ve çelişkili klinik sonuçlar elde edilmiştir. Örneğin Sabins ve arkadaşları ile Stamos ve meslektaşları tarafından yürütülen mikroskobik serilerde; ultrasonik sistemlerin yüksek frekans güçleri sayesinde kök kanal

duvarlarından sonik sistemlere kıyasla istatistiksel olarak çok daha fazla dentin debris ve organik artık uzaklaştırabildiği rapor edilmiştir(Sabins et al., 2003; Stamos et al., 1987). Bu durum, ultrasonik uçların sıvı içerisinde oluşturduğu akustik akım oluşum hızının ve mikroskobik kavitasyon enerjisinin daha yüksek olmasıyla ilişkilendirilmektedir.

4.3. Ultrasonik Aktivasyon Sistemleri

Ultrasonik enerji, günümüz endodonti pratiğinde kök kanal dezenfeksiyonunu ve irrigasyon aktivasyonunu sağlamak amacıyla dünya çapında en yaygın tercih edilen akustik yöntemlerin başında gelmektedir. Tarihsel gelişim süreci incelendiğinde ultrasonik sistemler, periodontal tedavilerdeki uzun yıllar süren başarılı uygulamaların ardından, ilk kez Richman tarafından 1957 yılında kök kanal debridmanında kullanılmak üzere endodonti literatürüne tanıtılmıştır (Richman, 1957). Daha sonra Martin ve arkadaşlarının öncü çalışmalarıyla geliştirilen ve endodontik tedavi mekaniklerine özel olarak tasarlanan ilk ultrasonik cihazın 1980 yılında ticari kullanıma sunulması, ultrasonik irrigasyon protokollerinin klinik uygulamalarda hızla yaygınlaşmasına ve standartlaşmasına zemin hazırlamıştır (Martin et al., 1980).

- **Fiziksel Parametreler ve Titreşim Karakteristiği:** Bir önceki bölümde ele alınan sonik sistemlerle karşılaştırıldığında ultrasonik cihazlar, fiziksel olarak çok daha yüksek frekanslarda ve buna bağlı olarak daha düşük deplasman amplitüdlerinde (genliklerinde) görev yapmaktadır(Walmsley & Williams, 1989). Endodontik amaçla kullanılan ultrasonik eğeler genellikle **25–30 kHz** gibi oldukça yüksek bir frekans aralığında titreşmekte olup, bu dalga boyu insan işitme sınırının (>20 kHz) tamamen üzerinde (ultrasonik düzeyde) yer almaktadır (Walmsley & Williams, 1989). Ultrasonik aktivasyon seansı sırasında enstrümanın çalışma ucu transvers (enine) yönde salınım sergilemekte ve ege gövdesi boyunca minimum hareket alanlarını temsil eden düğüm (node) noktaları ile maksimum salınımın gerçekleştiği karın (antinode) bölgelerinden oluşan karakteristik bir dalga/titreşim paterni meydana getirmektedir (van der Sluis et al., 2007; Walmsley & Williams, 1989).
- **Akustik Akım ve Kavitasyon Dinamikleri:** Ultrasonik irrigasyon protokollerinin kök kanal sistemindeki yüksek temizleme ve dezenfeksiyon etkinliği, temel olarak solüsyon içerisinde tetiklediği iki majör hidrodinamik fenomene dayanmaktadır: **Akustik akım (acoustic streaming)** ve **kavitasyon (cavitation)** etkileri (Ahmad et al., 1988). Ultrasonik ucun yüksek frekanslı titreşimi sayesinde irrigasyon solüsyonu kanal lümeni

içerisinde son derece dinamik, hızlı ve enerjik bir şekilde hareket etmekte; kanal duvarları boyunca mikroskobik düzeyde güçlü sıvı akımları (girdaplar) oluşmaktadır. Bu fiziksel kuvvetler sayesinde, mekanik şekillendirme enstrümanlarının anatomik kısıtlamalar nedeniyle fiziksel olarak ulaşamadığı ismus, lateral kanal ve apikal düzensizlik gibi kör noktalarda hapsolan inorganik/organik debrislerin ve bakteriyel biyofilmin yerinden sökülerek uzaklaştırılması önemli ölçüde kolaylaşmaktadır.

Klinik Uygulama Yöntemleri ve PUI Kavramı: Endodonti literatüründe ve klinik rutin içerisinde ultrasonik irrigasyon temel olarak iki farklı protokol altında uygulanmaktadır:

1. **Ultrasonik İrrigasyon (Ultrasonic Irrigation - UI):** İrrigasyon solüsyonu deşarjı ile mekanik ultrasonik enstrümantasyonun (kanal şekillendirmenin) aynı anda, eş zamanlı olarak gerçekleştirildiği geleneksel yöntemdir.
2. **Pasif Ultrasonik İrrigasyon (Passive Ultrasonic Irrigation - PUI):** Kök kanal preparasyonunun tamamen tamamlanmasının ardından, kanala iğneyle enjekte edilmiş durağan solüsyonun pürüzsüz bir ultrasonik uç yardımıyla aktive edilmesi esasına dayanan ve günümüz kanıta dayalı endodontisinde çok daha yaygın kabul gören modern yaklaşımdır.

Ultrasonik irrigasyonun literatürdeki ilk dönem klinik uygulamalarında (UI), aktif irrigasyon akışı ile enstrümantasyon işlemleri eş zamanlı olarak yürütülmüştür. Bu kombine tasarımla gerçekleştirilen bazı araştırmalar; ultrasonik irrigasyon sistemleri yardımıyla hazırlanan kök kanallarının, geleneksel paslanmaz çelik el eğeleri ile şekillendirilen kanallara kıyasla çok daha temiz ve artıklardan arınmış kanal duvarları ürettiğini mikroskobik olarak bildirmiştir (Archer et al., 1992; Lee et al., 2004a, 2004b). Ancak endodonti literatüründeki diğer bazı bağımsız araştırmalar, bu mekanik eş zamanlı yöntemin geleneksel yöntemlere karşı her senaryoda mutlak ve belirgin bir üstünlük sağlayamadığını da rapor etmiştir.

4.2.4. Lazer Aracılı İrrigasyon Aktivasyon Teknolojileri (LAI)

Endodontik irrigasyon aktivasyonunda fiziksel kısıtlamaları ve apikal "vapor lock" bariyerini aşmak amacıyla geliştirilen en güncel ve teknolojik yaklaşımlardan biri de lazer aracılı irrigasyon (Laser-Activated Irrigation - LAI) sistemleridir. Bu alanda özellikle **Er:YAG lazer teknolojisi**—ve bu teknolojinin alt modifikasyonları olan foton destekli fotoakustik akım (**PIPS** - photon-induced photoacoustic streaming) ile şok dalgası destekli emisyon fotoakustik

akım (**SWEEPS** - shock wave-enhanced emission photoacoustic streaming) sistemleri—kök kanal dezenfeksiyonunda geleneksel yöntemlere kıyasla tutarlı bir şekilde üstün klinik başarı göstermektedir. Yapılan çalışmalar, Er:YAG lazer aktivasyonunun kök kanal sisteminde **%91.03'e varan oranlarda** bakteriyel azalma sağladığını ve karmaşık anatomik bölgelerdeki inatçı biyofilmleri etkili bir şekilde elimine edebildiğini ortaya koymaktadır (Afkhami et al., 2021; Bao et al., 2024).

- **Debridman Kalitesi ve Sealer Penetrasyonu:** Literatürdeki mikroskopik veriler, Er:YAG lazer aktivasyon teknolojisinin kök kanallarından enstrümantasyon talaşlarını (debris) ve smear tabakasını uzaklaştırmada çok daha gelişmiş bir performans sergilediğini doğrulamaktadır (Deleu et al., 2015). Ayrıca, Er:YAG lazer aktivasyonu kullanılarak gerçekleştirilen irrigasyon protokollerinin, Nd:YAG lazer sistemlerine kıyasla kök kanal patlarının (sealer) dentin tübüllerinin derinliklerine penetre olmasını çok daha etkili bir şekilde kolaylaştırdığı gösterilmiştir (Ozbay & Erdemir, 2018).
- **Hidrodinamik Şok Dalgası Etkisi ve Konsantrasyon İnkilemi:** LAI-PIPS teknolojisi, sıvı içerisinde geleneksel şırınga irrigasyonuna ve hatta pasif ultrasonik aktivasyona (PUI) kıyasla çok daha güçlü, patlama benzeri **biyofiziksel şok dalgaları** (shockwave-like effects) üreterek sıvı hidrodinamiğini maksimize etmektedir (Liu et al., 2023). Bu yüksek fiziksel enerji sayesinde, sodyum hipoklorit (NaOCl) gibi agresif dezenfektanlar SWEEPS teknolojisi ile aktive edildiğinde, solüsyonun **düşük konsantrasyonlarda kullanıldığı klinik senaryolarda dahi** antimikrobiyal dezenfeksiyon etkinliğinin korunabildiği saptanmıştır (Lei et al., 2022). Nitekim, düşük konsantrasyonlu NaOCl içeren PIPS protokollerinin, bakteriyel eliminasyonu sağlama ve genel klinik çıktıları iyileştirme konusunda konvansiyonel iğneli irrigasyon yöntemlerini geride bıraktığı bildirilmiştir (Zhao et al., 2024).

Klinik Avantajlar ve Rejeneratif Endodontiye Katkıları: PIPS uygulamalarının klinik başarılarının yanı sıra, tedavi sonrasında hastada gelişen post-operatif ağrı ve rahatsızlık (post-operative discomfort) hissini belirgin şekilde azalttığı (Mandras et al., 2020) ve primer süt dişlerinde *Enterococcus faecalis* varlığını tamamen (%100) ortadan kaldırabildiği kanıtlanmıştır (Yavagal et al., 2021). Er:YAG lazer sistemleri, spesifik irrigasyon protokolleriyle kombine edildiğinde olgunlaşmış matür biyofilm yapılarını tamamen parçalamakta (Neelakantan et al., 2015), smear tabakasını elimine ederken dentin tübüllerini açık hale getirmekte ve MTAD gibi geleneksel şelatör karışımların aksine, kök kanalı

içerisindeki **kök hücrelerin (stem cells) dentin duvarına yapışma (adezyon) kabiliyetini** artırarak rejeneratif tedavilere zemin hazırlamaktadır (Rahmati et al., 2022).

Er:YAG lazer sistemlerinin debridman verimliliği, klinikte uygulanan endodontik giriş kavitesinin tasarımından bağımsız olarak yüksek kalmaktadır. Literatür bulguları; sistemin ister minimal invaziv (bkzn: ninja / ultra-konservatif erişim) ister konvansiyonel standart giriş kaviteleriyle çalışılsın, kök kanalının tüm kesitlerinde (koronal, orta ve apikal) herhangi bir yapısal dentin hasarına yol açmaksızın derinlemesine ve homojen bir temizlik sağladığını göstermektedir (Todea DCM, 2018). Ayrıca, antimikrobiyal etkinliği en üst seviyeye çıkarmak adına Er:YAG lazer teknolojisinin **fotodinamik terapi (PDT)** ile kombine edildiği multimodal protokollerde, kök kanal içi mikrobiyal yükte **%99.97 oranında** radikal bir bakteriyel azalma elde edildiği rapor edilmiştir (Yang & Chen, 2024).

6. SONUÇ VE GELECEK PERSPEKTİFLERİ

Endodontik tedavilerin biyolojik ve klinik başarısı, kök kanal sisteminin mikrobiyal patojenlerden, organik doku artıklarından ve inorganik smear tabakasından tamamen arındırılmasına bağlıdır. Tarihsel süreçten günümüze enstrümantasyon metalurjisinde yaşanan devrimsel gelişmelere rağmen, yüksek çözünürlüklü mikro-BT verilerinin de açıkça ortaya koyduğu üzere, mekanik şekillendirme tek başına karmaşık kanal anatomisinin ancak sınırlı bir kısmına fiziksel olarak temas edebilmektedir. Bu yapısal kısıtlama, aktif kimyasal irrigasyon solüsyonlarının endodontik tedavinin vazgeçilmez ve tamamlayıcı bir ana aktörü olduğu gerçeğini sarsılmaz bir klinik doktrin haline getirmiştir.

Ancak geleneksel pozitif basınçlı şırınga irrigasyonunun dar apikal alanlardaki mekanik yetersizliği, sıvının yüzey gerilimi engelleri ve ucu kapalı bir mikrokanal tasarımı içerisinde hapsolarak dezenfeksiyona bariyer oluşturan "Vapor Lock" (hava kilidi) fenomeni, klinisyenleri daha gelişmiş arayışlara sevk etmiştir. Bu hidrodinamik sınırlılıkları aşmak adına literatüre kazandırılan manuel dinamik ajitasyon (MDA), sonik, pasif ultrasonik (PUI) ve foton/şok dalgası destekli lazer aracılı irrigasyon (LAI-PIPS/SWEEPS) teknolojileri, irrigasyon solüsyonlarının temizleme ve doku çözme performansını maksimize ederek endodontide yeni bir çağ başlatmıştır. Bu sistemler sayesinde, dar kök kanallarında ve lateral anatomik uzantılarda dahi yüksek düzeyde debridman kalitesi elde etmek ve hatta daha düşük konsantrasyonlu dezenfektanlarla dahi derinlemesine mikrobiyal eliminasyon sağlamak mümkün hale gelmiştir.

Günümüz kanıta dayalı diş hekimliği paradigmasında, endodontik irrigasyon ve aktivasyon alanında her geçen gün artan sistematik derleme ve meta-analiz çeşitliliği, beraberinde klinisyenlerin günlük rutinlerinde karar verme süreçlerini zorlaştıran tutarsız veya çelişkili bulguları da getirmiştir. İşte bu noktada, literatürdeki bilgi kirliliğini ve karmaşayı süzerek mevcut en yüksek kanıt düzeyini betimsel bir analizle sentezleyen "Şemsiye İncelemeler" (Umbrella Reviews), klinisyenler için en güvenilir rehber konumundadır. Bu kitap bölümünde sunulan kanıta dayalı veriler ve klinik öneriler, karmaşık cihaz parametreleri ile üretici talimatlarının ötesine geçerek, öngörülebilir ve standardize irrigasyon protokollerinin oluşturulmasına katkı sağlamayı amaçlamaktadır.

Gelecek Perspektifleri: Geleceğin endodonti pratiğinde irrigasyon sistemlerinin gelişimi; sadece mikrobiyal yükü azaltmaya değil, aynı zamanda kök kanalcı içerisindeki biyolojik doku dostu dengeleri korumaya ve rejeneratif endodontik tedavileri desteklemeye odaklanacaktır. Lazer ve ultrasonik enerji gibi fiziksel aktivasyon yöntemlerinin, dentin duvarındaki kök hücre yapışmasını artıran spesifik irrigan kombinasyonları ile entegrasyonu, pulpa-dentin kompleksinin yeniden canlandırılması süreçlerinde kritik bir rol oynayacaktır. Gelecek çalışmaların, hem ucu kapalı in vitro gerçekçi anatomik modelleri hem de uzun dönemli klinik takipleri içeren çok merkezli randomize kontrollü seriler üzerinden bu ileri aktivasyon sistemlerinin standardizasyon kılavuzlarını kesinleştirmesi beklenmektedir.

KAYNAKÇA

- Afkhami, F., Ahmadi, P., Chiniforush, N., & Sooratgar, A. (2021). Effect of different activations of silver nanoparticle irrigants on the elimination of *Enterococcus faecalis*. *Clinical Oral Investigations*, 25(12), 6893-6899. <https://doi.org/10.1007/s00784-021-03979-5>
- Ahmad, M., Pitt Ford, T. R., & Crum, L. A. (1987). Ultrasonic debridement of root canals: an insight into the mechanisms involved. *J Endod*, 13(3), 93-101. [https://doi.org/10.1016/s0099-2399\(87\)80173-5](https://doi.org/10.1016/s0099-2399(87)80173-5)
- Ahmad, M., Pitt Ford, T. R., Crum, L. A., & Walton, A. J. (1988). Ultrasonic debridement of root canals: acoustic cavitation and its relevance. *J Endod*, 14(10), 486-493. [https://doi.org/10.1016/s0099-2399\(88\)80105-5](https://doi.org/10.1016/s0099-2399(88)80105-5)
- Al-Hadlaq, S. M., Al-Turaiki, S. A., Al-Sulami, U., & Saad, A. Y. (2006). Efficacy of a new brush-covered irrigation needle in removing root canal debris: a scanning electron microscopic study. *J Endod*, 32(12), 1181-1184. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2006.07.019>
- Archer, R., Reader, A., Nist, R., Beck, M., & Meyers, W. J. (1992). An in vivo evaluation of the efficacy of ultrasound after step-back preparation in mandibular molars. *J Endod*, 18(11), 549-552. [https://doi.org/10.1016/s0099-2399\(06\)81212-4](https://doi.org/10.1016/s0099-2399(06)81212-4)
- Arias-Moliz, M. T., Ferrer-Luque, C. M., Espigares-García, M., & Baca, P. (2009). *Enterococcus faecalis* biofilms eradication by root canal irrigants. *J Endod*, 35(5), 711-714. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2009.01.018>
- Aromataris, E., Fernandez, R., Godfrey, C. M., Holly, C., Khalil, H., & Tungpunkom, P. (2015). Summarizing systematic reviews: methodological development, conduct and reporting of an umbrella review approach. *JBIM Evidence Implementation*, 13(3), 132-140.
- Bao, P., Liu, H., Yang, L., Zhang, L., Yang, L., Xiao, N., Shen, J., Deng, J., & Shen, Y. (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. <https://doi.org/10.1186/s12903-024-04042-x>
- Boutsioukis, C. (2018). Internal tooth anatomy and root canal irrigation. In *The root canal anatomy in permanent dentition* (pp. 303-321). Springer.
- Boutsioukis, C., & Arias-Moliz, M. T. (2022). Present status and future directions - irrigants and irrigation methods. *Int Endod J*, 55 Suppl 3(Suppl 3), 588-612. <https://doi.org/10.1111/iej.13739>
- Boutsioukis, C., Lambrianidis, T., & Kastrinakis, E. (2009). Irrigant flow within a prepared root canal using various flow rates: a Computational Fluid Dynamics study. *Int Endod J*, 42(2), 144-155. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2591.2008.01503.x>
- Bramante, C. M., Berbert, A., & Borges, R. P. (1987). A methodology for evaluation of root canal instrumentation. *J Endod*, 13(5), 243-245. [https://doi.org/10.1016/s0099-2399\(87\)80099-7](https://doi.org/10.1016/s0099-2399(87)80099-7)
- Busanello, F. H., Petridis, X., So, M. V. R., Dijkstra, R. J. B., Sharma, P. K., & van der Sluis, L. W. M. (2019). Chemical biofilm removal capacity of endodontic irrigants as a function of biofilm structure: optical coherence tomography, confocal microscopy and viscoelasticity determination as integrated assessment tools. *Int Endod J*, 52(4), 461-474. <https://doi.org/10.1111/iej.13027>
- Caron, G. (2007). *Cleaning efficiency of the apical millimeters of curved canals using three different modalities of irrigant activation: an SEM study* [Master's thesis, Paris VII University]. Paris, France.

- Cobankara, F. K., Ozkan, H. B., & Terlemez, A. (2010). Comparison of organic tissue dissolution capacities of sodium hypochlorite and chlorine dioxide. *J Endod*, 36(2), 272-274. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2009.10.027>
- D'Arcangelo, C., Varvara, G., & De Fazio, P. (1999). An evaluation of the action of different root canal irrigants on facultative aerobic-anaerobic, obligate anaerobic, and microaerophilic bacteria. *J Endod*, 25(5), 351-353. [https://doi.org/10.1016/s0099-2399\(06\)81170-2](https://doi.org/10.1016/s0099-2399(06)81170-2)
- de Gregorio, C., Estevez, R., Cisneros, R., Heilborn, C., & Cohenca, N. (2009). Effect of EDTA, sonic, and ultrasonic activation on the penetration of sodium hypochlorite into simulated lateral canals: an in vitro study. *J Endod*, 35(6), 891-895. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2009.03.015>
- De-Deus, G., Zehnder, M., Reis, C., Fidel, S., Fidel, R. A., Galan, J., Jr., & Paciornik, S. (2008). Longitudinal co-site optical microscopy study on the chelating ability of etidronate and EDTA using a comparative single-tooth model. *J Endod*, 34(1), 71-75. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2007.09.020>
- Delany, G. M., Patterson, S. S., Miller, C. H., & Newton, C. W. (1982). The effect of chlorhexidine gluconate irrigation on the root canal flora of freshly extracted necrotic teeth. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol*, 53(5), 518-523. [https://doi.org/10.1016/0030-4220\(82\)90469-8](https://doi.org/10.1016/0030-4220(82)90469-8)
- Deleu, E., Meire, M. A., & De Moor, R. J. G. (2015). Efficacy of laser-based irrigant activation methods in removing debris from simulated root canal irregularities. *Lasers in Medical Science*, 30(2), 831-835. <https://doi.org/10.1007/s10103-013-1442-y>
- Du, T., Wang, Z., Shen, Y., Ma, J., Cao, Y., & Haapasalo, M. (2014). Effect of long-term exposure to endodontic disinfecting solutions on young and old *Enterococcus faecalis* biofilms in dentin canals. *Journal of endodontics*, 40(4), 509-514.
- Fukumoto, Y., Kikuchi, I., Yoshioka, T., Kobayashi, C., & Suda, H. (2006). An ex vivo evaluation of a new root canal irrigation technique with intracanal aspiration. *Int Endod J*, 39(2), 93-99. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2591.2006.01050.x>
- Gao, Y., Haapasalo, M., Shen, Y., Wu, H., Li, B., Ruse, N. D., & Zhou, X. (2009). Development and validation of a three-dimensional computational fluid dynamics model of root canal irrigation. *J Endod*, 35(9), 1282-1287. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2009.06.018>
- George, S., Kishen, A., & Song, K. P. (2005). The role of environmental changes on monospecies biofilm formation on root canal wall by *Enterococcus faecalis*. *J Endod*, 31(12), 867-872. <https://doi.org/10.1097/01.don.0000164855.98346.fc>
- Grawehr, M., Sener, B., Waltimo, T., & Zehnder, M. (2003). Interactions of ethylenediamine tetraacetic acid with sodium hypochlorite in aqueous solutions. *Int Endod J*, 36(6), 411-417. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2591.2003.00670.x>
- Gu, L. S., Kim, J. R., Ling, J., Choi, K. K., Pashley, D. H., & Tay, F. R. (2009). Review of contemporary irrigant agitation techniques and devices. *J Endod*, 35(6), 791-804. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2009.03.010>
- Gutarts, R., Nusstein, J., Reader, A., & Beck, M. (2005). In vivo debridement efficacy of ultrasonic irrigation following hand-rotary instrumentation in human mandibular molars. *J Endod*, 31(3), 166-170. <https://doi.org/10.1097/01.don.0000137651.01496.48>
- Hariharan, V. S., Nandlal, B., & Srilatha, K. T. (2010). Efficacy of various root canal irrigants on removal of smear layer in the primary root canals after hand instrumentation: a scanning electron microscopy study. *J Indian Soc Pedod Prev Dent*, 28(4), 271-277. <https://doi.org/10.4103/0970-4388.76157>

- Hauser, V., Braun, A., & Frentzen, M. (2007). Penetration depth of a dye marker into dentine using a novel hydrodynamic system (RinsEndo). *Int Endod J*, 40(8), 644-652. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2591.2007.01264.x>
- Heling, I., Steinberg, D., Kenig, S., Gavrilovich, I., Sela, M. N., & Friedman, M. (1992). Efficacy of a sustained-release device containing chlorhexidine and Ca(OH)₂ in preventing secondary infection of dentinal tubules. *Int Endod J*, 25(1), 20-24. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2591.1992.tb00944.x>
- Hottel, T. L., el-Refai, N. Y., & Jones, J. J. (1999). A comparison of the effects of three chelating agents on the root canals of extracted human teeth. *J Endod*, 25(11), 716-717. [https://doi.org/10.1016/s0099-2399\(99\)80115-0](https://doi.org/10.1016/s0099-2399(99)80115-0)
- Hsieh, Y. D., Gau, C. H., Kung Wu, S. F., Shen, E. C., Hsu, P. W., & Fu, E. (2007). Dynamic recording of irrigating fluid distribution in root canals using thermal image analysis. *Int Endod J*, 40(1), 11-17. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2591.2006.01168.x>
- Huang, T. Y., Gulabivala, K., & Ng, Y. L. (2008). A bio-molecular film ex-vivo model to evaluate the influence of canal dimensions and irrigation variables on the efficacy of irrigation. *Int Endod J*, 41(1), 60-71. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2591.2007.01317.x>
- Huffaker, S. K., Safavi, K., Spangberg, L. S., & Kaufman, B. (2010). Influence of a passive sonic irrigation system on the elimination of bacteria from root canal systems: a clinical study. *Journal of endodontics*, 36(8), 1315-1318.
- Jensen, S. A., Walker, T. L., Hutter, J. W., & Nicoll, B. K. (1999). Comparison of the cleaning efficacy of passive sonic activation and passive ultrasonic activation after hand instrumentation in molar root canals. *J Endod*, 25(11), 735-738. [https://doi.org/10.1016/s0099-2399\(99\)80120-4](https://doi.org/10.1016/s0099-2399(99)80120-4)
- Jungbluth, H., Marending, M., De-Deus, G., Sener, B., & Zehnder, M. (2011). Stabilizing sodium hypochlorite at high pH: effects on soft tissue and dentin. *J Endod*, 37(5), 693-696. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2011.02.019>
- Kahn, F. H., Rosenberg, P. A., & Gliksberg, J. (1995). An in vitro evaluation of the irrigating characteristics of ultrasonic and subsonic handpieces and irrigating needles and probes. *J Endod*, 21(5), 277-280. [https://doi.org/10.1016/s0099-2399\(06\)80998-2](https://doi.org/10.1016/s0099-2399(06)80998-2)
- Kasić, S., Knezović, M., Beader, N., Gabrić, D., Malčić, A. I., & Baraba, A. (2017). Efficacy of Three Different Lasers on Eradication of Enterococcus faecalis and Candida albicans Biofilms in Root Canal System. *Photomed Laser Surg*, 35(7), 372-377. <https://doi.org/10.1089/pho.2016.4258>
- Keir, D. M., Senia, E. S., & Montgomery, S. (1990). Effectiveness of a brush in removing postinstrumentation canal debris. *J Endod*, 16(7), 323-327. [https://doi.org/10.1016/s0099-2399\(06\)81942-4](https://doi.org/10.1016/s0099-2399(06)81942-4)
- Lee, S. J., Wu, M. K., & Wesselink, P. R. (2004a). The effectiveness of syringe irrigation and ultrasonics to remove debris from simulated irregularities within prepared root canal walls. *Int Endod J*, 37(10), 672-678. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2591.2004.00848.x>
- Lee, S. J., Wu, M. K., & Wesselink, P. R. (2004b). The efficacy of ultrasonic irrigation to remove artificially placed dentine debris from different-sized simulated plastic root canals. *Int Endod J*, 37(9), 607-612. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2591.2004.00857.x>
- Lei, L., Wang, F., Wang, Y., Li, Y., & Huang, X. (2022). Laser activated irrigation with SWEEPS modality reduces concentration of sodium hypochlorite in root canal irrigation. *Photodiagnosis and Photodynamic Therapy*, 39, 102873. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.pdpdt.2022.102873>
- Liolios, E., Economides, N., Parissis-Messimeris, S., & Boutsoukis, A. (1997). The effectiveness of three irrigating solutions on root canal cleaning after hand and

- mechanical preparation. *Int Endod J*, 30(1), 51-57. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2591.1997.tb01098.x>
- Liu, J., Watanabe, S., Mochizuki, S., Kouno, A., & Okiji, T. (2023). Comparison of vapor bubble kinetics and cleaning efficacy of different root canal irrigation techniques in the apical area beyond the fractured instrument. *Journal of Dental Sciences*, 18(3), 1141-1147. <https://doi.org/10.1016/j.jds.2022.10.032>
- Machado-Silveiro, L. F., González-López, S., & González-Rodríguez, M. P. (2004). Decalcification of root canal dentine by citric acid, EDTA and sodium citrate. *Int Endod J*, 37(6), 365-369. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2591.2004.00813.x>
- Mandras, N., Pasqualini, D., Roana, J., Tullio, V., Banche, G., Gianello, E., Bonino, F., Cuffini, A. M., Berutti, E., & Alovise, M. (2020). Influence of Photon-Induced Photoacoustic Streaming (PIPS) on Root Canal Disinfection and Post-Operative Pain: A Randomized Clinical Trial. *Journal of Clinical Medicine*, 9(12), 3915. <https://www.mdpi.com/2077-0383/9/12/3915>
- Martin, H., Cunningham, W. T., Norris, J. P., & Cotton, W. R. (1980). Ultrasonic versus hand filing of dentin: a quantitative study. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol*, 49(1), 79-81. [https://doi.org/10.1016/0030-4220\(80\)90034-1](https://doi.org/10.1016/0030-4220(80)90034-1)
- McGill, S., Gulabivala, K., Mordan, N., & Ng, Y. L. (2008a). The efficacy of dynamic irrigation using a commercially available system (RinsEndo) determined by removal of a collagen 'bio-molecular film' from an ex vivo model. *Int Endod J*, 41(7), 602-608. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2591.2008.01408.x>
- McGill, S., Gulabivala, K., Mordan, N., & Ng, Y. L. (2008b). The efficacy of dynamic irrigation using a commercially available system (RinsEndo®) determined by removal of a collagen 'bio-molecular film' from an ex vivo model. *International Endodontic Journal*, 41, 602-608. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2591.2008.01408.x>
- Migoun, N. P., & Azouni, M. A. (1996). Filling of One-Side-Closed Capillaries Immersed in Liquids. *Journal of Colloid and Interface Science*, 181(1), 337-340. <https://doi.org/10.1006/jcis.1996.0387>
- Migun, N., & Shnip, A. (2002). Model of Film Flow in a Dead-End Conic Capillary. *Journal of Engineering Physics*, 75, 1422-1428. <https://doi.org/10.1023/A:1022135514496>
- Mohammadi, Z. (2008). Sodium hypochlorite in endodontics: an update review. *Int Dent J*, 58(6), 329-341. <https://doi.org/10.1111/j.1875-595x.2008.tb00354.x>
- Molander, A., Reit, C., & Dahlén, G. (1999). The antimicrobial effect of calcium hydroxide in root canals pretreated with 5% iodine potassium iodide. *Endod Dent Traumatol*, 15(5), 205-209. <https://doi.org/10.1111/j.1600-9657.1999.tb00775.x>
- Moser, J. B., & Heuer, M. A. (1982). Forces and efficacy in endodontic irrigation systems. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol*, 53(4), 425-428. [https://doi.org/10.1016/0030-4220\(82\)90446-7](https://doi.org/10.1016/0030-4220(82)90446-7)
- Nair, P. N. (2004). Pathogenesis of apical periodontitis and the causes of endodontic failures. *Crit Rev Oral Biol Med*, 15(6), 348-381. <https://doi.org/10.1177/154411130401500604>
- Nair, P. N., Henry, S., Cano, V., & Vera, J. (2005). Microbial status of apical root canal system of human mandibular first molars with primary apical periodontitis after "one-visit" endodontic treatment. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod*, 99(2), 231-252. <https://doi.org/10.1016/j.tripleo.2004.10.005>
- Neelakantan, P., Cheng, C. Q., Mohanraj, R., Sriraman, P., Subbarao, C., & Sharma, S. (2015). Antibiofilm activity of three irrigation protocols activated by ultrasonic, diode laser or Er:YAG laser in vitro. *Int Endod J*, 48(6), 602-610. <https://doi.org/10.1111/iej.12354>

- Nielsen, B. A., & Craig Baumgartner, J. (2007). Comparison of the EndoVac system to needle irrigation of root canals. *J Endod*, 33(5), 611-615.
<https://doi.org/10.1016/j.joen.2007.01.020>
- Onçağ, O., Hoşgör, M., Hilmioğlu, S., Zekioğlu, O., Eronat, C., & Burhanoğlu, D. (2003). Comparison of antibacterial and toxic effects of various root canal irrigants. *Int Endod J*, 36(6), 423-432. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2591.2003.00673.x>
- Ozbay, Y., & Erdemir, A. (2018). Effect of several laser systems on removal of smear layer with a variety of irrigation solutions. *Microscopy Research and Technique*, 81(10), 1214-1222. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/jemt.23122>
- Pesse, A. V., Warriar, G. R., & Dhir, V. K. (2005). An experimental study of the gas entrapment process in closed-end microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48(25), 5150-5165.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2005.07.020>
- Peters, O. A. (2004). Current challenges and concepts in the preparation of root canal systems: a review. *J Endod*, 30(8), 559-567.
<https://doi.org/10.1097/01.don.0000129039.59003.9d>
- Peters, O. A., Laib, A., Rügsegger, P., & Barbakow, F. (2000). Three-dimensional analysis of root canal geometry by high-resolution computed tomography. *J Dent Res*, 79(6), 1405-1409. <https://doi.org/10.1177/00220345000790060901>
- 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), 221-230.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1046/j.1365-2591.2001.00373.x>
- Petridis, X., Busanello, F. H., So, M. V., Dijkstra, R. J., Sharma, P. K., & van der Sluis, L. W. (2019). Factors affecting the chemical efficacy of 2% sodium hypochlorite against oral steady-state dual-species biofilms: exposure time and volume application. *International Endodontic Journal*, 52(8), 1182-1195.
- Petridis, X., Busanello, F. H., So, M. V. R., Dijkstra, R. J. B., Sharma, P. K., & van der Sluis, L. W. M. (2019). Factors affecting the chemical efficacy of 2% sodium hypochlorite against oral steady-state dual-species biofilms: Exposure time and volume application. *Int Endod J*, 52(8), 1182-1195. <https://doi.org/10.1111/iej.13102>
- Pitt, W. G. (2005). Removal of oral biofilm by sonic phenomena. *Am J Dent*, 18(5), 345-352.
- Poppolo Deus, F., & Ouanounou, A. (2022). Chlorhexidine in Dentistry: Pharmacology, Uses, and Adverse Effects. *Int Dent J*, 72(3), 269-277.
<https://doi.org/10.1016/j.identj.2022.01.005>
- Portenier, I., Lutz, F., & Barbakow, F. (1998). Preparation of the apical part of the root canal by the Lightspeed and step-back techniques. *Int Endod J*, 31(2), 103-111.
<https://doi.org/10.1046/j.1365-2591.1998.00116.x>
- Rahmati, A., Karkehabadi, H., Rostami, G., Karami, M., Najafi, R., & Rezaei-Soufi, L. (2022). Comparative effects of Er:YAG laser, and EDTA, MTAD, and QMix irrigants on adhesion of stem cells from the apical papilla to dentin: A scanning electron microscopic study. *J Clin Exp Dent*, 14(4), e310-e315.
<https://doi.org/10.4317/jced.59129>
- Ram, Z. (1977). Effectiveness of root canal irrigation. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol*, 44(2), 306-312. [https://doi.org/10.1016/0030-4220\(77\)90285-7](https://doi.org/10.1016/0030-4220(77)90285-7)
- Richman, R. J. (1957). The use of ultrasonics in root canal therapy and root resection. *Med Dent J*, 12, 12-18.
- Ruddle, C. J. (2001). *Microbrush for endodontic use* (United States Patent No.
- Ruddle, C. J. (2008). Endodontic disinfection-Tsunami irrigation. *Endod Pract*, 2, 1-10.

- Sabins, R. A., Johnson, J. D., & Hellstein, J. W. (2003). A comparison of the cleaning efficacy of short-term sonic and ultrasonic passive irrigation after hand instrumentation in molar root canals. *J Endod*, 29(10), 674-678.
<https://doi.org/10.1097/00004770-200310000-00016>
- Schilder, H. (1974). Cleaning and shaping the root canal. *Dent Clin North Am*, 18(2), 269-296.
- Schoeffel, G. J. (2008). The EndoVac method of endodontic irrigation, part 2--efficacy. *Dent Today*, 27(1), 82, 84, 86-87.
- Sedgley, C. (2004). Root canal irrigation--a historical perspective. *J Hist Dent*, 52(2), 61-65.
- Sedgley, C. M., Nagel, A. C., Hall, D., & Applegate, B. (2005). Influence of irrigant needle depth in removing bioluminescent bacteria inoculated into instrumented root canals using real-time imaging in vitro. *Int Endod J*, 38(2), 97-104.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2591.2004.00906.x>
- Senia, E. S., Marshall, F. J., & Rosen, S. (1971). The solvent action of sodium hypochlorite on pulp tissue of extracted teeth. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology*, 31(1), 96-103. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0030-4220\(71\)90040-5](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0030-4220(71)90040-5)
- Setlock, J., Fayad, M. I., BeGole, E., & Bruzick, M. (2003). Evaluation of canal cleanliness and smear layer removal after the use of the Quantec-E irrigation system and syringe: a comparative scanning electron microscope study. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod*, 96(5), 614-617. [https://doi.org/10.1016/s1079-2104\(03\)00302-0](https://doi.org/10.1016/s1079-2104(03)00302-0)
- Shabahang, S., & Torabinejad, M. (2003). Effect of MTAD on Enterococcus faecalis-contaminated root canals of extracted human teeth. *J Endod*, 29(9), 576-579.
<https://doi.org/10.1097/00004770-200309000-00008>
- Shiozawa, A. (2000). Characterization of reactive oxygen species generated from the mixture of NaClO and H₂O₂ used as root canal irrigants. *J Endod*, 26(1), 11-15.
<https://doi.org/10.1097/00004770-200001000-00003>
- Stamos, D. E., Sadeghi, E. M., Haasch, G. C., & Gerstein, H. (1987). An in vitro comparison study to quantitate the debridement ability of hand, sonic, and ultrasonic instrumentation. *J Endod*, 13(9), 434-440. [https://doi.org/10.1016/s0099-2399\(87\)80061-4](https://doi.org/10.1016/s0099-2399(87)80061-4)
- Tay, F. R., Gutmann, J. L., & Pashley, D. H. (2007). Microporous, demineralized collagen matrices in intact radicular dentin created by commonly used calcium-depleting endodontic irrigants. *J Endod*, 33(9), 1086-1090.
<https://doi.org/10.1016/j.joen.2007.04.017>
- Thompson, S. A., & Dummer, P. M. (1997). Shaping ability of Lightspeed rotary nickel-titanium instruments in simulated root canals. Part 2. *J Endod*, 23(12), 742-747.
[https://doi.org/10.1016/s0099-2399\(97\)80347-0](https://doi.org/10.1016/s0099-2399(97)80347-0)
- Todea DCM, L. R., Bălăbuc CA, Miron MI, Locovei C, Mocuța DE. (2018). Scanning electron microscopy evaluation of the root canal morphology after Er:YAG laser irradiation. *Romanian Journal of Morphology and Embryology*, 59, 269-275.
- Townsend, C., & Maki, J. (2009). An in vitro comparison of new irrigation and agitation techniques to ultrasonic agitation in removing bacteria from a simulated root canal. *J Endod*, 35(7), 1040-1043. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2009.04.007>
- Tronstad, L., Barnett, F., Schwartzben, L., & Frasca, P. (1985). Effectiveness and safety of a sonic vibratory endodontic instrument. *Endod Dent Traumatol*, 1(2), 69-76.
<https://doi.org/10.1111/j.1600-9657.1985.tb00564.x>
- Usman, N., Baumgartner, J. C., & Marshall, J. G. (2004). Influence of instrument size on root canal debridement. *J Endod*, 30(2), 110-112. <https://doi.org/10.1097/00004770-200402000-00012>

- van der Sluis, L. W., Gambarini, G., Wu, M. K., & Wesselink, P. R. (2006). The influence of volume, type of irrigant and flushing method on removing artificially placed dentine debris from the apical root canal during passive ultrasonic irrigation. *Int Endod J*, 39(6), 472-476. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2591.2006.01108.x>
- van der Sluis, L. W., Versluis, M., Wu, M. K., & Wesselink, P. R. (2007). Passive ultrasonic irrigation of the root canal: a review of the literature. *Int Endod J*, 40(6), 415-426. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2591.2007.01243.x>
- Walmsley, A. D., Lumley, P. J., & Laird, W. R. (1989). Oscillatory pattern of sonically powered endodontic files. *Int Endod J*, 22(3), 125-132. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2591.1989.tb00910.x>
- Walmsley, A. D., & Williams, A. R. (1989). Effects of constraint on the oscillatory pattern of endosonic files. *J Endod*, 15(5), 189-194. [https://doi.org/10.1016/s0099-2399\(89\)80233-x](https://doi.org/10.1016/s0099-2399(89)80233-x)
- Walters, M. J., Baumgartner, J. C., & Marshall, J. G. (2002). Efficacy of Irrigation with Rotary Instrumentation. *Journal of Endodontics*, 28(12), 837-839. <https://doi.org/https://doi.org/10.1097/00004770-200212000-00011>
- Wang, Z., Shen, Y., & Haapasalo, M. (2020). Dynamics of Dissolution, Killing, and Inhibition of Dental Plaque Biofilm [Original Research]. *Frontiers in Microbiology*, Volume 11 - 2020. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.00964>
- Weise, M., Roggendorf, M., Ebert, J., Petschelt, A., & Frankenberger, R. (2007). Four methods for cleaning simulated lateral extensions of curved root canals: A SEM evaluation. *Int Endod J*, 40, 991-992.
- White, R. R., Hays, G. L., & Janer, L. R. (1997). Residual antimicrobial activity after canal irrigation with chlorhexidine. *J Endod*, 23(4), 229-231. [https://doi.org/10.1016/s0099-2399\(97\)80052-0](https://doi.org/10.1016/s0099-2399(97)80052-0)
- Wu, M. K., & Wesselink, P. R. (2001). A primary observation on the preparation and obturation of oval canals. *Int Endod J*, 34(2), 137-141. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2591.2001.00361.x>
- Yang, G., & Chen, W. (2024). In vitro effects of Er: YAG laser-activated photodynamic therapy on Enterococcus faecalis in root canal treatment. *Photodiagnosis and Photodynamic Therapy*, 45, 103992. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.pdpdt.2024.103992>
- Yavagal, C. M., Patil, V. C., Yavagal, P. C., Kumar, N. K., Hariharan, M., & Mangalekar, S. B. (2021). Efficacy of Laser Photoacoustic Streaming in Paediatric Root Canal Disinfection - An Ex-Vivo Study. *Contemporary Clinical Dentistry*, 12(1). https://journals.lww.com/cocd/fulltext/2021/12010/efficacy_of_laser_photoacoustic_streaming_in.9.aspx
- Zehnder, M. (2006). Root canal irrigants. *J Endod*, 32(5), 389-398. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2005.09.014>
- Zhao, J., Wu, S., Huang, Y., Zhao, Y., Liu, H., Jiang, Q., Shen, Y., & Chen, M. (2024). Comparison of the effectiveness of conventional needle irrigation and photon-induced photoacoustic streaming with sodium hypochlorite in the treatment of teeth with apical periodontitis: a randomized clinical trial. *BMC Oral Health*, 24(1), 293. <https://doi.org/10.1186/s12903-024-04055-6>
- Zhu, W. C., Gyamfi, J., Niu, L. N., Schoeffel, G. J., Liu, S. Y., Santarcangelo, F., Khan, S., Tay, K. C., Pashley, D. H., & Tay, F. R. (2013). Anatomy of sodium hypochlorite accidents involving facial ecchymosis - a review. *J Dent*, 41(11), 935-948. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2013.08.012>

BÖLÜM 4

**ELEKTRONİK APEKS BULUCULAR:
TEMEL PRENSİPLER, GÜNCEL
TEKNOLOJİLER VE KLİNİK
UYGULAMALAR**

GİRİŞ VE TARİHSEL GELİŞİM

Kök kanal tedavisinin başarısı, özellikle anatomik sınırlar dikkate alındığında, çalışma uzunluğunun doğru tespit edilmesine doğrudan bağlıdır. Kök kanalının uç noktası olan apikal konstriksiyon (minör foramen), başarılı bir tedavi protokolü için en kritik anatomik referans noktasıdır (Duran-Sindreu et al., 2013). Kök kanal tedavisi sonrasında periapikal dokuların durumunu inceleyen araştırmalar, en ideal klinik sonuçların tedavinin tam olarak apikal konstriksiyon seviyesinde sonlandırıldığı olgularda alındığını tutarlı bir şekilde ortaya koymaktadır. Buna karşın, bu sınırın ötesine taşan uygulamalar başarısızlık riski ve olumsuz prognozla ilişkilidir. Dolayısıyla, apikal konstriksiyonun klinik olarak hassas bir şekilde konumlandırılması, endodontic pratiklerin en temel basamaklarından birini oluşturur (Schaeffer et al., 2005; Sjogren et al., 1990).

Kök kanal çalışma uzunluğunu saptamak amacıyla radyografi, taktil algı, kanama takibi ve kök kanal morfolojisi bilgisinden yararlanan çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Klinik pratikte en sık tercih edilen yaklaşım ise periapikal radyografiler ile elektronik apeks bulucuların kombine edilmesidir (Meares & Steiman, 2002). Radyografik yöntem; kök kanal sisteminin, kök sayısının ve eğriliklerinin doğrudan gözlemlenebilmesi, komşu anatomik yapıların değerlendirilmesi ve periapikal patolojilerin teşhis edilebilmesi gibi yadsınamaz avantajlara sahiptir (Custer, 1918). Bununla birlikte bu yöntem; teknik duyarlılığı, klinisyenler arası yorumlama farklılıkları, iyonize radyasyon riski ve üç boyutlu bir nesnenin iki boyutlu izdüşümünü vermesinden kaynaklanan büyüme (magnifikasyon), bozunma (distorsiyon) ve görüntülerin üst üste binmesi gibi ciddi dezavantajlar barındırmaktadır ((Bodur et al., 2008; Estrela et al., 2008; Green, 1955; C. Williams et al., 2006).

Apikal foramenin her zaman kök ucunda sonlanmayıp, diş kökünün lateral yüzeyinde konumlanabilmesi radyografik yöntemin en büyük klinik kısıtlamalarından biridir. Literatürde, majör foramenlerin radyografik apeksten yaklaşık 3,5 mm'ye kadar uzakta yer alabileceği bildirilmiştir (Bodur et al., 2008; Dummer et al., 1984; Mancini et al., 2011) .Bu tür anatomik varyasyonlarda kök kanalı film düzleminde sonlandığında, radyografik görüntü gerçek uzunluktan daha "kısa" görünmekte ve çalışma boyu olduğundan daha uzun tespit edilerek taşkın enstrümantasyona zemin hazırlamaktadır (Olson et al., 1991). Williams ve arkadaşları, radyografik görüntüde kanal eğesinin ucu radyografik apeksten daha geride görüldüğünde bile, gerçekte eğe ucunun major foramene filmdeki görüntüden çok daha yakın olduğunu bildirerek

bu yöntemin yanıtıcılığını ortaya koymuştur (C. B. Williams et al., 2006). Son yıllarda endodontide kullanılmaya başlanan Konik Işınlı Bilgisayarlı Tomografi (CBCT) teknolojisi, geleneksel bilgisayarlı tomografiye kıyasla çok daha düşük radyasyon dozuyla kök kanal morfolojisinin üç boyutlu ve distorsiyonsuz bir şekilde görselleştirilmesini sağlasa da, yüksek maliyet ve pratiklik açısından klinikte her olguda rutin olarak tercih edilen bir yöntem değildir (Jeger et al., 2012; Patel, 2009). Bu kısıtlamalar, endodontide elektriksel akımlardan yararlanan sistemlerin doğuşunu zorunlu kılmıştır.

Apikal foramenlerin yerini belirlemek amacıyla elektriksel yöntemlerin kullanımı ilk olarak 1918 yılında Custer tarafından önerilmiştir (Custer, 1918). Ardından 1942 yılında Suzuki, köpekler üzerinde gerçekleştirdiği deneysel çalışmalar neticesinde, oral mukoza ile periodontal membran arasında 6,5 k Ω 'luk sabit bir direnç bulunduğunu keşfetmiş ve bu değerin yaş, cinsiyet veya diş türünden etkilenmediğini öne sürerek "Biyolojik Karakteristik Teorisi"ni ortaya koymuştur. Sunada (1962), Suzuki'nin bu biyolojik ilkesini geliştirerek, söz konusu elektriksel direnç değerinin elektronik araçlarla ölçülebileceğini kanıtlamış ve direkt akım (DC) ile çalışan ilk ticari elektronik apeks bulucuyu endodonti dünyasına tanıtmıştır (Sunada, 1962).

Bu süreçten sonra apeks bulucu teknolojisi, her yeni jenerasyonda ölçüm doğruluğunu ve klinik pratikliği artırarak altı farklı kuşak boyunca gelişim göstermiştir. İlk iki kuşağa ait cihazların kanal içi ortama ve tedavi esnasında uygulanan irigasyon solüsyonlarına karşı yüksek hassasiyet göstermesi, bu sistemlerin klinik etkinliğini sınırlayan en önemli dezavantaj olmuştur (Rifaat et al., 2023). İki farklı frekansın empedans oranını temel alan üçüncü kuşak apeks bulucular, klinikte geniş bir kabul görmüştür (Cîmpean et al., 2023). Beş farklı frekanstan elde edilen verileri matematiksel algoritmalarla işleyen dördüncü kuşak ile elektriksel özellikleri matematiksel modellemelerle karşılaştıran beşinci kuşak sistemler de literatürde ümit verici sonuçlar ortaya koymuştur (Chukka et al., 2020). Buna karşın yapılan çalışmalar, dördüncü kuşak cihazların ölçüm hassasiyeti açısından önceki nesillerle arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark olmadığını göstermektedir (Duran-Sindreu et al., 2013).

Günümüzde EAB teknolojisinin klinik popülaritesi hızla artsa da, radyografik yöntem ile elektronik ölçümün karşılaştırmalı doğruluğu ve klinik etkinliği üzerinde literatürde halen mutlak ve tek sesli bir fikir birliği (konsensüs) bulunmamaktadır. Uluslararası prestijli veri tabanlarında (PubMed, Cochrane, Science Direct vb.) yapılan geniş çaplı literatür taramaları ve sistematik derleme arayışları, iki yöntemin birbirine olan üstünlük sınırlarının klinik başarı ve uzun dönem prognoz açısından hala derinlemesine incelenmeye muhtaç olduğunu

göstermektedir. Bu kitap bölümü, söz konusu literatür boşluğunu doldurmak, her iki yöntemin klinik etkinlik sınırlarını güncel kanıta dayalı diş hekimliği verileriyle karşılaştırmalı olarak ortaya koymak amacıyla kurgulanmıştır.

2. ELEKTRONİK APEKS BULUCULARIN TEMEL FİZİKSEL VE BİYOLOJİK PRENSİPLERİ

Elektronik apeks bulucuların (EAB) kök kanalı içerisindeki hassas konumlandırma yeteneği, insan vücudunun ve diş sert dokularının sergilediği spesifik biyofiziksel ve elektriksel özelliklere dayanmaktadır. Diş hekimliğinde EAB sistemleri, insan vücudunu bir bütün olarak ele alıp elektriksel bir devre mimarisi kurarak çalışır. Bu devrenin bir ucu hastanın oral mukozasına dudak kancasıyla, diğer ucu ise kök kanalı içine ilerletilen endodontik eğeye klips vasıtasıyla bağlanarak tamamlanır.

Biyolojik bir perspektiften bakıldığında, mineralize sert dokulardan oluşan mine ve dentin tabakaları, içerdikleri düşük su ve sınırlı iyon konsantrasyonu nedeniyle elektriksel akımlara karşı yüksek direnç gösteren kararlı birer yalıtkan (izolatör) vazifesi görürler. Buna karşın, kök kanalını çevreleyen periodontal ligament, alveolar kemik, pulpa dokusu ve periapikal bölgedeki canlı dokular; kan, lenf ve interstisyel sıvılar açısından zengin olduklarından dolayı yüksek iyonik iletkenliğe sahip birer elektrolit ortamı oluştururlar. Eğe, yalıtkan özellik gösteren kök kanalı boyunca apikal konstriksiyona doğru ilerledikçe devrenin elektriksel direnci ve kapasitans değerleri dinamik olarak değişime uğrar. Eğe ucu nihayetinde canlı doku sınırı olan periodontal ligament ile temas ettiği anda devre kapanır ve sistem apikal terminale ulaşıldığını algılar (Khandewal et al., 2015; Meares & Steiman, 2002).

Cihazların bu değişimi matematiksel olarak modelleyebilmesi için insan dişi, paralel bağlı bir direnç (R) ve bir kapasitör (C) ağından oluşan eşdeğer bir elektriksel devre şeklinde simüle edilir. Eğenin apikal yöndeki hareketi esnasında akımın karşılaştığı toplam zorluk, yani empedans (Z) değeri alternatif akım (AC) frekansına bağlı olarak şu fiziksel formülle hesaplanır:

$$Z = \frac{R}{1 + j\omega CR}$$

Burada ω açısal frekansı ($\omega = 2\pi f$), j ise sanal birimi ifade etmektedir. Eğe apikal konstriksiyona yaklaştıkça, daralan kanal geometrisinden ötürü akım yoğunluğu daralma bölgesinde tepe

noktasına ulaşır ve kapasitif reaktans keskin bir düşüş sergiler (Gordon & Chandler, 2004). İlk kuşak cihazlar sadece basit bir doğru akım (DC) direnç ölçümünü temel alırken, modern çoklu frekans tabanlı sistemler iki ya da daha fazla farklı frekanstaki (örneğin 400 Hz ve 8 kHz) empedans değerlerinin birbirine oranını (Z_1 / Z_2) sürekli olarak hesaplar. Matematiksel olarak kurgulanan bu oran algoritması sayesinde, kök kanalı içerisinde sodyum hipoklorit, kan veya eksüda gibi yüksek iletkenliğe sahip elektrolit sıvıların varlığı, iki farklı frekansta da benzer sapmalar yarattığı için birbirini nötralize eder. Böylelikle modern EAB teknolojisi, kanal içi nem koşullarından bağımsız olarak foramen apikalenin yerini milimetrik bir doğrulukla hekime görsel ve işitsel sinyallerle rapor edebilmektedir (Lucena-Martín et al., 2004; Welk et al., 2003).

Elektronik apeks bulucuların (EAB) kök kanal sisteminin sonlanma sınırını mikroskobik düzeyde saptama yeteneği, konvansiyonel radyografinin iki boyutlu anatomik gölge kısıtlamalarını aşan en güçlü yönlerinden biridir. Literatürde iki yöntemin mikroskobik anatomiye olan gerçek uzaklığını diş çekimleri sonrasında histomorfolojik olarak inceleyen sınırlı sayıda spesifik araştırma mevcuttur.

- **Sementodental Birleşime (SDB) Olan Mesafe:** Literatürde sementodental birleşime olan mesafeyi doğrudan değerlendiren tek bir çalışma dikkat çekmektedir. Hassanien ve ark. tarafından yürütülen bu çalışmada, elektronik yöntemle belirlenen çalışma uzunluğu sonucunda ege ucunun sementodental birleşime ortalama **0,09 mm** gibi milimetrenin onda biri düzeyinde son derece hassas bir yakınlıkta konumlandığı saptanmıştır. Buna karşın, sadece geleneksel radyografik tespitle kurgulanan protokollerde bu mesafenin sementodental birleşimden ortalama **0,26 mm** uzakta kaldığı kaydedilmiş ve aradaki fark elektronik ölçüm lehine istatistiksel olarak ileri düzeyde anlamlı bulunmuştur (Hassanien et al., 2008)

3. GÜNCEL TEKNOLOJİLER VE KUŞAKLAR ARASI KARŞILAŞTIRMA

Elektronik apeks bulucu (EAB) teknolojisi, Sunada'nın ortaya koyduğu temel ilkelerden günümüze kadar sinyal işleme yöntemleri, akım tipleri, kullanılan frekans sayıları ve matematiksel algoritmalar açısından devrimsel aşamalardan geçmiştir. Piyasada yer alan ve klinik kullanıma sunulan cihazlar, kanaldaki elektriksel değişimleri ve empedansı analiz etme biçimlerine göre altı farklı kuşak altında sınıflandırılmaktadır. Her bir nesil, bir önceki kuşağın klinik sınırlılıklarını, özellikle de kanal içi nem, irigasyon solüsyonu varlığı ve canlı doku

kaynaklı ölçüm hatalarını elimine etmek üzere geliştirilmiştir (Khandewal et al., 2015; Meares & Steiman, 2002).

Endodonti literatüründe elektriksel direnç ölçüm mekanizmasıyla sahneye çıkan ilk kuşak sistemler, rezistans tip olarak sınıflandırılmaktadır. Bu teknolojinin temelleri, ağız mukozası ile periodontal dokular arasında sabit bir elektriksel akım direnci bulunduğu kuramının Sunada tarafından geliştirilmesine dayanır; nitekim araştırmacı 1962 yılında *The Root Canal Meter* ticari adıyla dental sektörün ilk cihazını literatüre kazandırmıştır (Sunada, 1962). Söz konusu sistemin mühendislik altyapısı, mukoza ve periodontal ligament yapılarının arasında konumlanan 6,5 k Ω düzeyindeki sabit direnç odağına göre şekillendirilmiştir. Bu doğrultuda, dudak klipsi ile kanal içi el eğesi arasındaki direnç varyasyonunu gözlemleyen ilkel bir devre mimarisi üzerinden, cihaz göstergesinin tam olarak bu kritik 6,5 k Ω değeri yakaladığı an eğe ucunun apikal konstriksiyon sınırına konumlandığı kabul görmüştür.

Teknolojik evrimin bir sonraki aşamasında, empedans tabanlı kurgulanan ikinci kuşak apeks bulucular geliştirilmiş ve 1971'de Inoue imzası taşıyan *Sono-Explorer* endodonti dünyasına takdim edilmiştir (Sunada, 1962). Kök kanallarının koronal girişinden kök ucuna doğru ilerleyen bir enstrümanın, kanal boyunca yükselen bir elektriksel empedans profiliyle karşılaşması bu sistemlerin ana felsefesini oluşturur. Bahsi geçen empedans tabanlı aygıtlar, kanal duvarındaki bu elektriksel direnç karakteristiğinin fizyolojik foramen seviyesine ulaşıldığı an ani bir kırılma ya da düşüş yaşaması metodolojisini kullanır. Eş zamanlı biçimde iki ayrı empedans takibi yapabilen *Sono-Explorer*, bu iki verinin grafiksel olarak birbirine yaklaştığı bölgeyi fizyolojik foramen olarak konumlandırır ve hekimi apikal sınıra gelindiği konusunda düşük frekanslı sesli bir sinyalle uyarır.

Zamanla çift empedans ve frekans analizini entegre bir biçimde yorumlayan frekans tip üçüncü kuşak apeks bulucular, kök kanal sisteminin sonlandığı anatomik sınırların belirlenmesinde yeni bir standart belirlemiştir. Bu yeni nesil aygıtlar, içerdikleri gelişmiş mikroişlemci mimarileri sayesinde ilk iki jenerasyon sistemlerin klinik zafiyetlerini aşarak çok daha hassas ve tekrarlanabilir klinik çıktılar sunmuşlardır (Gordon & Chandler, 2004). Sektörde ilk olarak 1990 yılında Yamashita tarafından projelendirilen üçüncü nesil bu sistemler, kanal içerisindeki nem veya solüsyon değişkenliklerinden etkilenmeksizin stabil ölçüm yapabilme kabiliyetiyle öne çıkmıştır (Saito & Yamashita, 1990).

İki farklı frekans düzleminde empedans ölçümü yürüten bu akıllı aygıtlar, alçak ve yüksek frekans çıktılarının arasındaki nüansları matematiksel algoritmalarla analiz ederek net çalışma boyunu hesaplar. Eğinin uç kısmı fizyolojik foramen odağına ulaştığında, iki farklı empedans verisi arasındaki matematiksel fark keskin bir biçimde tepe noktasına (zirveye) ulaşır. Frank ve Torabinejad tarafından literatürde değerlendirilen *Apit/Endex* bu jenerasyonun en spesifik örneklerinden biridir.(Frank & Torabinejad, 1993).

Endodonti pratiklerinde milat kabul edilen ve kanal içi nemli ortamlardan etkilenmeyen otomatik kalibrasyon yeteneğiyle donatılmış ilk modern cihaz olan *Root ZX*, 1991 senesinde Kobayashi ve meslektaşları tarafından diş hekimliği dünyasına sunulmuştur (Kobayashi, 1995). Bu popüler sistem, 0.4 ve 8 kHz frekans değerlerindeki empedans çıktılarını eş zamanlı analiz edip birbirine oranlama felsefesiyle fizyolojik foramenin konumunu saptamaktadır. Bünyesinde barındırdığı yüksek kapasiteli mikroişlemciler sayesinde aygıt, ileri düzey matematiksel algoritmalar ve oranlama modelleri yürütebilmektedir (Gordon & Chandler, 2004; Lucena-Martín et al., 2004). Dunlap ve çalışma arkadaşlarının literatüre kazandırdığı verilerde, *Root ZX* kullanılarak hem vital hem de devital/nekrotik pulpa yapısına sahip dişlerde gerçekleştirilen klinik ölçümlerin başarı düzeyi %82,3 şeklinde rapor edilmiştir (Dunlap et al., 1998). Paralel şekilde Shabahang ve ark. tarafından yürütülen bir diğer araştırmada ise sistemin olguların %96,2 gibi oldukça dominant bir oranında apikal konstriksiyonu hatasız tespit ettiği gözler önüne serilmiştir (Shabahang et al., 1996). Elde edilen bu dikkate değer klinik doğruluk çıktıları, *Root ZX* cihazının uzun yıllar boyunca endodontik bilimsel araştırmalarda kıyaslama amacıyla başvurulana ana "referans altın standart aygıt" konumuna yükselmesini sağlamıştır (Gordon & Chandler, 2004).

Teknolojik gelişim zincirinin bir sonraki halkasını oluşturan orantı tipi dördüncü nesil elektronik apeks bulucular, temelde farklı frekans spektrumlarındaki empedansların matematiksel olarak oranlanması prensibini benimsemiştir (Gordon & Chandler, 2004). Söz konusu sistemler yapısal algoritmalar yönünden üçüncü jenerasyon öncülleriyle benzer bir temel mantığı paylaşırlar da, tek bir zaman diliminde ölçebildikleri frekans çeşitliliği, veri işleme hız kapasiteleri ve sentez algoritmaları bakımından onlardan keskin sınırlarla ayrışırlar. Sektörel pazarda bu jenerasyonun bilinen örneklerinden biri olarak yerini alan *Raypex 4*, dördüncü kuşak teknolojisinin karakteristik bir temsilcisidir (Hör et al., 2005) . Bu donanım da tıpkı üçüncü nesil platformlar gibi veri analiz sürecinde 400Hz ve 8 kHz olmak üzere iki farklı temel frekanstan yararlanır.

Klinik tanı hassasiyetini ve ölçüm doğruluğunu maksimize etmek adına kök kanal sisteminde çoklu frekans (multifrekans) spektrumundan yararlanılmasının, EAB cihazlarının performansını majör düzeyde yukarı taşıdığı savunulmaktadır. Beşinci jenerasyon apeks bulucu mimarileri, çoklu frekans akımlarını dijital sinyal işleme (DSP) teknolojisiyle entegre ederek analiz etme esasına dayanır; bu doğrultuda eğeden toplanan ham analog sinyaller herhangi bir distorsiyona, sapmaya ya da yapısal kayba uğratılmadan doğrudan işlenerek gelişmiş bir dijital konfigürasyona dönüştürülür (Gordon & Chandler, 2004).

Sektörde karşımıza çıkan *ProPex*, *Propex II* ve *Propex Pixi* gibi ticari modeller, multifrekans kombinasyonlarını kombine ederek ölçüm doğruluğu sağlayan popüler sistemlerdir (Mancini et al., 2011; Plotino et al., 2006). Klinik çalışmalarda çift frekans tabanlı sistemlerin apikal foramen tespitindeki başarı yüzdesi %82 seviyelerinde izlenirken (Pagavino et al., 1998), beşinci nesil çoklu frekanslı sistemlerde bu başarı oranının %90'lara kadar ulaştığı bildirilmiştir (Welk et al., 2003).

Dijital endodonti teknolojisinin ulaştığı en güncel basamak olan adaptif tip altıncı kuşak cihazlar, elektriksel akım devresi boyunca ana üniteden yollanan ve geri toplanan çift frekanslı sinyal niteliklerinin anlık olarak optimize edilmesi prensibiyle çalışır. Sektörde bu ileri düzey adaptif donanımın karakteristik temsilcileri arasında *Raypex 6*, *Apex ID* (SybronEndo, Glendora, CA, ABD) ve *CanalPro* (ColteneEndo) gibi popüler platformlar yer almaktadır (Gordon & Chandler, 2004). Söz konusu akıllı algoritmaların, hekimlerin klinik uygulama esnasında karşılaştığı kök kanalını mutlak surette kurulama ya da suni olarak nemlendirme gereksinimini tamamen elimine ettiği; kök kanal sisteminin saniyeler içinde değişebilen dinamik ıslaklık varyasyonlarından bağımsız biçimde, en yüksek hassasiyetle stabil ve tekrarlanabilir veriler üretebildiği ileri sürülmektedir.

4. KLİNİK UYGULAMA PROTOKOLLERİ VE DOĞRULUK STRATEJİLERİ

Elektronik apeks bulucuların klinik ortamda sunduğu yüksek başarı, hekimin cihaz ekranında gördüğü sinyalleri nasıl yorumladığı ve lastik stopörü hangi milimetrik referans çizgisine göre ayarladığı ile doğrudan ilişkilidir. Literatürdeki sistematik veriler incelendiğinde, elektronik ölçümlerin doğruluğu genellikle üç farklı parametre üzerinden test edilmektedir: Kök kanal tedavisi gören dişlerde radyografik apekse olan mesafe, EAB (EAL) ile radyografi arasındaki ölçüm uyumu ve diş çekimi sonrasında spesifik anatomik apikal referans noktalarına olan gerçek uzaklık değerlendirilerek karşılaştırılmıştır.

4.1. Radyografik Apeks Olan Mesafe ve Klinik Doğruluk Oranları

Elektronik apeks bulucuların (EAB) performansını değerlendirmek amacıyla, on bir adet çalışma (ElAyouti et al., 2009; Pascon et al., 2009; Pommer et al., 2002) radyografik apeks olan mesafe faktörünü kullanmıştır. Yapılan bu araştırmaların büyük çoğunluğu, radyografik apekten 0,5 mm ile 1,5 mm arasındaki bir mesafeyi kabul edilebilir radyografik aralık olarak belirlemiş; eğer ucunun bu radyografik aralıkta konumlanması durumunda çalışma boyu tespitini başarılı kabul etmiştir.

Klinik tolerans aralıklarının daha geniş (0,0 - 2,0 mm) tutulduğu alternatif senaryolarda da cihazların performansı incelenmiştir. Bu doğrultuda, kabul edilebilir radyografik aralığı 0,0 ila 2,0 mm olarak belirleyen çalışmalardan El Ayouti ve ark. (21) ve bulucu **0,5-mm** işaretindeyken sırasıyla %97 oranlarında klinik etkinlik değerlerine ulaşmışlardır (ElAyouti et al., 2009). Pascon ve ark. ise bulucu **1-mm** işaretindeyken olguların %91,82'sinde kabul edilebilir tam çalışma boyu tespitleri gerçekleştirmişlerdir (Pascon et al., 2009).

4.2. Ana Kon Uyum Aşaması ve Final Dolgu Boyutunun Değerlendirilmesi

Kök kanal preparasyonu sonrasında, biyomekanik olarak şekillendirilmiş kanallara yerleştirilen gütaperka ana konun (master cone) derinliği ve ardından elde edilen kalıcı obtürasyon seviyesi, elektronik çalışma boyu tespitinin klinik başarısını yansıtan en somut kriterlerdir. Apeks bulucuların etkinliğini değerlendirmek amacıyla doğrudan enstrümantasyon (odontometri) eğesi kullanmak yerine, endodontik tedavinin ana kon uyum aşamasını baz almıştır (Ravanshad et al., 2010).

- Ravanshad ve ark. (24) tarafından yürütülen çalışmada, 188 kök kanalında ana kon uzunluğu tayini gerçekleştirilmiş; çalışma boyu tespiti ise tek başına ya apeks bulucu ya da radyografik ölçüm ile tamamlanmıştır. Ana kon ucunun, apekten 0,0 ila 2,0 mm arasındaki güvenli radyografik aralıkta yer alması başarılı kabul edilmiştir. Bu protokolde, apeks bulucu olguların %90,4'ünde, radyografi ise %82,1'inde başarı göstermiş ve aralarındaki bu fark istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır.
- İki yöntem arasındaki tek anlamlı fark taşkın ölçümlerde saptanmıştır. Taşkın ölçümlerde apeks bulucu sadece %1 oranında uzun (taşkın) ölçüm verirken, radyografik çalışma boyu tespiti %10,7 oranında taşkınlığa yol açmıştır (Ravanshad et al., 2010).

- Fouad ve Reid (25) yaptıkları değerlendirmede, final kanal dolgularının uygunluğunu apeks bulucu kullanılan grupta %93,3 oranında kabul edilebilir bulurken, sadece radyografi kullanılan grupta bu oranı %75 olarak bildirmişlerdir. İki grup arasındaki bu fark istatistiksel olarak anlamlı kabul edilmiştir (Fouad & Reid, 2000).

4.3. Klinik Protokollerin Radyografi İhtiyacı Üzerindeki Etkisi

Elektronik apeks bulucu kullanımının en önemli klinik ve biyolojik avantajlarından biri, hastaların maruz kaldığı toplam iyonize radyasyon dozunu ve tedavi seanslarındaki film sayısını dramatik şekilde düşürebilmesidir. Yapılan bazı çalışmalar, EAB kullanarak veya sadece radyografik kontrollerle kök kanal tedavisini tamamlamak için gerekli olan radyografi sayısını değerlendirmiştir.

- Saad ve Al-Nazhan (23), hastaların maruz kaldığı radyasyon dozunu azaltmayı amaçlayan dijital radyografi tekniğinde, kök kanallarının tam enstrümantasyonundan sonra EAB verileri kararlı ve tekrarlanabilir olduğu sürece, ana konun konumunu kontrol etmek için tek bir film kullanmışlardır. İncelenen 14 olguda, bulucu tarafından yapılan tüm tespitler, ana konun radyografik ölçümlerinin yanı sıra final obtürasyon radyografisiyle de tam uyum göstermiştir (Saad et al., 2007).
- Fouad ve Reid, denemelerine dahil edilen 36 diş için genel toplamda apeks bulucu kullanımı olan veya olmayan durumlar arasında gerekli radyografi sayısı açısından anlamlı bir fark bulamamışlardır. Ancak diş örneklerini gruplara ayırdıklarında; ön dişler ve premolarlar grubunda apeks bulucu kullanıldığında ihtiyaç duyulan radyografi sayısının önemli ölçüde düştüğü ve bu farkın istatistiksel olarak anlamlı olduğu sonucuna varmışlardır (Molar grubunda ise anlamlı bir fark görülmemiştir). Toplam tedavi süresince ön diş/premolar grubu ortalama 3,18 radyografiye gereksinim duyarken, molar grubu 3,91 radyografiye ihtiyaç duymuştur (Fouad & Reid, 2000).
- Ravanshad ve ark. EAB yardımıyla gerçekleştirilen ve ana kon ile final obtürasyon basamaklarında radyografik konfirme yapılan 104 kök kanalı ile, sadece radyografik verilere dayanarak çalışma uzunluğu belirlenen 84 kök kanal tedavisini karşılaştırmışlardır. Araştırma sonucunda apeks bulucu grubunun tedavi boyunca ortalama 3 radyografiye, sadece radyografi grubunun ise 4,07 radyografiye ihtiyaç duyduğu saptanmış ve bu fark istatistiksel olarak ileri düzeyde anlamlı kabul edilmiştir (Ravanshad et al., 2010).

5. KLİNİK BAŞARIYI ETKİLEYEN DEĞİŞKENLER VE ZORLU FAKTÖRLER

Elektronik apeks bulucuların (EAB) klinik koşullardaki başarısı ve çalışma boyu tespitindeki etkinliği, günlük dental pratikte halen en sık kullanılan yöntem olan konvansiyonel radyografi ile sürekli karşılaştırılmaktadır (Nekoofar et al., 2010). Ancak unutulmamalıdır ki, her iki tekniğin de kendine has klinik dezavantajları mevcuttur (Katz et al., 1991). Radyografik yöntemin en büyük dezavantajı, enstrümantasyon ve obtürasyonun sonlanması gereken apikal konstriksiyonun yerini sadece tahmini olarak belirleyebilmesidir. Bu tahmin, söz konusu dar çaplı apikal alanın konumunda anatomik olarak varyasyonlar meydana gelebileceğini belgeleyen literatür verilerine dayanmaktadır (Dummer et al., 1984; Hassanien et al., 2008; Kuttler, 1955). Diğer taraftan EAB cihazları da apikal konstriksiyonun konumunu olguların %100'ünde kusursuz olarak tanımlayamamaktadır (Hassanien et al., 2008; Kim et al., 2008).

Kanıt dayalı endodonti literatüründe, insan klinik çalışmaları incelenirken günlük pratik gerçeğe en yakın sonuçları almak adına genellikle birinci ve ikinci kuşak cihazların yetersiz performanslarından dolayı sadece üçüncü nesil ve daha üzeri EAB teknolojileri değerlendirmeye dahil edilmektedir (Gordon & Chandler, 2004; Kim & Lee, 2004). Klinik çalışmalarda cihazların doğruluğu üzerinde rol oynayan parametreler ise "Etkilemeyen Kararlı Değişkenler" ve "Etki Eden / Çelişkili Değişkenler" olarak ikiye ayrılmaktadır:

5.1. Ölçüm Doğruluğunu Etkilemeyen Kararlı Değişkenler

Sistemik literatür verileri ve in vivo tanısal test çalışmaları incelendiğinde, elektronik çalışma uzunluğu ölçümlerine belirgin bir manipülatif etkisi bulunmayan parametreler şu şekildedir:

- **Hasta Demografisi (Cinsiyet ve Yaş) ve Diş Tipi:** Faktörler olarak hastanın cinsiyeti, yaşı veya tedavisi yapılan dişin türü (anterior, premolar veya molar olması) çalışma uzunluğu tespiti üzerinde herhangi bir olumsuz etki yaratmamaktadır.
- **Kanal İçi Nem Durumu:** Kanal içi nem faktörünün, gelişmiş frekans algoritmalarına sahip çağdaş apeks bulucuların çalışma uzunluğu doğruluğu üzerinde istatistiksel bir etkisi bulunmamaktadır.
- **Cihaz Çeşitliliği (Marka/Model):** Farklı markalara ait modern apeks bulucuların genel klinik başarı oranları arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark tespit edilmemiştir. **Ancak her cihazın üretiminde uygulanan farklı elektronik karakteristikler ve**

sinyal işleme modelleri nedeniyle, markalar arasında klinik olarak tamamen aynı olmayan, kendi içinde tutarsız/değişken sonuçlar üretilebileceği unutulmamalıdır.

5.2. Ölçüm Doğruluğunu Etkileyebilen Çelişkili ve Riskli Değişkenler

Literatürde üzerlerinde tam bir uzlaşa sağlanamayan, klinik ölçümleri saptırabilen veya cihazların kararsız okumalar yapmasına yol açan riskli değişkenler şunlardır:

- **Pulpal Teşhis (Canlılık Durumu):** Pulpanın histopatolojik durumu ile EAB doğruluğu arasındaki ilişki literatürde çelişkilidir. Çalışmaların büyük bir çoğunluğu pulpa teşhisinin elektronik ölçüme herhangi bir müdahalesi veya etkisi olmadığını savunurken (Akisue et al., 2007; ElAyouti et al., 2009; Ravanshad et al., 2010; Smadi, 2006); bazı klinik araştırmalar ise bunun aksini belirterek vital veya devital olgular arasında ölçüm doğruluğu açısından farklar olduğunu bildirmiştir (Pommer et al., 2002).
- **Endodontik Yenileme Tedavileri (Retreatment):** Kök kanal dolgusunun yenilendiği olgular da benzer şekilde çelişkili sonuçlar barındırmaktadır (ElAyouti et al., 2009; Pommer et al., 2002). Kanal duvarlarında kalan eski dolgu materyalleri veya kimyasal solventler cihazların empedans dengesini bozabilmektedir.
- **Çalışmalardan Elenen Kritik Klinik Faktörler:** [Geçiş Cümlesi] Birçok klinik araştırmanın daha steril sonuçlar almak adına dışarıda bıraktığı (eksklúde ettiği) bazı patolojik durumlar, gerçek klinik gerçeklikte EAB'lerin başarısını doğrudan düşürmektedir. Kök rezorpsiyonu varlığı, kök ucunun tam olarak şekillenmediği immatür (açık apeksli) dişler veya dişte metal kron restorasyonlarının bulunması gibi durumlar, apeks bulucuların klinik etkinliğini olumsuz yönde değiştirerek çalışma uzunluğu tespitinde radyografik yöntemi daha avantajlı hale getirebilmektedir.

5.3. In Vitro ve In Vivo Ölçüm Paradoksu

Elektronik apeks bulucuların cihaz bazlı karşılaştırmalarında laboratuvar (in vitro) çalışmaları ile canlı insan (in vivo) çalışmaları arasında metodolojik bir çelişki mevcuttur. Canlı klinik çalışmalarda (in vivo) cihazların birbirine üstünlüğü konusunda anlamlı bir fark bulunamazken, in vitro laboratuvar testlerinde farklı cihaz modelleri arasında istatistiksel olarak ileri düzeyde anlamlı farklar tanımlanmıştır (Carvalho et al., 2010; Cianconi et al., 2010; Mancini et al., 2011; Real et al., 2011).

Ancak laboratuvar ortamı ne olursa olsun, hem in vitro tanısal çalışmalar hem de histolojik kesit analizleri; herhangi bir EAB cihazı ile yapılan elektronik ölçümün doğruluğunun, tek başına yapılan radyografik tespitten belirgin derecede daha yüksek olduğunu doğrulamaktadır (Cianconi et al., 2010; Krajczár et al., 2008; Mancini et al., 2011; Real et al., 2011). Apikal konstriksiyonun saptanmasında EAB doğruluğu diş tipine ve cihaza göre %43,9 ile %89,1 arasında değişirken; radyografik yöntemin doğruluğu sadece %14,6 ile %32,72 arasında kalmaktadır.

İki yöntemin tek başına kusursuz olamaması nedeniyle, klinik başarıyı maksimize etmek ve radyografi sayısını minimumda tutmak adına en ideal yaklaşım; apeks bulucunun doğruluğundan yararlanıp, bunu tek bir radyografik kontrol ile destekleyerek kombine bir yöntem (kombinasyon protokolü) uygulamaktır. Literatürdeki güçlü klinik veriler (Fouad & Reid, 2000; Ravanshad et al., 2010) ve laboratuvar testleri (Brunton et al., 2002; ElAyouti et al., 2002), apeks bulucunun bir radyografik kontrol yardımıyla kullanılmasının hem tedavi etkinliğini en üst seviyeye çıkardığını hem de hastanın maruz kaldığı radyasyon dozunu anlamlı ölçüde azalttığını net olarak kanıtlamaktadır.

6. SONUÇ VE GELECEK PERSPEKTİFLERİ

Kök kanal tedavisinde apikal konstriksiyon sınırları içerisinde kalabilmek, biyomekanik preparasyonun ve obtürasyonun başarısı, dolayısıyla da periapikal dokuların uzun dönemli sağlığı açısından vazgeçilmez bir kuraldır. Günlük klinik pratikte en sık başvuru olan yöntem halen konvansiyonel radyografi olsa da, bu yöntemin üç boyutlu anatomik yapıları iki boyutlu bir düzleme yansıtması, magnifikasyon, distorsiyon ve anatomik süperpozisyonlar gibi yapısal kısıtlamaları hekimi yanıltabilmektedir.

Kanıt dayalı klinik ve histolojik veriler ışığında, elektronik apeks bulucu (EAB) teknolojisi ve klinik uygulama stratejilerine dair ulaşılan nihai sonuçlar şu şekilde özetlenebilir:

- **Üstün Anatomik Doğruluk:** Üçüncü nesil ve üzeri modern elektronik apeks bulucular; sementodental birleşim, apikal konstriksiyon ve apikal foramen gibi mikroskopik doku sınırlarını saptamada konvansiyonel radyografik yöntemle kıyasla istatistiksel olarak ileri düzeyde anlamlı ve daha yüksek bir klinik başarı sergilemektedir.
- **Klinik Koşullarda Kararlılık:** Canlı insan çalışmalarından (in vivo) elde edilen veriler; hastanın yaşı, cinsiyeti, patolojik lezyon varlığı ve kanal içi nem durumunun

EAB cihazlarının kararlı ölçüm performansı üzerinde manipülatif bir olumsuzluk yaratmadığını kanıtlamaktadır. Pulpa teşhisi (vital/devital ayrımı) ve retreatment olguları ise klinik ölçümlerde dikkat edilmesi gereken çelişkili değişkenler olarak güncelliğini korumaktadır.

- **Radyasyon Güvenliği ve Biyolojik Avantaj:** Elektronik yöntemlerin klinik protokollere doğru şekilde entegre edilmesi, tedavi seanslarında ihtiyaç duyulan periapikal film sayısını anlamlı derecede düşürmektedir. Hastanın maruz kaldığı iyonize radyasyon dozunu azaltan bu biyolojik avantaj; özellikle yüksek radyasyon riskinden kaçınılması gereken sistemik rahatsızlığı bulunan (tıbbi açıdan kompromize) özel hasta gruplarında radyografisiz odontometri seçeneğini güçlü bir alternatif haline getirmektedir.
- **En İdeal Protokol (Kombinasyon Yaklaşımı):** Hiçbir elektronik cihazın %100 oranında kusursuz bir apikal konumlandırma sunamayacağı klinik bir gerçektir. Bu nedenle endodontik tedavide en yüksek başarı ve en düşük risk profili; tek başına EAB veya tek başına radyografi kullanımıyla değil, **kararlı elektronik ölçümlerin tek bir radyografik kontrol (ana kon uyum filmi) ile desteklendiği kombinasyon protokolleri** sayesinde elde edilmektedir.

Gelecek perspektifinde, elektronik apeks bulucu algoritmalarının kök kanal anatomisini yapay zeka tabanlı üç boyutlu navigasyon sistemleriyle eş zamanlı analiz edebilen akıllı mikromotor teknolojilerine tamamen entegre edilmesi beklenmektedir. Ancak teknoloji ne kadar gelişirse gelişsin, başarılı bir kök kanal tedavisinin anahtarı; cihazların biyofiziksel sınırlarını bilmek, klinik faktörleri doğru analiz etmek ve elektronik verileri hekimin klinik muhakeme yeteneğiyle harmanlamaktan geçmektedir.

KAYNAKÇA

- Akisue, E., Gavini, G., & de Figueiredo, J. A. (2007). Influence of pulp vitality on length determination by using the Elements Diagnostic Unit and Apex Locator. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod*, 104(4), e129-132. <https://doi.org/10.1016/j.tripleo.2007.04.018>
- Bodur, H., Odabaş, M., Tulunoğlu, O., & Tinaz, A. C. (2008). Accuracy of two different apex locators in primary teeth with and without root resorption. *Clin Oral Investig*, 12(2), 137-141. <https://doi.org/10.1007/s00784-007-0157-5>
- Brunton, P. A., Abdeen, D., & MacFarlane, T. V. (2002). The effect of an apex locator on exposure to radiation during endodontic therapy. *J Endod*, 28(7), 524-526. <https://doi.org/10.1097/00004770-200207000-00009>
- Carvalho, A. L., Moura-Netto, C., Moura, A. A., Marques, M. M., & Davidowicz, H. (2010). Accuracy of three electronic apex locators in the presence of different irrigating solutions. *Braz Oral Res*, 24(4), 394-398. <https://doi.org/10.1590/s1806-83242010000400004>
- Chukka, R. R., Bellam, M. D., Marukala, N. R., Dinapadu, S., Konda, N. K., & Nagilla, J. (2020). Efficiency of an Integrated Apex Locator in Determining Working Length in Various Irrigating Solutions: An In Vivo Study. *J Pharm Bioallied Sci*, 12(Suppl 1), S410-s414. https://doi.org/10.4103/jpbs.JPBS_122_20
- Cianconi, L., Angotti, V., Felici, R., Conte, G., & Mancini, M. (2010). Accuracy of three electronic apex locators compared with digital radiography: an ex vivo study. *J Endod*, 36(12), 2003-2007. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2010.08.036>
- Cîmpean, S. I., Chisnoiu, R. M., Colceriu Burtea, A. L., Rotaru, R., Bud, M. G., Delean, A. G., & Pop-Ciutrilă, I. S. (2023). In Vitro Evaluation of the Accuracy of Three Electronic Apex Locators Using Different Sodium Hypochlorite Concentrations. *Medicina (Kaunas)*, 59(5). <https://doi.org/10.3390/medicina59050918>
- Custer, L. E. (1918). Exact Method of Locating the Apical Foramen. *Dent Regist*, 72(9), 420-425.
- Dummer, P. M., McGinn, J. H., & Rees, D. G. (1984). The position and topography of the apical canal constriction and apical foramen. *Int Endod J*, 17(4), 192-198. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2591.1984.tb00404.x>
- Dunlap, C. A., Remeikis, N. A., BeGole, E. A., & Rauschenberger, C. R. (1998). An in vivo evaluation of an electronic apex locator that uses the ratio method in vital and necrotic canals. *J Endod*, 24(1), 48-50. [https://doi.org/10.1016/s0099-2399\(98\)80214-8](https://doi.org/10.1016/s0099-2399(98)80214-8)
- Duran-Sindreu, F., Gomes, S., Stöber, E., Mercadé, M., Jané, L., & Roig, M. (2013). In vivo evaluation of the iPex and Root ZX electronic apex locators using various irrigants. *Int Endod J*, 46(8), 769-774. <https://doi.org/10.1111/iej.12057>
- ElAyouti, A., Dima, E., Ohmer, J., Sperl, K., von Ohle, C., & Löst, C. (2009). Consistency of apex locator function: a clinical study. *J Endod*, 35(2), 179-181. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2008.10.017>
- ElAyouti, A., Weiger, R., & Löst, C. (2002). The ability of root ZX apex locator to reduce the frequency of overestimated radiographic working length. *J Endod*, 28(2), 116-119. <https://doi.org/10.1097/00004770-200202000-00017>
- Estrela, C., Bueno, M. R., Sousa-Neto, M. D., & Pécora, J. D. (2008). Method for determination of root curvature radius using cone-beam computed tomography images. *Braz Dent J*, 19(2), 114-118. <https://doi.org/10.1590/s0103-64402008000200005>
- Fouad, A. F., & Reid, L. C. (2000). Effect of using electronic apex locators on selected endodontic treatment parameters. *J Endod*, 26(6), 364-367. <https://doi.org/10.1097/00004770-200006000-00013>

- Frank, A. L., & Torabinejad, M. (1993). An in vivo evaluation of Endex electronic apex locator. *J Endod*, 19(4), 177-179. [https://doi.org/10.1016/s0099-2399\(06\)80683-7](https://doi.org/10.1016/s0099-2399(06)80683-7)
- Gordon, M. P., & Chandler, N. P. (2004). Electronic apex locators. *Int Endod J*, 37(7), 425-437. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2591.2004.00835.x>
- Green, D. (1955). A stereo-binocular microscopic study of the root apices and surrounding areas of 100 mandibular molars; preliminary study. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol*, 8(12), 1298-1304. [https://doi.org/10.1016/0030-4220\(55\)90434-5](https://doi.org/10.1016/0030-4220(55)90434-5)
- Hassanien, E. E., Hashem, A., & Chalfin, H. (2008). Histomorphometric study of the root apex of mandibular premolar teeth: an attempt to correlate working length measured with electronic and radiograph methods to various anatomic positions in the apical portion of the canal. *J Endod*, 34(4), 408-412. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2007.12.013>
- Hör, D., Krusy, S., & Attin, T. (2005). Ex vivo comparison of two electronic apex locators with different scales and frequencies. *Int Endod J*, 38(12), 855-859. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2591.2005.01004.x>
- Jeger, F. B., Janner, S. F., Bornstein, M. M., & Lussi, A. (2012). Endodontic working length measurement with preexisting cone-beam computed tomography scanning: a prospective, controlled clinical study. *J Endod*, 38(7), 884-888. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2012.03.024>
- Katz, A., Tamse, A., & Kaufman, A. Y. (1991). Tooth length determination: a review. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol*, 72(2), 238-242. [https://doi.org/10.1016/0030-4220\(91\)90169-d](https://doi.org/10.1016/0030-4220(91)90169-d)
- Khandewal, D., Ballal, N. V., & Saraswathi, M. V. (2015). Comparative evaluation of accuracy of 2 electronic Apex locators with conventional radiography: an ex vivo study. *J Endod*, 41(2), 201-204. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2014.10.011>
- Kim, E., & Lee, S. J. (2004). Electronic apex locator. *Dent Clin North Am*, 48(1), 35-54. <https://doi.org/10.1016/j.cden.2003.10.005>
- Kim, E., Marmo, M., Lee, C. Y., Oh, N. S., & Kim, I. K. (2008). An in vivo comparison of working length determination by only root-ZX apex locator versus combining root-ZX apex locator with radiographs using a new impression technique. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod*, 105(4), e79-83. <https://doi.org/10.1016/j.tripleo.2007.12.009>
- Kobayashi, C. (1995). Electronic canal length measurement. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology and Endodontics*, 79(2), 226-231. [https://doi.org/10.1016/S1079-2104\(05\)80288-4](https://doi.org/10.1016/S1079-2104(05)80288-4)
- Krajczár, K., Marada, G., Gyulai, G., & Tóth, V. (2008). Comparison of radiographic and electronical working length determination on palatal and mesio-buccal root canals of extracted upper molars. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod*, 106(2), e90-93. <https://doi.org/10.1016/j.tripleo.2008.04.007>
- Kuttler, Y. (1955). Microscopic investigation of root apexes. *J Am Dent Assoc*, 50(5), 544-552. <https://doi.org/10.14219/jada.archive.1955.0099>
- Lucena-Martín, C., Robles-Gijón, V., Ferrer-Luque, C. M., & de Mondelo, J. M. (2004). In vitro evaluation of the accuracy of three electronic apex locators. *J Endod*, 30(4), 231-233. <https://doi.org/10.1097/00004770-200404000-00012>
- Mancini, M., Felici, R., Conte, G., Costantini, M., & Cianconi, L. (2011). Accuracy of three electronic apex locators in anterior and posterior teeth: an ex vivo study. *J Endod*, 37(5), 684-687. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2011.02.011>
- Meares, W. A., & Steiman, H. R. (2002). The influence of sodium hypochlorite irrigation on the accuracy of the Root ZX electronic apex locator. *J Endod*, 28(8), 595-598. <https://doi.org/10.1097/00004770-200208000-00008>

- Nekoofar, M. H., Stone, D. F., & Dummer, P. M. (2010). The effect of blood contamination on the compressive strength and surface microstructure of mineral trioxide aggregate. *Int Endod J*, 43(9), 782-791. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2591.2010.01745.x>
- Olson, A. K., Goerig, A. C., Cavataio, R. E., & Luciano, J. (1991). The ability of the radiograph to determine the location of the apical foramen. *Int Endod J*, 24(1), 28-35. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2591.1991.tb00867.x>
- Pagavino, G., Pace, R., & Baccetti, T. (1998). A SEM study of in vivo accuracy of the Root ZX electronic apex locator. *J Endod*, 24(6), 438-441. [https://doi.org/10.1016/s0099-2399\(98\)80029-0](https://doi.org/10.1016/s0099-2399(98)80029-0)
- Pascon, E. A., Marrelli, M., Congi, O., Ciancio, R., Miceli, F., & Versiani, M. A. (2009). An in vivo comparison of working length determination of two frequency-based electronic apex locators. *Int Endod J*, 42(11), 1026-1031. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2591.2009.01615.x>
- Patel, S. (2009). New dimensions in endodontic imaging: Part 2. Cone beam computed tomography. *Int Endod J*, 42(6), 463-475. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2591.2008.01531.x>
- Plotino, G., Grande, N. M., Brigante, L., Lesti, B., & Somma, F. (2006). Ex vivo accuracy of three electronic apex locators: Root ZX, Elements Diagnostic Unit and Apex Locator and ProPex. *Int Endod J*, 39(5), 408-414. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2591.2006.01095.x>
- Pommer, O., Stamm, O., & Attin, T. (2002). Influence of the canal contents on the electrical assisted determination of the length of root canals. *J Endod*, 28(2), 83-85. <https://doi.org/10.1097/00004770-200202000-00008>
- Ravanshad, S., Adl, A., & Anvar, J. (2010). Effect of working length measurement by electronic apex locator or radiography on the adequacy of final working length: a randomized clinical trial. *J Endod*, 36(11), 1753-1756. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2010.08.017>
- Real, D. G., Davidowicz, H., Moura-Netto, C., Zenkner Cde, L., Pagliarin, C. M., Barletta, F. B., & de Moura, A. A. (2011). Accuracy of working length determination using 3 electronic apex locators and direct digital radiography. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod*, 111(3), e44-49. <https://doi.org/10.1016/j.tripleo.2010.10.033>
- Rifaat, S., Aljami, A., Alshehri, T., S, T. A., Aldossary, A., Almutairi, W., M, N. A., F, A. F., & Taymour, N. (2023). The Effect of Coronal Pre-flaring and Type of Root Canal Irrigation on Working Length Accuracy Using Electronic Apex Locators. *F1000Res*, 12, 533. <https://doi.org/10.12688/f1000research.133288.3>
- Saad, A. Y., Al-Hadlaq, S. M., & Al-Katheeri, N. H. (2007). Efficacy of two rotary NiTi instruments in the removal of Gutta-Percha during root canal retreatment. *J Endod*, 33(1), 38-41. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2006.08.012>
- Saito, T., & Yamashita, Y. (1990). Electronic determination of root canal length by newly developed measuring device. Influences of the diameter of apical foramen, the size of K-file and the root canal irrigants. *Dent Jpn (Tokyo)*, 27(1), 65-72.
- Schaeffer, M. A., White, R. R., & Walton, R. E. (2005). Determining the optimal obturation length: a meta-analysis of literature. *J Endod*, 31(4), 271-274. <https://doi.org/10.1097/01.don.0000140585.52178.78>
- Shabahang, S., Goon, W. W., & Gluskin, A. H. (1996). An in vivo evaluation of Root ZX electronic apex locator. *J Endod*, 22(11), 616-618. [https://doi.org/10.1016/s0099-2399\(96\)80033-1](https://doi.org/10.1016/s0099-2399(96)80033-1)
- Sjogren, U., Hagglund, B., Sundqvist, G., & Wing, K. (1990). Factors affecting the long-term results of endodontic treatment. *J Endod*, 16(10), 498-504. [https://doi.org/10.1016/s0099-2399\(07\)80180-4](https://doi.org/10.1016/s0099-2399(07)80180-4)

- Smadi, L. (2006). Comparison between two methods of working length determination and its effect on radiographic extent of root canal filling: a clinical study [ISRCTN71486641]. *BMC Oral Health*, 6, 4. <https://doi.org/10.1186/1472-6831-6-4>
- Sunada, I. (1962). New Method for Measuring the Length of the Root Canal. *Journal of Dental Research*, 41(2), 375-387. <https://doi.org/10.1177/00220345620410020801>
- Welk, A. R., Baumgartner, J. C., & Marshall, J. G. (2003). An in vivo comparison of two frequency-based electronic apex locators. *J Endod*, 29(8), 497-500. <https://doi.org/10.1097/00004770-200308000-00002>
- Williams, C., Loushine, R. J., Weller, R. N., Pashley, D. H., & Tay, F. R. (2006). A comparison of cohesive strength and stiffness of Resilon and gutta-percha. *J Endod*, 32(6), 553-555. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2005.08.002>
- Williams, C. B., Joyce, A. P., & Roberts, S. (2006). A comparison between in vivo radiographic working length determination and measurement after extraction. *J Endod*, 32(7), 624-627. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2005.10.044>