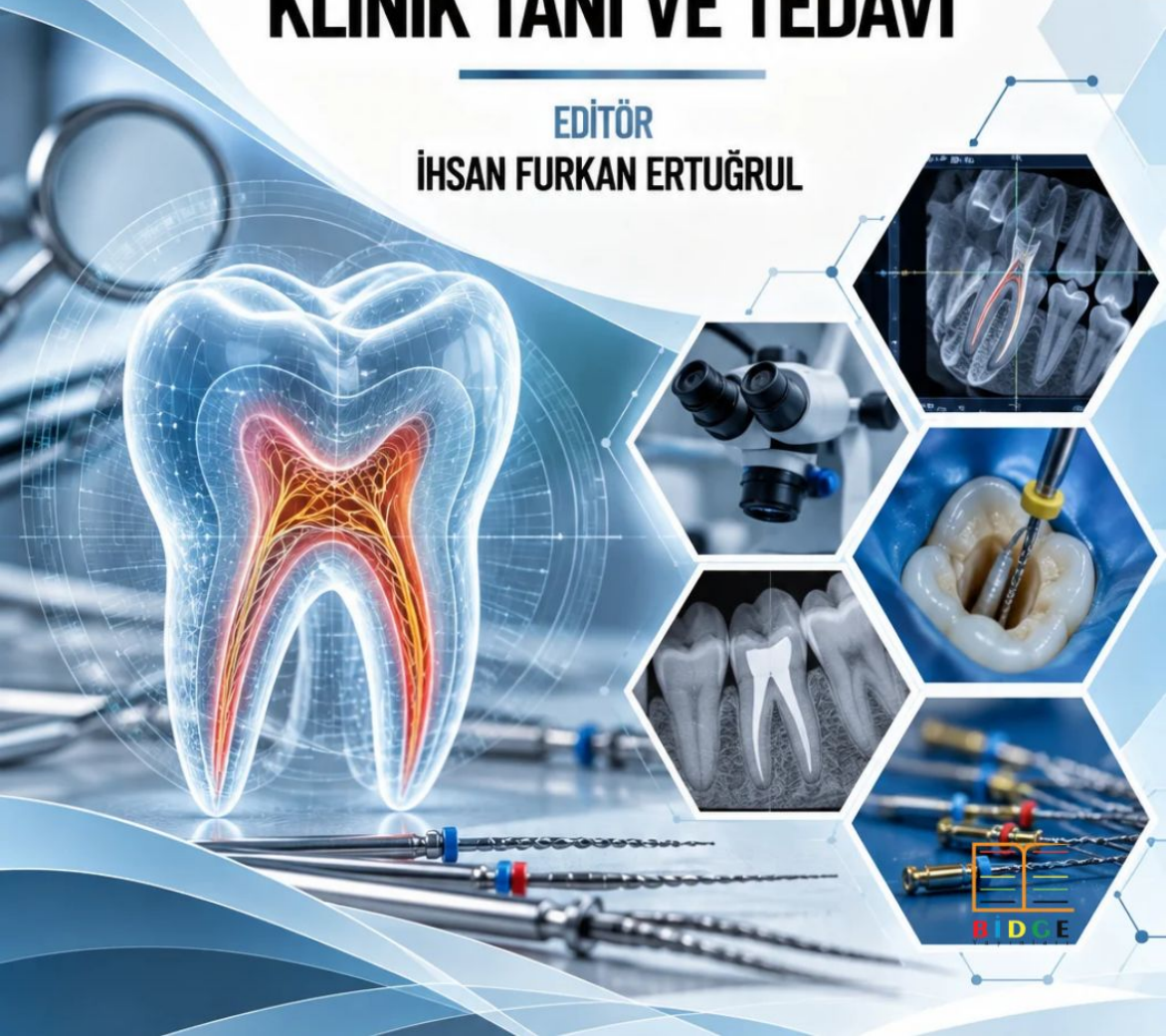
ENDODONTİDE GÜNCEL YAKLAŞIMLAR: İLERİ TEKNOLOJİLER, KLİNİK TANI VE TEDAVİ

EDİTÖR
İHSAN FURKAN ERTUĞRUL



BİDGE

BİDGE Yayınları

Endodontide Güncel Yaklaşımlar: İleri Teknolojiler, Klinik Tanı ve Tedavi

Editör: Prof. Dr. İhsan Furkan ERTUĞRUL

ISBN: 978-625-5474-59-9

1. Baskı
Sayfa Düzeni: Gözde YÜCEL
Yayınlama Tarihi: 2026-10-25
BİDGE Yayınları

Bu eserin bütün hakları saklıdır. Kaynak gösterilerek tanıtım için yapılacak kısa alıntılar dışında yayıncının ve editörün yazılı izni olmaksızın hiçbir yolla çoğaltılamaz.

Sertifika No: 71374
Yayın hakları © BİDGE Yayınları
www.bidgeyayinlari.com.tr - bidgeyayinlari@gmail.com
Krc Bilişim Ticaret ve Organizasyon Ltd. Şti.
Güzeltepe Mahallesi Abidin Daver Sokak Sefer Apartmanı No: 7/9 Çankaya / Ankara

ÖNSÖZ

Değerli Meslektaşlarım ve Okurlar, Diş hekimliğinin en dinamik ve teknolojiyle en hızlı bütünleşen uzmanlık dallarından biri kuşkusuz endodontidir. Kök kanallarının karmaşık anatomisini anlama, mikroorganizmaları uzaklaştırma ve biyouyumlu materyallerle sızdırmaz bir tıkanma sağlama yolculuğumuz, her geçen gün yeni bir bilimsel keşifle şekillenmektedir. Geçmişte klinisyenlerin sınırlarını zorlayan olgular, günümüzde biyoteknoloji, malzeme bilimi ve dijitalleşmenin sunduğu imkanlarla çok daha öngörülebilir ve konforlu süreçlere dönüşmüştür. Bu eserin ortaya çıkmasında, bilgi ve deneyimlerini büyük bir titizlikle kağıda döken, her biri alanında uzman tüm değerli yazarlarımıza en içten teşekkürlerimi sunarım. Büyük bir emeğin ve kolektif bir çabanın ürünü olan bu kitabın, tüm meslektaşlarımıza ve geleceğin diş hekimlerine faydalı bir kaynak olmasını diler; endodonti bilimine yeni ufuklar açmasını temenni ederim. Sevgi ve Saygılarımla,

Prof.Dr. İhsan Furkan ERTUĞRUL

İÇİNDEKİLER

GÖRÜNMEYENİ YÖNETMEK: ÇATLAK DİŞ SENDROMUNDA TANI, TEDAVİ VE KLİNİK YÖNETİM 1
SELİMCAN SATAR

GERİATRİK ENDODONTİ: YAŞLI HASTADA PULPA DOKUSU VE TEDAVİ YAKLAŞIMLARI 20
GAMZE MERCAN, SUDE GÜL ÖZDEMİR

ENDODONTİDE İRRİGASYON AKTİVASYON SİSTEMLERİ: ÇALIŞMA MEKANİZMALARI VE KANITA DAYALI KLİNİK DEĞERLENDİRME 33
FURKAN PALA, AZİZ ŞAHİN ERDOĞAN

ENDODONTİDE MULTİSONİK DALGA TEKNOLOJİSİ: GENTLEWAWE SİSTEMİ VE BİYOMEKANİK TEMELLERİ 63
SUDE GÜL ÖZDEMİR

ENDODONTİDE YAPAY ZEKA UYGULAMALARI: GÜNCEL BİR BAKIŞ AÇISI 88
DENİZ ERDOĞAN

BÖLÜM 1

GÖRÜNMEYENİ YÖNETMEK: ÇATLAK DİŞ SENDROMUNDA TANI, TEDAVİ VE KLİNİK YÖNETİM

Selimcan SATAR[1]

1. Giriş, Tanımlar, Terminoloji ve Epidemiyoloji

1.1. Giriş ve Tarihsel Gelişim

Çatlak diş olguları, günümüz klinik diş hekimliği uygulamasında diş kaybının çürük ve periodontal hastalıklardan sonra gelen en yaygın üçüncü temel nedeni olarak kabul edilmektedir [7, 8]. Diş dokularında oluşan mikroskobik devam bozukluklarının ve eksik kırıkların tanımlanması, tarihsel süreçte belirgin bir evrim geçirmiştir [10]. İlk olarak 1954 yılında 'tüberkül kırığı odontaljisi' (cuspal fracture odontalgia) olarak adlandırılan durum, Cameron tarafından 1964 yılında vital posterior dişlerde dentine uzanan ve pulpa dokusunu tehdit eden tamamlanmamış kırıklar için 'Çatlak Diş Sendromu' (Cracked Tooth Syndrome) terimi ile literatüre kazandırılmıştır [8, 10, 12]. Sonraki yıllarda 'fissür kırığı', 'yeşil ağaç kırığı' (greenstick fracture) ve 'saç çizgisi diş kırığı' (hairline tooth fracture) gibi çeşitli tanımlamalar

[1] Arş Gör., Mersin Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi Endodonti AD., Orcid: 0009-0004-2242-4354

kullanılmış olsa da klinik pratikte ağırlıklı olarak 'çatlak diş' (cracked tooth) terminolojisi yerleşmiştir [8, 10].

1.2. 'Sendrom' Teriminin Literatürdeki Tartışmalı Durumu

Literatürdeki mevcut kanıtlara ve güncel derlemelere göre, 'Çatlak Diş Sendromu' ifadesindeki 'sendrom' kelimesinin kullanımı akademik çevrelerde belirgin şekilde tartışmalıdır [5, 8]. Cameron (1964) tarafından önerilen tanım, birbirini izleyen belirli ve tutarlı bir semptomlar kompleksine işaret etmekteydi [12]. Ancak Ellis (2001) [13], Rivera ve Walton (2008, 2015) [14] ile Whitworth ve arkadaşları (2022) [5] gibi araştırma grupları, çatlağın tek başına spesifik bir hastalık veya 'sendrom' olmadığını; aksine pulpal ve periradiküler patolojilerin gelişmesine yol açan etiyolojik bir yapısal bozukluk (fiziksel kanal) olduğunu vurgulamışlardır. Ayrıca, her çatlak dişte tıp dilindeki klasik sendrom tanımına uyan patolojik ve sabit semptom kümelerinin gözlenmemesi, hastaların önemli bir kısmının tamamen asemptomatik kalabilmesi veya semptomların orofasiyal ağrı ve baş ağrılarını taklit edecek kadar değişkenlik göstermesi nedeniyle 'sendrom' terimi yanıltıcı kabul edilmekte ve klinik terminolojide 'çatlak diş' (cracked tooth) tanımı tercih edilmektedir [5, 8, 10].

1.3. Tanımlar ve Terminoloji

Avrupa Endodonti Derneği (European Society of Endodontology - ESE) ve Amerikan Endodontistler Birliği (American Association of Endodontists - AAE) standart tanımlamalarına göre çatlak diş; 'vital bir dişin kuronundan başlayıp subgingival yöne doğru ilerleyen, bilinmeyen bir derinlik ve uzanıma sahip olan, pulpa dokusunu dahil edebilen tamamlanmamış/eksik bir longitudinal dentin kırığı' olarak tanımlanmaktadır [1, 2, 3, 5]. Çatlak hattı genellikle mesiodistal doğrultuda uzanmakta ve bir veya her iki marjinal sırtı içermektedir [5, 8, 10].

1.4. Epidemiyoloji ve Prevalans

Yetişkin popülasyonda çatlak diş prevalansı çalışılan örnekleme bağlı olarak %10 ile %70 arasında geniş bir aralıkta rapor edilmiştir (Krell ve Rivera 2007'den aktaran Whitworth [5]). Çatlak diş olgularının insidansı özellikle 45-60 yaş grubundaki bireylerde en yüksek seviyeye ulaşmaktadır [3, 8]. Cinsiyet dağılımına bakıldığında belirgin bir fark saptanmamakla birlikte, parafonksiyonel alışkanlığı olan bireylerde risk anlamlı derecede yüksektir [3, 5]. Diş tiplerine göre dağılım incelendiğinde, en sık etkilenen dişlerin mandibular birinci molar dişler (%35-45) olduğu, bunu sırasıyla maksiller premolarlar, maksiller molarlar ve mandibular ikinci molarların izlediği bildirilmiştir [3, 8, 10]. Mandibular birinci molar dişlerin en yüksek insidansa sahip olması; ağızda ilk süren kalıcı molar olmaları nedeniyle uzun süreli çiğneme yüküne ve restoratif girişimlere maruz kalmalarıyla açıklanmaktadır [8, 10]. Ayrıca maksiller birinci molar dişin belirgin mesiopalatinal tüberkülünün, mandibular moların santral fossasına yaptığı 'kama etkisi' mekanik bir risk faktörüdür [10]. Restorasyonsuz (intakt) dişlerde de çatlak prevalansının arttığı son epidemiye dayalı gözlemlerde bildirilmiştir [4, 5].

2. Sınıflama ve Tiplerin Prognozu

2.1. Amerikan Endodontistler Birliği (AAE) Sınıflaması

Amerikan Endodontistler Birliği (AAE), boyuna diş kırıklarını tutulan dokuların derinliği, kırık hattının yönü ve segmentlerin ayrılma durumuna göre 5 ana kategoride sınıflandırmıştır [1, 3, 5, 8, 10]:

1. Mine Çatlakları / Aşınma Çizgileri: Sadece mine dokusu ile sınırlı, dentine geçmeyen yüzeysel mikroskobik çatlaklardır. Asemptomatiktir, ışıkla saptanır ve tedavi gerektirmez. Prognoz mükemmeldir [8, 10].

2. Kırık Tüberkül: Dişin tüberkülünden başlayıp servikal bölgeye veya gingival marjinin hemen altına doğru uzanan, mine ve dentini içeren kırıklardır. Çiğneme sırasında hafif-orta derecede ağrı oluşturabilir. Kırık tüberkül uzaklaştırılıp diş tüberkül kaplamalı restorasyonla restore edilebilir. Prognoz son derece iyidir [5, 8, 10].

3. Çatlak Diş: Kuron yüzeyinden başlayıp subgingival yönde mesiodistal uzanım gösteren, ancak segmentlerin henüz tamamen ayrılmadığı eksik (incomplete) kırık hattıdır. Pulpal ve periodontal tutuluma bağlı olarak semptomlar son derece değişkendir. Prognoz çatlağın derinliğine ve zamanında yapılan müdahaleye bağlı olarak değişkendir [3, 5, 8, 10].

4. Ayrılmış Diş: Çatlağın ilerleyerek diş parçalarının mesiodistal veya bukkolingual eksende tamamen ikiye ayrıldığı durumdur. İki ayrı oynak segment mevcuttur. Çiğnemede şiddetli ağrı görülür. Genellikle çekim veya çok köklü dişlerde hemiseksiyon/kök rezeksiyonu gerektirir. Prognoz kötüdür/ümitsizdir [1, 3, 8, 10].

5. Dikey Kök Kırığı: Kök dokusundan (apikal veya servikal) başlayıp koronale doğru uzanan, genellikle endodontik tedavili dişlerde görülen apeks tabanlı kırık hattıdır. Çoğunlukla dar ve derin periodontal cep ve çift taraflı sinüs traktı ile karakterizedir. Prognoz ümitsizdir ve çekim tek seçenektir [1, 3, 5, 8].

2.2. Clark ve Caughman Prognoz Sınıflaması

Çatlak dişlerin derinliğine göre klinik prognozu Clark ve Caughman tarafından 4 seviyede kategorize edilmiştir (Clark ve Caughman'dan aktaran Raj ve Singh [10]): Mükemmel prognoz (dentin içiyle sınırlı, pulpayı etkilemeyen tüberkül kırıkları), İyi prognoz (kuronda mesiodistal uzanan ve pulpaya ulaşmayan dikey çatlaklar), Kötü prognoz (dentine ve pulpa odasına ulaşan ancak kuron sınırında kalan çatlaklar) ve Ümitsiz prognoz (pulpa tabanını

aşarak kök dokusuna geçen ve derin periodontal defekt oluşturan dikey kırıklar) [10].

3. Etiyoloji ve Patofizyoloji

3.1. İyatrojenik Olmayan Faktörler

Çatlak diş etiyolojisi multifaktöriyel olup içsel ve dışsal etkenlerin etkileşimi sonucu meydana gelir [8, 10, 11]. Yaşlanma en temel risk faktörlerinden biridir; yaşla birlikte dentinin tübüler sklerozu artar, esneklik modülü ve yorulma direnci azalır [8, 10, 11]. Bireylerdeki gece bruksizmi, diş sıkma, sert gıdaları (fındık, buz, kemik) çiğneme ve ani sıcaklık değişimlerine yol açan termal siklus alışkanlıkları diş dokularında siklik stres birikimine yol açar [3, 8, 10, 11]. Anatomik olarak dik tüberkül eğimleri, derin gelişimsel oluklar ve boğumlu mine (gnarled enamel) ile mine tuftlarının mikroskobik zayıf noktaları çatlak başlangıcını kolaylaştırır [8, 11]. Pandemi dönemi ve sosyoekonomik stres artışının da bruksizmi tetikleyerek çatlak diş görülme sıklığını artırdığı bildirilmiştir [11].

3.2. İyatrojenik Faktörler

Hekim kaynaklı faktörler arasında geniş kavite hazırlıkları esnasında marjinal sırtların ve oklüzal dokunun aşırı uzaklaştırılması, dişin rijitliğini belirgin şekilde düşürür [8, 10]. Derin kavitelerde dolgu kondansasyonu sırasında uygulanan aşırı mekanik basınç ve dolgu matreyalinin genleşmesi mekanik gerilmelere yol açar [8, 10]. Endodontik tedaviler sırasında kök kanallarının aşırı genişletilmesi (over-enstrumantasyon), kavisli kanallarda kontrolsüz döner alet kullanımı ve lateral/dikey kompresyonla yapılan kanal dolgusu işlemleri kök dentininde mikro-çatlaklar oluşturabilir [5, 8, 10]. Baş-boyun radyoterapisi alan hastalarda tükürük akışının azalması ve dentin-mine birleşiminin (DEJ) yapısının bozulması diş dokusunun kırılganlaşmasına (brittleness) neden olur [8].

3.3. Patofizyoloji ve Hidrodinamik Teori

Çatlak ilerlemesi, çiğneme kuvvetlerinin zayıflamış diş yapısında veya stres konsantrasyon noktalarında (çatlak ucu) birikmesiyle oluşur [2, 8, 11]. In vitro ve Sonlu Elemanlar Analizi (FEA) çalışmalarında, çatlak derinliği arttıkça dişin taşıma kapasitesinin ve nihai dayanıklılığının (ultimate strength) anlamlı olarak azaldığı gösterilmiştir [2]. Diş dokusu sağlamken kırık palatal tüberkülden başlarken, çatlak dişlerde kırık başlangıcı doğrudan çatlak ucundaki gerilme konsantrasyonuna kayar [2]. Semptomların mekanizması Brännström'ün Hidrodinamik Teorisi ile açıklanır [10]. Çiğneme esnasında dişe yük geldiğinde çatlak segmentleri birbirinden uzaklaşır; yük kaldırıldığında segmentler hızla geri esner (recoil effect). Bu mikro hareket dentin tübüllerindeki sıvının ani hareketine neden olarak dentin-pulpa sınırındaki A-delta sinir liflerini uyarır ve karakteristik 'baskı kaldırılırken duyulan ani keskin ağrı' (rebound pain) oluşur [5, 8, 10]. Çatlak derinleştikçe bakteri ve toksinlerin pulpaya ulaşmasıyla C-lifleri uyarılır ve künt, spontan ağrı gelişir [5, 8, 10].

4. Klinik ve Radyografik Tanı

4.1. Klinik Muayene Yöntemleri ve Tanısal Doğruluk

Çatlak dişlerin tanısı son derece güçtür ve tek bir testle kesin tanı konulamaz [4, 5, 8, 11]. Süreç kapsamlı bir anamnez ve sistematik muayene gerektirir:

• Anamnez ve Semptom Değerlendirmesi: Hastalar genellikle sert gıda ısırma sırasında veya sonrasında ani keskin ağrı ve soğuk hassasiyeti bildirir [3, 5, 8, 10].

• Görsel Muayene ve Büyütme (Magnifikasyon): Operasyon mikroskobu ve loupe kullanımı çatlak tespitinde kritik role sahiptir [4, 5, 8, 11]. In vitro deneysel bir tanısal doğruluk çalışmasında, düşük büyütmeli mikroskobun tanısal doğruluğu %52.2 iken, yüksek büyütmeli mikroskobun özgüllüğü %92.9-%96.7 ve pozitif tahmin değeri %96.7 olarak bulunmuştur [4, 11].

• Transilüminasyon (Fiber-Optik Transilüminasyon - FOTI): Diş yüzeyine dik uygulanan ışığın çatlak hattında kırılması esasına dayanır [4, 5, 8, 11]. Görsel yöntemler arasında en yüksek tanısal doğruluk (%65.3) ve duyarlılığa (%68.8) sahiptir [4, 11]. Ancak yüzeysel çatlak çizgileri (craze lines) ile derin dentin çatlaklarını ayırt etmede yetersiz kalabilir [4, 11].

• Boyama Yöntemi: Metilen mavisi veya gentian viyole uygulanmasıdır. Eski restorasyonların kaldırılmasını gerektirir, 2-5 gün geçici dolgu takibi gerektirebilir ve diş dokusunda estetik renklenme yapma riski taşır [5, 8, 11].

• Isırma Testleri: Tooth Slooth, pamuk pelet veya lastik diskler kullanılarak her bir tüberkül ayrı ayrı test edilir. Isırma kuvveti kaldırıldığında oluşan 'rebound pain' çatlak için karakteristik bulgudur [5, 8, 10, 11].

• Periodontal Sondalama: Derin, dar ve izole bir periodontal cebin varlığı (>4-6 mm), çatlağın radiküler uzanım gösterdiğinin ve kök kırığının patognomonik bir klinik belirtisidir [1, 3, 5, 8, 11].

4.2. Radyografik İnceleme (Periapikal / Bitewing ve CBCT)

Geleneksel periapikal ve bitewing radyografiler, X-ışınının çatlak düzlemine tam paralel geçmediği durumlarda çatlak hattını doğrudan gösteremez [1, 5, 8, 11]. Ancak ilerlemiş olgularda lokalize marjinal kemik kaybı veya 'J-şekilli' periradiküler radyolüsensi gibi ikincil bulguları gösterebilir [1, 8, 11]. Konik Işınlı Bilgisayarlı Tomografi (CBCT), üç boyutlu görüntü sunarak klasik radyografilere göre kemik defektlerini belirlemede üstünlük sağlasa da, voksel boyutu sınırlamaları ve intraoral metal restorasyonların oluşturduğu artefaktlar nedeniyle erken aşamadaki dar dentin çatlaklarını saptamada yetersiz kalmaktadır [1, 5, 9, 11]. Retrospektif bir klinik çalışmada, periapikal radyografiler ve CBCT'nin çatlak ve dikey kök kırıklarını doğrudan tespit etme

kapasiteleri karşılaştırılmış, CBCT'nin periodontal kemik yıkımını değerlendirmede daha hassas olduğu ancak metal artefaktlarının görüntü kalitesini kısıtladığı doğrulanmıştır [1].

4.3. Gelişen ve Yenilikçi Tanı Yöntemleri

Son yıllarda tanısal belirsizlikleri aşmak amacıyla gelişen teknolojiler araştırmaların odağı olmuştur [8, 9, 11]:

1. Kontrastlı Konik Işınlı Bilgisayarlı Tomografi (Contrast-Enhanced CBCT): Meglumin diatrizoat gibi kontrast maddelerin çatlak hattına penetre ettirilmesiyle CBCT görüntülerinde çatlağın derinliği ve yönü belirgin hale getirilir [8, 9, 11].

2. Süpürme Kaynaklı Optik Koherens Tomografi (Swept-Source Optical Coherence Tomography (SS-OCT)): 1300 nm yakın kızılötesi dalga boyunda düşük koheranslı interferometri ile çalışan tahribatsız bir görüntüleme yöntemidir. 10 μm çözünürlükle mikro çatlakları gösterebilir; ancak penetrasyon derinliği kuronda 2-3 mm ile sınırlıdır [8, 10, 11].

3. Kantitatif Işık Kaynaklı Floresans (QLF): Florışıl kayıp ($\Delta Fmax > 15$ veya $\Delta Rmax > 30$) parametreleri ile emaye çatlak derinliğini nicel olarak ölçer ve %60 olasılıkla kanal tedavisi ihtiyacını öngörebilir [5, 11].

4. SWIFT Manyetik Rezonans Görüntüleme (SWIFT-MRI): Metal artefaktlarından etkilenmeden 20 μm genişliğindeki çatlakları ve sert/yumuşak dokuları eş zamanlı tespit edebilir; ancak yüksek cihaz maliyeti nedeniyle klinikte yaygınlaşmamıştır [11].

5. Yapay Zekâ Destekli Optik ve Radyografik Modeller: CNN ve DeepLabv3+ derin öğrenme algoritmaları optik fotoğraflar üzerinden %90'ın üzerinde doğrulukla otomatize çatlak tespiti yapabilmektedir [10, 11].

Tablo 1: Çatlak Diş Tanı Yöntemlerinin Klinik Özellikleri ve Doğruluk Oranları

Tanı Yöntemi	Duyarlılık/Özgüllük	Avantajları	Dezavantajları ve Sınırlılıkları
Yüksek Büyütmeli Mikroskop (DOM) [4, 11]	Özgüllük:%92.9-%96.7 Tanısal Doğruluk: %52-65 [4]	Direkt görselleştirme, yüksek özgüllük	Derinliği değerlendiremez, pahalı ekipman
Transilüminasyon (FOTI) [4, 11]	Duyarlılık: %68.8 Tanısal Doğruluk: %65.3 [4]	Hızlı,non-invaziv, pratik	Craze line ile dentin çatlağını karıştırabilir
Periapikal Radyografi [1, 11]	Doğrudan tespit: Çok düşük [1]	Kolay ulaşılabilir, ucuz	Çatlağı doğrudan göstermez, sadece ikincil kemik kaybı
Kontrastlı / Standart CBCT [1, 9, 11]	Duyarlılık: Orta Kemik defektinde yüksek [1]	3B kemik yıkımı ve kırık uzanımı	Metal artefaktları kısıtlar, erken mikro-çatlağı kaçırır

5. Tedavi Planlaması ve Karar Algoritması

5.1. Tedavi Kararını Etkileyen Faktörler

Çatlak dişlerin tedavi planlamasında kararı etkileyen en kritik parametreler şunlardır [3, 5, 7, 10]:

1) Pulpa teşhisi (vital/reversible pulpitis vs. irreversibl pulpitis/nekroz),

2) Çatlağın derinliği ve radiküler uzanımı,

3) Periodontal dokuların durumu (derin izole cep varlığı),

4) Kalan diş dokusu miktarı ve oklüzal yükler [3, 5, 7, 10].

5.2. Klinik Karar Algoritması

Sistematik derleme ve meta-analiz verilerine dayanan adım adım karar algoritması aşağıda özetlenmiştir [3, 5, 7]:

• Adım 1: Asemptomatik & Vital Pulpa → Koruyucu Takip ve Oklüzal Düzenleme. Ferracane ve ark.'ndan aktaran Zhang ve ark. [3] ile Whitworth ve ark. [5], asemptomatik vital çatlak dişlerin %80'inin 3 yıl boyunca stabil kaldığını bildirmiştir.

• Adım 2: Semptomatik Reversible Pulpitis & Kuronla Sınırlı Çatlak → Tüberkül Kaplamalı Direkt/İndirekt Restorasyon veya Aşamalı Splintleme (Geçici Kuron) sonrası Daimi Onlay/Kuron [3, 5, 7].

• Adım 3: İrreversibl Pulpitis / Pulpa Nekrozu & Restore Edilebilir Kök → Ortograt Kanal Tedavisi (RCT) + İntraorifis Biyo-seramik Bariyer + Tam Kuron Restorasyonu [3, 5, 7].

• Adım 4: Derin Periodontal Cep (>4-6 mm) VEYA Pulpa Tabanını Aşan Radiküler Çatlak VEYA Tam Ayrılmış Diş (Split Tooth) → Çekim veya Cerrahi Hemiseksiyon/Radektomi [1, 3, 5, 7, 10].

6. Tedavi Seçenekleri

6.1. Koruyucu Yaklaşımlar ve İzlem (Monitoring)

Semptom göstermeyen ve vitalitesini koruyan hafif çatlaklarda agresif restoratif girişimler yerine takip önerilmektedir [3, 5, 7]. National Dental Practice-Based Research Network (PBRN) verilerine göre (Ferracane et al. 2021, 2022'den aktaran Whitworth [5] ve Zhang [3]), asemptomatik ve takibe alınan dişlerin 3 yıllık süreçte %80 oranında herhangi bir müdahale gerektirmeden fonksiyonunu sürdürdüğü saptanmıştır.

6.2. Vital Pulpa Tedavisi ve Geçici / Aşamalı Yaklaşımlar (Interim / Multi-Aşama Tedavileri)

Reversible pulpitis teşhisi konulan vital çatlak dişlerde pulpa canlılığını korumak amacıyla tek aşamalı veya çok aşamalı restoratif protokoller uygulanır [5, 8]:

• Ekstra-koronal Splintleme: Paslanmaz çelik ortodontik bantlar, bakır halkalar veya suprakoronal direkt kompozit splint (DCS) uygulanarak tüberkül esnemeleri engellenir [5, 8]. Ortodontik bantların 1-3 ay kullanımı %83-%100 vakada semptomları geriletir; ancak daimi restorasyon geciktirilirse pulpal nekroz riski artar (5 yıllık pulpa vitalitesi daimi kuronda %81 iken, bant sabit kaldığında %37'ye düşer) [5].

• Geçici Kuron Uygulaması: Oklüzal koruma ve stabilizasyon sağlar. Guthrie ve DiFiore (1991'den aktaran Whitworth [5]), 2 haftalık geçici kuron takibi sonrası vakaların %89'unun vital ve asemptomatik kaldığını bildirmiştir.

• İki Yönlü Splintleme: Ekstra-koronal bantlama ile intra-koronal bonded kompozit restorasyonunun kombine edilmesidir [5].

6.3. Kanal Tedavisi (Root Canal Treatment - RCT) Stratejileri

İrreversibl pulpitis veya nekroz gelişen çatlak dişlerde endodontik tedavi zorunludur [3, 5, 7]. Endodontik giriş kavitesi açıldığında tabandaki çatlak hatları mikroskop altında değerlendirilmeli, kanal dolgusu esnasında aşırı kompaksiyon kuvvetlerinden kaçınılmalıdır [5]. Kanal dolgusunu takiben koronal sızıntıyı ve çatlak ilerlemesini önlemek için kanal ağızlarına intraorifis rezin veya biyo-seramik (Biodentine) bariyer yerleştirilmesi uzun dönem başarısını belirgin şekilde artırmaktadır [5, 7].

6.4. Restorasyon Seçimleri: Direkt Restorasyon vs. Tam Kuron

Sistematik derleme ve meta-analiz sonuçları (Zhang et al. 2024 [3] ve JCDE Umbrella Review [7]), restorasyon seçiminin dişin ve pulpanın kaderini doğrudan belirlediğini kanıtlamıştır:

• Vital Pulpalı Çatlak Dişlerde (CT-VDP): Tüberkül kaplaması olmayan direkt kompozit restorasyonlar, tam kuron

restorasyonlarına kıyasla pulpal komplikasyon riskini 3.2 kat (RR = 3.2, %95 GA: 1.51-6.82, p = 0.002) ve diş çekim riskini 8.1 kat (RR = 8.1, %95 GA: 1.05-62.5, p = 0.045) artırmaktadır [3, 7].

• Kanal Tedavili Çatlak Dişlerde (CT-RCT): Kanal tedavisi görmüş çatlak dişlerin tam kuron yapılmaması durumunda diş çekim riski, tam kuron yapılanlara göre 11.3 kat daha yüksektir (RR = 11.299, %95 GA: 4.25-30.0, p < 0.001) [3, 7]. Bu nedenle kanal tedavili çatlak dişlerde tam tüberkül kaplamalı kuron restorasyonları kesinlikle tavsiye edilmektedir [3, 7].

6.5. Cerrahi Yaklaşımlar ve Çekim

Çatlağın kök ortasına ulaştığı, derin periodontal cep oluşturduğu veya segmentlerin ayrıldığı vakalarda konservatif tedavi başarısız olur ve dişin çekimi gereklidir [1, 3, 5, 7]. Çok köklü dişlerde çatlak tek bir kökle sınırlı ise hemiseksiyon veya kök rezeksiyonu bir alternatif olabilir [5, 10].

7. Komplikasyon Yönetimi

Çatlak dişlerin takibinde ve tedavisinde karşılaşılan başlıca komplikasyonlar şunlardır [3, 5, 7, 8]:

1. İrreversibl Pulpitis ve Pulpa Nekrozu: Reversible pulpitis tanısıyla kuron yapılan dişlerin %21'inde ilk 2-5 ay içinde pulpa nekrozu gelişebilmektedir (Krell ve Rivera 2007'den aktaran Whitworth [5]). Bu durumda kuron sökülmeden oklüzalden giriş kavitesi açılarak endodontik tedavi tamamlanır [5].

2. Periodontal Yıkım ve Kemik Kaybı: Çatlak hattından bakteriyel sızıntı sonucu lokalize periodontal cep ve kemik kaybı gelişebilir. Derin periodontal cep varlığı (>4 mm), çekim riskini katlayarak artırır [3, 5, 7].

3. Dikey Kök Kırığına (VRF) İlerleme: Erken tüberkül kaplaması yapılmayan vakalarda oklüzal yükler çatlağı derinleştirerek dişi ayrılmış dişe (split tooth) veya VRF'ye dönüştürebilir [1, 3, 8].

8. Prognoz ve Uzun Dönem Sonuçlar

8.1. Vital ve Kanal Tedavili Çatlak Dişlerde Sağkalım Oranları

Zhang ve arkadaşları (2024) tarafından yapılan kapsamlı meta-analiz sonuçlarına göre [3, 7]:

• Vital Pulpalı Çatlak Dişler (CT-VDP): 1-6 yıllık diş sağkalım oranı (TSR) %92.8 - %97.8; 1-3 yıllık pulpa sağkalım oranı (PSR) %85.6 - %90.4; klinik başarı oranı (SR) %80.6 - %89.9 arasındadır [3, 7].

• Kanal Tedavili Çatlak Dişler (CT-RCT): 1-2 yıllık diş sağkalım oranı %90.5 - %91.1; 1-4 yıllık başarı oranı %83.0 - %91.2'dir [3, 7]. Tam kuron yapılan kanal tedavili çatlak dişlerde 5 yıllık sağkalım %84.1 ile %97.0 arasında rapor edilmiştir [5, 7].

8.2. Prognozu Etkileyen Faktörler ve 'Iowa İndeksi'

Prognozu olumsuz etkileyen en güçlü bağımsız risk faktörleri:

1) Başlangıçta derin periodontal cep varlığı (>4-6 mm) (çekim riskini belirgin artırır),

2) Çatlağın pulpa tabanına veya kök orifislerine uzanması (radicular extension),

3) Birden fazla çatlak hattı varlığı,

4) Bruksizm ve ağır oklüzal temaslar,

5) Distal marjinal sırt tutulumudur [3, 5, 7]. Krell ve Caplan (2018'den aktaran Whitworth [5]), periradiküler tanı, distal marjinal çatlak ve periodontal cep (≥5 mm) parametrelerini birleştirerek 'Iowa İndeksi' adı verilen bir prognoz skoru oluşturmuşlardır [5].

9. Önleme

Çatlak diş oluşumunu ve var olan çatlakların ilerlemesini önlemek için alınacak tedbirler [8, 10]:

• Oklüzal Erken Temasların Düzenlenmesi: Tüberkül üzerindeki prematüre temasların kaldırılması ve tüberkül koruyucu matrislerin oluşturulması [5, 8].

• Koruyucu Gece Plağı: Bruksizm ve diş sıkma hastalarında gece plağı kullanımı mekanik yük dağılımını dengeler [8, 10].

• Restoratif Biyomimetik Önlemler: Geniş kavitelerde tüberkül kaplamalı (onlay/overlay) adezif tasarımların tercih edilmesi; koronal dokunun maksimum korunması [5, 8].

• Hastaların Eğitilmesi: Şişe kapağı açma, kalem ısırma ve sert kabuklu gıdaları dişle kırma gibi zararlı oral alışkanlıklardan kaçınılması [8, 10].

10. Gelecek Perspektifleri ve Literatürdeki Boşluklar

Literatürdeki mevcut boşluklar; standartlaştırılmış evrensel klinik protokollerin olmaması, randomize kontrollü klinik çalışmaların (RCT) kısıtlılığı ve 10 yılı aşan uzun dönemli prospektif izlem verilerinin eksikliğidir [3, 5, 7, 11]. Gelecek perspektiflerinde ise, yapay zekâ destekli otomatize mikro-çatlak tespiti (CNN modelleri), yüksek çözünürlüklü düşük maliyetli dekatörlere sahip yakın kızılötesi (NIR) görüntüleme sistemleri, kontrastlı tomografi ve biyomimetik restoratif materyaller ön plana çıkmaktadır [7, 10, 11].

11. Kısa Klinik Vaka Örnekleri ve Mesajlar

Klinik Vaka 1: Vital Çatlak Dişte Konservatif Onlay Tedavisi (Kurgusal)

48 yaşında erkek hasta, sol alt çenede çiğneme esnasında ani ve keskin ağrı (rebound pain) şikayetiyle başvurdu.

Klinik İnceleme: Mandibular birinci molar dişinde (#36) oklüzalden mesial marjinal sırta uzanan çatlak hattı saptandı. Sondlamada periodontal cep yok. Soğuk testinde geçici hassasiyet (reversible pulpitis).

Tedavi & Seyir: Oklüzal erken temaslar düzeltildi, dişe tüberkül kaplamalı direkt kompozit onlay restorasyonu yapıldı. 2 yıllık takipte hasta tamamen asemptomatik ve pulpa vitalitesini korumaktadır.

Klinik Vaka 2: İrreversibl Pulpitisli Çatlak Dişte RCT ve Tam Kuron (Kurgusal)

52 yaşında kadın hasta, sağ üst çenede gece başlayan ve kendiliğinden devam eden şiddetli ağrı şikayetiyle başvurdu.

Klinik İnceleme: Maksiller birinci premolar dişinde (#14) derin mesiodistal çatlak saptandı. Termal testte uzamış şiddetli ağrı (irreversibl pulpitis). Periodontal sondlama normal.

Tedavi & Seyir: Ortograt kanal tedavisi uygulandı. Kanal ağızlarına Biodentine intraorifis bariyer yerleştirilerek zirkonyum tam kuron ile restore edildi. 3 yıllık izlemde periapikal dokular sağlıklı ve fonksiyon tamdır.

Klinik Vaka 3: Dikey Kök Kırığı (VRF) ve Çekim Kararı (Kurgusal)

58 yaşında erkek hasta, sağ alt çenede diş etinde şişlik ve çiğneyememe şikayetiyle başvurdu.

Klinik İnceleme: Mandibular ikinci molar dişinde (#47) mesiobukkalde 8 mm derinliğinde dar, izole periodontal cep ve apikal sinüs traktı saptandı. Radyografide J-şekilli kemik kaybı görüldü.

Tanı & Tedavi: Dikey Kök Kırığı (VRF) / Ayrılmış Diş (Split Tooth) tanısı konuldu. Dişin koronal ve radiküler restorasyonu mümkün olmadığından çekim ve dental implant tedavisi uygulandı.

ÖNEMLİ MESAJLAR

1. Çatlak Diş Sendromu erken tanı gerektiren dinamik ve sinsi bir klinik durumdur; 'sendrom' terimi literatürde tartışmalı olup çatlak bir hastalık değil patolojilerin etiyolojik nedenidir.

2. Yüksek büyütmeli mikroskop (DOM) ve transilüminasyon (FOTI) tanısal hassasiyeti belirgin artırır; ancak kesin tanı çoklu klinik testlerin kombinasyonu ile konur.

3. Vital çatlak dişlerde tüberkül kaplaması olmayan direkt restorasyonlar, tam kuronlara göre pulpal komplikasyon riskini 3.2 kat, çekim riskini 8.1 kat artırır.

4. Kanal tedavisi yapılmış çatlak dişlerde tam kuron uygulanmaması, diş çekim riskini 11.3 kat artırmaktadır ($p < 0.001$). Tam kuron kesinlikle önerilir.

5. Derin periodontal cep varlığı (>4-6 mm) ve kök orifislerini aşan radiküler çatlaklar olumsuz prognozun ve diş kaybının en güçlü göstergeleridir.

Kaynakça

1. Mareque-Bueno MS, Nagendrababu V, Dummer PMH, Ruíz-Piñón M, Arias-Moliz T, Uroz-Torres D, Garrido-Parada S, Martín-Biedma B, Castelo-Baz P. A retrospective clinical study to compare the ability of cone-beam computed tomographic images and periapical radiographs to reveal cracked teeth, split teeth, and teeth with vertical root fractures. J Am Dent Assoc. 2024;155(8):614-624. [Retrospektif Klinik Çalışma]

2. In vitro and Finite Element Analysis Study. Effects of crack depth and width on the ultimate strength and stress distribution of human first premolars to guide clinical treatment decisions. J Prosthet Dent. 2026;136(2):196-206. [In Vitro ve Sonlu Elemanlar Analizi (FEA) Çalışması]

3. Zhang S, Xu Y, Ma Y, Zhao W, Jin X, Fu B. The treatment outcomes of cracked teeth: A systematic review and meta-analysis. J Dent. 2024;142:104843. [Sistematik Derleme ve Meta-Analiz]

4. Diagnostic Accuracy Study. Diagnostic accuracy of four commonly used visual tests in diagnosing cracked teeth using micro-CT as gold standard. Clin Exp Dent Res. 2025;11(1):e70138. [Tanısal Doğruluk Çalışması / In Vitro Deney]

5. Whitworth J, Gavriil D, Kakka A, Del Fabbro M. Management of cracked teeth: A narrative review of current evidence and clinical approaches. Clin Exp Dent Res. 2022;8(5):1218-1235. [Narratif Derleme]

6. Case Report and Biomechanical Overview. CAD/CAM overlay and restorative management of cracked teeth. Clin Case Rep Res. 2026;14(2):e5525524. [Olgu Sunumu ve Derleme]

7. Umbrella Review Study. Clinical results and complication rates of various therapeutic modalities in patients with cracked tooth syndrome: An umbrella review of systematic reviews. J Conserv Dent Endod. 2025/2026;29(1):11-22. [Şemsiye Derleme / Umbrella Review]

8. Li F, Diao Y, Wang J, Hou X, Qiao S, Kong J, Sun Y, Lee ES, Jiang HB. Review of cracked tooth syndrome: Etiology, diagnosis, management, and prevention. Pain Res Manag. 2021;2021:3788660. [Derleme Article]

9. Hu Z, Wang T, Liang J, Aihemati G, Cao Y, Gao A, Yuan M, Miao L, Lin Z. Diagnosis of cracked tooth using contrast-enhanced cone-beam computed tomography. Dentomaxillofac Radiol. 2021;50(5):20210003. / Heliyon. 2024;10:e31036. [Deneysel ve Tanısal Görüntüleme Çalışması]

10. Raj S, Singh A. Cracked tooth syndrome: A diagnostic dilemma - A mini review. Front Oral Health. 2025;6:1572665. [Mini Derleme / Mini Review]

11. Zeng J, Liu Y, Zhang C, Xu S. Emerging detection technologies for cracked teeth: A systematic review and future perspectives. Clin Oral Investig. 2026;30(4):206. [Sistematik Derleme]

12. Cameron CE. Cracked-tooth syndrome. JADA. 1964;68(3):405-411. [Cameron 1964'ten aktaran Li ve ark. [8], Raj ve Singh [10], Whitworth [5]]

13. Ellis SG. Incomplete tooth fracture - proposal for a new definition. Br Dent J. 2001;190(8):424-428. [Ellis 2001'den aktaran Li ve ark. [8]]

14. Rivera EM, Walton RE. Longitudinal tooth cracks and fractures: an update and review. Endod Topics. 2015;33(1):14-42. [Rivera ve Walton 2015'ten aktaran Mareque-Bueno ve ark. [1], Whitworth [5]]

15. Krell KV, Rivera EM. A six year evaluation of cracked teeth diagnosed with reversible pulpitis: Treatment and prognosis. J Endod. 2007;33(12):1405-1407. [Krell ve Rivera 2007'den aktaran Whitworth [5], Zhang ve ark. [3]]

16. Krell KV, Caplan DJ. 12-month success of cracked teeth treated with orthograde root canal treatment. J Endod. 2018;44(4):543-548. [Krell ve Caplan 2018'den aktaran Mareque-Bueno ve ark. [1], Whitworth [5]]

17. Opdam NJ, Roeters JJ, Loomans BA, Bronkhorst EM. Seven-year clinical evaluation of painful cracked teeth restored with a direct composite restoration. J Endod. 2008;34(7):808-811. [Opdam ve ark. 2008'den aktaran Whitworth [5], Zhang ve ark. [3]]

18. Davis MC, Shariff SS. Success and survival of endodontically treated cracked teeth with radicular extensions: A 2- to 4-year prospective cohort. J Endod. 2019;45(7):848-855. [Davis ve Shariff 2019'dan aktaran Whitworth [5], Mareque-Bueno ve ark. [1]]

19. Ferracane JL, Hilton TJ, Funkhouser E, et al. Baseline characteristics as 3-year predictors of tooth fracture and crack progression: Findings from the national dental practice-based research network. J Am Dent Assoc. 2021;152(2):146-156. [Ferracane ve ark. 2021'den aktaran Whitworth [5], Zhang ve ark. [3]]

20. Berman LH, Kuttler S. Fracture necrosis: diagnosis, prognosis assessment, and treatment recommendations. J Endod. 2010;36(3):442-446. [Berman ve Kuttler 2010'dan aktaran Whitworth [5], Hu ve ark. [9]]

BÖLÜM 2

GERİATRİK ENDODONTİ: YAŞLI HASTADA PULPA DOKUSU VE TEDAVİ YAKLAŞIMLARI

Gamze MERCAN[1]

Sude Gül Özdemir[2]

GİRİŞ[1]

Dünya Sağlık Örgütü (DSÖ) verilerine göre küresel yaşlı nüfus oranındaki hızlı artış, diş hekimliği pratiğinde de köklü bir paradigma değişimini beraberinde getirmiştir. Geçmiş yıllarda ileri yaş grubunda total dişsizlik (edentülizm) doğal bir sonuç olarak kabul edilirken, günümüzde koruyucu diş hekimliğindeki ilerlemeler sayesinde yaşlı bireylerin doğal dişlerini ağızda tutma oranları dramatik şekilde artmıştır (Atanda ve ark., 2022). Bu durum, "gerodontoloji" kavramını daha kritik hale getirerek geriatrik hastalarda endodontik tedavi ihtiyacını zirveye taşımıştır. Geriatrik endodonti, yalnızca kronolojik yaşlanmanın pulpa-dentin kompleksi üzerindeki lokal biyolojik etkilerini değil, aynı zamanda kompleks medikal anamnezlerin (sistemik hastalıklar ve polifarmasi) diş hekimliği uygulamalarına entegrasyonunu gerektiren çok boyutlu

[1] [1] **Uzm. Dt. Özel Klinik, Endodonti, ORCID: 0000-0002-1746-1714**

[2]Arş. Gör. Mersin Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi, Endodonti Anabilim Dalı, ORCID: 0009-0008-6673-0723

bir disiplindir (Johnstone & Parashos, 2015). Temel amaç, hastanın çiğneme verimliliğini, beslenme düzenini ve sosyo-psikolojik iyilik halini desteklemek için dişlerin fonksiyonel ömrünü maksimuma çıkarmaktır (Atanda ve ark., 2022; Johnstone & Parashos, 2015).

YAŞLANMAYA BAĞLI ANATOMİK VE HİSTOLOJİK DEĞİŞİMLER

İlerleyen yaşla birlikte pulpa-dentin kompleksinde geri döndürülemez fizyolojik, morfolojik ve hücresel değişimler meydana gelir (Kytridou ve ark., 2023; Johnstone & Parashos, 2015). Dişin ömrü boyunca fizyolojik olarak biriken sekonder dentin ve çürük, atrizyon, abrazyon gibi dış uyaranlara yanıt olarak gelişen tersiyer (reaktif) dentin, pulpa odasının hacminde asimetrik daralmalara yol açar (Murray ve ark., 2002). Bu yoğun kalsifikasyon süreci, sıklıkla koronal pulpa odasının obliterasyonuna ve kök kanallarında pulpa taşlarının (dentikül) insidansında artışa neden olur (Johnstone & Parashos, 2015). Histolojik boyutta pulpa dokusu incelendiğinde; genç dokularda bolca bulunan odontoblast ve fibroblast hücrelerinin sayısında belirgin bir azalma, buna karşın kollajen lif yoğunluğunda (fibrozis) artış saptanır (Murray ve ark., 2002; Kytridou ve ark., 2023). Ayrıca pulpa içi kan akımını sağlayan damar ağı (vaskülarizasyon) zayıflarken, sinir innervasyonu da dejenere olur (Kytridou ve ark., 2023). Apikal bölgede ise ilerleyen yaşla beraber sement dokusunun apozisyonu (hipersementoz) artar; bu durum apikal konstrüksiyonun anatomik apeksten daha koronal bir pozisyona kaymasına ve foramen apikale'nin daralmasına yol açarak kök ucu morfolojisini oldukça düzensiz bir hale getirir (Allen & Whitworth, 2004; Johnstone & Parashos, 2015).

GERİATRİK HASTALARDA TEŞHİS VE PLANLAMA ZORLUKLARI

Geriatrik popülasyonda endodontik patolojilerin teşhisi ve tedavi planlaması, yalnızca dental dokulardaki hücresel değişimler nedeniyle değil, aynı zamanda bilişsel, fiziksel ve sistemik faktörlerin sürece dahil olmasıyla oldukça komplike bir yapıya bürünür (AlRahabi, 2019). Hastaların anamnez alınma sürecinde yaşayabileceği işitme veya görme kayıpları, bilişsel gerilemeler (demans, Alzheimer hastalığı) ve çoklu ilaç kullanımına (polifarmasi) bağlı gelişen kafa karışıklıkları, doğru medikal ve dental öyküye ulaşmayı zorlaştıran temel bariyerlerdir (AlRahabi, 2019; Johnstone & Parashos, 2015).

Klinik muayene aşamasında, pulpa-dentin kompleksindeki aşırı kalsifikasyon (sekonder ve tersiyer dentin birikimi) ve sinir innervasyonundaki (A-delta liflerindeki) dramatik kayıplar nedeniyle teşhis testlerinin güvenilirliği azalır (Jafarzadeh & Abbott, 2010). Termal testler (özellikle soğuk testi) ve elektrikli pulpa testleri (EPT) yaşlı dişlerde sıklıkla yalancı negatif yanıtlar verir (Jafarzadeh & Abbott, 2010; Johnstone & Parashos, 2015). Bunun sonucunda, pulpa nekrozu veya kronik apikal periodontitis gibi patolojiler ileri yaş grubunda klinik olarak tamamen ağrısız (asemptomatik) seyredebilir ve bu durum klinisyenin radyografik bulgu olmaksızın doğru teşhise ulaşmasını engeller (AlRahabi, 2019). Radyografik değerlendirme sürecinde ise, yaşa bağlı kemik yoğunluğundaki değişimler, komşu anatomik yapıların süperpozisyonu ve daralmış periodontal ligament (PDL) aralığı, geleneksel periapikal radyografilerin teşhis kalitesini düşürür (Patel ve ark., 2014). Bu kısıtlılıkları aşmak ve kök kanal sistemindeki tıkanıklıkları tespit etmek için Konik Işınlı Bilgisayarlı Tomografi (KIBT) kullanımı kompleks geriatrik vakalarda kritik bir öneme sahiptir (Patel ve ark., 2014; Kiefner ve ark., 2017).

SİSTEMİK DURUMLAR VE MEDİKAL ANAMNEZİN ENDODONTİK YÖNETİMİ

Geriatrik hasta popülasyonu, sıklıkla birden fazla kronik sistemik hastalığın (komorbidite) ve buna bağlı çoklu ilaç kullanımının bir arada görüldüğü karmaşık bir tıbbi profile sahiptir (Kytridou ve ark., 2023). Bu durum, endodontik tedavi planlamasını lokal bir diş probleminden çıkararak multidisipliner bir medikal yönetime dönüştürür. İleri yaş hastalarında en sık karşılaşılan sistemik tabloların başında kardiyovasküler hastalıklar gelmektedir (Chan ve ark., 2021). Hipertansiyon, iskemik kalp hastalıkları veya geçirilmiş miyokard enfarktüsü öyküsü olan hastalarda, tedavi stresi ve ağrı yönetimi kritik öneme sahiptir. Kullanılacak lokal anestezik solüsyonlardaki vazokonstriktör (adrenalin) miktarının dikkatle sınırlandırılması, kan basıncı takibi yapılması ve seansların stressiz, kısa tutulması esastır (Kytridou ve ark., 2023).

Tip 2 diyabet, geriatrik hastalarda hücresel immün yanıtı ve periapikal iyileşme potansiyelini doğrudan etkileyen bir diğer önemli faktördür. Kontrol altına alınmamış diyabetik hastalarda enfeksiyonun yayılım hızı ve endodontik alevlenme (flare-up) riski artmaktadır (Segura-Egea ve ark., 2019). Ayrıca, osteoporoz veya onkolojik rahatsızlıklar nedeniyle antiresorptif ilaç (bifosfonat) veya anti-anjiyojenik tedavi gören hastalarda, diş çekimi veya periapikal cerrahi gibi kemik içi invaziv işlemler İlaçlara Bağlı Çene Kemiği Osteonekrozu (MRONJ) riskini dramatik şekilde tetiklemektedir (Ruggiero ve ark., 2014). Bu hasta grubunda, dişin prognozu sınırda olsa dahi, çekim yerine konservatif endodontik tedavilerin (kök kanal tedavisi) tercih edilmesi temel koruyucu yaklaşımdır (Ruggiero ve ark., 2014; Kytridou ve ark., 2023). Bunlara ek olarak, polifarmasi sonucu sıklıkla gözlenen kserostomi (ağız kuruluğu), tükürüğün yıkayıcı ve remineralize edici etkisini ortadan kaldırarak kök çürüklerine zemin hazırlar ve bu durum geriatrik hastalarda endodontik tedavi ihtiyacını artıran önemli bir kısır döngü yaratır (Chan ve ark., 2021).

KLİNİK TEDAVİ PROTOKOLLERİNDEKİ MODİFİKASYONLAR

Geriatrik endodontik vakalarda uygulanan klinik adımlar, dokuların artan kırılganlığına ve anatomik zorluklara göre özel olarak modifiye edilmelidir: Giriş kavitesi açılırken daralmış veya tamamen oblitere olmuş pulpa odalarına yaklaşımda perforasyon (sapma) riskini minimize etmek için dental operasyon mikroskobu (DOM) eşliğinde ultrasonik uçların kullanılması güncel bir zorunluluktur (Iandolo ve ark., 2023). Kalsifiye kök kanallarında alet kırılmasını önlemek amacıyla, rotasyonel şekillendirme öncesinde el eğeleri ile mutlaka bir kayma yolu (glide path) oluşturulmalıdır. İşlem sırasında döngüsel yorgunluğa karşı direnci artırılmış, ısıl işlem görmüş (heat-treated) ve esnekliği yüksek nikel-titanyum (NiTi) alaşımlı eğe sistemleri tercih edilmelidir (Kwak ve ark., 2022). İlerleyen yaşa bağlı olarak dentin tübüllerinin skleroze olması (saydam dentin oluşumu), kimyasal ajanların penetrasyonunu engeller (Johnstone & Parashos, 2015). Bu bariyeri aşmak için Sodyum Hipoklorit (NaOCl) ile inorganik dokuyu çözen %17'lik EDTA solüsyonlarının ardışık kullanımı şarttır. Ayrıca irrigantların etkinliğini artırmak için düşük seviyeli lazer terapisi (LLLT) veya sonik/ultrasonik aktivasyon cihazlarından faydalanılmalıdır (Alshahrani ve ark., 2024). Son olarak hastaların eklem (TME) rahatsızlıkları ve sistemik yorgunlukları göz önünde bulundurularak tedavi süresi optimize edilmeli, rezin esaslı patlar ve sıcak gutta-perka teknikleri kullanılarak kök kanal sistemi üç boyutlu ve hızlı bir şekilde tıkanmalıdır (Talwar ve ark., 2020).

GERİATRİK BİREYLERDE VİTAL PULPA TEDAVİLERİ (VPT)

Geçmişte, pulpa dokusunun yaşa bağlı olarak hücresel ve vasküler bileşenlerindeki dejenerasyon nedeniyle ileri yaş grubunda vital pulpa tedavilerinin (VPT) başarılı olamayacağına dair yaygın

bir inanış hakimdi. Ancak güncel literatür, uygun endikasyonlarda ve biyouyumlu kalsiyum silikat esaslı materyallerin (MTA, Biodentine vb.) kullanımıyla pulpanın onarım kapasitesinin geriatrik popülasyonda da korunabileceğini göstermektedir (Duncan ve ark., 2022). Vital pulpa tedavileri; dişin propriyoseptif duyusunu koruması, apikal dokuların immün savunmasını desteklemesi ve yaşa bağlı artan dentin kırılganlığına karşı dişi yapısal olarak daha bütünleşik tutması sebebiyle, geriatrik hastalarda daha agresif endodontik yaklaşımlara karşı minimal invaziv ve öncelikli bir alternatif olarak değerlendirilmelidir (Duncan ve ark., 2022).

GERİATRİK HASTALARDA ENDODONTİK YENİDEN TEDAVİ (RETREATMENT) VE RESTORASYON UZAKLAŞTIRMA STRATEJİLERİ

Geriatrik hastalar, sıklıkla ağızlarında yıllar önce yapılmış eski kanal dolguları, metal/fiber postlar ve yoğun rezin simanlarla sabitlenmiş kompleks koronal restorasyonlarla kliniğe başvururlar. Suyu ve esnekliğini kaybetmiş, skleroze ve kırılgan yaşlı dentininden bu eski materyallerin uzaklaştırılması işlemi, iyatrojenik perforasyon veya dikey kök kırığı riskini oldukça artırmaktadır. Bu noktada köklerin tamamına işlem yapmak yerine, yalnızca radyografik veya klinik patoloji gösteren kökleri hedef alan seçici yeniden tedavi (selective retreatment) stratejileri ön plana çıkmaktadır (Cardinali ve ark., 2024). İşlem sırasında eski kanal patlarının ve adeziv simanların zayıflamış dentin duvarlarına zarar vermeden uzaklaştırılabilmesi için, üç boyutlu KIBT görüntüleme eşliğinde dental operasyon mikroskobu ve spesifik ultrasonik uçların kullanılması günümüz endodontisinde zorunludur (Cardinali ve ark., 2024).

İLERİ YAŞTA ENDODONTİK CERRAHİ VE DOKU İYİLEŞME DİNAMİKLERİ

Geleneksel (ortograd) kanal tedavisinin veya yeniden tedavinin anatomik engeller, taşkın restorasyonlar veya kırılgan kök yapıları nedeniyle gerçekleştirilemediği durumlarda, apikal mikrocerrahi (EMS) geriatrik hastalar için önemli bir diş kurtarma seçeneğidir. Ancak yaşlanma ile birlikte kemik iliğindeki hücresel aktivitenin azalması, periapikal kan akımının yavaşlaması ve osteoporoz gibi kemik metabolizmasını etkileyen sistemik hastalıklar, cerrahi sonrası yara iyileşme dinamiklerini doğrudan etkiler. Literatürdeki üç boyutlu tomografik iyileşme analizleri, 45-50 yaş üzerindeki hastalarda mikrocerrahi sonrası tam kemik iyileşmesinin (osteogenezis) genç bireylere kıyasla istatistiksel olarak daha yavaş seyrettiğini veya periapikal dokunun asimetrik skar dokusuyla (fibrozis) iyileşmeye daha eğilimli olduğunu ortaya koymaktadır (Zhu ve ark., 2022). Yine de, mikroskobik cerrahi prensipleri ve biyouyumlu retrograd dolgu materyallerinin kullanımıyla ileri yaş grubunda dahi cerrahi sonrası sağ kalım oranları oldukça yüksektir (Zhu ve ark., 2022).

GERİATRİK ENDODONTİDE FARMAKOLOJİK AĞRI YÖNETİMİ

Geriatrik hastaların endodontik acillerinde ve post-operatif ağrı yönetiminde farmakolojik yaklaşım; yaşa bağlı değişen farmakokinetik (azalmış renal klerens, hepatik metabolizma) ve polifarmasi (çoklu ilaç etkileşimi) riskleri nedeniyle genç bireylerden keskin bir şekilde ayrılmalıdır. Diş hekimliğinde ağrı kontrolünde ilk tercih olan non-steroid anti-enflamatuar ilaçlar (NSAİİ), 65 yaş üstü bireylerde gastrointestinal (MİDE-Bağırsak) kanama, renal toksisite ve kardiyovasküler trombotik olay riskini ciddi şekilde artırır (Ribeiro ve ark., 2022). Bu nedenle, şiddetli endodontik ağrı vakalarında yüksek dozlu geleneksel NSAİİ'ler yerine kısa süreli ve gastrointestinal tolerabilitesi daha yüksek olan siklooksijenaz-2 (COX-2) spesifik inhibitörler veya parasetamol

(asetaminofen) ağırlıklı kombinasyonlar tercih edilmeli; hastanın kronik tıbbi öyküsü medikal hekim konsültasyonu ile mutlaka denetlenmelidir (Ribeiro ve ark., 2022).

KÖK ÇÜRÜKLERİ VE ENDODONTİK-PERİODONTAL KOMBİNE LEZYONLAR

Yaşlı popülasyonda fizyolojik yaşlanma ve periodontal hastalık geçmişine bağlı olarak gelişen diş eti çekilmeleri , sement ve kök dentini yüzeylerini oral floraya doğrudan maruz bırakır. Buna çoklu ilaç kullanımına (polifarmasi) bağlı gelişen tükürük azalması (kserostomi) ve azalan motor beceriler nedeniyle yetersiz oral hijyen eklendiğinde, kök yüzeyi çürüklerinin insidansı geriatrik bireylerde dramatik bir şekilde artar (Bhat ve ark., 2014). Kök dentininin mineye kıyasla inorganik içeriğinin çok daha düşük olması ve pulpa odasına olan anatomik yakınlığı, çürüğün hızlı bir şekilde yıkım yaparak pulpaya ulaşmasına neden olur. Pulpa enfeksiyonunun apikal foramen veya lateral kanallar aracılığıyla periyodonsiyuma yayılması, ileri yaş hastalarında sıklıkla gerçek endodontik-periodontal kombine lezyonların ortaya çıkmasına zemin hazırlar (Herrera ve ark., 2018). Yaşlı kemik dokusunun (osteoblastik aktivitenin azalması nedeniyle) onarım kapasitesinin düşük olması sebebiyle, bu kombine lezyonların prognozu risklidir; uzun dönem diş sağ kalımı için kök kanal sisteminin kimyasal dezenfeksiyonu ile periodontal cep yüzeyinin küretajının birbirini destekleyecek şekilde eş zamanlı yürütülmesi şarttır (Kytridou ve ark., 2023).

YAŞLI DİŞLERDE ÇATLAK DİŞ SENDROMU (CRACKED TOOTH) VE VERTİKAL KÖK KIRIKLARI

İleri yaş hastalarındaki doğal dişler, on yıllar boyunca onbinlerce döngüsel çiğneme kuvvetine, oklüzal streslere ve muhtelif restoratif işlemlere (kronlar, inleyler) maruz kalmış biyomekanik olarak "yorgun" dişlerdir. Yaşlanmayla birlikte pulpa-

dentin kompleksinin su içeriğini kaybetmesi (dehidratasyon), kollajen matriksindeki çapraz bağların zayıflaması ve aşırı sekonder dentin kalsifikasyonuna bağlı artan sertlik, dişleri yapısal olarak çok daha kırılgan hale getirir (Liao ve ark., 2021). Bu histolojik dejenerasyon, geriatrik hastalarda Çatlak Diş Sendromu (Cracked Tooth Syndrome) ve Vertikal Kök Kırıklarının (VRF) genç popülasyona kıyasla belirgin düzeyde yüksek oranda görülmesine yol açar. Özellikle aşırı madde kaybına uğramış ve endodontik tedavi görmüş yaşlı dişlerde, mikroçatlakların zamanla oklüzal yükler altında ilerleyerek tam kat dikey kırıklara (VRF) dönüşmesi en yaygın çekim nedenlerinden biridir (Patel ve ark., 2022). Klinik olarak klasik "J-formunda" periapikal radyolüsensi ve dişi çevreleyen kemikte izole derin dar periodontal cep ile karakterize olan bu kırıkların erken teşhisinde geleneksel radyografiler yetersiz kalmaktadır. Kesin tanı ve endodontik müdahale kararı için dental operasyon mikroskobu (DOM) altında kök içi inceleme yapılması ve şüpheli vakalarda Konik Işınlı Bilgisayarlı Tomografi (KIBT) kullanılması geriatrik endodontide hayati bir zorunluluktur (Liao ve ark., 2021; Patel ve ark., 2022).

SONUÇ

Yaşlanan pulpa ve periapikal dokuların iyileşme potansiyeline yönelik endişelere rağmen, literatürdeki güncel çalışmalar geriatrik hastalarda endodontik tedavinin başarı ve diş sağ kalım oranlarının genç hasta popülasyonu ile istatistiksel olarak benzer olduğunu göstermektedir (Kytridou ve ark., 2023). İleri yaş grubundaki kök kanal tedavilerinde asıl başarısızlık nedeni endodontik kökenli değil; dişlerde oluşan sekonder çürükler, periodontal yıkımlar ve dentin dokusunun kırılganlığına bağlı olarak gelişen vertikal kök kırıklarıdır (Zadik ve ark., 2008; Touré ve ark., 2011). Bu sebeple, endodontik tedavi sonrası koronal sızıntıyı engelleyecek ve dişi fonksiyonel kuvvetlere karşı destekleyecek olan

protetik restorasyonun en kısa sürede tamamlanması, geriatrik endodontinin klinik başarısında ve dişin ağızda tutulmasında temel belirleyicidir (Ray & Trope, 1995; Aquilino & Caplan, 2002).

Kaynakça

Allen, P. F., & Whitworth, J. M. (2004). Endodontic considerations in the elderly. Gerodontology, 21(4), 185-194.

AlRahabi, M. K. (2019). Root canal treatment in elderly patients. Saudi Medical Journal, 40(3), 217-223.

Alshahrani, A. A., et al. (2024). Efficacy of Different Irrigation Activation Techniques on Dentinal Tubule Penetration. Applied Sciences, 14(2), 701.

Aquilino, S. A., & Caplan, D. J. (2002). Relationship between crown placement and the survival of endodontically treated teeth. The Journal of Prosthetic Dentistry, 87(3), 256-263.

Atanda, A. J., et al. (2022). Tooth retention, health, and quality of life in older adults: a scoping review. BMC Oral Health, 22(1), 185.

Bhat, M., et al. (2014). Association of Root Caries with Oral Habits in Older Individuals Attending a Rural Health Centre of a Dental Hospital in India. Journal of Clinical and Diagnostic Research, 8(11), ZC80–ZC83.

Cardinali, F., et al. (2024). Selective root canal retreatment of a maxillary first molar. Frontiers in Dental Medicine, 5, 1422390.

Chan, A. K. Y., et al. (2021). Common medical and dental problems of older adults: a narrative review. Geriatrics (Basel), 6(3), 76.

Duncan, H. F., et al. (2022). Present status and future directions—Vital pulp treatment and pulp preservation strategies. International Endodontic Journal, 55(4), 1-15.

Herrera, D., et al. (2018). Acute periodontal lesions (periodontal abscesses and necrotizing periodontal diseases) and endo-periodontal lesions. Journal of Clinical Periodontology, 45(Suppl 20), S78-S94.

Iandolo, A., et al. (2023). Calcifications detection and management in the obliterated endodontic space. Journal of Osseointegration, 15(1), 48-52.

Jafarzadeh, H., & Abbott, P. V. (2010). Review of pulp sensibility tests. Part II: electric pulp tests and test cavities. International Endodontic Journal, 43(11), 945-958.

Johnstone, M., & Parashos, P. (2015). Endodontics and the ageing patient. Australian Dental Journal, 60(1 Suppl), 20-27.

Kiefner, P., et al. (2017). Treatment of calcified root canals in elderly people: a clinical study about the accessibility, the time needed and the outcome with a three-year follow-up. Gerodontology, 34(2), 164-170.

Kwak, S. W., et al. (2022). Evaluation of design, mechanical properties, and torque/force generation of heat-treated NiTi glide path instruments. BMC Oral Health, 22(1), 528.

Kytridou, V., et al. (2023). A literature review of local and systemic considerations for endodontic treatments in older adults. Gerodontology, 40(4), 410-421.

Liao, W. C., et al. (2021). Vertical Root Fracture in Non-Endodontically and Endodontically Treated Teeth: Current

Understanding and Future Challenge. Journal of Personalized Medicine, 11(12), 1375.

Murray, P. E., et al. (2002). Age-related odontometric changes of human teeth. Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontology, 93(4), 474-478.

Patel, S., et al. (2014). European Society of Endodontology position statement: the use of CBCT in endodontics. International Endodontic Journal, 47(6), 502-504.

Patel, S., Bhuva, B., & Bose, R. (2022). Present status and future directions: Vertical root fractures in root filled teeth. International Endodontic Journal, 55(Suppl 3), 804-826.

Ray, H. A., & Trope, M. (1995). Periapical status of endodontically treated teeth in relation to the technical quality of the root filling and the coronal restoration. International Endodontic Journal, 28(1), 12-18.

Ribeiro, H., et al. (2022). Non-steroidal anti-inflammatory drugs (NSAIDs), pain and aging. Biomedicine & Pharmacotherapy, 150, 112958.

Ruggiero, S. L., et al. (2014). American Association of Oral and Maxillofacial Surgeons position paper on medication-related osteonecrosis of the jaw—2014 update. Journal of Oral and Maxillofacial Surgery, 72(10), 1938-1956.

Segura-Egea, J. J., et al. (2019). Endodontics and diabetes: association versus causation. International Endodontic Journal, 52(6), 790-802.

Talwar, S., et al. (2020). Geriatric endodontics. International Journal of Current Research, 12(6), 11843-11847.

Touré, B., et al. (2011). Analysis of reasons for extraction of endodontically treated teeth: a prospective study. Journal of Endodontics, 37(11), 1512-1515.

Zadik, Y., et al. (2008). Analysis of factors related to extraction of endodontically treated teeth. Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontology, 106(5), e31-e35.

Zhu, Y., et al. (2022). Prognostic Predictors of Endodontic Microsurgery: Radiographic and Cone-beam Computed Tomographic Evaluation. Journal of Dental Sciences, 17(3), 1312-1320.

[1] Uzm. Dt. Özel Klinik, Endodonti, ORCID: 0000-0002-1746-1714

[2]Arş. Gör. Mersin Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi, Endodonti Anabilim Dalı, ORCID: 0009-0008-6673-0723

BÖLÜM 3

ENDODONTİDE İRRİGASYON AKTİVASYON SİSTEMLERİ: ÇALIŞMA MEKANİZMALARI VE KANITA DAYALI KLİNİK DEĞERLENDİRME

Furkan PALA[1] & Aziz Şahin ERDOĞAN[2]

Giriş

Apikal periodontitis, kök kanal sistemine yerleşen mikroorganizmalara ve bunların ürünlerine karşı gelişen konak yanıtının sonucudur; bu nedenle kök kanal tedavisinin temel biyolojik hedefi, kanal sistemindeki enfeksiyonun kontrol altına alınmasıdır (Boutsioukis & Arias-Moliz, 2022; Sjögren et al., 1997). Uzun yıllar boyunca kök kanalının temizlenmesi ve dezenfeksiyonu ağırlıklı olarak mekanik enstrümantasyonun işlevi olarak görülmüş, irrigasyona ise tamamlayıcı bir rol atfedilmiştir (Boutsioukis & Arias-Moliz, 2022). Ancak yüksek çözünürlüklü görüntüleme yöntemleriyle yapılan çalışmalar, günümüz nikel-titanyum eğelerinin dahi özellikle oval ve düzensiz kesitli kanallarda kanal duvarı yüzeyinin önemli bir bölümüne temas edemediğini ortaya koymuştur (Peters, 2004; van der Sluis et al., 2007). Bu bulgular

[1] Arş. Gör., Atatürk Üniversitesi, Diş Hekimliği Fakültesi, Endodonti Anabilim Dalı, Orcid: 0009-0006-0084-6016 (Sorumlu yazar)
[2] Dr. Öğr. Üyesi, Atatürk Üniversitesi, Diş Hekimliği Fakültesi, Endodonti Anabilim Dalı, Orcid: 0000-0002-7799-8767

endodontide bir paradigma değişimine yol açmış; enstrümantasyon, temizlik ve dezenfeksiyonun büyük bölümünü üstlenmesi beklenen irrigasyon solüsyonlarının apikal anatomiye ulaşmasını sağlayan bir araç olarak yeniden tanımlanmıştır (Boutsioukis & Arias-Moliz, 2022).

Sodyum hipoklorit (NaOCl) ve preparasyon sonrasında uygulanan etilendiamintetraasetik asit (EDTA), günümüzde kabul gören temel irrigasyon protokolünü oluşturmaktadır (Boutsioukis & Arias-Moliz, 2022; Zehnder, 2006). Bunun yanında bir irrigantın kimyasal etkinliği, hedef dokulara yeterli miktarda ulaşabilmesine ve kimyasal reaksiyonlarla etkisini kaybettikçe yenilenebilmesine bağlıdır. Konvansiyonel enjektör irrigasyonu ile oluşturulan yıkamanın ana kanal dışındaki isthmus, lateral kanal ve oval uzantılara ancak sınırlı ölçüde ulaşabilmesi, irrigantın aktive edilmesini amaçlayan çok sayıda teknik ve cihazın geliştirilmesine zemin hazırlamıştır (Gu et al., 2009; van der Sluis et al., 2007).

İrrigasyon, son yirmi yılda endodonti literatürünün en yoğun çalışılan başlıklarından biri haline gelmiş ve her yıl yüzlerce yeni çalışma yayımlanır olmuştur (Boutsioukis & Arias-Moliz, 2022). Buna karşın laboratuvar çalışmalarında sıklıkla elde edilen olumlu sonuçların klinik sonuçlara yansıyıp yansımadığı hâlâ tartışmalıdır (Cheung et al., 2021; Liang et al., 2013; Virdee et al., 2018). Türkçe literatürde irrigasyon solüsyonlarını ve klinik güvenliği bütüncül biçimde ele alan güncel bir kitap bölümü yakın zamanda yayımlanmıştır (Gürler, 2026). Bu bölümde ise solüsyon seçiminden çok aktivasyon sistemlerine odaklanılmakta; sistemler biyofiziksel çalışma mekanizmalarına göre ele alınmakta, her sistemin etkinliği laboratuvar, klinik ara sonuç ve hasta merkezli sonuç düzeylerinde ayrı ayrı değerlendirilmekte ve klinik uygulamaya yönelik kanıta dayalı öneriler sunulmaktadır.

Kök Kanal İrrigasyonunun Temel Sorunları

Kök Kanal Sisteminin Anatomik Karmaşıklığı ve Biyofilm

Kök kanal enfeksiyonları, dentin yüzeyine tutunmuş ve kendi ürettikleri hücre dışı polimerik matriks içine gömülü çok çeşitli biyofilmler tarafından oluşturulur (Boutsioukis & Arias-Moliz, 2022). Bu matriks antimikrobiyal ajanların difüzyonunu fiziksel olarak sınırlamakta ve ajanların bir bölümünü nötralize etmektedir. Biyofilmin iç katmanlarında metabolik olarak yavaşlamış hücrelerin ve çoklu ilaç toleransı gösteren persister hücrelerin bulunması, irrigantlara karşı direnci daha da artırır (Boutsioukis & Arias-Moliz, 2022).

Anatomik açıdan ana kanala ek olarak yüzgeç benzeri uzantılar, aynı kök içindeki kanalları birleştiren isthmuslar, lateral ve aksesuar kanallar ile apikal deltalar biyofilm için korunaklı bölgeler oluşturur (Boutsioukis & Arias-Moliz, 2022). Enstrümantasyon sırasında oluşan dentin talaşlarının bu bölgelere sıkışması, altındaki biyofilmi irrigantlardan yalıtan bir bariyer işlevi görebilir (Paqué et al., 2009). Enstrümantasyon ve irrigasyonun etkisinden kaçan mikroorganizmalar, hem primer tedavi hem de retreatment sonrasında başarısızlığın başlıca nedeni olarak kabul edilmektedir (Boutsioukis & Arias-Moliz, 2022). Oval kanallarda döner eğe sistemleri ile apikal kanal duvarının ancak yaklaşık %40'ına temas edilebildiği bildirilmiştir (van der Sluis et al., 2007). Mekanik preparasyonun ulaşamadığı bu alanların temizliği, büyük ölçüde irrigantın dağılımına ve mekanik etkisine bağlıdır.

Enjektör-İğne İrrigasyonunun Dinamiği ve Sınırlılıkları

Enjektör irrigasyonu hem endodontistler hem de genel diş hekimleri arasında en yaygın kullanılan irrigant iletim yöntemidir (Boutsioukis & Arias-Moliz, 2022). Yöntemin etkinliği temel olarak enjektör iğnesinin çalışma boyuna yakınlığı, apikal üçlüdeki boşluk ve irrigant akış hızı tarafından belirlenir (Boutsioukis & Gutierrez Nova, 2021; Boutsioukis et al., 2010b). Hesaplamalı akışkanlar

dinamiği çalışmaları, açık uçlu iğnelerin daha güçlü bir jet akış oluşturarak irrigant değişimini artırdığını, ancak apikal ekstrüzyon riskini de yükselttiğini göstermiştir. Bu nedenle açık uçlu iğnelerin çalışma boyunun 2–3 mm, kapalı uçlu yan açıklıklı iğnelerin ise yaklaşık 1 mm kısasına, kanal duvarına bağlanmadan yerleştirilmesi önerilmektedir (Boutsioukis & Arias-Moliz, 2022; Boutsioukis et al., 2010b).

İnce (30–31 G) iğnelerin sıkışmaksızın yeterli derinliğe ulaşabilmesi ve irrigantın iğne ucunun ötesine ilerleyebilmesi için apikal preparasyonun en az ISO 30–35 çapında olması gerekir; ISO 25 veya daha dar preparasyonlarda, iğne tipinden bağımsız olarak irrigantın çalışma boyuna ulaşamadığı gösterilmiştir (Boutsioukis & Gutierrez Nova, 2021; Boutsioukis et al., 2010a). Bu bulguların klinik karşılığı da mevcuttur: Apikal periodontitisli dişlerde yapılan bir klinik çalışmada, ISO 20–25 çapına kadar preparasyonda %2,5 NaOCl ile serum fizyolojik arasında bakteri azalması bakımından fark saptanmazken, preparasyon ISO 35–50'ye genişletildiğinde fark anlamlı hale gelmiştir (Rodrigues et al., 2017).

Akış hızı, kök kanal irrigasyonunda en çok göz ardı edilen parametrelerden biridir. Kapalı uçlu iğnelerde düşük akış hızlarında irrigant iğne ucuna dahi güçlükle ulaşırken, 0,15–0,20 mL/sn düzeyindeki akış hızlarında ucun 1–1,5 mm ötesine ilerleyebilmektedir. Akış hızı aynı zamanda mekanik temizlikten sorumlu olan duvar gerilimini de doğrudan belirler (Boutsioukis & Arias-Moliz, 2022). Kalın iğnelerin kullanıldığı klasik çalışmalar, irrigantın iğne ucunun yalnızca yaklaşık 1 mm ötesine ulaştığını ve iğnenin çoğu zaman kanalın koronal veya orta üçlüsünde kaldığını göstermiştir (Gu et al., 2009). Sonuç olarak enjektör irrigasyonu, yukarıdaki koşullar sağlandığında ana kanalda yeterli etkinlik gösterse de oluşturduğu akış uç kısmı kapalı anatomik düzensizliklerin içine derinlemesine nüfuz edememekte; bu alanlarda irrigantın ilerlemesi büyük ölçüde son derece yavaş ve

verimsiz bir süreç olan difüzyona kalmaktadır (Boutsioukis & Arias-Moliz, 2022).

Buhar Kilidi Olgusu

Uç kısmı kapalı mikrokanallarda ilerleyen bir sıvı cephesinin önünde hava hapsolması, fizik literatüründe iyi tanımlanmış bir olgudur ve endodontide "buhar kilidi" (vapor lock) olarak adlandırılmaktadır (Gu et al., 2009; Tay et al., 2010). Senia ve arkadaşlarının klasik çalışmasında NaOCl, apikal preparasyon ISO 30 çapına genişletilmiş olmasına rağmen çalışma boyunun 3 mm'sinden daha yakına ulaşamamıştır (Senia et al., 1971). Tay ve arkadaşları, apikal bölgede hapsolan gazın bu bölgedeki debris ve smear tabakası uzaklaştırılmasını olumsuz etkilediğini göstermiştir (Tay et al., 2010). Bu bulgular, pek çok aktivasyon cihazının tanıtımında temel gerekçe olarak kullanılmıştır.

Bununla birlikte, deneysel ve hesaplamalı yöntemlerin birlikte kullanıldığı çalışmalar, apikal hava kabarcığının kötü irrigant penetrasyonunun nedeni değil, büyük olasılıkla sonucu olduğunu ortaya koymuştur. Yeterli genişlikteki bir kanalda iğnenin uygun derinliğe yerleştirilmesi, kabarcığın büyük ölçüde uzaklaştırılmasını sağlayabilmektedir (Boutsioukis & Arias-Moliz, 2022; Boutsioukis et al., 2014b). Dolayısıyla buhar kilidi, bağımsız bir engelden çok yetersiz preparasyon çapı ve uygun olmayan iğne konumunun bir göstergesi olarak değerlendirilmelidir.

İdeal Bir Aktivasyon Yönteminden Beklenen Özellikler

Yukarıda özetlenen sorunlar göz önüne alındığında ideal bir irrigasyon ya da aktivasyon yönteminden şunlar beklenir: irrigantı ana kanalın ve anatomik düzensizliklerin tamamına ulaştırması, kimyasal reaksiyonlarla etkinliğini kaybeden irrigantı sık aralıklarla yenilemesi, hedefleri kanal duvarından ayıracak düzeyde akma gerilimi oluşturması, ayrılan materyali ve etkinliğini kaybeden irrigantı kanal dışına taşıyacak bir geri akış oluşturması ve tüm

bunları yaparken irrigantın apikal foramenden taşmasını önlemesi (Boutsioukis & Arias-Moliz, 2022). Klinisyen açısından ise kullanım kolaylığı, maliyet ve tedavi süresine etkisi de sistem seçiminde belirleyici ölçütler arasındadır (Gu et al., 2009).

Aktivasyon Mekanizmalarının Biyofiziksel Temelleri

Aktivasyon sistemleri irrigant üzerinde farklı fiziksel olgular aracılığıyla etki gösterir. Bu olguların doğru anlaşılması, bir cihazın hangi koşullarda etkili olabileceğini öngörmeyi ve yeni sistemleri üretici iddialarından bağımsız olarak değerlendirmeyi kolaylaştırır.

Akustik Akış

Akustik akış, titreşen bir eğe ya da tel çevresinde sıvının dairesel veya girdap benzeri hızlı hareketidir; kök kanalı gibi dar bir geometride oluştuğunda akustik mikroakış olarak da adlandırılır (van der Sluis et al., 2007). Ultrasonik frekansta salınan bir eğe boyunca düğüm (node) ve karşı düğüm (antinode) noktalarından oluşan karakteristik bir titreşim paterni gelişir ve akış paterni bu yapıya uyum gösterir; salınım genliği eğe ucunda en yüksek düzeydedir (van der Sluis et al., 2007). Birinci yaklaşımla akış hızı, çalışma frekansı ve genliğin karesi ile doğru, eğe yarıçapı ile ters orantılıdır. Bu ilişki, ince eğelerin, yüksek frekansın ve yüksek genliğin daha güçlü bir akış oluşturacağını öngörür (van der Sluis et al., 2007).

Akustik akış ana kanaldaki irrigantı karıştırır, irrigantı eğenin yerleştirildiği derinliğin ötesine ve uzak anatomik bölgelere taşır ve kanal duvarındaki kayma gerilimini artırarak mekanik temizliği destekler (Boutsioukis & Arias-Moliz, 2022). Eğenin kanal duvarına temas etmesi salınım genliğini azaltarak akışı zayıflatır; ancak akış tamamen ortadan kalkmaz (van der Sluis et al., 2007).

Akustik, Hidrodinamik ve Optik Kavitasyon

Kavitasyon, sıvı içindeki hızlı basınç değişimlerine bağlı olarak buhar ya da gaz kabarcıklarının oluşması, genişlemesi ve şiddetle çökmesidir. Kabarcıkların çökmesi şok dalgaları, lokal olarak çok yüksek basınç ve sıcaklık ile sonokimyasal reaksiyonlar üretebilir (van der Sluis et al., 2007). Ultrasonik aktivasyon sırasında, eğenin serbestçe titreşebildiği veya duvara yalnızca hafifçe dokunduğu durumlarda geçici (transient) kavitasyonun oluşabildiği, yoğun duvar temasında ise bu olgunun ortadan kalktığı bildirilmiştir (van der Sluis et al., 2007). Yüksek hızlı görüntüleme çalışmaları ultrasonik eğe çevresinde kavitasyonun oluştuğunu doğrulamış, ancak düşük frekans ve yüksek genlikle çalışan sonik cihazlarda anlamlı bir kavitasyon saptanmamıştır (Boutsioukis & Arias-Moliz, 2022; van der Sluis et al., 2007).

Lazerle aktive irrigasyonda mekanizma farklıdır. Er:YAG (2940 nm) ve Er,Cr:YSGG (2780 nm) lazerlerin dalga boyları suda yüksek oranda absorbe edildiğinden, her lazer atımı irrigantı ani olarak ısıtıp buharlaştırır ve hızla genişleyip çöken bir buhar kabarcığı oluşturur. Optik kavitasyon olarak adlandırılan bu olgu, kanal boyunca güçlü ikincil akışlar yaratır (Meire & De Moor, 2024). Çok frekanslı akustik sistemlerde ise pulpa odasında oluşturulan yüksek hızlı bir sıvı jetinin hidrodinamik kavitasyona yol açması ve kabarcıkların çökmesiyle geniş bir frekans aralığında akustik dalgaların üretilmesi hedeflenir (Boutsioukis & Arias-Moliz, 2022).

Duvar Kayma Gerilimi ve Isı Etkisi

Biyofilmin ve debrisin kanal duvarından fiziksel olarak ayrılmasında belirleyici parametre, akışın duvar yüzeyinde oluşturduğu kayma gerilimidir. Kayma gerilimi, duvar yakınındaki hız gradyanı ile artar; bu nedenle enjektör irrigasyonunda akış hızının artırılması ya da aktivasyon yöntemleriyle duvar yakınındaki akışın hızlandırılması mekanik temizliğe destek olur (Boutsioukis & Arias-Moliz, 2022; Chen et al., 2014). Nitekim laboratuvar

koşullarında biyofilmin uzaklaştırılmasında irrigasyonun mekanik etkisinin, NaOCl konsantrasyonundan daha belirleyici olabildiği bildirilmiştir (Boutsioukis & Arias-Moliz, 2022).

Aktivasyon sırasında kinetik enerjinin bir kısmı ısıya dönüşür. Ultrasonik aktivasyonda irrigant sıcaklığının eğe ucuna yakın bölgede birkaç derece arttığı, sürekli yenileme yapıldığında ise soğuma gözlendiği bildirilmiştir; kaydedilen sıcaklık artışlarının periodontal ligament için patolojik düzeye ulaşmadığı kabul edilmektedir (Boutsioukis & Arias-Moliz, 2022; van der Sluis et al., 2007). Sıcaklık artışı NaOCl'nin reaksiyon hızını artırabilir; ancak bu etki seçici değildir ve dentin kollajeni ile periapikal dokular üzerindeki istenmeyen etkileri de hızlandırır (Boutsioukis & Arias-Moliz, 2022). Önceden ısıtılmış NaOCl'nin kanal içinde kısa sürede vücut sıcaklığına düştüğünün in vivo olarak gösterilmesi, ısıya bağlı faydanın kısa süreli olduğunu düşündürmektedir (Boutsioukis & Arias-Moliz, 2022).

Manuel Aktivasyon Teknikleri

Manuel Dinamik Aktivasyon

Manuel dinamik aktivasyon (MDA), kanal preparasyonu tamamlandıktan sonra kanala iyi uyum sağlayan bir güta-perka ana konun irrigant içinde çalışma boyuna kadar yerleştirilip 2–3 mm'lik kısa itme-çekme hareketleriyle hareket ettirilmesine dayanır (Gu et al., 2009; Virdee et al., 2018). Bu hareketin kanal içinde basınç dalgalanmaları oluşturarak irrigantın dokunulmamış yüzeylere taşınmasını, aktif irrigantın etkisini kaybetmiş irrigantla karışmasını ve apikal bölgedeki gazın fiziksel olarak yer değiştirmesini sağladığı düşünülmektedir (Gu et al., 2009). Kollajen tabanlı biyomoleküler film modeli kullanılan çalışmalarda MDA'nın statik irrigasyona ve otomatik bir basınç-emme cihazına göre daha etkili olduğu bildirilmiştir (Gu et al., 2009). Virdee ve arkadaşlarının meta-analizinde de MDA, apikal üçlüde smear tabakası ve debris

uzaklaştırılmasında anlamlı iyileşme sağlayan yöntemler arasında yer almıştır (Virdee et al., 2018).

Tekniğin başlıca avantajları ek ekipman gerektirmemesi ve maliyetinin düşük olmasıdır. Buna karşın uygulama zaman alıcıdır, hareketin hızı ve genliği klinisyene göre değiştiğinden standardizasyonu zordur ve pistonlama hareketinin apikal foramenden anlamlı miktarda irrigant ekstrüzyonuna yol açabildiği gösterilmiştir (Boutsioukis & Arias-Moliz, 2022; Boutsioukis et al., 2014a).

Fırça Sistemleri

Endodontik fırçalar irrigant iletiminden çok kanal duvarlarının debridmanına ve irrigantın karıştırılmasına yardımcı olan araçlardır. Fırça kaplı irrigasyon iğnelerinin koronal üçlüde temizliği artırdığı, ancak orta ve apikal üçlüde anlamlı bir fark oluşturmadığı bildirilmiştir (Gu et al., 2009). Fırça kıllarının kanal içinde kopabilmesi ve radyolüsent oldukları için fark edilememesi, bu sistemlerin önemli bir dezavantajı olarak değerlendirilmektedir. Döner fırça sistemleri de sınırlı sayıda laboratuvar çalışmasıyla desteklenmekte olup klinik sonuçlara ilişkin veri bulunmamaktadır (Gu et al., 2009).

Cihaz Destekli Aktivasyon Sistemleri

Cihaz destekli sistemler, irrigantı sonik veya ultrasonik titreşim, döner hareket, negatif basınç, lazer enerjisi ya da yüksek hızlı sıvı aracılığıyla harekete geçirir. Başlıca sistemlerin çalışma mekanizmaları, temel özellikleri ve sınırlılıkları Tablo 1'de özetlenmiştir.

Tablo 1. İrrigasyon Aktivasyon Sistemlerinin Karşılaştırmalı Özellikleri

Sistem	**Çalışma mekanizması**	**Öne çıkan özellikler**	**Başlıca sınırlılıklar**
Manuel dinamik aktivasyon	Güta-perka konun itme-çekme hareketiyle kanal içinde basınç dalgalanması	Ek ekipman gerektirmez; düşük maliyet	Zaman alıcı; standardizasyonu güç, ekstrüzyonu artırabilir
Sonik aktivasyon (EndoActivator, EDDY)	Düşük frekanslı salınım akışı (EndoActivator ~160–190 Hz; EDDY ~6 kHz)	Kesici olmayan polimer uç; kolay kullanım	Sık duvar teması; akustik akış ve kavitasyon sınırlı; radyolüsent uç
Ultrasonik irrigant aktivasyonu	~30 kHz salınım; akustik akış ve geçici kavitasyon	En yaygın ve en çok çalışılmış yöntem; karmaşık anatomide debridmanı artırır	En az ISO 30–35 apikal çap gerekir; dentin kaldırma ve eğe kırılması riski
Mekanik aktivasyon (XP-endo Finisher)	Isıyla form değiştiren NiTi eğenin duvar teması ve irrigantı aktivasyonu	Düzensiz duvar bölgelerine ulaşım	Dentin kaldırma ve eğe kırılması riski; klinik sonuç verisi yok
Apikal negatif basınç (EndoVac)	Mikrokanül ile vakum; irrigantın çalışma boyuna iletimi	En düşük apikal ekstrüzyon	Karmaşık düzenek; sınırlı akış hızı ve zayıf mekanik etki; en az ISO 35 çap
Lazerle aktive irrigasyon (LAİ, PIPS, SWEEPS)	Er:YAG veya Er,Cr:YSGG enerjisiyle optik kavitasyon	Güçlü ikincil akış; minimal preparasyonda kullanım iddiası	Yüksek maliyet; çelişkili kanıt; ekstrüzyonu artırabilir
Çok frekanslı akustik sistem (GentleWave)	Hidrodinamik kavitasyon ve geniş bantlı akustik dalgalar	Minimal preparasyon iddiası; eş zamanlı aspirasyon	Çok yüksek maliyet; bağımsız çalışmalarda üstünlük doğrulanmamış

Kaynak: Yazarlar tarafından ilgili kaynaklardan derlenmiştir *(Bao et al., 2017; Boutsioukis & Arias-Moliz, 2022; Gu et al., 2009; Meire & De Moor, 2024; Nielsen & Baumgartner, 2007; van der Sluis et al., 2007; Virdee et al., 2018)*.

Sonik Aktivasyon

Sonik sistemler irrigantı 1–10 kHz aralığındaki düşük frekanslarda salınan uçlar aracılığıyla harekete geçirir (Gu et al., 2009; Virdee et al., 2018). Ultrasonik eğelerden farklı olarak sonik uçlarda tipik olarak bağlantı noktasına yakın tek bir düğüm ve uçta tek bir karşı düğüm bulunur; hareket kısıtlandığında yanal salınım kaybolarak boylamsal titreşime dönüşebilir (Gu et al., 2009; van der Sluis et al., 2007). Klinikte en yaygın kullanılan sonik sistemlerden EndoActivator (Dentsply Sirona), kesici olmayan esnek polimer uçları yaklaşık 160–190 Hz frekans ve yaklaşık 1200 μm genlikle salındırır (Boutsioukis & Arias-Moliz, 2022). Bu kadar düşük frekans ve yüksek genlik, akustik akış ve geçici kavitasyon oluşumu için yetersizdir. Ayrıca ucun engelsiz salınabilmesi için çalışma boyuna yakın bölgede klinik olarak nadiren sağlanabilecek genişlikte bir boşluk gerekir (Boutsioukis & Arias-Moliz, 2022). Bu nedenle uç kanal duvarıyla sık sık temas eder ve laboratuvar çalışmalarında ana kanalda gözlenen temizliğin önemli bir kısmının irrigant aktivasyonundan çok bu doğrudan fiziksel temastan kaynaklandığı düşünülmektedir. Yaygın kanının aksine polimer uçların dentini kesebildiği ve smear tabakası oluşturabildiği de gösterilmiştir (Boutsioukis & Arias-Moliz, 2022).

Etkinlik açısından pek çok ex vivo çalışmada EndoActivator ile enjektör irrigasyonu arasında ana kanal ve isthmus temizliği ya da dezenfeksiyonu bakımından fark saptanmamış; aynı sürede uygulandığında EndoActivator'ın ultrasonik aktivasyondan daha az etkili olduğu bildirilmiştir (Boutsioukis & Arias-Moliz, 2022). Daha yeni bir sonik sistem olan EDDY (VDW) ise polimer ucu yaklaşık 6 kHz frekans ve yaklaşık 350 μm genlikle salındırır. Artan frekans ve azalan genlik sayesinde EDDY'nin enjektör irrigasyonundan daha etkili olduğu ve bazı modellerde ultrasonik aktivasyonun etkinliğine yaklaştığı bildirilmiştir (Boutsioukis & Arias-Moliz, 2022; Neuhaus et al., 2016). Salınım frekansının artması ve genliğin azalmasıyla

etkinliğin iyileşmesi eğilimi, klasik düşük frekanslı sonik aktivasyonun etkinliğini sorgulatmaktadır (Boutsioukis & Arias-Moliz, 2022). Polimer uçların radyolüsent olması ise kanal içinde kırılmaları halinde tespitlerini güçleştiren bir diğer dezavantajdır (Gu et al., 2009).

Ultrasonik Aktivasyon

Ultrasonik aktivasyon, günümüzde en yaygın kullanılan irrigant aktivasyon yöntemidir (Boutsioukis & Arias-Moliz, 2022). Ultrasoniklerin endodontiye girişi kanal preparasyonu amacıyla olmuş; ancak ultrasonik eğelerle eş zamanlı preparasyon ve irrigasyonun kanal şeklinin kontrolünü zorlaştırdığı, strip perforasyonlara ve düzensiz kanal şekillendirilmesine yol açtığı görülmüştür (Gu et al., 2009; van der Sluis et al., 2007). Bunun üzerine, preparasyon tamamlandıktan sonra kesici olmayan ince bir eğe veya düz bir telle irrigantın aktive edildiği yöntem "pasif ultrasonik irrigasyon" olarak tanımlanmıştır (van der Sluis et al., 2007). Bunun yanı sıra eğenin kanal içinde duvara temas etmeden salındığı varsayımı yüksek hızlı görüntüleme çalışmalarıyla çürütülmüş ve eğenin kanal duvarıyla sık sık temas ettiği gösterilmiştir (Boutsioukis & Arias-Moliz, 2022; Boutsioukis et al., 2013). Bu nedenle güncel literatürde, kendi içinde çelişkili bir anlam taşıyan "pasif" teriminin yerine "ultrasonik irrigant aktivasyonu" (UİA) ifadesinin kullanılması önerilmektedir (Boutsioukis & Arias-Moliz, 2022; Căpută et al., 2019).

Duvar teması sıklıkla gerçekleşse de ultrasonik eğe, etkisini kanal duvarına doğrudan temastan çok çevresindeki irrigantı harekete geçirerek gösterir. Yaklaşık 30 kHz frekanstaki salınım, ana kanalda akustik akış oluşturarak irrigantı karıştırır, anatomik düzensizliklere taşır ve duvar gerilimini artırır; belirli koşullarda oluşan geçici kavitasyon da bu etkiye katkıda bulunur (Boutsioukis & Arias-Moliz, 2022).

Ultrasonik aktivasyonun etkinliği bir dizi teknik parametreye bağlıdır. Oluşan akışın kanalın apikal ucuna ulaşabilmesi için ultrasonik ucun çalışma boyunun 2–3 mm yakınına kadar yerleştirilmesi gerekir (Boutsioukis & Arias-Moliz, 2022). Ultrasonik ucun yaklaşık 50–80 μm genlikle engelsiz salınabilmesi için küçük çaplı eğeler tercih edilmeli ve aktivasyon kanal preparasyonu tamamlandıktan sonra uygulanmalıdır; bu gereksinimler göz önüne alındığında minimum apikal preparasyon çapının ISO 30–35 olması önerilmektedir (Boutsioukis & Arias-Moliz, 2022). Cihaz gücünün artırılması akustik akışı ve temizliği güçlendirir, ancak ultrasonik uç kırılması ve kontrolsüz dentin kaldırılması riskini de yükseltir; üreticiler irrigant aktivasyonu için cihazın maksimum gücünün yaklaşık %30–50'sinin kullanılmasını önermektedir (Boutsioukis & Arias-Moliz, 2022). Eğimli kanallarda ultrasonik ucun önceden kavislendirilmesinin akışı güçlendirdiği bildirilmiştir (van der Sluis et al., 2007).

İrrigantın enjektör ile verilip ardından aktive edildiği ve döngüler arasında yeni irrigantla yenilendiği aralıklı (intermitan) protokol, en yaygın kullanılan uygulama biçimidir (Căpută et al., 2019). Aktivasyonun tekrarlayan kısa döngüler halinde uygulanmasının, aynı toplam süredeki kesintisiz aktivasyona göre temizlik etkinliğini artırdığı; sık yenilemenin ise kimyasal reaksiyonlarla hızla tükenen serbest klorun telafisine katkıda bulunduğu gösterilmiştir (Boutsioukis & Arias-Moliz, 2022; Căpută et al., 2019). Yaygın kullanılan protokol her biri 20 saniyelik üç aktivasyon döngüsünden oluşmakla birlikte, 3×10 saniyelik daha kısa protokoller de kullanılmaktadır (Boutsioukis & Arias-Moliz, 2022; Căpută et al., 2019). İrrigantın ultrasonik olarak titreşen bir iğne aracılığıyla sürekli iletildiği sürekli ultrasonik irrigasyon ise in vivo koşullarda mandibular molarlarda daha temiz kanal ve isthmus yüzeyleri ve daha fazla bakteriyel azalma ile ilişkilendirilmiştir (Carver et al., 2007; Gu et al., 2009). Sürekli ve aralıklı protokollerin

birbirine üstünlüğü ise henüz netlik kazanmamıştır (Boutsioukis & Arias-Moliz, 2022).

Erken dönem in vitro ve ex vivo çalışmalar, ultrasonik aktivasyonun enjektör irrigasyonuna göre pulpa dokusu artıklarını, dentin debrisini ve planktonik bakterileri daha etkili uzaklaştırdığını bildirmiştir (Gu et al., 2009; van der Sluis et al., 2007). Bu bulguların yöntemin klinik pratikte hızla benimsenmesine katkıda bulunduğu, ancak etkinliğin söz konusu erken çalışmalarda olduğundan yüksek tahmin edildiği ileri sürülmüştür (Boutsioukis & Arias-Moliz, 2022). Güncel araştırmalar, ultrasonik aktivasyonun instrümante edilmemiş oval uzantılar, isthmuslar ve lateral kanalların debridmanında enjektör irrigasyonundan açıkça daha etkili olduğunu göstermektedir. Buna karşın bu bölgelerdeki antimikrobiyal etkiye ilişkin bilgiler sınırlıdır ve yöntemin uzun dönem tedavi sonucunu iyileştirdiğini gösteren bir klinik çalışma henüz bulunmamaktadır (Boutsioukis & Arias-Moliz, 2022; Căpută et al., 2019).

Mekanik Aktivasyon: XP-endo Finisher

XP-endo Finisher (FKG Dentaire), özel bir nikel-titanyum alaşımından üretilmiş, ISO 25 çapında ve konikliği olmayan bir döner eğedir. Oda sıcaklığında martensitik fazda ve düz olan eğe, kanal içinde vücut sıcaklığına maruz kaldığında östenitik faza geçerek apikal bölümünde kaşık benzeri bir form kazanır ve dönme sırasında kendi çapını aşan bir hacmi tarayarak düzensiz duvar bölgelerine ulaşmayı hedefler (Bao et al., 2017). Sistemin etkisi, eğenin kanal duvarına mekanik teması ile irrigantın çalkalanmasının bileşimine dayanır; bu yönüyle saf bir irrigant aktivasyon yönteminden çok mekanik ve hidrodinamik etkileri birleştiren bir yardımcı araç olarak değerlendirilmelidir.

İn vitro bir çalışmada eğenin apikal kanal bölgelerinde biyofilm uzaklaştırılmasına katkı sağladığı bildirilmiştir (Bao et al., 2017). Oval kanallarda mikro-bilgisayarlı tomografi (mikro-BT) ile

yapılan bir karşılaştırmada ise XP-endo Finisher'ın birikmiş sert doku debrisinin uzaklaştırılmasında ultrasonik aktivasyona benzer etkinlik gösterdiği, ancak her iki protokolün de debrisi tamamen uzaklaştıramadığı bildirilmiştir (De-Deus et al., 2019). Eğenin kanal duvarına doğrudan temas etmesi, özellikle eğimli kanallarda dentin kaldırılması ve eğe kırılması açısından dikkatli kullanımı gerektirmektedir. Sisteme ilişkin klinik sonuç verisi henüz bulunmamaktadır.

Apikal Negatif Basınç Sistemleri

Apikal negatif basınç sistemleri, irrigantın aktive edilmesinden çok iletilmesine yönelik bir yaklaşımdır. EndoVac (Kerr) sisteminde irrigant pulpa odasına verilirken çalışma boyuna yerleştirilen, ucu kapalı ve yan delikli bir mikrokanül aracılığıyla uygulanan vakum, irrigantı kanal boyunca apikale doğru çeker ve dışarı aspire eder (Gu et al., 2009; Nielsen & Baumgartner, 2007). Mikrokanülün kullanılabilmesi için kanalın en az ISO 35 çapına genişletilmesi gerekir (Gu et al., 2009). Bu sistemle birim zamanda çalışma boyuna daha fazla irrigant iletildiği ve apikal 1 mm'de daha fazla debris uzaklaştırıldığı bildirilmiştir (Nielsen & Baumgartner, 2007).

Bu avantajların yanında negatif basınç sistemleri çok sayıda bileşen, hortum ve bağlantı içeren karmaşık düzeneklerdir. Ulaşılabilecek maksimum akış hızı sınırlı olduğundan kanal içindeki irrigant değişimi yavaş ve mekanik temizlik etkisi zayıftır (Boutsioukis & Arias-Moliz, 2022; Chen et al., 2014). Mevcut sistematik derleme verileri, çok özel durumlar dışında apikal negatif basıncın enjektör irrigasyonuna üstünlüğünü gösteren açık bir kanıt bulunmadığını ortaya koymaktadır (Boutsioukis & Arias-Moliz, 2022). Yöntemin en önemli avantajı, apikal foramenden taşan irrigant miktarının belirgin şekilde az olmasıdır (Boutsioukis & Arias-Moliz, 2022). Rutin tedavilerde bu farkın klinik önemi sınırlı

olabilir; ancak daha önce NaOCl kazası yaşanmış ve bu nedenle yeni bir kaza riski artmış bir dişte bu özellik değer kazanır (Boutsioukis & Arias-Moliz, 2022). Klinik açıdan, negatif basınç sistemiyle yapılan irrigasyonun konvansiyonel enjektör irrigasyonuna göre postoperatif ağrıyı azalttığını bildiren randomize bir klinik çalışma da mevcuttur (Gondim et al., 2010).

Lazerle Aktive İrrigasyon

Lazerle aktive irrigasyonda (LAİ), orta kızılötesi bölgede çalışan erbiyum lazerlerin enerjisi irrigant tarafından absorbe edilerek optik kavitasyon oluşturulur (Meire & De Moor, 2024). Laboratuvar çalışmaları, lazer ucu çalışma boyuna yakın yerleştirildiğinde LAİ'nin biyofilm ve sert doku debrisinin uzaklaştırılmasında ultrasonik aktivasyondan daha etkili olabildiğini göstermiştir (Boutsioukis & Arias-Moliz, 2022; Meire & De Moor, 2024).

Foton başlatımlı fotoakustik akış (photon-induced photoacoustic streaming, PIPS) ve şok dalgasıyla güçlendirilmiş emisyonlu fotoakustik akış (shock wave-enhanced emission photoacoustic streaming, SWEEPS), düşük enerjili atımların ve özel tasarımlı uçların kullanıldığı, lazer ucunun pulpa odasında konumlandırıldığı varyantlardır ve özellikle minimal şekillendirilmiş kanalların temizliği için önerilmektedir (Meire & De Moor, 2024). SWEEPS yaklaşımında, atım çiftlerindeki ikinci atımın ilk atımla oluşan kabarcığın çökme evresiyle eş zamanlanarak daha güçlü şok dalgaları üretmesi amaçlanır (Meire & De Moor, 2024).

Bununla birlikte bu varyantlara ilişkin kanıtlar hem sınırlı hem de çelişkilidir. Bazı çalışmalarda PIPS'in klasik LAİ'den daha az etkili olduğu ve NaOCl ile kullanıldığında bazı koşullarda enjektör irrigasyonuna eşdeğer sonuçlar verdiği bildirilirken, diğer çalışmalarda iki yaklaşım arasında fark saptanmamıştır (Boutsioukis

& Arias-Moliz, 2022). Lazer ucunun pulpa odasında konumlandırılmasının, özellikle antimikrobiyal etki açısından sınırlayıcı bir faktör olduğu düşünülmektedir (Boutsioukis & Arias-Moliz, 2022). SWEEPS ile PIPS'in karşılaştırıldığı çalışmalar da tutarsız sonuçlar ortaya koymuştur (Boutsioukis & Arias-Moliz, 2022; Meire & De Moor, 2024). Ayrıca lazer aktivasyonunun, eğe veya uçların enine salınımına dayanan tekniklere göre apikal foramenden daha fazla irrigant ekstrüzyonuna yol açtığı bildirilmiştir (Boutsioukis & Arias-Moliz, 2022). Yüksek cihaz maliyeti ve öğrenme güçlüğüde de yöntemin klinik yaygınlığını sınırlayan etkenlerdir.

Çok Frekanslı Akustik Sistem: GentleWave

GentleWave (Sonendo) sistemi, pulpa odasına yerleştirilen bir el aleti aracılığıyla yüksek hızlı bir irrigant jeti oluşturan ve kanal içindeki sıvıyı eş zamanlı olarak aspire eden bağımsız bir irrigasyon sistemidir. Sistemin temel yeniliği, hidrodinamik kavitasyon kabarcıklarının çökmesiyle geniş frekans aralığında akustik dalgaların üretilmesidir; bu dalgaların kök kanal sisteminin temizliğine ve dezenfeksiyonuna katkıda bulunduğu ileri sürülmektedir (Boutsioukis & Arias-Moliz, 2022). Sistemin, irrigantın ulaşması için kapsamlı bir kanal preparasyonuna gerek duymadan tek başına kullanılabileceği öne sürülmekle birlikte, yayımlanmış çalışmaların çoğunda kanallar ISO 15–25 çapına kadar genişletilmiştir (Boutsioukis & Arias-Moliz, 2022).

Erken dönem çalışmalar sistemin enjektör irrigasyonu ve ultrasonik aktivasyondan açıkça üstün olduğunu bildirmiştir. Ancak bağımsız araştırma gruplarının daha yakın tarihli çalışmaları bu üstünlüğü doğrulamamıştır (Boutsioukis & Arias-Moliz, 2022). Yüksek maliyet ve sınırlı erişilebilirlik de değerlendirmede göz önünde bulundurulması gereken pratik unsurlardır.

Kanıt Düzeyine Göre Değerlendirme

Laboratuvar Kanıtı ve Ara Sonuç Ölçütü Noktalarının Sınırlılıkları

Aktivasyon sistemlerine ilişkin literatürün büyük bölümü laboratuvar çalışmalarından oluşmaktadır. Virdee ve arkadaşlarının 16 taramalı elektron mikroskobu (SEM) çalışmasını kapsayan sistematik derleme ve meta-analizinde, aktivasyon yöntemlerinin konvansiyonel enjektör irrigasyonuna göre koronal, orta ve apikal üçlüde smear tabakası ve debris uzaklaştırılmasını anlamlı ölçüde artırdığı; ancak apikal 1 mm'de gözlenen iyileşmenin istatistiksel anlamlılığa ulaşmadığı gösterilmiştir (Virdee et al., 2018). Dahil edilen çalışmaların hiçbirinde konvansiyonel enjektör irrigasyonu herhangi bir aktivasyon yönteminden üstün bulunmamıştır. Buna karşın smear tabakası analizlerinde heterojenliğin çok yüksek olması (I^2 = %79,3–92,8), tekniklerin birbirine üstünlüğü hakkında sonuç çıkarılmasını engellemiş; küçük örneklem ve yayın yanlılığına ilişkin bulgular da saptanmıştır (Virdee et al., 2018).

Bu tür çalışmaların yorumlanmasında temel sorun, ara ölçüt noktalarının geçerliliğidir. İrrigasyon yöntemlerini karşılaştıran iki sistematik derlemeye SEM çalışmaları eklenerek yapılan bir değerlendirmede, toplam 107 çalışmanın yalnızca %1'inin apikal periodontitisin iyileşmesini, %22'sinin antimikrobiyal etkiyi, %36'sının pulpa dokusu artıkları veya sert doku debrisinin uzaklaştırılmasını, %41'inin ise SEM ile smear tabakasının uzaklaştırılmasını incelediği belirlenmiştir (Boutsioukis & Arias-Moliz, 2022). SEM ile smear tabakası değerlendirmesi; kanal duvarının çok küçük ve çoğu zaman standardize edilmemiş bölgelerinin incelenmesi, örnek hazırlığı sırasında oluşabilecek artefaktlar ve skorlama sistemlerinin öznelliği nedeniyle ciddi metodolojik eleştirilere konu olmuştur (Virdee et al., 2018). Kanal içi mikrobiyal yükün azalması, apikal periodontitisin iyileşmesiyle belirli ölçüde ilişkili olduğu gösterilmiş en anlamlı ara ölçüt noktasıdır (Boutsioukis & Arias-Moliz, 2022; Sjögren et al., 1997).

Buna karşın laboratuvar çalışmalarında sıklıkla kullanılan tek türlü *Enterococcus faecalis* biyofilmi, plastik blok ve açık kanal modelleri in vivo koşulları yansıtmakta yetersiz kalmaktadır (Boutsioukis & Arias-Moliz, 2022; Gu et al., 2009; Virdee et al., 2018).

Metodolojik standardizasyon eksikliği de karşılaştırmaları zorlaştırmaktadır. Aktivasyon süresi, uç tipi, yerleştirme derinliği, güç ayarı ve kontrol grubunda kullanılan enjektör tipi çalışmalar arasında büyük farklılık göstermektedir (Virdee et al., 2018). Yeni bir yöntemin, suboptimal bir protokolle uygulanan bir klinik standartla karşılaştırılması, yöntemin etkinliğinin olduğundan yüksek tahmin edilmesine yol açabilir (Boutsioukis & Arias-Moliz, 2022).

Mikrobiyolojik Sonuçlar ve Postoperatif Ağrı

Aktivasyon yöntemlerini klinik ortamda değerlendiren başlıca çalışmalar Tablo 2'de özetlenmiştir. In vivo bir mikrobiyolojik çalışma, sürekli ultrasonik irrigasyonun nekrotik mandibular molarlarda kanal içi bakteri sayısını tek başına enstrümantasyon ve enjektör irrigasyonuna göre daha fazla azalttığını göstermiştir (Carver et al., 2007). Ancak kâğıt konla yapılan örneklemenin isthmus ve lateral kanallar gibi bölgeleri temsil etmedeki sınırlılıkları, bu tür sonuçların yorumlanmasında dikkatli olunmasını gerektirir (Boutsioukis & Arias-Moliz, 2022). Klinik çalışmaları derleyen incelemeler, aktivasyon yöntemlerine ilişkin randomize kontrollü çalışmaların sayıca az ve metodolojik olarak heterojen olduğunu, bu nedenle klinik açıdan anlamlı sonuçlar çıkarılmasının güç olduğunu ve iyi kontrollü çalışmalara ihtiyaç duyulduğunu vurgulamaktadır (Cheung et al., 2021; Tonini et al., 2022).

Tablo 2. İrrigasyon Aktivasyonunu Değerlendiren Başlıca Klinik Çalışmalar

Çalışma	Tasarım / örneklem	Karşılaştırma	Sonlanım noktası	Başlıca bulgu
(Carver et al., 2007)	In vivo; nekrotik mandibular molarlar	Enstrümantasyon ± sürekli ultrasonik irrigasyon	Kanal içi bakteri sayısı	Ultrasonik grupta daha fazla bakteriyel azalma
(Gondim et al., 2010)	Randomize klinik çalışma	Apikal negatif basınç vs. iğne irrigasyonu	Postoperatif ağrı	Negatif basınç grubunda daha az ağrı
(Liang et al., 2013)	RKÇ; apikal periodontitisli 84 tek köklü diş; 10–19 ay takip	Enjektör ± ultrasonik aktivasyon	Periapikal radyografi ve KIBT ile iyileşme	Anlamlı fark yok (%95,1 vs. %88,4)
(Gündoğar et al., 2021)	RKÇ; semptomatik irreversibl pulpitisli 160 hasta	Enjektör, EDDY, EndoActivator, ultrasonik aktivasyon	Postoperatif ağrı	24. saatte enjektör grubunda EDDY grubuna göre daha fazla ağrı; 24. saatten sonra fark yok

RKÇ: randomize kontrollü çalışma; KIBT: konik ışınlı bilgisayarlı tomografi. Kaynak: Yazarlar tarafından ilgili çalışmalardan derlenmiştir.

Postoperatif ağrı, hasta açısından en belirgin kısa dönem sonuçtur ve apikal ekstrüzyonla ilişkilendirilmektedir. Semptomatik irreversibl pulpitis tanılı mandibular premolarlara sahip 160 hastayı kapsayan randomize bir klinik çalışmada; enjektör irrigasyonu, iki sonik sistem (EDDY ve EndoActivator) ve ultrasonik aktivasyon karşılaştırılmıştır. En yüksek ağrı tüm gruplarda 8. saatte kaydedilmiş, 24. saatte enjektör irrigasyonu grubundaki ağrı yalnızca EDDY grubuna göre anlamlı derecede yüksek bulunmuştur (Gündoğar et al., 2021). Negatif basınç sistemiyle yapılan irrigasyonun konvansiyonel irrigasyona kıyasla postoperatif ağrıyı

azalttığı da bildirilmiştir (Gondim et al., 2010). Ancak saptanan farkların kısa süreli ve sınırlı olması, çalışmalarda farklı ağrı ölçüm araçlarının ve takip sürelerinin kullanılması, aktivasyon yöntemlerinin ağrı üzerindeki etkisine ilişkin kesin bir yargıya varılmasını güçleştirmektedir (Cheung et al., 2021; Tonini et al., 2022).

Hasta Merkezli Sonuç: Periapikal İyileşme

Klinik endodontide birincil sonuç, apikal periodontitisin önlenmesi veya iyileşmesidir (Boutsioukis & Arias-Moliz, 2022). Bu sonucu değerlendiren az sayıdaki randomize kontrollü çalışmadan birinde Liang ve arkadaşları, periapikal lezyonlu tek köklü dişleri yalnızca enjektör irrigasyonu veya ek ultrasonik aktivasyon gruplarına randomize etmiş ve 10–19 aylık takipte 84 dişi periapikal radyografi ile konik ışınlı bilgisayarlı tomografiyi (KIBT) birlikte kullanarak değerlendirmiştir (Liang et al., 2013). KIBT ile lezyonun kaybolduğu veya küçüldüğü dişlerin oranı ultrasonik grupta %95,1, enjektör grubunda %88,4 olarak bulunmuş ve iki grup arasında anlamlı fark saptanmamıştır. Tedavi sonucunu anlamlı olarak etkileyen faktörler irrigasyon yöntemi değil, başlangıçtaki lezyon hacmi ve ana kon çapı olmuştur (Liang et al., 2013).

Yazarlar bu sonucu; çalışmanın istatistiksel gücü, in vitro modellerin klinik geçerliliğinin sınırlı olması, daha iyi temizliğin kendiliğinden daha iyi sonuç anlamına gelmemesi ve apikal delta, dentin tübülleri ya da ekstraradiküler biyofilm gibi irrigasyonun etkileyemediği faktörlerin baskın etkisi ile açıklamıştır. Konuya ilişkin önceki veri bulunmadığından güvenilir bir güç analizi yapılamadığı da belirtilmiştir (Liang et al., 2013). İkili bir sonuç değişkeninde iki yöntem arasındaki %20'lik bir başarı farkını saptamak için grup başına yaklaşık 49 hasta yeterliyken, klinik olarak anlamlı kabul edilebilecek %10'luk bir fark için bu sayının yaklaşık 250'ye çıktığı hesaplanmıştır (Boutsioukis & Arias-Moliz,

2022). Bu durum, tek merkezli çalışmaların gücünün yetersiz kalabileceğini ve çok merkezli çalışmaların önemini göstermektedir.

Mevcut kanıtlar, ultrasonik aktivasyon da dahil olmak üzere hiçbir yardımcı irrigasyon yönteminin, uygun enstrümantasyon ve enjektör irrigasyonuyla elde edilebilen uzun dönem tedavi sonucunu iyileştirdiğini henüz göstermemektedir (Boutsioukis & Arias-Moliz, 2022; Căpută et al., 2019). Tüm bu bulgular, ek yöntemlerin etkisiz olduğu anlamına gelmemekte; daha çok, klinik olarak anlamlı farkları saptayabilecek güçte ve uygun sonlanım noktalarını kullanan iyi tasarlanmış çalışmalara duyulan ihtiyacı yansıtmaktadır.

Güvenlik: Apikal Ekstrüzyon ve İyatrojenik Komplikasyonlar

NaOCl'nin apikal foramenden periapikal dokulara taşması, şiddetli ağrı, ödem, ekimoz ve nadiren kalıcı nörolojik hasarla seyredebilen ciddi bir komplikasyondur (Guivarc'h et al., 2017). Yaygın kanının aksine, NaOCl konsantrasyonu ile kazanın riski veya şiddeti arasında klinik bir ilişki gösterilememiş; %1'lik solüsyonla da kaza bildirilmiştir (Boutsioukis & Arias-Moliz, 2022; Guivarc'h et al., 2017). Ex vivo çalışmalar, açık uçlu iğnelerin kapalı uçlu iğnelere göre daha fazla irrigant taşırdığını; iğne çalışma boyuna yaklaştıkça ve kanal duvarına sıkıştırıldığında ekstrüzyonun arttığını, apikal preparasyon çapı büyüdükçe ise azaldığını göstermiştir (Psimma et al., 2013). Apikal negatif basınç sistemleri ekstrüzyonu en aza indirirken, manuel dinamik aktivasyon ve lazer aktivasyonu daha fazla ekstrüzyonla ilişkilendirilmiştir (Boutsioukis & Arias-Moliz, 2022; Boutsioukis et al., 2014a).

Aktivasyon yöntemlerine özgü diğer bir risk iyatrojenik dentin kaybıdır. Ultrasonik eğeler ve düz uçlar dahil tüm ultrasonik uçların, özellikle yüksek güçte ve eğimli kanallarda kanal duvarından kontrolsüz dentin kaldırabildiği gösterilmiştir (Boutsioukis & Arias-Moliz, 2022). Sonik polimer uçların da dentin kesebildiği ve smear tabakası oluşturabildiği bildirilmiştir

(Boutsioukis & Arias-Moliz, 2022). Ultrasonik uçların kırılması ile radyolüsent plastik uç veya fırça kıllarının kanal içinde kalması da göz önünde bulundurulması gereken komplikasyonlardır (Boutsioukis & Arias-Moliz, 2022; Gu et al., 2009).

Klinik Öneriler ve Gelecek Perspektifleri

Mevcut kanıtlar ışığında NaOCl, kemomekanik preparasyon boyunca birincil irrigant olarak kullanılmalı ve kimyasal inaktivasyonu telafi etmek için bol miktarda ve sık aralıklarla yenilenmelidir (Boutsioukis & Arias-Moliz, 2022). İrrigantın ana kanalın tamamına iletilmesinde birincil taşıma mekanizması olarak akış kullanılmalıdır; bu amaçla ince, bağlanmayan ve çalışma boyuna yakın yerleştirilen bir iğne ile yapılan enjektör irrigasyonu maliyet-etkin yöntem olarak öne çıkmaktadır (Boutsioukis & Arias-Moliz, 2022). NaOCl ile güçlü şelatörlerin preparasyon sırasında dönüşümlü kullanımı serbest klorun hızla tükenmesine yol açtığından önerilmez. EDTA, preparasyon tamamlandıktan sonra birikmiş sert doku debrisini ve smear tabakasının inorganik bileşenini uzaklaştırmak amacıyla uygulanmalı, ardından NaOCl ile son irrigasyon yapılmalıdır (Boutsioukis & Arias-Moliz, 2022; Zehnder, 2006). Aktivasyonun gerekli görüldüğü durumlarda, bu son irrigasyon aşamasında aralıklı ultrasonik aktivasyon en ideal seçenek olarak değerlendirilmektedir (Boutsioukis & Arias-Moliz, 2022).

Aktivasyondan özellikle fayda görmesi beklenen olgular; isthmus, oval uzantı ve lateral kanal gibi karmaşık anatomik yapılar içeren dişler, özellikle de mandibular molarların mezyal kökleridir (Boutsioukis & Arias-Moliz, 2022; Căpută et al., 2019). Buna karşın basit anatomili tek köklü dişlerde, enjektör irrigasyonu için gerekli koşullar sağlandığında aktivasyonun ek katkısı sınırlı kalabilir (Boutsioukis & Arias-Moliz, 2022; Liang et al., 2013). Daha önce NaOCl kazası yaşanmış dişler gibi ekstrüzyon riskinin ön planda

olduğu durumlarda apikal negatif basınç sistemleri tercih edilebilir (Boutsioukis & Arias-Moliz, 2022).

Gelecekte irrigasyon protokollerinin, ultrasonik ve lazer aktivasyonunun birleştirilmesi gibi farklı yöntemleri kombine eden yaklaşımlarla güçlendirilmesi beklenmektedir. Mikrobiyom analizleri ve yüksek çözünürlüklü üç boyutlu görüntüleme ile elde edilen anatomik verilerin bilgisayar tabanlı akış simülasyonlarıyla birleştirilerek hastaya özgü irrigasyon protokollerinin geliştirilmesi de uzun vadeli araştırma hedefleri arasında yer almaktadır (Boutsioukis & Arias-Moliz, 2022). Kısa vadede ise laboratuvar çalışmalarının doğrulanmamış ara ölçüt sonlanım noktaları yerine irrigant penetrasyonuna ve olgun çok türlü biyofilmler üzerindeki etkiye odaklanması; klinik çalışmaların ise yeterli örneklem büyüklüğüne sahip, çok merkezli ve periapikal iyileşmeyi birincil sonlanım noktası olarak alan tasarımlarla yürütülmesi gerekmektedir (Boutsioukis & Arias-Moliz, 2022; Cheung et al., 2021; Virdee et al., 2018). Kontrol grubu olarak optimize edilmiş protokollerle uygulanan klinik standartların (NaOCl, EDTA, enjektör irrigasyonu ve ultrasonik aktivasyon) kullanılması da çalışmaların karşılaştırılabilirliğini artıracaktır (Boutsioukis & Arias-Moliz, 2022).

Sonuç

İrrigasyon aktivasyon sistemleri akustik akış, kavitasyon, hidrodinamik basınç değişimi ve negatif basınç gibi farklı fiziksel mekanizmalar aracılığıyla irrigantın kök kanal sistemindeki dağılımını ve mekanik etkinliğini artırmayı amaçlar. Laboratuvar düzeyinde bu sistemlerin, özellikle karmaşık anatomik bölgelerde enjektör irrigasyonuna göre daha iyi temizlik sağladığına dair tutarlı kanıtlar bulunmaktadır. Ancak bu üstünlüğün periapikal iyileşme gibi hasta merkezli sonuçlara yansıdığı henüz gösterilememiştir. Günümüzde NaOCl ve EDTA'nın enjektör -iğne ile iletildiği ve

gerektiğinde ultrasonik olarak aktive edildiği protokoller, kök kanal irrigasyonunun temelini oluşturmaya devam etmektedir. Yeni ve maliyetli sistemlerin klinik uygulamaya alınmasında üretici iddialarından çok bağımsız araştırma gruplarınca yürütülen, iyi tasarlanmış klinik çalışmaların sonuçları esas alınmalıdır.

Kaynakça

Bao, P., Shen, Y., Lin, J., & Haapasalo, M. (2017). In vitro efficacy of XP-endo Finisher with 2 different protocols on biofilm removal from apical root canals. *Journal of Endodontics, 43*(2), 321–325. https://doi.org/10.1016/j.joen.2016.09.021

Boutsioukis, C., & Arias-Moliz, M. T. (2022). Present status and future directions – irrigants and irrigation methods. *International Endodontic Journal, 55*(S3), 588–612. https://doi.org/10.1111/iej.13739

Boutsioukis, C., Gogos, C., Verhaagen, B., Versluis, M., Kastrinakis, E., & van der Sluis, L. W. M. (2010a). The effect of apical preparation size on irrigant flow in root canals evaluated using an unsteady computational fluid dynamics model. *International Endodontic Journal, 43*(10), 874–881. https://doi.org/10.1111/j.1365-2591.2010.01761.x

Boutsioukis, C., & Gutierrez Nova, P. (2021). Syringe irrigation in minimally shaped root canals using 3 endodontic needles: A computational fluid dynamics study. *Journal of Endodontics, 47*(9), 1487–1495. https://doi.org/10.1016/j.joen.2021.06.001

Boutsioukis, C., Kastrinakis, E., Lambrianidis, T., Verhaagen, B., Versluis, M., & van der Sluis, L. W. M. (2014b). Formation and removal of apical vapor lock during syringe irrigation: A combined experimental and computational fluid dynamics approach. *International Endodontic Journal, 47*(2), 191–201. https://doi.org/10.1111/iej.12133

Boutsioukis, C., Psimma, Z., & Kastrinakis, E. (2014a). The effect of flow rate and agitation technique on irrigant extrusion ex vivo. *International Endodontic Journal, 47*, 487–496. https://doi.org/10.1111/iej.12176

Boutsioukis, C., Verhaagen, B., Versluis, M., Kastrinakis, E., Wesselink, P. R., & van der Sluis, L. W. M. (2010b). Evaluation of irrigant flow in the root canal using different needle types by an unsteady computational fluid dynamics

model. *Journal of Endodontics, 36*(5), 875–879. https://doi.org/10.1016/j.joen.2009.12.026

Boutsioukis, C., Verhaagen, B., Walmsley, A. D., Versluis, M., & van der Sluis, L. W. M. (2013). Measurement and visualization of file-to-wall contact during ultrasonically activated irrigation in simulated canals. *International Endodontic Journal, 46*, 1046–1055. https://doi.org/10.1111/iej.12097

Căpută, P. E., Retsas, A., Kuijk, L., Chávez de Paz, L. E., & Boutsioukis, C. (2019). Ultrasonic irrigant activation during root canal treatment: A systematic review. *Journal of Endodontics, 45*(1), 31–44.e13. https://doi.org/10.1016/j.joen.2018.09.010

Carver, K., Nusstein, J., Reader, A., & Beck, M. (2007). In vivo antibacterial efficacy of ultrasound after hand and rotary instrumentation in human mandibular molars. *Journal of Endodontics, 33*, 1038–1043. https://doi.org/10.1016/j.joen.2006.11.026

Chen, J. E., Nurbakhsh, B., Layton, G., Bussmann, M., & Kishen, A. (2014). Irrigation dynamics associated with positive pressure, apical negative pressure and passive ultrasonic irrigations: A computational fluid dynamics analysis. *Australian Endodontic Journal, 40*(2), 54–60. https://doi.org/10.1111/aej.12027

Cheung, A. W. T., Lee, A. H. C., & Cheung, G. S. P. (2021). Clinical efficacy of activated irrigation in endodontics: A focused review. *Restorative Dentistry & Endodontics, 46*(1), e10. https://doi.org/10.5395/rde.2021.46.e10

De-Deus, G., Belladonna, F. G., de Siqueira Zuolo, A., Perez, R., Carvalho, M. S., Souza, E. M., Lopes, R. T., & Silva, E. J. N. L. (2019). Micro-CT comparison of XP-endo Finisher and passive ultrasonic irrigation as final irrigation protocols on the removal of accumulated hard-tissue debris from oval

shaped-canals. *Clinical Oral Investigations, 23*(7), 3087–3093. https://doi.org/10.1007/s00784-018-2729-y

Gondim, E. Jr., Setzer, F. C., Dos Carmo, C. B., & Kim, S. (2010). Postoperative pain after the application of two different irrigation devices in a prospective randomized clinical trial. *Journal of Endodontics, 36*(8), 1295–1301. https://doi.org/10.1016/j.joen.2010.04.012

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. *Journal of Endodontics, 35*(6), 791–804. https://doi.org/10.1016/j.joen.2009.03.010

Guivarc'h, M., Ordioni, U., Ahmed, H. M. A., Cohen, S., Catherine, J. H., & Bukiet, F. (2017). Sodium hypochlorite accident: A systematic review. *Journal of Endodontics, 43*(1), 16–24. https://doi.org/10.1016/j.joen.2016.09.023

Gündoğar, M., Sezgin, G. P., Kaplan, S. S., Özyürek, H., Uslu, G., & Özyürek, T. (2021). Postoperative pain after different irrigation activation techniques: A randomized, clinical trial. *Odontology, 109*(2), 385–392. https://doi.org/10.1007/s10266-020-00553-5

Gürler, K. (2026). Endodontik irrigasyonda güncel yaklaşımlar: Solüsyon seçimi, aktivasyon sistemleri ve klinik güvenlik. In I. İlgenli (Ed.), *Endodontide güncel uygulamalar II* (pp. 89–108). Livre de Lyon. https://doi.org/10.5281/zenodo.21716383

Liang, Y. H., Jiang, L. M., Jiang, L., Chen, X. B., Liu, Y. Y., Tian, F. C., Bao, X. D., Gao, X. J., Versluis, M., Wu, M. K., & van der Sluis, L. (2013). Radiographic healing after a root canal treatment performed in single-rooted teeth with and without ultrasonic activation of the irrigant: A randomized controlled trial. *Journal of Endodontics, 39*(10), 1218–1225. https://doi.org/10.1016/j.joen.2013.06.024

Meire, M., & De Moor, R. J. G. (2024). Principle and antimicrobial efficacy of laser-activated irrigation: A narrative review. *International Endodontic Journal, 57*(7), 841–860. https://doi.org/10.1111/iej.14042

Neuhaus, K. W., Liebi, M., Stauffacher, S., Eick, S., & Lussi, A. (2016). Antibacterial efficacy of a new sonic irrigation device for root canal disinfection. *Journal of Endodontics, 42*, 1799–1803. https://doi.org/10.1016/j.joen.2016.08.024

Nielsen, B. A., & Baumgartner, J. C. (2007). Comparison of the EndoVac system to needle irrigation of root canals. *Journal of Endodontics, 33*, 611–615. https://doi.org/10.1016/j.joen.2007.01.020

Paqué, F., Laib, A., Gautschi, H., & Zehnder, M. (2009). Hard-tissue debris accumulation analysis by high-resolution computed tomography scans. *Journal of Endodontics, 35*, 1044–1047. https://doi.org/10.1016/j.joen.2009.04.026

Peters, O. A. (2004). Current challenges and concepts in the preparation of root canal systems: A review. *Journal of Endodontics, 30*(8), 559–567. https://doi.org/10.1097/01.DON.0000129039.59003.9D

Psimma, Z., Boutsioukis, C., Kastrinakis, E., & Vasiliadis, L. (2013). Effect of needle insertion depth and root canal curvature on irrigant extrusion ex vivo. *Journal of Endodontics, 39*(4), 521–524. https://doi.org/10.1016/j.joen.2012.12.018

Rodrigues, R. C. V., Zandi, H., Kristoffersen, A. K., Enersen, M., Mdala, I., Ørstavik, D., Rôças, I. N., & Siqueira, J. F. Jr. (2017). Influence of the apical preparation size and the irrigant type on bacterial reduction in root canal-treated teeth with apical periodontitis. *Journal of Endodontics, 43*(7), 1058–1063. https://doi.org/10.1016/j.joen.2017.02.004

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, 96–103. https://doi.org/10.1016/0030-4220(71)90040-5

Sjögren, U., Figdor, D., Persson, S., & Sundqvist, G. (1997). Influence of infection at the time of root filling on the outcome of endodontic treatment of teeth with apical periodontitis. *International Endodontic Journal, 30*, 297–306. https://doi.org/10.1046/j.1365-2591.1997.00092.x

Tay, F. R., Gu, L. S., Schoeffel, G. J., Wimmer, C., Susin, L., Zhang, K., Arun, S. N., Kim, J., Looney, S. W., & Pashley, D. H. (2010). Effect of vapor lock on root canal debridement by using a side-vented needle for positive-pressure irrigant delivery. *Journal of Endodontics, 36*(4), 745–750. https://doi.org/10.1016/j.joen.2009.11.022

Tonini, R., Salvadori, M., Audino, E., Sauro, S., Garo, M. L., & Salgarello, S. (2022). Irrigating solutions and activation methods used in clinical endodontics: A systematic review. *Frontiers in Oral Health, 3*, 838043. https://doi.org/10.3389/froh.2022.838043

van der Sluis, L. W. M., Versluis, M., Wu, M. K., & Wesselink, P. R. (2007). Passive ultrasonic irrigation of the root canal: A review of the literature. *International Endodontic Journal, 40*(6), 415–426. https://doi.org/10.1111/j.1365-2591.2007.01243.x

Virdee, S. S., Seymour, D. W., Farnell, D., Bhamra, G., & Bhakta, S. (2018). Efficacy of irrigant activation techniques in removing intracanal smear layer and debris from mature permanent teeth: A systematic review and meta-analysis. *International Endodontic Journal, 51*(6), 605–621. https://doi.org/10.1111/iej.12877

Zehnder, M. (2006). Root canal irrigants. *Journal of Endodontics, 32*(5), 389–398. https://doi.org/10.1016/j.joen.2005.09.014

BÖLÜM 4

ENDODONTİDE MULTİSONİK DALGA TEKNOLOJİSİ: GENTLEWAWE SİSTEMİ VE BİYOMEKANİK TEMELLERİ

SUDE GÜL ÖZDEMİR[1]

Giriş

Endodontik tedavinin temel amacı; pulpa dokusunun nekrozu sonrasında kök kanal sistemine yerleşen mikrobiyal etkenleri ve bunların toksik ürünlerini elimine etmek, apikal periodontitisin gelişimini önlemek veya mevcut periradiküler lezyonların iyileşmesini sağlamaktır (Karobari & ark., 2026; Usta, Doğuş & Gündoğar, 2026). Ancak kök kanal sisteminin sahip olduğu karmaşık iç anatomi (isthmuslar, yan ve aksesuar kanallar, apikal deltalardaki dallanmalar, oval kanallar ve kalsifikasyonlar) endodontik dezenfeksiyonun önündeki en büyük engeli oluşturmaktadır (de Araujo & ark., 2026; Tolley & ark., 2026). Geleneksel döner veya ileri-geri hareket eden nikel-titanyum (NiTi) eğe sistemleri ile gerçekleştirilen mekanik şekillendirme işlemlerinin, kanal duvarlarının önemli bir yüzdesine hiç temas edemediği güncel araştırmalarla kanıtlanmaktadır (de Araujo & ark.,

[1] Araştırma Görevlisi, Mersin Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi, Endodonti, Orcid: 0009-0008-6673-0723

2026; Oliveira Neto & ark., 2025). Biyofilm ve bakteri birikintilerinin mekanik olarak dokunulamayan bu anatomik düzensizliklerde varlığını sürdürmesi, dezenfeksiyon başarısının büyük oranda kullanılan kimyasal irrigasyon solüsyonlarına ve bu solüsyonların aktivasyon dinamiklerine bağımlı hale gelmesine neden olmaktadır (de Araujo & ark., 2026).

Kök kanal enfeksiyonlarının patogenezinde mikrobiyal etkenler ve bunlara ait virülans faktörleri kritik bir rol oynamaktadır. Primer endodontik enfeksiyonlar çoğunlukla Gram-negatif polimikrobiyal türlerden oluşurken, persistan veya sekonder enfeksiyonlarda Enterococcus faecalis gibi dirençli Gram-pozitif mikroorganizmalar öne çıkmaktadır (Velardi & ark., 2022). Bu bakterilerin ürettiği hücre duvarı bileşenleri, enfeksiyonun şiddetini doğrudan etkilemektedir. Gram-negatif bakterilerin dış membranında bulunan lipopolisakkaritler (LPS / endotoksinler), konakçıda güçlü bir immün yanıtı tetikleyerek kendiliğinden ağrı, perküsyon hassasiyeti ve şiddetli periapikal kemik yıkımı ile ilişkilendirilmektedir (Velardi & ark., 2022). Diğer taraftan, E. faecalis gibi Gram-pozitif bakterilerin hücre duvarında yer alan lipoteikoik asit (LTA) ise bakteriyel tutunmada, konakçı iltihabi yanıtının başlatılmasında ve periapikal radyolüsenslerin genişlemesinde anahtar rol oynamaktadır (Velardi & ark., 2022). Kanal duvarlarında ve dentin tübüllerinin derinliklerinde organize olan dirençli biyofilm matrisleri ile birleştiğinde, bu virülans faktörlerinin geleneksel enstrümantasyon ve standart şırınga irrigasyonuyla tamamen uzaklaştırılması oldukça güçtür (Velardi & ark., 2022; Velardi & ark., 2022).

Son yıllarda endodontide, doğal diş yapısını ve sağlam radiküler dentini maksimum düzeyde korumayı hedefleyen "Minimal İnvaziv Endodonti" yaklaşımı popülerlik kazanmaktadır (Velardi & ark., 2022). Bu yaklaşımda, kanal preparasyon boyutlarının kısıtlı tutulması amaçlanmaktadır (de Araujo & ark.,

2026; Tolley & ark., 2026). Ancak dar preparasyon boyutları, geleneksel irrigasyon iğnelerinin apikal üçte bir bölgeye ulaşmasını ve sıvı değişimini kısıtlayarak dezenfeksiyon etkinliğini olumsuz etkileme riski taşımaktadır (Usta, Doğuş & Gündoğar, 2026).

Bu klinik ikilem karşısında GentleWave Sistemi (GWS; Sonendo, Laguna Hills, CA, ABD), minimal mekanik şekillendirme ile maksimum dezenfeksiyon sağlama vaadiyle geliştirilmiş yenilikçi bir teknoloji olarak ortaya çıkmaktadır (Karobari & ark., 2026; Usta, Doğuş & Gündoğar, 2026; Velardi & ark., 2022). GentleWave Sistemi; geniş bir frekans spektrumuna sahip multisonik akustik enerji, gelişmiş akışkan dinamiği, hidrodinamik kavitasyon ve sürekli sıvı değişimi ilkelerini birleştiren bütüncül bir ultra temizleme teknolojisidir (Usta, Doğuş & Gündoğar, 2026; Velardi & ark., 2022).

GentleWawe Sisteminin Teknolojik Yapısı ve Etki Mekanizması

GentleWave Sistemi (GWS; Sonendo, Laguna Hills, CA, ABD), geleneksel mekanik aletlerin ve kanal içi döner eğelerin ulaşamadığı anatomik bölgeleri temizlemek üzere hidro-akustik prensiplere dayalı geliştirilen bütüncül bir dezenfeksiyon sistemidir (de Araujo & ark., 2026; Oliveira Neto & ark., 2025). Sistem; geniş spektrumlu akustik enerji (multisonik ultra temizleme), gelişmiş akışkan dinamiği, hidrodinamik kavitasyon ve negatif apikal basınç ilkelerini eş zamanlı olarak uygulayarak kök kanal dezenfeksiyonunu optimize etmektedir (Velardi & ark., 2022; Usta, Doğuş & Gündoğar, 2026; Oliveira Neto & ark., 2025).

Multisonik Ultra Temizleme Teknolojisi ve Akustik Enerji

Geleneksel pasif ultrasonik irrigasyon (PUI) sistemleri genellikle tek bir yüksek frekansta (25–30 kHz) piezoelektrik enerji yayarken, sonik sistemler daha düşük frekanslarda (1–6 kHz) esnek uçların salınımı esasına dayanmaktadır (Velardi & ark., 2022). Bu

geleneksel tekniklerin aksine GentleWave Sistemi, geniş bir ses dalgası spektrumunu kapsayan "multisonik ultra temizleme" teknolojisinden yararlanmaktadır (Velardi & ark., 2022; Usta, Doğuş & Gündoğar, 2026). Sistem tarafından üretilen multisonik enerji dalgaları, pulpa odasından başlayarak ana kanallar, isthmuslar, yan ve aksesuar kanallar ile dentin tübüllerinin derinliklerine kadar yayılan sürekli bir enerji akışı oluşturmaktadır (Velardi & ark., 2022; Karobari & ark., 2026). Bu geniş frekans spektrumu, kanal içerisinde herhangi bir metal veya polimer ucun apikal bölgeye doğru ilerletilmesine gerek kalmadan, sıvının enerjiyle yüklenerek en dar anatomik düzensizliklere dahi nüfuz etmesine olanak tanımaktadır (Velardi & ark., 2022; de Araujo & ark., 2026).

Gelişmiş Akışkan Dinamiği ve Hidrodinamik Kavitasyon

GentleWave Sisteminin temel etki mekanizmalarından biri, pulpa odasında meydana gelen gelişmiş akışkan dinamiği ve hidrodinamik kavitasyon olgusudur (Velardi & ark., 2022; Oliveira Neto & ark., 2025). İşlem sırasında degassing (gazı alınmış) irrigasyon solüsyonu, özel el aletinin ucundan pulpa odasındaki durağan sıvı kütlesine doğru yüksek hızla püskürtülmektedir (Velardi & ark., 2022; Oliveira Neto & ark., 2025). Hareketli sıvının durağan sıvıya çarpmasıyla yüksek kesme kuvvetleri meydana gelmekte ve pulpa odasında bulut şeklinde yoğun bir hidrodinamik kavitasyon alanı tetiklenmektedir (Velardi & ark., 2022).

Hidrodinamik kavitasyon süreci, sıvı içerisinde mikroskobik buhar kabarcıklarının (mikrobaloncuklar) sürekli olarak oluşması ve ardından şiddetle içe doğru çökmesi esasına dayanır (Velardi & ark., 2022; Usta, Doğuş & Gündoğar, 2026). Bu mikro patlamalar ve oluşan akustik mikro akışlar, kanal duvarlarına yapışmış olan dirençli bakteriyel biyofilm tabakalarını, organik pulpa artıklarını, smear tabakasını ve birikmiş sert doku kalıntılarını mekanik olarak parçalayarak yüzeyden sökmektedir (Velardi & ark., 2022; de Araujo

& ark., 2026; Usta, Doğuş & Gündoğar, 2026). Ayrıca bu dinamik çalkalama, kullanılan kimyasal solüsyonların (NaOCl ve EDTA) doku çözme ve dezenfeksiyon reaksiyon hızlarını önemli ölçüde artırmaktadır (de Araujo & ark., 2026; Karobari & ark., 2026).

Negatif Apikal Basınç Mekanizması ve Apikal Ekstrüzyon Güvenliği

Geleneksel şırınga ve iğne irrigasyonunda sıvının apikal yönde pozitif basınçla itilmesi, NaOCl gibi sitotoksik irrigasyon solüsyonlarının periapikal dokulara sızması (apikal ekstrüzyon) ve "hipoklorit kazası" gibi ciddi komplikasyon risklerini beraberinde getirmektedir (de Araujo & ark., 2026; Karobari & ark., 2026). GentleWave Sistemi ise kök kanal sistemi içerisinde negatif apikal basınç prensibiyle çalışacak şekilde tasarlanan bir sistemdir (de Araujo & ark., 2026; Usta, Doğuş & Gündoğar, 2026; Oliveira Neto & ark., 2025).

El aletine entegre edilmiş olan sürekli emme mekanizması, pulpa odasına iletilen fazla sıvıyı, çözünmüş doku artıklarını ve gazları eş zamanlı olarak dışarı emerek konsol içerisindeki atık haznesine yönlendirmektedir (Oliveira Neto & ark., 2025). Bu sürekli emme hareketi, sıvı akışında hafif bir girdap ve negatif basınç gradyanı oluşturur (Oliveira Neto & ark., 2025). Böylece irrigasyon solüsyonları apikale doğru güvenli bir şekilde çekilmekte, apikal daralmanın ötesine sıvı taşma riski minimuma indirilmekte ve çalışma uzunluğu boyunca apikal ekstrüzyon güvenliği sağlanmaktadır (de Araujo & ark., 2026; Usta, Doğuş & Gündoğar, 2026).

Sistem Bileşenleri ve İrrigasyon Solüsyon Protokolü

GentleWave Sistemi, üç ana teknolojik bileşenin ve hassas bir kimyasal uygulamanın entegrasyonundan oluşmaktadır (Velardi & ark., 2022; Oliveira Neto & ark., 2025):

1. **Ana Konsol:** İrrigasyon solüsyonlarının otomatik akış hızlarını, sıcaklıklarını, gaz giderme süreçlerini ve emme mekanizmasını yöneten merkezi bilgisayarlı ünitedir (Velardi & ark., 2022; Oliveira Neto & ark., 2025).
2. **Tek Kullanımlık El Aleti ve SoundSeal Platformu:** İşlem öncesinde, dişin koronal kısmında sızdırmaz bir çalışma ortamı elde etmek amacıyla ışıkla sertleşen özel reçine materyali (SoundSeal, Sonendo) ile bir pulpa odası platformu inşa edilir (Velardi & ark., 2022). Steril ve hasta odaklı tek kullanımlık el aleti, bu platform üzerine oturtularak kanal içerisine sokulmadan yalnızca pulpa odası seviyesinde konumlandırılır (Velardi & ark., 2022; Oliveira Neto & ark., 2025).
3. **Degassing (Gaz Giderme) Ünitesi:** İrrigasyon sıvılarının kanala iletilmeden önce çözünmüş gazlardan arındırılması kritik bir basamaktır. Sıvı içerisindeki gazların uzaklaştırılması, apikal bölgede hava kabarcıklarının sıkışması sonucu oluşan "apikal buhar kilitlenmesi" olgusunu önler ve sıvının dentin tübüllerine ve mikro kanallara kesintisiz temasını sağlar (Velardi & ark., 2022).

İrrigasyon Solüsyon Protokolü: GentleWave Sistemi, üretici firmanın standartlaştırdığı sıralı ve zamanlamalı bir kimyasal protokol yürütmektedir (Velardi & ark., 2022; Oliveira Neto & ark., 2025):

- **Aşama 1 (Doku Çözme ve Dezenfeksiyon):** Yaklaşık 45 mL/dk akış hızında 5 dakika boyunca gazı alınmış %3 Sodyum Hipoklorit (NaOCl) uygulaması (Velardi & ark., 2022; de Araujo & ark., 2026).
- **Aşama 2 (Nötralizasyon ve Durulama):** 15 saniye boyunca steril/damıtılmış su ile durulama (Velardi & ark., 2022; Oliveira Neto & ark., 2025).

- **Aşama 3 (İnorganik Temizlik ve Smear Tabakası Eliminasyonu):** 2 dakika boyunca %8 Etilendiamintetraasetik Asit (EDTA) (nötr pH) uygulaması (Velardi & ark., 2022; Oliveira Neto & ark., 2025).
- **Aşama 4 (Son Durulama):** 15 saniye boyunca steril/damıtılmış su ile son yıkama gerçekleştirilerek kanal içi kurutma ve dolgu aşamasına geçilir (Velardi & ark., 2022; Oliveira Neto & ark., 2025).

Klinik Uygulamalar ve Yaklaşımlar

GentleWave Sistemi (GWS; Sonendo, Laguna Hills, CA, ABD), klinik çalışma sahasındaki uygulama adımları ve çalışma konsepti açısından geleneksel kök kanal tedavisi protokollerinden belirgin farklılıklar göstermektedir (de Araujo & ark., 2026; Shon, 2016). Sistem, kök kanal içi alet uygulamasından ziyade koronal pulpa odasından yönetilen hidro-akustik bir irrigasyon yaklaşımına dayanmaktadır (Velardi & ark., 2022; Amaral & ark., 2025). Bu doğrultuda klinik başarının elde edilmesi; doğru erişim kavitesi hazırlığına, pulpa odası seviyesinde tam bir sıvı sızdırmazlığının sağlanmasına, minimal invaziv preparasyon konseptiyle doğru entegrasyona ve karmaşık kanal anatomilerine uygun çalışma standartlarının uygulanmasına bağlıdır (Velardi & ark., 2022; Usta, Doğuş & Gündoğar, 2026).

Pulpa Odası Platformu (SoundSeal) ve Erişim Kavitesi Hazırlığı

GentleWave uygulamasında ilk ve en kritik aşama, işlem sırasında sıvının dışarı sızmasını önleyecek ve vakum/emme mekanizmasının etkinliğini koruyacak hava ve sıvı geçirmez bir oklüzal platformun (SoundSeal) inşa edilmesidir (Velardi & ark., 2022; Velardi & ark., 2022).

Klinik işlem sırası şu adımları kapsamaktadır (Velardi & ark., 2022; Velardi & ark., 2022; Amaral & ark., 2025):

1. **Erişim Kavitesi Hazırlığı ve Açıklık Kontrolü:** Diş ameliyat mikroskobu altında geleneksel veya konservatif erişim kavitesi hazırlanır. Kök kanallarına 10 numara K-eğesi yerleştirilerek apikal patensi (açıklık) kontrol edilir ve çalışma uzunluğu belirlenir.
2. **Oklüzal Platformun (SoundSeal) Oluşturulması:** Dişin koronal duvarlarındaki eksiklikler, kuron kayıpları veya kavite sınırları ışıkla sertleşen özel reçine materyali (SoundSeal, Sonendo Inc.) ile rekonstrüke edilir. Bu platform, işlem esnasında el aletinin oturacağı stabil ve sızdırmaz bir hazne görevi görür.
3. **El Aleti Ucu Seçimi ve Konumlandırma:** Üretici firmanın sağladığı özel derinlik ölçerler kullanılarak, pulpa odasının derinliğine ve morfolojisine uygun sızdırmazlık kapağı ve el aleti ucu seçilir. Steril, tek kullanımlık el aleti bu platform üzerine sızdırmaz şekilde kilitlenir. El aletinin ucu pulpa odasında kalacak şekilde konumlandırılır; kanal ağızlarına veya kanal lümenine kesinlikle sokulmaz.

Minimal İnvaziv Teknik ve Geleneksel Enstrümantasyon Tekniği ile Entegrasyonu

Geleneksel endodontik tedavide dezenfeksiyon solüsyonlarının apikal bölgeye ulaşabilmesi için kanalların ISO 30-35 veya daha büyük boyutlara genişletilmesi gerekmektedir (Usta, Doğuş & Gündoğar, 2026; Velardi & ark., 2022). Ancak kanalların aşırı genişletilmesi radiküler dentin dokusunu zayıflatmakta ve dikey kök kırığı riskini artırmaktadır (Velardi & ark., 2022).

GentleWave Sistemi, Minimal İnvaziv Teknik (örneğin ISO 15/.04 veya 20/.06 preparasyon boyutu) ile tam bir uyum içerisinde çalışabilmektedir (de Araujo & ark., 2026; Usta, Doğuş & Gündoğar, 2026; Velardi & ark., 2022). Multisonik enerjinin ve sıvı kavitasyonunun pulpa odasından tüm kanal sistemine yayılması

sayesinde, kanal içi döner eğelerin yalnızca apikal patensi sağlamak ve rehber yol oluşturmak amacıyla kullanılması yeterli olmaktadır (Velardi & ark., 2022; Amaral & ark., 2025).

Yapılan araştırmalarda, GentleWawe Sisteminin minimal invaziv preparasyon (MIT; ISO 15/.04) ve geleneksel enstrümantasyon (CIT; ISO 35/.04) uygulanan gruplarda Enterococcus faecalis lipoteikoik asit (LTA) ve lipopolisakkarit (LPS) virülans faktörlerini uzaklaştırma etkinliği karşılaştırılmaktadır (Velardi & ark., 2022; Velardi & ark., 2022). Elde edilen veriler, GWS+MIT ve GWS+CIT protokollerinin virülans faktörlerinin dezenfeksiyonunda eşit düzeyde yüksek başarı gösterdiğini ve aralarında istatistiksel olarak anlamlı bir fark bulunmadığını ortaya koymaktadır (Velardi & ark., 2022; Velardi & ark., 2022).

Buna karşılık, pasif ultrasonik irrigasyon (PUI) gibi yöntemlerde ultrasonik ucun dar hazırlanmış kanallarda (ISO 15) dentin duvarlarına temas etmesi sonucu salınım genliğinin kısıtlandığı ve dezenfeksiyon etkinliğinin anlamlı derecede düştüğü gösterilmektedir (Velardi & ark., 2022; Velardi & ark., 2022). Bu durum, GWS'nin minimal enstrümantasyon uygulanan vakalarda dentin yapısını korurken üstün dezenfeksiyon sağlama klinik avantajını doğrulamaktadır (Velardi & ark., 2022; Usta, Doğuş & Gündoğar, 2026).

Karmaşık Kanal Anatomilerinde Kullanım Standartları

Kök kanal sisteminin mekanik aletlerle temas edilemeyen alanları (isthmuslar, yan ve aksesuar kanallar, oval kanallar, C-şekilli kanallar ve apikal deltalardaki kalsifikasyonlar) bakteriyel biyofilmin ve doku artıklarının biriktiği ana sığınaklardır (de Araujo & ark., 2026; Karobari & ark., 2026; Amaral & ark., 2025).

- **Isthmus ve Yan Kanalların Temizliği:** GWS'nin ürettiği hidrodinamik kavitasyon ve yüksek hızlı kesme kuvvetleri, alt ve üst çene azı dişlerinin dar isthmus bölgelerinde biriken sert doku kalıntılarını (AHTD) ve organik pulpa artıklarını %97'nin üzerinde bir oranla temizleyebilmektedir (Karobari & ark., 2026; Usta, Doğuş & Gündoğar, 2026).
- **Oval ve Yassı Kanallar:** Geleneksel döner eğelerin dairesel kesitleri nedeniyle ulaşamadığı oval kanalların bukkal ve lingual uzantılarında, GWS hidrodinamik akış mekanizması sayesinde biyofilm tabakasını ve smear tabakasını bütüncül olarak uzaklaştırabilmektedir (Karobari & ark., 2026; Usta, Doğuş & Gündoğar, 2026).
- **Çok Köklü ve Karmaşık Azı Dişleri:** Çok köklü dişlerde ve aksesuar kanalların yoğun olduğu anatomik yapılarda, GWS'nin multisonik enerjisi pulpa odasından itibaren tüm kanal dallarına eş zamanlı olarak iletilmektedir (Velardi & ark., 2022; Amaral & ark., 2025). Bu sayede hekimin her bir kanalı tek tek uzun süreler boyunca irrigasyona tabi tutma ihtiyacı azalmakta, tedavi süresi ve klinik operasyon standartları optimize edilmektedir (Velardi & ark., 2022; de Araujo & ark., 2026).

Diğer Gelişmiş İrrigasyon ve Aktivasyon Sistemleri ile Karşılaştırma

Endodontik tedavide klinik başarının anahtarı olan kök kanal dezenfeksiyonunu artırmak amacıyla tarihsel süreç içerisinde pozitif basınçlı şırınga irrigasyonundan başlayarak pasif ultrasonik irrigasyon (PUI), sonik aktivasyon cihazları, negatif basınçlı irrigasyon üniteleri ve lazer destekli sistemlere (Er:YAG, SWEEPS) kadar pek çok teknoloji bulunmaktadır (de Araujo & ark., 2026; Karobari & ark., 2026; Usta, Doğuş & Gündoğar, 2026). GentleWave Sistemi (GWS), bu teknolojilerin sunduğu fiziksel ve kimyasal mekanizmaları multisonik akustik enerji, gazı alınmış

solüsyon akışı ve hidrodinamik kavitasyon başlığı altında tek bir platformda birleştirmektedir (Velardi & ark., 2022; Karobari & ark., 2026). Bu bölümde, GWS'nin literatürdeki deneysel ve klinik veriler ışığında diğer gelişmiş irrigasyon sistemleriyle karşılaştırmalı analizi sunulmaktadır.

Pasif Ultrasonik İrrigasyon (PUI) ile Karşılaştırmalı Laboratuvar ve Klinik Sonuçlar: Pasif Ultrasonik İrrigasyon (PUI), piezoelektrik veya manyetostriktif transdüserler aracılığıyla yüksek frekansta (25–30 kHz) titreşen metal bir ucun (örneğin ProUltra PiezoFlow, Irrisafe) kanal içi sıvıda akustik mikro akış ve kavitasyon oluşturması esasına dayanmaktadır (Velardi & ark., 2022; Oliveira Neto & ark., 2025).

1. **Mikrobiyolojik Etkinlik ve Virülans Faktörlerinin Eliminasyonu:** Laboratuvar araştırmalarında, PUI'nin dezenfeksiyon başarısının kanal hazırlık boyutuna doğrudan bağımlı olduğu gösterilmektedir (Velardi & ark., 2022; Velardi & ark., 2022). Ultrasonik ucun apikal üçte bir bölgede serbestçe salınabilmesi ve dentin duvarlarına temas etmemesi gerekmektedir; ucu dar kanallarda (örneğin ISO 15/.04) dentin duvarına temas ettiğinde salınım genliği kısıtlanmakta ve dezenfeksiyon gücü düşmektedir (Velardi & ark., 2022; Velardi & ark., 2022). GWS ise el aletinin kanal içerisine sokulmaması nedeniyle dar hazırlanmış veya minimal invaziv (MIT; ISO 15/.04) kanallarda dahi multisonik enerjiyi tüm kanala yayabilmektedir (Velardi & ark., 2022; Velardi & ark., 2022). Yapılan karşılaştırmalı in vitro çalışmalarda GWS'nin, E. faecalis bakterisini, LTA ve LPS virülans faktörlerini uzaklaştırmada PUI'ye göre istatistiksel olarak anlamlı derecede daha yüksek bir dezenfeksiyon ve öngörülebilirlik sağladığı kanıtlanmaktadır (Zhang & ark., 2019; Velardi & ark., 2022; Velardi & ark., 2022; Alquria & ark., 2023). Ancak kanalların geleneksel

boyutta (CIT; ISO 35/.04) genişletildiği ve apikal fiziksel erişimin arttığı durumlarda, PUI ile GWS arasındaki biyofilm ve bakteri miktarındaki azalmanın birbirine yaklaştığı ve benzer seviyelere ulaştığı bildirilmektedir (Coaguila-Llerena & ark., 2022)

2. **Debridman, Smear Tabakası ve Doku Çözünmesi:** Doku çözme kapasitesi açısından GWS, bünyesindeki vakum ve degassing mekanizması sayesinde %3 NaOCl ile organik dokuyu ortalama 82 saniyede çözerken, PUI destekli %6 NaOCl uygulamasının aynı dokuyu çözme hızı belirgin şekilde daha yavaş kalmaktadır (Haapasalo & ark., 2014; Karobari & ark., 2026). Sert doku kalıntılarının (AHTD) ve isthmus debridmanının mikro-CT ile değerlendirildiği çalışmalarda ise, GWS'nin PUI'ye göre daha yüksek debridman skorları elde ettiği gösterilmekle birlikte (Chan & ark., 2019), bazı araştırmalarda her iki sistemin de benzer düzeyde yüksek AHTD temizliği sağladığı rapor edilmektedir (Sharma & ark., 2023; Usta, Doğuş & Gündoğar, 2026).
3. **Klinik İyileşme ve Ameliyat Sonrası Ağrı:** GWS ile tedavi edilen vakalarda 6 ve 12 aylık takiplerde %97'yi aşan periapikal iyileşme oranları bildirilmektedir (Sigurdsson & ark., 2018). Ancak GWS ile PUI+NPI (Negatif Basınçlı İrrigasyon) kombinasyonunu doğrudan karşılaştıran prospektif kohort çalışmalarında, iki sistem arasında 12 aylık periapikal lezyon iyileşme başarı oranları açısından istatistiksel olarak anlamlı bir fark bulunmamaktadır (GWS: %83,5, PUI+NPI: %87,1) (Montero & ark., 2025; de Araujo & ark., 2026). Benzer şekilde, prospektif randomize kontrollü klinik çalışmalarda, tedavi sonrası ameliyat sonrası ağrı (postoperatif ağrı) şiddeti ve analjezik kullanımı açısından GWS ile PUI arasında anlamlı bir fark

saptanmamaktadır (Grigsby & ark., 2020; Dale, 2021; Karobari & ark., 2026).

Lazerle Aktive Edilen İrrigasyon (LAI): Er:YAG lazer, SWEEPS (Shock Wave Enhanced Emission Photoacoustic Streaming) ve Er,Cr:YSGG (Waterlase iPlus) gibi lazer sistemleri, solüsyon içerisinde fotoakustik şok dalgaları ve kavitasyon kabarcıkları oluşturarak dezenfeksiyon sağlamaktadır (Gündoğar & ark., 2025; Usta, Doğuş & Gündoğar, 2026). Ex vivo ve in vitro histolojik analizlerde, GWS ve SWEEPS teknolojilerinin nekrotik oval kanallarda ve apikal isthmuslarda benzer düzeyde son derece yüksek debridman ve sert doku kalıntısı temizliği sağladığı gösterilmektedir (Gündoğar & ark., 2025). Er:YAG lazer ve GWS'nin smear tabakasını uzaklaştırma performanslarının geleneksel iğne irrigasyonundan açık ara üstün olduğu, ancak iki gelişmiş sistemin birbirine yakın etkinlik sergilediği saptanmaktadır (Dash & ark., 2020; Usta, Doğuş & Gündoğar, 2026). Fototermal dezenfeksiyon (LEAP) yaklaşımlarında ise dentin tübüllerinin 50–150 µm derinliğindeki bakteriyel öldürme oranlarında lazer sistemlerinin bir miktar avantaj sağladığı, ana kanal lümeninde ise GWS ile benzer antibakteriyel etki elde edildiği bildirilmektedir (Auerbach & ark., 2024).

Sonik Aktivasyon Sistemleri (EndoActivator, EDDY): Sonik sistemler, esnek polimer veya metal uçları düşük frekanslarda (1–6 kHz) titreştirerek sıvıyı çalkalamaktadır (Oliveira Neto & ark., 2025). Polimer uçların dentin duvarlarına zarar vermeme avantajı bulunsa da ürettikleri enerji spektrumu ve kavitasyon gücü multisonik akustik dalgalara kıyasla daha sınırlıdır (Alquria & ark., 2023; Oliveira Neto & ark., 2025). Laboratuvar verileri, GWS'nin bakteriyel biyofilm, LTA ve LPS eliminasyonunda EndoActivator gibi sonik cihazlara göre anlamlı derecede daha yüksek dezenfeksiyon sağladığını ortaya koymaktadır (Alquria & ark., 2023; Usta, Doğuş & Gündoğar, 2026). Buna karşılık, klinik

ameliyat sonrası ağrı parametrelerinde GWS ile EndoActivator arasında belirgin bir fark gözlenmemektedir (Bingham, 2022; Karobari & ark., 2026).

Geleneksel Şırınga İrrigasyonuna Karşı Sağladığı Farklar: Geleneksel şırınga ve iğne irrigasyonu (open-ended veya side-vented iğneler), sıvının elle pozitif basınç altında kanala itilmesi esasına dayanmaktadır (Haapasalo & ark., 2016; Karobari & ark., 2026).

- **Sıvı Akış Dinamiği ve Derinlik:** Şırınga irrigasyonunda sıvının yenilenmesi ve yıkama etkisi iğne ucunun en fazla 1–2 mm ötesine ulaşabilmektedir. Aletle şekillendirilmemiş yanal kanallara, isthmuslara ve dentin tübüllerine sıvı penetrasyonu son derece kısıtlıdır (de Araujo & ark., 2026; Karobari & ark., 2026). GentleWave Sistemi ise degassing yapılmış solüsyonların hidrodinamik kavitasyon ve vakum etkisiyle apikal daralmaya ve tübül derinliklerine (400 µm'nin üzerine) kesintisiz ulaşmasını sağlamaktadır (Haapasalo & ark., 2014; Karobari & ark., 2026).
- **Apikal Güvenlik ve Basınç Profili:** Şırınga irrigasyonunda pozitif basınç nedeniyle NaOCl'nin periapikal dokulara sızma ve "hipoklorit kazası" oluşturma riski oldukça yüksektir; deneysel modellerde geleneksel iğnelerde %33'e varan apikal ekstrüzyon oranları bildirilmektedir (Charara & ark., 2016; Crepps, 2019). GWS ise el aletine entegre sürekli emme ünitesi sayesinde işlem boyunca negatif apikal basınç değerlerini korumakta, apikal ekstrüzyon ve doku iritasyonu riskini ortadan kaldırmaktadır (Haapasalo & ark., 2016; Charara & ark., 2016; Wohlgemuth & ark., 2015).
- **Temizlik ve Doku Çözme Hızı:** Geleneksel şırınga irrigasyonu organik pulpa dokularını çözmede 20 dakikadan uzun sürelere ihtiyaç duyarken ve %30–40 oranında dokunulmamış alan bırakırken, GWS %97'nin üzerinde

bütüncül temizlik ve birkaç dakika içerisinde tam doku çözünmesi sağlamaktadır (Haapasalo & ark., 2014; Molina & ark., 2015; de Araujo & ark., 2026).

GentleWawe Sisteminin Klinik Avantajları ve Sınırlılıkları

Yenilikçi dezenfeksiyon teknolojilerinin klinik pratiğe aktarılmasında en kritik basamak, sunulan teknolojik avantajların gerçek klinik başarıya, hasta konforuna ve doku koruma ilkelerine ne ölçüde yansıdığının objektif bir yarar/zarar analiziyle değerlendirilmesidir (de Araujo & ark., 2026; Karobari & ark., 2026; Usta, Doğuş & Gündoğar, 2026). GentleWave Sistemi (GWS), hidro-akustik kavitasyon gücüyle kök kanal tedavisinde geleneksel yaklaşımların ötesine geçen belirgin klinik avantajlar sunmakla birlikte, beraberinde getirdiği ekonomik ve metodolojik sınırlılıklar nedeniyle klinisyenler açısından dikkatle tartılması gereken bir profil çizmektedir (de Araujo & ark., 2026; Karobari & ark., 2026).

Klinik Avantajlar ve Yararlar

- **Radiküler Dentin Dokusunun Korunması ve Prosedürel Hata Riskinin Azalması:** Geleneksel kemomekanik şekillendirmede dezenfektan solüsyonların apikale ulaşabilmesi için kanalların genişletilmesi (ISO 30–35 veya daha büyük boyutlara) gerekmektedir (Usta, Doğuş & Gündoğar, 2026; Velardi & ark., 2022). Bu durum radiküler dentin hacmini azaltarak dişi dikey kök kırıklarına (VRF) karşı hassas hale getirmektedir (Velardi & ark., 2022). GWS ise multisonik enerjinin pulpa odasından iletilmesi sayesinde, kanalların ISO 15/.04 veya 20/.06 gibi son derece dar boyutlarda hazırlanmasına (MIT) imkan tanımaktadır (de Araujo & ark., 2026; Velardi & ark., 2022). Kanal içi aşırı alet kullanımına ihtiyaç duyulmaması; perforasyon, basamak (ledge) oluşumu, kanal taşınması (transportasyon) ve dikey

kök kırığı riskini önemli ölçüde azaltmaktadır (de Araujo & ark., 2026; Oliveira Neto & ark., 2025).

- **Karmaşık Anatomik Bölgelerde Yüksek Dezenfeksiyon ve Debridman:** Döner eğelerin mekanik olarak dokunamadığı isthmuslar, yanal kanallar, oval kanallar ve apikal deltalarda biriken organik pulpa artıkları, bakteriyel biyofilm ve birikmiş sert doku kalıntıları (AHTD), GWS'nin hidrodinamik kavitasyon etkisiyle %97'nin üzerinde bir oranla temizlenmektedir (Haapasalo & ark., 2014; Karobari & ark., 2026; Usta, Doğuş & Gündoğar, 2026). Bu durum, özellikle anatominin son derece karmaşık olduğu ve re-treatment (tekrarlayan tedavi) vakalarında adeziv tıkanma öncesi temizliğin kritik olduğu durum klinik başarısını yükseltmektedir (Wright & ark., 2019; de Araujo & ark., 2026).
- **Doku Çözünme Hızının Artması ve İşlem Süresinin Kısalması:** Sistem bünyesinde uygulanan gazı alınmış NaOCl solüsyonu ve yüksek hızlı çalkalama, organik dokuların çözünme reaksiyonunu olağanüstü düzeyde hızlandırmaktadır (Haapasalo & ark., 2014; Molina & ark., 2015). Geleneksel şırınga irrigasyonunun 20 dakikadan uzun sürede başarabildiği doku çözünmesi, GWS ile ortalama 82 ila 228 saniyede tamamlanmaktadır (Haapasalo & ark., 2014; Molina & ark., 2015). Bu ivme, klinisyenin koltuk başında geçirdiği süreyi kısaltmakta ve kök kanal tedavisinin vakaların büyük çoğunluğunda tek seansta öngörülebilir şekilde tamamlanmasına olanak sağlamaktadır (Velardi & ark., 2022; de Araujo & ark., 2026).
- **Apikal Ekstrüzyon Güvenliği ve Negatif Basınç Profili:** GWS el aletine entegre sürekli emme mekanizması, pulpa odasında negatif apikal basınç gradyanı oluşturarak irrigasyon solüsyonlarının periapikal dokulara sızmasını engellemektedir (Haapasalo & ark., 2016; Charara & ark.,

2016; Wohlgemuth & ark., 2015). Geleneksel iğne irrigasyonunda %33'e varan apikal ekstrüzyon ve buna bağlı NaOCl kazaları riski bulunurken, GWS'de apikal ekstrüzyon gözlenmemektedir (Charara & ark., 2016; Crepps, 2019).

- **Periapikal İyileşme ve Ameliyat Sonrası Ağrı Düzeyleri:** Erken dönem prospektif çok merkezli klinik çalışmalarda, GWS ile tedavi edilen vakalarda büyük periapikal lezyonlarda (PAI skoru ≥ 3) dahi 6 ve 12 aylık takiplerde %97'yi aşan periapikal iyileşme oranları bildirilmektedir (Sigurdsson & ark., 2016; Sigurdsson & ark., 2018). Ayrıca randomize kontrollü çalışmalarda, tedavi sonrası ameliyat sonrası ağrı şiddeti ve analjezik kullanımı açısından GWS ile PUI veya EndoActivator gibi sistemler arasında anlamlı bir fark bulunmadığı, hastaların çoğunda ağrısız bir iyileşme süreci elde edildiği gösterilmektedir (Grigsby & ark., 2020; Dale, 2021; Bingham, 2022).

Sınırlılıklar, Riskler ve Dezavantajlar

- **Yüksek Cihaz Maliyeti ve Sarf Malzeme Bağımlılığı:** GWS'nin rutin klinik kullanıma girmesinin önündeki en büyük engel ekonomik faktörlerdir (de Araujo & ark., 2026; Karobari & ark., 2026; Usta, Doğuş & Gündoğar, 2026). Cihazın yüksek satın alma maliyeti, periyodik bakım giderleri ve en önemlisi her hasta için kullanılan özel tek kullanımlık el aletlerinin (single-use handpiece) ve sızdırmazlık reçinelerinin maliyeti, işlem başına düşen sarf giderini önemli ölçüde artırmaktadır (de Araujo & ark., 2026; Karobari & ark., 2026). Bu durum, sistemin maliyet-etkinliğini tartışmalı hale getirmekte ve yaygın erişilebilirliğini kısıtlamaktadır (Karobari & ark., 2026; Usta, Doğuş & Gündoğar, 2026).
- **Klinik Kanıt Düzeyinin Sınırlılığı ve Metodolojik Heterojenlik:** Literatürdeki GentleWave yayınlarının

%80'den fazlası in vitro veya ex vivo laboratuvar araştırmalarından oluşmaktadır (de Araujo & ark., 2026; Oliveira Neto & ark., 2025). Yayınlanmış klinik çalışma sayısı oldukça sınırlı olup, bu çalışmaların önemli bir kısmı tek kollu prospektif kohort tasarımlarıdır (Sigurdsson & ark., 2018; de Araujo & ark., 2026). Bağımsız randomize kontrollü klinik çalışmaların (RCT) azlığı, bilimsel kanıt düzeyinin "düşük ila orta" seviyede kalmasına neden olmaktadır (de Araujo & ark., 2026; Karobari & ark., 2026).

- **Diğer Gelişmiş İrrigasyon Sistemlerine Karşı Klinik Eşdeğerlik:** Laboratuvar çalışmalarında GWS'nin debridman ve bakteri DNA'sı azaltmada üstün performans gösterdiği bildirilse de, güncel ve bağımsız klinik çalışmalar zıt bir tablo sunmaktadır (Montero & ark., 2025; de Araujo & ark., 2026). Apikal periodontitisli 230 azı dişini kapsayan prospektif kohort çalışmasında Montero ve ark. (2025), GWS ile Pasif Ultrasonik İrrigasyon + Negatif Basınçlı İrrigasyon (PUI+NPI) kombinasyonu arasında 12 aylık periapikal iyileşme oranlarında (GWS: %83,5, PUI+NPI: %87,1) istatistiksel olarak anlamlı bir fark saptamadıklarını bildirmektedir. Benzer şekilde, ameliyat sonrası ağrı parametrelerinde de GWS'nin PUI veya sonik sistemlere açık bir üstünlük sağlamadığı gösterilmektedir (Grigsby & ark., 2020; Dale, 2021). Bu veriler, GWS'nin dezenfeksiyon teknolojileri arasında devrimsel bir üstünlükten ziyade, "etkili bir alternatif" konumunda olduğunu düşündürmektedir (de Araujo & ark., 2026; Karobari & ark., 2026).
- **Hassas Klinik Teknik ve Platform Oluşturma Zorluğu:** GWS uygulamasının başarısı, oklüzal bölgede tam bir sızdırmazlık sağlayan SoundSeal platformunun kusursuz inşasına bağlıdır (Velardi & ark., 2022). Koronal doku kaybının çok fazla olduğu, subgingival madde kayıplı veya

izole edilmesi zor olan dişlerde sızdırmaz bir pulpa odası platformu oluşturmak teknik olarak hassas ve zaman alıcı bir süreçtir (Velardi & ark., 2022; de Araujo & ark., 2026). Sızdırmazlığın bozulması durumunda vakum etkisi kaybolmakta ve sistemin çalışması durmaktadır (Velardi & ark., 2022).

Sonuç

Endodontik enfeksiyonların tedavisinde ve apikal periodontitisin iyileşmesinde anahtar rol oynayan kök kanal dezenfeksiyonu, kanal sisteminin karmaşık iç anatomisi ve geleneksel mekanik aletlerin ulaştığı fiziksel sınırlar nedeniyle uzun yıllardır klinik bir meydan okuma olmaya devam etmektedir. GentleWave Sistemi (GWS), geniş spektrumlu multisonik akustik enerji, gelişmiş akışkan dinamiği, hidrodinamik kavitasyon, gazı alınmış solüsyon akışı ve negatif apikal basınç ilkelerini tek bir teknolojik platformda birleştirerek endodontik irrigasyon yaklaşımında önemli bir yenilik sunmaktadır (de Araujo & ark., 2026; Usta, Doğuş & Gündoğar, 2026).

Mevcut in vitro ve ex vivo literatür verileri, GWS'nin Enterococcus faecalis biyofilmlerini, LTA ve LPS gibi güçlü bakteriyel virülans faktörlerini, organik pulpa dokularını, smear tabakasını ve birikmiş sert doku kalıntılarını (AHTD) uzaklaştırmada geleneksel şırınga irrigasyonuna açık ara üstünlük sağladığını göstermektedir (Velardi & ark., 2022; Velardi & ark., 2022; Alquria & ark., 2023). Sistemin el aletinin kanal içine sokulmadan yalnızca pulpa odasından uygulanabilmesi ve ürettiği hidro-akustik enerji, kanalların ISO 15/.04 gibi son derece kısıtlı boyutlarda hazırlandığı Minimal İnvaziv Endodonti (MIT) yaklaşımlarında dahi radiküler dentin dokusunu koruyarak derinlemesine dezenfeksiyon elde edilmesini mümkün kılmaktadır (de Araujo & ark., 2026; Velardi & ark., 2022). Ayrıca, entegre emme mekanizmasının sağladığı negatif apikal basınç profili,

NaOCl'nin apikal ekstrüzyon riskini ve buna bağlı hipoklorit kazası komplikasyonlarını ortadan kaldırarak klinik işlem güvenliğini artırmaktadır (Charara & ark., 2016; Crepps, 2019).

Bununla birlikte, teknolojinin getirdiği avantajlar objektif bir klinik perspektifle değerlendirildiğinde birtakım sınırlılıklar öne çıkmaktadır. Laboratuvar araştırmalarında tespit edilen yüksek dezenfeksiyon üstünlüğüne karşın; güncel prospektif klinik çalışmalar, GWS'nin 12 aylık periapikal lezyon iyileşme oranları (%83,5 - %97) ve ameliyat sonrası ağrı düzeyleri açısından Pasif Ultrasonik İrrigasyon (PUI) veya Negatif Basınçlı İrrigasyon (NPI) gibi diğer gelişmiş aktivasyon sistemlerine kıyasla istatistiksel olarak anlamlı bir fark oluşturmadığını göstermektedir (Grigsby & ark., 2020; Montero & ark., 2025; de Araujo & ark., 2026). Cihazın yüksek yatırım maliyeti, hasta başına düşen tek kullanımlık sarf malzeme giderleri ve SoundSeal platformunun oluşturulmasındaki teknik hassasiyet, sistemin rutin klinik pratikteki maliyet-etkinliğini ve yaygınlaşmasını kısıtlayan ana unsurlardır (Karobari & ark., 2026; Usta, Doğuş & Gündoğar, 2026).

Sonuç olarak GentleWave Sistemi, kök kanal dezenfeksiyonunda geleneksel yöntemlerin yetersiz kaldığı karmaşık anatomili ve zorlu vakalarda etkili, güvenli ve yenilikçi bir yardımcı irrigasyon seçeneği sunmaktadır. Ancak teknolojinin uzun dönem klinik başarısını, spesifik kullanım endikasyonlarını ve ekonomik değerini netleştirmek adına, bağımsız araştırma merkezleri tarafından yürütülecek metodolojik olarak standartlaştırılmış, sponsor bağlantısı bulunmayan prospektif randomize kontrollü klinik çalışmalara (RCT) ihtiyaç duyulmaktadır.

Kaynakça

Alquria, T. A., Alfirdous, R. A., Gupta, S., Santamaria, M. P., Santamaria, I. F., Gomes, A. P. M., ... & Martinho, F. C. (2023). Comparison of conventional and contemporary root canal disinfection protocols against bacteria, lipoteichoic acid (LTA), and lipopolysaccharide (LPS). Scientific Reports, 13(1), 1206. https://doi.org/10.1038/s41598-023-28268-w

Amaral, R. R., Tolley, E., Ziola, M., Gross, D., Mannix, M., Sayre, D., & Martins de Mello Neto, J. (2025). GentleWave system compared to other endodontic irrigation systems: Antibacterial efficacy evaluation. Clinical and Experimental Dental Research, 11(1), e7001.

Auerbach, D., Alaugaily, I., Davis, S., & Azim, A. A. (2024). A promising approach utilizing photothermal energy to disinfect the root canal system: An in vitro investigation. Australian Endodontic Journal, 50(1), 1–9. https://doi.org/10.1111/aej.12810

Bingham, D. (2022). Postoperative pain following root canal treatment using the GentleWave system versus EndoActivator (Yüksek lisans tezi). Saint Louis Üniversitesi, St. Louis, MO.

Chan, R., Versiani, M. A., Friedman, S., Malkhassian, G., Souza, E. M., & Khakpour, M. (2019). Efficacy of 3 supplementary irrigation protocols in removing hard tissue debris from the mesial root canal system of mandibular molars. Journal of Endodontics, 45(7), 923–929. https://doi.org/10.1016/j.joen.2019.03.013

Charara, K., Friedman, S., Sherman, A., Kishen, A., Malkhassian, G., Khakpour, M., ... & Azim, A. A. (2016). Assessment of apical extrusion during root canal irrigation with the novel GentleWave system in a simulated apical environment. Journal of Endodontics, 42(1), 135–139. https://doi.org/10.1016/j.joen.2015.08.032

Choi, H. W., Park, S. Y., Kang, M. K., & Shon, W. J. (2019). Comparative analysis of biofilm removal efficacy of multi-sonic

ultracleaning system and passive ultrasonic activation. Materials, 12(21), 3492. https://doi.org/10.3390/ma12213492

Coaguila-Llerena, H., Gaeta, E., & Faria, G. (2022). Outcomes of the GentleWave system in root canal treatment: A narrative review. Restorative Dentistry & Endodontics, 47(1), e11. https://doi.org/10.5395/rde.2022.47.e11

Coaguila-Llerena, H., Ordinola-Zapata, R., Staley, C., Dietz, M., Chen, R., & Faria, G. (2022). Removal of multispecies biofilm in mandibular molars by a multisonic irrigation system. International Endodontic Journal, 55(11), 1252–1261. https://doi.org/10.1111/iej.13813

Crozeta, B. M., Chaves de Souza, L., Corrêa Silva-Sousa, Y. T., Sousa-Neto, M. D., & Silva, R. G. (2020). Evaluation of passive ultrasonic irrigation and GentleWave system as supplementary steps in endodontic retreatment. Journal of Endodontics, 46(9), 1279–1285. https://doi.org/10.1016/j.joen.2020.06.004

Dale, J. G. (2021). Postoperative pain and mechanical allodynia following non-surgical root canal treatment using the GentleWave system: A randomized controlled trial (Yüksek lisans tezi). Minnesota Üniversitesi, Minneapolis, MN.

Dash, S., Ismail, P. M., Singh, J., Agwan, M. A., Ravikumar, K., & Annadurai, T. (2020). Evaluation of efficacy of erbium:yttrium-aluminum-garnet laser, GentleWave irradiation, photodynamic therapy, and sodium hypochlorite in smear layer removal. Journal of Contemporary Dental Practice, 21(11), 1266–1269.

de Araujo, L. P., da Rosa, W. L. O., Gobbo, L. B., da Silva, T. A., de Almeida, J. F. N., & Ferraz, C. C. R. (2026). Information on the GentleWave system: A scoping review of clinical and laboratory evidence. Journal of Endodontics, 52(1), 14–25. https://doi.org/10.1016/j.joen.2025.10.014

Grigsby, D., Ordinola-Zapata, R., McClanahan, S. B., & Fok, A. (2020). Postoperative pain following root canal treatment using

the GentleWave system: A randomized controlled trial. Journal of Endodontics, 46(8), 1017–1022. https://doi.org/10.1016/j.joen.2020.04.014

Gündoğar, M., Özdemir, O., Gündoğar, Ö., Bektaş, S., Demir, F. N., & Bolat, N. (2025). Comparative effect of multisonic ultracleaning and laser-activated irrigation vs passive ultrasonic activation on debridement in minimally invasive instrumentation of necrotic oval root canals: An ex vivo histological analysis. Journal of Clinical Medicine, 14(8), 2597. https://doi.org/10.3390/jcm14082597

Haapasalo, M., Shen, Y., Wang, Z., & Gao, Y. (2014). Irrigation in endodontics. British Dental Journal, 216(6), 299–303. https://doi.org/10.1038/sj.bdj.2014.204

Haapasalo, M., Shen, Y., Wang, Z., Park, E., Curtis, A., Patel, P., & Khakpour, M. (2016). Apical pressure created during irrigation with the GentleWave system compared to conventional syringe irrigation. Clinical Oral Investigations, 20(7), 1525–1534. https://doi.org/10.1007/s00784-015-1632-z

Karobari, M. I., Assiry, A. A., Aljehani, Y. A., Alharbi, M., Almuhaiza, M., & Alamri, H. M. (2026). Efficacy of the GentleWave root canal irrigation system: A comprehensive scoping review. BMC Oral Health, 26(1), 142. https://doi.org/10.1186/s12903-026-03912-x

Ma, J., Shen, Y., Yang, Y., Gao, Y., Wan, P., Gan, Y., ... & Haapasalo, M. (2015). In vitro study of calcium hydroxide removal from the root canals of mandibular molars. Journal of Endodontics, 41(4), 553–558. https://doi.org/10.1016/j.joen.2014.11.023

Molina, B., Glickman, G., Vandrangi, P., & Khakpour, M. (2015). Evaluation of root canal debridement in human molars using the GentleWave system. Journal of Endodontics, 41(10), 1701–1705. https://doi.org/10.1016/j.joen.2015.06.018

Montero, L. Q., Basrani, B., Ellis, D. A., & Cohenca, N. (2025). Post-treatment healing outcomes of molars using different

root canal disinfection methods: A prospective cohort study. Journal of Endodontics, 51(7), 909–919. https://doi.org/10.1016/j.joen.2025.04.012

Oliveira Neto, R. S., Souza, T. M., Amorim, J. V. O., Lima, T. O., Silva, G. F., Vivan, R. R., Alcalde, M. P., & Duarte, M. A. H. (2025). Bibliometric analysis of the GentleWave system: Trends, collaborations, and research gaps. Restorative Dentistry & Endodontics, 50(2), e17. https://doi.org/10.5395/rde.2025.50.e17

Sharma, N., Alobaid, M. A., Nayan, K., Singh, R., & Verma, S. (2023). Efficacy of removing hard tissue debris from the mesial root canal system of mandibular molars using different supplementary irrigation protocols: An original study. Journal of Pharmacy and Bioallied Sciences, 15(Suppl 1), S151–S155. https://doi.org/10.4103/jpbs.jpbs_512_22

Shon, W. J. (2016). Introduction of GentleWave system. Restorative Dentistry & Endodontics, 41(3), 235–236. https://doi.org/10.5395/rde.2016.41.3.235

Sigurdsson, A., Garland, R. W., Le, K. T., & Woo, S. M. (2016). 12-month healing rates after endodontic treatment using the novel GentleWave system: A prospective multicenter clinical study. Journal of Endodontics, 42(7), 1040–1048. https://doi.org/10.1016/j.joen.2016.04.017

Sigurdsson, A., Garland, R. W., Le, K. T., & Rassoulian, S. A. (2018). Healing of periapical lesions after endodontic treatment with the GentleWave procedure: A prospective multicenter clinical study. Journal of Endodontics, 44(4), 510–517. https://doi.org/10.1016/j.joen.2017.12.004

Tolley, E., Ziola, M., Gross, D., Mannix, M., Sayre, D., Martins de Mello Neto, J., & Amaral, R. R. (2026). Assessment of the antibacterial efficacy of the GentleWave system compared to other endodontic irrigation systems: A systematic review. Clinical and Experimental Dental Research, 12(1), e7001.

Usta, S. N., Doğuş, E., & Gündoğar, M. (2026). Antibacterial efficacy of GentleWave system vs. passive ultrasonic irrigation in root canal disinfection: A systematic review and meta-analysis. BMC Oral Health, 26(1), 296. https://doi.org/10.1186/s12903-026-04112-9

Velardi, J. P., Alquria, T. A., Alfirdous, R. A., Corazza, B. J. M., Gomes, A. P. M., Silva, E. G., & Martinho, F. C. (2022). Efficacy of GentleWave system and passive ultrasonic system against Enterococcus faecalis lipoteichoic acid in infected root canals with minimal invasive and conventional instrumentation techniques. Journal of Endodontics, 48(6), 768–774. https://doi.org/10.1016/j.joen.2022.01.021

Velardi, J. P., Alquria, T. A., Alfirdous, R. A., Griffin, I. L., Tordik, P. A., & Martinho, F. C. (2022). Comparison of GentleWave system and passive ultrasonic irrigation with minimal invasive and conventional instrumentation against lipopolysaccharide in infected root canals. Scientific Reports, 12(1), 4894. https://doi.org/10.1038/s41598-022-08894-0

Wright, C. R., Glickman, G. N., Jalali, P., & Umorin, M. (2019). Efficacy of gutta-percha/sealer removal during retreatment of extracted teeth using the GentleWave system. Journal of Endodontics, 45(3), 272–280. https://doi.org/10.1016/j.joen.2018.11.018

Zhang, D., Shen, Y., de la Fuente-Núñez, C., & Haapasalo, M. (2019). In vitro evaluation of the efficacy of disinfection of multispecies biofilms in root canals by two irrigation systems by quantitative real-time PCR and culturing. Clinical Oral Investigations, 23(2), 913–920. https://doi.org/10.1007/s00784-018-2515-x

BÖLÜM 5

ENDODONTİDE YAPAY ZEKA UYGULAMALARI: GÜNCEL BİR BAKIŞ AÇISI

DENİZ ERDOĞAN

Bilgisayarlı görü ve yapay zekâdaki hızlı teknolojik gelişmeler, son on yıldan fazla bir süredir endodonti alanında klinik karar destek sistemlerinin gelişimini ve entegrasyonunu hızlandırmıştır. Makine öğrenmesi ve derin öğrenme algoritmaları, dijital radyografik görüntüler, klinik indeksler ve hasta verileri üzerinde otomatik veri madenciliği yaparak, insan gözünün zor algıladığı mikro değişiklikleri ve biyometrik desenleri yüksek doğrulukla tespit edebilmektedir. Bu derlemenin amacı, son yıllarda endodonti alanında yapay zekâ uygulamalarını geniş bir perspektifle incelemektir. Periapikal lezyonların teşhisi, kök kanal anatomisinin belirlenmesi, kök kırıklarının tespiti, tedavi prognozunun tahmin

Dr. Öğr. Üyesi
Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi
Diş Hekimliği Fakültesi, Endodonti AD
ORCID: 0000-0002-6471-8631

edilmesi, eğitim süreçleri ile endodontide robotik ve büyük dil modellerinin rolü, güncel veriler doğrultusunda ele alınmıştır. Ayrıca, konunun sınırlamaları ve etik konulara da yer verilmiştir.

Giriş

Endodonti pratiğinde teşhis, tedavi planlaması ve tedavi sonrası prognoz değerlendirmesi; yüksek çözünürlüklü görüntüleme tekniklerine ve klinisyenin karmaşık anatomik yapıları doğru yorumlama yeteneğine bağlıdır (Ourang et al., 2024). Geleneksel iki boyutlu periapikal radyografiler ve panoramik görüntüler rutin klinik kullanımda temel olsa da, anatomik yapıların üst üste binmesi, doku yoğunluklarındaki gölgelenmeler ve üç boyutlu yapıların iki boyutlu düzlemde bozulması gibi belirgin sınırlamaları vardır. Konik ışınlı bilgisayarlı tomografi (KIBT) teknolojisi, kök kanal sisteminin ve periapikal dokuların üç boyutlu olarak incelenmesine olanak tanıyarak teşhis yeteneğini üst seviyeye taşımıştır. Bununla birlikte, KIBT verilerinin analizi zaman alıcı olabilir; metal restorasyonlar veya dolgu maddelerinin neden olduğu huzme sertleşmesi artefaktları ve gözlemciler arasındaki yorum farklılıkları tanısal hatalara neden olabilmektedir (Radwanski et al., 2026). Endodonti disiplini; semptomların, klinik muayene bulgularının, pulpa duyarlılık testlerinin, periodontal durumun, radyografik özelliklerin ve teknik faktörlerin çok boyutlu sentezini gerektirdiği için yapay zeka (YZ) uygulamaları açısından elverişli bir zemin sunabilir.

Son yıllarda derin öğrenme ve bilgisayarlı görü alanındaki teknolojik gelişmeler, endodontide klinik karar destek sistemlerinin gelişimini ivmelendirmiştir (Ourang et al., 2024; Radwanski et al., 2026). Bununla birlikte, endodontide YZ uygulamarı, klinik muhakeme veya mesleki sorumluluğun yerini alacak bir araç olarak değil; belirli görevlerde tutarlılığı ve verimliliği artırabilecek bir destek sistemi olarak değerlendirilmelidir. YZ; öğrenme, örüntü

tanıma, sınıflandırma, tahmin ve karar desteği için kullanılan hesaplamalı yöntemlerin hepsini içerir (Aminoshariae et al., 2024). Makine öğrenmesi modelleri, önceden belirlenmiş değişkenler ile sonuçlar arasındaki bağlantıları saptar. Makine öğrenmesinin bir alt dalı olan ve çok katmanlı yapay sinir ağlarına dayanan derin öğrenme, özellikle evrişimli sinir ağları ile temsil edilir (Razzaq & Shah, 2025). Evrişimli sinir ağları, derin öğrenmenin bir alt dalı olup özellikle görsel bilgi analizi, resim ve video tanıma, nesne algılama ile bilgisayarlı görü görevlerinde yaygın olarak kullanılan yapay sinir ağı türüdür (Purwono et al., 2022). Bu ağlar, tanısal görüntü özelliklerini doğrudan radyografilerden ve konik ışınlı bilgisayarlı tomografi (KIBT) görüntülerinden öğrenerek insan gözünün fark etmekte zorlandığı mikro kontrast değişiklikleri ve biyometrik örüntüleri yüksek hassasiyetle tespit edebilmektedir (Aminoshariae et al., 2024).

Endodontik araştırmalarda öne çıkan başlıca yapay zeka mimarileri şunlardır (Ourang et al., 2024):

a. Yapay Sinir Ağları (YSA/ANN) ve Çok Katmanlı Algılayıcılar (MLP): Biyolojik sinir sistemini taklit eden katmanlı modellerdir; klinik veri analizinde, postoperatif ağrı tahmininde ve apikal darlık tespitinde kullanılmıştır.

b. Evrişimli Sinir Ağları (ESA/CNN): Görsel ve radyografik verilerden otomatik öznitelik çıkarımı yapan katmanlı mimarilerdir; AlexNet, ResNet ve ConvNeXt sınıflandırma ve teşhis görevlerinde yaygın olarak tercih edilmektedir.

c. Segmentasyon Mimarileri (U-Net ve Türevleri): Bu modeller, pikselleri veya üç boyutlu vokselleri sınıflandırarak patolojik ya da anatomik sınırları tanımlar. U-Net, U²-Net, SpatialConfiguration-Net ve CBCT-SAM, periapikal lezyon

hacimlerinin ve kök kanal boşluklarının segmentasyonunda kullanılmaktadır.

d. Gelişmiş Nesne Tespiti Algoritmaları (YOLO, Mask R-CNN, Faster R-CNN): Görüntü içerisindeki spesifik hedefleri sınırlayıcı kutular veya piksel maskeleri ile eşzamanlı konumlandıran mimarilerdir. Kırık kanal aletleri, kanal girişleri ve apikal lezyonların tespiti için idealdir.

e. Büyük Dil Modelleri (LLM): Transformatör mimarisine dayanan, doğal dil işleme (NLP) yeteneğiyle klinik senaryo yanıtlayan ve endodonti eğitiminde kullanılan modellerdir.

Tanısal Uygulamalar ve Görüntü Analizi

a. Periapikal Lezyon Tespiti ve Değerlendirmesi

Periapikal lezyonların (apikal periodontitis) erken tespiti ve sınırlarının doğru bir şekilde belirlenmesi, endodontik tedavinin başarısını doğrudan etkilemektedir. Apikal periodontitisin erken teşhisi, anatomik süperpozisyonlar ve erken dönemde kortikal kemikteki değişikliklerin sınırlı olduğu durumlarda güçlük arz edebilmektedir (Suyambukesan et al., 2013). Derin öğrenme algoritmaları, iki boyutlu ve üç boyutlu görseller üzerinde periapikal patolojilerin tespiti ve segmentasyonunda yüksek performans göstermektedir. YZ algoritmaları, konvansiyonel periapikal, panoramik veya KIBT görüntüleri üzerinde şüpheli patolojik odakları belirleyerek klinisyene ikincil bir okuyucu olarak destek olabilir.

Periapikal radyografilerde periapikal lezyonların tespitinde Diagnocat ile tecrübeli endodontistler karşılaştırıldığında, Diagnocat %89 oranında uzmanlarla uyum göstermiş; özellikle patoloji bulunmayan vakalarda yüksek özgüllük sergileyerek hastalığın

olmadığını teyit etmede güvenilir bir araç olduğu gösterilmiştir (Allihaibi et al., 2025).

Panoramik radyografilerde ise U-Net tabanlı segmentasyon modelleri ve iki aşamalı dedektör-sınıflandırıcı sistemler kullanılarak 180 test lezyonunun 147'sini segmente edebilmiş ve lezyon sınırlarının otomatik olarak belirlenmesinde başarılı bulunmuştur (Ba-Hattab et al., 2023).

Periapikal lezyonların tespit etmek amacıyla evrişimsel sinir ağlarının kullanıldığı bir çalışmada, 153 periapikal lezyonun 142'sini (%92,8) tespit edildiğini ve otomatik hacim tahminlerinin manuel segmentasyonla uyumlu olduğu bildirilmişlerdir (Orhan et al., 2020). Başka bir çalışmada, lezyonlu ve lezyonsuz 61 kökü içeren 20 KIBT hacmi üzerinde derin öğrenme sistemini değerlendirerek yaklaşık %93 doğruluk ve %88 özgüllük oranı bildirilmiştir (Aminoshariae et al., 2024). KIBT verileriyle eğitilen modeller lezyon tespiti ve hacimsel segmentasyon görevlerinde %97.0 ile %99.0'ı aşan doğruluk ve özgüllük değerlerine ulaşmıştır (Chau et al., 2025; Radwanski et al., 2026). Bu sistemlerin sunduğu yüksek özgüllük sayesinde, yanlış pozitif teşhis riskini düşürerek gereksiz endodontik müdahalelerin önüne geçilebileceği bildirilmiştir.

Görüntüleme modalitesi ve lezyon lokalizasyonunun performansı doğrudan etkilediği bilinmektedir. Güncel bir derleme, YZ modellerinin mandibular lezyonlarda maksiller lezyonlara kıyasla daha yüksek performans sergilediğini, küçük lezyonlarda periapikal radyografilerin panoramik görüntülere üstünlük sağladığını ve en yüksek tanısal doğruluğun KIBT ile elde edildiğini vurgulamaktadır (Septina & Kiswanjaya, n.d.). YZ'nin tarama ve takipte ikinci okuyucu olarak yararlı olabileceği, bunula birlikte, radyolüsensinin tek başına pulpal ya da periapikal bir tanı koyduramayacağı ve YZ sistemlerinin klinik muayenenin, hasta

öyküsünün veya klinisyenin kararının yerini alamayacağı unutulmamalıdır.

b. Kök Kırıklarının ve Kök rezorbsiyonlarının Değerlendirilmesi

Restoratif materyal artefaktları ve dar anatomiden dolayı, dikey kök kırıkları ve eksternal kök rezorpsiyonları genellikle radyografik olarak gizlenebilir. Panoramik görüntüler kullanılarak gerçekleştirilen dikey kök kırığı değerlendirmelerinde, modellerin yüksek bir kesinlik (0.93) sağladığı, ancak duyarlılığın 0.45 ile 0.75 arasında değişiklik gösterdiği rapor edilmiştir (Fukuda et al., 2020). Üç boyutlu yüksek çözünürlüklü KIBT verilerinin iki boyutlu yöntemlere kıyasla daha zengin bir veri seti sunduğu gösterilmiştir (Hu et al., 2022). Simüle edilmiş rezorpsiyon kaviteleri üzerine yapılan bir başka araştırmada, yapay zeka modellerinin birleştirilmesi %81.9 oranında sınıflandırma doğruluğu elde etmiştir (Reduwan et al., 2024). Ancak bu verilerin in vitro koşullardan klinik ortama uyarlanmasında ihtiyatlı olunmalıdır. Bu konuyla ilgili güncel bir incelemede, YZ destekli dikey kök kırığı tespitinde CBCT görüntülemenin, panoramik radyografi modellerine göre umut verici bir doğruluk sergilediği belirtilmiş, ancak klinik doğrulamanın gerekli olduğu vurgulanmıştır (Alshahrani et al., 2026).

Ekstrenal sevikal kök rezorbsiyonlarını tespit etmek amacıyla farklı öğrenme modelleri kullanılan bir çalışmada, kendi kendine denetimli öğrenme modellerinin çoğunun, transfer öğrenmeye dayalı temel modellerden daha iyi performans gösterdiği bildirilmiştir (Mohammad-Rahimi et al., 2024). Bu çalışma ile ekstrenal servikal rezorbsiyonlarını tespit etmek amacıyla YZ modellerinde yardım alınabileceği gösterilmiştir.

c. Radyografik Görüntü Analizi ve Anatomik Varyantlar

YZ tabanlı görüntü işleme; sınıflandırma, nesne tespiti, piksel/voksel düzeyinde segmentasyon ve hacimsel ölçüm aşamalarını kapsamaktadır.

Mandibular birinci molarlarda üç kök varlığının tespiti (Jin et al., 2024) ve ikinci meziyobukkal kanalların YOLOv5x gibi modellerle tespiti (Duman et al., 2024) gibi anatomik varyasyon analitiği, tedavi başarısını doğrudan etkileyen alanlardır. Güncel bir derlemede CT/CBCT görüntülerinden diş segmentasyonu için çeşitli derin öğrenme algoritmalarının başarıyla uygulanabileceği gösterilmiştir (Kot et al., 2025).

Otomatik segmentasyon, lezyon alanını veya hacmini zaman içinde ölçmeyi de sağlayabilir; bu, ardışık görüntülerin gözle karşılaştırılmasından daha nesneldir. Bununla birlikte, cerrahi olmayan ya da cerrahi tedavi sonrası iyileşmenin izlenmesindeki klinik değeri hâlâ prospektif olarak ortaya konmalıdır.

Klinik Karar Destek Sistemleri

Klinik karar destek sistemleri, hastaya özgü bilgileri tanı ve tedavi kararlarını yönlendirmek için değil, bunlara yardımcı olmak için kullanır. Endodontide gelecekteki sistemler radyografik bulguları diş tipi, pulpal ve periapikal durum, periodontal durum, restorasyon kalitesi, semptomlar, tıbbi öykü ve işlemsel faktörlerle birleştirebilir. Örneğin, Amerikan Endodonti Derneği (AAE) olgu zorluk formu kriterlerine dayalı olarak geliştirilen VGG16 tabanlı sınıflandırma modelleri, olguların zorluk seviyesini %87.62 doğruluk oranıyla tahmin edebilmiştir (Karkehabadi et al., 2024). Benzer şekilde, KİBT üzerinde diş segmentasyonunu kanal uzunluğu ve eğrilik ölçümleriyle entegre eden otomasyon modelleri, klinik iş akışının standardizasyonu için önemli ilerlemeler sağlamaktadır (Adil et al., 2025; Cheng et al., 2022).

Karar desteği tasarımında yorumlanabilirlik öncelikli olmalıdır. Klinisyen girdileri görebilmeli, çıktının makul olup olmadığını değerlendirebilmeli ve klinik tabloyla çelişen bir öneriyi reddedebilmelidir.

Kök Kanal Anatomisi ve Karmaşık Morfolojilerin Analizi

Kök kanal sistemindeki anatomik varyasyonların gözden kaçması ve kanalların eksik şekillendirilmesi, endodontik başarısızlığın ana nedenlerinden bazılarıdır. Özellikle üst çene molar dişlerdeki ikinci meziobukkal kanal ile alt çene molar dişlerdeki C-şekilli kanal konfigürasyonları klinik tespiti zor yapılardır (Radwanski et al., 2026).

Üst çene birinci molar dişlerde ikinci meziobukkal kanal bulunma sıklığı %60–%90 arasında değişmektedir. Yaşlanmaya bağlı olarak ve apikal üçüncüye yaklaşıldıkça kanal lümeni daralmaktadır. KIBT görüntülerinde Lojistik Regresyon, Rastgele Orman ve Derin CNN modelleri (YOLOv5, nnU-Net v2) ile yapılan analizlerde, meziobukkal ve palatal kanal girişleri arasındaki mesafe (MB–P mesafesi) ikinci meziobukkal kanal varlığını öngören en güçlü parametre olarak tanımlanmıştır (Duman et al., 2024; Talabani, 2026).

Özellikle alt çene ikinci molar dişlerde görülen C-şekilli kanallar, karmaşık yapıları nedeniyle tam temizlenmelerinde zorluklara yol açabilmektedir. ResNet, Xception ve Residual U-Net mimarili derin öğrenme modelleri, KIBT ve panoramik görüntülerde C-şekilli kanalları %95.1 doğruluk ve %97.0 özgüllükle sınıflandırmayı başarmıştır (Sherwood et al., 2021).

Pulpa taşları ve taurodontizm tespitinde ise, U²-Net ve YOLOv5 modelleri panoramik ve KIBT görüntülerinde pulpa

taşlarını ve pulpa odası obliterasyonlarını hassasiyetle segmente edebilmiştir (Altındağ et al., 2024).

Tedavi Prognozu, Mikro-Cerrahi ve Postoperatif Ağrı Tahmini

Endodontik tedavinin başarısı, preoperatif periapikal durum, irrigasyon ve dezenfeksiyon kalitesi, koronal restorasyonun bütünlüğü ve sistemik faktörlere bağlıdır. Klinik açıdan endodontik sonucu tahmin etmek cazip olsa da oldukça zordur. Kök kanalı tedavisi sonrası iyileşme, preoperatif periapikal durum, enfeksiyon kontrolü, kanal morfolojisi, dolgu kalitesi, koronal restorasyon, periodontal durum, diş tipi, hasta faktörleri ve takip süresi gibi unsurlara bağlıdır. Modellerin geniş boylamsal veri kümelerine ve şeffaf doğrulama süreçlerine ihtiyacı vardır.

Boylamsal çalışmalarda alveolar kemik kaybı, yüksek periapikal indeks skorları, tekrarlayan kanal tedevisi vakaları ve sigara kullanımı başarısızlığın temel belirleyicileri olarak saptanmıştır (Herbst et al., 2023). Aynı çalışmada karmaşık makine öğrenmesi algoritmalarının geleneksel risk faktörlerine karşı üstünlük sağlamasa da yüksek riskli vakaların taranmasında etkili olabileceği bildirilmiştir.

Başka bir araştırmada, tedavi öncesinde elde edilen periapikal radyografiler derin sinir ağları kullanılarak analiz edilmiş ve rejeneratif endodontik tedavinin uzun vadeli başarısını tahmin eden modeller geliştirilmiştir (Lu et al., 2025). Modellerin geliştirilmesi sırasında yaş, cinsiyet, etiyoloji, kök kanalı sayısı, travma türü, şişlik veya sinüs yolu varlığı, periapikal lezyon boyutu ve kök gelişim aşaması gibi değişkenler dikkate alınmıştır. Sonuç olarak, 1 yıllık ve 2 yıllık takip sürelerindeki tahminlerde (%91 ve %84 doğruluk oranlarıyla) en iyi ve birbirine yakın performanslar gösterilmiştir. Bu modellerin, rejeneratif endodontik tedavi

prognozunu tahmin etmek için bir puanlama sistemi oluşturulmasına katkı sağlayarak klinisyenlerin karar verme süreçlerine destek olabileceği belirtilmiştir.

Gao ve arkadaşları, kök kanal tedavisi sonrası gelişebilecek ağrı düzeyini ve süresini tahmin etmek için 13 girdi katmanı ve 10 gizli katmandan oluşan bir yapay sinir ağı geliştirmiş ve hasta parametreleri ile postoperatif konfor arasındaki karmaşık doğrusal olmayan ilişkileri başarıyla modellemişlerdir (Gao et al., 2021). Bu modeller, preoperatif hasta verileri ile postoperatif ağrı gelişimi arasındaki doğrusal olmayan karmaşık ilişkileri başarıyla modelleyerek klinisyene risk sınıflandırması sunabileceğini göstermiştir.

Qu ve arkadaşlarının çalışmasında ise, mikro-cerrahi uygulanan hastaların 8 temel klinik ve radyografik değişkenini makine öğrenmesi modellerine işleyerek cerrahi prognozu %80.0 doğrulukla öngörülmüştür (Qu et al., 2022). Tedavi öncesi verilerin makine öğrenmesi modellerine entegre edilmesi, uzun dönemli başarı oranlarının öngörülmesine katkı sağlayabilir.

Büyük Dil Modelleri ve Dijital Asistanlar

Görsel tanı sistemlerinin yanı sıra, doğal dil işleme (NLP) tabanlı büyük dil modelleri (LLM) de endodontik klinik karar desteğine ve diş hekimliği eğitimine entegre olmaktadır (Baris & Baris, 2025; Çekiç & Tavşan, 2025; Dashti et al., 2026).

Meta-analizler ve karşılaştırmalı çalışmalar; GPT-4, GPT-4o, Microsoft Copilot ve ScholarGPT gibi LLM'lerin ulusal ve uluslararası diş hekimliği uzmanlık/lisanslama sınav sorularında %73.0 ile %90.0 arasında değişen doğruluk oranlarına ulaştığını göstermektedir (Dashti et al., 2026). Akademik veri tabanlarıyla desteklenen ScholarGPT, endodontik apikal cerrahi sorularında

%97.7 doğrulukla ChatGPT-4o (%90.1) ve Gemini'yi (%59.5) geride bırakmıştır (Baris & Baris, 2025). 11 farklı LLM'in karşılaştırıldığı bir çalışmada, modellerin çoğunda tutarlılığın %90'ın üzerinde bulunduğu ve en iyi performans gösteren LLM'de tutarlılığın %98,3'e yükseldiği bildirilmiştir (de Araújo et al., 2026).

Yapılan sistematik bir meta-analiz çalışması, ChatGPT-4o'nun objektif sorulara yanıt verirken daha güvenilir olduğunu, açık uçlu sorular söz konusu olduğunda ise ChatGPT-4'ün daha güvenilir olduğunu ortaya koymuştur (Wang et al., 2025). Bu araçların kullanımıyla klinisyenlerin değerli içgörüler elde edebileceği ve öğrenme, tanı koyma ile çeşitli klinik senaryoların yönetimi süreçlerinde karar verme mekanizmalarını geliştirmek için LLM'lerin etkili bir şekilde kullanılabileceği ifade edilmiştir. LLM'lerin endodontik kılavuzlar ve sorular bağlamındaki performansının yüksek olduğu belirtilmiş, ancak zaman zaman halüsinasyon üretme eğilimleri nedeniyle klinik kararlarda tek başına yetkili olmamaları ve uzman denetiminden geçmeleri gerektiği vurgulanmıştır (de Araújo et al., 2026; Özbay et al., 2025).

Endodonti Eğitiminde Yapay Zeka Entegrasyonu

Preklinik eğitimde sanal gerçeklik ve artırılmış gerçeklik simülasyonları; erişim kavitesi hazırlığı, kök kanal anatomisinin kavranması ve psikomotor becerilerin geliştirilmesinde öğrencilerin işlem süresini ve başarısını belirgin şekilde arttırmaktadır (Deshpande et al., 2026; Karatekin & Gencoglu, 2024). Ancak mevcut LLM'lerin karmaşık klinik senaryolarda doğrudan otonom karar verici olarak kullanılması yetersiz bulunmakta; öğretim elemanı denetiminde yardımcı birer eğitim aracı olarak konumlandırılmaları önerilmektedir (Dashti et al., 2026).

Preklinik endodontik laboratuvar çalışmalarında, yapay zekâ modelleri tutarlı ve izlenebilir görüntü analizi sunarak öğrencilerin el becerilerinin değerlendirilmesine olanak tanıyabilir.

Robotik ve Otomasyon

Endodontide robotik uygulamalar henüz ağırlıklı olarak preklinik ve deneysel aşamadadır. Dental robotların çoğu implant cerrahisi için tasarlanmıştır ve endodontik işlemlere yönelik ilk sistemler ancak yakın zamanda ortaya çıkmıştır. En güncel uygulamalar arasında; dijital olarak planlanan rehberlik, otomatik segmentasyon, navigasyon desteği ve rehberli erişim hazırlığı, kontrollü enstrümantasyon ile frez konumu veya çalışma uzunluğu hakkında anlık geri bildirim gibi yüksek hassasiyet gerektiren aşamalarda robotik destek bulunmaktadır.

Güç ve tork sensörleri kullanarak eğe-kanal temasını izleyen, hasta hareketlerini dengeleyen ve eğe kırılmasını engellemeyi amaçlayan kuvvet kılavuzlu ilk endodontik robotik sistemler arasında bulunmaktadır (Cheng et al., 2022; Dhara et al., n.d.)

Kalsifiye dişlerde gerçek zamanlı robotik haptik rehberliği incelenmiş ve robot destekli yönlendirmenin, kanal tedavisi konusunda daha az deneyime sahip genel diş hekimlerinin başarı oranını artırabileceği belirtilmiştir (Hirt et al., 2025).

Manyetik alan kullanılarak yönlendirilen nanobotların, mevcut klinik yöntemlerle ulaşılamayan tübüllerin derinliklerine erişebildiği ve belirlenen bölgelerden kontrollü bir şekilde geri çekilebildiği kanıtlanmıştır (Dasgupta et al., 2022). Ek olarak, nanobotların bakterisidal tedavi yöntemleriyle entegre edilebildiği de gösterilmiştir.

Robotik sistemler, çalışma hassasiyetini arttırabilir ve operatör kaynaklı değişkenliği düşürebilir. Ancak, beklenmedik kanal anatomisi, kalsifikasyon, hasta hareketleri, sınırlı erişim ve işlem sırasında ortaya çıkan komplikasyonlar, otonom tedavinin yakın gelecekte uygulanabilir olmasının önündeki engellerdir.

Sınırlılıklar, Doğrulanabilirlik ve Etik Değerlendirmeler

a. Sınırlılıklar

Endodontide YZ'nin temel sınırlamaları, veri kalitesi, dış geçerlilik, yanlılık, yorumlanabilirlik ve klinik uygunluk konularını kapsar. Çoğu çalışma retrospektif nitelikte olup, küçük veri kümeleriyle ve tek merkezli olarak gerçekleştirilmiştir (Mohammad-Rahimi et al., 2024). Veri kümesi kayması da başka bir sınırlamadır. Bir tarayıcıdan, popülasyondan veya klinikten elde edilen görüntülerle eğitilen bir sistem, farklı bir ortamda değişik performans sergileyebilir (Mohammad-Rahimi et al., 2024). Ayrıca, çalışmalar algoritmanın yalnızca kendi başına iyi çalışıp çalışmadığını değil, aynı zamanda YZ'nin klinisyenlerin doğruluğunu, verimliliğini, güven kalibrasyonunu ve hasta sonuçlarını iyileştirip iyileştirmediğini de değerlendirmelidir (Chari et al., 2026).

Derin öğrenme modellerinin girdileri işleyerek sonuca nasıl ulaştığının matematiksel olarak izlenememesi, doktorların algoritmalara olan güvenini kısıtlamaktadır (Murad et al., 2024). Tıp ve diş hekimliği araştırmalarında şeffaflık ve tekrarlanabilirliği sağlamak için CONSORT-AI ve TRIPOD-AI gibi standart raporlama kılavuzlarının benimsenmesi zorunludur (Collins et al., 2024). Ayrıca, veri gizliliği, hastaların bilgilendirilmiş onamı ve demografik gruplar arasındaki adalet dikkatle ele alınmalıdır. Hasta verilerinin anonimleştirilmesi ve yanlış teşhis durumunda yasal

sorumluluğun doktor mu yoksa yazılım geliştiricisi mi olduğu konusundaki sınırların belirlenmesi yasal çerçeveye oturtulmalıdır (Mohammad-Rahimi et al., 2024).

b. Doğrulanabilirlik ve Genellenebilirlik

Doğrulama, klinik YZ için temel gerekliliktir. İç doğrulama, bir modelin eğitim verisiyle aynı kaynaktan gelen verilerde iyi performans gösterip göstermediğini sınar. Dış doğrulama ise başka hastalardan, kurumlardan, tarayıcılardan veya bölgelerden alınan bağımsız verileri kullanır ve gerçek dünya kullanımı açısından daha anlamlıdır (Cabitza et al., 2021; Steyerberg & Harrell Jr, 2015).

Sistemlerin uygun klinik referans standartlarıyla karşılaştırılarak test edilmesi gerekmektedir. Örneğin, lezyon tespit modelleri, yalnızca bir gözlemcinin radyografi okumasına dayanarak değil, uzmanların uzlaşısı veya klinik olarak gerekçelendirilmiş KIBT değerlendirmesi mevcut olduğunda değerlendirilmelidir (Eskandar, 2025). Periapikal lezyonlarla ilgili literatür, bunun neden önemli olduğunu ortaya koymaktadır. Yapay zeka modelleriyle gerçekleştirilen çalışmalarda birçok model yüksek duyarlılık veya özgüllük bildirse de, kanıtlar önemli yanlılık riski ve uygulanabilirlik sorunları içermektedir (Pul & Schwendicke, 2024). Uygulamadan önce bağımsız bir doğrulama yapılmalı ve ardından yerel ortamdaki performans sürekli olarak izlenmelidir.

c. Etik Hususlar

Endodontide YZ; hasta gizliliği, veri sahipliği, bilgilendirilmiş onam, yanlılık, hesap verebilirlik ve şeffaflık konularını gündeme taşır. YZ sistemlerinin geliştirilmesinde kullanılan dental görüntüler ve sağlık kayıtları, güvenli bir şekilde ve mevcut gizlilik düzenlemelerine uygun olarak işlenmelidir (B. K. et al., 2026; Mohammad-Rahimi et al., 2024).

Sonuç olarak; YZ sistemleri, hekimin klinik deneyimini ve karar verme yeteneğini ikame eden bir unsur değil, teşhis hatalarını en aza indiren, hasta iletişimini güçlendiren ve tedavi başarısını artıran klinik karar destek araçlarıdır. Hukuki ve etik sorumluluk her zaman klinisyene aittir ve YZ çıktılarının yalnızca yardımcı analitik veri kaynakları olduğu unutulmamalıdır. YZ'nin yakın gelecekte günlük endodontik iş akışını, eğitimi ve sürekli öğrenmeyi önemli ölçüde etkilemesi beklenmektedir.

Kaynakça

Adil, A. H., Snigdha, N. T., Fareed, M., & Karobari, M. I. (2025). Robotics in endodontics: A comprehensive scoping review. *Journal of Dentistry*, *157*, 105741. https://doi.org/10.1016/j.jdent.2025.105741

Allihaibi, M., Koller, G., & Mannocci, F. (2025). The detection of apical radiolucencies in periapical radiographs: A comparison between an artificial intelligence platform and expert endodontists with CBCT serving as the diagnostic benchmark. *International Endodontic Journal*, *58*(8), 1146-1157. https://doi.org/10.1111/iej.14250

Alshahrani, A. S., Alelyani, A. A., Jabali, A., Al Malwi, A. A., Alroomy, R., Shaiban, A. S., Almnea, R. A., Mehta, V., & Al Moaleem, M. M. (2026). Use of artificial intelligence in diagnosing vertical root fractures- A systematic review. *Diagnostics*, *16*(3), 406. https://doi.org/10.3390/diagnostics16030406

Altındağ, A., Bahrilli, S., Çelik, Ö., Bayrakdar, İ. Ş., & Orhan, K. (2024). The detection of pulp stones with automatic deep learning in panoramic radiographies: An AI pilot study. *Diagnostics*, *14*(9), 890. https://doi.org/10.3390/diagnostics14090890

Aminoshariae, A., Nosrat, A., Nagendrababu, V., Dianat, O., Mohammad-Rahimi, H., O'Keefe, A. W., & Setzer, F. C. (2024). Artificial intelligence in endodontic education. *Journal of Endodontics*, *50*(5), 562-578. https://doi.org/10.1016/j.joen.2024.02.007

B. K., R., Luke, A. M., M. A., V., & Shetty, K. P. (2026). Artificial intelligence–driven dentistry: A systematic review of ethical and legal challenges.

International Journal of Dentistry, *2026*(1), 1870800. https://doi.org/10.1155/ijod/1870800

Ba-Hattab, R., Barhom, N., Osman, S. A. A., Naceur, I., Odeh, A., Asad, A., Al-Najdi, S. A. R., Ameri, E., Daer, A., & Silva, R. L. D. (2023). Detection of periapical lesions on panoramic radiographs using deep learning. *Applied Sciences*, *13*(3), 1516. https://doi.org/10.3390/app13031516

Baris, S. D., & Baris, K. (2025). Assessment of various artificial intelligence applications in responding to technical questions in endodontic surgery. *BMC Oral Health*, *25*(1), 763. https://doi.org/10.1186/s12903-025-06149-1

Cabitza, F., Campagner, A., Soares, F., de Guadiana-Romualdo, L. G., Challa, F., Sulejmani, A., Seghezzi, M., & Carobene, A. (2021). The importance of being external. Methodological insights for the external validation of machine learning models in medicine. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, *208*, 106288. https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2021.106288

Çekiç, E. C., & Tavşan, O. (2025). Evaluating large language models using national endodontic specialty examination questions: Are they ready for real-world dentistry? *BMC Medical Education*, *25*(1), 1308. https://doi.org/10.1186/s12909-025-07896-z

Chari, N., Abdelmageed, A. A. A., Subhedar, D., Sabra, M., Ali, O., Ali, S., Waqas, R., & Ali, R. (2026). Artificial intelligence in clinical decision-making: A systematic review of diagnostic accuracy, predictive performance, and clinical outcomes. *Cureus*, *18*(6), e49422. https://www.cureus.com/articles/494229-artificial-intelligence-in-clinical-decision-making-a-systematic-review-of-diagnostic-accuracy-predictive-performance-and-clinical-outcomes.pdf

Chau, K.-K., Zhu, M., AlHadidi, A., Wang, C., Hung, K., Wohlgemuth, P., Lam, W. Y. H., Liu, W., Yuan, Y., & Chen, H. (2025). A novel AI model for detecting periapical lesion on CBCT: CBCT-SAM. *Journal of Dentistry*, *153*, 105526. https://doi.org/10.1016/j.jdent.2024.105526

Cheng, H.-F., Li, Y.-C., Ho, Y.-C., & Chen, C.-W. (2022). Force-guided alignment and file feedrate control for robot-assisted endodontic treatment. *2022 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 1841–1847. https://doi.org/10.1109/IROS47612.2022.9981393

Collins, G. S., Moons, K. G., Dhiman, P., Riley, R. D., Beam, A. L., Van Calster, B., Ghassemi, M., Liu, X., Reitsma, J. B., & Van Smeden, M. (2024). TRIPOD+ AI statement: Updated guidance for reporting clinical prediction models that use regression or machine learning methods. *BMJ*, *385*, e078378. https://www.bmj.com/content/385/bmj-2023-078378.short

Dasgupta, D., Peddi, S., Saini, D. K., & Ghosh, A. (2022). Mobile nanobots for prevention of root canal treatment failure. *Advanced Healthcare Materials*, *11*(14), 2200232. https://doi.org/10.1002/adhm.202200232

Dashti, M., Khosraviani, F., Meyari, A., Amirzade-Iranaq, M. H., Chaurasia, A., Hefzi, D., Ghadimi, N., Tichy, A., Khurshid, Z., & Schwendicke, F. (2026). Accuracy of large language models in answering dental examination questions: A systematic review and meta-analysis. *International Dental Journal*, *76*(4), 109609. https://doi.org/10.1016/j.identj.2025.109609

de Araújo, L. P., Moreno, L. B., de Araújo, B. C. C., Chaves, E. T., Botero, T. M., & Romero, V. H. D. (2026). From evidence-based endodontics to generative AI: A comparative study of 11 large language models. *Journal of Endodontics*, *52*(6), 1010-1015. https://doi.org/10.1016/j.joen.2026.01.009

Deshpande, A., Licari, F. W., Patil, S., & Bhandi, S. (2026). Effectiveness of virtual reality for endodontic education in undergraduate dental students-A systematic review. *Journal of Dental Education*, *90*(4), 584-598. https://doi.org/10.1002/jdd.70007

Dhara, K., Imran, A. H., Maiti, N., Banik, A., Arya, A., & Mustafa, M. (t.y.). *Effect of smart endodontic motors (AI-based torque control) on file separation and dentinal damage*. Erişim tarihi: 16 Ekim 2026, https://www.researchgate.net/profile/Arindam-Banik-2/publication/400757977_Effect_of_smart_endodontic_motors_AI-based_torque_control_on_file_separation_and_dentinal_damage/links/698f578542f94d1212aa9549/Effect-of-smart-endodontic-motors-AI-based-torque-control-on-file-separation-and-dentinal-damage.pdf

Duman, Ş. B., Çelik Özen, D., Bayrakdar, I. Ş., Baydar, O., Alhaija, E. S. A., Helvacioğlu Yiğit, D., Çelik, Ö., Jagtap, R., Pileggi, R., & Orhan, K. (2024). Second mesiobuccal canal segmentation with YOLOv5 architecture using cone beam computed tomography images. *Odontology*, *112*(2), 552–561. https://doi.org/10.1007/s10266-023-00868-y

Eskandar, K. (2025). Artificial intelligence in CT imaging: A systematic review of diagnostic accuracy, clinical decision–support impact, and integration pathways. *iRADIOLOGY*, *3*(6), 434-445. https://doi.org/10.1002/ird3.70046

Fukuda, M., Inamoto, K., Shibata, N., Ariji, Y., Yanashita, Y., Kutsuna, S., Nakata, K., Katsumata, A., Fujita, H., & Ariji, E. (2020). Evaluation of an artificial intelligence system for detecting vertical root fracture on panoramic radiography. *Oral Radiology*, *36*(4), 337-343. https://doi.org/10.1007/s11282-019-00409-x

Gao, X., Xin, X., Li, Z., & Zhang, W. (2021). Predicting postoperative pain following root canal treatment by using artificial neural network evaluation. *Scientific Reports*, *11*(1), 17243. https://doi.org/10.1038/s41598-021-96800-4

Herbst, S. R., Pitchika, V., Krois, J., Krasowski, A., & Schwendicke, F. (2023). Machine learning to predict apical lesions: A cross-sectional and model development study. *Journal of Clinical Medicine*, *12*(17), 5464. https://doi.org/10.3390/jcm12175464

Hirt, L., Hildebrand, H., Weiger, R., Thieringer, F. M., Connert, T., & Leontiev, W. (2025). Real-time guided endodontics with a miniaturized dynamic navigation system in calcified posterior teeth: Performance in regard to the operator's level of experience. *Journal of Endodontics*, *51*(2), 200-208. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0099239925002547

Hu, Z., Cao, D., Hu, Y., Wang, B., Zhang, Y., Tang, R., Zhuang, J., Gao, A., Chen, Y., & Lin, Z. (2022). Diagnosis of in vivo vertical root fracture using deep learning on cone-beam CT images. *BMC Oral Health*, *22*(1), 382. https://doi.org/10.1186/s12903-022-02422-9

Jin, L., Tang, Y., Zhou, W., Bai, B., Yu, Z., Zhang, P., & Gu, Y. (2024). Detection of three-rooted mandibular first molars on panoramic radiographs using deep learning. *Scientific Reports*, *14*(1), 30392. https://doi.org/10.1038/s41598-024-81822-1

Karatekin, A. O., & Gencoglu, N. (2024). Augmented reality assisted endodontics: An experimental setup study. *International Dental Journal*, *74*(Suppl 2), S100. https://doi.org/10.1016/j.identj.2024.07.876

Karkehabadi, H., Khoshbin, E., Ghasemi, N., Mahavi, A., Mohammad-Rahimi, H., & Sadr, S. (2024). Deep learning for determining the difficulty of

endodontic treatment: A pilot study. *BMC Oral Health*, *24*(1), 574. https://doi.org/10.1186/s12903-024-04235-4

Kot, W. Y., Au Yeung, S. Y., Leung, Y. Y., Leung, P. H., & Yang, W. (2025). Evolution of deep learning tooth segmentation from CT/CBCT images: A systematic review and meta-analysis. *BMC Oral Health*, *25*(1), 800. https://doi.org/10.1186/s12903-025-05984-6

Lu, J., Cai, Q., Chen, K., Kahler, B., Yao, J., Zhang, Y., Zheng, D., & Lu, Y. (2025). Machine learning models for prognosis prediction in regenerative endodontic procedures. *BMC Oral Health*, *25*(1), 234. https://doi.org/10.1186/s12903-025-05531-3

Mohammad-Rahimi, H., Dianat, O., Abbasi, R., Zahedrozegar, S., Ashkan, A., Motamedian, S. R., Rohban, M. H., & Nosrat, A. (2024). Artificial intelligence for detection of external cervical resorption using label-efficient self-supervised learning method. *Journal of Endodontics*, *50*(2), 144-153.e2. https://doi.org/10.1016/j.joen.2023.11.004

Mohammad-Rahimi, H., Sohrabniya, F., Ourang, S. A., Dianat, O., Aminoshariae, A., Nagendrababu, V., Dummer, P. M. H., Duncan, H. F., & Nosrat, A. (2024). Artificial intelligence in endodontics: Data preparation, clinical applications, ethical considerations, limitations, and future directions. *International Endodontic Journal*, *57*(11), 1566–1595. https://doi.org/10.1111/iej.14128

Murad, N. Y., Hasan, M. H., Azam, M. H., Yousuf, N., & Yalli, J. S. (2024). Unraveling the black box: A review of explainable deep learning healthcare techniques. *IEEE Access*, *12*, 66556–66568. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3398203

Orhan, K., Bayrakdar, I. S., Ezhov, M., Kravtsov, A., & Özyürek, T. (2020). Evaluation of artificial intelligence for detecting periapical pathosis on cone-beam computed tomography scans. *International Endodontic Journal*, *53*(5), 680–689. https://doi.org/10.1111/iej.13265

Ourang, S. A., Sohrabniya, F., Mohammad-Rahimi, H., Dianat, O., Aminoshariae, A., Nagendrababu, V., Dummer, P. M. H., Duncan, H. F., & Nosrat, A. (2024). Artificial intelligence in endodontics: Fundamental principles, workflow, and tasks. *International Endodontic Journal*, *57*(11), 1546-1565. https://doi.org/10.1111/iej.14127

Özbay, Y., Erdoğan, D., & Dinçer, G. A. (2025). Evaluation of the performance of large language models in clinical decision-making in endodontics. *BMC Oral Health*, *25*(1), 648. https://doi.org/10.1186/s12903-025-06050-x

Pul, U., & Schwendicke, F. (2024). Artificial intelligence for detecting periapical radiolucencies: A systematic review and meta-analysis. *Journal of Dentistry*, *147*, 105104. https://doi.org/10.1016/j.jdent.2024.105104

Purwono, P., Ma'arif, A., Rahmaniar, W., Fathurrahman, H. I. K., Frisky, A. Z. K., & Haq, Q. M. ul. (2022). Understanding of convolutional neural network (CNN): A review. *International Journal of Robotics and Control Systems*, *2*(4), 739–748. https://doi.org/10.31763/ijrcs.v2i4.888

Qu, Y., Lin, Z., Yang, Z., Lin, H., Huang, X., & Gu, L. (2022). Machine learning models for prognosis prediction in endodontic microsurgery. *Journal of Dentistry*, *118*, 103947. https://doi.org/10.1016/j.jdent.2022.103947

Radwanski, M., Zmysłowska-Polakowska, E., Eyüboğlu, T. F., Özcan, M., & Lukomska-Szymanska, M. (2026). Artificial intelligence in endodontic diagnostics: Current applications, clinical performance, limitations, and future perspectives-A narrative review. *Applied Sciences*, *16*(14), 7216. https://doi.org/10.3390/app16147216

Razzaq, K., & Shah, M. (2025). Machine learning and deep learning paradigms: From techniques to practical applications and research frontiers. *Computers*, *14*(3), 93. https://doi.org/10.3390/computers14030093

Reduwan, N. H., Aziz, A. A., Mohd Razi, R., Abdullah, E. R. M. F., Mazloom Nezhad, S. M., Gohain, M., & Ibrahim, N. (2024). Application of deep learning and feature selection technique on external root resorption identification on CBCT images. *BMC Oral Health*, *24*(1), 252. https://doi.org/10.1186/s12903-024-03910-w

Septina, F., & Kiswanjaya, B. (t.y.). Evaluating deep learning AI for periapical lesion detection across panoramic, periapical, and CBCT radiographs: A systematic review. *Open Dentistry Journal*. https://doi.org/10.2174/0118742106391708260406104035

Sherwood, A. A., Sherwood, A. I., Setzer, F. C., Shamili, J. V., John, C., & Schwendicke, F. (2021). A deep learning approach to segment and classify C-shaped canal morphologies in mandibular second molars using cone-beam

computed tomography. *Journal of Endodontics*, *47*(12), 1907-1916. https://doi.org/10.1016/j.joen.2021.09.006

Steyerberg, E. W., & Harrell, F. E., Jr. (2015). Prediction models need appropriate internal, internal-external, and external validation. *Journal of Clinical Epidemiology*, *69*, 245-247. https://doi.org/10.1016/j.jclinepi.2015.04.005

Suyambukesan, S., Perumal, G. C. L., Somasundaram, E., Pandian, N. J., & Manigandan, T. (2013). Analyzing periapical lesions on intraoral periapical radiographs: Incongruity in diagnosis. *Journal of Indian Academy of Oral Medicine and Radiology*, *25*(1), 5-9. https://doi.org/10.5005/jp-journals-10011-1330

Talabani, R. M. (2026). Application of machine learning in predicting of MB2 canal in permanent maxillary first and second molars: A CBCT study. *PLOS ONE*, *21*(9), e0357808. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0357808

Wang, L., Li, J., Zhuang, B., Huang, S., Fang, M., Wang, C., Li, W., Zhang, M., & Gong, S. (2025). Accuracy of large language models when answering clinical research questions: Systematic review and network meta-analysis. *Journal of Medical Internet Research*, *27*, e64486. https://doi.org/10.2196/64486


BİDGE