



TÜRKİYE CUMHURİYETİ
KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
DİŞ HEKİMLİĞİ FAKÜLTESİ

ENDODONTİ ANABİLİM DALI

**İTERNAL KÖK REZORPSİYONLU 3D BASKILI
DİŞLERDE ETİDRONİK ASİDİN, FARKLI İRRİGASYON
AKTİVASYON YÖNTEMLERİYLE KANAL İÇİ
MEDİKAMENTLERİ UZAKLAŞTIRMA ETKİNLİĞİNİN
DEĞERLENDİRİLMESİ**

Şeyma KANDEMİR GENÇ

UZMANLIK TEZİ

Dr. Öğr. Üyesi Nihan ÇELİK UZUN

TRABZON-2026



TÜRKİYE CUMHURİYETİ
KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
DİŞ HEKİMLİĞİ FAKÜLTESİ

ENDODONTİ ANABİLİM DALI

**İTERNAL KÖK REZORPSİYONLU 3D BASKILI
DİŞLERDE ETİDRONİK ASİDİN, FARKLI İRRİGASYON
AKTİVASYON YÖNTEMLERİYLE KANAL İÇİ
MEDİKAMENTLERİ UZAKLAŞTIRMA ETKİNLİĞİNİN
DEĞERLENDİRİLMESİ**

Şeyma KANDEMİR GENÇ
ORCID: 0000-0002-5783-2145

UZMANLIK TEZİ

Dr. Öğr. Üyesi Nihan ÇELİK UZUN
ORCID: 0000-0002-1261-5091

TRABZON-2026

ONAY



BEYAN

Bu tez çalışmasının Karadeniz Teknik Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü Tez Hazırlama ve Yazım Kılavuzu standartlarına uygun şekilde hazırlanarak yazıldığını, tezdeki bütün bilgileri akademik ve etik kurallara bağlı kalarak elde ettiğimi, tezde yer alan ve bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen tüm bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve kullanılan kaynakların kaynaklar listesinde yer aldığını, tezimin çalışılması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici davranışımın olmadığını tezimin Karadeniz Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri koordinasyon birimi tarafından TDH-2025-16767 proje kodu ile desteklendiğini beyan ederim.

30/06/2026

Şeyma KANDEMİR GENÇ

İthaf

Bu uzmanlık tezimi, bu günlere gelmem için hiçbir fedakârlıktan kaçınmayan ve her zaman hala yanımda hissettiğim rahmetli babam Adem Kandemir'e ithaf ediyorum.



TEŞEKKÜR

Uzmanlık ve tez dönemim boyunca benimle ilgiyle, sabırla ilgilenen, beni bu süreç boyunca teşvik eden ve tüm desteğini her zaman hissettiğim danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Nihan ÇELİK UZUN'a

Uzmanlık eğitim dönemim boyunca değerli bilgi ve deneyimlerini benimle paylaşan, yol gösteren, eğitimimde büyük katkıları olan değerli hocalarım Prof. Dr. Tamer TAŞDEMİR'e, Prof. Dr. Davut ÇELİK'e, Dr. Öğr. Üyesi Tuğba KOŞAR'a,

Asistanlık dönemim boyunca bu yola beraber başladığım ve aynı zorlukları yaşadığım canım eşkıdemlilerim Damla AKKAYA ve Münevver KAYA, bana her anımda yol gösteren, tüm dertlerimi, sıkıntılarımı dinleyip onları hafifleten canım uzman kıdemlilerim Ece Ezgi ERDİNÇ KURT, Murat TAŞDEMİR, Sevil ZIRHLI, Tunahan AKTAŞ ve İzel TOPAL'a ve birlikte çalışmaktan keyif aldığım Abdulrahman NECCARROĞLU, Simge UZUN, Okan YADİGAROĞLU, Zeynep SAĞLAM, Fatmagül KADERLİ, Cihan MİNTAŞ, Gizem DEMİR, Taylan ÇETİNER, Tuğçe Nur YAVUZ, Rumeysa KARA, Selvinaz ERKULU ve Ömer Can DURMUŞ'A

Çalışma ortamımızı güzelleştiren, her zaman güler yüzlü ve çalışkan bölüm personelimiz Betül AKÇAY, Seda ALBAYRAK, Hilal TANDOĞAN, Yurdanur USTA, Zeynep DAĞTEKİN, Ebru ÇAKIR ve Emine Nur ÖZDEMİR'e

Hayatım boyunca hep arkamda dimdik duran, kendime inanmadığım zamanlarda bile bana sonsuz inanan, maddi ve manevi tüm fedakarlıkları gösteren, başarılarımda çok büyük emekleri olan canım babama, anneme ve ablam Sümeysa KANDEMİR ÖKSÜZ'e,

Asistanlık sürecimde her daim yanımda olan, sabır ve desteğini esirgemeyen yol arkadaşım Fatih GENÇ'e ve biricik oğlum Selim'e

Tüm kalbimle teşekkür ederim...

Şeyma KANDEMİR GENÇ

İÇİNDEKİLER

Sayfa

İÇ KAPAK SAYFASI

ONAY

BEYAN

İthaf

TEŞEKKÜR

İÇİNDEKİLER

vi

TABLolar DİZİNİ

ix

ŞEKİLLER DİZİNİ

x

RESİMLER DİZİNİ

xi

KISALTMALAR, SİMGELER ve FORMÜLLER DİZİNİ

xiii

ÖZET

xv

ABSTRACT

xvi

1. GİRİŞ ve AMAÇ

1

2. GENEL BİLGİLER

4

2.1. Kök Rezorpsiyonları

4

2.2. Kök Rezorpsiyonlarının Sınıflandırılması

4

2.2.1. Eksternal Kök Rezorpsiyonu

5

2.2.2. İnternal Kök Rezorpsiyonu

6

2.2.2.1. İnternal Kök Rezorpsiyonunun Etiyolojisi ve Görülme Sıklığı

6

2.2.2.2. İnternal Kök Rezorpsiyonunun Patogenezi

7

2.2.2.3. İnternal Kök Rezorpsiyonunun Histolojisi

9

2.2.2.4. İnternal Kök Rezorpsiyonunun Sınıflandırılması

10

2.2.2.5. İnternal Kök Rezorpsiyonunun Klinik Özellikleri

12

2.2.2.6. İnternal Kök Rezorpsiyonunun Radyolojik Özellikleri

13

2.2.2.7. İnternal Kök Rezorpsiyonunun Tedavi Prosedürleri

14

2.3. Kanal İçi Medikamentler

15

2.3.1. Kanal İçi Medikamentlerin Kullanım Amaçları

16

2.3.2. Kanal İçi Medikamentlerin Sınıflandırılması

17

2.3.2.1. Antibiyotik Kombinasyonları

18

2.3.2.2. Fenolik Olmayan Biyosidler	18
2.3.2.3. Fenolik Biyosidler	19
2.3.2.4. İyot Bileşikleri	19
2.3.2.5. Kalsiyum Hidroksit Bileşikleri	20
2.3.2.6. Biyoseramik (Kalsiyum Silikat) Esaslı Bileşikler	22
2.3.3. Kanal İçi Medikamentlerin Kök Kanalından Uzaklaştırılması	24
2.3.4. Kanal İçi Medikamentlerin Kök Kanalından Uzaklaştırılmasında Kullanılan İrrigasyon Solüsyonları	24
2.3.4.1. Sodyum Hipoklorit	26
2.3.4.2. EDTA	28
2.3.4.3. Sitrik Asit	29
2.3.4.4. Etidronik Asit	30
2.4. Kök Kanal Tedavisinde Kullanılan İrrigasyon Aktivasyon Yöntemleri	31
2.4.1. Manuel İrrigasyon Yöntemleri	32
2.4.1.1. Standart İğne İrrigasyonu	32
2.4.1.2. Manuel Dinamik Aktivasyon	33
2.4.1.3. Manuel Fırçalar	34
2.4.2. Makine Destekli İrrigasyon Yöntemleri	35
2.4.2.1. Negatif Basınç Prensibi ile Çalışan İrrigasyon Aktivasyon Sistemleri	35
2.4.2.2. Döner Başlıkla Birlikte Kullanılan İrrigasyon Yöntemleri	36
2.4.2.3. Sonik Cihazlar	39
2.4.2.4. Ultrasonik Cihazlar	42
2.4.2.5. Lazer ile Aktive Edilen İrrigasyon	43
2.4.2.6. Antimikrobiyal Fotodinamik Terapi	46
2.5. 3D Baskılı Diş Modelleri	46
2.5.1. Endodontik Araştırmalarda 3D Baskı Teknolojisi	47
2.5.2. 3D Baskılı Dişlerin Avantaj ve Dezavantajları	48
3. GEREÇ ve YÖNTEM	50
3.1. Çalışmanın Tasarımı	50
3.2. Örneklem Büyüklüğü ve Güç Analizi	50
3.3. 3D Baskılı Diş Modellerinin Hazırlanması	50
3.4. Kanal İçi Medikamentlerin Uygulanması	51

3.5. Kanal İçi Medikamentlerin Uzaklaştırılması	54
3.6. İrrigasyon Aktivasyon Yöntemlerinin Uygulanması	56
3.6.1. Standart İğne İrrigasyonu	58
3.6.2. Pasif Ultrasonik İrrigasyon	59
3.6.3. EndoAktivatör	60
3.6.4. XP Endo-Finisher	61
3.6.5. Lazer ile Aktive Edilen İrrigasyon	62
3.7. Örneklerin Değerlendirilmesi	64
3.7.1. Görüntüleme Yöntemi	64
3.7.2. Skorumanın Yapılması	66
3.8. İstatistiksel Analiz	68
4. BULGULAR	69
4.1. Ultracal XS Uygulanan Gruplarda Medikament Kalıntı Skorlarının Karşılaştırılması	69
4.2. Bio-C Temp Uygulanan Gruplarda Medikament Kalıntı Skorlarının Karşılaştırılması	71
4.3. Farklı İrrigasyon Protokolü ve Aktivasyon Yöntemi Kombinasyonlarının Karşılaştırılması	72
4.4. Medikamentlerin Uzaklaştırılabilirliklerinin Karşılaştırılması	73
5. TARTIşMA	75
6. SONUÇ ve ÖNERİLER	99
7. KAYNAKLAR	101
ÖZGEçMİş	

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo No	Sayfa
Tablo 1. İrrigasyon Solüsyonu, Aktivasyon Yöntemi ve Kanal İçi Medikament Kombinasyonlarına Göre Medikanent Kalıntı Skorlarının Karşılaştırılması	71
Tablo 2. Bio-C Temp ve Ultracal XS gruplarına ait skor dağılımlarının karşılaştırılması	74



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil No	Sayfa
Şekil 1. Kök rezorpsiyonlarının sınıflandırılması	6
Şekil 2. Ultracal XS kullanılan çalışma gruplarının şematik gösterimi	58
Şekil 3. Bio-C Temp kullanılan çalışma gruplarının şematik gösterimi	59
Şekil 4. Ultracal XS uygulanan gruplara ait medikament kalıntı skorlarının dağılımı	72
Şekil 5. Bio-C Temp uygulanan gruplara ait medikament kalıntı skorların dağılımı	73
Şekil 6. Kullanılan kanal içi medikamentlere göre medikament kalıntı skorlarının dağılımı	



RESİMLER DİZİNİ

Resim No	Sayfa
Resim 1. Çalışmada kullanılan rezin diş modelinin şematik gösterimi: (a) 6 mm kron uzunluğu, 18 mm kök uzunluğu ve 5 mm çaplı konik koronal rezervuardan oluşan genel model tasarımı; (b) apeks seviyesinden 5 mm uzaklıkta konumlandırılan, 1.6 mm çapında ve 0.8 mm derinliğindeki rezorpsiyon kavitesi; (c) baskı sonrasında elde edilen 3D şeffaf diş modeli	52
Resim 2. Ultracal XS	53
Resim 3. Ultracal XS'nin örneklerle uygulanması	53
Resim 4. Eppendorf tüpüne yerleştirilmiş diş örneği	54
Resim 5. 3D baskılı dişlerin saklandığı inkübatör	54
Resim 6. Bio-C Temp	55
Resim 7. Bio-C Temp'in örneklerle uygulanması	55
Resim 8. Dual Rinse HEDP	56
Resim 9. (a) NaOCl solüsyonu ve (b) EDTA solüsyonu	57
Resim 10. Kilitli enjektör ve yandan açılı 29 G endodontik iğne	57
Resim 11. P5 Newtron XS ultrasonik cihazı	60
Resim 12. Irrisafe ultrasonik uçlar	61
Resim 13. (a) EA sonik irrigasyon cihazı; (b) 25/04 kırmızı EA ucu	62
Resim 14. (a) Ai-Motor endomotor; (b) XP-endo Finisher eğesi	63
Resim 15. Er: YAG lazer sistemi ve PIPS bileşenleri: (a) Er:YAG lazer cihazı; (b) PIPS fiber ucu; (c) H14 el aleti	64
Resim 16. PIPS ile irrigasyon aktivasyonunun uygulanması	64
Resim 17. Bir diş örneğinin ikiye ayrılmış temsili görüntüsü (Ultracal XS-HEDP-PIPS grubu)	65
Resim 18. Olympus SZ61 stereomikroskop sistemi	66
Resim 19. (a) ImageJ yazılımı ile İKR kavitesinin dış sınırlarının ölçümü; (b) İKR kavitesinde kalan medikament alanının ölçülmesi	67

Resim 20. Simüle İKR kavitesinde kalan medikament miktarının değerlendirilmesinde kullanılan temsili stereomikroskopik görüntüler ve skarlama sistemi: (a) Skor 0; (b) Skor 1; (c) Skor 2; (d) Skor 3 68



KISALTMALAR, SİMGELER ve FORMÜLLER DİZİNİ

Kısaltmalar

3D	Üç boyutlu
CH	Kalsiyum hidroksit
CHX	Klorheksidin
EA	EndoAktivatör
EDTA	Etilendiamintetraasetik asit
EKR	Eksternal kök rezorpsiyonu
Er:YAG	Erbiyum: itriyum-alüminyum-garnet
ESR	Eksternal servikal rezorpsiyon
GP	Gütaperka
HEDP	1-Hidroksietan-1,1-difosfonik asit
İİKR	İnternal inflamatuvar kök rezorpsiyonu
İKR	İnternal kök rezorpsiyonu
KIBT	Konik ışınlı bilgisayarlı tomografi
KTLM	Konfokal lazer taramalı mikroskop
LAİ	Lazer ile aktive edilen irrigasyon
mikro-BT	Mikro-bilgisayarlı tomografi
NaOCl	Sodyum hipoklorit
PIPS	Foton kaynaklı fotoakustik akış
PUI	Pasif ultrasonik irrigasyon
SA	Sitrik asit
Sİİ	Standart iğne irrigasyonu
SWEEPS	Şok dalgası destekli emisyon fotoakustik akış
TEM	Taramalı elektron mikroskopisi
XPF	XP-endo Finisher

Formüller

Ca²⁺	Kalsiyum iyonu
I₂	Moleküler iyot
Na⁺	Sodyum iyonu
OCl⁻	Hipoklorit iyonu

OH⁻	Hidroksil iyonu
Ph	Çözeltide hidrojen iyonu konsantrasyonunun negatif logaritması
Simgeler	
<	Küçüktür
>	Büyüktür
≥	Büyük eşit
°C	Santigrat derece
%	Yüzde
/	Bölü



İnternal Kök Rezorpsiyonlu 3D Baskılı Dişlerde Etidronik Asidin, Farklı İrrigasyon Aktivasyon Yöntemleriyle Kanal İçi Medikamentleri Uzaklaştırma Etkinliğinin Değerlendirilmesi

ÖZET

Bu çalışmanın amacı, internal kök rezorpsiyonunu simüle eden 3D baskılı dişlerde etidronik asit (HEDP) ve geleneksel NaOCl/EDTA irrigasyon protokollerinin, farklı irrigasyon aktivasyon yöntemleriyle birlikte Ultracal XS ve Bio-C Temp kanal içi medikamentlerinin uzaklaştırılmasındaki etkinliğini değerlendirmektir.

Standart internal kök rezorpsiyonu kavitesine sahip 240 adet 3D baskılı maksiller kesici diş modeli üretildi. Negatif kontrol grubunun ayrılmasının ardından kalan örnekler Ultracal XS veya Bio-C Temp kanal içi medikamenti yerleştirildi ve iki hafta bekletildi. Pozitif kontrol örnekleri ayrıldıktan sonra kalan örnekler %9 HEDP veya %5,25 NaOCl/%17 EDTA irrigasyon protokolüne ayrıldı. Her irrigasyon protokolü; standart iğne irrigasyonu (Sİİ), EndoActivator (EA), pasif ultrasonik irrigasyon (PUİ), XP-endo Finisher (XPF) ve foton kaynaklı fotoakustik akış (PIPS) yöntemleriyle uygulandı (n=11). İrrigasyon sonrasında modeller ikiye ayrılarak internal kök rezorpsiyonu kavitelerinde kalan medikament miktarı 20× büyütme stereomikroskop altında dört dereceli skorlama sistemiyle değerlendirildi. Veriler Kruskal-Wallis H ve Mann-Whitney U testleri kullanılarak analiz edildi.

Hiçbir irrigasyon protokolü veya aktivasyon yöntemi kanal içi medikamentleri tamamen uzaklaştıramadı. Aynı aktivasyon yöntemi altında HEDP ve NaOCl/EDTA irrigasyon protokolleri arasında hem Ultracal XS hem de Bio-C Temp için istatistiksel olarak anlamlı fark bulunmadı ($p>0,05$). Benzer şekilde, iki medikamentin uzaklaştırılabilirliği arasında da anlamlı farklılık saptanmadı ($p=0,50$). Aktivasyon yöntemleri karşılaştırıldığında ise PIPS ve XPF gruplarında, her iki medikament için de EA ve Sİİ gruplarına kıyasla anlamlı düzeyde daha düşük medikament kalıntı skorları elde edildi ($p<0,001$). PIPS ile XPF arasında ve EA ve Sİİ grupları arasında istatistiksel olarak anlamlı fark belirlenmedi ($p>0,05$).

Sonuç olarak, simüle internal kök rezorpsiyonu kavitelerinde kanal içi medikamentlerin uzaklaştırılmasında HEDP ve NaOCl/EDTA irrigasyon protokolleri benzer etkinlik göstermiştir. Buna karşın, irrigasyon aktivasyon yöntemi medikament uzaklaştırma başarısını belirleyen temel faktör olmuş; PIPS ve XPF en etkili aktivasyon yöntemleri olarak belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: 3D baskılı diş, Bio-C Temp, Etidronik asit, İnternal kök rezorpsiyonu, Kalsiyum hidroksit, PIPS

Evaluation of the Efficacy of Etidronic Acid Combined with Different Irrigation Activation Methods for the Removal of Intracanal Medicaments from 3D-Printed Teeth with Internal Root Resorption

ABSTRACT

The aim of this study was to evaluate the efficacy of etidronic acid (HEDP) and conventional NaOCl/EDTA irrigation protocols, combined with different irrigation activation methods, in removing Ultracal XS and Bio-C Temp intracanal medicaments from 3D-printed teeth simulating internal root resorption.

Two hundred and forty 3D-printed maxillary incisor tooth models with a standardized internal root resorption cavity were fabricated. Following the separation of the negative control group, the remaining specimens were filled with either Ultracal XS or Bio-C Temp intracanal medicaments and kept for two weeks. After separating the positive control specimens, the remaining specimens were divided into 9% HEDP or 5.25% NaOCl/17% EDTA irrigation protocols. Each irrigation protocol was applied using standard needle irrigation (SNI), EndoActivator (EA), passive ultrasonic irrigation (PUI), XP-endo Finisher (XPF), and photon-induced photoacoustic streaming (PIPS) methods (n=11). After irrigation, the models were split longitudinally, and the amount of remaining medicament in the internal root resorption cavities was evaluated under a stereomicroscope at 20× magnification using a four-grade scoring system. Data were analyzed using Kruskal-Wallis H and Mann-Whitney U tests.

None of the irrigation protocols or activation methods completely removed the intracanal medicaments. Under the same activation method, no statistically significant difference was found between the HEDP and NaOCl/EDTA irrigation protocols for both Ultracal XS and Bio-C Temp ($p>0.05$). Similarly, no significant difference was detected between the removability of the two medicaments ($p=0.50$). When comparing the activation methods, significantly lower medicament residue scores were obtained in the PIPS and XPF groups for both medicaments compared to the EA and SNI groups ($p<0.001$). No statistically significant difference was determined between PIPS and XPF, or among the , EA, and SNI groups ($p>0.05$). In conclusion, HEDP and NaOCl/EDTA irrigation protocols showed similar efficacy in removing intracanal medicaments from simulated internal root resorption cavities. In contrast, the irrigation activation method was the primary factor determining the success of medicament removal, with PIPS and XPF identified as the most effective activation methods.

Keywords: 3D-printed tooth, Bio-C Temp, Calcium hydroxide, Etidronic acid, Internal root resorption

1. GİRİŞ ve AMAÇ

İnternal kök rezorpsiyonu (İKR), pulpanın inflamatuvar mikroçevresinde klastik hücrelerin farklılaşması ve aktivasyonu sonucunda ortaya çıkan, intraradiküler dentin ile dentin tübüllerinin progresif (ilerleyici) rezorpsiyonu ile karakterize patolojik bir süreçtir (1). Klinik ve radyografik olarak İKR, kök kanal duvarlarının özellikle kökün orta ve apikal üçlülerinde simetrik ve progresif genişlemesi ile dentin dokusunda meydana gelen kayıpla karakterizedir (2).

İKR tedavisinin temel amacı, kök kanal sisteminin dezenfekte edilmesi ve rezorpsiyon sürecinin devamında rol oynayan dokuların uzaklaştırılmasıdır (3). Ancak İKR kavitelerinin kompleks anatomisi, mekanik preparasyon ve irrigasyon işlemlerinin etkinliğini sınırlandırmakta ve kanal içi medikamentlerin tamamen uzaklaştırılmasını zorlaştırmaktadır (4). Kanal içinde kalan medikament artıkları ise kök kanal dolgu materyallerinin dentin duvarlarına adaptasyonunu olumsuz etkileyerek tedavi başarısını azaltabilmektedir (5-7).

Kalsiyum hidroksit (CH), endodontide kanal içi medikasyon amacıyla en yaygın kullanılan materyallerden biridir ve yüksek pH'ına bağlı antimikrobiyal özellikleri nedeniyle sıklıkla tercih edilmektedir (8,9). Son yıllarda ise biyoseramik esaslı medikamentler, biyouyumluluk ve biyoaktivite özellikleri nedeniyle dikkat çekmektedir. Bu materyallerden biri olan Bio-C Temp (Angelus, Londrina, PR, Brezilya)'ın kök kanal sisteminden uzaklaştırılabilirliğine ilişkin veriler sınırlı olmakla birlikte, bazı çalışmaların bu materyalin CH'ye göre daha zor uzaklaştırılabildiğini bildirmesi, biyoseramik medikamentlere yönelik uzaklaştırma protokollerinin araştırılmasını gerekli kılmaktadır (10,11).

Kanal içi medikamentlerin uzaklaştırılmasında irrigasyon solüsyonlarının kimyasal özellikleri önemli rol oynamaktadır. Sodyum hipoklorit (NaOCl), organik doku çözücü ve antimikrobiyal etkileri nedeniyle temel irrigasyon ajanı olarak kullanılırken, inorganik artıkların uzaklaştırılması amacıyla EDTA, sitrik asit ve maleik asit gibi şelatör ajanlardan yararlanılmaktadır (12,13). Son yıllarda ise NaOCl ile kimyasal uyumluluğu sayesinde sürekli şelasyon yaklaşımına olanak tanıyan etidronik asit [1-hidroksietan-1.1-difosfonik asit (HEDP)], klinik kullanım kolaylığı ve şelasyon kapasitesi nedeniyle giderek daha fazla ilgi görmektedir (14-16).

Mekanik açıdan ise irrigasyon solüsyonlarının kanal sistemindeki ulaşılması güç alanlara penetrasyonunu artırmak amacıyla çeşitli aktivasyon teknikleri geliştirilmiştir

(17,18). Standart iğne irrigasyonu (Sİİ), klinikte yaygın kullanılan geleneksel bir yöntem olmakla birlikte, kök kanal düzensizliklerinden medikament kalıntılarının uzaklaştırılmasında sınırlı etkinlik gösterebilmektedir (17,20–22). Buna karşılık pasif ultrasonik irrigasyon (PUİ), oluşturduğu kavitasyon ve akustik akım etkileri sayesinde irrigasyon etkinliğini artırmakta ve özellikle apikal bölgelerde kanal içi medikamentlerin uzaklaştırılmasında başarılı sonuçlar sunmaktadır (23,24).

Ultrasonik sistemlerin yanı sıra, bu amaçla sonik bir sistem olan EndoAktivator (EA) gibi farklı cihazlar da kullanılabilir (8). EA ile birlikte kullanılan uçlar, düz yüzeyli yapıları sayesinde kök kanal dentininde kesici bir etki oluşturmayıp, irrigasyon solüsyonunun kanal içerisinde güvenli ve etkin biçimde aktive edilmesine olanak sağlamaktadır. Kanal içi medikamentlerin uzaklaştırılmasına yönelik çalışmalarda, EA'nın Sİİ'ye göre anlamlı derecede daha etkili olmadığı, ayrıca PUİ'ye kıyasla daha düşük temizleme etkinliği gösterdiği bildirilmiştir (9, 10).

Yakın zamanda, irrigasyon solüsyonlarının final aktivasyonu amacıyla geliştirilen XP-Endo Finisher'in (XPF) sahip olduğu yüksek esneklik ve kök kanal boşluğuna üç boyutlu uyum sağlayabilme özelliği sayesinde, orijinal kanal anatomisine saygılı şekilde çalıştığı ve düzensiz ya da erişilmesi güç alanların daha etkin temizlenmesine katkıda bulunduğu bildirilmiştir (11). XPF'nin medikament uzaklaştırmada Sİİ'ye üstün olduğu, PUİ ile karşılaştırıldığında ise sonuçların kanal morfolojisine göre değiştiği rapor edilmiştir (12).

Foton kaynaklı fotoakustik akış (PIPS), irrigasyon solüsyonlarını düşük enerjili Er:YAG lazerle aktive ederek kavitasyon ve şok dalgaları oluşturan bir tekniktir (13). PIPS'in irrigantın dentin tübüllerine penetrasyonunu ve smear tabakası, debris ile bakterilerin uzaklaştırılmasını artırdığı bildirilmiştir (14). Çeşitli çalışmalarda, kanal içi medikamentlerin uzaklaştırılmasında PIPS'in Sİİ, sonik ve ultrasonik yöntemlerden daha etkili olabildiği rapor edilmiştir (14–17).

İKR kavitelerinden medikament uzaklaştırılmasını değerlendiren in vitro çalışmalarda model seçimi, güvenilirlik ve tekrarlanabilirlik açısından önemlidir. Geleneksel yöntemlerde frez veya asit demineralizasyonuyla oluşturulan yapay kaviteler, klinik lezyonların düzensiz morfolojisini tam olarak yansıtmamakta ve örnekler arası yüksek boyutsal varyasyona yol açarak gruplar arası karşılaştırmaların istatistiksel güvenilirliğini zayıflatmaktadır (18–20). Doğal dişler ise anatomik heterojenite, temin güçlüğü, etik

kısıtlamalar ve çapraz enfeksiyon gibi riskler taşımaktadır (21). Bilgisayar destekli tasarım ve 3D baskı teknolojileri, söz konusu kısıtlamaların üstesinden gelmek amacıyla endodonti araştırmalarında giderek yaygınlaşan bir model geliştirme yaklaşımı olarak öne çıkmaktadır. (22). Bu teknoloji; kavite çapı, derinliği, konumu ve kök kanal anatomisinin tüm örneklerde birebir aynı biçimde yeniden üretilmesine olanak tanıyarak grup içi ve gruplar arası varyasyonu ortadan kaldırmaktadır. Nitekim son yayınlanan in vitro çalışmalarda, standardize 3D baskılı İKR modeli kullanımının örnekler arası yüksek tekrarlanabilirlik sağladığı ve bu sayede tedavi protokollerinin etkisinin daha net biçimde değerlendirilebildiği bildirilmiştir (23, 24).

Literatürde kanal içi medikamentlerin uzaklaştırılmasında farklı irrigasyon aktivasyon yöntemlerinin etkinliği geniş ölçüde araştırılmaktadır. PUI, XPF, sonik sistemler ve lazer destekli irrigasyon teknikleri, konvansiyonel yöntemlere kıyasla daha iyi temizlik kapasitesi göstermesine rağmen, özellikle İKR gibi düzensiz kavite yapılarında bu etkinliğin belirgin şekilde değişebildiği bildirilmiştir (9, 10, 12, 16, 17). Bununla birlikte, HEDP gibi alternatif şelasyon ajanlarının kök kanal sisteminden CH'yi uzaklaştırmadaki etkinliğini değerlendiren sınırlı sayıda çalışma mevcut olup (25–27), HEDP'nin İKR kavitelerinden CH ve Bio-C Temp'in uzaklaştırılmasındaki etkinliğini değerlendiren bir çalışmaya rastlanmamıştır. Ayrıca mevcut çalışmaların büyük kısmı doğal diş veya standartlaştırılmış modeller üzerinde yürütülmüş olup, rezorptif defektleri taklit eden 3D baskılı modellerle yapılan araştırmalar sınırlıdır. Bu kapsamda mevcut çalışmanın amacı, simüle İKR'li diş modellerinde HEDP'nin beş farklı irrigasyon aktivasyon yöntemi (Sİİ, PUI, EA, XPF ve PIPS) ile kullanıldığında, kanal içi medikamentleri (CH ve Bio-C Temp) uzaklaştırma etkinliğini değerlendirmektir. Oluşturulan hipotezler şu şekildedir:

H₀₁: Kanal içi medikamentlerin (Bio-C Temp, Ultracal XS) uzaklaştırılmasında HEDP ve NaOCl/EDTA protokolleri arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark yoktur.

H₀₂: Kanal içi medikamentlerin (Bio-C Temp, Ultracal XS) uzaklaştırılmasında kullanılan irrigasyon aktivasyon yöntemleri (Sİİ, PUI, EA, XPF ve PIPS) arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark yoktur.

H₀₃: Irrigasyon protokolü ve aktivasyon yönteminden bağımsız olarak Ultracal XS ve Bio-C Temp medikamentlerinin uzaklaştırılmasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark yoktur.

2. GENEL BİLGİLER

2.1. Kök Rezorpsiyonları

Rezorpsiyon, Amerikan Endodonti Derneği'nin 1944 yılında yaptığı tanıma göre dentin, sement ya da kemik dokuda kayba neden olan fizyolojik veya patolojik süreçlerle ilişkili bir durum olarak ifade edilmektedir (28).

Kök rezorpsiyonu, klastik hücrelerin dişin sert ve yumuşak dokularıyla etkileşimi sonucunda, mineralize sement veya dentinin bakteriyel olmayan yıkımı olarak tanımlanır (29). Daimi dişlerde gözlenen kök rezorpsiyonları, kökeninden bağımsız olarak patolojik ve geri dönüşümsüz bir süreçtir. Bu olgular klinik olarak asemptomatik seyredip rutin radyografilerde tesadüfi bir bulgu olarak saptanabildiği gibi, çeşitli semptomlarla da ortaya çıkabilirler. Tedavi gerektiren bu yıkıcı süreç, zamanında müdahale edilmediğinde dişin prognozunu olumsuz etkileyerek erken diş kayıplarına yol açabilmektedir (30). Daimi dişlerin aksine, süt dişlenmedeki fizyolojik kök rezorpsiyonu, süt dişinin eksfoliasyonunu (düşmesini) sağlayarak alttan gelen daimi dişin sürmesine zemin hazırlayan arzu edilen bir süreçtir (31, 32).

2.2. Kök Rezorpsiyonlarının Sınıflandırılması

Kök rezorpsiyonlarının sınıflandırılması, tanı, etkili tedavi ve sonuçların iyileştirilmesi için kritik öneme sahiptir (33). Literatürde kök rezorpsiyonlarının histolojik, etiyolojik, lokalizasyon ve kökenine göre birçok farklı sınıflandırması bulunmaktadır (34). İlk sınıflandırma 1970 yılında Andreasen tarafından lezyonun lokalizasyonu, tipi ve travma etkileri baz alınarak yapılmıştır (35). Bu sınıflandırma, literatürde en çok atıf alan bir sınıflandırma olup, tarihsel bir referans olarak geniş ölçüde kabul görmektedir (36). Andreasen'in 1970 yılında önerdiği kök rezorpsiyonu sınıflandırması:

- İnternal rezorpsiyon: İnflamatuvar rezorpsiyon ve replasman (yer değiştirme) rezorpsiyonu
- Eksternal rezorpsiyon: Yüzey rezorpsiyonu, replasman rezorpsiyonu ve inflamatuvar rezorpsiyon

Bununla birlikte, Patel ve ark. tarafından 2018 yılında yayımlanan güncel sınıflandırma Şekil 1'de sunulmuştur (37).



Şekil 1. Kök rezorpsiyonlarının sınıflandırılması

2.2.1. Eksternal Kök Rezorpsiyonu

Eksternal kök rezorpsiyonu (EKR), periodontal ligamentten başlayan ve diş kökünde sement ile dentinin kaybıyla karakterize bir durumdur. Bu süreç, diş kökünü etkileyebilen çok sayıda faktöre bağlı olarak gelişebilir ve çoğunlukla asemptomatik seyrettiğinden saptanması oldukça güçtür (38).

Diş travması, bakteriyel faktörler, ortodontik tedavi, periodontal hastalık, diş beyazlatma, viral etkenler veya nedeni belli olmayan idiyopatik faktörler bu süreci tetikleyebilir. Bunların yanı sıra, endokrin değişiklikler ile vitamin-mineral eksiklikleri gibi bazı sistemik predispozan faktörlerin de rezorpsiyon riskiyle ilişkili olduğu bildirilmiştir (38). Özellikle eksternal kök rezorpsiyonları, sıklıkla ortodontik diş hareketleri gibi mekanik uyarılara sekonder bir yanıt olarak gelişir. Bu uyarılar, belirli moleküler yolları aktive ederek odontoklastlarda fizyolojik olmayan bir uyarılma meydana getirir. Aktivasyon fazını takiben mineralize matrikse tutunan odontoklastlar, hücre membranı ile füzyon gösterir. Bu bölgeye salınan hidrojen iyonları ve proteolitik enzimler, yarattıkları asidik mikroçevre sayesinde kalsifiye sert dokunun dekalsifikasyonuna ve organik matriksin yıkımına yol açarlar (39). Diş dokularında hasar veya irritasyon varlığında klastik hücreler kök yüzeyindeki etkilenmiş bölgeye çekilir. Bu bağlamda rezorpsiyon, aslında savunma mekanizmasının bir parçası olarak, klastik hücrelerin hasarlı dokuyu uzaklaştırma (debridman) işlevinin patolojik bir yan ürünü olarak ortaya çıkar (40).

Eksternal kök rezorpsiyonunun tanısı esas olarak radyografik yöntemlere dayanmakla birlikte, tanının doğrulanabilmesi için ayrıntılı bir anamnez ve yeterli klinik muayene zorunludur. Konvansiyonel radyografilerin iki boyutlu doğası, lezyonun tam lokalizasyonu, yayılımı ve morfolojik tipi hakkında kısıtlı bilgi sunmakta, bu durum ise hatalı veya eksik değerlendirme riskini beraberinde getirmektedir (41). Literatürde Takeshita ve ark., eksternal kök rezorpsiyonunu iki boyutlu görüntülerle saptanması en güç dental patolojilerden biri olarak tanımlamıştır (42). Benzer şekilde D'Addazio ve ark., periapikal radyografilerin lezyonun varlığını saptayabilse de kesin lokalizasyon ve ayırıcı tanı konusunda güvenilir bir veri sağlamada yetersiz kaldığını vurgulamıştır (43). Bu nedenle, lezyonun çevre dokularla ilişkisinin ve gerçek boyutunun netleştirilmesi amacıyla sıklıkla ileri görüntüleme tekniklerine başvurulması zorunlu hâle gelmiştir.

2.2.2. İnternal Kök Rezorpsiyonu

İKR, pulpanın inflamatuvar mikroçevresinde klastik hücrelerin farklılaşma ve aktivasyonu ile ortaya çıkan, intraradiküler dentin ile dentin tübüllerinin kademeli rezorpsiyonu olarak tanımlanır (1). Literatürdeki ilk bilimsel kaydı 1830 yılında Bell tarafından yapılan bu tablo, pulpa dokusunun yoğun vaskülarizasyonu ve granülasyon dokusu içermesi nedeniyle literatürde “internal granülom” olarak da tanımlanmaktadır (44, 45). Klinik ve radyolojik olarak İKR; özellikle kökün orta veya apikal üçlüsünde, kök kanal duvarlarının progresif bir şekilde genişlemesi ve dentin dokusunun kaybı ile karakterizedir (2).

2.2.2.1. İnternal Kök Rezorpsiyonu Etiyolojisi ve Görülme Sıklığı

İKR'nin etiyolojisi tam olarak bilinmemekle birlikte, odontoblastların ve mineralize dokuyu örten mineralize olmamış predentin tabakasının hasar görerek odontoklastlara maruz kalmasının, sürecin başlamasında kritik rol oynadığı yaygın olarak kabul görmektedir (46). Predentin tabakasında meydana gelen hasar ve yıkımla ilişkili etiyolojik faktörler çeşitlilik göstermektedir. Bu faktörler arasında dental travma, periodontal enfeksiyonlar, çürük kaynaklı pulpitis ve vital dişlerdeki restoratif işlemler sırasında oluşan termal hasar başta gelmektedir. Ayrıca vital kök rezeksiyonları, anakoresis, ortodontik kuvvetler, pulpa amputasyonu ve CH uygulamaları gibi iyatrojenik nedenlerin yanı sıra; çatlak dişler ve sağlıklı pulpa dokusunda izlenen idiyopatik distrofik değişimlerin de bu süreci tetiklediği bildirilmiştir (47–50). Bunun yanı sıra, literatürde herpes zoster enfeksiyonu ile rezorpsiyon gelişimi arasında ilişki olabileceği ve sistemik viral enfeksiyona bağlı olarak odontoblast

dejenerasyonunun ortaya çıkabileceği de bildirilmiştir (51). Dental pulpada gözlenen bu patolojik tutulum; virüsün nörotropik özelliği nedeniyle, pulpa dokusu içerisinde sonlanan sinir uçlarını takip ederek bölgeye penetre olmasıyla açıklanmaktadır (52).

İnternal rezorpsiyonun gelişiminde genetik etkenlerin de rol oynayabileceği ileri sürülmüştür. Tek yumurta ikizlerinde yürütülen bir çalışmada, interlökin-1 (IL-1) gen polimorfizmi ile kök rezorpsiyonu arasında ilişki olduğu gösterilmiştir (53).

EKR ile karşılaştırıldığında, İKR'nin görülme sıklığı daha düşüktür ve İKR olgularının erkeklerde kadınlara göre daha yüksek oranda görüldüğü bildirilmiştir (54). İKR genel olarak nadir görülen bir durum olarak değerlendirilmekle birlikte, konuya ilişkin epidemiyolojik verilerin sınırlı olması nedeniyle gerçek görülme sıklığı net biçimde ortaya konulamamıştır (4). Yakın tarihli bir çalışmada, 1 086 hastaya ait konik ışınli bilgisayarlı tomografi (KIBT) görüntüleri değerlendirildiğinde, 171 hastada (%15.7) toplam 250 dişte kök rezorpsiyonu saptanmıştır. Ayrıca, rezorpsiyon tespit edilen dişlerin %9.6'sında rezorptif sürecin İKR bileşeni ile ilişkili olduğu raporlanmıştır (55).

2.2.2.2. İnternal Kök Rezorpsiyonu Patogenezi

Kemik rezorpsiyonundan sorumlu olan osteoklastlar; hareketli, çok çekirdekli dev hücrelerdir. Bu hücreler, mezenkimal kökenli osteoblast ve osteositlerin aksine, hematopoetik kökenli (dalak veya kemik iliği) monosit-makrofaj serisine ait mononükleer öncü hücrelerin füzyonu ile farklılaşırlar (56, 57). Hasar veya irritasyon bölgesine proinflamatuvar sitokinlerin kemotaktik etkisiyle yönelen bu hücrelerin, rezorpsiyonu başlatabilmesi için öncelikle mineralize yüzeye adhezyonu (tutunması) gerekir (58, 59). Mineralize ekstrasellüler matriks ile temasın ardından, aktif rezorpsiyon fazına geçen osteoklastın aktin sitoskeleti yeniden organize olarak “clear zone” adı verilen organelsiz sitoplazmik alanı oluşturur. Bu yapı, hücrenin sert doku yüzeyi ile sızdırmaz bir temas kurmasını sağlar (60). Clear zone, hücre membranının kıvrımlı kenar (podozom) olarak adlandırılan geniş yüzey alanlı rezorptif bölgesini çevreleyerek, bu alanı ekstrasellüler ortamdan izole eder. Bu izolasyon sayesinde podozomların da yardımıyla oluşturulan kapalı mikroçevrede, hidrojen iyonları ve proteolitik enzimlerin etkisiyle sert doku yıkımı için gerekli asidik ortam stabilize edilir (61).

Odontoklastlar, diş sert dokularını rezorbe eden hücreler olup morfolojik olarak osteoklastlara benzerler (62). Bununla birlikte daha küçük olmaları, daha az çekirdek içermeleri ve muhtemelen hedef dokunun farklılığına bağlı olarak daha küçük sealing

zonlara sahip olmalarıyla osteoklastlardan ayrılırlar (63). Her iki hücre tipi benzer enzimatik özellikler gösterir ve mineralize doku yüzeyinde Howship lakünleri olarak tanımlanan rezorpsiyon çukurlukları oluşturur (60, 64). Çok çekirdekli osteoklastlarla ortak hematopoietik kökene sahip tek çekirdekli dendritik hücreler uzun süre yalnızca immün savunma hücreleri olarak değerlendirilmiş olsa da güncel çalışmalar olgunlaşmamış dendritik hücrelerin osteoklast prekürsörü gibi davranabildiğini ve transdiferansiyasyon ile osteoklastlara dönüşme potansiyeli taşıdığını göstermiştir. Dental pulpada dendritik hücrelerin bulunması, bu hücrelerin odontoklastlar için de olası bir prekürsör kaynağı olabileceğini düşündürmektedir (65, 66).

Moleküler sinyalizasyon açısından, kemik remodelingi sırasında klastik hücre fonksiyonlarını düzenleyen osteoprotegerin (OPG)/nükleer faktör kappa B reseptör aktivatörü ligandı (RANKL)/RANK sistemi kök rezorpsiyonu ile de ilişkilendirilmiştir (67). Bu sistem, osteoblastik stromal hücrelerle hücre-hücre etkileşimleri üzerinden klastik hücrelerin prekürsörlerinden farklılaşmasını yönlendirir. Eksternal kök rezorpsiyonunda rol oynayan periodontal ligament hücrelerine benzer şekilde, insan dental pulpasının da OPG ve RANKL için mRNA ekspresyonu gösterdiği yakın zamanda bildirilmiştir (68). Tümör nekroz faktörü süper familyasının bir üyesi olan OPG, yalancı reseptör gibi RANKL'ye bağlanarak RANKL-RANK etkileşimini azaltır ve böylece klastik hücre farklılaşmasını baskılar. Bu nedenle OPG/RANKL/RANK sisteminin, İKR'de odontoklast farklılaşmasına katkı sağlayabileceği düşünülmektedir (69).

Klastik hücrelerin mineralleşmemiş kollajen matrislerine adezyon yeteneğine sahip olmadığı iyi bilinmektedir (70). Dentin içerisinde bulunan kollajen içermeyen organik bileşenlerin (odontoblast tabakası ve predentin) varlığının, kök kanal duvarının rezorpsiyonunu engellediği ileri sürülmüştür (71, 72). Odontoklastların, RGD (arjinin-glisin-aspartik asit) dizisi içeren ekstrasellüler proteinlere integrinler aracılığıyla bağlanabildiği; bu bağlanmada özellikle $\alpha_v\beta_3$ integrininin kritik rol oynadığı belirtilmektedir (73). Mineralize doku yüzeyindeki RGD içeren matriks proteinlerinden osteopontin, hem dentindeki apatitlere hem de klastik hücrelerin integrin reseptörlerine bağlanarak adezyonu güçlendiren bir köprü görevi görür (74). Predentinde RGD peptidlerinin bulunmamasının odontoklast bağlanmasını azaltarak kanal duvarlarının İKR'ye karşı direnç kazanmasına katkıda bulunabileceği öne sürülmüştür (75).

İKR'nin ilerleyebilmesi için lezyonun apikalindeki pulpa dokusunun; klastik hücreleri ve gerekli besin öğelerini sağlayabilecek vital bir vaskülarizasyona sahip olması şarttır. Buna karşın, lezyonun koronalinde konumlanan enfekte ve nekrotik pulpa dokusu, klastik hücre aktivitesini tetikleyen bir uyarıcı rolü üstlenir (34). Bakteriyel bir stimülasyonun bulunmadığı durumlarda rezorpsiyon genellikle kendini sınırlar ve klinik veya radyografik olarak saptanabilir düzeye ulaşmadan remisyona uğrayabilir. Bu nedenle, progresif bir yıkım için rezorpsiyon bölgesinin apikalindeki pulpa vitalitesinin korunması elzemdir.

Tedavi edilemeyen vakalarda İKR, kök kanal duvarında perforasyona yol açarak lateral periodontal lezyonların oluşumuna zemin hazırlayabilir. Ayrıca mikroorganizmaların tüm kanal sistemine invaze olarak pulpayı tamamen enfekte etmesi durumunda, süreç apikal periodontitis ile sonuçlanabilir (54). Pulpa dokusunun nekroze olması veya endodontik tedavi ile tamamen uzaklaştırılması, rezorptif sürecin devam etmesi için gerekli olan besinsel desteği keseceğinden lezyonun durmasına neden olur (76).

2.2.2.3. İnternal Kök Rezorpsiyonu Histolojisi

İnsanlarda İKR'nin histolojik bulgularına ilişkin bilgi birikimi büyük ölçüde Wedenberg ve Zetterqvist'in çalışmalarına dayanmaktadır. Bu çalışmada, süt ve daimî dişlerdeki İKR lezyonları; ışık mikroskopisi, taramalı elektron mikroskopisi ve enzim histokimyası yöntemleriyle değerlendirilmiştir. Progresif internal rezorpsiyon nedeniyle süt ve daimî dişlerin histolojik görünümü ile histokimyasal profillerinin benzer olduğu, ancak rezorpsiyonun genellikle süt dişlerinde daha hızlı seyrettiği bildirilmiştir. İKR'de, tüm dişlerde pulpa dokusunda değişen derecelerde inflamasyon mevcut olup, inflamatuvar infiltrat ağırlıklı olarak lenfosit ve makrofajlardan, daha az oranda ise nötrofillerden oluşmaktadır (46).

Patolojik süreçte inflamasyonun genişlemiş damarlarla ilişkili olduğu; vakaların büyük çoğunluğunda bakteriyel invazyonun ya nekrotik koronal pulpa dokusunda ya da lezyona komşu dentin tübüllerinde lokalize olduğu bildirilmiştir. Pulpa boşluğunu dolduran granülasyon dokusu; normal pulpa dokusuna kıyasla daha az vasküler, ancak daha hücrel ve fibröz yapıdan zengin olmasıyla periodontal bağ dokusu ile benzerlik göstermektedir. Birçok olguda periodontal ligamentin, apikal foramen veya gelişen perforasyonlar aracılığıyla pulpa dokusu ile anatomik devamlılık sergilediği saptanmıştır (54).

Lezyonların ayırt edici histopatolojik bulgusu, kanal duvarındaki rezorpsiyon lakünlerini (Howship lakünleri) dolduran, aktif yıkım özelliklerine sahip çok çekirdekli odontoklastların varlığıdır. Bu hücrelere komşu dokuda mononükleer inflamatuvar hücre infiltrasyonu eşlik etmektedir. Yapılan histokimyasal analizlerde hem odontoklastlarda hem de ilişkili inflamatuvar hücrelerde tartrata dirençli asit fosfataz aktivitesi gözlenmiştir. Ayrıca rezorpsiyonun gerçekleştiği dentin duvarlarında, koruyucu bir bariyer olan preentin tabakasına ve odontoblast hücre dizilimine rastlanmamıştır (46).

2.2.2.4. İnternal Kök Rezorpsiyonu Sınıflandırılması

İKR genel olarak inflamatuvar ve replasman (yer değiştirme) tip olmak üzere iki ana tip altında değerlendirilir:

1. İnternal İnflamatuvar Kök Rezorpsiyonu

İnternal inflamatuvar kök rezorpsiyonu (İİKR), pulpa kök kanalı sisteminin belirli bir segmentinde ortaya çıkan ve dentin kaybıyla sonuçlanan inflamatuvar bir süreçtir. Söz konusu kayıp kök kanal duvarından başlayarak sementuma doğru ilerler (46). İİKR, kanal sisteminin herhangi bir bölgesinde lokalize olabilmekle birlikte; radyografik olarak genellikle pulpa boşluğunda izlenen oval veya simetrik genişlemeler ile karakterize edilir (77). Lezyonun radyografik olarak saptanabilir düzeye ulaşması, genellikle belirgin bir ilerleme kaydedip perforasyona yaklaştığı ileri aşamalarda mümkün olabilmektedir. Süreç içerisinde pulpa dokusunun tamamen nekroze olması ve kanal sisteminin enfekte hâle gelmesi durumunda, tabloya akut veya kronik apikal periodontitis bulguları eklenir (75). Rezorpsiyonun kronik bölgesindeki pulpa odasında meydana geldiği vakalarda; vaskülarize granülasyon dokusunun incelmış mine ve dentinden yansıması sonucu, dişte patognomonik bir pembe renk değişimi izlenebilir. Bu klinik görünüm, literatürde 19. yüzyıl anatomisti James Howard Mummery'ye atfen "Mummery'nin pembe dişi" (Pink spot of Mummery) olarak tanımlanmaktadır (78).

İİKR rezorptif odakların komşuluğunda ek sert doku depozitleri oluşmaksızın intraradiküler dentinin progresif kaybıyla karakterizedir. Süreç sıklıkla kronik pulpa inflamasyonu ile ilişkilidir. Nitekim lezyon rutin radyografilerde saptanabilecek düzeye ulaştığında, granülasyon dokusu içerisinde bakteriyel varlık gösterilebilir (79). Pulpa enfeksiyonlarında kronik inflamasyon yaygın bir bulgu olsa da tek başına İİKR'yi tetiklemek için yeterli bir faktör değildir. Rezorptif sürecin başlaması için belirli biyolojik koşulların eş zamanlı olarak mevcudiyeti şarttır. Öncelikle odontoblast tabakasının ve koruyucu preentin

bariyerinin fiziksel veya kimyasal olarak bozulması, ardından dental pulpa içerisinde odontoklast öncüllerinin kemotaksis yoluyla toplanarak aktive olması gerekir. Ancak bu spesifik koşullar sağlandığında, aktive olan klastik hücreler mineralize dentin yüzeyine adhezyon göstererek rezorpsiyonu başlatabilir (80). Bu çok aşamalı ve spesifik aktivasyon süreci, İİKR'nin eksternal inflamatuvar kök rezorpsiyonuna kıyasla klinik olarak neden daha nadir gözlemlendiğini açıklayan temel mekanizmadır (75).

Aktif ve progresif İİKR lezyonlarında, rezorptif odağın koronalinde yer alan kök kanal bölümü genellikle nekrotiktir. Buna karşılık apikalde pulpa vital kalır ve odontoklastlara gerekli beslenmeyi sağlayarak rezorpsiyonun ilerlemesine olanak tanır (30, 34). Dolayısıyla, pulpa vitalitesinin tamamen yitirildiği veya nekrozun tüm kanal sistemine yayıldığı durumlarda rezorptif sürecin ilerlemesi durur. Tedavi edilmediği takdirde progresyon gösteren bu yıkıcı süreç; zamanla kök yapısında perforasyonlara, dental dokunun mekanik direncinin azalmasına ve sonuç olarak dikey veya yatay kök kırıklarına yol açabilir (81).

Klinik bulgu ve semptomlar çoğunlukla lezyonun ileri evrelerinde fark edilir. İİKR bulunan dişler genellikle asemptomatiktir; ancak rezorptif lezyonun genişlemesi sırasında pulpa dokusunun kısmen canlılığını sürdürmesi nedeniyle geri dönüşümlü veya geri dönüşümsüz pulpitis ile uyumlu klinik belirtiler ortaya çıkabilir. İleri olgularda özellikle kök kanal sisteminin enfekte ve nekrotik hale geldiği durumlarda renk değişikliği, sinüs yolu/fistül, palpasyon ve/veya perküsyonda hassasiyet gibi periapikal periodontitise ait semptom ve/veya bulgular görülebilir (37).

2. *İnternal Replasman Rezorpsiyonu*

İnternal replasman rezorpsiyonu (İRR), pulpa ve dentin dokularının kemik benzeri sert bir doku ile yer değiştirmesiyle tanımlanan, oldukça nadir görülen bir durumdur. Başlangıçta meydana gelen dentin kaybını takiben, kök kanal boşluğu içerisinde mineralize doku birikimi izlenir. Bu süreç, pulpa veya kök kanalı içerisinde başlayarak kanal duvarları boyunca ilerler ve sementuma doğru devam eder (82). Etiyolojisi tam olarak bilinmemekle birlikte, genellikle diş travması, çürük lezyonları veya pulpayı etkileyen periodontal enfeksiyon öyküsü gibi faktörlerle ilişkili olduğu bildirilmiştir (83).

Histolojik olarak intraradiküler dentinin rezorpsiyonuna, dentin yerine kemik ya da sementi andıran metaplastik bir sert dokunun birikimi eşlik eder. Metaplazi, bir erişkin hücre tipinin (epitelyal veya mezenkimal) başka bir hücre tipine geri dönüşümlü olarak yer

değiştirmesiyle karakterize bir değişimi ifade eder (84). Bu bağlamda metaplastik doku, lameller görünümlü olup içerisinde kompakt kemiğin osteonlarını andıran şekilde osteosit benzeri hücrelerin hapsediği izlenir (75).

İİKR'nin bir varyantı olan ve literatürde "iç tünel rezorpsiyonu" olarak tanımlanan bu tablo; sıklıkla kök kırıklarının koronal fragmanlarında saptanmakla birlikte, lüksasyon yaralanmalarını takiben de gelişebilmektedir. Bu süreçte rezorpsiyon, kök kanalına komşu dentin dokusu içerisinde tünel benzeri bir morfolojiyle ilerlerken, eş zamanlı olarak bazı alanlarda kemik benzeri doku deposiyonu izlenir. Histomorfolojik olarak bu kemiksi oluşumlar; kompakt kemikten ziyade, trabeküler yapıda spongiyöz kemik özellikleri sergilemektedir. Patolojik sürecin stabilizasyonunu takiben, kök kanal boşluğunun spongiyöz kemik dokusu ile tamamen obliterasyonla kapanmasıyla sonuçlanan bir iyileşme paterni gözlenebilir (85).

2.2.2.5. İnternal Kök Rezorpsiyonunun Klinik Özellikleri

İKR'nin inflamatuvar ve replasman tipi klinik açıdan benzer özellikler gösterir. İKR'li dişler genellikle asemptomatiktir ve tesadüfi bir radyografik bulgu olarak tespit edilir (75). İKR ile ilişkili semptom ve klinik bulguların ortaya çıkışı; pulpanın anlık inflamatuvar durumu, sert doku yıkımının yaygınlığı ve lezyonun diş içerisindeki lokalizasyonuna bağlı olarak değişkenlik gösterir. Pulpanın kısmen vital kaldığı etkilenmiş dişlerin bakteriyel kontaminasyona maruz kalması durumunda, akut pulpitis ile uyumlu klinik semptomlar ve bulgular saptanabilir.

İleri evre İKR olgularında, pulpa dokusunun nekroze olması ve kanal sisteminin kronik enfeksiyonu sonucunda, tabloya akut veya kronik apikal periodontitis bulguları eklenir. Bu patolojik ilerleyişe bağlı olarak hastalar; perküsyonda hassasiyet, dişte gri/pembe renk değişikliği, intraoral apse formasyonu veya sinüs yolu (fistül) gibi şikayetlerle kliniğe başvurabilirler (75).

Kök kanalının koronal üçlüsünde lokalize olan İKR olgularında; sert doku yıkımının ardından bölgeye fibrovasküler granülasyon dokusunun invaze olması, kron üzerinde karakteristik bir pembe renklenme (pink spot) oluşmasına neden olabilir (86). Ancak bu fenomen, eksternal servikal rezorpsiyon ile benzer klinik görünüm sergileyebildiğinden hatalı teşhis riski taşımaktadır (29). Rezorpsiyonun başlangıç merkezini tayin etmede renk değişikliğinin lokalizasyonu ayırıcı bir kriterdir. İKR'de renklenme genellikle (çok köklü dişler istisna tutulmak kaydıyla) mesiodistal yönde dişin santral aksında (orta hattında)

izlenirken; ESR vakalarında bu alanın konumu mezial, santral veya distal yöne doğru asimetrik bir dağılım gösterebilir (4).

Progresif seyreden rezorpsiyonlar, zamanla dişin protetik veya restoratif yöntemlerle rehabilite edilemeyeceği düzeyde yaygın sert doku kaybına yol açabilmektedir. Bazı olgularda ise kanal duvarının perforasyonu sonucunda, kök kanal sistemi ile periodontal ligament arasında patolojik bir bağlantı (iletişim) gelişebilmektedir (87).

2.2.2.6. İnternal Kök Rezorpsiyonunun Radyolojik Özellikleri

İKR'nin tanısı temelde radyografik değerlendirmeye dayanır. Lezyonun radyografide güvenilir biçimde saptanabilmesi için pulpal dentin duvarında kayda değer miktarda rezorpsiyon gelişmiş olması gerekir. Enfeksiyonun kök kanalında hızla ilerleyerek tüm pulpanın nekrozuna yol açtığı olgularda ise rezorptif süreç erken dönemde sonlanabilir ve bu nedenle hem klinik hem de radyografik olarak fark edilmeyebilir (4). İKR tipik olarak, kök kanalının simetrik biçimde oval ya da dairesel şekilde genişlemesiyle uyumlu balonlaşma görünümü veren bir radyolüsensi şeklinde izlenir (88). İnternal replasman kök rezorpsiyonu ise genellikle düzensiz sınırlı bir radyolüsensi olarak ortaya çıkar; rezorptif defektin kenarlarında ve defekt içerisinde biriken kemik benzeri doku depozitlerine bağlı olarak benekli/bulutlu bir görünüm sergiler (75).

EKR ve İKR'nin iki boyutlu radyografilerde benzer görüntü özellikleri gösterebildiği ve bu nedenle birbirinden ayırt edilmesinin güçleşerek yanlış tanıya yol açabileceği iyi bilinmektedir (34). Bu nedenle, rezorpsiyonun niteliğini ayırt etmede paralaks tekniğinden yararlanılabilir (88). Buna göre, İKR defekti kök kanalına göre konumunu değiştirmez; buna karşılık ESR, ikinci paralaks radyografisinde aynı yönde ya da zıt yönde yer değiştirerek lezyonun sırasıyla kökün lingual/palatal veya bukkal dış yüzeyinde yer aldığını düşündürür. Çok köklü dişlerde ise bir kök kanalındaki İKR lezyonu, sağlam başka bir kök kanalının üzerine süperpoze olabilir; bu durum tanıda karışıklığa neden olarak lezyonun ESR şeklinde yanlış yorumlanmasına yol açabilir (75, 88).

Yüksek çözünürlüklü ve küçük görüş alanlı (FOV) KIBT, potansiyel olarak tedavi edilebilir görünen İKR lezyonlarının gerçek karakterini ve kapsamını ortaya koymak amacıyla önerilmektedir (89, 90). KIBT, İKR'yi ESR'den doğru biçimde ayırt etmenin yanı sıra, kök kanal duvarında perforasyon varlığı ve perforasyonun yaygınlığı gibi lezyonun niteliğine ilişkin unsurları da güvenilir şekilde ortaya koyar (91). Ayrıca birçok çalışma,

KIBT'nin konvansiyonel radyografilere kıyasla kök rezorpsiyonunun tanısal doğruluğunu artırdığını ve tedavi planlamasını belirgin biçimde iyileştirdiğini doğrulamıştır (92, 93).

2.2.2.7. İnternal Kök Rezorpsiyonunun Tedavi Prosedürleri

İnflamatuvar ve replasman tip İKR'nin yönetim prensipleri büyük ölçüde benzerdir; bu nedenle sert doku yıkımının yaygınlığının değerlendirilmesi için KIBT ile inceleme yapılması önemlidir (94). Tedavinin temel amacı, kök kanal sistemindeki bakterilerin uzaklaştırılması ve kanalın dezenfeksiyonunun sağlanmasının yanı sıra, rezorpsiyonun sürdürülmesinde rol oynayan apikaldeki rezidüel vital dokunun da elimine edilmesidir. Endodontik tedavi, ancak dişin restoratif olarak kurtarılabilir olduğu düşünülen olgularda gündeme alınmalıdır (3).

Kök kanalları, bakterilerin barınmasına elverişli karmaşık bir morfolojiye sahiptir. Endodontik tekniklerdeki ilerlemelere rağmen, enstrümanlar ve irrigasyon solüsyonları kanal boşluğunun dar ve erişimi kısıtlı bölgelerine her zaman öngörülebilir biçimde ulaşamamaktadır (95). İrrigantın ultrasonik yöntemlerle aktive edilmesinin, kök kanalın ulaşılamayan bölgelerinden nekrotik debris ve biyofilm uzaklaştırılmasını artırdığı gösterilmiştir (96). Mekanik preparasyonu takiben irrigantların ultrasonik aktivasyonu, kanal içindeki bakteri yükünü azaltabilmektedir (3). İKR lezyonlarının kemomekanik debridmana sınırlı erişilebilirliği göz önüne alındığında, irrigantların ultrasonik aktivasyonu internal rezorpsiyon defektinin dezenfeksiyonunda temel bir basamak olarak değerlendirilmelidir. Bununla birlikte, ultrasonik enstrüman kullanımına rağmen bazı erişimi kısıtlı bölgelerde bakterilerin kalabileceği de unutulmamalıdır (96).

Rezorpsiyon görülen bir dişte perforasyon saptanması durumunda, olası bir sodyum hipoklorit kazasını önlemek amacıyla irrigasyonun İKR lezyonunun koronal sınırı ile sınırlandırılması önerilir. Perforasyonun ileri düzeyde olduğu olgularda ise cerrahi olmayan ve cerrahi yöntemlerin birlikte uygulandığı kombine bir yaklaşım tercih edilmelidir (91).

Rezorpsiyon kavitesindeki granülasyon dokusunun manipülasyonu sırasında belirgin kanama görülebilir; ancak inflamasyonlu pulpa dokusu ile granülasyon dokusu tamamen uzaklaştırıldığında kanama genellikle kendiliğinden durur (96).

İKR defektleri, doğaları gereği yeterli şekilde obtüre edilmesi güç alanlar oluşturabilir. Rezorptif boşluğun tam olarak sızdırmaz biçimde kapatılabilmesi için obtürasyon materyalinin akışkan özellikte olması önemlidir. Bu amaçla genellikle

termoplastik dolum teknikleri tercih edilir (75). Sıcak vertikal kompaksiyon yönteminin, lateral kondensasyon ve Thermafil gibi taşıyıcı temelli tekniklere kıyasla daha etkili bir kök kanal dolgu tekniği olduğu gösterilmiştir (97, 98).

İKR defektinin kök kanal duvarında perforasyona yol açtığı klinik tablolarda; perforasyonun onarımı amacıyla Mineral Trioksit Agregat (MTA) ve Biodentine gibi biyouyumlu ve biyoaktif özellik sergileyen, hidrolik kalsiyum silikat esaslı simanların kullanımı önerilmektedir (99, 100). Bu materyallerin periradiküler dokular tarafından yüksek düzeyde tolere edilebildiği ve periodonsiyumun rejenerasyon kapasitesini desteklediği bildirilmiştir. Perforasyonun eşlik ettiği rezorptif vakalarda; defektin apikalinde kalan kanal bölümünün gütaperka (GP) ve pat ile standart yöntemle doldurulduğu, rezorptif kavitenin ise biyoaktif kalsiyum silikat simanı ile sızdırmaz bir şekilde kapatıldığı “hibrit kök kanal dolgu tekniği” en uygun tedavi yaklaşımı olarak kabul edilmektedir (101, 102).

İKR defektinin internal (ortograd) yaklaşımla onarılamadığı vakalarda cerrahi tedavi endikasyonu doğmaktadır. Cerrahi onarım öncesinde kök kanal sistemine erişim sağlanmalı; cerrahi prosedür esnasında kanalların debris veya onarım materyalleri ile istenmeden tıkanmasını önlemek amacıyla, kanallara uygun boyutlardaki GP konları yerleştirilerek kanal patensisi korunmalıdır. Perforasyonun cerrahi olarak açığa çıkarılması ve nekrotik/inflamatuvar dokuların debridmanını takiben, defektin biyoaktif hidrolik kalsiyum silikat esaslı simanlar ile obtüre edilmesi önerilmektedir (100). Materyal sertleşmesini tamamladıktan sonra kök kanal sistemi dezenfekte edilip şekillendirilmeli; ardından termoplastik GP veya GP ve biyoaktif materyallerin kombinasyonundan oluşan hibrit teknikler ile sızdırmaz bir şekilde doldurulmalıdır (3). Ancak internal rezorpsiyonun dişin yapısal bütünlüğünü ileri derecede bozduğu ve diş protetik veya restoratif yöntemlerle rehabilite edilemez hale getirdiği “terminal” olgularda, tek tedavi seçeneği diş çekimidir (75).

2.3. Kanal İçi Medikamentler

Apikal periodontitisin birincil etiyolojik faktörü, kök kanal sistemine invaze olan mikroorganizmalardır. Tedavi başarısı, bu mikroorganizmaların kanal boşluğundan öngörülebilir şekilde eliminasyonuna ve periapikal dokuların iyileşmesini sağlayacak biyolojik ortamın oluşturulmasına doğrudan bağlıdır (103–106). Nitekim literatürdeki çok sayıda çalışma; obtürasyon (kanal dolgusu) aşamasında enfeksiyonun devam ettiği dişlerdeki başarı oranının, mikroorganizma saptanmayan kanallara kıyasla istatistiksel

olarak anlamlı derecede düşük olduğunu göstermiştir (107). Ancak, karmaşık kök kanal anatomisi ve bakteriyel biyofilmin direnci nedeniyle, yalnızca mekanik enstrümantasyon ile tam dezenfeksiyonun sağlanması çoğu zaman mümkün değildir (106, 108). Bu bağlamda; mikroorganizmaların, toksik metabolik ürünlerinin ve rezidüel organik doku artıklarının inaktive edilerek uzaklaştırılması amacıyla kimyasal bir dezenfeksiyon protokolü uygulanması zorunludur. Kök kanal sisteminin kemomekanik debridmanında kullanılan bu kimyasal ajanlar; pratik ve klinik bir sınıflandırma ile “irrigasyon solüsyonları” ve “kanal içi medikamentler” olmak üzere iki ana başlık altında değerlendirilir (109).

Kök kanal tedavisinde, seanslar arasında kök kanal boşluğuna uygulanan; kanal içindeki mikroorganizmaların elimine edilmesi ve yeniden enfeksiyonun önlenmesi amacıyla antimikrobiyal etki gösteren ajanlar kanal içi medikament olarak tanımlanır (110). Ekstraradiküler enfeksiyonlar, geniş periradiküler lezyonlar ve karmaşık kök kanal anatomisi gibi faktörler, ulaşılması güç bölgelerde mikroorganizmaların barınmasına olanak tanıyarak endodontik enfeksiyonun sürmesine neden olabilir (111). Kanal içi medikament kullanımı, bakteri düzeylerinin yanı sıra proinflatuvar sitokinleri ve matriks metalloproteinazları azaltarak kök kanal dezenfeksiyonunu optimize eder (112). Ayrıca tedavi tamamlanmadan önce, apikal periodontitis bulgu ve semptomlarındaki gerilemeyi izlemeye olanak sağlayarak kısa dönem tedavi yanıtının klinik olarak değerlendirilmesine de yardımcı olur (113).

2.3.1. Kanal İçi Medikamentlerin Kullanım Amaçları

Kanal içi medikasyonun temel amacı; mekanik preparasyon ve irrigasyon prosedürleri sonrasında kök kanal sisteminin ulaşılması güç anatomik alanlarında (istmuslar, aksesuar kanallar ve dentin tübülleri) varlığını sürdüren mikrobiyal yükü ve toksik ürünleri elimine etmektir. Kök kanalına antimikrobiyal ve dezenfektan özellikli kimyasal ajanların uygulanması; mikroorganizmaların proliferasyonunu doğrudan baskılamakta veya tamamen elimine etmekte, bakteriyel endotoksinleri nötralize ederek biyolojik aktiviteyi durdurmakta ve ortam pH'sını modüle etmektedir. Bu farmakolojik müdahale; periapikal dokuların onarımı ve rejenerasyonu için biyolojik açıdan daha elverişli bir mikroçevre oluşturarak endodontik tedavinin başarısına kritik bir katkı sağlamaktadır (114, 115). Buna göre kanal içi medikamentin kullanım amaçları şunlardır:

- Kemo-mekanik preparasyon ile elimine edilemeyen kök kanal sistemi içindeki canlı kalmış bakterilerin azaltılması veya ortadan kaldırılması (116),

- Periapikal dokular ve/veya kalan pulpa dokusu kaynaklı inflamatuvar yanıtın baskılanmasına katkı sağlanması,
- Kanal içeriğinin biyolojik olarak daha inaktif hale getirilmesi ve doku artıkları ile toksik bileşenlerin etkisinin azaltılması,
- Mevcutsa inflamatuvar kök rezorpsiyonunun önlenmesi ya da durdurulması (117),
- Geçici restorasyon üzerinden gelişebilecek mikrosızıntıya karşı kanal içinde hem fiziksel hem kimyasal bariyer oluşturulması,
- Süregelen eksüdasyon nedeniyle ıslak kalan kanalların kurutulmasına yardımcı olunması (113).

Günümüzde seanslar arası medikasyonun tedavi etkinliğini artırabileceği kabul edilmekle birlikte, aynı zamanda iki seans arasında yeniden enfeksiyon riskini de yükseltebileceği belirtilmektedir (118). Enfekte olmayan kök kanallarına ilişkin klinik çalışmalar ve sistematik değerlendirmeler, periapikal kemik yoğunluğu, lezyon iyileşme oranı ve postoperatif ağrı gibi göstergeler esas alındığında tek seanslı ve çok seanslı kök kanal tedavileri arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark bulunmadığını göstermiştir (119–121). Bu nedenle enfekte olmayan kök kanallarında kanal içi medikament kullanımının önerilmediği ifade edilmektedir. Bununla birlikte, şiddetli kök kanal enfeksiyonlarının bulunduğu olgularda semptomların yönetimi, enfeksiyon kontrolü ve prognozun değerlendirilmesi amacıyla uygun medikamentlerin kullanılması hâlen önerilmektedir (122–125).

2.3.2. Kanal İçi Medikamentlerin Sınıflandırılması

Endodonti pratiğinde günümüze kadar çok sayıda kanal içi medikament denenmiş olsa da tüm klinik tablolarda tam öngörülebilir ve kesin bir terapötik başarı sağlayan “ideal” bir preparat henüz tanımlanamamıştır. Klinik uygulamada en sık başvuru alan medikamentler arasında; kalsiyum hidroksit, antibiyotik kombinasyonları, fenolik olmayan biyosidler, fenolik bileşikler ve iyot bazlı solüsyonlar yer almaktadır. Bu farmakolojik ajanların her birinin kendine özgü avantajları ve klinik sınırlılıkları mevcuttur. Karmaşık kök kanal enfeksiyonlarının yönetiminde, vakaya özel en uygun seçeneğin ve ideal uygulama protokollerinin tam olarak belirlenebilmesi için ileri düzey klinik araştırmalara gereksinim duyulmaktadır (126).

2.3.2.1. Antibiyotik Kombinasyonları

Bakteriler irrigantların ve mekanik temizliğin erişemediği kök kanal sisteminin bazı bölgelerinde varlığını sürdürebilirler. Bu nedenle kanal içi medikament içinde yer alan bir antibiyotiğin, canlı bakteri sayısını azaltabilmek için bu ulaşılması güç alanlara difüze olabilmesi gerekir (127). Bu amaçla antibiyotikler, endodontik tedaviye destek amacıyla lokal (kanal içerisine), sistemik ve profilaktik uygulamalar için kullanılabilir.

Günümüzde antibiyotik içeren ticari pat preparatları arasında en yaygın kullanılan iki ürün Ledermix patı (Lederle Pharmaceuticals, Almanya) ve Septomixine Forte patıdır (Septodont, Fransa). Bu preparatların her ikisi de antiinflamatuvar amaçla kortikosteroid içermektedir (126).

Kök kanal enfeksiyonlarının polimikrobiyal ve kompleks doğası, tek bir antibiyotik ajanı ile öngörülebilir bir dezenfeksiyon sağlanmasını güçleştirmektedir. Bu nedenle, antibakteriyel spektrumu genişletmek ve mikroorganizmaların direnç geliştirme riskini minimize etmek amacıyla antibiyotik kombinasyonlarının kullanımı tercih edilmektedir (128). Bu kapsamda; metronidazol, minosiklin ve siprofloksasin bileşenlerinden oluşan üçlü antibiyotik patı (ÜAP), yüksek antimikrobiyal etkinliği nedeniyle özellikle rejeneratif endodontik prosedürlerde oldukça etkilidir (129, 130). ÜAP kullanımının en belirgin klinik dezavantajı, içeriğindeki minosiklinin dentin yapısındaki kalsiyum ile şelasyon yaparak diş dokularında şiddetli renklenmeye yol açabilmesidir. Bu estetik riski bertaraf etmek amacıyla, minosiklinin formülasyondan çıkarıldığı ve yalnızca siprofloksasin ile metronidazol içeren ikili antibiyotik patı, etkili bir alternatif yaklaşım olarak literatürde yerini almıştır (131).

2.3.2.2. Fenolik Olmayan Biyosidler

Biyosidler, çok çeşitli mikroorganizmaları inaktive edebilen, birbirinden farklı kimyasal ajanları kapsayan geniş bir gruptur. Yaygın biyosid örnekleri arasında alkoller (örn. etanol), aldehitler (örn. formaldehit, glutaraldehit), biguanidler (örn. klorheksidin [CHX]), kuaterner amonyum bileşikler, çinko ve esansiyel yağlar ile fenileterleri (örn. triklosan) içeren fenolik bileşikler yer alır (132).

CHX; aerob ve anaerob mikroorganizmalara ve ayrıca *Candida* türlerine karşı görece geniş bir etki spektrumuna sahiptir. Asidik pH'ya kıyasla alkali pH'da daha etkilidir. CHX, düşük konsantrasyonlarda genellikle bakteriyostatik etki gösterirken, daha yüksek konsantrasyonlarda sitoplazmanın çökmesi ve/veya koagülasyonu (muhtemelen protein

çapraz bağlanmasına bağlı) nedeniyle bakterisidal etki ortaya çıkarır (133). CHX'nin ayırt edici bir özelliği, dentinle temas ettikten sonra antimikrobiyal kalıcılık (substantivite) kazandırabilmesidir (134). Bu substantivitenin elde edilebilmesi için, dentinin CHX ile doygunluğa ulaşmasına izin verecek şekilde uzamış etkileşim gereklidir. Bu nedenle CHX'nin yalnızca irrigant olarak kullanılmasından ziyade, seanslar arasında en az 7 gün süreyle kanal içi medikament olarak uygulanması önerilmektedir (135).

2.3.2.3. Fenolik Biyosidler

Bu medikamentler; antimikrobiyal etkinliğin medikamentin buharlaşması yoluyla iletildiği varsayımına dayanır (136). Örneğin kamforlu monoklorofenol gibi endodontik medikamentlerde amaç, oluşan buharların difüzyonla kök kanal sistemi boyunca yayılması ve kemomekanik enstrümantasyon ile irrigasyon sonrasında kanalda kalmış mikroorganizmalarla temas etmesidir (137). Pulpa odasına yerleştirilen bir pamuk pelet ile ya da kök kanalına yerleştirilen bir kâğıt kon ile uygulanır.

Bu yaklaşımda kökün apikal bölümünde ve dentin tübülleri içinde ortaya çıkan antimikrobiyal etki, büyük ölçüde medikamentin uçuculuğuna bağlıdır. Dolayısıyla ajan, buhar fazına geçebilmeli ve kök kanal sisteminin tamamına penetre olarak mikroorganizmalarla doğrudan temas kurabilmelidir (126).

2.3.2.4. İyot Bileşikleri

İyot; bakterilere, mantarlara, tüberküloz basiline, virüslere ve sporlara karşı hızlı öldürücü etki gösterir. İyot solüsyonları stabil değildir ve antimikrobiyal etkinliğin büyük ölçüde moleküler iyot (I_2) tarafından sağlandığı kabul edilmektedir. İyodoforlar (iyot taşıyıcıları), iyot ile çözücü bir taşıyıcıdan oluşan komplekslerdir ve aktif serbest iyot için bir rezervuar görevi görür (138). Endodontide %2 iyot–potasyum iyodür (IPI) preparatının kullanımı bildirilmiş olup; bu preparatın formokrezol, CMCP ve krezatine kıyasla daha düşük toksisiteye ve daha az doku irritasyonuna sahip olduğu gösterilmiştir (139). İnsan dişlerinde yapılan çalışmalarda %2 IPI uygulanan kök kanallarında, dentin tübüllerinde *E. faecium* üremesini engellemek için 1–2 saatlik bir süre gerektiği; buna karşılık CH uygulanan örneklerde 24 saat sonra dahi kültür pozitifliğinin devam edebildiği bildirilmiştir (140).

2.3.2.5. Kalsiyum Hidroksit Bileşikleri

CH, 1920'lerden bu yana diş hekimliğinde yaygın biçimde kullanılmaktadır ve günümüzde de en sık tercih edilen endodontik medikament olma özelliğini sürdürmektedir (141). Beyaz renkli, kokusuz, 12.5–12.8 gibi yüksek bir pH'ya sahip ve kristal yapıda bir toz olan CH, suda oldukça düşük bir çözünürlüğe sahipken alkolde çözünme özelliği yoktur (116, 142). Bu düşük çözünürlük özelliği, materyalin vital dokulardan gelen doku sıvılarıyla doğrudan temas ettiğinde yavaş bir ayrışma göstermesini sağlayarak, klinik açıdan avantajlı bir tablo oluşturur. Bu sayede hidroksil iyonlarının salınımı uzun bir süreye yayılır ve terapötik etkinin sürekliliği korunmuş olur (136).

Kimyasal olarak güçlü baz sınıfında yer alan bu materyalin başlıca etkileri, Ca^{2+} ve hidroksil (OH^-) iyonlarına ayrışması ve bu iyonların vital dokular üzerindeki etkileri ile ilişkilidir. Bu mekanizma, sert doku oluşumunun indüklenmesi ve antibakteriyel aktivitenin de temelini oluşturmaktadır (116). CH'nin antimikrobiyal etkinliği, sulu ortamda OH^- salınımına bağlıdır (143). OH^- iyonları çeşitli biyomoleküllerle son derece hızlı reaksiyona girebilen güçlü oksidan serbest radikaller olarak tanımlanmaktadır. OH^- iyonlarının bakteriyel hücreler üzerindeki öldürücü etkisinin başlıca şu mekanizmalar üzerinden gerçekleştiği düşünülmektedir (116):

- Bakteriyel sitoplazmik membranın hasarlanması
- Proteinlerin denatürasyonu
- DNA'nın zarar görmesi

CH'nin ayrışması sonucu açığa çıkan yüksek alkalin pH; mikroorganizmaların enzim aktivitelerini inhibe ederek hücresel metabolizmalarını ve yapısal proteinlerini geri dönüşümsüz olarak olumsuz etkiler. Serbest kalan hidroksil iyonları, dentin tübülleri boyunca periferik yönde difüze olarak, dentinin derin katmanlarındaki pH değerini yaklaşık 9.0 düzeyine yükseltebilmektedir. Literatürde bu etki “trans-dentinal medikasyon” olarak tanımlanmıştır (144). Söz konusu mekanizmanın, dentin tübüllerinin derinliklerinde yer alan bakteriyel rezervuarların kontrol altına alınmasında klinik açıdan kritik bir önem taşıdığı öngörülmektedir. CH, kanalı dolduran fiziksel bir bariyer işlevi görerek rezidüel mikroorganizmaların proliferasyonunu mekanik olarak sınırlar ve olası bir koronal sızıntı durumunda kök kanal sisteminin yeniden enfeksiyon riskini minimize eder (116). Antimikrobiyal etkisinin yanı sıra, organik doku artıklarını tek başına çözebilme

kapasitesine sahiptir. Ayrıca, sodyum hipoklorit (NaOCl) irrigasyonu öncesinde nekrotik dokuları hidrolize ederek “ön işlem” işlevi görür; bu durum NaOCl’nin doku çözme etkinliğini sinerjik bir şekilde artırmaktadır (145).

Tüm gram-negatif bakterilerin hücre duvarının bir parçası olan endotoksin, çoğalma veya bakteri ölümü sırasında salınarak bir dizi biyolojik etkiye neden olur, bu da inflamatuvar bir reaksiyona ve periapikal kemik rezorpsiyonuna yol açar (146–148). Kronik periapikal lezyonlu dişlerde, gram-negatif anaerob bakterilerin kök kanal sistemi boyunca daha yaygın biçimde bulunduğu ve apikal bölgede bakteriyel biyofilm varlığının da eşlik edebildiği bildirilmiştir. Bu alanlara enstrümantasyonla etkili şekilde erişilemediğinden, söz konusu bakterilerin eliminasyonunu desteklemek ve klinik başarı olasılığını artırmak amacıyla kanal içi medikament kullanımı önerilmektedir (149, 150). Laboratuvar koşullarında Safavi ve Nichols, CH’nin bakteriyel lipopolisakkarit (LPS) üzerindeki etkisini incelemiş ve endotoksinin zararlı etkilerinden büyük ölçüde sorumlu olan lipid A molekülünü hidrolize ettiğini bildirmiştir (151). Aynı araştırma grubunun bir sonraki çalışmasında CH’nin, lipid A’yı toksik olmayan yağ asitleri ve amino şekerlere dönüştürdüğü bildirilmiştir (152). Bu bulgular, daha sonra yapılan in vitro çalışmalarla da desteklenmiş olup, CH’nin bakteriyel LPS’yi detoksifiye edebildiği rapor edilmiştir (148, 153).

CH’nin tek başına kuru toz formda kanala uygulanması pratik olarak güç olduğundan, sıvı bir taşıyıcı ile karıştırılarak kullanılması önerilir. Ayrıca OH⁻ iyonlarının salınımı için sıvı fazın varlığı gereklidir. Bu taşıyıcılar temelde üç ana grupta sınıflandırılır (154):

1. Suda çözünebilen taşıyıcılar: su, serum fizyolojik, lokal anestezik solüsyonlar, karboksimetilselüloz, metilselüloz ve Ringer solüsyonu.
2. Visköz taşıyıcılar: gliserin, polietilen glikol (PEG) ve propilen glikol.
3. Yağ bazlı taşıyıcılar: zeytinyağı, silikon yağı, kafur (kamforlu paraklorofenolün yağı), bazı yağ asitleri (oleik, linoleik ve izostearik asitler dâhil), öjenol ve metakresilasetat.

CH patlarının hazırlanmasında kullanılan sulu taşıyıcılar, iyonların hızlı ve etkin bir şekilde serbestleşmesini destekledikleri için kısa süreli tedavilerde öncelikli olarak tercih edilmelidir. Buna karşın, yağ bazlı (viskoz) taşıyıcıların klinik kullanım alanı oldukça

sınırlıdır. Bu materyallerin kök kanalından uzaklaştırılmalarının güç olması ve kalıcı kanal dolgu materyallerinin dentin duvarına adezyonunu olumsuz etkilemesi nedeniyle kullanımları genel olarak önerilmemektedir.

Günümüzde, endodontik medikamentlerde en sık başvurulanan taşıyıcılardan biri olan PEG; düşük sistemik toksisitesi, sulu ortamlardaki yüksek çözünürlüğü, düşük immünojenisitesi ve minimal antijenik özellikleri sayesinde ideal bir farmakolojik profil sergilemektedir. PEG bazlı taşıyıcılar, hem iyon salınım hızını dengede tutmakta hem de materyalin kanala uygulanabilirliğini kolaylaştırmaktadır (126).

2.3.2.6. Biyoseramik (Kalsiyum Silikat) Esaslı Medikamentler

Biyoseramik materyaller, tıp ve diş hekimliği alanlarında onarım ve rekonstrüksiyon amacıyla geliştirilmiş materyal grubunu temsil eder (155). Söz konusu materyallerin biyouyumlulukları oldukça yüksek olup, diş sert dokularıyla kimyasal bağ oluşturabilmeleri ve nemli ortam koşullarında dahi fiziksel özelliklerini yitirmeden etkin şekilde uygulanabilmeleri, bu ajanların en önemli klinik avantajlarından. Ayrıca, dentin duvarına sağladıkları üstün marjinal adaptasyon sayesinde sızdırmaz bir bariyer oluşturdukları ve yüksek radyopasite değerleri ile radyografik takip ve klinik değerlendirmeyi kolaylaştırdıkları bildirilmektedir (156).

Biyoseramik endodontik materyaller, dentin ile etkileşime girerek nem varlığında mineralize bir ara tabaka oluşturabilmeleri nedeniyle biyoaktif özellikleriyle öne çıkmaktadır (156, 157). Bunun yanı sıra, konak hücre yanıtını modüle ederek kemik iyileşmesini destekledikleri, özellikle periapikal onarımda etkin rol alan osteoblastların yaşamını sürdürmesi ve farklılaşmasını teşvik ettikleri bildirilmiştir (158). Bu biyolojik etki, sonuçta mineralize doku oluşumunu mümkün kılmaktadır (159).

Buna paralel olarak, güncel endodonti literatüründe biyoaktif kalsiyum silikat temelli yeni materyallerin geliştirilmesine yönelik ilgi giderek artmaktadır (160). Biyoseramik materyallerin sergilediği üstün biyouyumluluk ve biyoaktivite potansiyelleri göz önünde bulundurularak, son yıllarda kalsiyum silikat esaslı kanal içi medikamentler klinik kullanıma sunulmuştur (161).

Bio-C Temp (Angelus, Londrina, PR, Brezilya), 2020 yılında kullanıma hazır şırınga formunda geliştirilmiştir. Pat formundaki bu materyal; ana yapısını oluşturan kalsiyum silikatlara ek olarak, kalsiyum tungstat ve titanyum oksit gibi radyopasite sağlayan bileşenleri içermektedir. Ayrıca formülünde yer alan kalsiyum alüminat ve kalsiyum oksit gibi maddelerin yanı sıra, materyalin kanal içerisinde erkenden hidrasyona uğramasını ve sertleşmesini engelleyen özel bir baz reçine ihtiva etmektedir (162). Üreticiye göre, bu materyal yüksek alkaliliğe ($\text{pH} = 12 \pm 1$) ve ISO 6876 standardına uygun yüksek radyopaklığa ($\geq 9 \text{ mm Al}$) sahiptir (163).

Bio-C Temp, nekrotik dişlerin tedavisinde, eksternal ve internal rezorpsiyon olgularında, kök gelişimi tamamlanmamış dişlerde, endodontik yeniden tedavi gerektiren vakalarda ve perforasyon tedavisinde kanal içi medikament materyali olarak kullanılmaktadır. Ayrıca Bio-C Temp'in, kalsifiye bir bariyer oluşumunun indüklenmesi amacıyla pulpotomi olgularında ve rejeneratif endodontik prosedürlerde kullanımı da önerilmektedir (163, 164).

Sertleşmeme özelliğinin klinik açıdan önemi, bu malzemenin pat kıvamını koruyarak geçici amaçla kullanılabilmesi ve kök kanalından CH patlarının uzaklaştırılmasında kullanılan protokollere benzer yöntemlerle çıkarılabilmesidir. Bununla birlikte, Bio-C Temp'in kök kanallarından uzaklaştırılmasına ilişkin literatürde sınırlı sayıda çalışma vardır (165–169). Mevcut çalışmaların bir kısmında, Bio-C Temp'in uzaklaştırılabilirliğinin CH ile benzer düzeyde olduğu bildirilmiştir (166, 167, 169). Buna karşın, Sarıyılmaz ve ark., Bio-C Temp'in kök kanalından uzaklaştırılmasının CH ve Ledermix medikamentlerine kıyasla daha zor olduğunu rapor etmiştir (165).

Bio-C Temp'in seyreltilmiş ekstraktlarının fibroblastlar, insan dental pulpa hücreleri (hDPCs) ve Saos-2 hücreleri üzerine uygulanması, materyalin sitotoksik olmadığını göstermiş; ayrıca osteojenik potansiyel taşıyabileceği de ileri sürülmüştür (160, 163, 164).

Edanami ve ark., apeksifikasyonda apikal sert doku bariyerinin oluşumuna katkı sağlayan mekanizmalardan birinin, intrakanal medikamentlerin çevre bağ dokusunda kalsiyum tuzu çökmesi oluşturabilmesi olduğunu vurgulayarak, kullanıma hazır ve kanalda sertleşmeyen kalsiyum silikat esaslı kanal içi medikament Bio-C Temp'in apeksifikasyonda CH patlarına alternatif olarak kullanılabilirliğini in vivo modelde

incelemiştir. Bio-C Temp'in CH patlarına benzer biçimde mineralize çökelti oluşturabildiğini ve bu sonuç çerçevesinde Bio-C Temp'in apeksifikasyonda apikal sert doku oluşumunu destekleyebileceği sonucuna varmışlardır (170).

Ferigolo ve ark. (2026), Bio-C Temp'in kök dentini üzerindeki etkisini değerlendirdikleri in vitro çalışmada, materyalin kısa süreli kullanımında (7–30 gün) kırılma direnci açısından belirgin bir olumsuzluk saptamazken, 90 günlük temasın köklerin kırılma direncini anlamlı düzeyde azalttığını bildirmiştir. Yazarlar, uzun süreli maruziyetin dentin yapısında değişikliklere yol açabileceğini ve bu nedenle Bio-C Temp'in uzun dönem kanalda bırakılmasının klinik açıdan dikkatle değerlendirilmesi gerektiğini vurgulamıştır (171).

2.3.3. Kanal İçi Medikamentlerin Kök Kanalından Uzaklaştırılması

Kök kanal sistemine yerleştirilen kanal içi medikamentlerin, nihai obtürasyon öncesinde biyolojik ve mekanik nedenlerle tamamen uzaklaştırılması gerekir. Yapılan in vitro çalışmalar; dentin duvarlarında kalan medikament rezidülerinin, kanal patlarının dentin tübüllerine penetrasyonunu fiziksel olarak engelleyebildiğini ve özellikle rezin esaslı patların dentin yüzeyine olan adezyonunu anlamlı derecede azalttığını göstermektedir (5–7). Buna ek olarak, kök kanal sisteminden tam olarak uzaklaştırılamayan intrakanal medikamentlerin zamanla kademeli olarak çözünmesi; kök kanal dolgu materyali ile dentin duvarları arasında mikroboşluklar oluşmasına neden olmaktadır. Bu yapısal defektler, apikal sızıntı miktarını artırmanın yanı sıra bakteriyel re-kolonizasyon için uygun bir mikroçevre hazırlayabilmektedir (172, 173). Bu nedenlerle hem biyokimyasal etkileşimleri önlemek hem de kök kanal dolgusunun uzun dönemli stabilitesini ve hermetik sızdırmazlığını sağlamak amacıyla medikamentin obtürasyon öncesinde kanaldan eksiksiz biçimde uzaklaştırılması hayati önem taşımaktadır. Bu kapsamda, literatürde kanal içi medikamentlerin eliminasyon etkinliği, kullanılan kimyasal ajanların özellikleri, konsantrasyonları ve bu ajanların çeşitli aktivasyon protokolleri ile kombinasyonlarının incelenmesi, hâlen güncelliğini koruyan araştırma konuları arasında yer almaktadır.

2.3.4. Kanal İçi Medikamentlerin Kök Kanalından Uzaklaştırılmasında Kullanılan İrrigasyon Solüsyonları

Kök kanal sistemindeki mikroorganizmaların eliminasyonu açısından irrigasyon süreci, endodontik tedavinin en kritik basamaklarından biri olarak kabul edilmektedir.

İrrigantların büyük bir bölümü, organik veya inorganik bileşenler üzerinde güçlü doku çözme kapasitesine ve mikroorganizmalar ile mayalar üzerinde doğrudan litik etki gösteren antimikrobiyal özelliklere sahiptir (174). Kemomekanik hazırlık sırasında ve sonrasında uygulanan irrigasyon solüsyonları; enfeksiyon etkenlerinin uzaklaştırılmasının yanı sıra nekrotik ve inflamasyonlu yumuşak dokular ile dentin debrislerinin kanal boşluğundan debridmanını sağlar (175). Ayrıca etkin bir irrigasyon protokolü; sert ve yumuşak doku artıklarının apikal bölgede sıkışmasını önleyerek, planktonik veya biyofilm hâlindeki bakterilerin periapikal dokulara ekstrüzyon riskini de minimize eder (176).

İdeal bir irrigasyon solüsyonu, aşağıdaki özelliklere sahip olmalıdır:

- ✓ Organik ve inorganik materyali çözmeli,
- ✓ Planktonik mikroorganizmaları elimine etmeli,
- ✓ Biyofilm içindeki mikroorganizmaları elimine etmeli,
- ✓ Biyofilmin yüzeyden ayrılmasını sağlamalı,
- ✓ Kök kanal sistemi içerisinde iyi penetrasyon göstermeli,
- ✓ Enstrümanların dentini kesme etkinliğini arttırmalı,
- ✓ Dentini zayıflatmamalı,
- ✓ Sürtünmeyi azaltmalı,
- ✓ Periapikal dokular için toksik olmamalı,
- ✓ Diğer dental materyallerle olumsuz reaksiyona girmemeli,
- ✓ Alerjik reaksiyon oluşturmamalı,
- ✓ Maliyeti düşük olmalıdır.

Ancak, günümüzde kullanılan hiçbir irrigasyon solüsyonu tam olarak bu özelliklerin hepsini karşılayamamaktadır.

Kanal içi medikamentlerin kök kanal sisteminden eliminasyonu; farklı kimyasal kompozisyona sahip irrigasyon solüsyonlarının ve çeşitli uygulama tekniklerinin etkinliği üzerinden pek çok araştırmaya konu olmuştur. Bu amaçla; mekanik yıkama sağlayan serum fizyolojik, organik doku çözücü ve antimikrobiyal etkili olan NaOCl ile inorganik bileşenleri ve kalsiyum bazlı artıkları uzaklaştırmak amacıyla kullanılan etilendiamintetraasetik asit (EDTA), maleik asit ve sitrik asit (SA) gibi şelatör ajanlar literatürde sıklıkla tercih

edilmektedir. Güncel protokoller, bu solüsyonların ardışık kullanımını içeren çeşitli kombinasyonların temizleme kapasitesine odaklanmıştır (177, 178).

2.3.4.1. Sodyum Hipoklorit

NaOCl, endodontide en yaygın olarak kullanılan irrigasyon solüsyonudur (179, 180). NaOCl suda iyonize olarak Na^+ ve hipoklorit iyonunu (OCl^-) oluşturur ve hipokloröz asit (HOCl) ile bir denge sistemi meydana getirir. Asidik ve nötr pH koşullarında klor çoğunlukla HOCl formunda bulunurken, pH'nın 9 ve üzerine çıktığı alkali ortamda OCl^- formu baskın hale gelir (181). Antibakteriyel etkinlikten esas olarak HOCl sorumludur; çünkü OCl^- iyonunun etkinliği, iyonize olmamış HOCl 'ye kıyasla daha düşüktür. Hipokloröz asit, mikrobiyal hücrenin yaşamsal fonksiyonlarının birden fazlasını bozarak hücre ölümüne yol açar (182, 183).

NaOCl, dentinin başlıca organik bileşenleri olan pulpa artıkları ile kollajeni etkin biçimde çözer (184). Bu nedenle, klinik kullanımda yer alan kök kanal irrigantları içinde nekrotik ve vital organik dokuyu çözebilen tek solüsyonun hipoklorit olduğu kabul edilmektedir (175). Ancak, NaOCl tek başına smear tabakasını uzaklaştıramaz. Smear tabakasının sadece organik kısmına etki eder ve EDTA veya SA gibi şelatörlerle birlikte kullanıldığında smear tabakasının tam olarak uzaklaştırılmasına zemin hazırlar (185–187).

NaOCl, endodontide genellikle %0.5–%6 aralığındaki konsantrasyonlarda kullanılmakta olup, hangi konsantrasyonun tercih edilmesi gerektiği konusunda literatürde kesin bir görüş birliği bulunmamaktadır (188). Bazı in vitro çalışmalar, daha yüksek konsantrasyonlardaki NaOCl'nin *Enterococcus faecalis* ve *Candida albicans*'a karşı daha etkili olabileceğini bildirmiştir (185, 189, 190). Buna karşılık klinik çalışmalar, düşük ve yüksek konsantrasyonların kök kanal sistemindeki bakteriyel yükü azaltmada benzer etkinlik gösterebildiğini ortaya koymuştur (106, 191). NaOCl'nin antibakteriyel etkinliğine ilişkin bulgular arasındaki farklılıkların önemli bir kısmının metodolojik değişkenlerden kaynaklandığı düşünülmektedir. Bazı çalışmalarda düşük konsantrasyonlarda dahi mikroorganizmaların saniyeler içinde elimine edildiği bildirilirken, diğerlerinde aynı türler için daha uzun temas süreleri rapor edilmiştir (185, 189, 190, 192). Bu farklılıkları açıklayan temel etkenlerden biri, eliminasyon deneyleri sırasında organik materyal varlığının NaOCl'nin etkinliğini belirgin biçimde azaltmasıdır. İn vivo koşullarda inflamatuvar eksüda,

doku artıkları ve mikrobiyal biyokütle gibi faktörler NaOCl'yi tüketerek aktivitesini düşürebilmektedir. Ayrıca organik madde miktarının standartlaştırılmaması ve kültür pH'sının kontrol edilmemesi sonuçları etkileyebilmektedir. Bu yanıltıcı etkenler elimine edildiğinde, NaOCl'nin %0.1'in altındaki konsantrasyonlarda dahi hedef mikroorganizmaları hızlı biçimde elimine edebildiği gösterilmiştir (192, 193). Dentin varlığının NaOCl etkinliği üzerindeki inhibitör etkisi üzerine çalışan Haapasalo ve ark., %1'lik NaOCl konsantrasyonunun *Enterococcus faecalis* eliminasyonu için gereken sürenin dentin varlığında anlamlı derecede arttığını rapor etmişlerdir (194).

Yüksek konsantrasyonlu NaOCl'nin doku çözme kapasitesi daha iyi olmakla birlikte, düşük konsantrasyonların yüksek hacimde ve uygun şekilde kullanılması durumunda benzer düzeyde etkinlik sağlanabileceği de bildirilmiştir (179, 195). Öte yandan, yüksek konsantrasyonlu NaOCl'nin toksisitesi, düşük konsantrasyonlara göre daha fazladır (196). Bu durum, kanal içi irrigasyonda daha düşük konsantrasyonların tercih edilmesi halinde, düşük konsantrasyonun olası sınırlılıklarını dengelemek amacıyla solüsyonun daha yüksek hacimde ve daha sık aralıklarla uygulanması yönündeki öneriyi desteklemektedir (179).

NaOCl'nin başlıca dezavantajları arasında; smear tabakasını tek başına uzaklaştıramaması, yüksek konsantrasyonlarda kullanıldığında toksik olması, kötü kokusu ve tadı yer alır (196). Aynı zamanda NaOCl'nin in vivo performansının, in vitro bulgulara kıyasla daha düşük olduğu bildirilmektedir. Bu durumun nedenleri arasında; irrigantın finler, kanallar arası anastomozlar, ana kanalın apikal bölümü, lateral kanallar ve dentin tübülleri gibi kök kanal sisteminin en periferik alanlarına yeterli düzeyde penetre olamaması yer almaktadır. Buna ek olarak, periapikal bölgeden gelen eksüda, pulpa dokusu, dentin kollajeni ve mikrobiyal biyokütle gibi NaOCl'yi inaktive edebilen maddelerin varlığının da solüsyonun etkinliğini azalttığı düşünülmektedir (194).

NaOCl güçlü bir dezenfektan olmakla birlikte, CH'nin uzaklaştırılmasında serum fizyolojik gibi tek başına yetersizdir. Silva ve ark., çeşitli irrigasyon solüsyonlarının CH'nin uzaklaştırılma etkinliğini değerlendirdikleri bir çalışmada %2.5 NaOCl'nin diğer gruplara göre anlamlı derecede daha kötü sonuçlar verdiğini rapor etmiştir (197). Bu nedenle EDTA benzeri bir şelatlayıcı ajan ile birlikte kullanılması gereklidir (177). Calt ve Serper, EDTA irrigasyonunu takiben NaOCl uygulanmasının, yalnızca NaOCl kullanımına kıyasla kök kanallarından CH'nin tamamen uzaklaştırılmasını sağladığını bildirmiştir (7). Buna karşılık,

aynı irrigasyon protokolünü (EDTA + NaOCl) değerlendiren diğer araştırmacılar bu bulguyu desteklememiş, CH kalıntılarının hafiften yaygına değişen düzeylerde kök kanallarında kalabildiğini rapor etmiştir (198, 199).

2.3.4.2. EDTA

Dentin, pulpa artıkları ve enstrümantasyon sonrasında kök kanalları içinde oluşan smear tabakası, endodontik irrigantların antibakteriyel etkinliğini olumsuz yönde etkilemektedir (200). Bu bileşenler; bakteriyel metabolizma için substrat oluşturarak, irrigantların optimal difüzyonunu engelleyerek, koronal ve apikal sızdırmazlığı zayıflatarak ve yeniden kontaminasyon için bir yol sağlayarak tedavi başarısını düşürmektedir (201). Bu nedenle enfekte bir kök kanalında yeterli antibakteriyel etkiyi sağlamak için kullanılan irrigantın, smear tabakasına nüfuz edebilmesi ya da bu tabakayı uzaklaştırabilmesi gerekir (200). NaOCl, yalnızca organik bileşenler üzerinde etkili olduğundan, smear tabakası ve dentin debrislerinin tamamen uzaklaştırılabilmesi için ek ajanlara ihtiyaç vardır. Bu nedenle, EDTA ve SA gibi şelasyon ajanları, hidroksiapatit dâhil olmak üzere inorganik materyali etkin biçimde çözen ajanlar olarak kullanılmaktadır (202–204).

EDTA, güçlü, renksiz, suda çözünebilen bir şelatlayıcı ajan olan bir poliaminokarboksilik asittir ve Ca^{2+} ve Fe^{3+} gibi di ve tri katyonik metal iyonlarını tutma yeteneğine sahiptir (174). EDTA solüsyonu nötr ya da hafif alkali (7–8) özellik gösterir; asidik pH koşullarında ise çökelme eğilimi vardır. EDTA, dentindeki kalsiyum iyonlarıyla reaksiyona girer ve çözünebilir kalsiyum şelatları oluşturarak dentini demineralize eder. EDTA'nın 5 dakika içinde dentini 20–30 µm derinliğe kadar dekalsifiye ettiği bildirilmiştir (205).

Klinik uygulamada genellikle %15 veya %17'lik konsantrasyonlarda tercih edilmekle birlikte, bazı çalışmalar smear tabakasının uzaklaştırılmasında %5 ve hatta %1'lik konsantrasyonların dahi yeterli olabileceğini bildirmektedir (204). Yakın tarihli bir sistematik incelemede, %17 EDTA'nın 1 dakika süreyle %2.5 NaOCl ile birlikte kullanımının, smear tabakasını anlamlı düzeyde uzaklaştırıldığını rapor etmişlerdir (206). Ayrıca araştırmacılar, EDTA'ya maruziyet süresinin bir dakikanın üzerine çıkarılmasının ve/veya NaOCl konsantrasyonunun %2.5'in üzerine yükseltilmesinin dentin tübüllerinde erozyona yol açtığını bildirmişlerdir (207, 208).

EDTA, smear tabakasının inorganik bileşenlerini çözerek etki gösterdiğinden, organik artıkların uzaklaştırılmasını sağlamak amacıyla NaOCl (%0.5–%5.25) ile birlikte kullanılması önerilmektedir (209–213). Bu irrigantların tek başına kullanımına kıyasla kombine kullanımıyla hem temizleyici etkinliğin hem de antimikrobiyal etkinin daha yüksek olduğu bildirilmiştir (210, 211, 214). Bununla birlikte, NaOCl varlığında EDTA'nın kalsiyumu şelatlama kapasitesini koruduğu; ancak NaOCl'nin doku çözme etkinliğinin azaldığı gösterilmiştir. EDTA'nın NaOCl solüsyonuna eklenmesiyle kullanılabilir klor düzeyinin %0.50'den %0.06'ya belirgin biçimde düştüğü; buna rağmen *Candida albicans* ve *Enterococcus faecalis*'e karşı antibakteriyel etkinliğin, %8.5 EDTA ile %17 EDTA/%1 NaOCl kombinasyonu arasında benzer olduğu rapor edilmiştir. Araştırmacılar bu bulgular doğrultusunda, iki solüsyonun birbirine karıştırılmadan ayrı ayrı kullanılmasının daha uygun olacağı sonucuna varmıştır (215).

EDTA, kök kanallarından CH'yi uzaklaştırmak için kullanılan en yaygın ve etkili şelatlayıcı ajanlardan biridir (216). Bu kapsamda Suresh ve ark.'nın laboratuvar çalışmalarını içeren sistematik derlemesinde, EDTA başta olmak üzere kalsiyum şelatörlerinin, NaOCl/serum fizyolojik gibi şelatör olmayan irrigantlara kıyasla CH'yi uzaklaştırılmasında genel olarak üstün sonuçlar sağladığı bildirilmiştir. Ayrıca, şelatlayıcı ajanların CH'yi uzaklaştırılmasını belirgin ölçüde artırmasının, su veya diğer taşıyıcıların varlığında kalsiyumu bağlayabilmeleri ve böylece medikamentin çözünmesini/dağılmasını kolaylaştırarak kanaldan uzaklaştırılmasını artırmalarıyla açıklanmıştır (217).

2.3.4.3. Sitrik Asit

Sitrik asit (SA), yeni ataşman tedavisinde hastalıklı kök yüzeylerinin detoksifikasyonu ve intrinsik kollajen liflerin açığa çıkarılması amacıyla kullanılan trikarboksilik bir asit olup, biyomekanik preparasyon sırasında smear tabakasının uzaklaştırılmasına da yardımcı olmaktadır (218).

SA, farklı konsantrasyonlara bağlı olarak pH değerleri 0.8 ile 1.9 arasında değişen zayıf bir asittir. SA farklı konsantrasyonlarda (yaklaşık %1–%50 aralığında) ticari olarak sunulmakta ve kullanılmaktadır; bu ajan için klinikte en sık tercih edilen form %10'luk solüsyondur (175).

SA, EDTA'ya kıyasla daha agresif bir demineralizan etki gösterebilir. Bu nedenle (önerilmemekle birlikte) SA uygulamasını takiben NaOCl kullanıldığında, EDTA–NaOCl sıralamasına göre kök kanal duvarında daha belirgin erozyon geliştiği bildirilmektedir (208). Ayrıca EDTA ve SA gibi şelatörlerin, CH'ye ait debrisleri emülsifiye ederek nötralize edebildiği ve partikülleri süspansiyon halinde tutarak uzaklaştırılmasını kolaylaştırdığı bildirilmektedir. %10 SA ve %17 EDTA kullanımının; kalsiyum iyonlarına yönelik etkinlikleri sayesinde NaOCl gibi diğer ajanlara kıyasla daha başarılı sonuçlar verdiği daha önceki çalışmalarda bildirilmiştir (177, 197, 219, 220). Yakın tarihli bir sistematik incelemede, SA'nın kullanımına ilişkin çalışmaların çoğunda, CH'nin uzaklaştırılmasında SA'nın EDTA'ya kıyasla daha etkili sonuçlar sağladığı rapor edilmiştir (221).

2.3.4.4. Etidronik Asit

Etidronik asit ya da 1-hidroksietan-1.1-difosfonik asit (HEDP), azot içermeyen bir bifosfonattır. Günümüzde suyun arıtılmasında, gıda dezenfeksiyonunda ve katı sabunlarda koruyucu olarak kullanılmaktadır. Yüksek biyoyumluluğa sahip bu ajan, tıpta osteoporoz veya osteolitik kemik yıkımıyla seyreden neoplastik hastalıklarda da kullanılmaktadır. (222).

Etidronat ise katyonların HEDP'nin anyonuna (genellikle Na_2HEDP veya Na_4HEDP) bağlı olduğu etidronik asidin bir tuzudur. HEDP'nin NaOCl ile benzersiz kısa süreli uyumluluğuna dayanarak, kemomekanik kök kanal hazırlığı sırasında ve son irrigasyon için kombine bir NaOCl/HEDP irrigasyon solüsyonu kullanmak teorik olarak mümkündür. Bu yaklaşımda HEDP, kullanım öncesinde NaOCl irrigasyon solüsyonuna toz formunda eklenmektedir; önceden tartılmış kapsüller halinde sunulan bu toz preparat günümüzde “Dual Rinse” adıyla (Medcem, İsviçre) ticari olarak temin edilebilmektedir. HEDP bir şelatlayıcı ajandır; NaOCl solüsyonunda çözündürüldüğünde, yaklaşık 1 saat boyunca stabilitesini koruduğu ve etkinliğini sürdürdüğü gösterilmiştir (223, 224).

Kök kanal irrigasyonu bağlamında sürekli şelasyon olarak tanımlanan bu yaklaşım, son yıllarda endodontik araştırmalarda giderek daha fazla ilgi görmektedir (225). Bu kombine sistemde, serbest kullanılabilir klora dayanan NaOCl'nin proteolitik ve antibakteriyel etkilerinin korunduğu bildirilmiştir. Aynı zamanda kalsiyumu bağlayan bir şelatör olan HEDP, smear tabakası ve sert doku debrisinin birikimini sınırlandırmaktadır. (208).

Son alışmalar etidronik asidin NaOCl ile kısa süre içinde minimal düzeyde etkileşime girmesi ve yeterli kalsiyum-şelatlama kapasitesi göstermesiyle SA veya EDTA'ya olası bir alternatif olabileceğini göstermiştir (224). HEDP'nin, EDTA'ya kıyasla kök dentini üzerinde daha az agresif etki gösterdiği de ileri sür÷lm÷ştür (223).

Tek sol÷syonla kombine irrigasyon konseptinin, farklı tip kanal patlarının kök dentinine adezyonu üzerinde olumlu etkiler gösterebileceği çeşitli çalışmalarda rapor edilmiştir (207, 209, 210). Ayrıca HEDP'nin smear tabakası üzerindeki etkisi sayesinde, deneysel olarak enfekte edilmiş kök kanallarında ve dentin tübülllerinde NaOCl'nin dezenfeksiyon etkinliğini artırabileceği ileri sür÷lmektedir (230).

Üretici önerileri doğrultusunda, söz konusu kombinasyonun CH ara seans medikamentinin uzaklaştırılmasına katkı sağlayarak daha temiz bir kanal sistemi elde edilmesinde kullanılabileceği ifade edilmektedir (231). Literatürde HEDP'nin kök kanal sisteminden CH uzaklaştırmadaki etkinliğini değerlendiren sınırlı sayıda çalışma mevcuttur. Bu çalışmaların bazılarında HEDP, CH'nin uzaklaştırılmasında NaOCl'den daha iyi performans göstermiştir (25–27). Buna karşılık bir alışma HEDP'nin NaOCl'ye kıyasla istatistiksel olarak anlamlı bir fark göstermediğini ortaya koymuştur (231).

2.4. Kök Kanal Tedavisinde Uygulanan İrrigasyon Aktivasyon Yöntemleri

İrrigasyonun etkinliği, hem irrigasyon sol÷syonunun kök kanal sistemine uygulanma biçimine hem de sol÷syonun fizikokimyasal özelliklerine bağlıdır. Konvansiyonel irrigasyonda, irrigantın kanal sistemi içinde ilerlemesi büyük ölçüde enjeksiyonla oluşturulan pozitif basına ve sol÷syonun viskozitesine dayanır. Kök kanal irrigasyonunda aktivasyon ise, irrigasyon sol÷syonunun kanal sisteminin karmaşık anatomik bölgelerine daha iyi nüfuz etmesini sağlamak amacıyla mekanik, fiziksel veya başka bir enerji kaynağı kullanılarak sol÷syonun ajite edilmesi ve akışının artırılması sürecidir (232).

Günümüzde piyasada çok farklı irrigasyon aktivasyon sistemleri bulunmaktadır. Bir sistematik derleme ve meta-analiz, kullanılan aktivasyon tekniği ne olursa olsun, aktivasyonun debris ve smear tabakasının uzaklaştırılmasını anlamlı biçimde artırdığını göstermiştir (233). Bu nedenle aktivasyon, kök kanal sisteminin kemomekanik preparasyonu sırasında önemli bir basamak olarak kabul edilmektedir. Bununla birlikte, teknik

uygulamalardaki farklılıklar ve araştırma sonuçlarındaki heterojenite nedeniyle, bugün için tek bir yöntemin diğerlerine üstün olduğunu kesin biçimde önermek mümkün değildir (234).

Endodonti tarihi boyunca, kök kanal irrigasyonunda irrigantın daha etkili taşınmasını ve aktivasyonunu sağlayacak sistemlerin geliştirilmesine yönelik sürekli çaba gösterilmiştir. Bu sistemler genel olarak iki ana grupta değerlendirilmiştir: Manuel aktivasyon teknikleri ve makine destekli aktivasyon yöntemleri (235).

2.4.1. Manuel İrrigasyon Yöntemleri

2.4.1.1. Standart İğne İrrigasyonu

Sİİ, farklı çaplarda iğne/kanül kullanılarak irrigasyon solüsyonunun kök kanalına verilmesine dayanır. Uygulama, pasif şekilde yapılabileceği gibi aktivasyonla da desteklenebilir. Aktivasyon, iğnenin kanal boşluğu içinde yukarı-aşağı hareket ettirilmesiyle sağlanır (236).

Kullanılan iğnelerin bir kısmı irrigantı en uç bölgeden boşaltacak şekilde tasarlanmışken (açık uçlu), diğer bir kısmı kapalı uçlu ve yandan delikli kanallardan irrigasyon solüsyonunu lateral yönde iletecek biçimde tasarlanmıştır (237). Yandan delikli ve kapalı uçlu tasarımın, irrigasyon solüsyonunun hidrodinamik olarak daha etkili aktive edilmesine katkı sağlayabileceği ve apikal ekstrüzyon riskini azaltabileceği ileri sürülmüştür (238).

İrrigasyon sırasında iğnenin kanal içerisinde sıkışmadan serbest hareket edebilmesi kritik öneme sahiptir. Bu durum, irrigasyon solüsyonunun geri akışına olanak sağlayarak debrislerin koronal yönde taşınmasını kolaylaştırmakta ve aynı zamanda irrigasyon solüsyonunun istemsiz şekilde periapikal dokulara taşınmasını önlemeye yardımcı olmaktadır. Sİİ'nin önemli avantajlarından biri, iğnenin kanal içerisindeki ilerleme derinliği ile kullanılan irrigasyon solüsyonu hacminin klinisyen tarafından nispeten kolay kontrol edilebilmesidir (238). Bununla birlikte, Sİİ'nin oluşturduğu mekanik temizleme etkisi sınırlıdır. Sİİ sonrasında erişilmesi güç kanal uzantıları ve düzensiz anatomik bölgelerde debris ve bakterilerin varlığını sürdürdürebildiği bildirilmektedir. Bu durum, kök kanal sisteminin etkin şekilde debride edilmesini zorlaştırmaktadır. Önceki bir çalışmada, Sİİ kullanıldığında irrigasyon solüsyonunun iğne ucundan yalnızca yaklaşık 1 mm daha apikale ilerleyebildiği gösterilmiştir (239). Bu bulgu klinik açıdan önemlidir; çünkü irrigasyon iğnesi çoğu zaman dar kanallarda koronal üçlüde, geniş kanallarda ise en fazla orta üçlü

düzeyinde konumlandırılabilir (240). Dolayısıyla irrigasyon solüsyonunun penetrasyon derinliği ve dentin tübüllerine ulaşarak dezenfeksiyon sağlayabilme kapasitesi sınırlı kalmaktadır. Bu nedenle, özellikle kompleks kanal anatomisine sahip dişlerde Sİİ'nin etkinliği tartışmalı bulunmuştur (241).

İrrigasyonun etkinliğinin artırılması amacıyla kök kanalının yeterli düzeyde genişletilmesi gerekliliği ilk olarak 1943 yılında Grossman tarafından vurgulanmıştır (242). Apikal preparasyonun 40 numaradan daha küçük boyutlarda sonlandırıldığı kanallarda, Sİİ ile gerçekleştirilen irrigasyonun daha düşük etkinlik gösterdiği bildirilmiştir (243, 244). Falk ve Sedgley tarafından yapılan çalışmada da 60 numaraya kadar hazırlanan kanallarla karşılaştırıldığında 36 numaraya kadar genişletilen kanallarda irrigasyon etkinliğinin anlamlı derecede azaldığı; ancak preparasyon çapının 77 numaraya kadar artırılmasının ek bir avantaj sağlamadığı gösterilmiştir (243). Bu nedenle klinisyenler, kanal genişletilmesiyle irrigasyonun mekanik etkinliğini artırma gereksinimi ile radiküler dentin kalınlığının azalmasına bağlı kök yapısının zayıflaması riski arasında dikkatli bir denge kurmak zorundadır (245).

Sİİ'nin etkinliğini artıran başlıca faktörler; irrigasyon iğnesinin apeks bölgesine daha yakın konumlandırılması, daha yüksek hacimde irrigasyon solüsyonu kullanılması ve daha ince çaplı iğnelerin tercih edilmesidir (240, 246). Daha küçük çaplı iğnelerin kullanımı, irrigasyon solüsyonunun kanal içerisinde daha derin bölgelere ulaşmasını ve daha etkin şekilde yenilenmesini sağlayarak debridman etkinliğini artırmaktadır (240, 247). Bunun yanı sıra, irrigasyon solüsyonunun akış hızı ve kanal içerisindeki yenilenme düzeyi, iğne ucunun ötesinde meydana gelen sıvı hareketini doğrudan etkileyen önemli değişkenlerdir. Ancak Sİİ sırasında akış hızının standardizasyonu ve kontrolü oldukça güçtür (248). Bu nedenle, dentin tübüllerine penetrasyon derinliğini artırabilen yeni irrigasyon uygulama sistemlerinin geliştirilmesi önemli avantajlar sağlayabilir. Böylece, kök kanal sisteminde daha etkin bir debridman elde edilirken, apikal ekstrüzyonun en aza indirilmesiyle NaOCl gibi irrigasyon solüsyonlarının periapikal dokular üzerindeki sitotoksik etkilerinin azaltılması mümkün olabilmektedir (249, 250).

2.4.1.2. Manuel Dinamik Aktivasyon

Manuel dinamik aktivasyon (MDA), ek bir ekipman gerektirmemesi ve düşük maliyetli olması nedeniyle klinikte yaygın olarak tercih edilen bir irrigasyon aktivasyon yöntemidir. Bu teknik, enstrümente edilmiş kök kanalında çalışma boyuna uygun şekilde

adapte edilen bir gütaperka konisinin yaklaşık 2 mm genlikte kısa vertikal itme-çekme hareketleriyle tekrarlayan biçimde kanala sokulup çıkarılması esasına dayanır. Uygulama genellikle yaklaşık 1 dakika içerisinde toplam 100 hareket olacak şekilde gerçekleştirilmektedir (251).

Bu işlem sırasında irrigasyon solüsyonu kök kanal sistemi boyunca yer değiştirerek ve yenilenerek hidrodinamik bir etki oluşturmakta, böylece irrigantın kanal duvarlarıyla daha etkin temas etmesine katkı sağlamaktadır. Bu etkinlik, McGill ve ark. ile Huang ve ark. tarafından yayımlanan çalışmalarla da desteklenmiştir (251, 252). Söz konusu çalışmalarda, manuel dinamik aktivasyonun; otomatik dinamik irrigasyon sistemi olan RinsEndo'ya ve statik irrigasyona kıyasla anlamlı derecede daha etkili olduğu gösterilmiştir. Ayrıca bu tekniğin, apikal bölgede oluşan vapor lock (buhar kilidi) etkisini ortadan kaldırabildiği; böylece debridman ve kanal temizliğini artırırken irrigasyon solüsyonlarının antimikrobiyal etkinliğini de güçlendirebildiği bildirilmiştir (232, 233).

MDA; basitliği ve maliyet etkinliği nedeniyle kanal irrigasyonu için önerilmiş olsa da el ile uygulanan bu yöntemin zahmetli ve zaman alıcı olması, rutin klinik pratikte kullanımını sınırlamaktadır. Bu nedenle, kök kanal irrigasyon solüsyonlarının aktivasyonunu sağlamak amacıyla geliştirilmiş ve üreticiler tarafından ya ticari olarak sunulan ya da üretim aşamasında bulunan çeşitli otomatik cihazlar mevcuttur (235).

2.4.1.3. Manuel Fırçalar

Manuel fırçalar, irrigasyon solüsyonunu kanal boşluklarına doğrudan iletmek amacıyla kullanılan araçlar olmaktan ziyade; kanal duvarlarının debridmanı ve irrigasyon solüsyonunun aktivasyonu amacıyla geliştirilmiş yardımcı sistemler olarak değerlendirilmektedir (235). Bu amaçla geliştirilen sistemlerden biri, üzerinde fırça bulunan 30 G irrigasyon iğnesi olan NaviTip FX'tir. Yapılan çalışmalarda, NaviTip FX ile gerçekleştirilen irrigasyon ve aktivasyon işlemlerinin, fırçasız NaviTip iğnesine kıyasla özellikle kök kanalının koronal üçlüsünde daha etkili temizlik sağladığı bildirilmiştir. Bununla birlikte, orta ve apikal üçlü bölgelerde elde edilen farkların istatistiksel olarak anlamlı olmadığı belirtilmiştir (253). Bunun yanında, NaviTip FX sisteminin en önemli dezavantajı; fırça kılları ile kanal düzensizlikleri arasında oluşabilecek sürtünme sonucu radyolüsent kılların koparak kanal içerisinde kalabilmesidir. Bu tür kalıntıların, cerrahi mikroskop kullanılsa dahi klinisyen tarafından her zaman kolaylıkla fark edilemeyebileceği bildirilmiştir (235).

Kök kanal debridmanını artırmak amacıyla geliştirilen bir diğer manuel fırça sistemi ise Endobrush'tur. Endodontik kullanım için tasarlanmış spiral yapılı bu fırça; bükülmüş teller üzerine yerleştirilmiş naylon kıllardan ve entegre bir saptan oluşmakta olup, tüm uzunluğu boyunca nispeten sabit bir çapa sahiptir. Kök kanal preparasyonunun tamamlanmasının ardından fırça çalışma boyuna kadar ilerletilmekte; ardından 90° rotasyonel hareket ile 2–3 mm'lik ileri-geri hareketler uygulanarak yaklaşık 1 dakika süreyle kullanılmaktadır. Yapılan çalışmalar, Endobrush kullanımının yalnızca mekanik enstrümantasyona kıyasla kök kanal debridmanı açısından istatistiksel olarak anlamlı derecede daha üstün sonuçlar sağladığını göstermiştir. Bununla birlikte, Endobrush'un boyutu nedeniyle her vakada tam çalışma boyuna kadar ilerletilemediği; bu durumun ise fırçalama işlemi sonrasında debrislerin kanalın apikal bölgesine doğru itilmesine neden olabileceği bildirilmiştir (254).

2.4.2. Makine Destekli İrrigasyon Yöntemleri

2.4.2.1. Negatif Basınç Prensibi ile Çalışan İrrigasyon Aktivasyon Sistemleri

Sİİ ile irrigasyon solüsyonunun uygulanması sırasında birbirine zıt görünen iki temel durum söz konusudur. Etkin debris uzaklaştırılması ve smear tabakasının eliminasyonu için irrigasyon solüsyonunun kanal duvarlarıyla doğrudan temas etmesi gerekmektedir. Ancak irrigasyon iğnesinin kanal içerisinde apikal foramenden uzak konumlandırılması durumunda, vapor lock fenomeni nedeniyle irrigasyon solüsyonunun kanalın apikal bölgelerine ulaşması güçleşmektedir. Buna karşılık, iğne ucunun apikal foramene aşırı yakın yerleştirilmesi irrigasyon solüsyonunun apikal foramenden taşma riskini artırmakta ve bu durum periapikal dokularda ciddi iyatrojenik hasarlara yol açabilmektedir. Bu probleme çözüm amacıyla geliştirilen negatif basınç prensibine dayalı irrigasyon sistemlerinde, irrigasyon solüsyonu eş zamanlı olarak kanal içerisine verilmekte ve aspire edilmektedir. Böylece hem irrigasyon etkinliğinin artırılması hem de apikal ekstrüzyon riskinin azaltılması hedeflenmektedir (255).

Negatif basınç prensibiyle çalışan sistemlerin en yaygın örneklerinden biri EndoVac sistemidir. EndoVac sisteminde, makrokannül veya mikrokannül adı verilen özel kanüller; tüpler aracılığıyla irrigasyon solüsyonu içeren bir enjektöre ve diş ünitesinin yüksek hızlı aspirasyon hattına bağlanmaktadır (256). Sistemde kullanılan plastik makrokannül, 0.02 konikliğe sahip açık uçlu 55 numara yapısında olup, koronal kök kanal bölümünün başlangıç

irrigasyonu amacıyla titanyum bir tutacak üzerine monte edilmiştir. Kanalin apikal bölümünün irrigasyonu için kullanılan 32 numara paslanmaz çelik mikrokannül ise kapalı uçlu yapıdadır ve ucuna komşu bölgede lazerle oluşturulmuş lateral yerleşimli mikrodeliklerden oluşan dört set (her sette üç delik) içermektedir. Bu mikrokannül, çalışma boyunda konumlandırılarak titanyum bir parmak parçası yardımıyla kullanılmaktadır (257).

İrrigasyon sırasında kullanılan dağıtım/aspirasyon ucu, irrigasyon solüsyonunu pulpa odasına iletirken aynı zamanda odada biriken fazla sıvıyı aspire ederek taşmayı önlemektedir. Kanal içerisinde konumlandırılan kannül ise eş zamanlı olarak negatif basınç oluşturarak, pulpa odasındaki taze irrigasyon solüsyonunun kanal boyunca apikal yönde ilerlemesini ve kannül ucuna kadar ulaşmasını sağlamaktadır. Daha sonra irrigasyon solüsyonu kannül içerisine çekilmekte ve aspirasyon hattı aracılığıyla kanal dışına uzaklaştırılmaktadır. Böylece çalışma boyuna kadar negatif basınç altında sürekli taze irrigasyon solüsyonu akışı sağlanabilmektedir (258, 259).

EndoVac sisteminin önemli avantajlarından biri, vapor lock fenomenini önleyebilmesidir. Bunun yanı sıra sistem, irrigasyon solüsyonlarının periapikal dokulara taşmasına neden olmaksızın çalışma boyuna kadar güvenli şekilde ulaştırılmasına olanak sağlamaktadır (258).

RinsEndo sistemi, negatif basınç prensibiyle çalışan bir diğer kök kanal irrigasyon cihazıdır. Bu sistemde, 1.6 Hz frekansta salınım yapan yaklaşık 65 µL hacmindeki irrigasyon solüsyonu, cihaza bağlı enjektörden çekilerek özel olarak tasarlanmış bir kanül aracılığıyla kök kanalına iletilmektedir. Aspirasyon fazında ise kullanılmış irrigasyon solüsyonu ve hava kanal içerisinden uzaklaştırılmakta, ardından sistem tarafından otomatik olarak taze irrigasyon solüsyonu ile yer değiştirilmektedir. Basınç ve aspirasyon döngülerinin dakikada yaklaşık 100 kez tekrarlandığı bildirilmiştir (238, 252).

2.4.2.2. Döner Başlıkla Birlikte Kullanılan İrrigasyon Yöntemleri

Ruddle Brush

Ruddle, enstrümente edilmiş kök kanallarında debris ve smear tabakasının uzaklaştırılmasını kolaylaştırmak amacıyla döner el aletine bağlanan bir mikro-fırça kullanımını tanımlamıştır. Bu fırça gövdeden ve merkezi bir tel çekirdekten radyal yönde uzanan çok sayıda kıla sahip fırçadan oluşur. Debridman aşamasında mikro-fırça yaklaşık

300 dev/dk hızla döner; bu hareket, kılların preparasyonun düzensiz alanlarına doğru şekil değiştirerek adapte olmasını sağlar. Böylece rezidüel debrislerin koronal yöne doğru yer değiştirmesine ve kanal dışına taşınmasına katkıda bulunur (260). Ancak bu ürünün, 2001 yılında patentinin onaylanmasından sonra ticari olarak piyasada bulunmadığı bildirilmiştir (235).

Canal Brush

Canal Brush (CB), yakın dönemde ticari olarak kullanıma sunulan bir endodontik mikro-fırçadır. Yüksek esnekliğe sahip bu mikro-fırça, tamamen polipropilenden kalıplanmıştır ve rotasyonel hareketle manuel olarak da kullanılabilir. Bununla birlikte, 600 dev/dk hızda çalışan bir anguldurvaya bağlandığında etkinliğinin arttığı bildirilmektedir. Weise ve ark. tarafından yayımlanan güncel bir raporda, küçük ve esnek CB'nin bir irrigant eşliğinde kullanıldığında, simüle edilmiş kanal uzantıları ve düzensizliklerinden debrislerin uzaklaştırılmasında etkili olduğu gösterilmiştir (261).

XP-endo Finisher Endodontik Eğe

Yakın zamanda, irrigasyon solüsyonlarının final aktivasyonu amacıyla yeni bir NiTi bitirme aleti olan XPF (FKG Dentaire, La Chaux-de-Fonds, İsviçre) geliştirilmiştir. XPF, sıcaklığa bağlı faz dönüşümü gösterebilen MaxWire alaşımından (Martensite–Austenite Electropolish-Flex, FKG) üretilmiş, 25 numara çapında ve koniklik içermeyen bir alettir (11, 262). Bu özel alaşım sayesinde alet, oda sıcaklığında martensitik fazda (M-fazı) düz bir formda bulunurken, vücut sıcaklığında östenitik faza (A-fazı) geçerek uzunluğunun son 10 mm'lik bölümünde yaklaşık 1.5 mm derinliğinde kaşık benzeri bir yapı kazanmaktadır (263). Üretici firma tarafından, alet ucunun sıkıştırılması durumunda kaşık benzeri bölümün yaklaşık 6 mm'ye kadar genişleyebildiği bildirilmiştir. Bu nedenle XPF'nin kanal içerisinde 7–8 mm'lik aşağı-yukarı hareketlerle kullanılması sırasında, kök kanal anatomisindeki doğal daralma ve genişlemeler doğrultusunda kaşık ve uç kısmı dinamik olarak genişleyip daralabilmektedir. Bu hareketin, kanal duvarlarının mekanik olarak kazınmasına ve irrigasyon solüsyonu içerisinde türbülans oluşmasına katkı sağladığı belirtilmiştir (264).

XPF'nin sahip olduğu yüksek esneklik ve kök kanal boşluğuna üç boyutlu uyum sağlayabilme özelliği sayesinde, orijinal kanal anatomisine saygılı şekilde çalıştığı ve düzensiz ya da erişilmesi güç alanların daha etkin temizlenmesine katkıda bulunduğu bildirilmektedir (11). XPF'nin, kök kanal preparasyonu en az 25 numara boyutunda tamamlandıktan sonra kullanılması önerilmektedir. Üretici firma tarafından önerilen çalışma

parametreleri; irrigasyon solüsyonları eşliğinde, yavaş ve kontrollü aşağı-yukarı hareketlerle 800 dev/dk hız ve 1 N·cm tork değeridir (265).

Önceki çalışmalarda, XPF sisteminin kök kanal sistemi içerisinde biriken sert doku artıklarının, smear tabakasının ve mikroorganizmaların uzaklaştırılmasında etkili olduğu bildirilmiştir (11, 266, 267). Taramalı elektron mikroskopu kullanılarak gerçekleştirilen bir çalışmada, XPF içeren endodontik irrigasyon protokolünün biyofilm uzaklaştırılması açısından PUI ve SII'ye kıyasla istatistiksel olarak anlamlı derecede daha başarılı olduğu gösterilmiştir (11). Ayrıca, XPF'nin %1.5 veya %2.5 NaOCl ile kullanıldığında, E. faecalis biyofilmine ait bakteri sayısını SII'ye göre daha fazla azalttığı ve PUI ile benzer düzeyde antibakteriyel etkinlik gösterdiği bildirilmiştir (268).

XPF'nin kanal içi medikamentlerin uzaklaştırılmasındaki etkinliği de çeşitli çalışmalarda diğer irrigasyon aktivasyon teknikleriyle karşılaştırılmıştır. Önceki araştırmalarda, XPF'nin kanal içi medikamentlerin uzaklaştırılmasında SII'ye kıyasla daha etkili olduğu bildirilmiştir. XPF ve PUI tekniklerinin kanal içi medikamentlerin uzaklaştırılmasındaki etkinliğini niceliksel olarak karşılaştıran bir meta-analizde, XPF'nin standartlaştırılmış yapay oluk ve kavitelerden kanal içi medikamentlerin uzaklaştırılmasında PUI'ye kıyasla daha üstün sonuçlar sağlayabileceği bildirilmiştir (12).

Quantec-E Irrigasyon Sistemi

Quantec-E irrigasyon sistemi sürekli irrigasyona olanak sağlamak amacıyla endodontik anguldruvaya bağlanabilen bir cihazdır. Döner enstrümantasyon esnasında sürekli irrigasyon sağlamak üzere bir pompa ünitesi, iki ayrı irrigasyon rezervuarı ve bağlantı tüplerinden oluşmaktadır. Aktif enstrümantasyon sırasında irrigasyonun sürekli olarak sürdürülmesinin, kullanılan irrigasyon solüsyonu miktarını ve solüsyonun kanal duvarlarıyla temas süresini artırabileceği, ayrıca kök kanal sistemi içerisine daha derin solüsyon penetrasyonu sağlayabileceği öne sürülmektedir. Bu mekanizmanın, geleneksel iğne irrigasyonuna göre daha etkin bir kanal debridmanı oluşturması beklenmekle birlikte, mevcut literatür bulguları bu üstünlüğü açık biçimde doğrulamamaktadır. Nitekim iğne irrigasyonu ile karşılaştırıldığında, Quantec-E irrigasyon sisteminin yalnızca kök kanalının koronal üçlüsünde daha etkili temizlik sağladığı; orta ve apikal üçlüde ise belirgin bir üstünlük göstermediği bildirilmiştir (269).

Self-Adjusting File Sistemi

Self-Adjusting File (SAF) sistemi, minimal invaziv endodontik tedavi yaklaşımı doğrultusunda geliştirilmiş bir şekillendirme ve irrigasyon sistemidir. Sistem, özel bir RDT anguldruva başlığı ile çalıştırılan SAF eğesi ve irrigasyon solüsyonunu eğenin içi boş yapısı aracılığıyla sürekli akış halinde ileten bir irrigasyon pompasından oluşmaktadır. SAF eğesi, örgü duvarlı silindirik yapısı sayesinde kanal anatomisine uyum sağlayabilmekte ve bu yapı nedeniyle eğe içerisinde basınç oluşmamaktadır. İrrigasyon pompası tarafından oluşturulan düşük düzeydeki basınç, irrigasyon solüsyonunun tüp boyunca eğe içerisine iletilmesini sağlamakta; ancak solüsyon eğe içerisine ulaştığında bu basınç ortadan kalkmaktadır (270).

SAF sisteminde irrigasyon solüsyonu kanal içerisine sürekli olarak iletildiğinden, preparasyon süresince kök kanalında yenilenen bir irrigasyon ortamı sağlanmaktadır. Eğenin solüsyon içerisindeki titreşim hareketi ise irrigantın kanal duvarlarıyla temasını artırarak temizleme ve debridman etkinliğine katkıda bulunmaktadır (271). Bununla birlikte, SAF sisteminin kullanılabilmesi için kanalın önceden en az 20 numaraya kadar genişletilmesi gerekliliği, alet kırılmasına ilişkin endişeler, tekniğin öğrenme süreci ve maliyetinin yüksek olması gibi faktörler klinik kullanımının yaygınlaşmasını sınırlandırmaktadır (272).

2.4.2.3. Sonik Cihazlar

Sonik irrigasyon sistemleri, ultrasonik irrigasyondan farklı olarak daha düşük frekans aralığında (1–6 kHz) çalışmakta ve bu nedenle daha düşük düzeyde kesme gerilimi oluşturmaktadır (273). Buna karşılık, sonik enerji daha yüksek genlikte titreşim meydana getirmekte; diğer bir ifadeyle, cihaz ucunda daha geniş ileri-geri hareket oluşmaktadır. Ayrıca sonik cihazların salınım karakteristikleri ultrasonik sistemlerden farklılık göstermektedir. Sonik sistemlerde, eğenin bağlantı bölgesine yakın kısmında bir düğüm noktası, uç kısmında ise bir karın noktası bulunmaktadır. Eğenin hareketinin kısıtlanması durumunda yanlara doğru olan salınım ortadan kalkmakta ve yalnızca boyuna hareket devam etmektedir. Bu titreşim şeklinin, yüklenmeden daha az etkilenmesi ve yüksek yer değiştirme genliği oluşturması nedeniyle kök kanal temizliğinde etkili olduğu bildirilmiştir (274).

EndoAktivatör

EA sistemi (Dentsply Sirona, Ballaigues, İsviçre), 1–10 kHz frekans aralığında salınım yapabilen, yüksek derecede esnek polimer uçlara sahip taşınabilir ve kablolu bir sonik irrigasyon aktivasyon sistemidir (235). Sistem içerisinde kullanılan tek kullanımlık polimer uçlar 15/02, 25/04 ve 35/04 olmak üzere üç farklı boyutta üretilmektedir. Bu uçlar düz yüzeyli yapıları sayesinde kök kanal dentininde kesici bir etki oluşturmayıp, irrigasyon solüsyonunun kanal içerisinde güvenli ve etkin biçimde aktive edilmesine olanak sağlamaktadır. Uçun horizontal yöndeki hareketine eşlik eden kısa vertikal hareketler, kök kanal sistemi içerisinde belirgin bir hidrodinamik etki oluşturmaktadır. Ayrıca cihaz çalışırken koronal-apikal yönde gerçekleştirilen 2–3 mm genliğindeki kısa yukarı-aşağı hareketlerin, oluşan hidrodinamik etkinliği artırdığı bildirilmiştir (8).

EA sisteminde kullanılan polimer uçların olası dezavantajlarından biri, radyolüsent olmalarıdır. Her ne kadar bu uçlar tek kullanımlık olup klinik kullanım sırasında kolay kırılmasa da radyolüsent yapısı nedeniyle kanal içerisinde kırılıp kalan bir parçanın ayrılması durumunda radyografik olarak tespit edilmesi güçleşebilmektedir (8, 275).

EA sisteminin etkinliğini değerlendiren çeşitli ex vivo çalışmalar, bu yöntemin ana kök kanalı, hazırlanmamış fin bölgeleri ve istmusların temizliği ile dezenfeksiyonunda şırınga irrigasyonuna kıyasla anlamlı bir üstünlük sağlamadığını göstermiştir (276–278). Benzer şekilde, kanal içi medikamentlerin uzaklaştırılmasına yönelik çalışmalarda da EA'nın Sİİ'ye göre anlamlı derecede daha etkili olmadığı, ayrıca PUI'ye kıyasla daha düşük temizleme etkinliği gösterdiği bildirilmiştir (9, 10).

EDDY

EDDY sistemi (VDW, Münih, Almanya), dentin yüzeyinde kesici etki oluşturmayan ve kanal anatomisinde istenmeyen değişikliklere neden olmayan esnek poliamid materyalden geliştirilmiş pasif bir sonik irrigasyon aktivasyon sistemidir. Sistem, kesici olmayan, steril ve tek kullanımlık bir uçtan oluşmakta olup hava tahrikli bir el aleti (Air Scaler) yardımıyla yaklaşık 5 000–6 000 Hz frekans aralığında çalıştırılmaktadır. Oluşturulan titreşim enerjisi uç kısma aktarılmakta ve böylece yüksek genlikli osilatuar hareket meydana gelmektedir. Bu üç boyutlu hareket sonucunda irrigasyon solüsyonu içerisinde kavitasyon ve akustik iletim etkileri oluşmaktadır. Üretici firma tarafından,

sistemin kompleks kök kanal anatomisinin etkin şekilde temizlenmesine ve debris ile organik doku kalıntılarının uzaklaştırılmasına katkı sağladığı bildirilmektedir (279, 280).

EDDY sisteminin daha yüksek frekanslarda (~6 kHz) ve daha düşük genlikte salınım yapması sayesinde Sİİ'ye kıyasla daha etkili olduğu ve etkinliğinin ultrasonik irrigasyon sistemlerine yaklaşabileceği bildirilmektedir (281, 282). Literatürdeki birçok çalışma, CH medikamentinin uzaklaştırılmasında PUI ve EDDY'nin tatmin edici sonuçlar verdiğini bildirmiştir (4,17, 20, 287–289).

GentleWave

GentleWave (Sonendo, Inc., Laguna Hills, Kaliforniya, ABD) irrigasyon sistemi, minimal düzeyde şekillendirilmiş kök kanallarının temizlenmesi ve dezenfeksiyonu amacıyla geliştirilmiş bir cihazdır (287). GentleWave sistemi, aynı anda birden fazla akustik frekansın oluşturulmasına dayanan çoklu sonik teknolojisini kullanmaktadır (288). Sistem, yüksek basınç oluşturan bir ana ünite ile gazdan arındırılmış irrigasyon solüsyonunun akışını sağlayan özel tasarımı bir el parçasından oluşmaktadır. Uygulama sırasında irrigasyon solüsyonu, el parçası aracılığıyla yüksek hızlı bir jet şeklinde, kapatılmış pulpa odasına yerleştirilen nozülün uç kısmına iletilmektedir. Buradan yayılan solüsyon, pulpa odası çevresine ve ardından kök kanallarına dağılmaktadır. El parçasının herhangi bir bölümü kök kanalı içerisine ilerlememektedir. Ayrıca irrigasyon solüsyonu, el parçasının kapatma kapağı üzerinde bulunan küçük aspirasyon delikleri aracılığıyla sürekli olarak pulpa odasından uzaklaştırılmaktadır (289).

İlk çalışmalar, bu tekniğin karmaşık kanal sistemlerinden biyofilm, doku kalıntıları ve bakterileri uzaklaştırmada etkili olabileceğini gösteren cesaret verici sonuçlar ortaya koymuş ve Sİİ ile ultrasonik aktivasyona göre üstün olabileceği sonucuna varmıştır (290, 291). Bununla birlikte, 2022 yılında yayımlanan önceki bir anlatı derlemesinde, klinik etkinliği ve uzun dönem sonuçlarına ilişkin kanıtların hâlen gelişmekte olduğu belirtilmiştir. Herhangi bir yeni teknolojide olduğu gibi, klinik performansı ve diğer irrigasyon teknikleriyle karşılaştırmalı etkinliği konusunda bilgi eksiklikleri devam etmektedir (292).

2.4.2.4. Ultrasonik Cihazlar

Diş hekimliğinde de ultrasonik enerjiden çeşitli klinik amaçlarla faydalanılmıştır. Başlangıçta daha çok periodontal tedavilerde kullanılan ultrasonik cihazlar, endodontide ilk kez 1957 yılında Richman tarafından apikal cerrahi sırasında ve kök kanalındaki debrislerin uzaklaştırılması amacıyla kullanılmıştır (293). Sonraki yıllarda ise kök ucu preparasyonu, kök kanal irrigasyonu, kanal dolgu materyalinin kompaksiyonu, smear tabakasının uzaklaştırılması, pulpa odasındaki kalsifiye yapıların elimine edilmesi, apikal cerrahide retrograt dolgu uygulamaları, küçük el aletlerinin dezenfeksiyonu ve kırık aletlerin kök kanalından çıkarılması gibi çok sayıda işlemde endodonti pratiğine dâhil olmuştur. Ultrasonik cihazların ticari olarak kullanıma sunulması ise Martin ve ark.'nın 1980 yılında bu amaçla bir ultrasonik cihaz geliştirmesiyle mümkün olmuştur (294).

Sonik enerji ile karşılaştırıldığında, ultrasonik enerji daha yüksek frekanslarda ancak daha düşük genliklerde çalışmaktadır (295). Bu sistemlerde kullanılan eğeler, insan işitme sınırının üzerinde olan (>20 kHz) 25–30 kHz frekans aralığında salınım yapacak şekilde tasarlanmıştır. Ayrıca bu eğeler, uzunlukları boyunca düğüm ve karın noktalarından oluşan karakteristik bir örüntü meydana getiren transvers titreşim hareketi göstermektedir (295, 296).

Literatürde iki tür ultrasonik irrigasyon tanımlanmıştır: biri irrigasyonun eş zamanlı ultrasonik alet kullanımı ile birleştirildiği ultrasonik irrigasyon (Uİ), diğeri ise eş zamanlı alet kullanımı olmadan yapılan PUİ olarak adlandırılan yöntemdir. PUİ ilk olarak Weller ve ark. tarafından tanımlanmıştır. PUİ, ultrasonik irrigasyonun özel bir uygulama şeklidir ve günümüzde endodontide en yaygın kullanılan ultrasonik aktivasyon yöntemlerinden biridir. Konvansiyonel ultrasonik irrigasyondan temel farkı, ultrasonik eğenin kanal içerisinde dentine temas ederek kesme veya şekillendirme amacıyla kullanılmamasıdır. PUİ'de ultrasonik uç veya eğe, genişletilmiş kök kanalı içerisinde serbest şekilde titreşmekte ve yalnızca irrigasyon solüsyonunun aktivasyonunu sağlamaktadır (297).

PUİ yöntemi, enjektör aracılığıyla aralıklı irrigasyon ya da ultrasonik el aletinden irrigasyon solüsyonunun sürekli olarak verilmesi yoluyla uygulanabilir. Aralıklı irrigasyon yönteminde, irrigasyon solüsyonu enjektör yardımıyla kök kanalına verilmekte ve her bir ultrasonik aktivasyon döngüsünün ardından birkaç kez yenilenmektedir. PUİ, kısa

protokollerle (3×10 sn) de uygulansa da en yaygın uygulama 20 saniyelik 3 periyottur (3×20 sn) (298). Bu yöntemde, enjektörün kanal içerisindeki penetrasyon derinliği ile uygulanan solüsyon hacmi bilindiğinden, irrigasyon solüsyonunun kanalın apikal bölgesinden geçen miktarı daha kontrollü şekilde ayarlanabilmektedir. Sürekli irrigasyon tekniğinde ise ultrasonik el aletinden sürekli irrigasyon solüsyonu akışı olduğundan, bu düzeyde bir kontrol sağlanamamaktadır. Bununla birlikte, sürekli ultrasonik irrigasyonun yaygın olarak kullanılan aralıklı aktivasyon protokollerinden daha etkili olup olmadığı günümüzde hâlâ belirsizliğini korumaktadır (299).

Yakın zamanda yayımlanan bir sistematik derleme ve meta-analiz çalışmasında, PUİ ve Sİİ yöntemlerinin mandibular molar diş kök kanallarında biriken sert doku debrislerinin uzaklaştırılmasındaki etkinlikleri karşılaştırılmıştır. Çalışma sonuçlarına göre, PUİ protokolünün Sİİ grubuna göre sert doku debrislerinin eliminasyonunda istatistiksel olarak daha üstün bir performans sergilediği gösterilmiştir (300).

Randomize klinik çalışmaların sistematik incelemesi ve meta-analizin yapıldığı başka bir çalışmada, PUİ ve Sİİ'nin mikrobiyal varlık insidansı üzerindeki etkileri benzer olmakla birlikte, mikrobiyal yükün azaltılmasında PUİ'nin daha etkili olduğu gösterilmiştir (301). Buna karşın PUİ'nin Sİİ'ye kıyasla antimikrobiyal etkinliği konusunda mevcut kanıtlar net ve tutarlı değildir. Bazı çalışmalar PUİ'nin kök kanal sistemindeki bakteriyel yükün azaltılmasında daha başarılı olabileceğini bildirmiş olsa da meta-analiz düzeyindeki veriler genel olarak iki yöntem arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark olmadığını bildirmiştir (298, 302–304).

Yaylalı ve ark. tarafından yayınlanan sistematik bir inceleme, PUİ'nin kök kanalının apikal üçte birlik bölgesinden CH'yi uzaklaştırmada Sİİ ve EA'dan daha üstün olduğunu göstermiştir (305). XPF ve PUİ yöntemlerinin karşılaştırıldığı başka bir meta-analizde, genel olarak PUİ kullanan protokollerin, tek düz kök kanallarından kanal içi medikamentleri uzaklaştırmada XPF kullanan protokollere göre daha etkili olduğu gösterilmiştir (12).

2.4.2.5. Lazer ile Aktive Edilen İrrigasyon

Lazer, çeşitli frekanslardaki ışığı, yakın mesafeden odaklandığında yüksek ısı ve güç üretebilen, tüm dalgaların aynı fazda olduğu görünür, kızılötesi ve ultraviyole bölgelerinde kromatik bir radyasyona dönüştüren bir cihazdır. 1960 yılında Maiman tarafından yakut

lazerin geliştirilmesinden bu yana, diş hekimliğinde de lazer uygulamaları incelenmektedir (306). Diş hekimliği alanındaki ilk çalışmalar, yakut lazerin sert diş dokuları üzerindeki etkilerine odaklanmış ve lazer uygulamasının minenin asit demineralizasyonuna karşı direncini artırabileceğini göstermiştir (307, 308).

Endodontide lazer kullanımına ilişkin ilk uygulama, 1971 yılında Weichman ve Johnson tarafından yüksek güçlü kızılötesi CO₂ lazer aracılığıyla apikal foramenin in vitro olarak kapatılmasının denenmesidir (309). O tarihten bu yana, lazerlerin diş hekimliğindeki kullanımına ilişkin çok sayıda çalışma yayımlanmış, bu konuya olan ilgi giderek artmıştır. Bu çalışmalar arasında, diş pulpasındaki kan akışının teşhisi, dentin aşırı duyarlılığı, pulpa kuafajı ve pulpotomi, kök kanal duvarlarının modifikasyonu, kök kanallarının sterilizasyonu, kök kanallarının şekillendirilmesi ve obturasyonu ve apikal rezeksiyon sayılabilir (310).

Diş hekimliğinde farklı sert ve yumuşak doku uygulamaları için çeşitli lazer sistemleri geliştirilmiştir. Bunlar arasında karbondioksit (CO₂), neodimyum: itriyum-alüminyum-garnet (Nd:YAG), argon, diyet, erbiyum: kromiyum-itriyum-skandiyum-galyum-garnet (Er,Cr:YSGG) ve erbiyum: itriyum-alüminyum-garnet (Er:YAG) lazerler yer almaktadır. Bu sistemler, dalga boyları ve doku ile etkileşim özellikleri bakımından birbirinden farklılık göstermektedir. Nd:YAG ve diyet lazerler, genellikle ince ve esnek fiber uçlar aracılığıyla doku ile temas halinde kullanılmaktadır. Nd:YAG lazer özellikle pigmente yapılar ve protein içeriği yüksek dokular tarafından etkin şekilde absorbe edilirken, su tarafından absorpsiyonu sınırlıdır. Buna karşılık CO₂ ve Er:YAG lazerler, çoğunlukla daha rijit veya yarı esnek iletim sistemleriyle ve doğrudan temas gerektirmeden uygulanmaktadır. Bu lazerlerin seçiminde, hedef dokunun fiziksel özellikleri ve istenen klinik etkinin niteliği belirleyici olmaktadır (311).

1997 yılında Er:YAG lazer, Amerika Birleşik Devletleri Gıda ve İlaç Dairesi (FDA) tarafından diş sert dokularının kesiminde kullanılmak üzere klinik kullanım onayı alan ilk lazer sistemi olmuştur. Er:YAG lazer, 2940 nm dalga boyuna sahip orta kızılötesi bir lazerdir. Diğer lazer sistemleriyle karşılaştırıldığında, su ve hidroksiapatit tarafından yüksek düzeyde absorbe edilmektedir. Lazer enerjisinin irrigasyon solüsyonu içinde kavitasyon oluşturarak sıvı hareketini artırması prensibiyle etki göstermektedir. Bu etki mekanizması, irrigasyon solüsyonunu kök kanal sisteminin daha ulaşılması güç bölgelerine taşınmakta ve temizleme ile dezenfeksiyon etkinliğini artırmaktadır (228, 312).

Foton kaynaklı fotoakustik akış (Photon Induced Photoacoustic Streaming [PIPS]), endodontide yaygın olarak kullanılan irrigasyon solüsyonlarını düşük enerjili Er:YAG ile aktive eden bir lazer aktivasyon tekniğidir. Bu sistem, fotoakustik ve fotomekanik etkiler sonucunda kök kanal içerisinde kavitasyon ve şok dalgaları oluşturarak etki göstermektedir (13). Er:YAG lazer sulu bir ortamda uygulandığında, irrigasyon solüsyonu lokal olarak ve anında kaynama noktasının üzerine ısınmakta, her bir atımdan sonra fiber ucunda bir buhar kabarcığı oluşmaktadır. Bu buhar kabarcığı, maksimum hacmine ulaştıktan sonra çöker ve ardından kavitasyon etkisi meydana gelir. Bu fenomen, irrigasyon sıvılarının türbülanslı fotoakustik hareketini üreterek sıvıların kök kanal sistemi boyunca üç boyutlu olarak hareket etmesini sağlar ve smear tabakasının etkili bir şekilde uzaklaştırılmasına yol açar (313).

PIPS tekniğinde, diğer aktivasyon tekniklerinden farklı olarak lazer ucu kök kanalları içerisine değil yalnızca pulpa odasına yerleştirilmektedir. Bu özellik, minimal düzeyde genişletilmiş kök kanal preparasyonu ile endodontik sistemin dezenfeksiyonunu mümkün kılmaktadır (314). Ayrıca, kanal içi konumlandırma gerektirmemesi, bu prosedürün daha kolay uygulanmasına olanak tanımakta ve operatöre bağlı değişkenliği de azaltmaktadır. LAİ tarafından indüklenen apikal bölgedeki sıvı akış hızını belirlemek için yapılan çalışmalar, pulpa odasında veya kanal girişinde erbiyum lazerle oluşturulan kavitasyon kabarcıklarının, alttaki kanal boşluğu boyunca önemli ölçüde irrigasyon sıvısı hareketine neden olduğunu göstermiştir (315, 316).

Sİİ ile karşılaştırıldığında, bu tekniğin irrigasyon solüsyonunun dentin tübüllerine daha iyi penetre olmasını sağladığı; bunun da kök kanal duvarlarından smear tabakasının, debrislerin ve bakterilerin uzaklaştırılmasında anlamlı iyileşme oluşturduğu bildirilmiştir. Aynı zamanda, çeşitli çalışmalarda PIPS'in kanal içi medikamentleri uzaklaştırmada geleneksel irrigasyon, sonik irrigasyon, ultrasonik irrigasyon ve Er,Cr:YSGG tekniklerinden çok daha etkili olduğunu gösterilmiştir (14–17).

Er:YAG lazer tabanlı irrigasyon aktivasyon tekniklerinden biri de Şok Dalgası Destekli Emisyon Fotoakustik Akış (Shock Wave Enhanced Emission Photoacoustic Streaming–SWEEPS) tekniğidir. SWEEPS, PIPS tekniğinin temizleme ve dezenfeksiyon verimliliğini artırmak için geliştirilmiş irrigasyon aktivasyon tekniğidir. PIPS'te her emisyon döngüsünde kare dalga formuna sahip tek bir lazer atımı kullanılırken, SWEEPS'te lazer tarafından oluşturulan kabarcıkların çökmesini hızlandırmak için ideal bir zaman aralığında senkronize edilmiş ultra kısa atım çiftleri uygulanmaktadır. Bu sayede daha güçlü şok

dalgaları ve daha belirgin sıvı hareketleri oluşturularak, özellikle kök kanal sisteminin dar ve ulaşılması güç bölgelerinde irrigasyonun temizleme ve dezenfeksiyon etkinliğinin artırılması hedeflenmiştir (313, 317, 318).

2.4.2.6. Antimikrobiyal Fotodinamik Terapi

Antimikrobiyal fotodinamik tedavi (aFDT), düşük konsantrasyonda ve toksik olmayan bir fotosensitizerin uygun dalga boyundaki ışık ile aktive edilmesi sonucu reaktif oksijen türleri oluşturarak mikroorganizmaların elimine edilmesini hedefleyen bir yardımcı dezenfeksiyon yöntemidir (319). Bu süreçte oluşan fotooksidatif etki; bakteri hücre zarı, enzim sistemleri ve kromozomal DNA gibi çeşitli hücresel yapılarda hasara yol açmaktadır (320). Mikrobiyal hücrelere karşı seçici etki göstermesi ve ökaryotik hücreler üzerinde görece daha sınırlı etki oluşturması, aFDT'nin önemli üstünlüklerinden biri olarak kabul edilmektedir (321, 322).

aFDT'nin endodontide kullanım amacı, özellikle kompleks kök kanal anatomisinde geleneksel kemomekanik preparasyon ve irrigasyon yöntemleriyle ulaşılamayan bölgelerde mikrobiyal yükün azaltılmasıdır. Bu yöntemin; dentin tübülleri, lateral kanallar, istmuslar ve apikal bölgelerdeki mikroorganizmaların eliminasyonunda etkili olabileceği bildirilmiştir. Ayrıca aFDT'nin antibiyotik direnci gelişimine neden olmaması ve konak dokular üzerinde minimal invaziv etki göstermesi önemli avantajları arasında yer almaktadır. Bu nedenle bu yöntem, kök kanal dezenfeksiyonunda antibiyotiklere alternatif veya destekleyici bir yaklaşım olarak değerlendirilmektedir (323). Yapılan sistematik derleme çalışmalarında, özellikle dirençli enfeksiyonlarda konvansiyonel endodontik tedaviye ek olarak uygulanan aFDT'nin in vitro koşullarda bakteri sayısını azaltabildiği gösterilmiş; ancak klinik etkinliğinin net olarak ortaya konabilmesi için daha fazla çalışma gerektiği vurgulanmıştır (324, 325). Bununla birlikte, diğer çalışmalar ışığın dentin ve kök kanal sistemi içerisinde yeterli derinliğe ulaşamaması, fotosensitizerin karmaşık kanal anatomisine sınırlı yayılımı, çevresel oksijen miktarının azlığı ve organik artıkların varlığı gibi faktörlerin, aFDT'nin etkinliğini azaltabileceğini bildirmiştir (319, 326).

2.5. 3D Baskılı Dış Modelleri

3D baskı teknolojisi, dijital görüntüleme ve bilgisayar destekli tasarım/veri işleme süreçleriyle elde edilen verilerin katmanlı üretim prensibi ile fiziksel modele dönüştürülmesine dayanan bir üretim yöntemidir. Dış hekimliğinde bu teknoloji; kişiye özgü modelleme, tedavi planlaması, cerrahi rehber üretimi, restoratif ve protetik uygulamalar ile

eğitim amaçlı simülasyonlarda giderek daha geniş bir kullanım alanı bulmaktadır. CAD/CAM tabanlı iş akışları sayesinde 3D baskı, diş hekimliğinde daha hassas, daha hızlı ve daha bireyselleştirilmiş uygulamaların geliştirilmesine katkı sağlamaktadır.

Genel diş hekimliği pratiğinde 3D baskılı modeller; maksillofasiyal bölgenin cerrahi rekonstrüksiyonunda, implant cerrahisine yönelik rehber plakların hazırlanmasında, kron ve benzeri protetik yapıların üretiminde, ortodontik modellerin hazırlanmasında ve hastaya özgül çalışma modellerinin oluşturulmasında kullanılmaktadır. Bu yönüyle 3D baskılı modeller yalnızca laboratuvar veya eğitim materyali olarak değil, aynı zamanda tanı, tedavi planlaması ve klinik uygulama süreçlerini destekleyen araçlar olarak da önem kazanmıştır. Ayrıca dijital modellerin tekrar üretilebilir olması, saklama ve paylaşım kolaylığı sağlaması ve gerektiğinde aynı anatomik yapının yeniden basılabilmesi, bu teknolojiyi klasik alçı ve analog modellere göre daha avantajlı hâle getirmiştir (327–329).

Dijital diş hekimliğinin gelişmesiyle birlikte özellikle KIBT gibi üç boyutlu görüntüleme yöntemlerinden elde edilen verilerin 3D baskı sistemleri ile birleştirilmesi, dental yapıların yüksek doğrulukla çoğaltılmasına olanak sağlamıştır. Böylece hem hasta-özü modeller hazırlanabilmekte hem de standartlaştırılmış araştırma ve eğitim materyalleri üretilebilmektedir (330).

2.5.1. Endodontik Araştırmalarda 3D Baskı Teknolojisi

Endodontik araştırmalarda, ex vivo çalışmalar ve prelinik eğitim için temel materyal olarak uzun yıllardır çekilmiş insan dişleri kullanılmaktadır. Ancak doğal dişlerin temin edilmesindeki güçlük, etik sorunlar, çapraz enfeksiyon riski, saklama koşulları ve en önemlisi anatomik standardizasyonun sağlanamaması önemli sınırlılıkları arasında yer almaktadır. 3D baskılı diş modelleri, bu dezavantajların bir kısmını ortadan kaldırarak daha standart, tekrarlanabilir ve kontrollü araştırma ortamları oluşturulmasına olanak sağlamıştır (21, 22, 331, 332).

3D baskı teknolojisi bu noktada önemli bir alternatif sunmaktadır. Endodontik amaçlı 3D baskılı modeller genellikle mikro-BT veya KIBT gibi görüntüleme yöntemleriyle elde edilen verilerin segmentasyon ve STL dönüştürme işlemlerinden geçirilmesi, ardından uygun bir baskı tekniği ile fiziksel modele dönüştürülmesi esasına dayanır. PolyJet/MultiJet ve stereolitografi gibi yüksek çözünürlük sağlayan baskı teknikleri, özellikle ince kanal detaylarının çoğaltılmasında daha avantajlı görünmektedir (21, 22). Liang ve ark. tarafından yapılan çalışmada, KIBT ve MultiJet baskı kullanılarak elde edilen 3D baskılı yapıy

dişlerde, doğal dişlerle karşılaştırıldığında apekten 3, 6 ve 9 mm seviyelerinde kanal kesit alanları açısından anlamlı fark bulunmadığı bildirilmiştir. Aynı çalışmada 3D baskılı modellerden yararlanılarak seçilen ana gütaperkanın klinik vakalarda uygun çalışma boyu ve koniklik ile uyumlu olduğu gösterilmiştir (333). Bu bulgular, 3D baskının endodontik araştırmalarda yalnızca eğitim için değil, aynı zamanda deneysel standardizasyonu artırmak için de kullanılabileceğini göstermektedir.

3D baskılı diş modelleri, araştırma grupları arasında kanal anatomisine bağlı değişkenliğin azaltılması, incelenen sistem veya yönteme ait farkların daha net ortaya konmasına olanak tanımaktadır. Bunun yanı sıra, prelinik eğitimde öğrencilerin aynı zorluk düzeyindeki modeller üzerinde çalışabilmesine, böylece hem değerlendirme adaletinin artırılmasına hem de aşamalı beceri gelişiminin desteklenmesine olanak sağlamaktadır (331, 334).

2.5.2. 3D Baskılı Dişlerin Avantaj ve Dezavantajları

3D baskılı dişlerin en belirgin avantajı, yüksek düzeyde standardizasyon sağlamalarıdır. Doğal dişlerde kök uzunluğu, kurvatür, kanal çapı, istmus varlığı, dentin kalınlığı, yaşa bağlı dentin değişiklikleri ve önceki tedavilere bağlı morfolojik farklılıklar araştırma sonuçlarını önemli ölçüde etkileyebilmektedir (331, 332). Buna karşılık, 3D baskılı modellerde aynı dijital veriden çok sayıda benzer örnek üretilebildiği için araştırma grupları arasında daha homojen dağılım sağlanabilir ve incelenen değişkenin etkisi kanal anatomisinden daha bağımsız olarak değerlendirilebilir (21, 22, 332).

Bir diğer önemli avantaj, ulaşılabilirlik ve tekrar üretilebilirliktir. Doğal dişlerin toplanması zaman alıcıdır; uygun morfolojiye sahip yeterli örnek sayısına ulaşmak güç olabilir ve biyolojik örnek olmaları nedeniyle etik onam, dezenfeksiyon, sterilizasyon ve saklama süreçleri gerektirir. 3D baskılı modeller ihtiyaç duyulduğunda tekrar basılabilir, çekilmiş dişlerdeki gibi sıvıda saklama gerektirmez, çapraz enfeksiyon riski taşımaz ve dijital dosya olarak arşivlenebilir. Ayrıca aynı modelin farklı merkezler arasında paylaşılabılır olması, çok merkezli ya da karşılaştırmalı eğitim-araştırma uygulamaları açısından ek avantaj sunabilir (21, 22, 335).

Buna karşın 3D baskılı dişlerin en önemli sınırlılıklarından biri, kullanılan reçine veya baskı materyalinin radyopasite ve sertlik açısından insan dentinine tam olarak benzememesidir. Bu durum, özellikle öğrenciler için bir eğitim modelinin teknik

tekrarlanabilirliğini artırsa da gerçek dentin davranışının tam olarak simüle edilememesi nedeniyle sonuçların klinik ortama doğrudan aktarılmasını sınırlandırmaktadır (21, 22).

3D baskılı dişlerin bir başka önemli sınırlılığı, kullanım alanlarının her endodontik araştırma sorusu için uygun olmamasıdır. Bu modeller özellikle kanal şekli, enstrümantasyon yolu, taşma/transportasyon, bazı obtürasyon karşılaştırmaları ve eğitim simülasyonları için uygun görünse de dentin yapısının kimyasal veya biyolojik özelliklerini esas alan araştırmalarda tek başına yeterli değildir. Örneğin smear tabakası, dentin penetrasyonu, dentin yüzey değişiklikleri ya da biyofilm uzaklaştırma gibi konular doğal doku özelliklerine bağlı olduğundan, salt reçine esaslı 3D baskılı modeller bu soruları güvenilir biçimde yanıtlamayabilir. Bu eksikliği azaltmak amacıyla dentin parçaları içeren hibrit modeller önerilmiş olsa da bu yaklaşımlar henüz yaygın standart hâline gelmemiştir (22, 336).

Üretim sürecinin kendisi de ayrı bir limitasyon kaynağıdır. 3D baskılı bir diş modeli; görüntü elde etme, segmentasyon, stl dosyası oluşturma, yazılım tabanlı düzeltme, baskı parametrelerinin seçimi, baskı işlemi ve baskı sonrası temizleme/polimerizasyon gibi çok sayıda basamaktan oluşur. Bu aşamaların her biri hata üretebilir. Özellikle kaynak görüntünün çözünürlüğü, stl dosyasındaki üçgen sayısı, yazılımın segmentasyon performansı ve baskı materyalinin görüntüleme özellikleri son modelin doğruluğunu doğrudan etkiler. Kulczyk ve ark. tarafından aktarılan veriler, mikro-BT temelli dosyaların çok yüksek ayrıntı sunduğunu; ancak aşırı büyük stl dosyalarının yazılım işleme yükünü artırdığını göstermektedir. Bu nedenle yalnızca yüksek çözünürlük yeterli olmayıp, iş akışının tamamının standartlaştırılması gerekmektedir (337).

Günümüzde, metodolojik standardizasyon eksikliği hâlen önemli bir sorundur. Farklı çalışmalar farklı görüntüleme cihazları, farklı yazılımlar, farklı segmentasyon protokolleri, farklı baskı materyalleri ve farklı baskı sonrası işleme yöntemleri kullandığından, elde edilen sonuçların doğrudan karşılaştırılması güçleşmektedir. Bu heterojenlik, literatürde 3D baskılı dişlerin umut verici bulunmasına rağmen henüz “tek tip” bir araştırma standardı oluşturulamamasının temel nedenlerinden biridir. Bu nedenle gelecekte, dentine daha çok benzeyen materyallerin geliştirilmesi, destek materyalinin tam uzaklaştırılmasına yönelik doğrulanmış protokollerin oluşturulması ve iç kanal morfolojisinin doğruluğunu geniş örnekleme test eden çalışmaların artırılması gerektiği bildirilmiştir (21, 22, 331).

3. GEREÇ VE YÖNTEM

3.1. Çalışmanın Tasarımı

Bu çalışma, insan ya da hayvan kaynaklı biyolojik materyal kullanılmaksızın, 3D baskı yöntemiyle üretilmiş standart deneysel modeller üzerinde yürütüldüğünden etik kurul onayı gerektirmemiştir.

Çalışmamızdaki örnekler kanal içi medikament yerleştirilmesi, irrigasyon prosedürleri ve aktivasyon yöntemlerinin uygulanması Karadeniz Teknik Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi Endodonti Anabilim Dalı'nda, stereomikroskop görüntüleme ise Merkezi Araştırma Laboratuvarı'nda gerçekleştirildi.

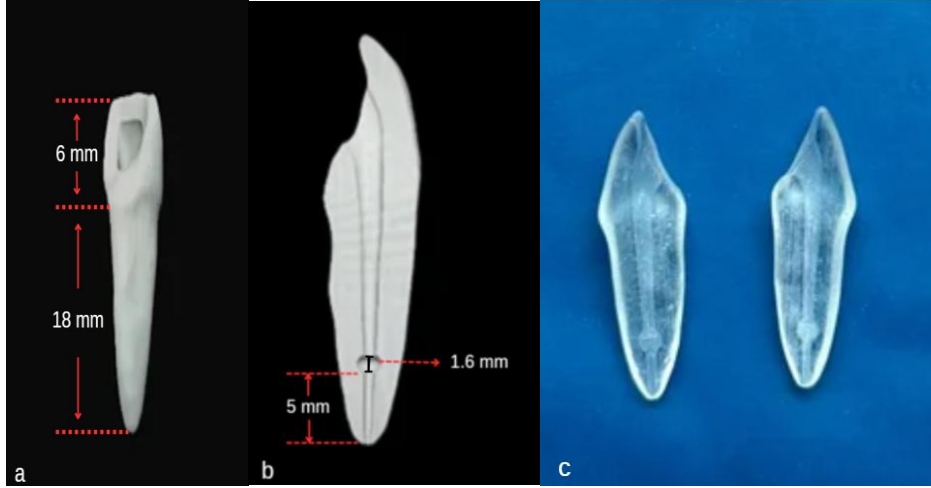
3.2. Örneklem Büyüklüğü ve Güç Analizi

Örneklem büyüklüğü hesaplaması, önceki bir çalışmadan (165) elde edilen veriler esas alınarak G*Power 3.1.9.7 yazılımı aracılığıyla yapıldı. Etki büyüklüğü 0.25, alfa hata düzeyi 0.05 ve istatistiksel güç 0.95 olarak kabul edildiğinde, her bir grup için en az 11 örneğin yeterli olduğu belirlendi. Negatif ve pozitif kontrol gruplarında 10'ar örneğin, toplamda ise en az 240 örneğin araştırmaya dâhil edilmesine karar verildi.

3.3. 3D Baskılı Diş Modellerinin Hazırlanması

İKR'li kalıcı maksiller kesici diş morfolojisini temsil eden 3D baskılı diş modelleri, belirlenen parametrelere uygun biçimde bir üretici firma (EduDent Eğitim Materyalleri, İstanbul, Türkiye) tarafından çalışmaya özel olarak tasarlandı. Kullanılan rezin diş modelleri; 6 mm kron uzunluğu, 18 mm kök uzunluğu ve giriş kavitesini simüle eden 5 mm çaplı konik bir koronal rezervuara sahip olacak şekilde tasarlandı. Kök kanalları, 0.5 mm apikal çap ve 0.05 koniklik parametreleri ile standartlaştırıldı. Rezorpsiyon kavitesi ise 1.6 mm çapında ve 0.8 mm derinliğinde olacak şekilde apeks seviyesinden 5 mm uzaklıkta konumlandırıldı. Tüm diş modelleri iki parça olarak üretildi (Resim 1).

3D baskılı diş modellerinin tasarımı Meshmixer (San Rafael, CA, ABD) yazılımı ile gerçekleştirilerek STL formatında kaydedildi. Modeller, Anycubic Photon M3 Max (Londra, ABD) 3D yazıcı kullanılarak 6 480 × 3 600 piksel çözünürlükte basıldı. Baskı materyali olarak şeffaf, üretilen-akrilat bazlı, ışığa duyarlı bir rezin tercih edildi.



Resim 1. Çalışmada kullanılan resin diş modelinin şematik gösterimi: **(a)** 6 mm kron uzunluğu, 18 mm kök uzunluğu ve 5 mm çaplı konik koronal rezervuardan oluşan genel model tasarımı; **(b)** apeks seviyesinden 5 mm uzaklıkta konumlandırılan, 1.6 mm çapında ve 0.8 mm derinliğindeki rezorpsiyon kavitesi; **(c)** baskı sonrasında elde edilen 3D şeffaf diş modeli

3.4. Kanal İçi Medikamentlerin Uygulanması

Çalışmada kullanılan 3D baskılı resin diş modelleri, uygulanacak kanal içi medikamente göre iki çalışma grubuna ayrıldı. Gruplar aşağıdaki şekilde oluşturuldu ve her grupta eşit sayıda örnek olacak şekilde standardizasyon sağlandı ($n = 115$). Negatif kontrol grubunda ise ($n = 10$) kanal içi medikament uygulanmadı.

- Grup 1: CH uygulanan örnekler
- Grup 2: Bio-C Temp uygulanan örnekler

Grup 1: Bu çalışma grubunda, CH içerikli bir kök kanal medikamenti olan Ultracal XS (Lot No: C3PBV; Ultradent Products Inc, South Jordan, ABD) kullanıldı (Resim 2). 3D baskılı dişlerin kök kanalı ve İKR kaviteleri, üretici firmanın önerdiği NaviTip 29 G uç (Ultradent, ABD) kullanılarak apikalden koronale doğru, kök kanalı ve rezorpsiyon kavitesi tamamen dolu olacak şekilde Ultracal XS ile dolduruldu (20) (Resim 3). Bu işlem, 3D baskılı dişlerin her bir yarısı için tekrarlandı ve toplamda bir diş için 0.04 mL Ultracal XS kullanıldı.



Resim 2. Ultracal XS



Resim 3. Ultracal XS'nin örneklere uygulanması

Medikamentlerin yerleştirilmesinin ardından, 3D baskılı dişlerin iki yarım parçası daha önce tanımlanmış bir metodolojiye göre siyanoakrilat yapıştırıcı (Pattex, Henkel, İrlanda) kullanılarak sabitlendi. Dişlerin koronal açıklıkları pamuk pelet ve geçici dolgu maddesi (Dentac Fillart, Meta Biomed, Kore) ile kapatıldı. Ardından, polivinil siloksan ölçü materyali (Addcosil Silicones, Efes Dental, Bursa, Türkiye) ile modifiye edilmiş 1.5 mL Eppendorf tüplerine yerleştirildi (18) (Resim 4).



Resim 4. Eppendorf tüpüne yerleştirilmiş diş örneği

Örnekler, klinik durumu taklit etmek için 37 °C’de ve >%95 bağıl nemde bir inkübatörde (Elektro-mag, İstanbul, Türkiye) 2 hafta boyunca bekletildi (20) (Resim 5).

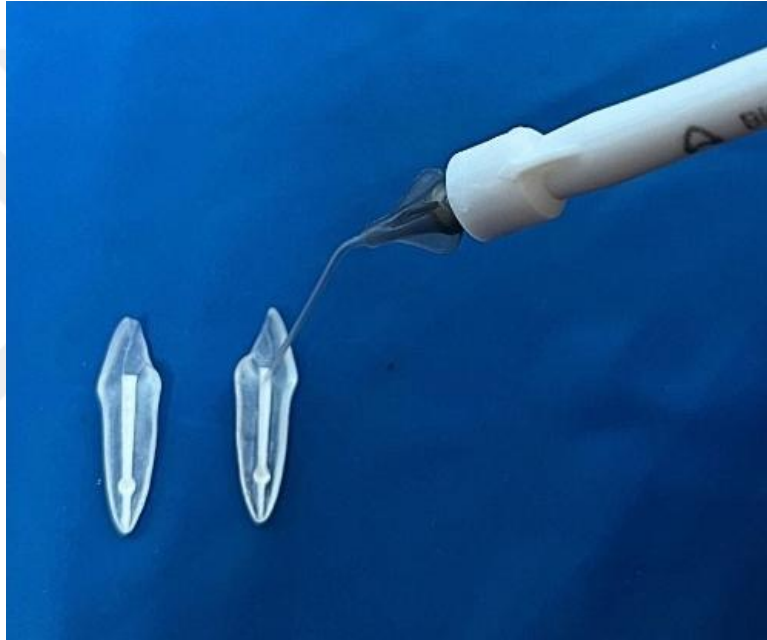


Resim 5. 3D baskılı dişlerin saklandığı inkübatör

Grup 2: Bu çalışma grubunda, biyoseramik esaslı kök kanal medikamenti olan Bio-C Temp (Lot No: 73203; Angelus, Londrina, Brezilya) kullanıldı (Resim 6). Tüm örneklerin kök kanalı ve İKR kavimleri üretici firmanın önerdiği şırınga ve iğne sistemi kullanılarak apikalden koronale doğru Bio-C Temp ile tamamen dolduruldu ve toplamda bir diş için 0.04 mL Bio-C Temp kullanıldı (Resim 7). Daha sonra Grup 1’de belirtildiği gibi örnekler hazırlanıp 2 hafta boyunca inkübatörde bekletildi.



Resim 6. Bio-C Temp



Resim 7. Bio-C Temp'in örneklere uygulanması

3.5. Kanal İçi Medikamentlerin Uzaklaştırılması

Ultracal XS ve Bio-C Temp gruplarından 5'er diş pozitif kontrol grubu olarak tutuldu ve medikament uzaklaştırılması yapılmadı. Geriye kalan diş örneklerinden her bir kanal içi medikament grubu (n = 110), kullanılan irrigasyon solüsyonuna göre iki alt gruba ayrıldı (n = 55).

%9 Etidronik asit grubu: Bu grupta, kanal içi medikamenti uzaklaştırmak amacıyla %9 etidronik asit solüsyonu kullanıldı. %9 etidronik asit solüsyonu, Dual Rinse HEDP (Medcem, Weinfelden, İsviçre) kullanılarak elde edildi (Resim 8). Bu amaçla, Dual Rinse

HEDP'nin bir kapsülündeki 0.9 g etidronik asit tozu, 10 mL %5.25 NaOCl ile karıştırıldı ve solüsyon taze hazırlanıp kullanıldı.

%5.25 NaOCl/%17 EDTA grubu: Bu grupta, kanal içi medikamenti uzaklaştırmak amacıyla %5.25 NaOCl ve %17 EDTA solüsyonları ardışık olarak kullanıldı (Resim 9).

Çalışma gruplarındaki dişlerin geçici restorasyonları kaldırıldıktan sonra medikamentin gevşetilmesi ve irrigasyon iğnesi için yer açılması amacıyla kök kanalına 15 numara K tipi ege (Dentsply Maillefer) yerleştirildi (18). İrrigasyon, 2.5 mL'lik kilitli enjektör ve ucu kapalı yandan açılı 29 G endodontik iğne kullanılarak yapıldı (Resim 10).



Resim 8. Dual Rinse HEDP



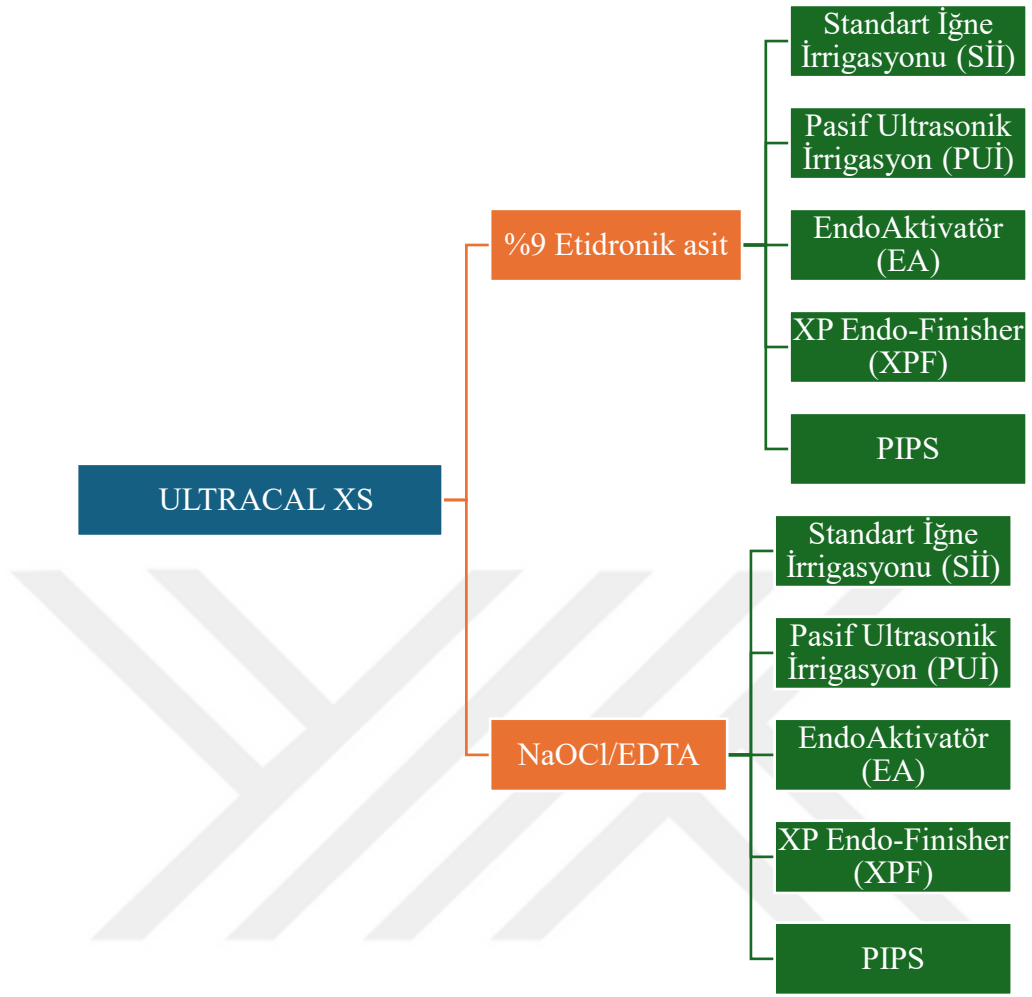
Resim 9. (a) NaOCl solüsyonu ve (b) EDTA solüsyonu



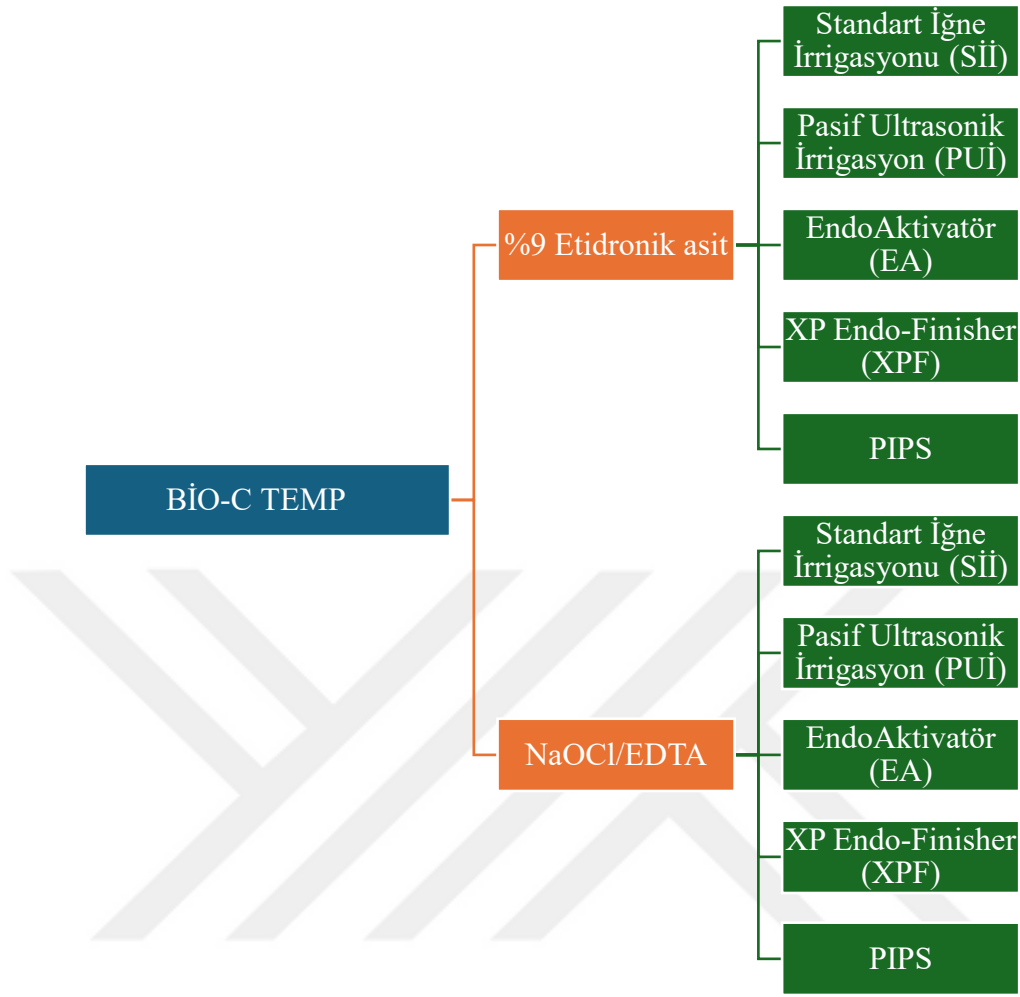
Resim 10. Kilitli enjektör ve yandan açılı 29 G endodontik iğne

3.6. İrrigasyon Aktivasyon Yöntemlerinin Uygulanması

Çalışma grupları, kanal içi medikamentlerin (Ultracal XS ve Bio-C Temp) uzaklaştırılması amacıyla kullanılan irrigasyon solüsyonlarının (%9 etidronik asit ve NaOCl/EDTA) aktivasyon yöntemine göre beşer ayrı alt gruba ayrıldı. Toplamda 20 çalışma grubu oluşturuldu (Şekil 2-3).



Şekil 2. Ultracal XS kullanılan çalışma gruplarının şematik gösterimi



Şekil 3. Bio-C Temp kullanılan çalışma gruplarının şematik gösterimi

3.6.1. Standart İğne İrrigasyonu

Bu çalışma grubunda, çalışma boyundan 1 mm kısa olacak şekilde yerleştirilen 29 G endodontik iğne, kanal içerisinde takılmadan 1 dakika boyunca ileri-geri hareketlerle kullanıldı (20). %9 etidronik asit kullanılan gruplar toplamda 6 mL etidronik asit solüsyonu ile muamele edildi ve işlem sonunda kök kanalları 5 mL distile su ile yıkandı.

NaOCl/EDTA solüsyonu kullanılan gruplarda; kök kanallarına 29 G yandan açılı endodontik iğne yardımıyla öncelikle 3 mL %5.25 NaOCl solüsyonu uygulandı ve kanal içerisinde takılmadan hafif ileri-geri hareketlerle irrigasyon yapıldı. Daha sonra aynı şekilde 3 mL %17 EDTA solüsyonu ile irrigasyon yapıldı. Son olarak kök kanalı 5 mL distile su ile yıkandı.

3.6.2. Pasif Ultrasonik İrrigasyon

Etidronik asit grubundaki örneklerin kök kanalına 29 G yandan açılı endodontik iğne aracılığıyla çalışma boyundan 1 mm kısa olacak şekilde 2 mL %9 etidronik asit solüsyonu uygulandı. Ardından, P5 Newtron XS ultrasonik cihazına (Acteon North America, Mount Laurel, NJ, ABD) takılı IRR 20/25 paslanmaz çelik uç (0.20 mm; 25 mm; Irrisafe, Satelec–Acteon Group, Mérignac, Fransa) çalışma boyunun 1 mm gerisinde konumlandırıldı (18) (Resim 11 ve 12). Üreticinin talimatları doğrultusunda güç seviyesi 8 konumuna getirilerek irrigasyon solüsyonu 20 saniye süreyle aktive edildi (18). Aktivasyon sırasında ultrasonik uç, kanal duvarlarına temas etmeyecek şekilde yaklaşık 2–3 mm’lik ileri-geri hareketlerle kullanıldı (20). Bu işlem üç döngü olacak şekilde tekrarlandı. Böylece, toplam 6 mL (2 mL $\times$ 3) %9 etidronik asit solüsyonu 1 dakika boyunca (20 sn $\times$ 3) PUI ile aktive edildi. Her bir ultrasonik uç en fazla dört dişte kullanıldıktan sonra yenisi ile değiştirildi (18). İşlem sonunda kök kanalı 5 mL distile su ile yıkandı.



Resim 11. P5 Newtron XS ultrasonik cihazı



Resim 12. Irrisafe ultrasonik uçlar

NaOCl/EDTA grubunda, kök kanalları 29 G yandan açılı irrigasyon iğnesi kullanılarak önce 1 mL %5.25 NaOCl ile irrigate edildi. Bunu takiben, kanal içerisindeki NaOCl solüsyonu 10 saniye süreyle ultrasonik olarak aktive edildi. Bu işlem toplam üç döngü olacak şekilde tekrarlandı ve toplamda 3 mL NaOCl solüsyonu 30 sn boyunca aktive edildi (338). Aynı işlem 3 mL %17 EDTA solüsyonu için de gerçekleştirilerek 30 sn boyunca aktive edildi. Son aşamada kök kanalı 5 mL distile su ile irrigate edilerek işlem tamamlandı.

3.6.3. EndoAktivatör

%9 etidronik asit grubunda, kök kanalları önce 2 mL %9 etidronik asit solüsyonu ile irrigate edildi. Sonik aktivasyon gerçekleştirmek amacıyla EA cihazına takılan 25/04 kırmızı EA uç (Dentsply Maillefer), çalışma uzunluğunun 2 mm gerisinde olacak şekilde kanala yerleştirildi ve irrigasyon solüsyonu 20 sn boyunca aktive edildi (17) (Resim 13). Aktivasyon sırasında EA uç kanal duvarlarına temas ettirilmeden yaklaşık 2–3 mm’lik ileri-geri hareket ettirildi (20). Bu işlem üç döngü olacak şekilde tekrarlandı. Bunun sonucunda toplam 6 mL (2 mL × 3) %9 etidronik asit solüsyonu 1 dakika boyunca (20 sn × 3) sonik aktivasyon ile aktive edildi. Daha sonra 5 mL distile su ile irrigasyon yapıldı.

NaOCl/EDTA grubunda, kök kanalları 1 mL %5.25 NaOCl ile irrigate edildikten sonra EA ile 10 sn boyunca aktivasyon gerçekleştirildi. Bu işlem üç döngü olacak şekilde tekrarlandı ve toplam 3 mL NaOCl solüsyonu 30 sn boyunca aktive edildi (338). Daha sonra kök kanalına 1 mL %17 EDTA solüsyonu uygulandı ve 10 saniye boyunca EA ile sonik aktivasyona tabi tutuldu. Bu işlem üç kez tekrar edildi ve toplam 3 mL EDTA solüsyonu 30

sn boyunca aktive edildi. Toplam irrigasyon solüsyonu 6 mL ve toplam aktivasyon süresi 1 dk olacak şekilde tamamlandı. Son olarak 5 mL distile su ile irrigasyon yapıldı.

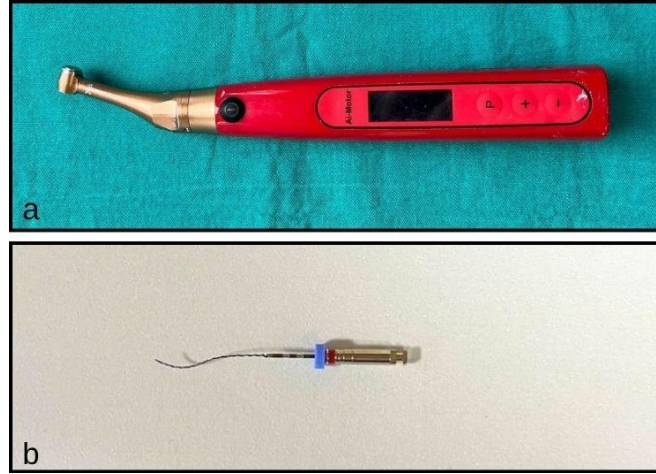


Resim 13. (a) EA sonik irrigasyon cihazı; (b) 25/04 kırmızı EA ucu

3.6.4. XP-endo Finisher

XPF sisteminin vücut sıcaklığına yakın koşullarda çalıştırılması amacıyla, irrigasyon solüsyonları uygulama öncesinde 37 °C'ye ısıtıldı. Bu işlem için solüsyonlar, deney öncesinde steril enjektörlere/kaplara alınarak sıcak su içeren bir kap içerisinde bekletildi. Su banyosunun sıcaklığı dijital termometre ile kontrol edildi ve solüsyon sıcaklığının 37 °C'ye ulaşması sağlandı. Sıcaklığın deney süresince mümkün olduğunca sabit kalabilmesi amacıyla ölçümler belirli aralıklarla tekrarlandı ve gerekli durumlarda sıcak su ilavesi yapılarak sıcaklık 37 °C olarak korundu (339).

%9 etidronik asit grubunda, kök kanalına 29 G yandan açılı irrigasyon iğnesi aracılığıyla, 2 mL %9 etidronik asit solüsyonu uygulandı. Üreticinin belirtmiş olduğu 1 000 dev/dk ve 1 N·cm torkta rotasyon moduna ayarlanan Ai-Motor endomotoruna (Woodpecker DTE, Çin) takılan XPF egesi (FKG Dentaire, La-Chaux-de-Fonds, İsviçre), irrigasyon solüsyonu ile doldurulmuş kök kanalına yerleştirildi (284) (Resim 14). XPF egesi 20 saniye boyunca 7–8 mm'lik dikey hareketlerle tam çalışma boyunca aktive edildi (20). Bu döngü iki kez daha tekrarlandı. Toplam 6 mL (2 mL × 3) %9 etidronik asit solüsyonu 1 dakika boyunca (20 sn × 3) XPF egesi ile aktive edildi. Son aşamada, kök kanalı 5 mL distile su ile yıkandı.

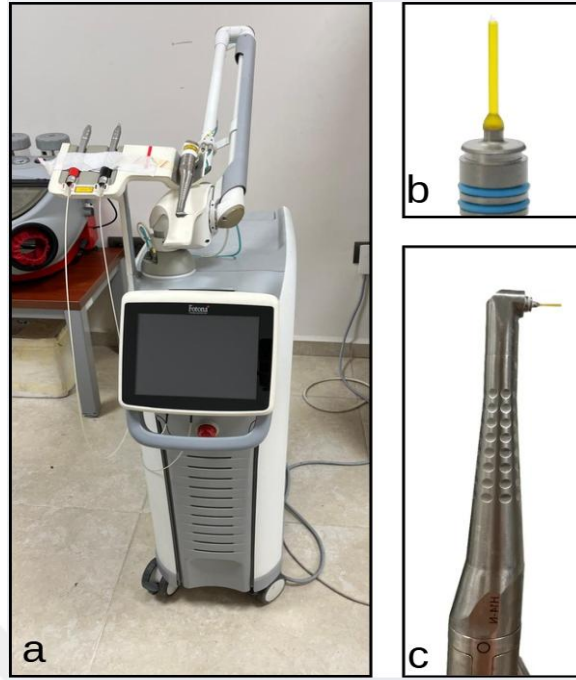


Resim 14. (a) Ai-Motor endomotor; (b) XP-endo Finisher eğesi

NaOCl/EDTA grubunda kök kanalları önce 1 mL %5.25 NaOCl solüsyonu ile irrigate edildi. Kanal içindeki NaOCl solüsyonu XPF eğesi ile 10 sn boyunca aktive edildi. Bu işlem üç döngü olacak şekilde tekrarlandı ve toplam 3 mL NaOCl solüsyonu 30 sn boyunca aktive edildi. Aynı işlem toplam 3 mL %17 EDTA solüsyonu için de gerçekleştirildi. Böylece toplam 6 mL irrigasyon solüsyonu 1 dk boyunca aktive edildi. Daha sonra kök kanalları 5 mL distile su ile yıkandı.

3.6.5. Lazer ile Aktive Edilen İrrigasyon

İrrigasyon solüsyonunun aktivasyonu için 2 940 nm dalga boyuna sahip Er:YAG lazer cihazı (Fotona LightWalker, Ljubljana, Slovenya) kullanıldı (Resim 15). Üretici firma talimatları doğrultusunda cihaz ayarları 0.3 W, 15 Hz, 20 mJ havasız ve susuz mod olarak ayarlandı. Dişlerin erişim boşluğuna H14 el aletine takılan düz uçlu fiber PIPS ucu (600/9, Fotona, Slovenya) yerleştirildi ve sabit pozisyonda 2 mL %9 etidronik asit solüsyonu 20 sn boyunca aktive edildi (318) (Resim 16). Toplamda 6 mL (2 mL $\times$ 3) %9 etidronik asit solüsyonu kullanıldı ve 1 dakika boyunca (20 sn $\times$ 3) PIPS ile aktivasyon gerçekleştirildi. Son aşamada, kök kanalı 5 mL distile su ile yıkandı.



Resim 15. Er: YAG lazer sistemi ve PIPS bileşenleri: **(a)** Er:YAG lazer cihazı; **(b)** PIPS fiber ucu; **(c)** H14 el aleti



Resim 16. PIPS ile irrigasyon aktivasyonunun uygulanması

NaOCl/EDTA grubunda ise kök kanalları önce 1 mL %5.25 NaOCl solüsyonu ile irrigate edildi. Kanal içindeki NaOCl solüsyonu 10 sn boyunca lazer ile aktive edildi. Bu işlem toplam üç döngü olacak şekilde tekrarlanarak, 3 mL NaOCl solüsyonu 30 sn boyunca aktive edildi. Aynı işlem 3 mL %17 EDTA solüsyonu için de gerçekleştirildi. Toplam irrigasyon

solüsyonu diğer gruplarda olduğu gibi 6 mL ve toplam aktivasyon süresi 1 dk olacak şekilde tamamlandı. En son 5 mL distile su ile yıkama yapıldı.

İrrigasyon aktivasyon prosedürleri tamamlandıktan sonra tüm gruplardaki dişlerin kök kanalları kâğıt kon yardımı ile kurulandı.

3.7. Örneklerin Değerlendirilmesi

Diş örnekleri Eppendorf tüplerinden çıkarıldıktan sonra, her bir örnek, mine keskisi yerleştirilerek hafif bir basınç uygulanmak suretiyle bukkal-lingual olarak ikiye ayrıldı (Resim 17).



Resim 17. Bir diş örneğinin ikiye ayrılmış temsili görüntüsü (Ultracal XS-HEDP-PIPS grubu)

3.7.1. Görüntüleme Yöntemi

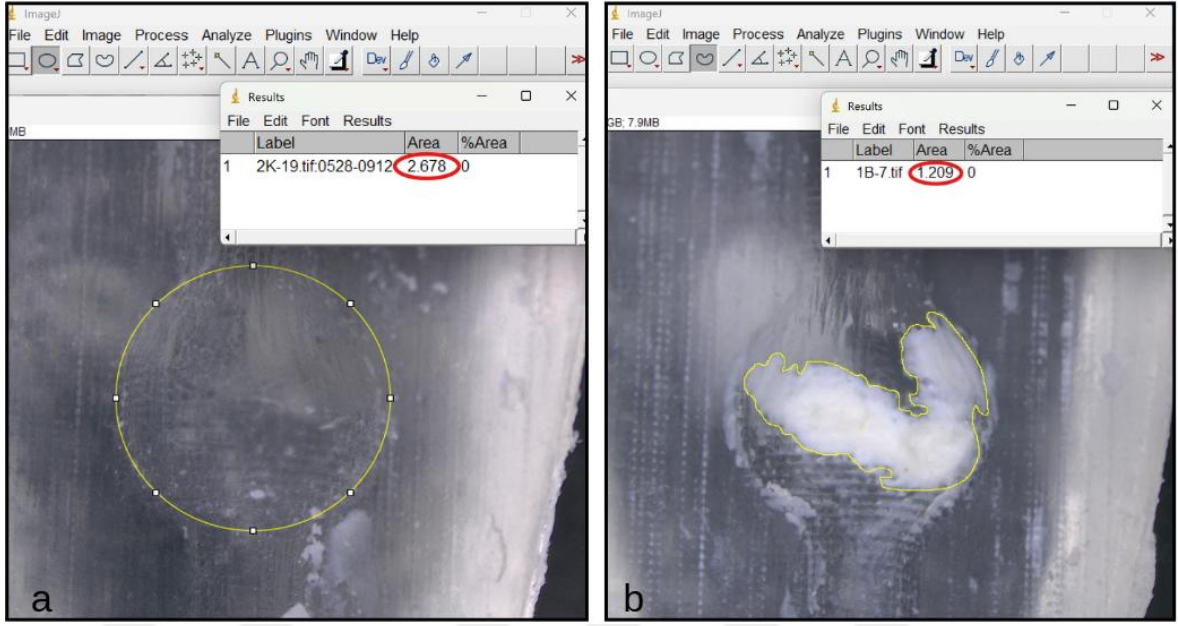
Her kök yarımının simüle edilmiş iç rezorpsiyon boşluğunun dijital görüntüleri, bir stereomikroskoba (Olympus SZ61, Olympus, Tokyo, Japonya) takılı dijital kamera kullanılarak 20× büyütmede kaydedildi (Resim 18). Tüm örneklerin stereomikroskopta görüntülenmesi, bu konuda eğitilmiş ve kalibrasyonu yapılmış tek bir araştırmacı (Ş.K.G.) tarafından gerçekleştirildi.



Resim 18. Olympus SZ61 stereomikroskop sistemi

Alınan dijital görüntüler, rezorpsiyon kavitesinden uzaklaştırılamayan medikamentlerin hesaplanması amacıyla ImageJ görüntü yazılımına (ImageJ sürüm 1.47v, National Institutes of Health, ABD) aktarıldı. Hesaplama yapılırken, her örnekteki rezorpsiyon kavitesinin dış sınırları manuel olarak belirlendi ve bu alan %100 referans kabul edildi. Daha sonra rezorpsiyon kavitesi içerisinde kalan medikamentin yüzey alanı manuel olarak çizilerek ölçüldü ve toplam rezorpsiyon kavitesinin alanına oranlanarak yüzdelik olarak ifade edildi (Resim 19).

$$\text{Kalan medikament miktarı (\%)} = (\text{Rezorpsiyon kavitesi içerisinde kalan medikamentin yüzey alanı} / \text{Rezorpsiyon kavitesinin toplam yüzey alanı}) \times 100$$

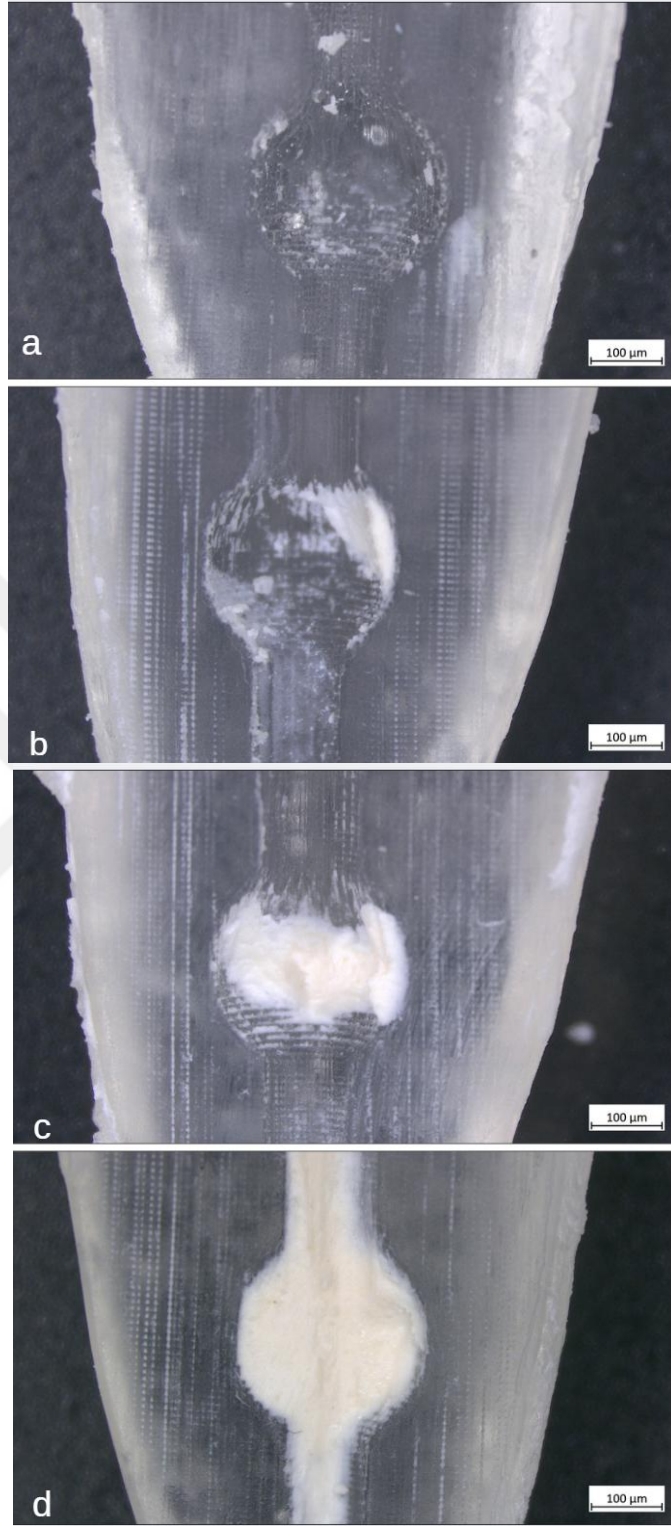


Resim 19. (a) ImageJ yazılımı ile İKR kavitesinin dış sınırlarının ölçümü; **(b)** İKR kavitesinde kalan medikament alanının ölçülmesi

3.7.2. Skorlamanın Yapılması

Elde edilen yüzdelik değerler, van der Sluis ve ark. (65) tarafından tanımlanan puanlama sistemi kullanılarak değerlendirildi. Stereomikroskopik görüntüler, çalışmaya körlenmiş ve önceden kalibre edilmiş iki bağımsız araştırmacı tarafından ayrı ayrı incelenmiş ve puanlandı (Resim 20).

- 0 = Kavite tamamen temiz
- 1 = Kavitenin $<50\%$ 'si kanal içi medikamentle dolu
- 2 = Kavitenin $>50\%$ 'si kanal içi medikamentle dolu
- 3 = Kavite tamamen kanal içi medikamentle dolu



Resim 20. Simüle İKR kavitesinde kalan medikament miktarının değerlendirilmesinde kullanılan temsili stereomikroskopik görüntüler ve skarlama sistemi: **(a)** Skor 0; **(b)** Skor 1; **(c)** Skor 2; **(d)** Skor 3

3.8. İstatistiksel Analiz

Verilerin istatistiksel analizi IBM SPSS Statistics v23 programı kullanılarak gerçekleştirildi. Gözlemciler arası uyumu analiz etmek için Cohen'in kappa testi kullanıldı. Üç ve üzeri bağımsız grubun medikament kalıntı skorları açısından karşılaştırılmasında Kruskal-Wallis H testi kullanıldı. Kruskal-Wallis H testi sonucunda istatistiksel olarak anlamlı farklılık saptanan karşılaştırmalarda, farklılığın hangi gruplardan kaynaklandığını belirlemek amacıyla Dunn çoklu karşılaştırma testi kullanıldı. İki bağımsız grubun karşılaştırılmasında Mann-Whitney U testi kullanıldı. Tanımlayıcı istatistikler sayı ve yüzde [n (%)] olarak sunuldu. İstatistiksel anlamlılık düzeyi $p < 0.05$ olarak kabul edildi.



4. BULGULAR

Simüle internal rezorpsiyon kavitelerinde kalan kanal içi medikament miktarları stereomikroskop altında değerlendirildi. Tüm gruplarda belirli miktarda medikament kalıntısı gözlenirken, hiçbir yöntemin kanal içi medikamenti tamamen uzaklaştıramadığı belirlendi. Negatif kontrol grubunda değerlendirilen yüzeylerin tamamı skor 0, pozitif kontrol grubunda ise tamamı skor 3 olarak değerlendirildi. İki değerlendirici arasındaki uyumun değerlendirilmesi amacıyla yapılan analiz sonucunda, gözlemciler arası uyumun %97,4 olduğu belirlendi.

4.1. Ultracal XS Uygulanan Gruplarda Medikament Kalıntı Skorlarının Karşılaştırılması

Çalışmamızda Ultracal XS uygulanan gruplara ait medikament kalıntı skorlarının sayı ve yüzde dağılımları Tablo 1’de, grafiksel dağılımları ise Şekil 4’te gösterilmiştir. Düşük skor değerleri daha az medikament kalıntısını ifade etmektedir. Yapılan istatistiksel analizler sonucunda gruplar arasında istatistiksel olarak anlamlı farklılık bulundu ($p < 0,001$).

HEDP kullanılan Ultracal XS grupları değerlendirildiğinde, Ultracal XS-HEDP-PIPS ve Ultracal XS-HEDP-XPF gruplarının Ultracal XS-HEDP-Sİİ ve Ultracal XS-HEDP-EA gruplarına göre istatistiksel olarak anlamlı düzeyde daha fazla medikament uzaklaştırdığı belirlendi ($p < 0,001$). Buna karşın, Ultracal XS-HEDP-PIPS ve Ultracal XS-HEDP-XPF gruplarında gözlenen medikament kalıntı skorlarının Ultracal XS-HEDP-PUİ grubuna göre daha düşük olduğu belirlendi; ancak bu fark istatistiksel olarak anlamlı değildi ($p > 0,05$). Ayrıca, Ultracal XS-HEDP-PUİ grubunda gözlenen skorlar Ultracal XS-HEDP-Sİİ ve Ultracal XS-HEDP-EA gruplarına göre daha düşük olmasına rağmen gruplar arasında anlamlı farklılık saptanmadı ($p > 0,05$). Ultracal XS-HEDP-EA ve Ultracal XS-HEDP-Sİİ ile aktive edilen gruplar arasında ise istatistiksel olarak anlamlı farklılık bulunmadı ($p > 0,05$).

NaOCl/EDTA kullanılan Ultracal XS grupları değerlendirildiğinde, en düşük medikament kalıntı skorları Ultracal XS-NaOCl/EDTA-PIPS grubunda gözlemlendi. Bununla birlikte, Ultracal XS-NaOCl/EDTA-PIPS, Ultracal XS-NaOCl/EDTA-XPF ve Ultracal XS-NaOCl/EDTA-PUİ grupları arasında istatistiksel olarak anlamlı farklılık bulunmadı ($p > 0,05$). Buna karşın, Ultracal XS-NaOCl/EDTA-PIPS ve Ultracal XS-NaOCl/EDTA-PUİ gruplarının, Ultracal XS-NaOCl/EDTA-EA grubuna göre istatistiksel olarak anlamlı düzeyde daha fazla medikament uzaklaştırdığı belirlendi ($p < 0,001$). Ultracal XS-

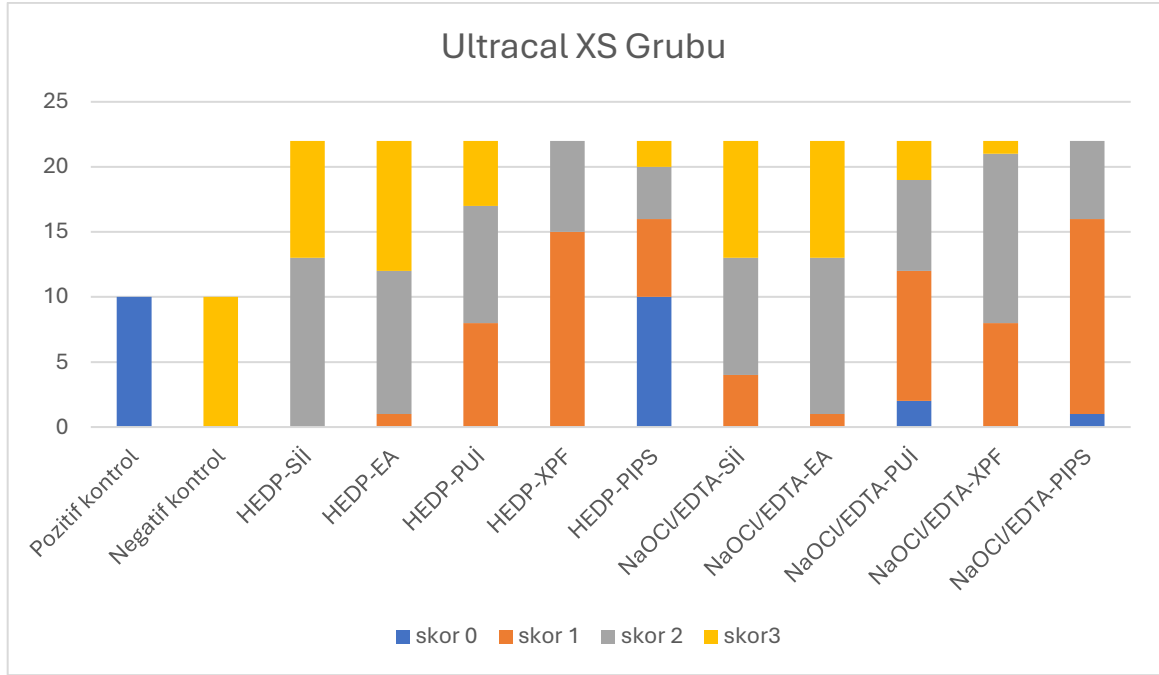
NaOCl/EDTA-EA ve Ultracal XS-NaOCl/EDTA-Siİ ile aktive edilen gruplar arasında ise istatistiksel olarak anlamlı farklılık bulunmadı ($p>0,05$).

Aynı aktivasyon yöntemi altında değerlendirilen irrigasyon solüsyonları karşılaştırıldığında, Siİ, EA, PUİ, XPF ve PIPS ile aktive edilen grupların hiçbirinde HEDP ve NaOCl/EDTA arasında istatistiksel olarak anlamlı fark bulunmadı ($p>0,05$).

Tablo 1. İrrigasyon solüsyonu, aktivasyon yöntemi ve kanal içi medikament kombinasyonlarına göre medikament kalıntı skorlarının karşılaştırılması

Gruplar		n (N)	Skor				Harflendirme	
			0	1	2	3		
Pozitif Kontrol Grubu		10 (20)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	20 (100)	-	
Negatif Kontrol Grubu		10 (20)	20 (100)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	-	
Bio-C Temp	HEDP	Siİ	11 (22)	0 (0)	0 (0)	11 (50)	11 (50)	a
		EA	11 (22)	0 (0)	0 (0)	13 (59,1)	9 (40,9)	a
		PUİ	11 (22)	0 (0)	2 (9,1)	18 (81,8)	2 (9,1)	abce
		XPF	11 (22)	0 (0)	14 (63,6)	7 (31,8)	1 (4,5)	cde
		PIPS	11 (22)	5 (22,7)	7 (31,8)	10 (45,5)	0 (0)	de
	NaOCl/ EDTA	Siİ	11 (22)	0 (0)	0 (0)	18 (81,8)	4 (18,2)	abc
		EA	11 (22)	0 (0)	0 (0)	14 (63,6)	8 (36,4)	ab
		PUİ	11 (22)	0 (0)	8 (36,4)	12 (54,5)	2 (9,1)	abcde
		XPF	11 (22)	5 (22,7)	5 (22,7)	9 (40,9)	3 (13,6)	bcde
		PIPS	11 (22)	0 (0)	19 (86,4)	3 (13,6)	0 (0)	d
Ultracal XS	HEDP	Siİ	11 (22)	0 (0)	0 (0)	13 (59,1)	9 (40,9)	a
		EA	11 (22)	0 (0)	1 (4,5)	11 (50)	10 (45,5)	a
		PUİ	11 (22)	0 (0)	8 (36,4)	9 (40,9)	5 (22,7)	abcde
		XPF	11 (22)	0 (0)	15 (68,2)	7 (31,8)	0 (0)	de
		PIPS	11 (22)	10 (45,5)	6 (27,3)	4 (18,2)	2 (9,1)	d
	NaOCl/ EDTA	Siİ	11 (22)	0 (0)	4 (18,2)	9 (40,9)	9 (40,9)	abc
		EA	11 (22)	0 (0)	1 (4,5)	12 (54,5)	9 (40,9)	ab
		PUİ	11 (22)	2 (9,1)	10 (45,5)	7 (31,8)	3 (13,6)	bcde
		XPF	11 (22)	0 (0)	8 (36,4)	13 (59,1)	1 (4,5)	abcde
		PIPS	11 (22)	1 (4,5)	15 (68,2)	6 (27,3)	0 (0)	de

n: Örnek sayısı, N: Değerlendirilen toplam yüzey sayısı, Siİ: Standart İğne İrrigasyonu, EA: EndoAktivatör, PUİ: Pasif Ultrasonik İrrigasyon, XPF: XP Endo Finisher, PIPS: Fotonla İndüklenen Akustik Akış. Aynı harfe sahip gruplar arasında anlamlı fark yoktur.



Şekil 4. Ultracal XS uygulanan gruplara ait medikament kalıntı skorlarının dağılımı

4.2. Bio-C Temp Uygulanan Gruplarda Medikament Kalıntı Skorlarının Karşılaştırılması

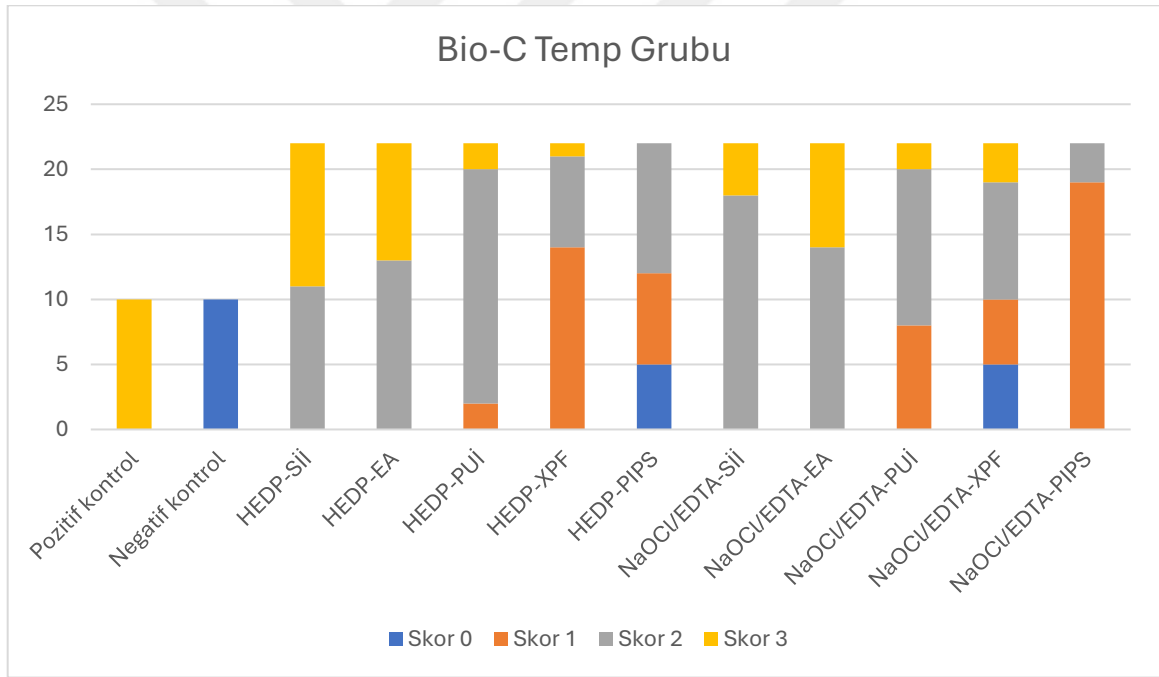
Bio-C Temp uygulanan gruplara ait medikament kalıntı skorlarının sayı ve yüzde dağılımları Tablo 1’de, grafiksel dağılımları ise Şekil 5’te gösterilmiştir. Yapılan istatistiksel analizler sonucunda gruplar arasında istatistiksel olarak anlamlı farklılık bulundu ($p < 0,001$).

HEDP kullanılan Bio-C Temp grupları değerlendirildiğinde, Bio-C Temp-HEDP-PIPS ve Bio-C Temp-HEDP-XPF gruplarının, Bio-C Temp-HEDP-Siİ ve Bio-C Temp-HEDP-EA gruplarına göre istatistiksel olarak anlamlı düzeyde daha düşük medikament kalıntı skorları gösterdiği belirlendi ($p < 0,001$). Buna karşın, Bio-C Temp-HEDP-PIPS ve Bio-C Temp-HEDP-XPF gruplarında gözlenen medikament kalıntı skorlarının Bio-C Temp-HEDP-PUI grubuna göre daha düşük olduğu belirlendi; ancak bu fark istatistiksel olarak anlamlı değildi ($p > 0,05$). Benzer şekilde, Bio-C Temp-HEDP-PUI grubunda gözlenen skorlar Bio-C Temp-HEDP-Siİ ve Bio-C Temp-HEDP-EA gruplarına göre daha düşük olmasına rağmen gruplar arasında istatistiksel olarak anlamlı farklılık saptanmadı ($p > 0,05$).

NaOC/EDTA kullanılan Bio-C Temp grupları değerlendirildiğinde, en düşük medikament kalıntı skorları Bio-C Temp-NaOC/EDTA-PIPS grubunda gözlemlendi. Bununla

birlikte, Bio-C Temp-NE-PIPS, Bio-C Temp-NaOCl/EDTA-XPF ve Bio-C Temp-NE-PUİ grupları arasında istatistiksel olarak anlamlı farklılık bulunmadı ($p>0,05$). Bio-C Temp-NaOCl/EDTA-PIPS grubunun, Bio-C Temp-NaOCl/EDTA-Sİİ ve Bio-C Temp-NaOCl/EDTA-EA gruplarına göre istatistiksel olarak anlamlı düzeyde daha düşük medikament kalıntı skorları gösterdiği saptandı ($p<0,001$). Bio-C Temp-NaOCl/EDTA-Sİİ ve Bio-C Temp-NaOCl/EDTA-EA grupları arasında ise istatistiksel olarak anlamlı farklılık izlenmedi ($p>0,05$).

Aynı aktivasyon yöntemi altında değerlendirilen irrigasyon solüsyonları karşılaştırıldığında, Bio-C Temp uygulanan ve Sİİ, EA, PUİ, XPF ve PIPS ile aktive edilen gruplarda HEDP ile NaOCl/EDTA arasında istatistiksel olarak anlamlı farklılık bulunmadı ($p>0,05$).



Şekil 5. Bio-C Temp uygulanan gruplara ait medikament kalıntı skorların dağılımları

4.3. Farklı İrrigasyon Protokolü ve Aktivasyon Yöntemi Kombinasyonlarının Karşılaştırılması

İrrigasyon solüsyonu, aktivasyon yöntemi ve kanal içi medikament kombinasyonlarına göre medikament kalıntı skorlarının karşılaştırılması Tablo 1’de

gösterilmiştir. Yapılan istatistiksel analiz sonucunda kombinasyon grupları arasında istatistiksel olarak anlamlı farklılık saptanmıştır ($p<0,001$).

Tüm gruplar birlikte değerlendirildiğinde, en düşük medikament kalıntı skorları PIPS aktivasyonunun uygulandığı gruplarda elde edilmiştir. Özellikle NaOCl/EDTA-PIPS-Bio-C Temp ve HEDP-PIPS-Ultracal XS grupları en başarılı sonuçları göstermiştir. Buna karşılık EA ve Sİİ aktivasyon yöntemlerinin uygulandığı gruplarda daha yüksek medikament kalıntı skorları gözlenmiştir. Özellikle Bio-C Temp-HEDP-Sİİ, Bio-C Temp-HEDP-EA, Ultracal XS-HEDP-Sİİ ve Ultracal XS-HEDP-EA grupları en başarısız sonuçları göstermiştir.

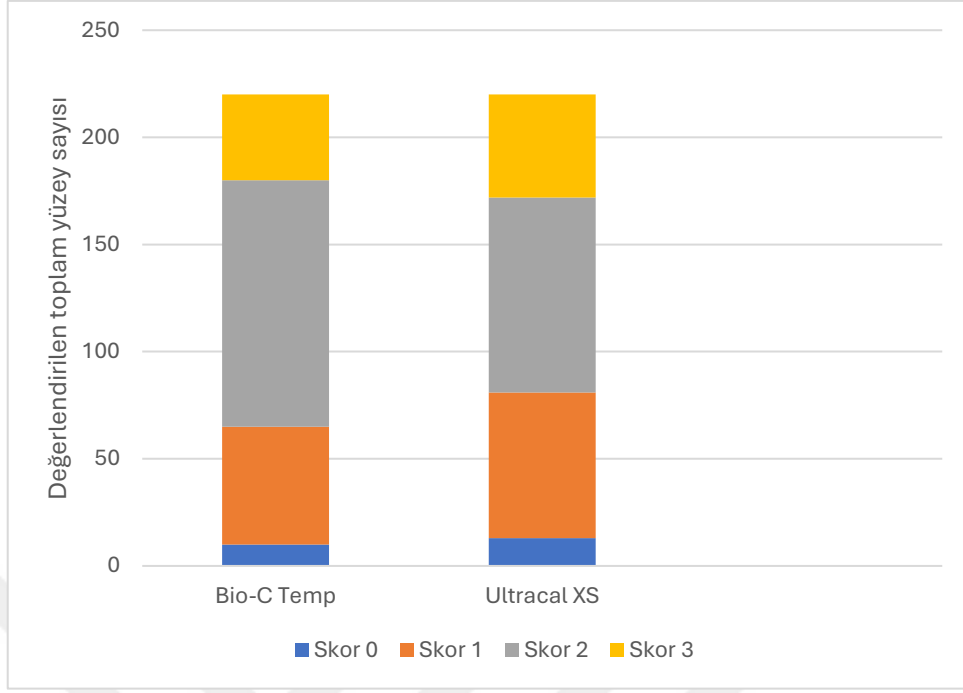
4.4. Medikamentlerin Uzaklaştırılabilirliklerinin Karşılaştırılması

Tablo 2 ve Şekil 6’te, aktivasyon yöntemleri ve irrigasyon solüsyonlarından bağımsız olarak Bio-C Temp ve Ultracal XS medikamentlerinin uzaklaştırılma etkinliklerine ait skor dağılımları gösterilmiştir. Gruplara göre skor dağılımları incelendiğinde istatistiksel olarak anlamlı farklılık yoktur ($p=0,5$).

Tablo 2. Ultracal XS ve Bio-C Temp gruplarına ait skor dağılımlarının karşılaştırılması

Gruplar	Skor					p^x
	n (N)	0	1	2	3	
Ultracal XS	110(220)	13 (5,9)	68 (30,9)	91 (41,4)	48 (21,8)	0,500
Bio-C Temp	110(220)	10 (4,5)	55 (25)	115 (52,3)	40 (18,2)	

^x Mann Whitney U testi n: örnek sayısı, N: Skorlanan örneklerin toplam sayısı



Şekil 6. Kullanılan kanal içi medikamentlere göre medikament kalıntı skorlarının dağılımı

5. TARTIŞMA

İKR görülen dişlerde rezorpsiyon kavitesinin düzensiz morfolojisi, kök kanal sisteminin etkin bir şekilde temizlenmesini güçleştirmektedir (4). Bu nedenle mekanik preparasyonun tek başına yeterli olmadığı durumlarda, kanal dezenfeksiyonunu desteklemek ve inflamatuvar rezorpsiyonun ilerlemesini kontrol altına almak amacıyla kanal içi medikamentlerden yararlanılmaktadır (117). Kök kanal tedavisinde en yaygın kullanılan kanal içi medikamentlerden biri CH'dir. Yüksek alkali pH'sı ve hidroksil iyonu salınımı sayesinde antimikrobiyal etki göstermesi, bakteriyel aktiviteyi baskılaması ve enfekte kök kanallarında mikroorganizma sayısını azaltabilmesi nedeniyle etkili bir kanal içi medikament olarak kabul edilmektedir (340, 341). Bununla birlikte, CH'nin uzun süreli kullanımda dentinin mekanik özelliklerini olumsuz etkileyerek kök kırığı riskini artırabilmesi ve *Enterococcus faecalis* gibi dirençli mikroorganizmalara karşı etkinliğinin sınırlı kalabilmesi gibi dezavantajları vardır (341, 342).

Son yıllarda kalsiyum silikat esaslı bir kanal içi medikament olan Bio-C Temp klinik kullanıma sunulmuştur (161). Kalsiyum iyonu salımı, alkali pH, biyoyumluluk ve yüksek radyopasite gibi özellikleri nedeniyle CH'ye alternatif bir kanal içi medikament olarak değerlendirilmektedir (343).

Bununla birlikte, obtürasyon öncesinde kanal içi medikamentlerin kök kanal sisteminden etkin bir şekilde uzaklaştırılması gerekmektedir. Yapılan çalışmalar, kök kanalında kalan medikament artıklarının kanal patlarının dentin tübüllerine penetrasyonunu engelleyebileceğini, rezin esaslı kanal patlarının adezyonunu olumsuz etkileyebileceğini ve apikal sızıntıyı artırabileceğini göstermiştir (5–7).

Literatürde, özellikle İKR kavitelerinden CH'nin uzaklaştırılmasına yönelik olarak farklı irrigasyon solüsyonları, aktivasyon sistemleri, irrigasyon süreleri ve irrigant hacimlerini inceleyen çok sayıda çalışma bulunmaktadır (9, 14, 18, 344). Buna karşın, Bio-C Temp ile CH esaslı medikamentlerin uzaklaştırılabilirliğini karşılaştıran çalışmalar sınırlı sayıdadır (165, 166, 169, 345). Araya-Cumsille ve ark.'nın yaptıkları çalışmada, molar dişlerin mezial kanallarından Bio-C Temp ile UltraCal XS'in uzaklaştırılma etkinliği açısından anlamlı fark olmadığını, ancak her iki medikamentin de kök kanal sisteminden tamamen elimine edilemediğini rapor etmişlerdir (169). Sarıılmaz ve ark.'nın İKR kavitelerinden farklı aktivasyon tekniklerinin çeşitli kanal patlarını uzaklaştırma etkinliğini inceledikleri çalışmada ise, Bio-C Temp'in uzaklaştırılmasının CH'ye kıyasla daha güç

olduğu ve XPF ile PUI'nin Sİİ ve EDDY irrigasyonundan daha etkili uzaklaştırma sağladığı bildirilmiştir (165). Literatür taraması yapıldığında, HEDP'nin İKR kavitelerindeki kanal içi medikamentlerin uzaklaştırılmasına etkisini değerlendiren herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu nedenle mevcut çalışmada, 3D baskılı İKR'li dişlerde HEDP'nin beş farklı irrigasyon aktivasyon tekniği (Sİİ, PUI, EA, XPF ve PIPS) ile birlikte kullanımının, CH ve Bio-C Temp'in uzaklaştırılmasındaki etkinliğini değerlendirmeyi amaçladık.

İKR'yi içeren in vitro çalışmalarda, klinik koşulları daha doğru yansıttığı gerekçesiyle sıklıkla çekilmiş insan dişleri kullanılmaktadır (18–20). Ancak çekilmiş dişlerin temin güçlüğü, etik kısıtlamalar, çapraz enfeksiyon riski ve saklama koşulları bu yaklaşımın pratik sınırlılıkları arasında yer almaktadır. Daha da önemlisi; kök uzunluğu, kurvatür, kanal çapı, dentin kalınlığı ve yaşa bağlı morfolojik farklılıklar araştırma sonuçlarını doğrudan etkileyebilmekte, gruplar arası karşılaştırmaların güvenilirliğini zayıflatabilmektedir (21, 22, 331, 332). Bunun yanı sıra, İKR görülen bir diş, kök kanal duvarlarında düzensiz genişleme ve dentin kaybı ile karakterize olduğundan, frez veya kimyasal yöntemlerle oluşturulan yapay rezorpsiyon kaviteleri ile güvenilir boyutsal ve morfolojik standardizasyon sağlamak oldukça zordur (18–20). Bu bağlamda, 3D baskı teknolojisi, internal rezorpsiyon benzeri defektlerin kontrollü ve tekrarlanabilir biçimde modellenmesine olanak sağladığından, bu kısıtlamaların büyük bölümünü ortadan kaldırmaktadır (346, 347).

3D baskılı diş modellerinde rezorptif kavitenin yeri, çapı ve geometrisi dijital ortamda önceden tanımlanarak tüm örneklerde birebir yeniden üretilebildiğinden, gruplar arası anatomik varyasyon en aza indirilmekte ve incelenen değişkenin etkisi kanal morfolojisinden bağımsız olarak değerlendirilebilmektedir (21, 22, 333). Böyle bir model, farklı irrigasyon protokollerinin, aktivasyon yöntemlerinin, dolgu tekniklerinin veya enstrümantasyon sistemlerinin aynı rezorptif geometri üzerinde karşılaştırılmasına olanak sağlayabilir. Bütün bunlar göz önünde bulundurulduğunda, mevcut çalışmamızda 3D baskılı diş modelleri kullanılmıştır.

Kök kanal irrigasyonunda solüsyonun kanal boyunca etkin penetrasyonu, koronal bölgede oluşturulan rezervuarla doğrudan ilişkilidir. Pulpa odası hacminin irrigant miktarını artırarak kanal içi akış ve dağılımı desteklediği bilinmektedir (348). Bazı in vitro çalışmalarda standardizasyon amacıyla, dişler semento-mine birleşiminden dekorone edilerek sabit kök uzunlukları elde edilmektedir. Ancak bu yaklaşım, özellikle aktivasyon tekniklerinin uygulandığı durumlarda koronal rezervuar işlevini ortadan kaldırmakta ve

irrigasyonun etkinliğini olumsuz etkileyebilmektedir (349, 350). Bu nedenle mevcut çalışmada klinik koşullar mümkün olduğunca taklit edilerek dişler dekorone edilmemiş, bunun yerine tüm örneklerde kron-kök uzunluğu eşit tutulmuş ve koronal bölgenin irrigasyon solüsyonları için rezervuar işlevi görmesi sağlanmıştır.

İKR kavitelerinin düzensiz morfolojisi, irrigantın rezorptif boşluğa ulaşabilmesi için yeterli kanal çapının sağlanmasını zorunlu kılmaktadır. Literatürde simüle İKR kavitelerinde yürütülen çalışmalarda kanalların R50 gibi geniş çaplı aletlerle prepare edildiği görülmektedir (18, 20). Geniş apikal preparasyonun irrigasyon iğnesinin apikale daha iyi ulaşmasına, irrigant hacminin ve yenilenmesinin artmasına katkı sağladığı; bunun da hem mekanik hem kimyasal temizleme etkinliğini iyileştirdiği bildirilmiştir (351). Usman ve ark. da irrigasyon sıvı akımının apikal çap ve koniklikle doğru orantılı olarak arttığını rapor etmiştir (352). Bu veriler doğrultusunda mevcut çalışmada 3D baskılı diş modellerinin kök kanalları 50/0.05 konikliğinde üretilmiştir.

Literatürde travma ve enfeksiyon gibi etkenlerle oluşan İKR lezyonlarının 0,2 mm ile 1,6 mm arasında değişen çaplara sahip olduğu rapor edilmiştir (283). Bu bilgi doğrultusunda rezorpsiyon kaviteleri, önceki çalışmalarla uyumlu biçimde apekten 5 mm uzaklıkta ve 1,6 mm çapında oluşturulmuştur (18, 20). Bu lokalizasyonun tercih edilmesinin temel nedeni, söz konusu bölgenin mekanik enstrümantasyonun sınırlı kaldığı ve irrigasyon solüsyonlarının ulaşmasının güçleştiği apikal üçlüye yakın bir alanı temsil etmesidir (283). Aynı zamanda apikal foramen bütünlüğü korunarak deneysel modelde kontrollü ve tekrarlanabilir bir yapı sağlanmıştır. Ayrıca, İKR'nin en sık üst çene santral kesici dişlerde görüldüğü bildirildiğinden (353), bu çalışmada söz konusu dişler model olarak tercih edilmiştir.

İKR kaviteleri klinik olarak düzensiz sınırlar ve değişken morfoloji ile karakterizedir. Literatürde bu morfolojiyi simüle etmeye yönelik farklı yaklaşımlar denenmiştir. Silveira ve ark., frez kullanmaksızın yalnızca asit demineralizasyonuna dayalı bir yöntem geliştirmiş; ancak bu yaklaşımda standardizasyonun sağlanamamasının önemli bir dezavantaj oluşturduğu bildirilmiştir (283). Silva ve ark. ise standardizasyonu sağlamak amacıyla kavitenin frezle açılmasının ardından klinik rezorpsiyon defektlerinin düzensiz yüzey dokusunu taklit etmek için asit demineralizasyonu uygulamıştır (20). Her iki yöntem de ya standardizasyon ya da klinik gerçekçilik açısından belirli kısıtlamalar barındırmaktadır (20, 354). Mevcut çalışmada ise bu kısıtlamaların üstesinden gelmek amacıyla 3D baskı

teknolojisi tercih edilmiştir. Bu sayede tüm örneklerde kavite çapı, derinliği ve lokalizasyonu tam olarak yeniden üretilerek gruplar arası anatomik varyasyon ortadan kaldırılmış ve farklı irrigasyon solüsyonları ile aktivasyon yöntemlerinin medikament uzaklaştırma etkinliği daha kontrollü ve tekrarlanabilir koşullarda değerlendirilebilmiştir. Doğal dentin yerine rezin esaslı 3D baskılı model kullanılması nedeniyle asit demineralizasyonu ile biyolojik dokuya benzer düzensiz bir rezorptif yüzey oluşturulamamış olması bu çalışmanın bir sınırlılığı olarak kabul edilmekle birlikte, elde edilen yüksek standardizasyon avantajı göz önüne alındığında kabul edilebilir düzeyde kaldığı değerlendirilmiştir.

Önceki çalışmalarda, kök kanal sistemi içerisinde kalan kanal içi medikamentlerin değerlendirilmesinde dijital fotoğraflar (355), stereomikroskop (18), taramalı elektron mikroskopisi (TEM) (27), mikro-bilgisayarlı tomografi (mikro-BT) (166) ve konfokal lazer taramalı mikroskop (KTLM) (356) gibi çeşitli yöntemler kullanılmıştır. Dijital fotoğraf yönteminde, değerlendirilecek yüzey alanının operatör tarafından belirlenmesi ölçüm hatalarına yol açabilmektedir. Ayrıca görüntüleme sırasında ortam ışığının tam olarak standardize edilememesi, elde edilen sonuçların güvenilirliğini etkileyebilecek bir diğer sınırlılıktır. (357). TEM, yüzey ayrıntılarının yüksek büyütmede incelenmesine imkân tanınmasına rağmen, değerlendirme alanının sınırlı olması, örnek hazırlama sürecinin zaman alıcı olması ve özellikle CH artıklarının smear tabakası veya dentin debrisinden ayırt edilmesinde güçlük oluşturabilmesi gibi dezavantajlara sahiptir (357, 358). Mikro-BT, örnekleri tahrip etmeden üç boyutlu ve hacimsel analiz yapılmasına olanak sağlayan güçlü bir yöntemdir; ancak yüksek maliyet, uzun tarama ve rekonstrüksiyon süresi, ileri analiz bilgisi gerektirmesi ve büyük veri hacmi nedeniyle rutin kullanım açısından sınırlılıklar taşımaktadır (359). KTLM ise özellikle dentin tübüllerine penetrasyonun yüksek çözünürlükte değerlendirilmesinde yararlı olmakla birlikte floresan boya kullanımı, kesit alma gereksinimi, ölçüm alanı seçimine bağlı değişkenlik ve özel ekipman gerektirmesi nedeniyle çok sayıda örneğin pratik şekilde değerlendirilmesinde dezavantajlı olabilmektedir (357). Bu nedenle mevcut çalışmada, İKR kavitelerinde kalan medikament artıklarının değerlendirilmesi amacıyla 20× büyütmede stereomikroskop altında elde edilen dijital görüntüler ImageJ yazılımı kullanılarak analiz edilmiştir.

Stereomikroskop kullanımının tercih edilmesinde, simüle edilmiş İKR kavitelerinin doğrudan görüntülenmesine olanak sağlaması, uygulama kolaylığı, düşük maliyetli olması ve çok sayıda örneğin standart koşullarda karşılaştırılabilmesine imkân tanınması etkili

olmuştur (360). ImageJ yazılımı, toplam rezorpsiyon kavitesi alanı ile kavite içerisinde kalan medikament alanının ölçülmesine ve rezidüel medikament miktarının yüzdelik olarak ifade edilmesine imkân tanımıştır. Böylece değerlendirme yalnızca subjektif görsel gözleme dayandırılmamış, alan temelli yarı kantitatif bir analizle desteklenmiştir (361). Elde edilen yüzdelik değerler van der Sluis ve ark.'nın önerdiği 4 dereceli skorlama sistemine göre puanlanmıştır (18). Bu yöntemin tercih edilmesinde, skorlama sisteminin uygulama kolaylığı, tekrarlanabilirliği, gözlemci içi ve gözlemciler arası uyum oranlarının yüksek olması gibi avantajları etkili olmuştur (362).

Stereomikroskopik değerlendirme için örneklerin bukkolingual yönde ikiye ayrılması gerekir (18, 20). Ancak bu işlemin irrigasyon protokolleri sonrasında uygulanması, su soğutması sırasında rezorpsiyon kavitesinde kalan medikamentin uzaklaşmasına ve dolayısıyla değerlendirme sonuçlarının etkilenmesine yol açabilir (17). Bu riski ortadan kaldırmak amacıyla çalışmada kullanılan 3D baskılı diş modelleri başlangıçtan itibaren iki yarım parça halinde üretilmiştir. Böylece kesme işlemine bağlı mikroçatlak, yüzey defekti veya kanal sınırlarında oluşabilecek yapısal bozulmalar önlenmiş; tüm örneklerin standart ve tekrarlanabilir koşullarda analiz edilmesi sağlanmıştır.

İn vitro koşullarda yürütülen endodontik çalışmalarda, elde edilen bulguların klinik durumu daha doğru yansıtabilmesi için deneysel modelin mümkün olduğunca in vivo koşullara yaklaştırılması önem taşımaktadır. Bu amaçla literatürde periodontal dokuların ve periapikal direncin taklit edilmesinde aljinat, jelatin, salin solüsyonu, sünger, agar ve polivinil siloksan gibi farklı materyallerden yararlanıldığı bildirilmektedir (363). Mevcut çalışmamızda da kök kanal sistemi ile periodontal ligament arasındaki kapalı ortam koşullarını, buhar kilidi fenomenini ve periapikal dokuların oluşturduğu direnci taklit edebilmek amacıyla polivinil siloksan ölçü materyali içerisine gömülmüş ve eppendorf tüplerinin içinde sabitlenmiştir (18). Polivinil siloksan, kolay uygulanabilir olması, stabil yapı göstermesi ve düşük maliyetli bir materyal olması nedeniyle tercih edilmiştir (363). Böylece irrigasyon protokollerinin daha gerçekçi koşullar altında değerlendirilebilmesi için kapalı uçlu bir kök kanal modeli oluşturulmuştur.

CH, belirgin antimikrobiyal aktivitesi, mineralize doku oluşumunu destekleyici etkisi ve rezorptif süreçleri sınırlayıcı özellikleri nedeniyle İKR tedavisinde uzun yıllardır yaygın olarak kullanılan kanal içi medikamenttir (109). Günümüzde bileşim ve konsantrasyon açısından farklılık gösteren çok sayıda ticari CH preparatı bulunmaktadır (364). Bu

preparatlar arasında yaygın olarak kullanılan UltraCal XS; sulu bir çözelti içerisinde CH, baryum sülfat ve metilselülozdan oluşmaktadır (163). Komabayashi ve ark. UltraCal XS'in saf CH'ye kıyasla daha küçük ve düzenli partikül yapısına sahip olduğunu; bu özelliğin dentin yüzeyindeki ıslanabilirliği artırarak tübüllere penetrasyonu kolaylaştırdığını bildirmiştir (365). Mevcut çalışmada UltraCal XS'in tercih edilmesinde; klinik pratikte yaygın kullanılan standart bir preparat olması ve karşılaştırma grubunda yer alan Bio-C Temp ile benzer şekilde hazır ve enjekte edilebilir formda bulunması belirleyici olmuştur.

Kalsiyum silikat esaslı biyoaktif bir materyal olan Bio-C Temp, yakın dönemde kanal içi medikament olarak klinik kullanıma sunulmuştur (161). Nekrotik dişlerin tedavisi, eksternal ve internal rezorpsiyon olguları, kök gelişimi tamamlanmamış dişler, endodontik yeniden tedavi gerektiren vakalar ve perforasyon tedavisi bu materyalin başlıca endikasyon alanları arasında yer almaktadır (163, 164). Üretici firma verilerine göre Bio-C Temp, yüksek alkali özellik gösteren ve mikronize partiküller içeren ($<2\ \mu\text{m}$) bir materyaldir. Bu küçük partikül yapısı materyalin akışkanlığını ve dentin tübüllere penetrasyonunu artırarak Ca^{2+} ve OH^- iyonlarının salınımını desteklemektedir (160). İKR olgularındaki potansiyel klinik kullanım alanı ve standartlaştırılmış internal rezorpsiyon modellerinden uzaklaştırılabilirliğine ilişkin literatürdeki sınırlı veri göz önünde bulundurularak Bio-C Temp bu çalışmaya dahil edilmiştir.

Literatürde CH medikamentinin kanalda bekletilme süresi ile ilgili değişken veriler mevcuttur. Enfekte matür dişlerin tedavisinde kanal içinde en az 7-14 gün bekletilmesi durumunda kanal içi bakterilerde azalma olduğu belirtilmiştir (340). Bunun yanı sıra üretici firma, Bio-C Temp'in kök kanalında en fazla 30 gün süreyle kalabileceğini bildirmektedir (162). Bu nedenle çalışmamızda kanal içi medikamentlerin uygulama süresini 14 gün olarak belirlenmiştir.

Kök kanal tedavisinde kullanılan kanal içi medikamentlerin kalıcı obtürasyon öncesinde kök kanal sisteminden mümkün olduğunca tamamen uzaklaştırılması önem taşımaktadır. Dentin duvarlarında kalan medikament artıklarının kanal patlarının dentin tübüllere penetrasyonunu sınırlandırabildiği ve özellikle rezin içerikli kanal patlarının dentine bağlanma dayanımını olumsuz yönde etkileyebildiği in vitro çalışmalarla gösterilmiştir (5–7). Bu amaçla kullanılan NaOCl güçlü bir dezenfektan olmakla birlikte, CH uzaklaştırılmasında tek başına yetersiz kalmaktadır. Silva ve ark., %2,5 NaOCl, %17 EDTA-T, %10 SA ve %37 fosforik asit solüsyonlarının CH uzaklaştırma etkinliğini

karşılaştırdıkları çalışmada NaOCl'nin diğer gruplara kıyasla anlamlı derecede daha düşük etkinlik gösterdiğini rapor etmiştir (197). EDTA, kalsiyum iyonlarına bağlanarak CH'nin çözünmesini destekleyen ve kök kanallarında yaygın biçimde kullanılan etkili bir şelatördür (216). Margelos ve ark. ise tek başına EDTA veya NaOCl uygulamasının CH'yi kanaldan etkili şekilde uzaklaştıramadığını; ancak iki solüsyonun ardışık kombinasyonunun uzaklaştırma etkinliğini anlamlı ölçüde artırdığını göstermiştir (5). Bu nedenle NaOCl'nin EDTA gibi bir şelatör ajanla birlikte kullanılması önerilmektedir (177). Bu bilgiler doğrultusunda mevcut çalışmada irrigasyon protokolü olarak NaOCl ve EDTA'nın ardışık uygulaması tercih edilmiştir.

NaOCl, endodontide genellikle %0,5–%6 aralığındaki konsantrasyonlarda kullanılmakta olup hangi konsantrasyonun tercih edilmesi gerektiği konusunda literatürde kesin bir görüş birliği bulunmamaktadır (188). Medikament uzaklaştırma etkinliğini değerlendiren çalışmalarda NaOCl %1 (178), %2 (366), %2.5 (355), %3 (18), %5 (20) %5.25 (284) gibi farklı konsantrasyonlarda kullanılmıştır. Konsantrasyonun etkisini inceleyen çalışmalarda, düşük konsantrasyonlu NaOCl solüsyonlarının organik doku çözme ve antimikrobiyal etkinlik açısından yüksek konsantrasyonlu solüsyonlara kıyasla daha sınırlı performans sergilediği bildirilmiştir (185, 189, 190). Bu bilgiler doğrultusunda mevcut çalışmada, medikament uzaklaştırma çalışmalarında yaygın olarak tercih edilen ve daha yüksek antimikrobiyal ile çözücü etkinliğe sahip %5,25 NaOCl solüsyonu kullanılmıştır.

Mevcut çalışmada EDTA, endodontik irrigasyon çalışmalarında en yaygın kullanılan konsantrasyon olan %17 düzeyinde uygulanmıştır. Bu konsantrasyonun kısa süreli uygulamalarda smear tabakasının uzaklaştırılmasında etkinliği literatürde gösterilmiş olup (367), medikament uzaklaştırma protokollerinde de standart referans konsantrasyon olarak kabul görmektedir.

HEDP, NaOCl ile kısa süreli ve minimal düzeyde etkileşime girmesi ve yeterli kalsiyum şelatlama kapasitesi göstermesi nedeniyle EDTA'ya alternatif olarak değerlendirilen zayıf bir şelatördür (224). Son yıllarda Dual Rinse HEDP'nin kullanıma sunulmasıyla, NaOCl ile birlikte tek solüsyon konsepti içerisinde şelasyon ve dezenfeksiyon etkinliğinin bir arada sağlanması hedeflenmiştir. Bu karışımın kısa süreli uygulamalarda NaOCl'nin aktif kalmasına olanak tanıdığı ve 1 saatlik süre içinde serbest klor kaybının klinik açıdan kabul edilebilir düzeyde kaldığı bildirilmiştir (223, 224). Bu kombine

irrigasyon konseptinin kök kanal sisteminden CH uzaklaştırılmasındaki etkinliğini değerlendiren sınırlı sayıda çalışma bulunmakla birlikte (25–27, 231), Dual Rinse HEDP'nin Bio-C Temp'in uzaklaştırılma etkinliğini inceleyen herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu nedenle mevcut çalışmanın bir irrigasyon grubunda Dual Rinse HEDP kullanılmıştır. Üretici firma önerileri doğrultusunda 0,9 g etidronik asit tozu 10 mL %5,25 NaOCl ile karıştırılarak %9'luk HEDP solüsyonu taze olarak hazırlanmış ve hemen uygulanmıştır.

Endodontide kullanılan irrigasyon iğneleri, açık uçlu ve kapalı uçlu yandan delikli olmak üzere iki temel tasarımda üretilmektedir. Açık uçlu iğneler irrigantı apikal yönde doğrudan iletirken, kapalı uçlu yandan delikli iğneler solüsyonu lateral yönde kanalın içine yayarak iletmektedir (237). Kapalı uçlu yandan delikli tasarımın irrigasyon solüsyonunun hidrodinamik olarak daha etkili dağılmasına katkı sağladığı ve apikal ekstrüzyon riskini azalttığı bildirilmiştir (238). Bu nedenle mevcut çalışmada kapalı uçlu yandan delikli irrigasyon iğnesi tercih edilmiştir.

Kemomekanik olarak erişilemeyen İKR boşluğunda medikament uzaklaştırılmasını iyileştirmek için, kök kanal sisteminin karmaşık üç boyutlu anatomisi içinde irrigasyon akışını ve dağılımını kolaylaştıran farklı irrigasyon aktivasyon tekniklerinin kullanılması önerilir. Yaylalı ve ark. tarafından yayınlanan sistematik bir inceleme, PUİ'nin kök kanalının apikal üçte birlik bölgesinden CH'yi uzaklaştırmada Sİİ ve EA'dan daha üstün olduğunu göstermiştir (305). Keskin ve ark. yaptıkları çalışmada, simüle edilmiş İKR kavitelerinden CH'nin uzaklaştırılmasında XPF'nin, Sİİ ve EA'ya kıyasla daha etkili olduğu bildirilmiştir (284). Aynı zamanda, çeşitli çalışmalarda PIPS'in kanal içi medikamentleri uzaklaştırmada Sİİ, sonik irrigasyon, PUİ ve Er,Cr:YSGG tekniklerinden çok daha etkili olduğunu gösterilmiştir (14–17). Bununla birlikte, HEDP irrigasyon solüsyonuyla birlikte Sİİ, PUİ, EA, XPF ve PIPS aktivasyon tekniklerinin İKR kavitelerindeki medikament uzaklaştırma etkinliğini karşılaştıran herhangi bir çalışmaya rastlanmadığından, mevcut çalışmada söz konusu beş aktivasyon tekniği karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

PUİ aktivasyon yönteminde kök kanalına küçük çaplı, kesici olmayan bir metal uç yerleştirilerek irrigasyon solüsyonuna ultrasonik enerji iletilmesi sağlanır. Bu yöntemde ucun kanal içinde serbestçe titreşebilmesi, aktivasyon etkinliği açısından kritik öneme sahiptir; dolayısıyla kullanılan ucun boyutu ve tasarımı irrigasyon etkinliğini doğrudan etkileyebilecek faktörler arasındadır (338). Mevcut çalışmada Irrisafe uç (IRR 20/25) tercih edilmiştir. Bu ucun kesici olmayan yapısı, dentin duvarlarında istenmeyen preparasyon etkisi

oluşturma riskini azaltmakta ve kanal içinde pasif çalışmaya olanak tanımaktadır (368). Uç, literatürdeki PUI protokolleriyle metodolojik uyumu korumak ve üretici önerileri doğrultusunda dentin duvarlarına temas oluşturmamak amacıyla çalışma boyundan 1 mm kısa konumlandırılmıştır (369).

EA sistemi için 15/02, 25/04 ve 35/04 olmak üzere üç farklı boyutta polimer uç üretilmektedir. Kullanılacak uç boyutunun seçiminde, kök kanalının apikal genişliği ve konikliğiyle uyumluluk, ucun kanal içinde bağlanmadan serbestçe titreşim yapabilmesi ve irrigasyon solüsyonunun etkin biçimde aktive edilebilmesi belirleyici kriterler arasındadır (8). Bu çalışmada kök kanallarının 50/0.05 boyutunda üretildiği göz önüne alındığında, 25/04 boyutundaki ucun kanal anatomisine en uygun seçenek olduğu değerlendirilmiştir. Uç, üretici önerileri doğrultusunda çalışma boyunun yaklaşık 2 mm gerisine, kanal duvarlarına temas etmeyecek şekilde yerleştirilmiş ve kısa vertikal hareketlerle kullanılmıştır.

XPF eğesi, sıcaklığa duyarlı MaxWire alaşımından üretilmiş olup oda sıcaklığında martensitik fazda daha düz bir yapı sergilerken, vücut sıcaklığına ulaştığında östenitik faza geçerek genişmekte ve kanal anatomisine üç boyutlu uyum sağlamaktadır. Bu faz dönüşümünün gerçekleşebilmesi için irrigasyon solüsyonlarının vücut sıcaklığına yakın uygulanması gerekmektedir (11, 262). Bu nedenle çalışmada kullanılan irrigasyon solüsyonları 37°C'ye ısıtılmıştır. Deney süresince solüsyon sıcaklığının tam olarak sabit tutulması güç olduğundan sıcaklık belirli aralıklarla kontrol edilerek 37°C'ye yakın değerlerde korunmaya çalışılmıştır. XPF, üretici önerileri doğrultusunda 1000 dev/dak hız ve 1 Ncm tork değerinde, çalışma boyunda 7–8 mm'lik aşağı-yukarı hareketlerle kullanılmıştır.

Mevcut çalışmada LAİ yöntemi olarak PIPS protokolü tercih edilmiştir. PIPS, Er:YAG lazer enerjisinin irrigasyon solüsyonu içinde oluşturduğu fotoakustik etki aracılığıyla sıvı hareketini artıran bir aktivasyon yöntemidir (13). Diğer aktivasyon yöntemlerinden farklı olarak PIPS uygulamasında lazer ucu kök kanalı içine ilerletilmeyip yalnızca pulpa odasında konumlandırılmaktadır. Bu yaklaşım kanal duvarlarıyla mekanik temas riskini ortadan kaldırmakta ve standartize edilmiş İKR morfolojisinin korunmasına katkı sağlamaktadır (314). Cihaz, üretici önerileri doğrultusunda 20 mJ enerji, 15 Hz frekans ve 0,3 W güç parametrelerinde, hava ve su spreji kapalı olacak şekilde kullanılmıştır.

Literatürde kök kanallarında irrigasyon aktivasyon yöntemlerinin uygulanma sürelerine ilişkin farklı protokoller bildirilmekte olup, aktivasyon süresi genellikle 30 saniye

ile 3 dakika arasında değişiklik göstermektedir. Yapılan çalışmalarda, etkili bir debridman ve temiz kanal yüzeyleri elde etmek için her bir kanalda toplam 1 dakikalık ultrasonik aktivasyonun ya da 10–20 saniyelik  ardışık aktivasyon döngüsünün yeterli olabileceği rapor edilmiştir (370). Bununla birlikte, optimal aktivasyon süresi konusunda literatürde kesin bir fikir birliği bulunmamaktadır (371).

Aktivasyon prosedürünün kesintisiz tek bir seans yerine aralıklı döngüler hlinde uygulanması ve her döngüde kök kanalındaki irrigasyon solüsyonunun yenilenmesi, solüsyonun kimyasal etkinliğini artıran en önemli faktörlerden biri olarak değerlendirilmektedir (372). Van der Sluis ve ark., irrigasyon solüsyonunun sık aralıklarla tazelenmesinin akustik akış dinamiklerini ve aktivasyon etkinliğini artırdığını, bu doğrultuda  irrigasyon/aktivasyon döngüsünün kök kanallarından debris ve smear tabakasının uzaklaştırılmasında klinikte yeterli olabileceğini bildirmiştir. Ayrıca aktivasyonun daha kısa periyotlar hlinde bölünerek yapılması, ultrasonik ucun kök kanalı içinde merkezde (sentrik konumda) daha kontrollü tutulmasına katkı sağlamakta; böylece enstrümanın kanal duvarlarına kontrolsüz temas riskini ve buna bağlı oluşabilecek istenmeyen iyatrojenik dentin değişikliklerini minimuma indirmektedir (373). Bu literatür verileri doğrultusunda, çalışmamızda metodolojik standardizasyonu sağlamak amacıyla toplam aktivasyon süresi tüm deney gruplarında her bir kanal için toplam 1 dakika (60 saniye) olarak sabitlenmiştir. HEDP kullanılan gruplarda aktivasyon prosedürü; taze solüsyon akışını desteklemek amacıyla, her biri 20 saniye süren üç eşit periyot (3 x 20 sn) şeklinde gerçekleştirilmiştir. Geleneksel ardışık irrigasyon protokolünü temsil eden NaOCl/EDTA kullanılan gruplarda ise, toplam aktivasyon süresini gruplar arasında tam olarak eşitlemek amacıyla; NaOCl solüsyonu 30 saniye, EDTA solüsyonu ise 30 saniye süreyle aktive edilmiştir. Her iki solüsyon için de aktivasyon işlemi 10 saniyelik üçer periyot (3 x 10 sn NaOCl ve 3 x 10 sn EDTA) hlinde uygulanmış; böylece tüm deneysel gruplar arasında hem toplam aktivasyon süreleri (1 dakika) hem de döngü sayıları açısından metodolojik standardizasyon sağlanmıştır.

Mevcut çalışmada, farklı irrigasyon solüsyonlarının ve aktivasyon yöntemlerinin, simüle İKR kavitelerindeki Bio-C Temp ve Ultracal XS medikamentlerini uzaklaştırma etkinliği değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, tüm gruplarda belirli miktarda medikament kalıntısı bulunduğunu ve hiçbir yöntemin tam temizleme sağlayamadığını

göstermiştir. Bu bulgu, literatürdeki önceki çalışmaların sonuçlarıyla uyumlu bulunmuştur (17, 18, 24, 166, 178, 344, 355, 366, 374, 375).

Bu çalışmada, aynı aktivasyon yöntemi altında değerlendirilen irrigasyon protokolleri karşılaştırıldığında, Sİİ, EA, PUI, XPF ve PIPS gruplarının hiçbirinde HEDP ve NaOCl/EDTA arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark saptanmamıştır ($p>0,05$). Bu sonuç hem Ultracal XS hem de Bio-C Temp medikamentleri için benzer şekilde gözlenmiştir. Buna göre, kanal içi medikamentlerin uzaklaştırılmasında HEDP ve NaOCl/EDTA protokolleri arasında fark bulunmadığını öngören sıfır hipotezi reddedilememiştir. Elde edilen bulgular, farklı kimyasal özelliklere sahip olmalarına rağmen, her iki irrigasyon protokolünün de mevcut deneysel koşullarda simüle İKR kavitelerinden medikament uzaklaştırılmasında benzer performans sergilediğini göstermektedir.

HEDP, NaOCl ile aynı anda kullanılabilen ve sürekli şelasyon prensibiyle çalışan zayıf bir şelatör ajan olarak tanımlanmaktadır (224). Bu yaklaşımda NaOCl'nin organik doku çözücü ve antimikrobiyal etkisi devam ederken, HEDP eş zamanlı olarak kalsiyum iyonlarıyla kompleks oluşturarak inorganik artıkların uzaklaştırılmasına katkı sağlamaktadır. Buna karşılık NaOCl/EDTA protokolü geleneksel ardışık irrigasyon yaklaşımını temsil etmekte olup, EDTA final irrigasyon aşamasında uygulanarak güçlü ancak kısa süreli bir şelasyon etkisi oluşturmaktadır (376). EDTA'nın HEDP'ye göre daha güçlü bir şelasyon ajanı olduğu bilinmesine rağmen, bu üstünlüğün klinik etkinliğe yansımaları uygulama süresi, temas alanı ve dentin yapısıyla olan etkileşime bağlıdır (224). Mevcut çalışmada kullanılan irrigasyon protokollerinin hacim ve aktivasyon sürelerinin standardize edilmiş olması da iki grup arasında fark oluşmamasına katkıda bulunmuş olabilir. HEDP grubunda %9 etidronik asit toplam 6 mL hacimde ve 1 dakika süreyle uygulanırken, NaOCl/EDTA grubunda toplam 6 mL solüsyon kullanılmış ve aktivasyon süresi 30 saniye NaOCl ile 30 saniye EDTA uygulaması şeklinde iki faza ayrılmıştır. Dolayısıyla HEDP grubunda daha uzun süreli ancak daha zayıf bir şelasyon etkisi söz konusu iken, NaOCl/EDTA grubunda daha güçlü fakat daha kısa süreli bir şelasyon etkisi oluşmuştur. Toplam hacim ve aktivasyon süresinin eşit tutulması, iki protokol arasındaki kimyasal farklılıkların medikament uzaklaştırma etkinliğine yansımaları sınırlandırmış olabilir.

EDTA ve HEDP gibi şelasyon ajanlarının etkinliği yalnızca medikament kalıntılarıyla değil, aynı zamanda dentin yüzeyiyle olan etkileşimleri de ilişkilidir. Şelasyon ajanlarının dentindeki kalsiyum iyonlarıyla reaksiyona girerek smear tabakasını uzaklaştırdığı, dentin tübüllerini açtığı ve uygulama koşullarına bağlı olarak dentinde demineralizasyon oluşturabildiği bilinmektedir (367, 377). Ancak mevcut çalışmada kullanılan rezin modellerde dentin tübülleri, mineralize dentin matriksi ve kalsiyum içeren yapılar bulunmadığından, HEDP ve EDTA'nın dentin üzerindeki farklı etkileri ortaya çıkamamış olabilir. Dolayısıyla, mevcut çalışmada doğal dişler yerine standartlaştırılmış 3D baskılı rezin diş modellerinin kullanılmış olması, iki irrigasyon protokolü arasında anlamlı fark bulunmamasını açıklayabilir.

İrrigasyon solüsyonlarının yüzey gerilimi de kanal düzensizliklerinin ıslanmasını ve irrigantın dar ve ulaşılması güç bölgelere yayılmasını etkileyen önemli faktörlerden biridir (378). Atasoy Ulusoy ve ark., %9 HEDP'nin düşük yüzey gerilimine sahip olduğunu ve NaOCl/HEDP karışımının yüzey geriliminin NaOCl/EDTA karışımına benzer olduğunu bildirmiştir (379). Bu durum, her iki irrigasyon protokolünün İKR kavitesi gibi kompleks anatomik bölgeleri benzer düzeyde ıslatabilmesine ve dolayısıyla benzer uzaklaştırma etkinliği göstermesine katkıda bulunmuş olabilir.

Literatürde medikament uzaklaştırılmasında HEDP ve NaOCl/EDTA protokollerini karşılaştıran çalışmaların sonuçları ise değişkenlik göstermektedir. Üstün ve ark. (26), HEDP/NaOCl ve EDTA grupları arasında CH'nin uzaklaştırılması açısından kök kanalının koronal, orta ve apikal üçlülerinde, kullanılan aktivasyon yönteminden bağımsız olarak anlamlı fark bulunmadığını bildirmiştir. Araştırmacılar, HEDP'nin EDTA'dan daha zayıf bir şelatör olmasına rağmen irrigant aktivasyonunun HEDP'nin CH uzaklaştırma kapasitesini artırmış olabileceğini belirtmiştir. Bu bulgular mevcut çalışmanın sonuçlarıyla uyumludur. Buna karşın Neelakantan ve ark. (25), doğal mandibular premolar dişlerde gerçekleştirdikleri CBCT çalışmasında NaOCl/EDTA protokolünün HEDP içeren sürekli şelasyon yaklaşımına göre daha fazla CH uzaklaştırdığını rapor etmişlerdir. Benzer şekilde Chockattu ve ark. (27), SEM analizi ile yaptıkları çalışmada apikal üçlüde EDTA'nın HEDP'den daha etkili olduğunu bildirmiştir. Bu çalışmaların sonuçları mevcut çalışmanın bulgularıyla tam olarak örtüşmemektedir. Ancak söz konusu araştırmalarda doğal dentin dokusunun kullanılması, medikament kalıntılarının hacimsel veya mikromorfolojik yöntemlerle değerlendirilmesi ve daha uzun irrigasyon sürelerinin uygulanması, EDTA ve

HEDP arasındaki kimyasal farklılıkların daha belirgin ortaya çıkmasına katkı sağlamış olabilir.

Öte yandan Savur ve Ulusoy (380), çekilmiş insan dişlerinde gerçekleştirdikleri çalışmada ultrasonik veya lazerle aktive edilen %9 HEDP'nin özellikle orta ve apikal üçlülerde NaOCl/EDTA protokolüne göre daha az CH kalıntısı bıraktığını bildirmiştir. Literatürdeki bu çelişkili sonuçlar, HEDP konsantrasyonu, kullanılan formülasyon, aktivasyon yöntemi, değerlendirme tekniği ve deneysel model farklılıklarının sonuçlar üzerinde önemli etkileri olabileceğini göstermektedir. Dolayısıyla mevcut çalışmada HEDP ve NaOCl/EDTA arasında anlamlı fark bulunmaması, her iki irrigasyon protokolünün kimyasal özelliklerinden ziyade, kullanılan deneysel koşullar altında aktivasyon yöntemlerinin oluşturduğu hidrodinamik etkinin baskın hale gelmiş olmasıyla açıklanabilir.

Çalışmamızda en başarılı sonuçlar genel olarak PIPS aktivasyonunun uygulandığı gruplarda elde edilmiştir. İKR kavitelerinden Ultracal XS'in uzaklaştırılmasında PIPS tekniğinin hem HEDP hem de NaOCl/EDTA irrigasyon protokollerinde EA ve Sİİ gruplarına kıyasla istatistiksel olarak anlamlı düzeyde daha etkili olduğu belirlenmiştir. Benzer şekilde, Bio-C Temp'in uzaklaştırılmasında da PIPS uygulanan gruplarda EA ve Sİİ gruplarına göre daha düşük medikament kalıntı skorları elde edilmiştir. Bu bulgular, kanal içi medikamentlerin uzaklaştırılmasında kullanılan irrigasyon aktivasyon yöntemlerinin benzer etkinlik gösterdiğini öngören hipotezin reddedilmesine neden olmuştur.

PIPS, aktivasyon ucunun kök kanalı içerisine iletilemesine gerek kalmaksızın yalnızca pulpa odasında konumlandırıldığı, Er:YAG lazer temelli bir irrigasyon aktivasyon tekniğidir (314). Bu sistem, ablatif altı enerji düzeylerinde çalışarak irrigasyon solüsyonunda fotoakustik şok dalgaları oluşturmakta ve kök kanal sistemi boyunca üç boyutlu sıvı hareketi meydana getirmektedir (381). Lazer enerjisinin irrigasyon solüsyonundaki su molekülleriyle etkileşimi sonucunda oluşan hızlı sıvı hareketleri, kavitasyon ve akustik akım etkileri irrigantın ulaşamadığı bölgelerde temizleme etkinliğini artırmaktadır (13, 382). Kavitasyon, mevcut çalışmada PIPS'in üstün performans göstermesi, sistemin oluşturduğu güçlü fotoakustik akım, kavitasyon, şok dalgaları ve üç boyutlu sıvı hareketi ile ilişkilendirilebilir. Ayrıca, PIPS fiber ucunun apikal bölgeye iletilemesine gerek olmadan koronal rezervuarda çalışması, dar apikal alanlarda fiber ucun kanal duvarına temas ederek sıkışması veya irrigasyon etkinliğinin sınırlanması gibi sorunları azaltmış olabilir (313). Bu durum, İKR

kavitesinde kalan medikament kalıntılarının uzaklaştırılmasında PIPS aktivasyonun etkin şekilde gerçekleşmesine olanak sağlamış olabilir.

Bulgularımızla uyumlu olarak, lazerle aktive edilmiş irrigasyonun konvansiyonel irrigasyon yöntemlerine kıyasla kök kanal duvarlarının temizlenmesinde daha etkili olduğu önceki çalışmalarda bildirilmiştir. Arslan ve ark., 48 çekilmiş tek köklü ve düz kanallı dişin apikal bölgesinde oluşturdukları standart yapay oluklardan CH'nin uzaklaştırılmasında PIPS'in EA ve Sİİ'ye göre anlamlı derecede daha başarılı olduğunu göstermiştir (15). Araştırmacılar PIPS'in üstün etkinliğini, düşük enerjili ve kısa süreli lazer atımlarının irrigant içerisinde oluşturduğu fotoakustik ve fotomekanik etkiler, şok dalgaları, kavitasyon ve güçlü sıvı akımıyla ilişkilendirmiştir. Benzer şekilde Li ve ark. doğal istmus yapısına sahip 24 çekilmiş maksiller birinci premolar üzerinde gerçekleştirdikleri mikro-BT ve SEM çalışmasında, PIPS'in ana kanal ve istmus bölgelerinden CH uzaklaştırmada EA ve Sİİ'den daha etkili olduğunu bildirmiştir (381). Araştırmacılar bu sonucu, PIPS'in oluşturduğu güçlü fotoakustik şok dalgalarının irrigantın apikal üçlüye ve istmuslara üç boyutlu olarak yayılımını artırmasıyla açıklamıştır.

Lloyd ve ark. ise doğal Weine Tip II kanal anatomisine sahip çekilmiş mandibular molar üzerinde yürüttükleri mikro-BT çalışmasında, PIPS'in apikal üçlüde kalan CH miktarını PUİ ve Sİİ'ye kıyasla anlamlı düzeyde azalttığını rapor etmiştir (16). Araştırmacılar PIPS'in üstünlüğünü, giriş kavitesinde oluşturulan genişleyen ve çöken kavitasyon kabarcıklarının kanal duvarları boyunca hidrodinamik kesme kuvvetleri meydana getirmesiyle ilişkilendirmiştir. Ayrıca Kırmızı ve ark., çekilmiş tek kanallı premolar dişlerde oluşturdukları simüle İKR kavitelerinde gerçekleştirdikleri mikro-BT çalışmasında PIPS ve SWEEPS tekniklerinin EA, PUİ, XPF, Er,Cr:YSGG lazer ve Sİİ gruplarına göre CH uzaklaştırmada daha üstün performans gösterdiğini bildirmiştir (14). Bu bulguyu, PIPS'in irrigant içerisinde oluşturduğu güçlü akustik akımın ve hidrodinamik etkinin, ana kanalın lateralinde bulunan rezorpsiyon kavitesine ulaşarak medikament kalıntılarını yerinden ayırabilmesiyle açıklamışlardır.

Literatürde PIPS tekniğinin Bio-C Temp'in İKR kavitelerinden uzaklaştırılmasındaki etkinliğini değerlendiren herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu nedenle mevcut çalışma, PIPS'in yalnızca CH bazlı medikamentlerde değil, kalsiyum silikat esaslı Bio-C Temp'in uzaklaştırılmasındaki etkinliğini de ortaya koyması bakımından literatüre özgün katkı sağlamaktadır.

Çalışmamızın bulguları, XPF'nin medikament uzaklaştırma performansının Sİİ ve EA'ya kıyasla daha yüksek olduğunu, ancak PIPS ile karşılaştırıldığında benzer etkinlik sergilediğini göstermiştir. Bu durum, farklı çalışma prensiplerine sahip olmalarına rağmen her iki sistemin de İKR kavitesindeki medikament kalıntılarının uzaklaştırılmasında etkili hidrodinamik koşullar oluşturabildiğini düşündürmektedir.

XPF, sıcaklığa duyarlı MaxWire alaşımından üretilmiş bir NiTi bitirme aletidir. Oda sıcaklığında düz formda bulunan alet, vücut sıcaklığında östenitik faza geçerek uzunluğunun son bölümünde kaşık benzeri bir yapı kazanmaktadır (263). Kanal anatomisindeki doğal daralma ve genişlemelere uyum sağlayabilen bu yapı, kanal duvarlarında mekanik süpürme etkisi oluştururken aynı zamanda irrigasyon solüsyonu içerisinde türbülans meydana getirmektedir (264). Ayrıca XPF'nin yüksek esnekliği ve üç boyutlu adaptasyon yeteneği sayesinde, özellikle rezorpsiyon kavileri gibi düzensiz anatomik bölgelerde irrigantın dolaşımını artırarak medikament kalıntılarının uzaklaştırılmasına katkıda bulunduğu bildirilmektedir (11). Dolayısıyla mevcut çalışmada düşük medikament kalıntı skorları elde edilmiş olması, XPF'nin mevcut yapısı ve İKR kavitesine adaptasyon yeteneğiyle ilişkili olabilir. Bunun yanı sıra, irrigasyon solüsyonlarının 37 °C'de kullanılmış olması da eğerin östenitik faza geçişini destekleyerek simüle İKR kavilerine adaptasyonunu ve temizleme etkinliğini artırmış olabilir.

Çalışmamızda elde edilen bulgular literatürdeki birçok araştırma ile uyumludur. Düzgün ve ark., 3D baskı yöntemiyle oluşturulan İKR kavilerinden CH'nin uzaklaştırılmasında XPF'nin Sİİ ve EA'ya göre daha etkili olduğunu bildirmiştir (23). Benzer şekilde Keskin ve ark., çekilmiş tek köklü dişlerde oluşturdukları İKR kavilerinde XPF'nin Sİİ, EA ve CB'a kıyasla daha başarılı sonuçlar verdiğini bildirmiştir (284). Sarıyılmaz ve ark. ise simüle iç rezorpsiyon boşluklarından Ultracal XS'in uzaklaştırılmasında XPF'nin Sİİ'ye göre anlamlı derecede daha etkili olduğunu rapor etmiştir (165). Yazarlar XPF'nin bu üstünlüğünü, şekil hafızalı ve konik olmayan yapısı sayesinde kanal içerisinde geniş bir hareket alanı oluşturabilmesi, düzensiz kavite yüzeylerine temas edebilmesi ve rotasyonel hareketiyle irrigantın dolaşımını artırarak medikament kalıntılarını mekanik olarak yerinden ayırabilmesiyle açıklamışlardır.

Bio-C Temp açısından değerlendirildiğinde, Almohareb ve ark. çekilmiş düz kök kanallarında XPF'nin EA ve Sİİ'ye kıyasla daha yüksek uzaklaştırma etkinliği gösterdiğini bildirmiştir (168). Araştırmacılar XPF'nin etkinliğini, şekil hafızası özelliği sayesinde kanal

içerisinde genişleyerek konvansiyonel aletlerin ulaşamadığı yüzeylere erişebilmesiyle açıklamıştır. Bu bulgu, çalışmamızda XPF'nin Bio-C Temp uzaklaştırılmasında EA ve Sİİ'ye kıyasla daha düşük medikament kalıntı skorları göstermesiyle uyumludur.

Literatürde XPF ile PIPS'in karşılaştırıldığı çalışmaların sonuçları ise farklılık göstermektedir. Shi ve ark., rezin bloklarda oluşturulmuş S-şekilli yapay kök kanallarında gerçekleştirdikleri çalışmada, PIPS ile XPF arasında anlamlı bir farklılık saptamamışlardır (286). Araştırmacılar bu sonucu, XPF'nin şekil değiştirerek kanal duvarlarına uyum sağlaması ve irrigant hareketini mekanik olarak artırması ile PIPS'in oluşturduğu fotoakustik sıvı akımının kompleks apikal bölgelere irrigant ulaşımını benzer düzeyde geliştirmesine bağlamışlardır. Benzer şekilde, çalışmamızda da PIPS gruplarında daha düşük medikament kalıntı skorları gözlenmesine rağmen, PIPS ve XPF arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark belirlenmemiştir.

Buna karşın Kırmızı ve ark., simüle İKR kavitelerinde gerçekleştirdikleri mikro-BT çalışmasında PIPS'in XPF'ye göre istatistiksel olarak anlamlı düzeyde daha etkili olduğunu rapor etmiştir (14). Bu sonucu XPF eğesinin kök kanalı içinde salınım yaparken simüle edilmiş rezorpsiyon kavitesi duvarlarına temas edecek kadar derine ulaşamamış olmasıyla ilişkilendirmişlerdir. Bu sonuç mevcut çalışmanın bulgularıyla tam olarak örtüşmemektedir. Söz konusu farklılık, öncelikle kullanılan değerlendirme yöntemlerinden kaynaklanmış olabilir. Kırmızı ve ark. medikament kalıntılarını mikro-BT ile hacimsel olarak değerlendirirken, mevcut çalışmada stereomikroskop görüntüleri üzerinden ImageJ yazılımı kullanılarak yüzey alanı esaslı skrolama yapılmıştır. Mikro-BT'nin sağladığı üç boyutlu hacimsel analiz, iki teknik arasındaki küçük farkları daha hassas şekilde ortaya koyabilmektedir. Ayrıca ilgili çalışmada XPF'nin 800 rpm hızında kullanılmış olması, mevcut çalışmada tercih edilen 1000 rpm hızından farklı bir hidrodinamik etki oluşturmuş olabilir.

Çalışmamızda PUİ grupları genel olarak PIPS ve XPF gruplarından daha yüksek, Sİİ ve EA gruplarından ise daha düşük medikament kalıntı skorları göstermiştir. Bununla birlikte, bu farklılıklar istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır. Bu sonuç, PUİ'nin medikament uzaklaştırılmasında orta düzeyde bir etkinlik sergilediğini, ancak mevcut deneysel koşullarda diğer aktivasyon yöntemlerine karşı belirgin bir üstünlük ortaya koymadığını göstermektedir.

PUİ sırasında ultrasonik ucun irrigasyon solüsyonu içerisinde kanal duvarlarına temas etmeden yüksek frekansta titreşim hareketi yapması, güçlü akustik mikroakımların oluşmasına neden olmaktadır. Bu hidrodinamik etki ve beraberinde ortaya çıkan akustik akım, irrigantın kanal düzensizliklerine ulaşmasını kolaylaştırarak kanal içi medikament artıklarının uzaklaştırılmasına katkı sağlayabilmektedir (296). Mevcut çalışmada ultrasonik uç çalışma boyundan 1 mm kısa olacak şekilde, kanal duvarlarına temas ettirilmeden ve 2–3 mm’lik ileri-geri hareketlerle kullanılmıştır. Bununla birlikte, İKR kavitesinin ana kanalın lateralinde yer alan düzensiz bir boşluk olması, ultrasonik aktivasyonla oluşan akımın kavite duvarlarının tamamına eşit şekilde ulaşmasını sınırlamış olabilir.

Literatürde simüle edilmiş İKR kavitelerinden kanal içi medikamentlerin uzaklaştırılmasında PUİ’nin daha belirgin bir üstünlük gösterdiğini bildiren çalışmalar bulunmaktadır (9, 18, 20, 23, 284). Topçuoğlu ve ark.’nın, simüle İKR kavitelerinden CH’nin uzaklaştırılmasını değerlendirdikleri çalışmalarında Sİİ, CB, PUİ, EA ve EndoVac sistemlerini karşılaştırmış ve PUİ’nin diğer gruplara göre anlamlı düzeyde daha etkili olduğunu bildirmiştir (18). Benzer şekilde Keskin ve ark., PUİ’nin Sİİ, EA ve CB gruplarına kıyasla daha fazla CH uzaklaştırdığını rapor etmiştir (284). Bu bulgular, çalışmamızda PUİ’nin belirgin bir üstünlük göstermemesiyle farklılık göstermektedir. Söz konusu farklılık, uygulanan aktivasyon süresinden kaynaklanmış olabilir. Mevcut çalışmada 1 dakikalık aktivasyon süresi uygulanırken, ilgili çalışmalarda 2 dakikalık aktivasyon süresi kullanılmıştır. Daha uzun aktivasyon süresinin PUİ’nin etkinliğini artırmış olması muhtemeldir. Aktivasyon süresinin uzaması, irrigasyon solüsyonunun kanal içerisindeki hidrodinamik etkisini artırmakta ve düzensiz anatomik bölgelerle temas süresini uzatmaktadır. Nitekim Zeltner ve ark. aktivasyon süresinin uzatılmasının irrigasyon etkinliğini artırabildiğini bildirmiştir (383). Ayrıca Van der Sluis ve ark., PUİ’de 3 dakikalık aktivasyonun 1,5 dakikalık aktivasyona kıyasla daha fazla debris uzaklaştırdığını göstererek yöntemin etkinliğinin uygulama süresinden etkilenebileceğini ortaya koymuştur (236).

Mevcut çalışmada XPF ve PUİ grupları arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark görülmemiştir. Bu bulgu, simüle edilmiş İKR kavitelerinde gerçekleştirilen çeşitli çalışmaların sonuçlarıyla uyumludur (9, 23, 165, 284). Buna karşın Mobarakeh ve ark. (384), farklı CH formlarının uzaklaştırılmasında PUİ’nin XPF’den daha etkili olduğunu bildirmiştir. Bu farklılık, çalışmalar arasında kullanılan medikament tipleri, irrigasyon protokolleri ve özellikle artık medikament miktarının değerlendirilmesinde tercih edilen

analiz yöntemlerindeki farklılıklardan kaynaklanmış olabilir. Ayrıca Mobarakeh ve ark.'nın çalışmasında değerlendirilen medikamentlerin fiziksel özellikleri ve kanal morfolojisi, PUI ile oluşan akustik akımın etkinliğini artırmış olabilir. Buna karşılık, çalışmamızda kullanılan standartlaştırılmış 3D baskılı İKR modeli, XPF'nin mekanik süpürme etkisi ile PUI'nin hidrodinamik etkisinin benzer düzeyde sonuç vermesine neden olmuş olabilir. Bu durum, her iki sistemin farklı mekanizmalarla çalışmasına rağmen, İKR kavitesinden medikament uzaklaştırılmasında benzer klinik performans sergileyebileceğini düşündürmektedir.

Çalışmamızda EA ve SII grupları hem Ultracal XS hem de Bio-C Temp'in İKR kavitelerinden uzaklaştırılmasında genel olarak en yüksek medikament kalıntı skorlarını göstermiştir. Ayrıca tüm karşılaştırmalarda bu iki yöntem arasında istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık saptanmamıştır. SII'nin önemli avantajlarından biri, irrigasyon iğnesinin kanal içerisindeki ilerleme derinliğinin ve kullanılan irrigasyon solüsyonu hacminin klinisyen tarafından nispeten kolay kontrol edilebilmesidir (238). Bununla birlikte, SII'nin oluşturduğu mekanik temizleme etkisi sınırlıdır. Önceki bir çalışmada, SII kullanıldığında irrigasyon solüsyonunun iğne ucundan yalnızca yaklaşık 1 mm daha apikale ilerleyebildiği gösterilmiştir (239). Bu bulgu klinik açıdan önemlidir; çünkü irrigasyon iğnesi çoğu zaman dar kanallarda koronal üçlüde, geniş kanallarda ise en fazla orta üçlü düzeyine kadar ilerletilebilmektedir (240). Ayrıca pozitif basınçlı irrigasyon sırasında özellikle apikal bölgede oluşabilen vapor lock etkisi, irrigasyon solüsyonunun kanalın apikal bölümüne ve anatomik düzensizliklere ulaşmasını sınırlandırabilmektedir (385). Ayrıca Sarıyılmaz ve ark., simüle İKR kavitelerinde Ultracal XS, Ledermix ve Bio-C Temp'in uzaklaştırılmasını değerlendirdikleri çalışmalarında en düşük etkinliğin SII gruplarında görüldüğünü bildirmiştir (165). Yazarlar bu bulguyu, SII'de irrigantın büyük ölçüde iğne ucunun çevresiyle sınırlı kalması nedeniyle rezorpsiyon kavitesine yeterli düzeyde ulaşamaması ve medikament kalıntılarının uzaklaştırılmasının kısıtlanması ile açıklamışlardır. Bu nedenle, çalışmamızda SII'nin düşük etkinlik göstermesi; irrigasyon solüsyonunun kanal sistemi içerisinde oluşturduğu hidrodinamik etkinin sınırlı kalması ve özellikle ana kanalın dışında yer alan İKR kavitesine yeterli düzeyde ulaşamaması ile açıklanabilir. Pozitif basınçlı irrigasyon sırasında irrigantın büyük ölçüde iğne ucunun çevresinde etkili olması, rezorpsiyon kavitesinde kalan medikament kalıntılarının uzaklaştırılmasını güçleştirmiş olabilir.

EA, esnek ve kesici olmayan polimer uçlar aracılığıyla irrigasyon solüsyonlarını aktive eden sonik bir irrigasyon sistemidir (235). Sonik sistemler, ultrasonik sistemlere göre daha düşük frekansta çalışmakta ve buna bağlı olarak daha düşük akış hızı ile kesme gerilimi oluşturmaktadır. Ayrıca sonik aktivasyon sırasında meydana gelen sıvı hareketinin, kavitasyon oluşumu için gerekli eşik değerin altında kaldığı bildirilmiştir (10). Her ne kadar EA kanal içerisinde belirli bir hidrodinamik etki meydana getirirse de oluşturduğu akustik akımın gücü PIPS veya XPF gibi sistemlere kıyasla daha sınırlı kalabilmektedir. Bu durum, mevcut çalışmada EA'nın medikament uzaklaştırma etkinliğinin Sİİ ile benzer olmasını ve PIPS ve XPF'den daha düşük performans göstermesini açıklayabilir.

Literatürdeki bazı çalışmalar da EA ve Sİİ'nin benzer etkinlik gösterebildiğini desteklemektedir. Topçuoğlu ve ark., simüle internal rezorpsiyon kavitelerinden CH'nin uzaklaştırılmasını değerlendirdikleri çalışmalarında Sİİ, CB ve EA grupları arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark bulunmadığını bildirmiştir (18). Benzer şekilde Keskin ve ark., simüle İKR kavitelerinde XPF, PUİ, EA, CB ve Sİİ tekniklerini karşılaştırmış ve Sİİ, EA ve CB grupları arasında anlamlı bir farklılık saptamamıştır (284). Almohareb ve ark. ise düz kök kanallarından Bio-C Temp'in uzaklaştırılmasında EA ile Sİİ arasında anlamlı bir fark olmadığını rapor etmiştir (168). Araştırmacılar, EA'nın Sİİ'ye göre ek bir üstünlük sağlayamamasını, sonik irrigasyonla oluşturulan sıvı hızının kavitasyon meydana getirmek için gerekli eşik değerin altında kalmasıyla ilişkilendirmiştir.

Çalışmamızda kullanılan medikamentlerin uzaklaştırılabilirliği karşılaştırıldığında, Ultracal XS ve Bio-C Temp arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark görülmemiştir. Dolayısıyla, “irrigasyon protokolü ve aktivasyon yönteminden bağımsız olarak Ultracal XS ve Bio-C Temp medikamentlerinin uzaklaştırılması arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark yoktur” şeklindeki hipotezimiz kabul edilmiştir. Bu bulgu, farklı kimyasal içeriklere sahip olmalarına rağmen her iki medikamentin de mevcut deneysel model koşullarında simüle İKR kavitelerinden benzer düzeyde uzaklaştırılabildiğini göstermektedir.

Ultracal XS, sulu taşıyıcıya sahip, radyopak ve yüksek pH'lı premiks bir CH patı olup içeriğinde CH, baryum sülfat ve metilselüloz bulunduğu bildirilmektedir (163). Bio-C Temp ise kalsiyum silikat esaslı biyoseramik bir kanal içi medikament olup kalsiyum silikat, kalsiyum alüminat, kalsiyum oksit, kalsiyum tungstat, titanyum oksit, salisilat ester ve polietilen glikol gibi bileşenler içermektedir (162). Her ne kadar Ultracal XS doğrudan CH içeren bir medikament, Bio-C Temp ise kalsiyum silikat esaslı bir materyal olsa da Bio-C

Temp'in nem varlığında gerçekleşen hidratasyon reaksiyonu sonucunda kalsiyum silikat hidrat jeli ve CH oluştuğu bildirilmiştir (167). Bu nedenle her iki materyal de kanal içerisinde kalsiyum içeren ve alkali özellik gösteren premiks patlar şeklinde davranabilmektedir.

Bununla birlikte, mevcut çalışmada kullanılan 3D baskılı rezin diş modellerinde dentin tübülleri, mineralize dentin matriksi ve doğal dentin yüzeyi bulunmamaktadır. Bu nedenle Bio-C Temp'in doğal dentinde gösterebileceği tübüler penetrasyon, biyoseramik-dentin etkileşimi veya yüzey bağlanması gibi mekanizmalar bu modelde ortaya çıkmamıştır. Her iki medikament de standartlaştırılmış rezorpsiyon kavitesi içerisinde yer alan premiks patlar olarak değerlendirilmiş ve uzaklaştırılmaları büyük ölçüde irrigasyonun oluşturduğu hidrodinamik etkilere bağlı kalmıştır. Bu durum, farklı kimyasal yapıya sahip olmalarına rağmen Ultracal XS ve Bio-C Temp'in benzer uzaklaştırılabilirlik göstermesini açıklayan önemli faktörlerden biri olabilir.

İki medikamentin zaman içerisindeki bazı fizikokimyasal özelliklerinin yaklaşması da benzer sonuçların elde edilmesine katkıda bulunmuş olabilir. Villa ve ark., Bio-C Temp ve Ultracal XS'in her ikisinin de alkali özellik gösterdiğini ve kalsiyum iyonu salımı gerçekleştirdiğini, ayrıca pasif olarak yerleştirildiklerinde her iki materyalde de dentin tübül penetrasyonunun gözlenmediğini bildirmiştir (160). Benzer şekilde Capitanio ve ark., Ultracal XS'in başlangıçta daha yüksek pH ve kalsiyum iyonu salımı göstermesine rağmen 72 ve 168 saat sonunda iki medikamentin pH değerlerinin benzer hâle geldiğini ve uzaklaştırma protokolü sonrasında her iki materyale ait kalıntıların kanal duvarlarında devam ettiğini göstermiştir (386). Bu bulgular doğrudan uzaklaştırılabilirliği değerlendirmemekle birlikte, her iki materyalin de kanal içerisinde benzer fizikokimyasal davranışlar gösterebildiğini ve uzaklaştırma sonrasında kanal duvarlarında kalıntı bırakabildiğini ortaya koymaktadır.

Literatürde Ultracal XS ve Bio-C Temp'in uzaklaştırılabilirliğini karşılaştıran çalışmaların sonuçları değişkenlik göstermektedir. Só ve ark. (387), Ultracal XS ve Bio-C Temp'in uzaklaştırılmasında konvansiyonel irrigasyon, PUI ve XPF yöntemlerini karşılaştırmış; kullanılan uzaklaştırma protokollerinin iki medikament arasında anlamlı bir farklılık oluşturmadığını bildirmiştir. Bu bulgu, çalışmamızda Ultracal XS ve Bio-C Temp arasında istatistiksel olarak anlamlı fark bulunmamasıyla paralellik göstermektedir. Benzer şekilde Araya-Cumsille ve ark. (169), Vertucci Tip II mezial molar kanallarında Bio-C Temp ve Ultracal XS'in yerleştirilmesi ve uzaklaştırılmasını mikro-BT ile değerlendirmiş; iki

medikament arasında hem yerleştirme hem de uzaklaştırma açısından istatistiksel olarak anlamlı fark bulunmadığını rapor etmiştir. Bu sonuç da çalışmamızda her iki medikamentin benzer uzaklaştırılabilirlik göstermesini desteklemektedir.

Buna karşın Sarıılmaz ve ark. (165), simüle İKR kavitelerinde Ultracal XS, Ledermix ve Bio-C Temp'in uzaklaştırılmasını değerlendirdikleri çalışmalarında Bio-C Temp'in diğer medikamentlere kıyasla daha zor uzaklaştırıldığını bildirmiştir. Araştırmacılar bu sonucu, Bio-C Temp'in küçük partikül boyutuna ve glikol bazlı taşıyıcısının düşük yüzey gerilimine bağlı olarak dentin yüzeyini daha etkin ıslatabilmesi ve dentin içerisine daha fazla penetre olabilmesi ile açıklamışlardır. Bu bulgu, çalışmamızda gözlenen benzer uzaklaştırılabilirlik bulgusuyla örtüşmemektedir. Söz konusu farklılık, kullanılan deneysel modeller arasındaki metodolojik farklılıklardan kaynaklanmış olabilir. Sarıılmaz ve ark. doğal dişlerde oluşturulan simüle İKR kavitelerini kullanırken, mevcut çalışmada standartlaştırılmış 3D baskılı rezin diş modelleri tercih edilmiştir. Doğal dentin kullanılan modellerde Bio-C Temp'in dentin tübüllerine penetrasyonu ve biyoseramik-dentin etkileşimi daha belirgin hâle gelebilirken, mevcut çalışmada bu etkileşimler söz konusu değildir. Bu nedenle Bio-C Temp ile Ultracal XS arasında doğal dentinde ortaya çıkabilecek olası uzaklaştırılabilirlik farklılıkları, kullanılan rezin modelde maskelenmiş olabilir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, elde edilen bulgular Ultracal XS ve Bio-C Temp'in simüle İKR kavitelerinden uzaklaştırılabilirlik açısından benzer performans gösterdiğini ortaya koymaktadır. Bu sonuç, mevcut deneysel modelde medikament uzaklaştırma başarısının materyaller arasındaki kimyasal farklılıklardan çok, irrigasyon sırasında oluşturulan hidrodinamik etkinlikten etkilendiğini düşündürmektedir.

Bu çalışmanın güçlü yönlerinden biri, standartlaştırılmış 3D baskılı internal rezorpsiyon modellerinin kullanılmış olmasıdır. Çalışmada kullanılan diş modelleri, İKR'li maksiller kesici diş morfolojisini temsil edecek şekilde özel olarak tasarlanmış; kök uzunluğu, koronal rezervuar, kanal genişliği ve rezorpsiyon kavitesi boyutları tüm örneklerde standardize edilmiştir. Rezorpsiyon kavitesinin apeks seviyesinden 5 mm uzaklıkta, 1,6 mm çapında ve 0,8 mm derinliğinde hazırlanmış olması, gruplar arasında kavite boyutu ve konumu açısından yüksek düzeyde standardizasyon sağlamıştır. Bu durum, doğal dişlerde görülebilen anatomik varyasyonlardan kaynaklanabilecek farklılıkları

azaltarak, uygulanan irrigasyon protokolleri ve aktivasyon yöntemlerinin daha kontrollü şekilde karşılaştırılmasına olanak tanımıştır.

Çalışmanın bir diğer güçlü yönü, beş farklı irrigasyon aktivasyon yönteminin aynı deneysel model içerisinde karşılaştırılmış olmasıdır. Sİİ, EA, PUI, XPF ve PIPS tekniklerinin; Ultracal XS ve Bio-C Temp medikamentleri ile HEDP ve NaOCl/EDTA irrigasyon protokolleri altında değerlendirilmesi, aktivasyon yöntemlerinin medikament uzaklaştırma etkinliklerinin kapsamlı bir şekilde incelenmesine olanak sağlamıştır. Ayrıca toplam 20 farklı çalışma grubunun oluşturulması, medikament, irrigasyon protokolü ve aktivasyon yöntemi arasındaki etkileşimlerin aynı metodolojik koşullar altında karşılaştırılabilmesine imkân vermiştir. Bu yönüyle çalışma, farklı irrigasyon stratejilerinin etkinliğini sistematik ve bütüncül bir yaklaşımla değerlendirmiştir.

Bu çalışmanın bazı sınırlılıkları bulunmaktadır. Bunlardan birincisi, çalışmanın in vitro koşullarda gerçekleştirilmiş olmasıdır. İn vitro çalışmalar, deneysel değişkenlerin kontrol edilmesi ve gruplar arasında standardizasyon sağlanması açısından avantajlı olmakla birlikte, klinik koşulları tam olarak yansıtamaz. Ağız içi ortamda bulunan tükürük, kan, eksüda, mikroorganizmalar, dentin yapısındaki bireysel farklılıklar, periodontal dokular, hasta ilişkili değişkenler ve klinik uygulama zorlukları bu modelde taklit edilememiştir. Bu nedenle elde edilen sonuçların klinik koşullara doğrudan aktarılması sınırlıdır.

Çalışmanın bir diğer sınırlılığı, yalnızca tek bir rezorpsiyon kavitesi boyutu ve konumunun değerlendirilmiş olmasıdır. Çalışmada tüm örneklerde İKR kavitesi 1,6 mm çapında, 0,8 mm derinliğinde ve apeks seviyesinden 5 mm uzaklıkta standardize edilmiştir. Ancak klinikte İKR lezyonları farklı boyutlarda, farklı derinliklerde, farklı lokalizasyonlarda ve düzensiz morfolojilerde görülebilir. Bu nedenle mevcut model, İKR'nin tüm klinik varyasyonlarını temsil etmemektedir. Daha geniş, daha derin, daha düzensiz veya farklı seviyelerde konumlanan rezorpsiyon kavitelerinde irrigasyon aktivasyon yöntemlerinin etkinliği farklılık gösterebilir.

Çalışmada doğal dentin yerine 3D baskılı rezin diş modellerinin kullanılması da hem güçlü bir standardizasyon sağlamış hem de önemli bir sınırlılık oluşturmuştur. Resin modellerde doğal dentine özgü dentin tübülleri, peritübüler ve intertübüler dentin yapısı, mineral içerik, yüzey pürüzlülüğü ve dentin-medikament etkileşimi bulunmamaktadır. Bu nedenle kanal içi medikamentlerin dentin tübüllerine penetrasyonu, dentin yüzeyine adaptasyonu ve EDTA veya HEDP gibi şelasyon ajanlarının mineralize dentin üzerindeki

etkileri bu modelde değerlendirilememiştir. Bu durum, çalışmada medikament veya irrigasyon solüsyonları arasında ortaya çıkabilecek bazı mikromorfolojik farklılıkların sınırlı kalmasına neden olmuş olabilir.

Bir diğer sınırlılık ise değerlendirme yönteminin stereomikroskopik görüntüler ve skorlama sistemi ile gerçekleştirilmiş olmasıdır. Bu yöntem, rezorpsiyon kavitesi içerisinde kalan medikament miktarının yüzey alanı bazında değerlendirilmesine olanak sağlamakla birlikte, mikro-BT gibi yöntemlerde mümkün olan üç boyutlu hacimsel analizleri sağlayamamaktadır. Bu nedenle gruplar arasında oluşabilecek küçük miktardaki kalıntı farklılıkları tam olarak ortaya konulamamış olabilir. Ayrıca çalışmada ImageJ yazılımı ile elde edilen yüzey alanı verileri belirli aralıklara ayrılarak skorlanmıştır. Skorlama sistemleri değerlendirmeyi standardize etmek ve istatistiksel karşılaştırmaları kolaylaştırmak açısından avantaj sağlamakla birlikte, aynı skor kategorisi içerisinde yer alan örnekler arasında belirli düzeyde farklılıklar bulunabilmektedir. Bu durum, özellikle birbirine yakın sonuçlar veren gruplar arasındaki küçük farkların istatistiksel olarak ortaya konulmasını sınırlandırmış olabilir.

Bunun yanı sıra, örnek sayısı istatistiksel analiz için yeterli olsa da daha geniş örneklem gruplarıyla yapılacak çalışmalar sonuçların genellenebilirliğini artıracaktır. İleride yapılacak çalışmalarda; daha büyük örneklem grupları, farklı boyutlarda ve lokalizasyonlarda oluşturulmuş İKR kavitelerine sahip dişlerin kullanılması ve ayrıca değerlendirme yapmak için mikro-BT gibi ileri görüntüleme yöntemlerinin kullanılması önerilmektedir.

6. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu in vitro çalışmada, 3D baskılı internal kök rezorpsiyonlu dişlerde HEDP'nin, farklı irrigasyon aktivasyon yöntemleriyle Ultracal XS ve Bio-C Temp kanal içi medikamentlerinin uzaklaştırılmasındaki etkinliği değerlendirilmiş ve elde edilen bulgular geleneksel NaOCl/EDTA irrigasyon protokolü ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen bulgular doğrultusunda aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

1. Kanal içi medikamentlerin simüle edilmiş İKR kavitelerinden hiçbir irrigasyon protokolü veya aktivasyon yöntemiyle tamamen uzaklaştırılamadığı görülmüştür. Bu bulgu, internal rezorpsiyon kavitelerinin retantif ve erişimi güç morfolojisi nedeniyle kanal içi medikamentlerin tam eliminasyonunun klinik olarak zor olabileceğini göstermektedir.
2. Aynı aktivasyon yöntemi içerisinde karşılaştırıldığında, HEDP ve NaOCl/EDTA irrigasyon protokolleri arasında medikament uzaklaştırma etkinliği açısından istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık bulunmamıştır. Bu bulgu, farklı kimyasal özelliklere sahip olmalarına rağmen her iki irrigasyon protokolünün de simüle İKR kavitelerinden medikament uzaklaştırılmasında benzer etkinlik gösterebildiğini düşündürmektedir.
3. Hem Bio-C Temp hem de Ultracal XS gruplarında irrigasyon aktivasyon yöntemleri, medikament uzaklaştırma etkinliğini anlamlı düzeyde etkilemiştir. Gruplar arasında istatistiksel olarak anlamlı farklılık bulunması, medikament uzaklaştırılmasında kullanılan irrigasyon solüsyonundan ziyade, solüsyonun hangi yöntemle aktive edildiğinin daha önemli olduğunu göstermektedir.
4. PIPS aktivasyon yöntemi her iki medikament grubunda da en başarılı sonuçları göstermiştir. PIPS gruplarında daha düşük medikament kalıntı skorlarının elde edilmesi, fotoakustik ve fotomekanik aktivasyonun İKR kaviteleri gibi düzensiz alanlarda irrigasyon etkinliğini artırabileceğini göstermektedir.
5. XPF aktivasyon yöntemi de medikament uzaklaştırılmasında yüksek etkinlik göstermiş ve birçok grupta PIPS ile benzer sonuçlar elde edilmiştir. Bu bulgu, XPF'nin özellikle mekanik aktivasyon ve geniş hareket paterni sayesinde İKR kavitesi içerisinde kalan medikament kalıntılarının uzaklaştırılmasına katkı sağlayabileceğini göstermektedir.

6. PUI uygulanan gruplarda medikament kalıntı skorları genel olarak Sİİ ve EA gruplarına kıyasla daha düşük bulunmuştur. Bununla birlikte, PUI ile Sİİ ve EA grupları arasındaki farklar çoğu karşılaştırmada istatistiksel olarak anlamlı düzeye ulaşmamıştır.
7. Sİİ ve EA gruplarında genel olarak daha yüksek medikament kalıntı skorları gözlenmiştir. Bu yöntemler, özellikle PIPS ve XPF gibi daha güçlü aktivasyon sistemlerine kıyasla daha sınırlı temizleme etkinliği göstermiştir. Ayrıca Sİİ ve EA grupları arasında istatistiksel olarak anlamlı fark bulunmaması, sonik aktivasyonun mevcut deneysel modelde Sİİ'ye göre belirgin bir ek avantaj sağlamadığını göstermektedir.
8. Kullanılan medikamentler karşılaştırıldığında, Ultracal XS ve Bio-C Temp arasında uzaklaştırılabilirlik açısından istatistiksel olarak anlamlı bir fark bulunmamıştır. Bu bulgu, iki medikamentin farklı kimyasal içeriklere sahip olmasına rağmen, 3D baskılı standart İKR kavitesi modelinde benzer retansiyon ve hidrodinamik etki göstermiş olabileceğini göstermektedir.
9. Çalışmanın bulguları, simüle İKR kavitelerinde kanal içi medikamentlerin uzaklaştırılmasında irrigasyon solüsyonu ve medikamentten ziyade, aktivasyon yönteminin daha belirleyici bir faktör olduğunu göstermektedir.

7. KAYNAKLAR

1. Galler KM, Grätz E-M, Widbiller M, Buchalla W, Knüttel H (2021). Pathophysiological mechanisms of root resorption after dental trauma: a systematic scoping review. *BMC Oral Health* 21: 163.
2. Nilsson E, Bonte E, Bayet F, Lasfargues J-J (2013). Management of Internal Root Resorption on Permanent Teeth. *International Journal of Dentistry* 2013: 1–7.
3. Patel S, Saberi N, Pimental T, Teng P (2022). Present status and future directions: Root resorption. *International Endodontic Journal* 55: 892–921.
4. HAAPASALO M, ENDAL U (2006). Internal inflammatory root resorption: the unknown resorption of the tooth. *Endodontic Topics* 14: 60–79.
5. Margelos J, Eliades G, Verdelis C, Palaghias G (1997). Interaction of calcium hydroxide with zinc oxide-eugenol type sealers: A potential clinical problem. *Journal of Endodontics* 23: 43–48.
6. Kim SK, Kim YO (2002). Influence of calcium hydroxide intracanal medication on apical seal. *International Endodontic Journal* 35: 623–628.
7. Çalt S, Serper A (1999). Dentinal tubule penetration of root canal sealers after root canal dressing with calcium hydroxide. *Journal of Endodontics* 25: 431–433.
8. Parikh M, Kishan K, Solanki N, Parikh M, Savaliya K, Bindu V, Devika Td (2019). Efficacy of removal of calcium hydroxide medicament from root canals by endoactivator and endovac irrigation techniques: A Systematic review of in vitro studies. *Contemporary Clinical Dentistry* 10: 135.
9. Arora R, Gupta T, Mirdha N, Gill B (2022). Comparative evaluation of efficacy of different irrigation devices in removal of calcium hydroxide in teeth with simulated internal resorption cavities – An in vitro study. *Journal of Conservative Dentistry* 25: 625.
10. Jiang L-M, Verhaagen B, Versluis M, van der Sluis LWM (2010). Evaluation of a Sonic Device Designed to Activate Irrigant in the Root Canal. *Journal of Endodontics* 36: 143–146.
11. 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: 321–325.
12. Zhou J, Liu T, Guo L (2021). Effectiveness of XP-Endo Finisher and passive ultrasonic irrigation on intracanal medicament removal from root canals: a systematic review and meta-analysis. *BMC Oral Health* 21: 294.
13. DiVito E, Peters OA, Olivi G (2012). Effectiveness of the erbium:YAG laser and new design radial and stripped tips in removing the smear layer after root canal instrumentation. *Lasers in Medical Science* 27: 273–280.
14. Kirmizi D, Aksoy U, Orhan K (2021). Efficacy of Laser-Activated Irrigation and Conventional Techniques in Calcium Hydroxide Removal from Simulated Internal Resorption Cavities: Micro-CT Study. *Photobiomodulation, Photomedicine, and Laser Surgery* 39: 674–681.

15. Arslan H, Akcay M, Capar ID, Saygili G, Gok T, Ertas H (2015). An in vitro comparison of irrigation using photon-initiated photoacoustic streaming, ultrasonic, sonic and needle techniques in removing calcium hydroxide. *International Endodontic Journal* 48: 246–251.
16. LLOYD A, NAVARRETE G, MARCHESAN MA, CLEMENT D (2016). Removal of calcium hydroxide from Weine Type II systems using photon-induced photoacoustic streaming, passive ultrasonic, and needle irrigation: a microcomputed tomography study. *Journal of Applied Oral Science* 24: 543–548.
17. Kuştarcı A, Er K, Siso SH, Aydın H, Harorlı H, Arslan D, Kirmali O (2016). Efficacy of Laser-Activated Irrigants in Calcium Hydroxide Removal from the Artificial Grooves in Root Canals: An *Ex Vivo* Study. *Photomedicine and Laser Surgery* 34: 205–210.
18. Topçuoğlu HS, Düzgün S, Ceyhanlı KT, Aktı A, Pala K, Kesim B (2015). Efficacy of different irrigation techniques in the removal of calcium hydroxide from a simulated internal root resorption cavity. *International Endodontic Journal* 48: 309–316.
19. Ulusoy Öİ, Savur İG, Alaçam T, Çelik B (2018). The effectiveness of various irrigation protocols on organic tissue removal from simulated internal resorption defects. *International Endodontic Journal* 51: 1030–1036.
20. Marques-da-Silva B, Alberton CS, Tomazinho FSF, Gabardo MCL, Duarte MAH, Vivan RR, Baratto-Filho F (2020). Effectiveness of five instruments when removing calcium hydroxide paste from simulated internal root resorption cavities in extracted maxillary central incisors. *International Endodontic Journal* 53: 366–375.
21. Reymus M, Stawarczyk B, Winkler A, Ludwig J, Kess S, Krastl G, Krug R (2020). A critical evaluation of the material properties and clinical suitability of in-house printed and commercial tooth replicas for endodontic training. *International Endodontic Journal* 53: 1446–1454.
22. Reymus M, Fotiadou C, Kessler A, Heck K, Hickel R, Diegritz C (2019). 3D printed replicas for endodontic education. *International Endodontic Journal* 52: 123–130.
23. Düzgün S, Çiçek M, Yavuz B, Topçuoğlu HS, Eraslan Akyüz İ (2025). Efficacy of activation systems in removing calcium hydroxide from 3D printed internal resorption cavities: a new study design. *The International Journal of Artificial Organs* 48: 897–903.
24. Yoo Y-J, Kim J-H, Hwang J-J, Sigurdsson A, Kim H-C (2024). Efficacy of Different Irrigation Needles and Ultrasonic Activation on Calcium Hydroxide Removal: A Micro-CT Study Using 3D-Printed Endodontic Models. *Journal of Endodontics* 50: 1478–1483.
25. Neelakantan P, Sriraman P, Gutmann JL (2017). Removal of calcium hydroxide intracanal medicament by different irrigants and irrigating techniques: a cone beam computed tomography analysis. *General dentistry* 65: 45–49.
26. Üstün Y, Aslan T, Sagsen B, Dinçer A (2016). The effects of different irrigation protocols on removing calcium hydroxide from the root canals. *Nigerian Journal of Clinical Practice* 19: 465.
27. Chockattu S, Deepak B, Goud Km (2017). Comparison of efficiency of ethylenediaminetetraacetic acid, citric acid, and etidronate in the removal of calcium

- hydroxide intracanal medicament using scanning electron microscopic analysis: An in-vitro study. *Journal of Conservative Dentistry* 20: 6.
28. Garg N GA (2010). *Textbook of endodontics*, 2nd ed. New Delhi: Boydell & Brewer Ltd.
 29. Patel S, Kanagasingam S, Pitt Ford T (2009). External Cervical Resorption: A Review. *Journal of Endodontics* 35: 616–625.
 30. Patel S, Ford TP (2007). Is the Resorption External or Internal? *Dental Update* 34: 218–229.
 31. Bille MLB, Kvetny MJ, Kjaer I (2008). A possible association between early apical resorption of primary teeth and ectodermal characteristics of the permanent dentition. *The European Journal of Orthodontics* 30: 346–351.
 32. Bille MLB, Nolting D, Kvetny MJ, Kjær I (2007). Unexpected early apical resorption of primary molars and canines. *European Archives of Paediatric Dentistry* 8: 144–149.
 33. Al-Momani Z, Nixon PJ (2013). Internal and external root resorption: aetiology, diagnosis and treatment options. *Dental Update* 40: 102–112.
 34. Tronstad L (1988). Root resorption — etiology, terminology and clinical manifestations. *Dental Traumatology* 4: 241–252.
 35. ANDREASEN JO (1970). Luxation of permanent teeth due to trauma A clinical and radiographic follow-up study of 189 injured teeth. *European Journal of Oral Sciences* 78: 273–286.
 36. Aidos FA (2018). Root Resorption Classifications: A Narrative Review and a Clinical Aid Proposal for Routine Assessment. *European Endodontic Journal*. doi:10.14744/eej.2018.33043.
 37. Patel S, Saberi N (2018). The ins and outs of root resorption. *British Dental Journal* 224: 691–699.
 38. Darcey J, Qualtrough A (2013). Resorption: part 1. Pathology, classification and aetiology. *British Dental Journal* 214: 439–451.
 39. Iglesias-Linares A, Hartsfield JK (2017). Cellular and Molecular Pathways Leading to External Root Resorption. *Journal of Dental Research* 96: 145–152.
 40. Gunraj MN (1999). Dental root resorption. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontology* 88: 647–653.
 41. Lima T, Gamba T, Zaia A, Soares A (2016). Evaluation of cone beam computed tomography and periapical radiography in the diagnosis of root resorption. *Australian Dental Journal* 61: 425–431.
 42. Takeshita W, Chicarelli M, Iwaki LV (2015). Comparison of diagnostic accuracy of root perforation, external resorption and fractures using cone-beam computed tomography, panoramic radiography and conventional & digital periapical radiography. *Indian Journal of Dental Research* 26: 619.
 43. D’Addazio PSS, Campos CN, Özcan M, Teixeira HGC, Passoni RM, Carvalho ACP (2011). A comparative study between cone-beam computed tomography and periapical radiographs in the diagnosis of simulated endodontic complications. *International Endodontic Journal* 44: 218–224.

44. Heboyan AG AAMMM (2018). Clinical case of a rarely diagnosed tooth root internal resorption. *The New Armenian Medical Journal* 12: 87–92.
45. Consolaro A (2019). Extreme root resorption in orthodontic practice: teeth do not have to be replaced with implants. *Dental Press Journal of Orthodontics* 24: 20–28.
46. Wedenberg C, Zetterqvist L (1987). Internal resorption in human teeth—a histological, scanning electron microscopic, and enzyme histochemical study. *Journal of Endodontics* 13: 255–259.
47. Rabinowitch BZ (1972). Internal resorption. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology* 33: 263–282.
48. Penido RS, CR& CAJ (1980). The anachoretic effect in root resorption: report of case. *The Journal of Pedodontics* 5: 85–88.
49. Walton RE, Leonard LA (1986). Cracked tooth: An etiology for “idiopathic” internal resorption? *Journal of Endodontics* 12: 167–169.
50. Cabrini RL, Maisto OA, Manfredi EE (1957). Internal Resorption of dentine. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology* 10: 90–96.
51. Seltzer S. and Bender I. (1975). *The Dental Pulp*, 2nd ed. Philadelphia, Pa, USA.: J. B. Lippincott.
52. Ramchandani PL, Mellor TK (2007). Herpes zoster associated with tooth resorption and periapical lesions. *British Journal of Oral and Maxillofacial Surgery* 45: 71–73.
53. Urban D, Mincik J (2010). Monozygotic twins with idiopathic internal root resorption: A case report. *Australian Endodontic Journal* 36: 79–82.
54. Çalışkan MK, Türkün M (1997). Prognosis of permanent teeth with internal resorption: a clinical review. *Dental Traumatology* 13: 75–81.
55. Dao V, Mallya SM, Markovic D, Tetradis S, Chugal N (2023). Prevalence and Characteristics of Root Resorption Identified in Cone-Beam Computed Tomography Scans. *Journal of Endodontics* 49: 144–154.
56. McHugh KP, Shen Z, Crotti T, Flannery MR, Fajardo RJ, Bierbaum BE, Goldring SR (2007). Role of Cell-matrix Interactions in Osteoclast Differentiation pp 107–111. doi:10.1007/978-0-387-72009-8_14.
57. Udagawa N, Takahashi N, Akatsu T, Tanaka H, Sasaki T, Nishihara T, Koga T, Martin TJ, Suda T (1990). Origin of osteoclasts: mature monocytes and macrophages are capable of differentiating into osteoclasts under a suitable microenvironment prepared by bone marrow-derived stromal cells. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 87: 7260–7264.
58. Saltel F, Chabadel A, Bonnelye E, Jurdic P (2008). Actin cytoskeletal organisation in osteoclasts: A model to decipher transmigration and matrix degradation. *European Journal of Cell Biology* 87: 459–468.
59. Takahashi N, Ejiri S, Yanagisawa S, Ozawa H (2007). Regulation of osteoclast polarization. *Odontology* 95: 1–9.
60. Pierce AM (1989). Experimental basis for the management of dental resorption. *Dental Traumatology* 5: 255–265.

61. Silver IA, Murrills RJ, Etherington DJ (1988). Microelectrode studies on the acid microenvironment beneath adherent macrophages and osteoclasts. *Experimental Cell Research* 175: 266–276.
62. Furseth R (1968). The resorption processes of human deciduous teeth studied by light microscopy, microradiography and electron microscopy. *Archives of Oral Biology* 13: 417–431.
63. Lindskog S, Blomlöf L, Hammarström L (1983). Repair of periodontal tissues In vivo and in vitro. *Journal of Clinical Periodontology* 10: 188–205.
64. Nilsen R, Magnusson BC (1979). Enzyme histochemistry of induced heterotropic bone formation in guinea-pigs. *Archives of Oral Biology* 24: 833–841.
65. Speziani C, Rivollier A, Gallois A, Coury F, Mazzorana M, Azocar O, Flacher M, Bella C, Tebib J, Jurdic P, *et al.* (2007). Murine dendritic cell transdifferentiation into osteoclasts is differentially regulated by innate and adaptive cytokines. *European Journal of Immunology* 37: 747–757.
66. Gallois A, Lachuer J, Yvert G, Wierinckx A, Brunet F, Rabourdin-Combe C, Delprat C, Jurdic P, Mazzorana M (2010). Genome-wide expression analyses establish dendritic cells as a new osteoclast precursor able to generate bone-resorbing cells more efficiently than monocytes. *Journal of Bone and Mineral Research* 25: 661–672.
67. Tyrovolas JB, Spyropoulos MN, Makou M, Perrea D (2008). Root resorption and the OPG/RANKL/RANK system: a mini review. *Journal of Oral Science* 50: 367–376.
68. Wada N, Maeda H, Tanabe K, Tsuda E, Yano K, Nakamuta H, Akamine A (2001). Periodontal ligament cells secrete the factor that inhibits osteoclastic differentiation and function: the factor is osteoprotegerin/osteoclastogenesis inhibitory factor. *Journal of Periodontal Research* 36: 56–63.
69. Uchiyama M, Nakamichi Y, Nakamura M, Kinugawa S, Yamada H, Udagawa N, Miyazawa H (2009). Dental Pulp and Periodontal Ligament Cells Support Osteoclastic Differentiation. *Journal of Dental Research* 88: 609–614.
70. Trope M (1998). Root resorption of dental and traumatic origin: classification based on etiology. *Practical periodontics and aesthetic dentistry : PPAD* 10: 515–522.
71. WEDENBERG C, LINDSKOG S (1987). Evidence for a resorption inhibitor in dentin. *European Journal of Oral Sciences* 95: 205–211.
72. WEDENBERG C (1987). Evidence for a dentin-derived inhibitor of macrophage spreading. *European Journal of Oral Sciences* 95: 381–388.
73. Nakamura I, Duong LT, Rodan SB, Rodan GA (2007). Involvement of $\alpha\text{v}\beta 3$ integrins in osteoclast function. *Journal of Bone and Mineral Metabolism* 25: 337–344.
74. Ishijima M, Rittling SR, Yamashita T, Tsuji K, Kurosawa H, Nifuji A, Denhardt DT, Noda M (2001). Enhancement of Osteoclastic Bone Resorption and Suppression of Osteoblastic Bone Formation in Response to Reduced Mechanical Stress Do Not Occur in the Absence of Osteopontin. *The Journal of Experimental Medicine* 193: 399–404.
75. Patel S, Ricucci D, Durak C, Tay F (2010). Internal Root Resorption: A Review. *Journal of Endodontics* 36: 1107–1121.
76. Ricucci (1998). Apical limit of root canal instrumentation and obturation, part 1. Literature review. *International Endodontic Journal* 31: 384–393.

77. Frank AL, Weine FS (1973). Nonsurgical Therapy for the Perforative Defect of Internal Resorption. *The Journal of the American Dental Association* 87: 863–868.
78. Mummery J.H. (1920). The pathology of pink spots on teeth. *British Dental Journal* 41: 301–311.
79. Wedenberg C, Lindskog S (1985). Experimental internal resorption in monkey teeth. *Dental Traumatology* 1: 221–227.
80. J B MASTERTON (1965). Internal resorption of the dentine: a complication arising from unhealed pulp wounds. *British Dental Journal* 118: 241–249.
81. Heithersay G (2007). Management of tooth resorption. *Australian Dental Journal* 52.
82. Abbott P V., Lin S (2022). Tooth resorption—Part 2: A clinical classification. *Dental Traumatology* 38: 267–285.
83. Patel S; DC; RD (2016). Root resorption. In: Hargreaves KM; BLH, editor. *Pathways of the Pulp*, 11th ed. St Louis: Elsevier, pp 660–683.
84. Cotran RS; KV; CT (1999). *Robbins: Pathologic Basis of Disease* Philadelphia, PA: WB Saunders.
85. Andreasen FM, Andreasen JO (1988). Resorption and mineralization processes following root fracture of permanent incisors. *Dental Traumatology* 4: 202–214.
86. Lyroutdia KM, Dourou VI, Pantelidou OCH, Labrianidis T, Pitas IK (2002). Internal root resorption studied by radiography, stereomicroscope, scanning electron microscope and computerized 3D reconstructive method. *Dental Traumatology* 18: 148–152.
87. Thomas P, Krishna Pillai R, Pushparajan Ramakrishnan B, Palani J (2014). An insight into internal resorption. *ISRN dentistry* 2014: 759326.
88. Gartner AH, Mack T, Somerlott RG, Walsh LC (1976). Differential diagnosis of internal and external root resorption. *Journal of Endodontics* 2: 329–334.
89. Patel S, Brown J, Semper M, Abella F, Mannocci F (2019). European Society of Endodontology position statement: Use of cone beam computed tomography in Endodontics. *International Endodontic Journal* 52: 1675–1678.
90. Fayad MI, Nair M, Levin MD, Benavides E, Rubinstein RA, Barghan S, Hirschberg CS, Ruprecht A (2015). AAE and AAOMR Joint Position Statement. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology and Oral Radiology* 120: 508–512.
91. Bhuva B, Barnes JJ, Patel S (2011). The use of limited cone beam computed tomography in the diagnosis and management of a case of perforating internal root resorption. *International Endodontic Journal* 44: 777–786.
92. Patel S, Dawood A, Wilson R, Horner K, Mannocci F (2009). The detection and management of root resorption lesions using intraoral radiography and cone beam computed tomography - an in vivo investigation. *International Endodontic Journal* 42: 831–838.
93. Madani Z, Moudi E, Bijani A, Mahmoudi E (2016). Diagnostic Accuracy of Cone-Beam Computed Tomography and Periapical Radiography in Internal Root Resorption. *Iranian endodontic journal* 11: 51–6.

94. Patel S, Brown J, Semper M, Abella F, Mannocci F (2019). European Society of Endodontology position statement: Use of cone beam computed tomography in Endodontics: European Society of Endodontology (ESE) developed by: *International Endodontic Journal* 52: 1675–1678.
95. Ricucci, Langeland (1998). Apical limit of root canal instrumentation and obturation, part 2. A histological study. *International Endodontic Journal* 31: 394–409.
96. BURLESON A, NUSSTEIN J, READER A, BECK M (2007). The In Vivo Evaluation of Hand/Rotary/Ultrasound Instrumentation in Necrotic, Human Mandibular Molars. *Journal of Endodontics* 33: 782–787.
97. Goldberg F, Massone EJ, Esmoris M, Alfie D (2000). Comparison of different techniques for obturating experimental internal resorptive cavities. *Dental Traumatology* 16: 116–121.
98. Gencoglu N, Yildirim T, Garip Y, Karagenc B, Yilmaz H (2008). Effectiveness of different gutta-percha techniques when filling experimental internal resorptive cavities. *International Endodontic Journal* 41: 836–842.
99. Regan JD, Gutmann JL, Witherspoon DE (2002). Comparison of Diaket and MTA when used as root-end filling materials to support regeneration of the periradicular tissues. *International Endodontic Journal* 35: 840–847.
100. MAIN C, MIRZAYAN N, SHABAHANG S, TORABINEJAD M (2004). Repair of Root Perforations Using Mineral Trioxide Aggregate: A Long-term Study. *Journal of Endodontics* 30: 80–83.
101. HSIEN H, CHENG Y, LEE Y, LAN W, LIN C (2003). Repair of Perforating Internal Resorption with Mineral Trioxide Aggregate: A Case Report. *Journal of Endodontics* 29: 538–539.
102. Jacobovitz M, De Lima RKP (2008). Treatment of inflammatory internal root resorption with mineral trioxide aggregate: A case report. *International Endodontic Journal* 41: 905–912.
103. Sundqvist G (1992). Ecology of the root canal flora. *Journal of Endodontics* 18: 427–430.
104. MÖLLER ÅJR, FABRICIUS L, DAHLÉN G, ÖHMAN AE, HEYDEN G (1981). Influence on periapical tissues of indigenous oral bacteria and necrotic pulp tissue in monkeys. *European Journal of Oral Sciences* 89: 475–484.
105. Kakehashi S, Stanley HR, Fitzgerald RJ (1965). The effects of surgical exposures of dental pulps in germ-free and conventional laboratory rats. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology* 20: 340–349.
106. BYSTRÖM A, SUNDQVIST G (1981). Bacteriologic evaluation of the efficacy of mechanical root canal instrumentation in endodontic therapy. *European Journal of Oral Sciences* 89: 321–328.
107. Molander A, Warfvinge J, Reit C, Kvist T (2007). Clinical and Radiographic Evaluation of One- and Two-visit Endodontic Treatment of Asymptomatic Necrotic Teeth with Apical Periodontitis: A Randomized Clinical Trial. *Journal of Endodontics* 33: 1145–1148.

108. Wu M -K., Dummer PMH, Wesselink PR (2006). Consequences of and strategies to deal with residual post-treatment root canal infection. *International Endodontic Journal* 39: 343–356.
109. Mohammadi Z, Dummer PMH (2011). Properties and applications of calcium hydroxide in endodontics and dental traumatology. *International Endodontic Journal* 44: 697–730.
110. Weine FS (1976). *Endodontic therapy*, 2nd ed. St. Louis: CV Mosby Co.
111. Siqueira JF, Rôças IN, Ricucci D, Hülsmann M (2014). Causes and management of post-treatment apical periodontitis. *British Dental Journal* 216: 305–312.
112. Barbosa-Ribeiro M, Arruda-Vasconcelos R, de-Jesus-Soares A, Zaia AA, Ferraz CCR, de Almeida JFA, Gomes BPFA (2019). Effectiveness of calcium hydroxide-based intracanal medication on infectious/inflammatory contents in teeth with post-treatment apical periodontitis. *Clinical Oral Investigations* 23: 2759–2766.
113. CHONG BS, FORD TRP (1992). The role of intracanal medication in root canal treatment. *International Endodontic Journal* 25: 97–106.
114. Fouad AF, Diogenes AR, Torabinejad M, Hargreaves KM (2022). Microbiome Changes during Regenerative Endodontic Treatment Using Different Methods of Disinfection. *Journal of Endodontics* 48: 1273–1284.
115. Hussein H, Kishen A (2022). Local Immunomodulatory Effects of Intracanal Medications in Apical Periodontitis. *Journal of Endodontics* 48: 430–456.
116. Siqueira JF, Lopes HP (1999). Mechanisms of antimicrobial activity of calcium hydroxide: a critical review. *International Endodontic Journal* 32: 361–369.
117. Abbott P V. (1990). Medicaments: Aids to success in endodontics. Part 1. A review of the literature. *Australian Dental Journal* 35: 438–448.
118. Zou X, Zheng X, Liang Y, Zhang C, Fan B, Liang J, Ling J, Bian Z, Yu Q, Hou B, *et al.* (2024). Expert consensus on irrigation and intracanal medication in root canal therapy. *International Journal of Oral Science* 16: 23.
119. Penesis VA, Fitzgerald PI, Fayad MI, Wenckus CS, BeGole EA, Johnson BR (2008). Outcome of One-visit and Two-visit Endodontic Treatment of Necrotic Teeth with Apical Periodontitis: A Randomized Controlled Trial with One-year Evaluation. *Journal of Endodontics* 34: 251–257.
120. Patil AA (2016). Incidence of Postoperative Pain after Single Visit and Two Visit Root Canal Therapy: A Randomized Controlled Trial. *JOURNAL OF CLINICAL AND DIAGNOSTIC RESEARCH*. doi:10.7860/JCDR/2016/16465.7724.
121. Karaoğlu F, Miçooğulları Kurt S, Çalışkan MK (2022). Outcome of single- versus two-visit root canal retreatment in teeth with periapical lesions: A randomized clinical trial. *International Endodontic Journal* 55: 833–843.
122. Schwendicke F, Göstemeyer G (2017). Single-visit or multiple-visit root canal treatment: systematic review, meta-analysis and trial sequential analysis. *BMJ Open* 7: e013115.
123. Tepel J, el Sawaf MD, Hoppe W (1994). Reaction of inflamed periapical tissue to intracanal medicaments and root canal sealers. *Dental Traumatology* 10: 233–238.

124. TANOMARUFILHO M, LEONARDO M, BEZERRADASILVA L (2002). Effect of Irrigating Solution and Calcium Hydroxide Root Canal Dressing on the Repair of Apical and Periapical Tissues of Teeth with Periapical Lesion. *Journal of Endodontics* 28: 295–299.
125. Figini L, Lodi G, Gorni F, Gagliani M (2008). Single Versus Multiple Visits for Endodontic Treatment of Permanent Teeth: A Cochrane Systematic Review. *Journal of Endodontics* 34: 1041–1047.
126. Athanassiadis B, Abbott P, Walsh L (2007). The use of calcium hydroxide, antibiotics and biocides as antimicrobial medicaments in endodontics. *Australian Dental Journal* 52.
127. Abbott P V., Hume WR, Pearman JW (1990). Antibiotics and endodontics. *Australian Dental Journal* 35: 50–60.
128. WINDLEYIII W, TEIXEIRA F, LEVIN L, SIGURDSSON A, TROPE M (2005). Disinfection of Immature Teeth with a Triple Antibiotic Paste. *Journal of Endodontics* 31: 439–443.
129. HOSHINO E, KURIHARA-ANDO N, SATO I, UEMATSU H, SATO M, KOTA K, IWAKU M (1996). In-vitro antibacterial susceptibility of bacteria taken from infected root dentine to a mixture of ciprofloxacin, metronidazole and minocycline. *International Endodontic Journal* 29: 125–130.
130. Wei X, Yang M, Yue L, Huang D, Zhou X, Wang X, Zhang Q, Qiu L, Huang Z, Wang H, *et al.* (2022). Expert consensus on regenerative endodontic procedures. *International Journal of Oral Science* 14: 55.
131. Ruparel NB, Teixeira FB, Ferraz CCR, Diogenes A (2012). Direct Effect of Intracanal Medicaments on Survival of Stem Cells of the Apical Papilla. *Journal of Endodontics* 38: 1372–1375.
132. Sreenivasan P, Gaffar A (2002). Antiplatelet biocides and bacterial resistance: a review. *Journal of Clinical Periodontology* 29: 965–974.
133. Russell AD, Path FRC (1986). Chlorhexidine: Antibacterial action and bacterial resistance. *Infection* 14: 212–215.
134. HELING I, STEINBERG D, KENIG S, GAVRILOVICH I, SELA MN, FRIEDMAN M (1992). Efficacy of a sustained-release device containing chlorhexidine and Ca(OH)₂ in preventing secondary infection of dentinal tubules. *International Endodontic Journal* 25: 20–24.
135. KOMOROWSKI R, GRAD H, YUWU X, FRIEDMAN S (2000). Antimicrobial Substantivity of Chlorhexidine-Treated Bovine Root Dentin. *Journal of Endodontics* 26: 315–317.
136. W Spångberg LS, Haapasalo M (2002). Endodontic Topics 2: 35–58.
137. Fager FK, Messer HH (1986). Systemic distribution of camphorated monochlorophenol from cotton pellets sealed in pulp chambers. *Journal of Endodontics* 12: 225–230.
138. Haapasalo M, Endal U, Zandi H, Coil JM (2005). Eradication of endodontic infection by instrumentation and irrigation solutions. *Endodontic Topics* 10: 77–102.

139. Spångberg L, Rutberg M, Rydinge E (1979). Biologic effects of endodontic antimicrobial agents. *Journal of Endodontics* 5: 166–175.
140. Safavi KE, Spngberg LSW, Langeland K (1990). Root canal dentinal tubule disinfection. *Journal of Endodontics* 16: 207–210.
141. Tang G, Samaranayake L, Yip H (2004). Molecular evaluation of residual endodontic microorganisms after instrumentation, irrigation and medication with either calcium hydroxide or Septomixine. *Oral Diseases* 10: 389–397.
142. Farhad A, Mohammadi Z (2005). Calcium hydroxide: a review. *International Dental Journal* 55: 293–301.
143. Siqueira JF (2001). Strategies to treat infected root canals. *Journal of California Dental Association* 29: 825–37.
144. Tronstad L, Andreasen JO, Hasselgren G, Kristerson L, Riis I (1981). pH changes in dental tissues after root canal filling with calcium hydroxide. *Journal of Endodontics* 7: 17–21.
145. Hasselgren G, Olsson B, Cvek M (1988). Effects of calcium hydroxide and sodium hypochlorite on the dissolution of necrotic porcine muscle tissue. *Journal of Endodontics* 14: 125–127.
146. Stashenko P (1990). The role of immune cytokines in the pathogenesis of periapical lesions. *Dental Traumatology* 6: 89–96.
147. Rietschel ET BH (1992). Bacterial endotoxins. *Scientific American* 267: 26–33.
148. BARTHEL CR, LEVIN LG, REISNER HM, TROPE M (1997). TNF- α release in monocytes after exposure to calcium hydroxide treated Escherichia coli LPS. *International Endodontic Journal* 30: 155–159.
149. Katebzadeh N, Hupp J, Trope M (1999). Histological periapical repair after obturation of infected root canals in dogs. *Journal of Endodontics* 25: 364–368.
150. Leonardo MR, Bezerra da Silva LA, Leonardo R de T, Utrilla LS, Assed S (1993). Histological evaluation of therapy using a calcium hydroxide dressing for teeth with incompletely formed apices and periapical lesions. *Journal of Endodontics* 19: 348–352.
151. SAFAVI K, NICHOLS F (1993). Effect of calcium hydroxide on bacterial lipopolysaccharide. *Journal of Endodontics* 19: 76–78.
152. Safavi KE, Nichols FC (1994). Alteration of biological properties of bacterial lipopolysaccharide by calcium hydroxide treatment. *Journal of Endodontics* 20: 127–129.
153. Olsen M, DiFiore P, Dixit S, Veis A (1999). The effect of calcium hydroxide inhibition on LPS induced release of IL-1b from human monocytes in whole blood. *Journal of Endodontics* 25: 289.
154. Fava L (1991). Pastas de hidróxido de calcio. Considerações sobre seu emprego clinico em Endodontia. *Revista Paulista de Odontologia* 13: 36–43.
155. Hench L (1991). Bioceramics: From Concept to Clinic. *J Am Ceramic Soc* 74: 1487–1510.

156. Prati C, Gandolfi MG (2015). Calcium silicate bioactive cements: Biological perspectives and clinical applications. *Dental materials: official publication of the Academy of Dental Materials* 31: 351–70.
157. Zare Jahromi M, Kalantar Motamedi MR (2019). Effect of calcium hydroxide on inflammatory root resorption and ankylosis in replanted teeth compared with other intracanal materials: a review. *Restorative Dentistry & Endodontics* 44.
158. Giacomino CM, Wealleans JA, Kuhn N, Diogenes A (2019). Comparative Biocompatibility and Osteogenic Potential of Two Bioceramic Sealers. *Journal of Endodontics* 45: 51–56.
159. Camps J, Jeanneau C, El Ayachi I, Laurent P, About I (2015). Bioactivity of a Calcium Silicate-based Endodontic Cement (BioRoot RCS): Interactions with Human Periodontal Ligament Cells In Vitro. *Journal of Endodontics* 41: 1469–1473.
160. Villa N, Santos VV Dos, Costa UM da, Mendes AT, Duarte PHM, Rosa RA da, Pereira JR, Só MVR (2020). A New Calcium Silicate-Based Root Canal Dressing: Physical and Chemical Properties, Cytotoxicity and Dentinal Tubule Penetration. *Brazilian Dental Journal* 31: 598–604.
161. PEÑA-BENGOA F (2023). Effect of Ultrasonic Activation on Dentinal Tubule Penetration of Bio-C Temp and Ultracal XS: A Comparative CLSM Assessment. *European Endodontic Journal*. doi:10.14744/eej.2023.24196.
162. Angelus Indústria de Produtos Odontológicos S/A (2021). Bio-C Temp brochure. *Angelus Indústria de Produtos Odontológicos S/A*. Available at: <https://angelus.ind.br/produto/bio-c-temp>. [Accessed: 22 January 2026].
163. Guerreiro JCM, Ochoa-Rodríguez VM, Rodrigues EM, Chavez-Andrade GM, Tanomaru-Filho M, Guerreiro-Tanomaru JM, Faria G (2021). Antibacterial activity, cytocompatibility and effect of Bio-C Temp bioceramic intracanal medicament on osteoblast biology. *International Endodontic Journal* 54: 1155–1165.
164. Oliveira L V., da Silva GR, Souza GL, Magalhães TEA, Barbosa GLR, Turrioni AP, Moura CCG (2020). A laboratory evaluation of cell viability, radiopacity and tooth discoloration induced by regenerative endodontic materials. *International Endodontic Journal* 53: 1140–1152.
165. Sarıyılmaz Ö, Uslu G, Sarıyılmaz E, Keskin NB (2024). Evaluation of different irrigation activation techniques for the removal of various medicaments from a simulated internal resorption cavity: an in vitro study. *Clinical Oral Investigations* 28: 491.
166. Myint PYA, Watanabe S, Okiji T (2025). Comparative micro-computed tomography analysis of the removal efficiency of calcium hydroxide-based and calcium silicate-based intracanal medicaments. *Journal of Oral Science* 67: 25–0150.
167. Lopes CS, Torres FFE, Faria G, Sasso-cerri E, Guerreiro-Tanomaru JM, Tanomaru-Filho M, Cerri PS (2024). Calcium Silicate-based Intracanal Medication: Physicochemical Properties and Effectiveness of Techniques for Removing Medication from the Human Root Canal. *European Endodontic Journal* 9: 374–382.
168. Almohareb RA, Barakat RM, Alreshaidan S, Alluhaidan S, Muwainea A, Bautista LSJ, Balto H (2024). Efficacy of various techniques in calcium silicate-based intracanal medicament removal: a micro-CT analysis. *Scientific Reports* 14: 19705.

169. Araya-Cumsille PA, Toloza-Espinoza RA, Brasil SC, Marques AA, Campello AF, Alves FRF, Rôças IN, Siqueira JF (2025). Placement and Removal of Calcium Hydroxide and a Bioceramic Medication in Type-II Mesial Molar Canals: A Micro-computed Tomographic Study. *Journal of Endodontics*. doi:10.1016/j.joen.2025.12.006.
170. Edanami N, Belal RSI, Takenaka S, Yoshiba K, Gutierrez REB, Takahara S, Yoshiba N, Ohkura N, Noiri Y (2023). In Vivo Assessment of the Calcium Salt-Forming Ability of a New Calcium Silicate-Based Intracanal Medicament: Bio-C Temp. *Dentistry Journal* 11: 91.
171. Ferigolo AP, Vier CM, Dalforno LF, Castillo DC, da Silva JRF, Pauletto G (2026). Effect of Bio-C Temp calcium silicate-based intracanal medication on the chemical composition and fracture resistance of root dentin. *Odontology*. doi:10.1007/s10266-026-01309-3.
172. Machado MEL, Veintimilla Lozada VN, Carrillo Rengifo KJ, Guillén REG, Caballero-Flores H, Nabeshima CK (2021). Confocal laser scanning microscopic analysis of the penetration of an epoxy resin-based sealer into dentinal tubules after calcium hydroxide dressing. *Australian Endodontic Journal* 47: 480–486.
173. Uzunoglu-Özyürek E, Erdoğan Ö, Aktemur Türker S (2018). Effect of Calcium Hydroxide Dressing on the Dentinal Tubule Penetration of 2 Different Root Canal Sealers: A Confocal Laser Scanning Microscopic Study. *Journal of Endodontics* 44: 1018–1023.
174. Basrani B, Haapasalo M (2012). Update on endodontic irrigating solutions. *Endodontic Topics* 27: 74–102.
175. Haapasalo M, Shen Y, Qian W, Gao Y (2010). Irrigation in Endodontics. *Dental Clinics of North America* 54: 291–312.
176. Park E, Shen Y, Haapasalo M (2012). Irrigation of the apical root canal. *Endodontic Topics* 27: 54–73.
177. Salgado RJC, Moura-Netto C, Yamazaki AK, Cardoso LN, Maranhão de Moura AA, Prokopowitsch I (2009). Comparison of different irrigants on calcium hydroxide medication removal: microscopic cleanliness evaluation. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontology* 107: 580–584.
178. Rödiger T, Vogel S, Zapf A, Hülsmann M (2010). Efficacy of different irrigants in the removal of calcium hydroxide from root canals. *International Endodontic Journal* 43: 519–527.
179. SIQUEIRAJR J, ROCAS I, FAVIERI A, LIMA K (2000). Chemomechanical Reduction of the Bacterial Population in the Root Canal after Instrumentation and Irrigation with 1%, 2.5%, and 5.25% Sodium Hypochlorite. *Journal of Endodontics* 26: 331–334.
180. Dunavant TR, Regan JD, Glickman GN, Solomon ES, Honeyman AL (2006). Comparative Evaluation of Endodontic Irrigants against *Enterococcus faecalis* Biofilms. *Journal of Endodontics* 32: 527–531.
181. McDonnell G, Russell AD (1999). Antiseptics and Disinfectants: Activity, Action, and Resistance. *Clinical Microbiology Reviews* 12: 147–179.

182. McKenna SM, Davies KJA (1988). The inhibition of bacterial growth by hypochlorous acid. Possible role in the bactericidal activity of phagocytes. *Biochemical Journal* 254: 685–692.
183. Barrette WC, Hannum DM, Wheeler WD, Hurst JK (1989). General mechanism for the bacterial toxicity of hypochlorous acid: abolition of ATP production. *Biochemistry* 28: 9172–9178.
184. Zollinger A, Attin T, Mohn D, Zehnder M (2019). Effects of endodontic irrigants on blood and blood-stained dentin. *Heliyon* 5: e01794.
185. Gomes BPFA, Ferraz CCR, M. E. V, Berber VB, Teixeira FB, Souza-Filho FJ (2001). In vitro antimicrobial activity of several concentrations of sodium hypochlorite and chlorhexidine gluconate in the elimination of *Enterococcus faecalis*. *International Endodontic Journal* 34: 424–428.
186. Harrison JW, Hand RE (1981). The effect of dilution and organic matter on the antibacterial property of 5.25% sodium hypochlorite. *Journal of Endodontics* 7: 128–132.
187. Zehnder M (2006). Root Canal Irrigants. *Journal of Endodontics* 32: 389–398.
188. Gonçalves LS, Rodrigues RCV, Andrade Junior CV, Soares RG, Vettore MV (2016). The Effect of Sodium Hypochlorite and Chlorhexidine as Irrigant Solutions for Root Canal Disinfection: A Systematic Review of Clinical Trials. *Journal of Endodontics* 42: 527–532.
189. Radcliffe CE, Potouridou L, Qureshi R, Hababbeh N, Qualtrough A, Worthington H, Drucker DB (2004). Antimicrobial activity of varying concentrations of sodium hypochlorite on the endodontic microorganisms *Actinomyces israelii*, *A. naeslundii*, *Candida albicans* and *Enterococcus faecalis*. *International Endodontic Journal* 37: 438–446.
190. Waltimo TMT, Ørstavik D, Sirén EK, Haapasalo MPP (1999). In vitro susceptibility of *Candida albicans* to four disinfectants and their combinations. *International Endodontic Journal* 32: 421–429.
191. Cvek M, Nord CE, Hollender L (1976). Antimicrobial effect of root canal débridement in teeth with immature root. A clinical and microbiologic study. *Odontologisk revy* 27: 1–10.
192. Vianna ME, Gomes BPFA, Berber VB, Zaia AA, Ferraz CCR, de Souza-Filho FJ (2004). In vitro evaluation of the antimicrobial activity of chlorhexidine and sodium hypochlorite. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontology* 97: 79–84.
193. PORTENIER I, WALTIMO T, ØRSTAVIK D, HAAPASALO M (2005). The Susceptibility of Starved, Stationary Phase, and Growing Cells of *Enterococcus faecalis* to Endodontic Medicaments. *Journal of Endodontics* 31: 380–386.
194. Haapasalo HK, Sirén EK, Waltimo TMT, Ørstavik D, Haapasalo MPP (2000). Inactivation of local root canal medicaments by dentine: an in vitro study. *International Endodontic Journal* 33: 126–131.
195. MOORER WR, WESSELINK PR (1982). Factors promoting the tissue dissolving capability of sodium hypochlorite. *International Endodontic Journal* 15: 187–196.

196. Spangberg L, Engström B, Langeland K (1973). Biologic effects of dental materials. 3. Toxicity and antimicrobial effect of endodontic antiseptics in vitro. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology* 36: 856–871.
197. da Silva JM, Silveira A, Santos E, Prado L, Pessoa OF (2011). Efficacy of sodium hypochlorite, ethylenediaminetetraacetic acid, citric acid and phosphoric acid in calcium hydroxide removal from the root canal: a microscopic cleanliness evaluation. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontology* 112: 820–824.
198. Kenee DM, Allemang JD, Johnson JD, Hellstein J, Nichol BK (2006). A Quantitative Assessment of Efficacy of Various Calcium Hydroxide Removal Techniques. *Journal of Endodontics* 32: 563–565.
199. Lambrianidis T, Margelos J, Beltes P (1999). Removal efficiency of calcium hydroxide dressing from the root canal. *Journal of Endodontics* 25: 85–88.
200. Kim S-W, Shin D-H (2017). Antibacterial effect of urushiol on *E. faecalis* as a root canal irrigant. *Restorative Dentistry & Endodontics* 42: 54.
201. Neelakantan P, Herrera DR, Pecorari VGA, Gomes BPFA (2019). Endotoxin levels after chemomechanical preparation of root canals with sodium hypochlorite or chlorhexidine: a systematic review of clinical trials and meta-analysis. *International Endodontic Journal* 52: 19–27.
202. Loel DA (1975). Use of acid cleanser in endodontic therapy. *The Journal of the American Dental Association* 90: 148–151.
203. Baumgartner JC, Brown CM, Mader CL, Peters DD, Shulman JD (1984). A scanning electron microscopic evaluation of root canal debridement using saline, sodium hypochlorite, and citric acid. *Journal of Endodontics* 10: 525–531.
204. Czonstkowsky M. WEG, HFA (1990). The smear layer in endodontics. *Dent Clin North Am* 34: 13–25.
205. von der Fehr FR, Östby BN (1963). Effect of edtac and sulfuric acid on root canal dentine. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology* 16: 199–205.
206. Fortea L, Sanz-Serrano D, Luz L-B, Bardini G, Mercade M (2024). Update on chelating agents in endodontic treatment: A systematic review. *Journal of clinical and experimental dentistry* 16: e516–e538.
207. Ozdemir HO, Buzoglu HD, Çalt S, Çehreli ZC, Varol E, Temel A (2012). Chemical and Ultramorphologic Effects of Ethylenediaminetetraacetic Acid and Sodium Hypochlorite in Young and Old Root Canal Dentin. *Journal of Endodontics* 38: 204–208.
208. Qian W, Shen Y, Haapasalo M (2011). Quantitative Analysis of the Effect of Irrigant Solution Sequences on Dentin Erosion. *Journal of Endodontics* 37: 1437–1441.
209. CENGİZ T, AKTENER BO, PISKIN B (1990). The effect of dentinal tubule orientation on the removal of smear layer by root canal Irrigants. *International Endodontic Journal* 23: 163–171.
210. BAUMGARTNER J, MADER C (1987). A scanning electron microscopic evaluation of four root canal irrigation regimens. *Journal of Endodontics* 13: 147–157.

211. Stewart GG (1998). A scanning electron microscopic study of the cleansing effectiveness of three irrigating modalities on the tubular structure of dentin. *Journal of Endodontics* 24: 485–486.
212. Yamada RS, Armas A, Goldman M, Lin PS (1983). A scanning electron microscopic comparison of a high volume final flush with several irrigating solutions: Part 3. *Journal of Endodontics* 9: 137–142.
213. Goldman M, Goldman LB, Cavaleri R, Bogis J, Sun Lin P (1982). The efficacy of several endodontic irrigating solutions: a scanning electron microscopic study: part 2. *Journal of Endodontics* 8: 487–492.
214. BYSTRÖM A, SUNVQVIST G (1985). The antibacterial action of sodium hypochlorite and EDTA in 60 cases of endodontic therapy. *International Endodontic Journal* 18: 35–40.
215. Grawehr M, Sener B, Waltimo T, Zehnder M (2003). Interactions of ethylenediamine tetraacetic acid with sodium hypochlorite in aqueous solutions. *International Endodontic Journal* 36: 411–415.
216. Tekdemir A, Ekici MA, Çelikten B, Helvacıoğlu Kıvanç B (2025). Comparison of calcium hydroxide removal efficiency of ethylenediaminetetraacetic acid, phytic acid and N-acetylcysteine using sonic activation: a micro-CT study. *BMC Oral Health* 26: 158.
217. Suresh N, Varghese A, Sundar S, Nagendrababu V, Velmurugan N (2022). Do Calcium Chelators Play a Role in the Removal of Calcium Hydroxide From Root Canals? A Systematic Review of Laboratory Studies. *European Endodontic Journal* 7: 11–19.
218. American Association of Endodontists (2022). Glossary of Endodontic Terms. Available at: <https://www.aae.org/specialty/clinical-resources/glossary-endodontic-terms/>. [Accessed: 30 May 2026].
219. Khedmat S, Shokouhinejad N (2008). Comparison of the Efficacy of Three Chelating Agents in Smear Layer Removal. *Journal of Endodontics* 34: 599–602.
220. Nandini S, Velmurugan N, Kandaswamy D (2006). Removal Efficiency of Calcium Hydroxide Intracanal Medicament With Two Calcium Chelators: Volumetric Analysis Using Spiral CT, An In Vitro Study. *Journal of Endodontics* 32: 1097–1101.
221. Gómez-Delgado M, Camps-Font O, Luz L, Sanz D, Mercade M (2023). Update on citric acid use in endodontic treatment: a systematic review. *Odontology* 111: 1–19.
222. Russell RGG, Rogers MJ (1999). Bisphosphonates: from the laboratory to the clinic and back again. *Bone* 25: 97–106.
223. Lottanti S, Gautschi H, Sener B, Zehnder M (2009). Effects of ethylenediaminetetraacetic, etidronic and peracetic acid irrigation on human root dentine and the smear layer. *International Endodontic Journal* 42: 335–343.
224. Zehnder M, Schmidlin P, Sener B, Waltimo T (2005). Chelation in Root Canal Therapy Reconsidered. *Journal of Endodontics* 31: 817–820.
225. Neelakantan P, Varughese AA, Sharma S, Subbarao C V., Zehnder M, De-Deus G (2012). Continuous chelation irrigation improves the adhesion of epoxy resin-based root canal sealer to root dentine. *International Endodontic Journal* 45: 1097–1102.

226. Arias-Moliz MT, Ordinola-Zapata R, Baca P, Ruiz-Linares M, Ferrer-Luque CM (2014). Antimicrobial Activity of a Sodium Hypochlorite/Etidronic Acid Irrigant Solution. *Journal of Endodontics* 40: 1999–2002.
227. Neelakantan P, Nandagopal M, Shemesh H, Wesselink P (2015). The effect of root dentin conditioning protocols on the push-out bond strength of three calcium silicate sealers. *International Journal of Adhesion and Adhesives* 60: 104–108.
228. Neelakantan P, Cheng CQ, Mohanraj R, Sriraman P, Subbarao C, Sharma S (2015). Antibiofilm activity of three irrigation protocols activated by ultrasonic, diode laser or Er: YAG laser in vitro. *International Endodontic Journal* 48: 602–610.
229. De-Deus G, Namen F, Galan J, Zehnder M (2008). Soft Chelating Irrigation Protocol Optimizes Bonding Quality of Resilon/Epiphany Root Fillings. *Journal of Endodontics* 34: 703–705.
230. Morago A, Ordinola-Zapata R, Ferrer-Luque CM, Baca P, Ruiz-Linares M, Arias-Moliz MT (2016). Influence of Smear Layer on the Antimicrobial Activity of a Sodium Hypochlorite/Etidronic Acid Irrigating Solution in Infected Dentin. *Journal of Endodontics* 42: 1647–1650.
231. Harzivartyan S, Hazar AB, Kartal N, Cimilli ZH (2021). Evaluation of different irrigation solutions and activation methods on removing calcium hydroxide. *Journal of Dental Sciences* 16: 700–705.
232. Susila A, Minu J (2019). Activated Irrigation vs. Conventional non-activated Irrigation in Endodontics – A Systematic Review. *European Endodontic Journal* 4: 96–110.
233. Virdee SS, Seymour DW, 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: 605–621.
234. Yilmaz A, Yalcin TY, Helvacioğlu-Yigit D (2020). Effectiveness of Various Final Irrigation Techniques on Sealer Penetration in Curved Roots: A Confocal Laser Scanning Microscopy Study. *BioMed Research International* 2020.
235. Gu L, Kim JR, Ling J, Choi KK, Pashley DH, Tay FR (2009). Review of Contemporary Irrigant Agitation Techniques and Devices. *Journal of Endodontics* 35: 791–804.
236. Van Der Sluis LWM, Gambarini G, Wu MK, Wesselink PR (2006). The influence of volume, type of irrigant and flushing method on removing artificially placed dentine debris from the apical root canal during passive ultrasonic irrigation. *International Endodontic Journal* 39: 472–476.
237. Kahn FH, Rosenberg PA, Gliksberg J (1995). An in vitro evaluation of the irrigating characteristics of ultrasonic and subsonic handpieces and irrigating needles and probes. *Journal of Endodontics* 21: 277–280.
238. Hauser V, Braun A, Frentzen M (2007). Penetration depth of a dye marker into dentine using a novel hydrodynamic system (RinsEndo). *International Endodontic Journal* 40: 644–652.
239. Ram Z (1977). Effectiveness of root canal irrigation. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology* 44: 306–312.

240. Chow TW (1983). Mechanical effectiveness of root canal irrigation. *Journal of Endodontics* 9: 475–479.
241. Langeland K, Liao K (King S, Pascon EA (1985). Work-saving devices in endodontics: Efficacy of sonic and ultrasonic techniques. *Journal of Endodontics* 11: 499–510.
242. Grossman LI (1943). Irrigation of Root Canals. *The Journal of the American Dental Association* 30: 1915–1917.
243. Falk KW, Sedgley CM (2005). The Influence of Preparation Size on the Mechanical Efficacy of Root Canal Irrigation In Vitro. *Journal of Endodontics* 31: 742–745.
244. Wu M-K, Wesselink PR (1995). Efficacy of three techniques in cleaning the apical portion of curved root canals. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontology* 79: 492–496.
245. LERTCHIRAKARN V, PALAMARA J, MESSER H (2003). Patterns of Vertical Root Fracture: Factors Affecting Stress Distribution in the Root Canal. *Journal of Endodontics* 29: 523–528.
246. SEDGLEY C, APPLGATE B, NAGEL A, HALL D (2004). Real-Time Imaging and Quantification of Bioluminescent Bacteria in Root Canals In Vitro. *Journal of Endodontics* 30: 893–898.
247. Sedgley CM, Nagel AC, Hall D, Applegate B (2005). Influence of irrigant needle depth in removing bioluminescent bacteria inoculated into instrumented root canals using real-time imaging in vitro. *International Endodontic Journal* 38: 97–104.
248. Boutsoukias C, Lambrianidis T, Kastrinakis E, Bekiaroglou P (2007). Measurement of pressure and flow rates during irrigation of a root canal ex vivo with three endodontic needles. *International Endodontic Journal* 40: 504–513.
249. BRADFORD C, ELEAZER P, DOWNS K, SCHEETZ J (2002). Apical Pressures Developed by Needles for Canal Irrigation. *Journal of Endodontics* 28: 333–335.
250. SERPER A, OZBEK M, CALT S (2004). Accidental Sodium Hypochlorite-Induced Skin Injury During Endodontic Treatment. *Journal of Endodontics* 30: 180–181.
251. Huang T -Y., Gulabivala K, Ng Y -L. (2008). A bio-molecular film ex-vivo model to evaluate the influence of canal dimensions and irrigation variables on the efficacy of irrigation. *International Endodontic Journal* 41: 60–71.
252. McGill S, Gulabivala K, Mordan N, Ng Y -L. (2008). The efficacy of dynamic irrigation using a commercially available system (RinsEndo) determined by removal of a collagen ‘bio-molecular film’ from an ex vivo model. *International Endodontic Journal* 41: 602–608.
253. ALHADLAQ S, ALTURAIKI S, ALSULAMI U, SAAD A (2006). Efficacy of a New Brush-Covered Irrigation Needle in Removing Root Canal Debris: A Scanning Electron Microscopic Study. *Journal of Endodontics* 32: 1181–1184.
254. Keir DM, Senia ES, Montgomery S (1990). Effectiveness of a brush in removing postinstrumentation canal debris. *Journal of Endodontics* 16: 323–327.
255. Konstantinidi E, Psimma Z, Chávez de Paz LE, Boutsoukias C (2017). Apical negative pressure irrigation versus syringe irrigation: a systematic review of cleaning

- and disinfection of the root canal system. *International Endodontic Journal* 50: 1034–1054.
256. Schoeffel GJ (2008). The EndoVac method of endodontic irrigation, part 2--efficacy. *Dentistry today* 27: 82, 84, 86–7.
 257. Schoeffel GJ (2008). The EndoVac method of endodontic irrigation, Part 3: System components and their interaction. *Dentistry today* 27: 106, 108–11.
 258. Nielsen BA, Craig Baumgartner J (2007). Comparison of the EndoVac System to Needle Irrigation of Root Canals. *Journal of Endodontics* 33: 611–615.
 259. Schoeffel GJ (2007). The EndoVac method of endodontic irrigation: safety first. *Dentistry today* 26: 92, 94, 96 passim.
 260. Ruddle CJ (2001). Microbrush for endodontic used. *United States Patent* (Vol. 6), Washington, DC, pp 179–617.
 261. Weise M, Roggendorf M, Ebert J (2007). Four methods for cleaning simulated lateral extensions of curved root canals - a SEM evaluation. *International Endodontic Journal* 40: 991–992.
 262. Ballal NV, Gandhi P, Shenoy PA, Dummer PMH (2020). Evaluation of various irrigation activation systems to eliminate bacteria from the root canal system: A randomized controlled single blinded trial. *Journal of Dentistry* 99: 103412.
 263. Silva EJNL, Belladonna FG, Zuolo AS, Rodrigues E, Ehrhardt IC, Souza EM, De-Deus G (2018). Effectiveness of XP-endo Finisher and XP-endo Finisher R in removing root filling remnants: a micro-CT study. *International Endodontic Journal* 51: 86–91.
 264. Trope M, Debelian G (2015). XP-3D Finisher file-the next step in restorative endodontics. *Endod Pract US* 8: 22–4.
 265. Machado R, da Silva I, Comparin D, de Mattos BAM, Alberton LR, da Silva Neto UX (2021). Smear layer removal by passive ultrasonic irrigation and 2 new mechanical methods for activation of the chelating solution. *Restorative Dentistry & Endodontics* 46.
 266. Leoni GB, Versiani MA, Silva-Sousa YT, Bruniera JFB, Pécora JD, Sousa-Neto MD (2017). Ex vivo evaluation of four final irrigation protocols on the removal of hard-tissue debris from the mesial root canal system of mandibular first molars. *International Endodontic Journal* 50: 398–406.
 267. Azim AA, Aksel H, Zhuang T, Mashtare T, Babu JP, Huang GT-J (2016). Efficacy of 4 Irrigation Protocols in Killing Bacteria Colonized in Dentinal Tubules Examined by a Novel Confocal Laser Scanning Microscope Analysis. *Journal of Endodontics* 42: 928–934.
 268. Sasanakul P, Ampornaramveth RS, Chivatxaranukul P (2019). Influence of Adjuncts to Irrigation in the Disinfection of Large Root Canals. *Journal of Endodontics* 45: 332–337.
 269. Setlock J, Fayad MI, BeGole E, Bruzick M (2003). Evaluation of canal cleanliness and smear layer removal after the use of the Quantec-E irrigation system and syringe: a comparative scanning electron microscope study. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontology* 96: 614–617.

270. Metzger Z (2014). The self-adjusting file (SAF) system: An evidence-based update. *Journal of Conservative Dentistry* 17: 401.
271. Metzger Z, Teperovich E, Zary R, Cohen R, Hof R (2010). The Self-adjusting File (SAF). Part 1: Respecting the Root Canal Anatomy—A New Concept of Endodontic Files and Its Implementation. *Journal of Endodontics* 36: 679–690.
272. Solomonov M (2011). Eight Months of Clinical Experience with the Self-Adjusting File System. *Journal of Endodontics* 37: 881–887.
273. Ahmad M, Pitt Ford TR, Crum LA (1987). Ultrasonic debridement of root canals: An insight into the mechanisms involved. *Journal of Endodontics* 13: 93–101.
274. WALMSLEY AD, LUMLEY PJ, LAIRD WRE (1989). The oscillatory pattern of sonically powered endodontic files. *International Endodontic Journal* 22: 125–132.
275. Duque JA, Duarte MAH, Canali LCF, Zancan RF, Vivan RR, Bernardes RA, Bramante CM (2017). Comparative Effectiveness of New Mechanical Irrigant Agitating Devices for Debris Removal from the Canal and Isthmus of Mesial Roots of Mandibular Molars. *Journal of Endodontics* 43: 326–331.
276. Varela P, Souza E, de Deus G, Duran-Sindreu F, Mercadé M (2019). Effectiveness of complementary irrigation routines in debriding pulp tissue from root canals instrumented with a single reciprocating file. *International Endodontic Journal* 52: 475–483.
277. Rödiger T, Zimmermann F, Konietschke F, Sydow HG, Wiegand A (2018). Comparison of the antibacterial efficacy of sonic- and two ultrasonic-activated irrigation techniques in reducing intracanal *Enterococcus faecalis* populations. *Quintessence international (Berlin, Germany : 1985)* 49: 689–697.
278. Klyn SL, Kirkpatrick TC, Rutledge RE (2010). In Vitro Comparisons of Debris Removal of the EndoActivator™ System, the F File™, Ultrasonic Irrigation, and NaOCl Irrigation Alone after Hand-rotary Instrumentation in Human Mandibular Molars. *Journal of Endodontics* 36: 1367–1371.
279. Zeng C, Willison J, Meghil MM, Bergeron BE, Cutler CW, Tay FR, Niu L, Ma J (2018). Antibacterial efficacy of an endodontic sonic-powered irrigation system: An in vitro study. *Journal of Dentistry* 75: 105–112.
280. Urban K, Donnermeyer D, Schäfer E, Bürklein S (2017). Canal cleanliness using different irrigation activation systems: a SEM evaluation. *Clinical Oral Investigations* 21: 2681–2687.
281. Swimberghe RCD, De Clercq A, De Moor RJG, Meire MA (2019). Efficacy of sonically, ultrasonically and laser-activated irrigation in removing a biofilm-mimicking hydrogel from an isthmus model. *International Endodontic Journal* 52: 515–523.
282. Conde AJ, Estevez R, Loroño G, Valencia de Pablo Ó, Rossi-Fedele G, Cisneros R (2017). Effect of sonic and ultrasonic activation on organic tissue dissolution from simulated grooves in root canals using sodium hypochlorite and <sc>EDTA</sc>. *International Endodontic Journal* 50: 976–982.
283. da Silveira PF, Vizzotto MB, Montagner F, Silveira HLD da, Silveira HED da (2014). Development of a New In Vitro Methodology to Simulate Internal Root Resorption. *Journal of Endodontics* 40: 211–216.

284. Keskin C, Sariyilmaz E, Sariyilmaz Ö (2017). Efficacy of XP-endo Finisher File in Removing Calcium Hydroxide from Simulated Internal Resorption Cavity. *Journal of Endodontics* 43: 126–130.
285. Van Der Sluis LWM, Wu MK, Wesselink PR (2007). The evaluation of removal of calcium hydroxide paste from an artificial standardized groove in the apical root canal using different irrigation methodologies. *International Endodontic Journal* 40: 52–57.
286. Shi L, Wu S, Yang Y, Wan J (2022). Efficacy of five irrigation techniques in removing calcium hydroxide from simulated S-shaped root canals. *Journal of Dental Sciences* 17: 128–134.
287. Crozeta BM, Chaves de Souza L, Correa Silva-Sousa YT, Sousa-Neto MD, Jaramillo DE, Silva RM (2020). Evaluation of Passive Ultrasonic Irrigation and GentleWave System as Adjuvants in Endodontic Retreatment. *Journal of Endodontics* 46: 1279–1285.
288. Shon W-J (2016). Introducing the GentleWave System. *Restorative Dentistry & Endodontics* 41: 235.
289. Haapasalo M, Wang Z, Shen Y, Curtis A, Patel P, Khakpour M (2014). Tissue Dissolution by a Novel Multisonic Ultracleaning System and Sodium Hypochlorite. *Journal of Endodontics* 40: 1178–1181.
290. Molina B, Glickman G, Vandrangi P, Khakpour M (2015). Evaluation of Root Canal Debridement of Human Molars Using the GentleWave System. *Journal of Endodontics* 41: 1701–1705.
291. Zhang D, Shen Y, de la Fuente-Núñez C, Haapasalo M (2019). In vitro evaluation by quantitative real-time PCR and culturing of the effectiveness of disinfection of multispecies biofilms in root canals by two irrigation systems. *Clinical Oral Investigations* 23: 913–920.
292. Coaguila-Llerena H, Gaeta E, Faria G (2022). Outcomes of the GentleWave system on root canal treatment: a narrative review. *Restorative Dentistry & Endodontics* 47.
293. Richman MJ (1957). The use of ultrasonics in root canal therapy and root resection. *J Dent Med* 12: 12–18.
294. Martin H, Cunningham WT, Norris JP, Cotton WR (1980). Ultrasonic versus hand filing of dentin: A quantitative study. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology* 49: 79–81.
295. Walmsley AD, Williams AR (1989). Effects of constraint on the oscillatory pattern of endosonic files. *Journal of Endodontics* 15: 189–194.
296. Van Der Sluis LWM, Versluis M, Wu MK, Wesselink PR (2007). Passive ultrasonic irrigation of the root canal: a review of the literature. *International Endodontic Journal* 40: 415–426.
297. Weller RN, Brady JM, Bernier WE (1980). Efficacy of ultrasonic cleaning. *Journal of Endodontics* 6: 740–743.
298. Căpută PE, Retsas A, Kuijk L, Chávez de Paz LE, Boutsoukis C (2019). Ultrasonic Irrigant Activation during Root Canal Treatment: A Systematic Review. *Journal of Endodontics* 45: 31-44.e13.

299. Boutsoukias C, Arias-Moliz MT (2022). Present status and future directions - irrigants and irrigation methods. *International endodontic journal* 55 Suppl 3: 588–612.
300. Barbosa AFA, Lima CO de, Sassone LM, Fares RD, Fidalgo TK da S, Silva EJNL (2021). Effect of passive ultrasonic irrigation on hard tissue debris removal: a systematic review and meta-analysis. *Brazilian Oral Research* 35.
301. Ali NT, El-Boghdadi RM, Ibrahim AM, Amin SAW (2022). Clinical and microbiological effects of ultrasonically activated irrigation versus syringe irrigation during endodontic treatment: a systematic review and meta-analysis of randomized clinical trials. *Odontology* 110: 419–433.
302. Silva EJNL, Rover G, Belladonna FG, Herrera DR, De-Deus G, da Silva Fidalgo TK (2019). Effectiveness of passive ultrasonic irrigation on periapical healing and root canal disinfection: a systematic review. *British Dental Journal* 227: 228–234.
303. Moreira RN, Pinto EB, Galo R, Falci SGM, Mesquita AT (2019). Passive ultrasonic irrigation in root canal: systematic review and meta-analysis. *Acta Odontologica Scandinavica* 77: 55–60.
304. Nagendrababu V, Jayaraman J, Suresh A, Kalyanasundaram S, Neelakantan P (2018). Effectiveness of ultrasonically activated irrigation on root canal disinfection: a systematic review of in vitro studies. *Clinical Oral Investigations* 22: 655–670.
305. Ethem Yaylali I, Kececi AD, Ureyen Kaya B (2015). Ultrasonically Activated Irrigation to Remove Calcium Hydroxide from Apical Third of Human Root Canal System: A Systematic Review of In Vitro Studies. *Journal of Endodontics* 41: 1589–1599.
306. Maiman TH (1960). Stimulated optical radiation in ruby. *Nature* 187: 493–4.
307. GOLDMAN L, HORNBY P, MEYER R, GOLDMAN B (1964). Impact of the Laser on Dental Caries. *Nature* 203: 417–417.
308. Stern R, Sognnaes R (1964). Laser beam effect on dental hard tissues. *Journal of Dental Research* 43: 873.
309. Weichman JA, Johnson FM (1971). Laser use in endodontics. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology* 31: 416–420.
310. Kimura Y, Wilder-Smith P, Matsumoto K (2000). Lasers in endodontics: a review. *International Endodontic Journal* 33: 173–185.
311. Coluzzi DJ (2000). An overview of laser wavelengths used in dentistry. *Dental clinics of North America* 44: 753–65.
312. Guidotti R, Merigo E, Fornaini C, Rocca J-P, Medioni E, Vescovi P (2014). Er:YAG 2,940-nm laser fiber in endodontic treatment: a help in removing smear layer. *Lasers in Medical Science* 29: 69–75.
313. Mancini M, Cerroni L, Palopoli P, Olivi G, Olivi M, Buoni C, Cianconi L (2021). FESEM evaluation of smear layer removal from conservatively shaped canals: laser activated irrigation (PIPS and SWEEPS) compared to sonic and passive ultrasonic activation—an ex vivo study. *BMC Oral Health* 21: 81.
314. Meire M, De Moor RJG (2024). Principle and antimicrobial efficacy of laser-activated irrigation: A narrative review. *International Endodontic Journal* 57: 841–860.

315. Cai C, Wen C, Guan L, Huang Y, Jiang Q (2022). Influence of sodium hypochlorite concentration on cavitation effect and fluid dynamics induced by photon-induced photoacoustic streaming (PIPS): A visualization study. *Lasers in Medical Science* 37: 2537–2544.
316. Koch JD, Jaramillo DE, DiVito E, Peters OA (2016). Irrigant flow during photon-induced photoacoustic streaming (PIPS) using Particle Image Velocimetry (PIV). *Clinical Oral Investigations* 20: 381–386.
317. Su Z, Li Z, Shen Y, Bai Y, Zheng Y, Pan C, Hou B (2021). Characteristics of the Irrigant Flow in a Simulated Lateral Canal Under Two Typical Laser-Activated Irrigation Regimens. *Lasers in Surgery and Medicine* 53: 587–594.
318. Kosarieh E, Bolhari B, Sanjari Pirayvatlou S, Kharazifard MJ, Sattari Khavas S, Jafarnia S, Saberi S (2021). Effect of Er:YAG laser irradiation using SWEEPS and PIPS technique on dye penetration depth after root canal preparation. *Photodiagnosis and Photodynamic Therapy* 33: 102136.
319. Kishen A (2010). Advanced therapeutic options for endodontic biofilms. *Endodontic Topics* 22: 99–123.
320. George S, Kishen A (2008). Influence of Photosensitizer Solvent on the Mechanisms of Photoactivated Killing of *Enterococcus faecalis*. *Photochemistry and Photobiology* 84: 734–740.
321. George S, Kishen A (2007). Advanced Noninvasive Light-Activated Disinfection: Assessment of Cytotoxicity on Fibroblast Versus Antimicrobial Activity Against *Enterococcus faecalis*. *Journal of Endodontics* 33: 599–602.
322. Soukos NS, Wilson M, Burns T, Speight PM (1996). Photodynamic effects of toluidine blue on human oral keratinocytes and fibroblasts and *Streptococcus sanguis* evaluated in vitro. *Lasers in Surgery and Medicine* 18: 253–259.
323. Garcez AS, Nuñez SC, Hamblin MR, Ribeiro MS (2008). Antimicrobial Effects of Photodynamic Therapy on Patients with Necrotic Pulps and Periapical Lesion. *Journal of Endodontics* 34: 138–142.
324. Vendramini Y, Salles A, Portella FF, Brew MC, Steier L, de Figueiredo JAP, Bavaresco CS (2020). Antimicrobial effect of photodynamic therapy on intracanal biofilm: A systematic review of in vitro studies. *Photodiagnosis and Photodynamic Therapy* 32: 102025.
325. Chrepa V, Kotsakis GA, Pagonis TC, Hargreaves KM (2014). The Effect of Photodynamic Therapy in Root Canal Disinfection: A Systematic Review. *Journal of Endodontics* 40: 891–898.
326. Shrestha A, Kishen A (2012). The Effect of Tissue Inhibitors on the Antibacterial Activity of Chitosan Nanoparticles and Photodynamic Therapy. *Journal of Endodontics* 38: 1275–1278.
327. Barazanchi A, Li KC, Al-Amleh B, Lyons K, Waddell JN (2017). Additive Technology: Update on Current Materials and Applications in Dentistry. *Journal of Prosthodontics* 26: 156–163.
328. Dawood A, Marti BM, Sauret-Jackson V, Darwood A (2015). 3D printing in dentistry. *British Dental Journal* 219: 521–529.

329. van Noort R (2012). The future of dental devices is digital. *Dental Materials* 28: 3–12.
330. Reis T, Barbosa C, Franco M, Baptista C, Alves N, Castelo-Baz P, Martin-Cruces J, Martin-Biedma B (2022). 3D-Printed Teeth in Endodontics: Why, How, Problems and Future—A Narrative Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 19: 7966.
331. Hülsmann M (2022). A critical appraisal of research methods and experimental models for studies on root canal preparation. *International Endodontic Journal* 55: 95–118.
332. De-Deus G, Simões-Carvalho M, Belladonna FG, Versiani MA, Silva EJNL, Cavalcante DM, Souza EM, Johnsen GF, Haugen HJ, Paciornik S (2020). Creation of well-balanced experimental groups for comparative endodontic laboratory studies: a new proposal based on micro-CT and *in silico* methods. *International Endodontic Journal* 53: 974–985.
333. Liang X, Liao W, Cai H, Jiang S, Chen S (2018). 3D-Printed Artificial Teeth: Accuracy and Application in Root Canal Therapy. *Journal of Biomedical Nanotechnology* 14: 1477–1485.
334. Bitter K, Gruner D, Wolf O, Schwendicke F (2016). Artificial Versus Natural Teeth for Preclinical Endodontic Training: A Randomized Controlled Trial. *Journal of Endodontics* 42: 1212–1217.
335. Holden A, Dracopoulos S (2017). Owning the tooth: exploring the ethical and legal issues relating to the use of extracted human teeth in dental education in Australia. *Australian Dental Journal* 62: 146–151.
336. Choi M, Kim M, Choi Y, Neelakantan P, Yu M, Min K (2021). A novel three-dimensionally printed model to assess biofilm removal by ultrasonically activated irrigation. *International Endodontic Journal* 54: 1871–1877.
337. Kulczyk T, Rychlik M, Lorkiewicz-Muszyńska D, Abreu-Głowacka M, Czajka-Jakubowska A, Przysańska A (2019). Computed Tomography versus Optical Scanning: A Comparison of Different Methods of 3D Data Acquisition for Tooth Replication. *BioMed Research International* 2019: 1–7.
338. Gomes BPFA, Aveiro E, Kishen A (2023). Irrigants and irrigation activation systems in Endodontics. *Brazilian Dental Journal* 34: 1–33.
339. Hassan E, Sharaan M, Ragab M (2022). Cleaning Efficacy and Debris Extrusion using XP-Endo Finisher and XP-Endo Finisher R as Supplementary Files during Retreatment: An in Vitro Study. *European Endodontic Journal* 7: 40–46.
340. SJÖGREN U, FIGDOR D, SPÅNGBERG L, SUNDQVIST G (1991). The antimicrobial effect of calcium hydroxide as a short-term intracanal dressing. *International Endodontic Journal* 24: 119–125.
341. Mohammadi Z, Shalavi S, Yazdizadeh M (2012). Antimicrobial Activity of Calcium Hydroxide in Endodontics: A Review. *Chonnam Medical Journal* 48: 133.
342. Andreasen JO, Farik B, Munksgaard EC (2002). Long-term calcium hydroxide as a root canal dressing may increase risk of root fracture. *Dental Traumatology* 18: 134–137.

343. El Hachem C, Sauro S, Eid A, Arıcan B, Alrayesse R, Fabro C, Gribova V, Hardan L, Haikel Y, Kharouf N (2024). Novel temporary endodontic medication based on calcium silicate strategy: a biological and physicochemical study. *Frontiers in Dental Medicine* 5.
344. Keskin C, Keleş A, Sarıyılmaz Ö (2021). Efficacy of glycolic acid for the removal of calcium hydroxide from simulated internal Resorption cavities. *Clinical Oral Investigations* 25: 4407–4413.
345. Nevil A, Gaffoor FMA, Gopakumar R, Girish CS, Sajeena NC, Anoop VN (2025). Comparison of Efficacy of Trunatomy Irrigation Needle, Sonic Irrigation Technique, and Ultrasonic Irrigation Technique in Retrievability of Rc Cal, Metapex, and Bio C Temp from Root Canals: An In-Vitro CBCT Analysis. *Journal of Pharmacy and Bioallied Sciences* 17: S1827–S1831.
346. Huang Q, Barnes JB, Schoeffel GJ, Fan B, Tay C, Bergeron BE, Susin LF, Ling J, Niu L, Tay FR (2017). Effect of Canal Anastomosis on Periapical Fluid Pressure Build-up during Needle Irrigation in Single Roots with Double Canals using a Polycarbonate Model. *Scientific Reports* 7: 1582.
347. Liu H, Shen Y, Wang Z, Haapasalo M (2022). The ability of different irrigation methods to remove mixtures of calcium hydroxide and barium sulphate from isthmuses in 3D printed transparent root canal models. *Odontology* 110: 27–34.
348. Fuke SG, Shenvi S, Vasundhara KA, Teja KV (2026). Effect of preendodontic build-up on irrigant penetration in extracted single-rooted premolars: An ex vivo study. *Journal of Conservative Dentistry and Endodontics* 29: 284–289.
349. Arslan H, Doğanay E, Alsancak M, Çapar ID, Karataş E, Gündüz HA (2016). Comparison of apically extruded debris after root canal instrumentation using Reciproc instruments with various kinematics. *International Endodontic Journal* 49: 307–310.
350. Nayak G, Singh I, Shetty S (2014). Evaluation of apical extrusion of debris and irrigant using two new reciprocating and one continuous rotation single file systems. *J Dent (Tehran)* 11: 302–9.
351. Boutsoukakis C, Gogos C, Verhaagen B, Versluis M, Kastrinakis E, Van Der Sluis LWM (2010). The effect of apical preparation size on irrigant flow in root canals evaluated using an unsteady Computational Fluid Dynamics model. *International Endodontic Journal* 43: 874–881.
352. USMAN N, BAUMGARTNER J, MARSHALL J (2004). Influence of Instrument Size on Root Canal Debridement. *Journal of Endodontics* 30: 110–112.
353. Alaçam Tayfun (2000). Pulpa ve periapikal dokuların biyolojisi. *Endodonti* Ankara: Barış Yayınları, pp 71–102.
354. Güngör Us S, Uzun Ö, Güngör NM (2025). Evaluation of the effectiveness of different supplemental cleaning techniques in the retreatment of roots with small simulated internal resorption cavities: an in vitro comparative study. *BMC Oral Health* 26: 148.
355. Taşdemir T, Çelik D, Er K, Yildirim T, Ceyhanlı KT, Yeşilyurt C (2011). Efficacy of several techniques for the removal of calcium hydroxide medicament from root canals. *International Endodontic Journal* 44: 505–509.

356. Furuncuoğlu F, Uğur Aydın Z, Doğan Çankaya T, Ocak MG (2024). Evaluation of the efficacy of different irrigation activation techniques in removing of calcium hydroxide on teeth with the simulated internal root resorption cavity: a confocal laser scanning microscope analysis. *Lasers in Medical Science* 39: 213.
357. Falakaloğlu S, Yeniçeri Özata M, Güneş B, Silva EJNL, Gündoğar M, Güçyetmez Topal B (2023). Influence of access cavity design on calcium hydroxide removal using different cleaning protocols: a confocal laser scanning microscopy study. *Restorative Dentistry & Endodontics* 48.
358. Alturaiki S, Lamphon H, Edrees H, Ahlquist M (2015). Efficacy of 3 Different Irrigation Systems on Removal of Calcium Hydroxide from the Root Canal: A Scanning Electron Microscopic Study. *Journal of Endodontics* 41: 97–101.
359. Ghavami-Lahiji M, Davaloo RT, Tajziehchi G, Shams P (2021). Micro-computed tomography in preventive and restorative dental research: A review. *Imaging Science in Dentistry* 51: 341.
360. Sarı M, Tufenkci P, Ayhan AA, Peker O, Celikten B (2026). The Effectiveness of EDDY in Removing Calcium Hydroxide, N-Acetylcysteine, and Diclofenac Sodium Medicaments from Root Canals. *Acta Odontologica Turcica* 43: 99–104.
361. Schneider CA, Rasband WS, Eliceiri KW (2012). NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. *Nature Methods* 9: 671–675.
362. GOKTURK H, OZKOC AK I, BUYUKGEBIZ F, DEMIR O (2017). Effectiveness of various irrigation protocols for the removal of calcium hydroxide from artificial standardized grooves. *Journal of Applied Oral Science* 25: 290–298.
363. Baldi J V., Victorino FR, Bernardes RA, de Moraes IG, Bramante CM, Garcia RB, Bernardineli N (2007). Influence of Embedding Media on the Assessment of Electronic Apex Locators. *Journal of Endodontics* 33: 476–479.
364. Hawkins JJ, Torabinejad M, Li Y, Retamozo B (2015). Effect of three calcium hydroxide formulations on fracture resistance of dentin over time. *Dental Traumatology* 31: 380–384.
365. Komabayashi T, Ahn C, Spears R, Zhu Q (2014). Comparison of particle morphology between commercial- and research-grade calcium hydroxide in endodontics. *Journal of Oral Science* 56: 195–199.
366. Arıcan B, Berkdemir N, Özalp Koca AT, Kemeç UC, Özyürek T (2025). Removal of calcium hydroxide from simulated internal root resorption defects: a comparative evaluation of EDDY, iVac, Pulp sucker, passive ultrasonic irrigation, and conventional techniques. *BMC Oral Health* 25: 502.
367. CALT S, SERPER A (2002). Time-Dependent Effects of EDTA on Dentin Structures. *Journal of Endodontics* 28: 17–19.
368. Retsas A, Koursoumis A, Tzimpoulas N, Boutsoukias C (2016). Uncontrolled Removal of Dentin during In Vitro Ultrasonic Irrigant Activation in Curved Root Canals. *Journal of Endodontics* 42: 1545–1549.
369. Ozyurek T (2017). Comparison of the Smear Layer Removal Ability of Four Different Final Activation Techniques after Retreatment Procedures: a SEM Investigation. *Turkish Endodontic Journal*. doi:10.14744/TEJ.2016.29491.

370. Plotino G, Cortese T, Grande NM, Leonardi DP, Di Giorgio G, Testarelli L, Gambarini G (2016). New Technologies to Improve Root Canal Disinfection. *Brazilian Dental Journal* 27: 3–8.
371. Munley PJ, Goodell GG (2007). Comparison of Passive Ultrasonic Debridement Between Fluted and Nonfluted Instruments in Root Canals. *Journal of Endodontics* 33: 578–580.
372. PLOTINO G, PAMEIJER C, MARIAGRANDE N, SOMMA F (2007). Ultrasonics in Endodontics: A Review of the Literature. *Journal of Endodontics* 33: 81–95.
373. van der Sluis LWM, Vogels MPJM, Verhaagen B, Macedo R, Wesselink PR (2010). Study on the Influence of Refreshment/Activation Cycles and Irrigants on Mechanical Cleaning Efficiency During Ultrasonic Activation of the Irrigant. *Journal of Endodontics* 36: 737–740.
374. Lambrianidis T, Kosti E, Boutsoukis C, Mazinis M (2006). Removal efficacy of various calcium hydroxide/chlorhexidine medicaments from the root canal. *International Endodontic Journal* 39: 55–61.
375. Küçükkaya Eren S, Aksel H, Parashos P (2017). A novel model for testing the efficiency of removal of calcium hydroxide from complex root canal anatomies. *Australian Endodontic Journal* 43: 5–10.
376. La Rosa GRM, Plotino G, Nagendrababu V, Pedullà E (2024). Effectiveness of continuous chelation irrigation protocol in endodontics: a scoping review of laboratory studies. *Odontology* 112: 1–18.
377. Deari S, Mohn D, Zehnder M (2019). Dentine decalcification and smear layer removal by different ethylenediaminetetraacetic acid and 1-hydroxyethane-1,1-diphosphonic acid species. *International Endodontic Journal* 52: 237–243.
378. TASMAN F, CEHRELI Z, OGAN C, ETIKAN I (2000). Surface Tension of Root Canal Irrigants. *Journal of Endodontics* 26: 586–587.
379. ULUSOY Öİ, SAVUR İG, ŞAHİN MANTI A (2023). Kök Kanal Tedavisinde Kullanılan Farklı İrrigasyon Solüsyonlarının Yüzey Gerilimlerinin Karşılaştırılması. *ADO Klinik Bilimler Dergisi* 12: 12–17.
380. Savur İ, Ulusoy Ö (2021). The effectiveness of ethylenediaminetetraacetic, etidronic, and peracetic acids activated with ultrasonics or diode laser on calcium hydroxide removal from root canal walls. *Nigerian Journal of Clinical Practice* 24: 1662–1668.
381. Li D, Jiang S, Yin X, Chang JWW, Ke J, Zhang C (2015). Efficacy of Needle, Ultrasonic, and Endoactivator Irrigation and Photon-Induced Photoacoustic Streaming in Removing Calcium Hydroxide from the Main Canal and Isthmus: An In Vitro Micro-Computed Tomography and Scanning Electron Microscopy Study. *Photomedicine and Laser Surgery* 33: 330–337.
382. De Groot SD, Verhaagen B, Versluis M, Wu M -K., Wesselink PR, Van Der Sluis LWM (2009). Laser-activated irrigation within root canals: cleaning efficacy and flow visualization. *International Endodontic Journal* 42: 1077–1083.
383. Zeltner M, Peters OA, Paqué F (2009). Temperature Changes During Ultrasonic Irrigation with Different Inserts and Modes of Activation. *Journal of Endodontics* 35: 573–577.

384. Nasab Mobarakeh NM, Taheri A, Rahmanian H, Jafarpour D, Rahmanian S (2020). Effect of Various Irrigating Devices on the Removal of Two Different Forms of Calcium Hydroxide from Internal Resorption Cavities. *International Journal of Dentistry* 2020: 1–7.
385. Tay FR, Gu L, Schoeffel GJ, Wimmer C, Susin L, Zhang K, Arun SN, Kim J, Looney SW, Pashley DH (2010). Effect of Vapor Lock on Root Canal Debridement by Using a Side-vented Needle for Positive-pressure Irrigant Delivery. *Journal of Endodontics* 36: 745–750.
386. Capitanio BL, Hashizume LN, Kuga MC, Oliveira ECG de, Rosa RA da, Só GB, Só MVR (2023). Analysis of pH, calcium ion release, and energy dispersive spectroscopy of a bioceramic root canal dressing. *Brazilian Dental Journal* 34: 54–61.
387. Só GB, Villa N, Pereira JR, Kuga MC, Duarte MAH, da Rosa RA, Só MVR (2025). Three different removal protocols for a bioceramic and a calcium hydroxide dressings: A microcomputed tomography study. *Journal of Conservative Dentistry and Endodontics* 28: 899–904.

