

T.C.
BOLU ABANT İZZET BAYSAL ÜNİVERSİTESİ
DİŞ HEKİMLİĞİ FAKÜLTESİ
ENDODONTİ ANABİLİM DALI



İRRİGASYON SOLÜSYONLARININ OZONLANMASININ
FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE OLAN ETKİLERİNİN
İNCELENMESİ

DİŞ HEKİMLİĞİNDE UZMANLIK TEZİ

ALİ HARAÇ

TEZ DANIŞMANI
Prof. Dr. ALİ KELEŞ

BOLU, EKİM 2025



ETİK BEYAN

Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kılavuzu ve Şablonuna uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
 - Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
 - Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
 - Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
 - Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu bildirir
- aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Teze ilişkin Turnitin adlı programında enstitü müdürlüğünce belirlenen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan benzerlik raporuna göre, tezin benzerlik oranı %30'u geçmemektedir.

Bu çalışma için Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi Girişimsel Olmayan Klinik Araştırmaları Etik Kurulundan 2024/245 sayısı ile etik izin alınmıştır.

ALİ HARAÇ

ÖNSÖZ

Endodontik tedavilerin başarısı, kök kanal sisteminin etkin bir şekilde dezenfekte edilmesine bağlıdır. Bu süreçte kullanılan irrigasyon solüsyonlarının antimikrobiyal etkinlikleri kadar, dentin tübüllerine penetre olabilme kapasiteleri de kritik öneme sahiptir. Son yıllarda güçlü oksidatif özellikleriyle dikkat çeken ozon, dental alanda farklı uygulamalarda gündeme gelmiş olsa da irrigasyon solüsyonlarıyla etkileşiminin fiziksel özellikler ve dentin tübüllerine yayılım üzerindeki etkileri literatürde yeterince araştırılmamıştır.

Bu eksiklikten yola çıkarak hazırlanan çalışmamızda, irrigasyon solüsyonlarının ozonlanmasının pH, yoğunluk ve viskozite gibi fiziksel parametreler ile dentin tübüllerindeki penetrasyon davranışları üzerindeki etkileri incelenmiştir. Ayrıca, penetrasyonun değerlendirilmesinde “Polar Transformer Tabanlı 360° Ölçüm Yöntemi” kullanılmıştır. Bu yöntem, klasik yaklaşımlara kıyasla dentin tübül penetrasyonunun daha objektif ve kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesine imkân tanımakta ve yeni bir yöntem olarak, literatüre metodolojik katkı sunmaktadır.

Bu çalışma, irrigasyon solüsyonlarını ozonlamanın, klinik kullanımındaki potansiyel etkilerine ışık tutmayı ve endodontik tedavilerde irrigasyon protokollerinin geliştirilmesine katkıda bulunmayı amaçlamaktadır.

Ali HARAÇ

15.10.2025

ÖZET

İRRİGASYON SOLÜSYONLARININ OZONLANMASININ FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE OLAN ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

DİŞ HEKİMLİĞİNDE UZMANLIK TEZİ

ALİ HARAÇ

BOLU ABANT İZZET BAYSAL ÜNİVERSİTESİ

DİŞ HEKİMLİĞİ FAKÜLTESİ

ENDODONTİ ANABİLİM DALI

(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. ALİ KELEŞ)

BOLU, EKİM-2025

XIII + 66 sayfa

Bu çalışmanın amacı, irrigasyon solüsyonlarının ozonlanmasının fiziksel özellikler ve dentin tübüllerine penetrasyon üzerindeki etkilerini incelemektir. Çalışmada sodyum hipoklorit (%5, %2.5, %1), EDTA (%17), klorheksidin diglukonat (%2) ve salin solüsyonları ile bu solüsyonların ozonlanmış halleri kullanıldı. Ozonlama, gaz fazı ozon konsantrasyonu 80 µg/NmL, gaz debisi 30 L/h ve temas süresi 5 dakika olacak şekilde Ozonette Ozon Jeneratörü (SEDECAL, Madrid, İspanya) kullanılarak gerçekleştirildi. Çözeltilerin pH, yoğunluk ve viskozite değerleri sırasıyla pH metre, piknometre ve Ostwald viskozimetresi kullanılarak belirlendi. Dentin tübüllerine penetrasyon değerlendirmesi için solüsyonlar Rodamin B ile işaretlenmiş, çekilmiş insan dişlerinden hazırlanan örnekler irrigasyon sonrası konfokal lazer taramalı mikroskop (CLSM) ile analiz edildi. Ölçümlerde ortalama ve maksimum penetrasyon uzunlukları ile yayılım alanları belirlendi. Ozonlama, NaOCl ve EDTA çözeltilerinde yoğunluk ve viskoziteyi anlamlı şekilde değiştirdi. CLSM analizleri, NaOCl gruplarında ozonlama sonrası dentin tübüllerine penetrasyonun arttığını, EDTA grubunda ise azaldığını gösterdi. Özellikle NaOCl gruplarında ozonlamanın penetrasyon kapasitesine etkisi, konsantrasyona bağlı farklılık gösterdi. Ozonlama işlemi irrigasyon solüsyonlarının fiziksel özelliklerini ve dentin tübüllerine penetrasyon davranışlarını etkilemektedir. Bu etkinin solüsyon türüne ve konsantrasyonuna bağlı olduğu gözlemlendi. Bulgular, ozonlanmış irrigasyon solüsyonlarının klinik kullanımı açısından dikkate alınması gereken yeni veriler sunmaktadır.

ANAHTAR KELİMELELER: Ozon, İrrigasyon solüsyonları, Sodyum hipoklorit, Viskozite, Dentin tübülleri, CLSM

ABSTRACT

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF OZONATION OF IRRIGATING SOLUTIONS ON THEIR PHYSICAL PROPERTIES SPECIALIZATION THESIS

ALİ HARAÇ

FACULTY OF DENTISTRY

BOLU ABANT İZZET BAYSAL UNIVERSITY

DEPARTMENT OF ENDODONTICS

(SUPERVISOR: PROF. DR. ALİ KELEŞ)

BOLU, OCTOBER 2025

XIII + 66 pages

The aim of this study was to investigate the effects of ozonation of irrigating solutions on their physical properties and dentinal tubule penetration. Sodium hypochlorite (5%, 2.5%, 1%), EDTA (17%), chlorhexidine digluconate (2%), and saline solutions, along with their ozonated counterparts, were used. Ozonation was performed using an Ozonette Ozone Generator (SEDECAL, Madrid, Spain) set to a gas-phase ozone concentration of 80 µg/NmL, with a gas flow rate of 30 L/h and a contact time of 5 min. The pH, density, and viscosity values of the solutions were determined using a pH meter, pycnometer, and Ostwald viscometer, respectively. For the evaluation of dentinal tubule penetration, the solutions were labeled with Rhodamine B, applied to extracted human teeth, and analyzed using confocal laser scanning microscopy (CLSM) following irrigation. Mean and maximum penetration depths as well as spread areas were measured. Ozonation significantly altered the density and viscosity of NaOCl and EDTA solutions. CLSM analyses revealed that dentinal tubule penetration increased after ozonation in NaOCl groups, whereas it decreased in the EDTA group. Particularly in the NaOCl groups, the effect of ozonation on penetration capacity varied depending on the concentration. Ozonation influences both the physical properties of irrigating solutions and their penetration behavior into dentinal tubules. This effect is dependent on the type and concentration of the solution. The findings provide new insights that should be considered regarding the clinical use of ozonated irrigants.

KEYWORDS: Ozone, Irrigating solutions, Sodium hypochlorite, Viscosity, Dentinal tubules, CLSM

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	v
ABSTRACT	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİL LİSTESİ.....	ix
TABLO LİSTESİ	x
FOTOĞRAF LİSTESİ	xi
KISALTMA VE SEMBOLLER LİSTESİ	xii
TEŞEKKÜR	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. GENEL BİLGİLER	4
2.1 Ozon.....	4
2.1.1 Ozonun Keşfi ve Tarihçesi	4
2.1.2 Doğal ve Yapay Ozon Oluşumu	4
2.2 Ozonun Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri	5
2.2.1 Ozon Molekül Yapısı	5
2.2.2 Ozonun Stabilesi ve Yarı Ömrü	5
2.2.3 Üretim Yöntemleri (Medikal Ozon Jeneratörleri vb.)	6
2.3 Ozonun Biyokimyasal Etki Mekanizması	7
2.3.1 Serbest Radikal Oluşumu ve Antioksidan Sistemler	7
2.3.2 Oksidatif Stres ve Hücre Düzeyindeki Etkiler	7
2.3.3 İmmünomodülatör ve Antimikrobiyal Etkiler	8
2.3.4 Doku Onarımında ve Rejenerasyonda Rolü	8
2.4 Diş Hekimliğinde Ozon Uygulamalarına Giriş	8
2.5 Endodonti Alanında Ozonun Kullanımı	9
2.5.1 Gaz Halinde Uygulama	10
2.5.2 Çeşitli Solüsyonların Ozonlanmasıyla Uygulama	10
2.5.3 Ozonun Solüsyonlar İçindeki Stabilesi	11
2.5.4 Güvenlik ve Yan Etkiler	12
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	14
3.1 Kullanılan Materyaller.....	14
3.2 Yoğunluk ve Viskozite Ölçümü	15
3.2.1 Örneklem Boyutunun Belirlenmesi	15
3.2.2 Yöntem	16
3.3 pH ölçümü	20
3.4 Dentin Tübüllerindeki Penetrasyonun Ölçülmesi.....	21
3.4.1 Örneklem Boyutunun Belirlenmesi	21
3.4.2 Yöntem	21
3.4.3 Yayılım Alanı Ölçümü	25
3.4.4 Ortalama Penetrasyon Mesafesi	25
3.4.5 Maksimum Penetrasyon Mesafesi	27
3.5 İstatistiksel Analiz	27
3.5.1 Ozonlanma İşleminin Fiziksel Özelliklere Olan Etkisi	27

4. BULGULAR	29
4.1 Ozonlamanın pH Üzerine Etkisi	29
4.2 Ozonlamanın Yoğunluk ve Viskozite Üzerine Etkisi.....	30
4.2.1 Ozonlama, Konsantrasyon ve Viskozite İlişkisi.....	33
4.3 Ozonlamanın Dentin Tübül Penetrasyonu Üzerine Etkisi.....	34
4.3.1 Penetrasyon Alanı	34
4.3.2 Ortalama Penetrasyon Mesafesi	35
4.3.3 Maksimum Penetrasyon Mesafesi	36
5. TARTIŞMA	38
5.1 Ozonlamanın İrrigasyon Solüsyonlarının Fiziksel Özelliklerine Etkisi	38
5.2 Ozonlama, Konsantrasyon ve Viskozite İlişkisine Dair Regresyon Analizi	39
5.3 Ozonlanmış NaOCl'nin Dentin Tübül Penetrasyonu Üzerindeki Etkisi ...	40
5.4 Polar Transform Yöntemi ve 360 Dereceli Ölçümün Klasik Yöntemlere Göre Üstünlükleri	41
5.5 EDTA ve CHX Gruplarında Ozonlama Sonrası Gözlenen Farklılıklar	42
5.6 Fiziksel Özellikler ile Penetrasyon İlişkisi	44
5.7 Ozonun Kök Kanal Sistemindeki Mikroorganizmalara Etkisi	45
5.8 Ozonun Dentin Dokusu Üzerine Etkisi	46
5.8.1 Dentin yüzeyinin negatif yükü	47
5.8.2 Ozonlama sonrası oluşabilecek potansiyel yüklü bileşikler.....	47
5.8.3 Ozonlama sonucu negatif/diğer yüklerin dentine yayılmayı zorlaştırabileceği olası mekanizmalar.....	48
5.9 Ozonlama Dozunun Belirlenmesi.....	49
5.10 Klinik Uygulamalara Yansıması.....	50
5.11 Çalışmanın Kısıtlılıkları ve Gelecek Araştırmalar.....	51
6. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	53
6.1 Çalışmanın Genel Sonuçları	53
6.2 Klinik Öneriler.....	53
6.3 Gelecek Araştırmalara Öneriler.....	54
KAYNAKLAR	55
EKLER.....	63

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 3.1. Yoğunluk formülü	17
Şekil 3.2. Ostwald viskozimetresi ölçüm formülü.....	18
Şekil 3.3. Lazer tarama işleminin yapılıp, ham görüntülerin alınması	24
Şekil 3.4. Polar Transformer eklentisi ile görüntülerin grafiksel şablonlara dönüşümü	26
Şekil 3.5. Yazılan ImageJ makrosunun polar transform edilmiş görüntüye uygulanması	26
Şekil 3.6. Sonuç penceresi	27
Şekil 4.1. Solüsyonların ozonlama öncesi ve sonrası yoğunlukları.....	30
Şekil 4.2. Solüsyonların ozonlama öncesi-sonrası viskozite değerleri (mPa·s)	32
Şekil 4.3. NaOCl Konsantrasyonu ve Δ Viskozite (Ortalama $\pm$ SD).....	33
Şekil 4.4. Yayılım alanlarının bar grafiği	34
Şekil 4.5. Ozonlama öncesi ve sonrası kanal lümeni çevresinde 360 derece boyunca dentin tübüllerinde ortalama yayılım uzunluklarının bar grafikleri	35
Şekil 4.6. Ozonlama öncesi ve sonrası kanal lümeni çevresinde 360 derece boyunca dentin tübüllerinde maksimum yayılım uzunluklarının bar grafikleri	37

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 4.1. Solüsyonların ozonlama öncesi ve sonrası pH değerleri.	29
Tablo 4.2. Solüsyonların ozonlama öncesi ve sonrası yoğunlukları	30
Tablo 4.3. Solüsyonların ostwald viskozimetresini geçiş süreleri	31
Tablo 4.4. Solüsyonların ozonlama öncesi ve sonrası viskozite değerleri (mPa·s)	32
Tablo 4.5 Ozonlamanın NaOCl gruplarında viskozite değişimine etkisi.....	33
Tablo 4.6. Solüsyonlarının ozonlama öncesi ve sonrası horizontal dentin kesitinde yayılma alanları (mm ²).....	34
Tablo 4.7. Solüsyonlarının ozonlama öncesi ve sonrası kanal lümeni çevresinde 360 derece boyunca dentin tübüllerinde ortalama yayılım uzunlukları (mm).....	35
Tablo 4.8. Solüsyonlarının ozonlama öncesi ve sonrası kanal lümeni çevresinde 360 derece boyunca dentin tübüllerinde maksimum yayılım uzunlukları (mm).....	36

FOTOĞRAF LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Fotoğraf 3.1. Ozon jeneratörü	14
Fotoğraf 3.2. Elektronik hassas tartı ve piknometre	16
Fotoğraf 3.3. Termokupl cihazı.....	17
Fotoğraf 3.4. Büzen kıskacı ile sabitlenmiş ostwald viskozimetre tüpü ve elektronik hassas termokupl cihazı.	20
Fotoğraf 3.5. Üniversitemizin YENİGIDAM birimindeki ph-metre.....	21
Fotoğraf 3.6. ISOMET testere bıçağı ile horizontal dentin kesitlerinin alınması..	23
Fotoğraf 3.7. CLSM incelemesine hazır horizontal kök kesitleri	23
Fotoğraf 3.8. Üniversitemizin YENİGIDAM bünyesindeki Konfokal Lazer Taramalı Mikroskop	25
Fotoğraf 4.1. EDTA'da ozonlama sonrası gözlemlenen sarı renk değişimi	21

KISALTMA VE SEMBOLLER LİSTESİ

BAİBÜ	: Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi
NaOCl	: Sodyum Hipoklorit
EDTA	: Etilendiamintetraasetik Asit
CHX	: Klorheksidin Diglukonat
CLSM	:Konfokal Lazer Taramalı Mikroskop (Confocal Laser Scanning Microscope)
SPSS	: Statistical Package for the Social Sciences
g/cm³	: Gram / Santimetreküp (Yoğunluk birimi)
ISO	: Uluslararası Standardizasyon Örgütü (International Organization for Standardization)
mm	: Milimetre
mPa·s	: Milipascal-saniye (Viskozite birimi)
O₃	: Ozon
pH	: Hidrojen iyonu konsantrasyonu ölçüsü
SD	: Standart sapma (Standard deviation)
Min	: Minimum
Max	: Maksimum
UV	: Ultraviyole
µm	: Mikrometre

TEŞEKKÜR

Uzmanlık eğitimim boyunca hem akademik hem de hayata dair tecrübelerini bizlerle paylaşmaktan çekinmeyen, maddi ve manevi bu çalışmaya ölçülemeyecek düzeyde katkı sunan, yöneticilik disiplini ve çalışma azmini örnek aldığım saygıdeğer hocam ve tez danışmanım Prof. Dr. Ali KELEŞ'e

Tez projemi destekleyen Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne,

Başta bu çalışmaya kendi alanındaki engin bilgileriyle büyük katkı vermiş olan Öğr. Gör. Dr. Şeyda KARABÖRK olmak üzere, üniversitemizin Yenilikçi Gıda Teknolojileri Geliştirme Uygulama ve Araştırma Merkezi'nin (YENİGIDAM) bütün çalışanlarına,

Hem lisans hem de uzmanlık eğitimimi almış olduğum Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesi Dış Hekimliği Fakültesindeki tüm hocalara ve güler yüzlü personellerine,

Uzmanlık eğitimim boyunca birçok güzel anı biriktirmemi sağlayan, kendileriyle tanışma şansı bulduğum eş kıdemli arkadaşlarım; Amine YİĞİT, Furkan YILMAZ, Pembe Büşra KAYGISIZ, Sude OKUR ve Yasemin ÖZDOĞAN ESER'e

Bugünlere gelmemi sağlayan babam Mehmet HARAÇ, annem Zehra HARAÇ ve kardeşim Ayça HARAÇ'a

Çalışma süresince hep yanımda olan eşim ve meslektaşım Gamze HARAÇ'a

Tüm kalbimle teşekkürlerimi sunarım.

1. GİRİŞ

Kök kanal tedavisinin amacı, enfekte dentin ve pulpayı temizleyerek kök kanal sistemindeki ekolojik dengeyi konak lehine çevirmektir. Bu süreçte, mikroorganizmalar ve onların oluşturduğu organik-inorganik artıkların uzaklaştırılması hedeflenir (Wong vd., 2021). Kök kanal anatomisi ile ilgili yapılan güncel analizler, kök kanal sisteminin son derece karmaşık bir yapı olduğunu ve geleneksel mekanik enstrümantasyon ile kök kanal sisteminin birçok yerine temas bile edilemediğini göstermiştir (Versiani vd., 2023). Bu analizlerin sonucunda iyi bir kök kanal irrigasyonun, başarılı bir tedavi için kritik olduğu tekrar vurgulanmıştır (Boutsioukis & Arias-Moliz, 2022). İdeal bir irrigasyon solüsyonu geliştirmek amacıyla antimikrobiyal etkinlik ve doku çözücülüğü açısından birçok ajan test edilmiş, ancak sodyum hipokloritin (NaOCl) yerini alabilecek düzeyde bir alternatif bulunamamıştır (Mohammadi vd., 2021).

İrrigasyon solüsyonlarının etkinliğini belirleyen en önemli etkenler, mikroorganizma öldürme gücüne ek olarak; aksesuar kanallara, apikal deltaya, istmuslara ve dentin tübülleri içine penetre olabilmesidir (Talib vd., 2024). Bir irrigasyon solüsyonu mükemmel özelliklere sahip olsa bile etki göstermesi gereken yere ulaşmadığı sürece kök kanal sisteminin etkin temizliği tartışmalı kalacaktır (Gupta vd., 2021). Bu noktada irrigasyon sıvılarının yüzey gerilimleri, viskoziteleri ve yüzey enerjileri gibi reolojik özellikleri de tıpkı, mikroorganizma öldürme güçleri gibi kritik bir önem kazanır. İdeal bir solüsyonun viskozitesi ve yüzey gerilimi, dar alanlara ve dentin tübülleri gibi kapiller bölgelere direnç göstermeden ulaşabilmesi için düşük olmalıdır (Fahad vd., 2024). Bu sebeple irrigasyon solüsyonlarının ulaşılması zor yerlere etkinlik gösterebilmesi için de araştırmalar yapılmaktadır. Bu araştırmalar; solüsyonların uygulanış yöntemleri, kanal içerisindeki aktivasyonları, sıcaklıkları, kombine halde kullanımları, konsantrasyonları gibi yaklaşımları içermektedir (Tonini vd., 2022). Ozon uygulamaları da dikkat çeken antimikrobiyal özellikleri ve gaz halinin verdiği birtakım avantajlar sebebiyle bu uygulamalar arasında yer almıştır (Moraes vd., 2021).

Ozon (O_3), üç oksijen atomundan oluşan reaktif bir gaz olup güçlü oksidatif özellikleri nedeniyle biyokimya ve tıp alanlarında kullanılmaktadır (Joshi vd., 2022). Moleküler düzeyde ozonun, biyomoleküllerle hızla reaksiyona girerek hücrel yapıları oksidatif strese maruz bıraktığı düşünülmektedir. Bu özelliği sayesinde antimikrobiyal ajan olarak bakteriler, virüsler ve mantarlar üzerinde etkili olduğu gösterilmiştir (Sinha vd., 2021). Ozon cihazlarının taşınabilir boyutlara gelip, ulaşılabilirliklerinin kolaylaşması ile birçok diş hekimi rutin pratiklerinde ozonu; cerrahi, periodontoloji, pedodonti ve endodonti alanlarında kullanmaya başlamıştır (Atılğan vd., 2024). Cerrahi branşlarda ozonun, doku iyileşmesini indükleyici etkisinden yararlanılırken, endodonti alanında, ozonun daha çok antimikrobiyal ve ulaşılması zor olan alanlara difüzyon etkisinden yararlanılmaktadır (Barczyk vd., 2023).

Endodonti alanında ozonun kullanımı çoğunlukla direkt olarak gaz halinde kanala uygulama veya bir sıvı içerisinde çözündürerek (irrigasyon solüsyonları, distile su, izotonik su, vb.) kök kanallarının bu solüsyonla irrig edilmesi şeklindedir (Liaquat vd., 2023). İki yöntemin de birtakım avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Gaz halindeki ozon, sıvı formuna kıyasla daha uzun yarıömre sahiptir (Ziyaina & Rasco, 2021). Buna karşılık ozonun önemli yan etkilerinden olan amfizem, mukoza ve solunum yolları irritasyonu, mide bulantısı ve baş dönmesi gibi etkiler, gaz halindeki uygulamalarda risk oluşturmaktadır (El Meligy vd., 2023). Bu sebeple ozonun sıvı içerisinde çözündürülmesi daha güvenli bir uygulama yöntemi olarak düşünülebilir. Ozon aynı zamanda difüzyon özelliği yüksek olan bir gazdır (Ivanov vd., 2007). Bu sebeple de gaz halinde ozonun kök kanallarına uygulandığı ve ulaşılması zor alanlara penetrasyonunun incelendiği çalışmalar da yapılmıştır (Barbosa vd., 2023).

Mühendislik alanında yapılan araştırmalar, bir sıvı içerisinde gaz çözündürmenin, o sıvının fizikokimyasal özelliklerini (viskozite, pH, yoğunluk, yüzey gerilimi vb.) değiştirebileceğini göstermiştir (Kerscher vd., 2022). Konumuz olan ozonun, mühendislik alanında bu amaçla denendiği çalışmalar mevcuttur. Bazı çalışmalarda ozon uygulanan çeşitli yağların viskozitelerinin 29 katına kadar çıkabildiği gösterilmiştir (Guerra-Blanco vd., 2021). Bunun aksine ozonlanan bazı sıvıların viskozitelerinin neredeyse yarıya düştüğünün gözlemlendiği çalışmalar da

mevcuttur (Yue vd., 2009). İrrigasyon solüsyonlarında bu boyutlardaki değişimlerin meydana gelmesi, solüsyonların gücünü önemli boyutlarda etkileme potansiyeli taşımaktadır. Bunlara ek olarak endodontide irrigasyonun temelini oluşturan NaOCl, klorheksidin diglukonat (CHX) ve etilendiamintetraasetik asidin (EDTA), ozon ile etkileşime girebilip birtakım yan ürünler oluşturduğu bilgisi de diş hekimliği dışındaki literatürlerde de yer almaktadır (Gilbert & Hoffmann-Glewe, 1990 Boyarinov et al., 2016; Kurylo et al., 2024).

Tüm bu düşünceden yola çıkarak yapılan literatür taramalarında, irrigasyon solüsyonlarını ozonlamanın fizikokimyasal özelliklerine (pH, yoğunluk, viskozite, kapillerite vb.) etkisini doğrudan inceleyen bir çalışmaya rastlanmamıştır. Mevcut çalışmalar genellikle, gaz haldeki ozonun ve ozonlanmış solüsyonların (çoğunlukla distile veya izotonik su) antimikrobiyal etkinliğine odaklanmış olup, geleneksel irrigasyon solüsyonlarının ozonlanmasının fizikokimyasal parametreler üzerindeki etkisi hakkında literatürde çalışma bulunmamaktadır. Bu çalışma, ozonlanmış irrigasyon solüsyonlarının fizikokimyasal özellikler üzerindeki etkisini araştırarak literatürdeki önemli bir bilgi boşluğunu doldurmayı amaçlamaktadır.

2. GENEL BİLGİLER

2.1 Ozon

Ozon (O_3), üç oksijen atomundan oluşan, yüksek reaktiviteye sahip bir gazdır (Suh vd., 2019). Atmosferde doğal olarak bulunan ozon, özellikle stratosferdeki ozon tabakasında yer alarak Güneş'ten gelen zararlı ultraviyole (UV) ışınlarını filtreleme görevi üstlenir (Kaye & Jackman, 1994). Kimyasal yapısı gereği kararsız olan ozon, kısa ömürlüdür ve zamanla oksijen moleküllerine (O_2) ayrışır (Schumacher, 1935). Güçlü oksitleyici özelliği sayesinde bakteri, virüs ve mantarları etkisiz hale getirme kapasitesine sahiptir. Bu nedenle dezenfeksiyon, hava ve su arıtımı gibi birçok endüstriyel ve medikal alanda kullanılır (Remondino & Valdenassi, 2018). Diş hekimliği de dahil olmak üzere çeşitli tıbbi uygulamalarda da terapötik bir ajan olarak değerlendirilmektedir (Atılğan vd., 2024).

2.1.1 Ozonun Keşfi ve Tarihçesi

Ozonun keşfi ve tarihçesi, 19. yüzyılın başlarına dayanmaktadır. İlk olarak 18. yüzyılın sonlarında Martin van Marum, elektrik boşalmaları sırasında havada keskin bir koku fark etti ancak bu gazın kimyasal yapısını belirleyemedi (Bocci, 2002). 1840 yılında Christian Friedrich Schönbein, laboratuvar deneyleri sırasında bu gazı tanımlayarak "ozon" adını verdi (Weidinger vd., 2011). Ozon kelimesi, Yunanca "ozein" (koklamak) kelimesinden türetilmiştir.

19. yüzyılın sonlarında ve 20. yüzyılın başlarında ozonun antibakteriyel özellikleri keşfedilmiş ve dezenfeksiyon amaçlı kullanılmaya başlanmıştır. 1893 yılında Almanya'nın Ousbaden kentinde, içme suyunu dezenfekte etmek için ilk ozon jeneratörü kullanılmıştır (Rojas-Valencia, 2012). Tıbbi alanda ise 20. yüzyılın başlarında, özellikle dikkat çekmeye başlamıştır (Rastogi vd., 2016).

2.1.2 Doğal ve Yapay Ozon Oluşumu

Ozon, doğada ve yapay olarak çeşitli yollarla oluşabilen reaktif bir gazdır. Doğal ozon oluşumu, genellikle atmosferin üst katmanlarında (stratosferde) gerçekleşir ve Güneş'ten gelen ultraviyole (UV) ışınlarının oksijen moleküllerini (O_2) parçalayarak serbest oksijen atomları ($O^{\cdot}$) oluşturmasıyla başlar. Bu serbest

oksijen atomları, diğer oksijen molekülleriyle birleşerek ozon (O_3) oluşturur. Troposferde ise ozon, şimşekler ve elektriksel boşalmalar sırasında doğal olarak meydana gelir (Chapman, 1932).

Yapay ozon oluşumu ise, ozon jeneratörleri kullanılarak sağlanır. En yaygın yöntemlerden biri, korona deşarjı prensibine dayanır ve yüksek voltaj uygulanarak oksijen moleküllerinin parçalanmasını sağlar (Vezzu vd., 2009). Diğer bir yöntem olan ultraviyole (UV) radyasyonu, doğal atmosferik süreci taklit ederek oksijenin ozona dönüşmesini sağlar. Medikal ve endüstriyel uygulamalarda kullanılan ozon, genellikle bu yapay yöntemlerle üretilir ve dezenfeksiyon, hava ve su arıtımı, tıbbi tedaviler gibi alanlarda kullanılır.

2.2 Ozonun Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri

2.2.1 Ozon Molekül Yapısı

Ozon (O_3), üç oksijen atomundan oluşan ve bükülmüş bir geometriye sahip olan bir moleküldür. Moleküler yapısı, $116,8^\circ$ lik bir bağ açısına sahip olup, rezonans yapıları nedeniyle kısmi yük dengesizliği gösterir. Oksijen-oksijen bağları tek veya çift bağ gibi net bir yapıya sahip olmamakla birlikte, aralarında delokalize elektron dağılımı bulunur (Trambarulo vd., 1953). Bu yapı, ozonun kararsız ve yüksek reaktif olmasına neden olur. Ozon molekülü, polar bir yapıya sahiptir ve güçlü oksitleyici özellikleri sayesinde biyolojik sistemlerde, endüstriyel işlemlerde ve dezenfeksiyon uygulamalarında önemli rol oynar. Ancak bu reaktivite, ozonun kısa ömürlü olmasına yol açarak, zamanla kararlı oksijen moleküllerine (O_2) dönüşmesine neden olur (Weschler, 2000).

2.2.2 Ozonun Stabilitesi ve Yarı Ömrü

Ozon, oldukça kararsız ve reaktif bir molekül olup, ortam koşullarına bağlı olarak hızla bozunarak oksijen moleküllerine (O_2) dönüşür. Gaz halinde ozonun yarı ömrü, sıcaklığa ve çevresel faktörlere bağlı olarak değişir. Düşük sıcaklık ve düşük nemde ozonun yarıömürü belirgin şekilde uzar. $24^\circ C$ ve %0 nemde hareketsiz havada ozonun yarıömürü 1500 dakikaya (25 saat) kadar çıkabilir. Sıcaklık ve nem arttıkça yarıömür 40 dakikaya kadar düşer (McClurkin vd., 2013). Havanın hareketsiz olduğu ortamlarda ozon daha uzun süre kalıcıdır. Hava akışı

arttıkça ozonun yarıömürü kısalır (McClurkin & Maier, t.y.). Ozonun temas ettiği yüzeyler ve ortamda bulunan organik maddeler (ör. meyve, sebze, toprak, mantar) ozonun hızla parçalanmasına neden olur. Suda saf ozonun yarıömürü 3200 saniye (~53 dakika) iken, organik madde varlığında bu süre birkaç dakikaya kadar düşebilir (Chhem-Kieth vd., 2022).

Yarıömürü Uzatanlar: Düşük sıcaklık, düşük nem, hareketsiz hava, az yüzey teması ve sitrik asit gibi bazı katkı maddeleri suda ozonun yarıömürünü uzatabilir (Hirahara vd., 2019).

Yarıömürü Azaltanlar: Yüksek sıcaklık, yüksek nem, hava akışı, organik madde ve yüzey teması ozonun daha hızlı parçalanmasına yol açar (McClurkin vd., 2013).

Ozonun yarıömürü, dezenfeksiyon ve sterilizasyon uygulamalarında etkin dozun ve temas süresinin belirlenmesinde kritik rol oynar (McClurkin vd., 2013). Yarıömürün kısa olması, ozonun hızlıca etkisiz hale gelmesine ve uygulama etkinliğinin azalmasına neden olabilir (McClurkin & Maier, t.y.).

2.2.3 Üretim Yöntemleri (Medikal Ozon Jeneratörleri vb.)

Ozon, doğada doğal yollarla oluşmasının yanı sıra, endüstriyel ve medikal kullanım için özel cihazlar aracılığıyla da üretilebilir. Medikal ozon jeneratörleri, yüksek saflıkta oksijen (O_2) kaynağından ozon (O_3) üretmek için kullanılan cihazlardır ve genellikle iki temel prensibe dayanır: korona deşarj yöntemi ve ultraviyole (UV) radyasyon yöntemi. Korona deşarj yöntemi, yüksek voltaj uygulanarak oksijen moleküllerinin parçalanmasını ve ardından serbest oksijen atomlarının ozon oluşturmasını sağlar. Bu yöntem, medikal ozon jeneratörlerinde en yaygın kullanılan tekniktir çünkü yüksek verimlilik ve kontrollü ozon konsantrasyonu sağlar (Chen & Davidson, 2002). Ultraviyole radyasyon yöntemi ise, kısa dalga boylu UV ışınları kullanarak oksijen moleküllerinin parçalanmasıyla ozon üretir, ancak bu yöntem düşük konsantrasyonda ozon elde edilmesine neden olur ve daha az verimli kabul edilir (Sarcan vd., 2023). Endüstriyel ölçekte ozon üretimi için ayrıca elektroliz yöntemi kullanılabilir, bu yöntemde suyun elektrolizi ile hidroksil radikalleri oluşarak ozona dönüşebilir (Silva vd., 2023). Medikal ve diş hekimliği alanında kullanılan ozon jeneratörleri, belirli doz aralıklarında

kontrollü ozon üretimi yaparak güvenli ve etkin tedavi protokollerinin uygulanmasına olanak tanır.

2.3 Ozonun Biyokimyasal Etki Mekanizması

2.3.1 Serbest Radikal Oluşumu ve Antioksidan Sistemler

Ozon, güçlü bir oksitleyici ajan olarak biyolojik sistemlerde serbest radikal üretimini tetikleyebilir. Ozon, hücrelerle etkileşime girdiğinde reaktif oksijen türleri (ROS) ve lipid peroksitler gibi oksidatif bileşikler oluşturur. Bu bileşikler, hücresel metabolizma ve sinyal iletiminde önemli roller oynarken, aynı zamanda yüksek konsantrasyonlarda hücre hasarına neden olabilir. Vücut, ozonun neden olduğu oksidatif etkilere karşı glutatyon peroksidaz, süperoksit dismutaz (SOD) ve katalaz gibi enzimatik antioksidan sistemlerle korunur. Düşük dozlarda ozona maruz kalma, bu antioksidan sistemleri uyararak hücresel savunma mekanizmalarının güçlenmesini sağlayabilir (Clavo vd., 2019; Galiè vd., 2019; Pelinsari vd., 2024). Ancak yüksek dozda ozon maruziyeti, antioksidan sistemlerin kapasitesini aşarak hücre hasarına ve oksidatif strese neden olabilir (Xia vd., 2021).

2.3.2 Oksidatif Stres ve Hücre Düzeyindeki Etkiler

Ozonun hücrelerle etkileşimi, oksidatif stres yoluyla çeşitli biyokimyasal değişikliklere yol açar. Oksidatif stres, serbest radikallerin hücresel antioksidan kapasiteyi aşması durumunda meydana gelir ve proteinler, lipidler ve DNA gibi temel biyomoleküllerin yapısında bozulmalara neden olabilir (Mustafa, 1990). Ozonun kontrollü kullanımı, hücresel redoks dengesini hafifçe bozarak adaptif yanıtlara neden olabilir ve böylece hücrelerin antioksidan savunma sistemlerini aktive edebilir. Ancak, yüksek dozlarda ozon uygulamaları apoptoz (programlanmış hücre ölümü) veya nekroz gibi hücre ölüm mekanizmalarını tetikleyebilir (Kirichenko vd., 1996). Bu nedenle, tıbbi ozon uygulamalarında uygun doz ve süre ayarlaması büyük önem taşır.

2.3.3 İmmünomodülatör ve Antimikrobiyal Etkiler

Ozonun immünomodülatör etkisi, bağışıklık hücreleri üzerindeki doğrudan ve dolaylı etkileşimleriyle ortaya çıkar. Ozon, makrofajlar, nötrofiller ve lenfositler gibi bağışıklık hücrelerini aktive ederek interlökinler (IL-2, IL-6), tümör nekroz faktörü-alfa (TNF- α) ve interferon-gamma (IFN- γ) gibi sitokinlerin salgılanmasını etkileyebilir (Zakhvatov vd., 2020). Bu durum, vücudun enfeksiyonlarla mücadelesini destekleyen proinflamatuvar ve antiinflamatuvar yanıtların dengelenmesine yardımcı olur. Ayrıca, ozonun doğrudan bakteri, virüs ve mantarlar üzerinde lizise (parçalanmaya) yol açan etkileri de bulunur. Ozonun lipofilik yapısı, mikrobiyal hücre zarlarıyla kolayca etkileşime girerek hücre membranında oksidatif hasar oluşturur ve mikroorganizmaların metabolizmasını bozarak ölümüne neden olur (Khadre vd., 2001). Bu nedenle, ozon özellikle diş hekimliği gibi sterilizasyonun kritik olduğu alanlarda etkili bir dezenfektan olarak kullanılmaktadır.

2.3.4 Doku Onarımında ve Rejenerasyonda Rolü

Ozon, hücresel düzeyde oksijenlenmeyi artırarak ve büyüme faktörlerini aktive ederek doku yenilenmesini teşvik edebilir. Ozon tedavisi, hipoksiye uğramış dokularda oksijen perfüzyonunu artırarak fibroblast aktivitesini ve kollajen sentezini uyarmaktadır. Bu etki, yara iyileşmesini hızlandırırken, inflamasyonun kontrol altına alınmasına da yardımcı olur (Zhang vd., 2014). Ayrıca, ozonun endotel hücreleri ve vasküler büyüme faktörleri üzerindeki düzenleyici etkileri sayesinde anjiyogenez (yeni damar oluşumu) sürecini uyatarak doku rejenerasyonunu desteklediği gösterilmiştir (Fang vd., 2024). Diş hekimliği alanında bu özellik, periodontal hastalıkların iyileşme sürecinde ve kök kanal tedavisi sonrası doku onarımında önemli bir avantaj sunmaktadır (Torul vd., 2023).

2.4 Diş Hekimliğinde Ozon Uygulamalarına Giriş

Diş hekimliğinde ozon kullanımı, özellikle son yıllarda giderek daha fazla ilgi gören bir uygulama alanı haline gelmiştir. Güçlü oksitleyici özelliklere sahip olan ozon, antibakteriyel, antifungal, antiviral ve immünomodülatör etkileri sayesinde çeşitli dental tedavilerde tamamlayıcı bir ajan olarak değerlendirilmiştir.

Diş hekimliğinde ozon; gaz, ozonlu su veya ozonlu yağ formlarıyla uygulanabilir ve geleneksel irrigasyon veya dezenfeksiyon yöntemlerine alternatif ya da destekleyici bir seçenek sunabilir (Suh vd., 2019). Özellikle çürük yönetimi, endodontik enfeksiyon kontrolü, periodontal tedaviler, cerrahi yara iyileşmesi ve dentin hassasiyeti gibi alanlarda ozon kullanımının avantajları araştırılmaktadır (Azarpazhooh & Limeback, 2008).

Bunun yanı sıra ozon, periodontal hastalıkların tedavisinde de kullanılmaktadır. Periodontal ceplerde bakteriyel yükü azaltma, enflamasyonu kontrol altına alma ve doku iyileşmesini hızlandırma gibi etkileri sayesinde konvansiyonel tedavilere destekleyici bir rol oynayabilir. Diş çekimi sonrası yara iyileşmesini hızlandırma, implant çevresindeki enfeksiyonları azaltma ve ağız içi lezyonların tedavisinde de ozon terapisi üzerine yapılan çalışmalar artmaktadır (Goswami vd., 2024).

2.5 Endodonti Alanında Ozonun Kullanımı

Endodontik tedavilerde kök kanal dezenfeksiyonu büyük önem taşımakta olup, ozon bu alanda güçlü bir antimikrobiyal ajan olarak dikkat çekmektedir (Silva vd., 2020). Geleneksel irrigasyon solüsyonlarının sınırlamaları göz önüne alındığında, ozon gazı veya ozonlanmış solüsyonların kullanımı potansiyel bir alternatif olarak değerlendirilmektedir (Sinha vd., 2021). Ozonun yüksek oksidatif gücü sayesinde, kök kanal sisteminde bulunan bakteriler, mantarlar ve virüsler üzerinde hızlı ve etkili bir dezenfeksiyon sağlaması amaçlanmaktadır. Ayrıca, ozonun dentin tübüllerine nüfuz etme kapasitesi, özellikle derin kanal enfeksiyonlarında dezenfeksiyonun etkinliğini artırma potansiyeline sahiptir (Chohan vd., 2024).

Bununla birlikte, ozonun gaz veya sıvı formda uygulanma şekli, etkinliğini belirleyen kritik bir faktördür. Gaz formundaki ozon doğrudan uygulanabildiği gibi, çeşitli irrigasyon solüsyonlarının ozonlanması ile de kombine edilebilir (Silva vd., 2022). Ozonun endodontik tedavilerde optimal kullanımını belirlemek için uygun doz ve uygulama sürelerinin belirlenmesi, solüsyonlar içindeki stabilitesi ve dokuya penetrasyonu gibi faktörler üzerinde daha fazla araştırma yapılması gerekmektedir.

2.5.1 Gaz Halinde Uygulama

Gaz halinde ozon uygulaması, kök kanal dezenfeksiyonunda bakteriyel yükü hızlı bir şekilde azaltabilmesi açısından avantajlıdır. Ozon gazı, dentin tübüllerine sıvı irrigasyon solüsyonlarından daha derinlemesine penetre olabilir ve anaerobik ortamda bulunan mikroorganizmalar üzerinde güçlü bir oksidatif etki gösterir (Huth vd., 2009). Bununla birlikte, gaz formundaki ozonun kontrollü ve güvenli bir şekilde uygulanması gerekmektedir, çünkü aşırı maruziyet mukozal tahrişe ve solunum sistemi ile ilgili olumsuz etkilere neden olabilir (El Meligy vd., 2023).

Gaz halinde ozonun bir diğer sınırlaması ise kanal içindeki sıvılar veya dokularla etkileşime girerek hızla oksijen moleküllerine dönüşmesi ve etkinliğinin kısa sürede azalmasıdır (McClurkin vd., 2013). Bu nedenle, gaz formunda ozon uygulamalarının optimal süre ve konsantrasyonlarının belirlenmesi ve klinik pratikte güvenli kullanım için standart protokollerin oluşturulması gerekmektedir (Veneri vd., 2025).

2.5.2 Çeşitli Solüsyonların Ozonlanmasıyla Uygulama

Ozon, tek başına gaz halinde uygulanabileceği gibi, distile su gibi çeşitli irrigasyon solüsyonlarının ozonlanarak kullanılması da mümkündür (Goswami vd., 2024). NaOCl, EDTA ve CHX gibi yaygın irrigasyon solüsyonlarının ozon ile zenginleştirilmesi, bu solüsyonların antimikrobiyal etkilerini artırabilir ve dentin tübüllerine daha iyi yayılmalarını sağlayabilir. Ayrıca zeytinyağı gibi normalde irrigasyon solüsyonu olarak kullanılmayan yağların da ozonlanıp kök kanal sistemine uygulandığı çalışmalar mevcuttur (Mittal vd., 2022). Ozonlanmış solüsyonların, özellikle çok kanallı ve anatomik olarak kompleks yapıya sahip kök kanallarında daha etkili bir dezenfeksiyon sağlayabileceği düşünülmektedir (Silva vd., 2020).

Giriş kısmında da kısaca bahsedildiği üzere çeşitli irrigasyon solüsyonlarının, diş hekimliğinin dışındaki alanlarda da ozonlandığı çeşitli durumlar özellikle bazı mühendislik literatürlerinde bulunmaktadır. Örneğin, EDTA'nın atık su ve çevre mühendisliği alanlarında ozonlanarak, metal iyonları ile

şelat oluşturma potansiyelinin arttırıldığı çeşitli çalışmalarda gösterilmiştir. Yine benzer çalışmalarda Metal-EDTA komplekslerinin parçalanmasında etkili bir ileri oksidasyon yöntemi olarak öne çıktığı; özellikle Cu(II), Ni(II), Zn(II) gibi metallerin EDTA kompleksleri ozonla oksitlenerek metallerin serbest hale geçmesini ve ardından çökmesini sağladığı kanıtlanmıştır (Shahzad vd., 2017). NaOCl ve CHX'in kanallara uygulandıktan sonra kanallardaki solüsyonlara gaz halinde ozon verip, antimikrobiyal etkinin sinerjistik şekilde arttığını gösteren çalışmalar da çok kısıtlı sayıda olsa da mevcuttur (Noites vd., 2014).

Ancak, ozonun bu solüsyonlarla etkileşimi sonucu oluşabilecek kimyasal değişiklikler dikkatle değerlendirilmelidir. Örneğin, ozonun NaOCl ile reaksiyonu sonucu pH değişimleri meydana gelebilir ve bu durum solüsyonun etkinliğini etkileyebilir. Benzer şekilde, ozonun CHX ile etkileşimi sonucu potansiyel olarak toksik bileşikler oluşup oluşmadığı da araştırılmalıdır. Bu nedenle, ozonlanmış irrigasyon solüsyonlarının kimyasal stabilitesi, viskozitesi, yoğunluğu ve dentin tübüllerine penetrasyonu üzerindeki etkilerinin incelenmesi, bu yöntemin güvenilirliği açısından kritik bir konudur.

2.5.3 Ozonun Solüsyonlar İçindeki Stabilitesi

Ozonun solüsyon içindeki stabilitesi, uygulama etkinliğini ve klinik kullanımını doğrudan etkileyen bir faktördür. Ozon gazı su veya irrigasyon solüsyonları içinde çözündüğünde, çevresel faktörler (pH, sıcaklık, çözücü tipi) nedeniyle hızla bozunarak oksijen moleküllerine dönüşebilir. Ozonun farklı solüsyonlar içindeki yarı ömrü değişkenlik gösterir ve bu süre, solüsyonun kimyasal bileşimi ile doğrudan ilişkilidir. Örneğin, suda çözündüğünde 20°C'de yaklaşık 15-20 dakika içinde önemli ölçüde parçalanırken, daha düşük sıcaklıklarda stabilitesi artabilmektedir (McClurkin vd., 2013).

İrrigasyon solüsyonlarında ozonun stabilitesini artırmak için çeşitli yöntemler araştırılmaktadır. Örneğin, sitrik asit ilavesi ile ozonun solüsyon içerisindeki aktivite süresinin uzatılabildiği görülmüştür (Hirahara vd., 2019). Ozonun NaOCl, EDTA veya CHX içindeki çözünürlüğü ve kimyasal bozunma dinamikleri üzerine yapılan çalışmalar, bu solüsyonların ozonlanmış formlarının ne kadar süreyle etkili kalabileceğini belirlemeye yardımcı olacaktır. Bu bağlamda,

ozonun irrigasyon solüsyonlarının pH dengesine, viskozitesine ve dentin tübüllerine yayılabilirliğine olan etkileri, endodontik tedavilerde etkinliğini değerlendirmek açısından büyük önem taşımaktadır.

2.5.4 Güvenlik ve Yan Etkiler

Ozon tedavisinin diş hekimliğinde birçok avantajı olmasına rağmen, bazı kısıtlama ve dezavantajları da bulunmaktadır (El Meligy vd., 2023). En önemli sınırlamalarından biri, ozonun kısa yarı ömrü ve kararsız yapısıdır (McClurkin & Maier, t.y.). Ozon, üretildikten kısa bir süre sonra oksijen moleküllerine ayrıştığı için, tedavi sırasında anında uygulanması gerekmektedir. Bu durum, ozon kullanımını pratik anlamda sınırlamakta ve sürekli ozon üreten jeneratörlere olan ihtiyacı artırmaktadır. Ayrıca, ozonun dozajı ve uygulama süresi konusunda henüz kesinleşmiş standart protokollerin bulunmaması, tedavi etkinliğini değişken hale getirebilmektedir.

Bunun yanı sıra, ozonun yüksek konsantrasyonlarda sitotoksik ve iritan etkilere sahip olması da bir dezavantajdır. Solunum yolları ve mukozalar için tahriş edici özellik gösterdiğinden, ozonun kontrollü kullanılması gerekmektedir. Gaz formunda yüksek dozda ozona maruz kalmak, solunum yollarında irritasyon ve akciğer dokusunda hasara neden olabilir, bu nedenle klinik kullanımlarda güvenlik önlemlerinin titizlikle uygulanması gerekir (Nuvolone vd., 2018).

Ozonun irrigasyon solüsyonlarıyla etkileşimi de dikkat edilmesi gereken bir konudur. Ozon uygulaması, irrigasyon solüsyonlarının pH'mı, yoğunluğunu ve viskozitesini değiştirerek beklenmeyen kimyasal reaksiyonlara yol açabilir. Örneğin, ozonlanmış NaOCl veya CHX solüsyonlarının dokuya penetrasyon kapasitesinde farklılıklar oluşabilir ve bu değişimlerin dentin tübüllerine yayılabilirlik açısından nasıl bir etki göstereceği, henüz araştırılmadığı için tam olarak bilinmemektedir. Bu nedenle, ozonun irrigasyon solüsyonları ile kombinasyon halinde kullanılması durumunda, fiziksel ve kimyasal özellikler üzerindeki değişikliklerin dikkatlice analiz edilmesi gerekmektedir.

Sonuç olarak, ozon tedavisinin diş hekimliğinde daha yaygın ve güvenli bir şekilde kullanılabilmesi için klinik protokollerin standardize edilmesi, optimal

konsantrasyon ve uygulama sürelerinin belirlenmesi ve irrigasyon solüsyonlarıyla etkileşimlerinin daha detaylı araştırılması gerekmektedir.



3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1 Kullanılan Materyaller

Bu in vitro çalışmada %5, %2.5 ve %1'lik konsantrasyonlarda NaOCl (Saver, Prime Dental, Maharashtra, Hindistan), %17 konsantrasyonlu EDTA (Werax, SDD, İzmir, Türkiye), %2 konsantrasyonlu CHX (Saver, Prime Dental, Maharashtra, Hindistan) ve steril salin solüsyonu (Polifleks, Polifarma, İstanbul, Türkiye) kullanıldı. Her solüsyonun ozonlanmış formu da hazırlanarak toplam 12 grup elde edildi. %2.5 ve %1'lik NaOCl solüsyonları, temin edilen %5'lik NaOCl solüsyonunun deiyonize suyla seyreltilmesi ile deney yapılan günlerde elde edildi. (Cárdenas-Bahena vd., 2012).

Ozonlama, gaz fazı ozon konsantrasyonu 80 µg/NmL, gaz debisi 30 L/saat ve temas süresi 5 dakika olacak şekilde Ozonette Ozon Jeneratörü (SEDECAL, Madrid, İspanya) kullanılarak gerçekleştirildi (Fotoğraf 3.1). Sıvı hacmi (200 mL), kap geometrisi ve oda sıcaklığı (23 ± 1 °C) işlem boyunca sabit tutuldu.



Fotoğraf 3.1. Ozon jeneratörü

3.2 Yoğunluk ve Viskozite Ölçümü

3.2.1 Örneklem Boyutunun Belirlenmesi

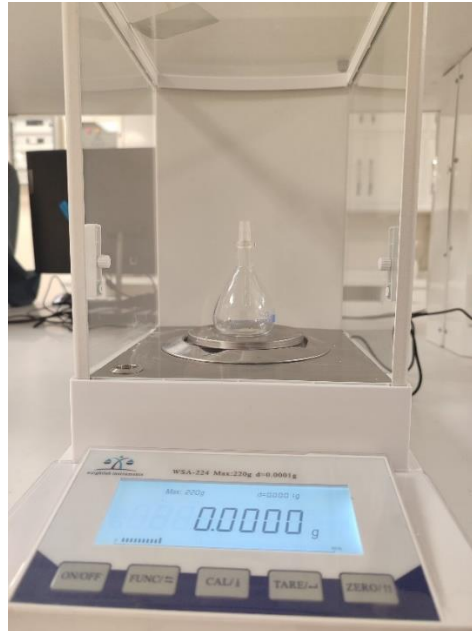
Alet hassasiyetini test etmek ve G*Power V. 3.1.9.6 (G*Power 3.1 for Macintosh; Heinrich Heine, Universitat Dusseldorf, Düsseldorf, Almanya) programıyla power analizi gerçekleştirip, deneyin tekrar sayısını belirleyebilmek adına bir ön çalışma da yapıldı. Bu çalışmada her irrigasyon solüsyonunun ozonlanmış ve ozonlanmamış halleri arasındaki viskozite farklarının istatistiksel olarak değerlendirilebilmesi amacıyla, iki bağımsız grup arasındaki fark için power analizi yapıldı. Gerekli örneklem büyüklüğü hesaplamasında G*Power v3.1.9.6 (*Universität Düsseldorf, Almanya*) programı kullanıldı (Faul vd., 2007). Pilot çalışmadan elde edilen veriler doğrultusunda, %2,5 NaOCl grubunun ozonlanmış ve ozonlanmamış halleri arasında ortalama viskozite farkı 0.1934 mPa·s, standart sapmalar ise sırasıyla 0.0126 ve 0.0117 olarak belirlendi. Bu verilere dayanarak hesaplanan etki büyüklüğü (Cohen's d) 20.612 olarak bulundu. Yaptığımız pilot çalışmanın istatistiksel detayları EKLER bölümünde paylaşılmıştır.

Pilot çalışmada elde edilen Cohen's d değerinin olağanüstü yüksek çıkması (20.612), biyolojik etkinin büyüklüğünden değil, deneysel koşulların hassasiyetinden kaynaklanmaktadır. Bu aşamada gerçek biyolojik etki sıfır olup, yalnızca aynı çözeltinin ozonlanmış ve ozonlanmamış halleri karşılaştırıldı. Ölçümlerde sıcaklığın sabit tutulması, viskozimetrenin ISO 3105 standartlarına uygun olarak temizlenmesi ve kullanılması, her ölçüm öncesi viskozimetrenin eğiminin su terazisi ile kontrol edilmesi gibi metodolojik önlemler, varyansı minimuma indirdi. Dolayısıyla hesaplanan etki büyüklüğü, gerçek biyolojik farklılığı değil, ölçümlerin teknik kararlılığını yansıtmaktadır.

%95 test gücü (power = 0.95) ve %5 anlamlılık düzeyi ($\alpha = 0.05$) ile yapılan hesaplamada, her grup için en az 10 örnek ile çalışılması gerektiği belirlendi. Çalışmanın diğer grupları da benzer şekilde ikili karşılaştırmalar şeklinde değerlendirileceğinden, örneklem sayısı tüm gruplarda bu değer altında kalmayacak şekilde planlandı. Her grup için 11 tekrar yapıldı.

3.2.2 Yöntem

Çalışmada irrigasyon solüsyonlarının yoğunlukları, sabit hacimli cam kaplar kullanılarak doğrudan ölçüldü ve elde edilen değerler, ozonlamanın fiziksel özellikler üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla karşılaştırıldı. Ölçümler, Borosil (*Mumbai, Hindistan*) cam piknometre ile gerçekleştirildi. Piknometreler, sıvıların hacimlerine karşılık gelen kütlelerinin ölçülmesi yoluyla yoğunluk hesaplamasında kullanılan, yüksek hassasiyetli laboratuvar cam kaplarıdır. Bu yöntem, özellikle düşük viskoziteli ve Newtonyen davranış gösteren sıvılar için doğru ve tekrarlanabilir sonuçlar sağlaması nedeniyle tercih edildi (Sander & Sniegowski, 2017). Piknometre ile yapılan ölçümler, ISO 758:2022 Endüstriyel kullanım için sıvı kimyasal ürünlerin yoğunluğun 20 °C'de tayini standardına uygun şekilde gerçekleştirildi. Bu standart, sıvıların yoğunluk tayininde kullanılacak piknometrelerin özelliklerini, ölçüm koşullarını ve temizleme protokollerini içermektedir. Her ölçüm öncesinde, piknometre dikkatlice temizlendi ve kurutuldu. Piknometre önce distile su ile, ardından aseton ile durulandı ve havayla kurutularak sonraki örnek için hazır hale getirildi. Her irrigasyon solüsyonu için ölçüm üç kez tekrarlanmış ve ortalama yoğunluk değeri mililitre başına gram (g/cm^3) cinsinden kaydedildi.



Fotoğraf 3.2. Elektronik Hassas Tartı ve Kabin İçine Yerleştirilmiş Piknometre

Tüm tartım işlemleri, üniversitemiz AR-GE laboratuvarında bulunan hassasiyet derecesi ± 0.0001 g olan elektronik terazi kullanılarak yapıldı (Fotoğraf 3.2). Piknometreler, boş ve dolu halde tartılarak her bir solüsyonun kütlesi tespit edildi. Yoğunluk hesaplamasında, bilinen hacme karşılık gelen kütle değeri esas alınarak aşağıdaki formül uygulandı:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Şekil 3.1. Yoğunluk Formülü ρ : Yoğunluk (g/cm^3), m : Maddenin kütlesi (g), V : Maddenin hacmi (cm^3)

Tüm ölçümler, 20 ± 0.1 °C sıcaklıkta sabitlenen bir laboratuvar ortamında yapılmış, sıcaklık kontrolü kalibre edilmiş bir termometre ile sağlandı (Fotoğraf 3.3). Bu koşullar da yine ISO 758:2022 standardının öngördüğü çerçevede sabit tutuldu ve sonuçların karşılaştırılabilirliği güvence altına alındı. Bu yöntem sayesinde irrigasyon solüsyonlarının yoğunluklarındaki değişimler, hem ozonlama öncesi ve sonrası gruplar hem de solüsyon türleri arasında karşılaştırmalı olarak değerlendirildi.



Fotoğraf 3.3. Termokupl cihazı

İrrigasyon solüsyonlarının viskozite değerleri, kılcal akış prensibine dayalı bir cihaz olan Ostwald viskozimetresi kullanılarak belirlendi. Bu yöntem, belirli bir hacimdeki sıvının yerçekimi etkisiyle viskozimetrenin üst haznesinden alt haznesine geçiş süresinin ölçülmesine dayanır. Ölçüm sonucunda elde edilen süreler, referans bir sıvıya (distile su) ait geçiş süreleriyle karşılaştırılarak göreceli viskozite hesaplandı. Dinamik viskozite yerine bu orantısal yöntem tercih edildi. Ostwald viskozimetresi, düşük maliyeti, kullanışlılığı ve sabit laboratuvar koşullarında yüksek hassasiyet sağlaması nedeniyle tercih edildi (Bhattad, 2023).

$$\eta_x = \eta_{ref} \cdot \frac{\rho_x \cdot t_x}{\rho_{ref} \cdot t_{ref}}$$

Şekil 3.2. Ostwald Viskozimetresi Ölçüm Formülü

Bu formülde sırasıyla:

η_x : Test edilen sıvının dinamik viskozitesi (mPa·s)

η_{ref} : Referans sıvının bilinen dinamik viskozitesi

ρ_x : Test edilen sıvının yoğunluğu (g/cm³)

ρ_{ref} : Referans sıvının yoğunluğu (g/cm³)

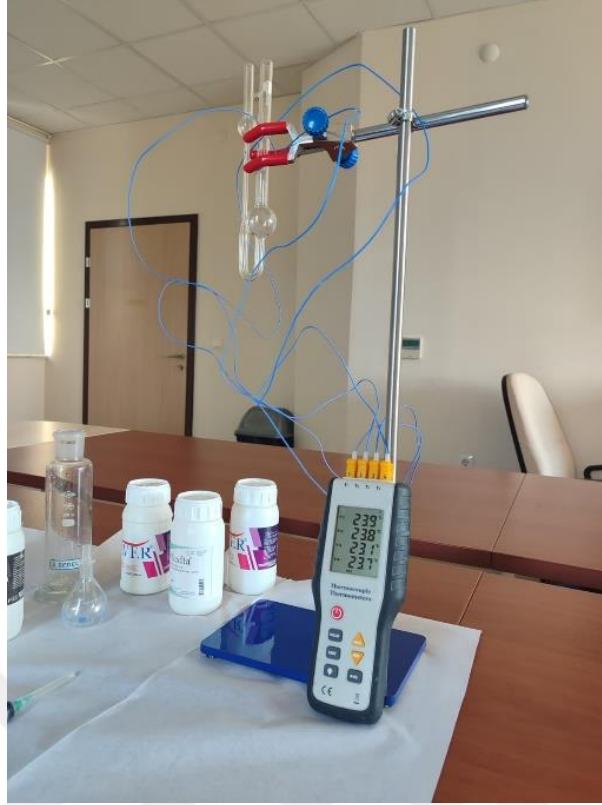
t_x : Test edilen sıvının akış süresi (s) – menisküs çizgileri arasındaki geçiş süresi

t_{ref} : Referans sıvının akış süresi (s) ifade etmektedir.

Ostwald viskozimetresinin kullanımı sırasında, ISO 3105:2023 (Cam kapiller kinematik viskoziteler) standardı temel alındı. Bu standart, cam kılcal viskozimetrelerin tasarımı, kullanımı ve kalibrasyonu ile ilgili kuralları içermektedir. ISO 3105'e göre; ölçüm yapılmadan önce viskozimetrenin temizliği

büyük önem taşımaktadır. Her kullanımdan sonra viskozimetre, uygun çözücülerle yıkanmalı ve kurutulmalıdır. Ayrıca, tüm ölçümler sabit bir sıcaklıkta (bu çalışmada 23 ± 1 °C) yapılmalı ve sıcaklık kontrolü bir termometre ile doğrulanmalıdır (Fotoğraf 3.3). Viskozite, sıcaklıktan yüksek derecede etkilenen bir fiziksel parametre olduğundan, bu koşulun sağlanması kritik önem taşımaktadır. Bu uyarılar doğrultusunda; Viskozimetre tüpünün açısı, sıvı akış süresini etkileyeceğinden tüp, bünzen kısıkaçı ve büret standı ile deney bitene kadar sabit tutuldu, her deney yapılacağı gün su terazisi ile standın eğimi kontrol edildi. Ölçümler arasında önceki deneyden tüp içinde kalan sıvılardan kaynaklı hatalı ölçüm olmaması için her sıvı geçişi öncesi tüpten etil alkol geçirilip tamamen buharlaştırıldı (Vijapur vd., 2022). Ölçümlerde, kalibrasyon solüsyonu olarak 23°C’de viskozitesi ve yoğunluğu bilinen distile su kullanıldı.

Ölçümler, viskozimetrenin dik konumda ve sarsıntısız bir yüzeye sabitlenmiş halde bulunduğu bir düzende gerçekleştirildi. Sıvının viskozimetreye aktarımı sırasında, hava kabarcığı oluşmaması için dikkatli çalışıldı, sıvının hazneye çekim işlemi için cerrahi emici başlık kullanıldı. ISO 3105, sıvının “menisküs seviyesi” ile ilgili hizalama hassasiyetine de dikkat çekmekte ve okumanın bu hizaya göre yapılmasını önermektedir. Bu detaylara uygunluk, ölçüm sonuçlarının doğruluğunu ve tekrarlanabilirliğini artırmaktadır. (Saxena & Kumar, 2021).



Fotoğraf 3.4. Bünen kısıacı ile sabitlenmiş Ostwald Viskozimetre tüpü ve elektronik hassas termokupl cihazı.

3.3 pH ölçümü

pH ölçümleri için Orion 3-Star pH metre (*Thermo Scientific, USA*) ve kimyasal dirençli double-junction cam elektrot kullanıldı. Cihaz her ölçüm günü, pH 4.0, 7.0 ve 10.0 tampon solüsyonları ile kalibre edildi. Tüm ölçümler $23^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ sıcaklıktaki sabit ortamda yapıp, her solüsyondan alınan beş farklı örnek ayrı ayrı ölçüldü ($n = 5$). Elektrot, solüsyona batırıldıktan sonra sabit değer alınana kadar beklendi (ortalama 30 saniye). Elektrotlar her ölçüm öncesi distile suyla durulandı ve filtre kâğıdı ile nazikçe kurulandı.

Cihazın kalibrasyonu ve çalışma yöntemleri için, ISO 10523:2008 – Su kalitesi pH Tayin Protokolleri; kullanılan tampon çözelti için, ISO 23496:2019 – Referans Tampon Çözeltiler; Doğruluk, lineerlik, tekrarlanabilirlik ve kalibrasyon gereksinimleri için, ISO 23668:2022 – pH Metreler İçin Performans Gereksinimleri standartları dikkatle gözetildi.



Fotoğraf 3.5. Üniversitemizin YENİGIDAM Birimindeki pH-metre

3.4 Dentin Tübüllerindeki Penetrasyonun Ölçülmesi

3.4.1 Örneklem Boyutunun Belirlenmesi

G*Power V. 3.1.9.6 (*G*Power 3.1 for Macintosh; Heinrich Heine, Universitat Dusseldorf, Düsseldorf, Almanya*) programıyla, irrigasyon solüsyonunun tübül penetrasyonu açısından benzer bir çalışma olan Llena ve ark “Effect of three different irrigation solutions applied by passive ultrasonic irrigation” isimli çalışması kullanılarak örnek genişliği hesaplandı (Llena vd., 2015). %95 güven ($1-\alpha$), %95 test gücü ($1-\beta$), $f=0,443$ etki büyüklüğü ile her bir grupta minimum 12 olmak üzere toplamda 144 örnek ile çalışmanın yürütülmesi gerektiği hesaplandı.

3.4.2 Yöntem

Bu çalışmada tek kanallı ve düz olgun köklere sahip kırk sekiz yeni çekilmiş insan üst çene daimî santral dişi kullanıldı (Schneider, 1971). Önceden kron restorasyonları, çürük, rezorpsiyon veya kanal tedavisi yapılmış dişler hariç tutuldu. Tüm dişler, koronal engellemeleri ortadan kaldırmak ve düz bir referans elde etmek amacıyla elmas disk (Isomet, Buehler, Lake Bluff, IL) kullanılarak 12 mm bırakılacak şekilde krondan ayrıldı (Karlović vd., 2021). Bir ISO 15 K-tipi eğe, apikal foramende görüne kadar yerleştirilip apical patency teyit edildi. Çalışma uzunluğu, bu uzunluktan 1 mm çıkarılarak belirlendi (Trierweiler Paiva vd., 2018).

Kanalın boyutunu ve taper açılarını standardize etmek için, kanallar crown-down yöntemi ile #40 %4 açılı döner eğeye kadar genişletildi (Peters, 2004). Her alet kullanıldıktan sonra 2 mL %5 NaOCl kullanıldı (Zehnder, 2006). Apikal açıklık, 15 K-tipi eğe kullanılarak korundu (Wu vd., 2000). Son olarak smear tabakasını kaldırmak için 1 dakika boyunca 2 mL %17 (EDTA) solüsyonu kullanıldı ve kanallar serum fizyolojik ile durulandı (Çalt & Serper, 2002). Ardından kanallar kâğıt konlar ile kurulandı (Zand vd., 2019).

Değerlendirme için her irrigasyon solüsyonu, Rodamin B (Kimyalab, İstanbul, Türkiye) ile işaretlendi (Coronas vd., 2020). Bu amaçla her 100 mL irrigasyon solüsyonuna 100 mg Rodamin B eklendi ve böylece %0,1 (w/v) konsantrasyonda boya içeren çözeltiler hazırlandı (Akçay vd., 2017; Giardino vd., 2021). Rodamin B önce az miktarda (1–2 mL) steril distile su içerisinde çözündürüldü, ardından ilgili irrigasyon solüsyonuna homojen bir şekilde karıştırıldı. Karışım işlemi, manyetik karıştırıcı ile gerçekleştirildi (Kachari vd., 2024). Özellikle NaOCl başta olmak üzere, irrigasyon solüsyonlarının rodamin B ile etkileşime girip, boyanın floresans özelliğini etkileme riski bulunmaktadır (Pasha & Narayana, 2007). Bu riski en aza indirmek için solüsyonlar deneyin ve incelemenin yapılacağı günlerde, az miktarlarda, taze olarak hazırlandı.

Endodontik prosedürleri tamamlanan örneklerde, kanallar bu Rodamin B ile işaretli irrigasyon solüsyonlarıyla yandan perfore endodontik irrigasyon uçlarıyla toplam 10 mL irrigate edildi. Her kanal irrigate edildikten sonra boyanın dentin tübüllerine penetre olmasına olanak sağlamak amacıyla hemen kurutma yapılmadı ve örnekler oda sıcaklığında kısa süre bekletildi. Ardından her diştten, kök uzunluğu boyunca belirlenen seviyelerde (apikal, orta ve koronal üçlünden) 1 mm kalınlığında horizontal kesitler alındı (Kachari vd., 2024).



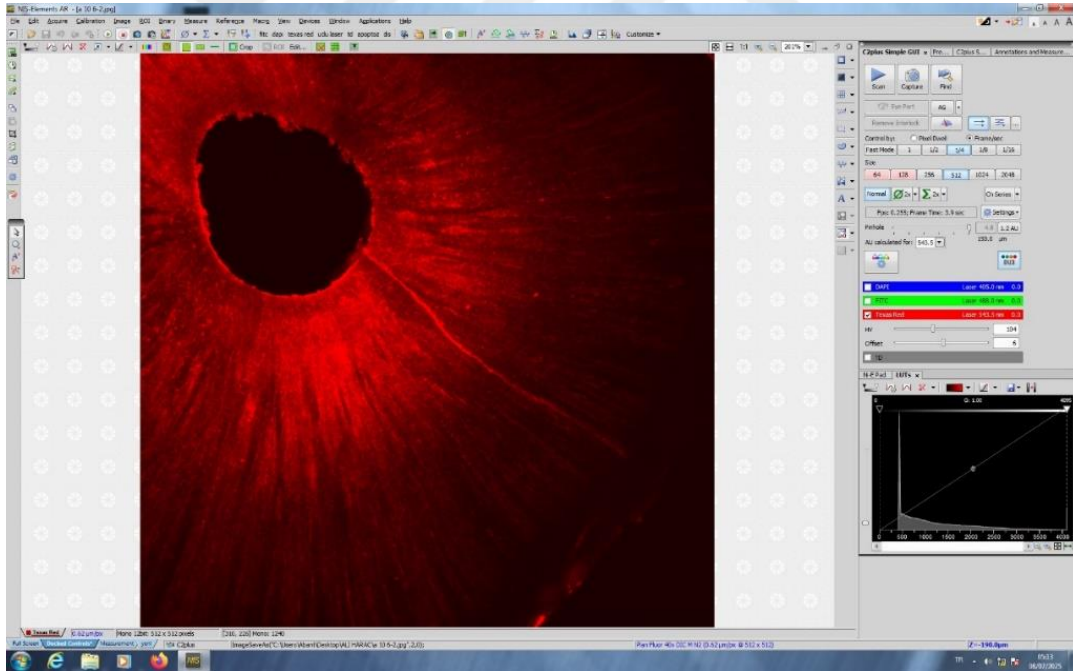
Fotoğraf 3.6. ISOMET testere bıçağı ile horizontal dentin kesitlerinin alınması



Fotoğraf 3.7. CLSM İncelemesine Hazır Horizontal Kök Kesitleri

Kesitler, doğrudan, konfokal lazer taramalı mikroskop (*Nikon C2, Nikon Corporation, Tokyo, Japonya*) cihazında değerlendirildi (Fotoğraf 3.8). Rodamin B, yaklaşık 540-560 nm dalga boylarında uyarılır ve kırmızı renge denk gelen 600-610 nm aralığında emisyon yapmaktadır (Włodarski & Chychłowski, 2021). Bu nedenle görüntüleme sırasında uygun lazer hattı ve filtreler kullanıldı. Görüntüler 4x büyütme ile alındı.

Bu yöntem sayesinde irrigasyon solüsyonlarının dentin içine difüzyon özellikleri doğrudan karşılaştırmalı olarak değerlendirilebildi. Konfokal mikroskopi, klasik boyama ve ışık mikroskobu yöntemlerine kıyasla daha az artefakta neden olması, kesit hazırlığı sırasında minimal işlem gerektirmesi ve sayısal veri üretmeye uygunluğu nedeniyle tercih edildi (Ozasir vd., 2021).



Şekil 3.3. Lazer Tarama İşleminin Yapılıp, Ham Görüntülerin Alınması



Fotoğraf 3.8. Üniversitemizin YENİGIDAM Bünyesindeki Konfokal Lazer Taramalı Mikroskop

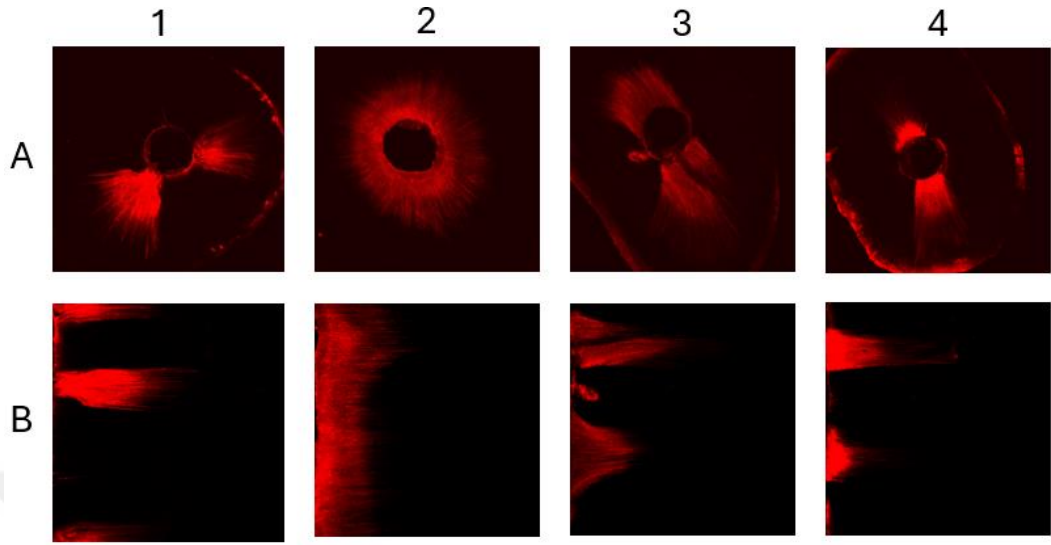
3.4.3 Yayılım Alanı Ölçümü

Rodamin B ile işaretlenmiş irrigasyon solüsyonlarının dentin tübüllerinde lateral yayılımı, konfokal lazer taramalı mikroskop (*CLSM, Nikon C2, Tokyo, Japonya*) ile elde edilen görüntüler üzerinden değerlendirildi. Horizontal kesitlerde 360° çevre boyunca boyalı bölgeler polar koordinatlara dönüştürüldü, bu dönüşüm için ImageJ (*NIH, Bethesda, MD, USA*) yazılımı ve tarafımızca yazılan özel java makroları kullanıldı (yazdığımız makro kodları EKLER bölümünde paylaşılmıştır). Polar transformer eklentisi sayesinde dairesel kanal lümeni, doğrusal eksene dönüştürülerek homojen ölçüm yapılabildi. Ölçümler sırasında ölçek kalibrasyonu, 180 piksel/mm olarak belirlendi. Böylece piksel/mm dönüşümü standardize edildi, elde edilen veriler mm^2 cinsinden penetrasyon alanı hesaplamasına dönüştürüldü.

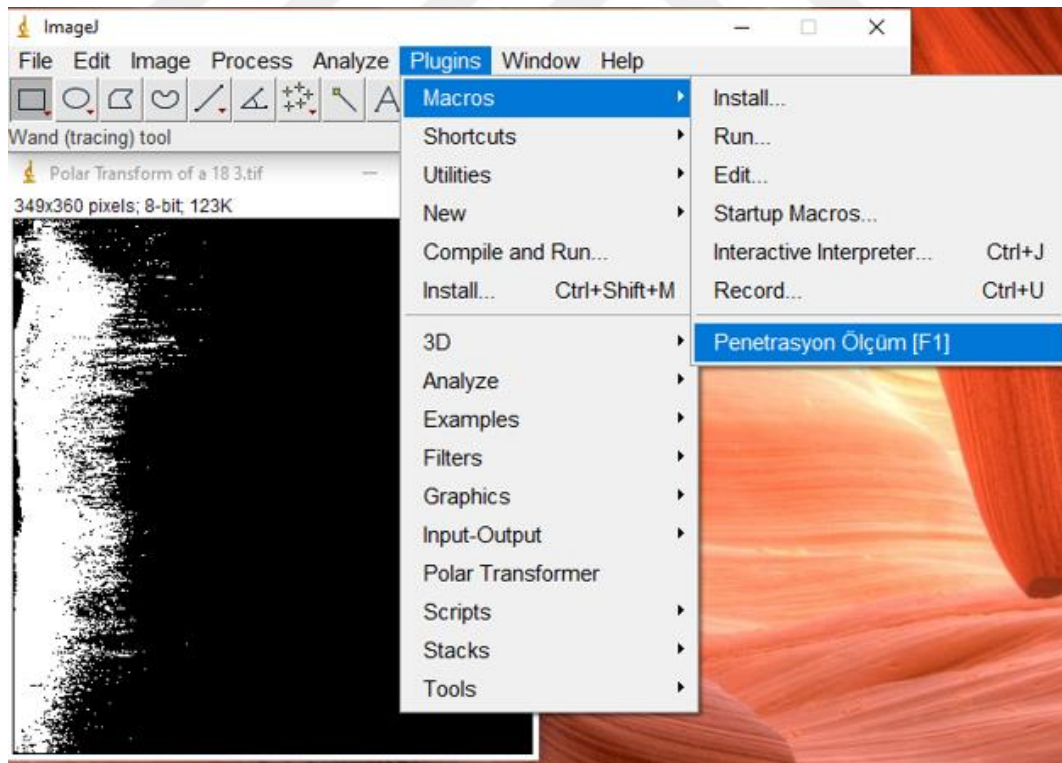
3.4.4 Ortalama Penetrasyon Mesafesi

Her kesitte kanal lümeni merkezinden dentin tübüllerine yayılan boyalı alanın sınırları, ImageJ yazılımındaki makrolar aracılığıyla otomatik olarak belirlendi. Polar transform sonrası her 1° 'lik açı için ölçülen penetrasyon uzunlukları kaydedildi ve 360 ölçüm değerinin ortalaması alınarak ortalama penetrasyon mesafesi (mm) hesaplandı. Bu yöntem, bireysel dentin farklılıklarının

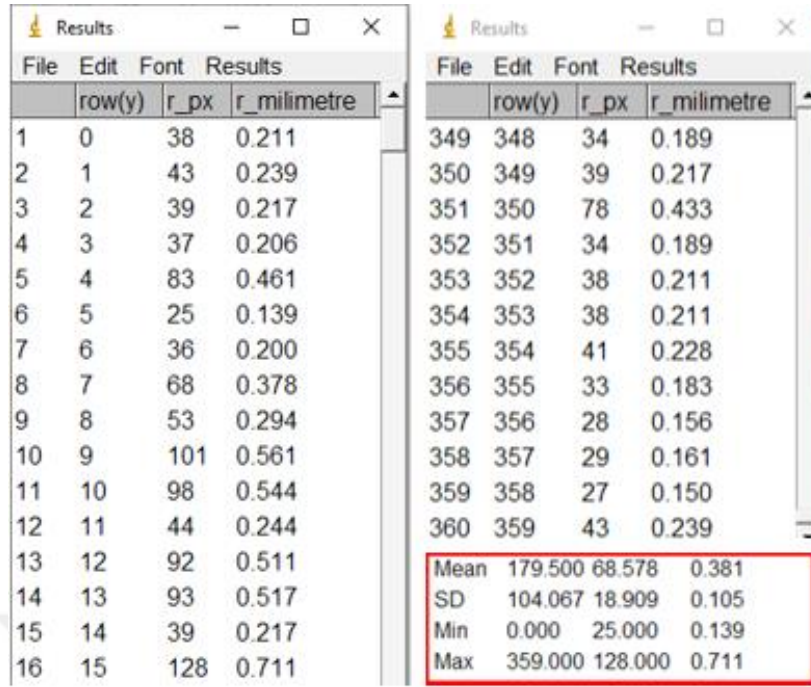
etkisini azaltarak irrigasyon solüsyonlarının genel yayılım kapasitesini objektif biçimde karşılaştırmaya olanak sağlamıştır.



Şekil 3.4. Polar Transformer eklentisi ile görüntülerin grafiksel şablonlara dönüşümü. A satırındaki görüntüler CLSM'den çıkan ham görüntüleri gösterirken, B satırındaki aynı numaralı sütunlarda yer alan görüntüler, polar transform edilmiş hali göstermektedir.



Şekil 3.5. Yazılan makronun ImageJ üzerinden polar transforme edilmiş görüntüye uygulanması



	row(y)	r_px	r_milimetre
1	0	38	0.211
2	1	43	0.239
3	2	39	0.217
4	3	37	0.206
5	4	83	0.461
6	5	25	0.139
7	6	36	0.200
8	7	68	0.378
9	8	53	0.294
10	9	101	0.561
11	10	98	0.544
12	11	44	0.244
13	12	92	0.511
14	13	93	0.517
15	14	39	0.217
16	15	128	0.711

	row(y)	r_px	r_milimetre
349	348	34	0.189
350	349	39	0.217
351	350	78	0.433
352	351	34	0.189
353	352	38	0.211
354	353	38	0.211
355	354	41	0.228
356	355	33	0.183
357	356	28	0.156
358	357	29	0.161
359	358	27	0.150
360	359	43	0.239

Mean	179.500	68.578	0.381
SD	104.067	18.909	0.105
Min	0.000	25.000	0.139
Max	359.000	128.000	0.711

Şekil 3.6. Sonuç penceresi. Row(y): Ölçüm yapılan aç, r_px: Ölçüm yapılan açıda sinyalin alınabildiği son mesafenin piksel ölçümü, r_milimetre: Ölçüm yapılan açıda sinyalin en son alınabildiği uzaklığı (mm) göstermektedir.

3.4.5 Maksimum Penetrasyon Mesafesi

Aynı polar dönüşüm verilerinden, her kesitte kaydedilen en yüksek değer seçilerek maksimum penetrasyon mesafesi (mm) belirlendi. Maksimum değerler, bireysel dentin yapısındaki varyasyonları da yansıtmaması açısından ayrıca kaydedildi ve istatistiksel analizlere dahil edildi. Bu yaklaşım sayesinde irrigantların yalnızca ortalama yayılımı değil, aynı zamanda en uç penetrasyon kapasiteleri de değerlendirildi.

3.5 İstatistiksel Analiz

3.5.1 Ozonlanma İşleminin Fiziksel Özelliklere Olan Etkisi

Deneyel verilerin dağılım özellikleri, Shapiro-Wilk testi ile değerlendirildi (Shapiro & Wilk, 1965). Verilerin normal dağılım gösterdiği durumlarda bağımsız iki örneklem t-testi (Independent Samples t-test), normal dağılım varsayımının sağlanmadığı durumlarda ise Mann-Whitney U testi uygulandı (Mann & Whitney, 1947). Tüm analizler %95 güven düzeyinde ($\alpha = 0.05$) yürütüldü ve SPSS v25 (IBM Corp., Armonk, NY, USA) ile Microsoft Excel 2016 (Microsoft Corp.,

Redmond, WA, USA) yazılımları kullanıldı. Çoklu karşılaştırmalarda tip I hata riskini azaltmak amacıyla Holm–Bonferroni düzeltmesi uygulanmış ve istatistiksel anlamlılık düzeyi bu yöntemle yeniden değerlendirilmiştir.

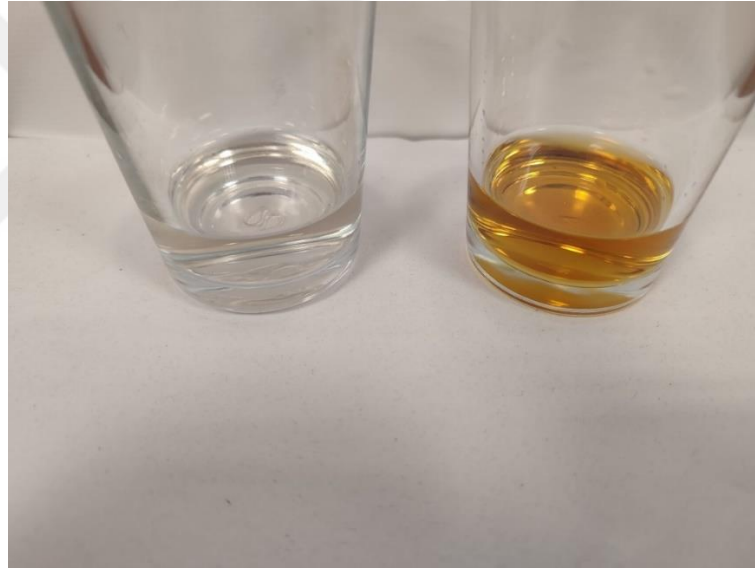
3.5.2 Ozonlama İşleminin Etkisinin NaOCl Konsantrasyonuyla Olan İlişkisi

NaOCl gruplarında ozonlama öncesi ve sonrası viskozite değişimlerinin (Δ = ozonlu ozonsuz) konsantrasyona bağlı olarak farklılık gösterip göstermediğini değerlendirmek üzere ayrıca grup karşılaştırmaları yapılması planlandı. Bu amaçla, Δ viskozite değerlerinin dağılımı normalite ve varyans homojenliği açısından test edildi; gruplar arası farkların incelenmesinde parametrik (tek yönlü ANOVA) ve nonparametrik (Kruskal–Wallis) yöntemler kullanıldı. Ayrıca konsantrasyon ile Δ viskozite arasındaki ilişkiyi değerlendirmek üzere çoklu regresyon analizi uygulandı.

4. BULGULAR

4.1 Ozonlamanın pH Üzerine Etkisi

Ozonlama işlemi sonrasında tüm irrigasyon solüsyonlarında pH değerlerinde azalma gözlemlendi. Bu azalma, bazı solüsyonlarda oldukça minimal düzeyde kalırken, özellikle bazı çözeltilerde dikkat çekici oranda gerçekleşti. En düşük yüzdesel değişim %5 NaOCl grubunda olup yalnızca %0.26'lık bir azalma saptandı. Benzer şekilde %1 ve %2.5 NaOCl gruplarında da sırasıyla %2.79 ve %4.37 oranlarında pH düşüşü izlendi. En yüksek değişim ise %29.83'lük azalma ile CHX'de gözlemlendi. EDTA'da ozonlama işlemi sonrası belirgin sarı renk değişimi gözlemlendi (Fotoğraf 4.1).



Fotoğraf 4.1. EDTA'da Ozonlama Sonrası Gözlemlenen Sarı Renk Değişimi

Tablo 4.1. Solüsyonların ozonlama öncesi ve sonrası pH değerleri

Solüsyon	Ozonsuz pH	Ozonlu pH	Değişim
NaOCl 5%	11.41	11.38	-0.26%
NaOCl 2.5%	10.76	10.29	-4.37%
NaOCl 1%	11.1	10.79	-2.79%
EDTA	12.53	12.47	-0.48%
CHX	9.05	6.35	-29.83%
Salin	8.08	7.04	-12.87%

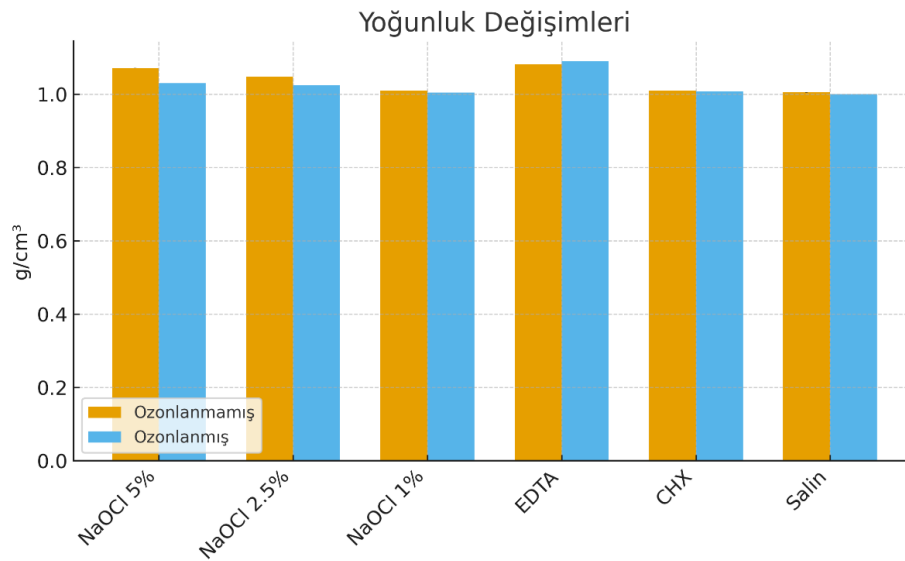
4.2 Ozonlamanın Yoğunluk ve Viskozite Üzerine Etkisi

EDTA hariç, tüm irrigasyon solüsyonları için yapılan ölçümlerde, ozonlama işlemi sonrasında yoğunluk değerlerinde hafif bir azalma eğilimi gözlemlendi. Ozonlama sonrası yoğunluk değişimleri %0.2 ile %3.8 arasında değişti; bu değişim en belirgin şekilde %5 NaOCl grubunda (%3.8 azalma) izlendi. EDTA grubunda ise diğerlerinin aksine %0.8 oranında artış kaydedildi. Ancak bu farklılıklar mutlak değer olarak oldukça küçük olup, ölçüm cihazının hassasiyet sınırlarında kalmaktadır.

Tablo 4.2. Solüsyonların ozonlama öncesi ve sonrası yoğunlukları (g/cm³)

Solüsyon	Ozonsuz		Ozonlu		p değeri
	Ort ± SD	(Min – Max)	Ort ± SD	(Min – Max)	
NaOCl 5%	1.0712 ± 0.0001 ^A	(1.0711 – 1.0713)	1.0302 ± 0.0001 ^B	(1.0302 – 1.0303)	0.0498*
NaOCl 2.5%	1.0481 ± 0.0001 ^A	(1.0480 – 1.0482)	1.0243 ± 0.0000 ^B	(1.0243 – 1.0244)	0.0498*
NaOCl 1%	1.0100 ± 0.0001 ^A	(1.0100 – 1.0101)	1.0047 ± 0.0001 ^B	(1.0046 – 1.0047)	0.0498*
EDTA	1.0812 ± 0.0001 ^A	(1.0811 – 1.0813)	1.0896 ± 0.0001 ^B	(1.0896 – 1.0897)	0.0498*
CHX	1.0101 ± 0.0001 ^A	(1.0100 – 1.0102)	1.0072 ± 0.0001 ^B	(1.0072 – 1.0073)	0.0498*
Salin	1.0050 ± 0.0001 ^A	(1.0050 – 1.0051)	1.0002 ± 0.0000 ^B	(1.0002 – 1.0003)	0.0498*

Aynı satır içindeki farklı üst karakterler, istatistiksel anlamlı farkı ($p < 0,05$) belirtmektedir (Ort: Ortalama, SD: Standart Sapma, Min: Minimum, Max: Maksimum). Verilen p değerlerine Holm-Bonferroni düzeltmesi uygulanmıştır. Holm-Bonferroni step-down düzeltmesinin bir sonucu olarak tüm karşılaştırmalar aynı düzeltilmiş p-değerine ulaşmıştır.



Şekil 4.1. Solüsyonların ozonlama öncesi ve sonrası yoğunlukları

Tüm gruplarda ozonlama işleminin geçiş süresi ve dolayısıyla viskozite üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla, verilerin dağılım özellikleri Shapiro–Wilk testi ile incelendi. Normal dağılım varsayımının sağlandığı gruplarda bağımsız iki örneklem t-testi uygulandı, normal dağılım göstermeyen gruplarda ise non-parametrik Mann–Whitney U testi kullanıldı. Böylece her grup için uygun istatistiksel yöntem seçildi ve ozonlamanın viskoziteye etkisi istatistiksel olarak değerlendirildi.

Tablo 4.3. Solüsyonların Ostwald Viskozimetresini Geçiş Süreleri

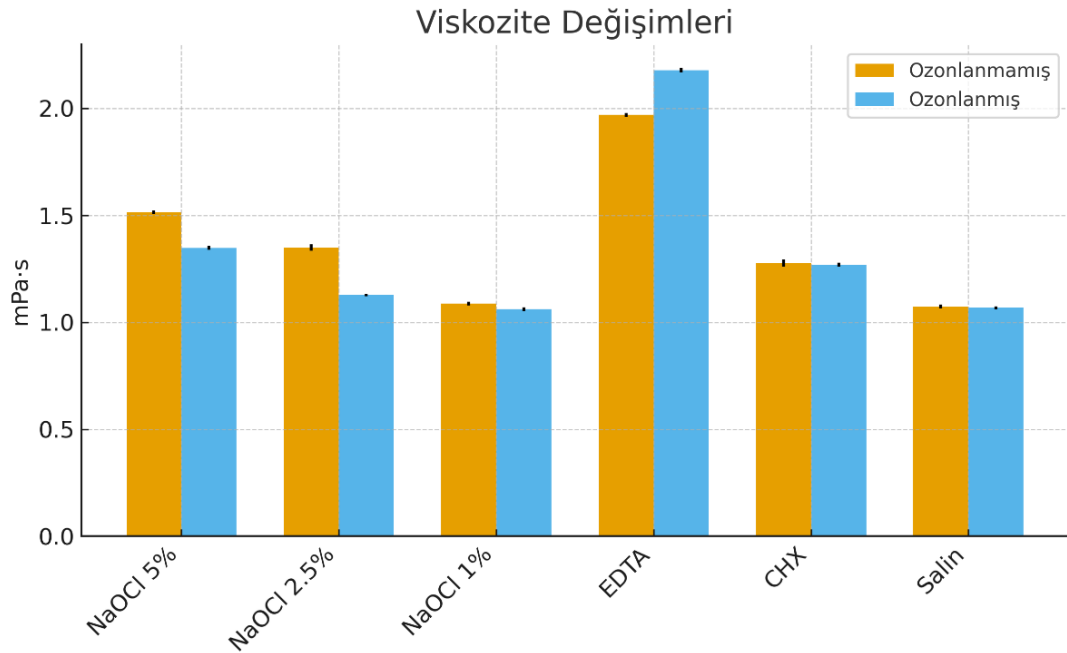
Solüsyon	Geçiş Süreleri (11 tekrar) (Saniye)
NaOCl %5	140-141-140-141-141-140-140-142-140-142-141
OZON-NaOCl %5	129-129-131-130-129-132-130-130-130-131-131
NaOCl %2.5	128-128-130-130-127-127-126-127-127-128-130
OZON-NaOCl %2.5	110-110-109-110-110-109-109-110-109-109-110
NaOCl %1	108-106-108-106-107-107-107-107-108-106-108
OZON-NaOCl %1	106-105-105-105-106-106-106-104-104-105-104
EDTA	180-180-181-181-182-182-181-181-181-183-181
OZON-EDTA	198-198-198-200-200-198-198-200-198-199-200
CHX	124-127-127-124-126-124-124-127-128-124-128
OZON-CHX	125-125-125-126-124-124-125-127-127-125-125
SALİN	106-107-107-105-107-107-107-105-105-107-105
OZON-SALİN	107-106-106-106-105-106-107-105-106-107-107

Bu geçiş süreleri ve daha önceki aşamada ölçülmüş olan yoğunluk değerleri cam kinematik viskozimetreler için kullanılan basit oran orantı formülünde yerlerine konularak, solüsyonların viskozite değerleri hesaplandı. Referans sıvısı olarak distile su kullanıldı ($23\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de saf su için yaklaşık $1.002\text{ mPa}\cdot\text{s}$).

Tablo 4.4. Solüsyonların ozonlama öncesi ve sonrası viskozite değerleri (mPa·s)

Solüsyon	Ozonsuz		Ozonlu		p değeri
	Ort ± SD	Min - Max	Ort ± SD	Min - Max	
NaOCl 5%	1.5150 ± 0.0085 ^A	1.5072 - 1.5287	1.3479 ± 0.0102 ^B	1.3356 - 1.3667	< 0.001*
NaOCl 2.5%	1.3483 ± 0.0149 ^A	1.3272 - 1.3694	1.1277 ± 0.0054 ^B	1.1221 - 1.1324	< 0.001*
NaOCl 1%	1.0872 ± 0.0084 ^A	1.0761 - 1.0964	1.0611 ± 0.0084 ^B	1.0501 - 1.0703	< 0.001*
EDTA	1.9686 ± 0.0095 ^A	1.9558 - 1.9884	2.1772 ± 0.0108 ^B	2.1682 - 2.1902	< 0.001*
CHX	1.2763 ± 0.0176 ^A	1.2588 - 1.2994	1.2681 ± 0.0102 ^A	1.2552 - 1.2856	0.3850
Salin	1.0725 ± 0.0099 ^A	1.0606 - 1.0808	1.0674 ± 0.0076 ^A	1.0555 - 1.0756	0.3850

Aynı satır içindeki farklı üst karakterler, istatistiksel anlamlı farkı ($p < 0,05$) belirtmektedir (Ort: Ortalama, SD: Standart Sapma, Min: Minimum, Max: Maksimum). Verilen p değerlerine Holm-Bonfferoni düzeltmesi uygulanmıştır.



Şekil 4.2. Solüsyonların ozonlama öncesi ve sonrası viskozite değerleri (mPa·s)

%5, %2.5 ve %1 NaOCl solüsyonlarında ozonlama sonrası viskozitede istatistiksel anlamlı bir azalma görüldü ($p < 0.001$). Bu durum, ozon gazının hipoklorit çözeltilerinin fiziksel yapısını değiştirerek daha akışkan hale getirdiğini göstermektedir. EDTA grubunda ise ozonlama viskoziteyi istatistiksel anlamlı biçimde artırdı. ($p < 0.001$). CHX grubunda ozonlama öncesi ve sonrası viskozite değerleri çok yakın olup, fark istatistiksel olarak anlamlı bulunmadı ($p = 0.46$).

4.2.1 Ozonlama, Konsantrasyon ve Viskozite İlişkisi

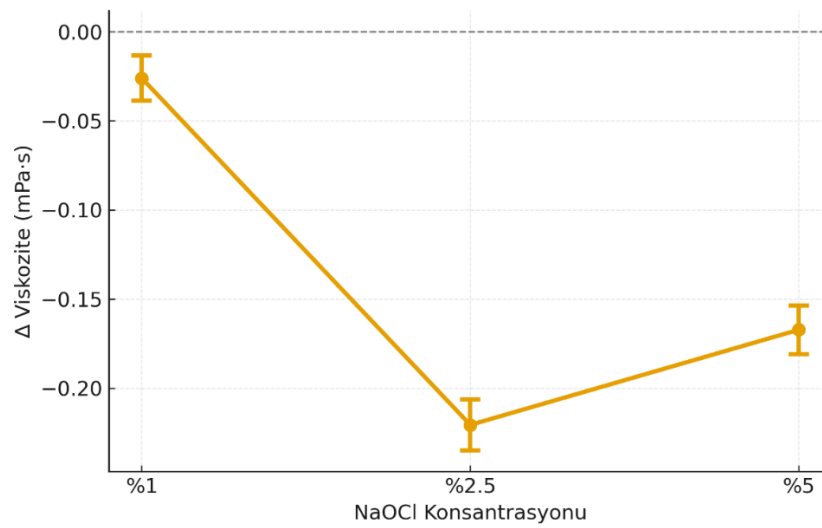
Ozonlama, NaOCl solüsyonlarının viskozitesini istatistiksel anlamlı şekilde azaltmıştır ve bu etki konsantrasyon bağımlıdır. %1 NaOCl’de viskozite değişimi minimal düzeyde kalırken, %2.5 ve %5 gruplarında belirgin düşüşler gözlemlendi. En büyük azalma %2.5 NaOCl grubunda ortaya çıktı. Bu durum, ozonun çözünürlüğü ve hipoklorit konsantrasyonu ile etkileşimi arasındaki doğrusal ilişkiyi desteklemektedir.

Tablo 4.5. Ozonlamanın NaOCl gruplarında viskozite değişimine (Δ = ozonlu – ozonsuz) etkisi

Grup	ort Δ (mPa.s)	sd	min	max
NaOCl %5	-0.1672	0.0136	-0.1827	-0.1405
NaOCl %2.5	-0.2206	0.0144	-0.2473	-0.2051
NaOCl %1	-0.0260	0.0128	-0.0463	-0.0159

Regresyon Analizi Detayları:

Shapiro–Wilk testi, %1 NaOCl grubunda normal dağılım olmadığını gösterdi ($p = 0.0027$). Varyans homojenliği sağlandı (Levene $p = 0.99$). Hem ANOVA ($p < 0.0001$) hem de Kruskal–Wallis ($p < 0.000001$) analizleri gruplar arasında istatistiksel anlamlı fark olduğunu gösterdi. Lineer regresyon analizi zayıf ve istatistiksel olarak anlamsız eğilim göstermiştir ($R^2 = 0.32$, $p > 0.05$). En belirgin viskozite azalması %2.5 NaOCl grubunda gözlemlenmiştir.



Şekil 4.3. NaOCl Konsantrasyonu ve Δ Viskozite (Ortalama $\pm$ SD)

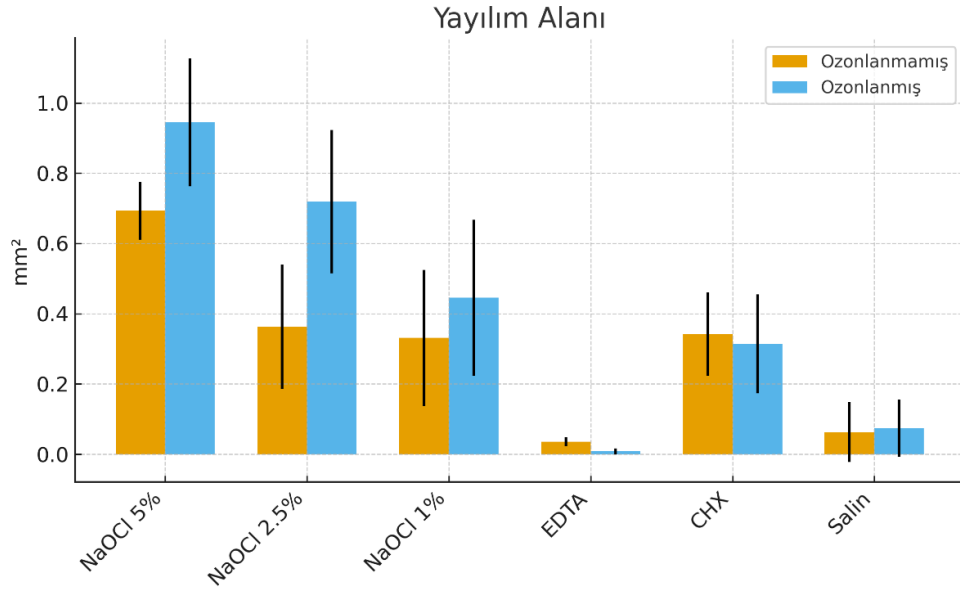
4.3 Ozonlamanın Dentin Tübül Penetrasyonu Üzerine Etkisi

4.3.1 Penetrasyon Alanı

Tablo 4.6. Solüsyonlarının ozonlama öncesi ve sonrası horizontal dentin kesitinde yayılma alanları (mm²)

Solüsyon	Ozonsuz		Ozonlu		p değeri
	Ort ± SD	(Min – Max)	Ort ± SD	(Min – Max)	
NaOCl 5%	0.693 ± 0.082 ^A	(0.606 - 0.883)	0.945 ± 0.182 ^B	(0.754 - 1.379)	0.0075*
NaOCl 2.5%	0.363 ± 0.177 ^A	(0.193 - 0.728)	0.719 ± 0.204 ^B	(0.448 - 1.048)	0.0066*
NaOCl 1%	0.331 ± 0.194 ^A	(0.137 - 0.763)	0.445 ± 0.222 ^A	(0.165 - 0.782)	0.7848
EDTA	0.035 ± 0.013 ^A	(0.014 - 0.052)	0.008 ± 0.009 ^B	(0.001 - 0.028)	0.0075*
CHX	0.342 ± 0.119 ^A	(0.148 - 0.548)	0.314 ± 0.141 ^A	(0.065 - 0.548)	1.0000
Salin	0.063 ± 0.085 ^A	(0.003 - 0.269)	0.074 ± 0.081 ^A	(0.005 - 0.262)	1.0000

Aynı satır içindeki farklı üst karakterler, istatistiksel anlamlı farkı ($p < 0,05$) belirtmektedir (Ort: Ortalama, SD: Standart Sapma, Min: Minimum, Max: Maksimum). Verilen p değerlerine Holm-Bonferroni düzeltmesi uygulanmıştır.



Şekil 4.4. Yayılım Alanlarının Bar Grafiği

Ozonlama sonrası özellikle NaOCl gruplarında penetrasyon alanında istatistiksel anlamlı artışlar gözlemlendi. %5 NaOCl için alan yaklaşık %36 oranında

artarken, %2.5 NaOCl'de bu artış neredeyse iki katına ulaştı. Buna karşın EDTA grubunda ozonlama, penetrasyon alanını belirgin şekilde azalttı ($p=0.002$). CHX ve salin gruplarında ise istatistiksel anlamlı değişiklik görülmedi. Bu sonuçlar, ozonlamanın özellikle hipoklorit bazlı irrigantlarda difüzyon kapasitesini artırdığını, ancak şelasyon ajanı olan EDTA'da ters etki yaratabileceğini göstermektedir.

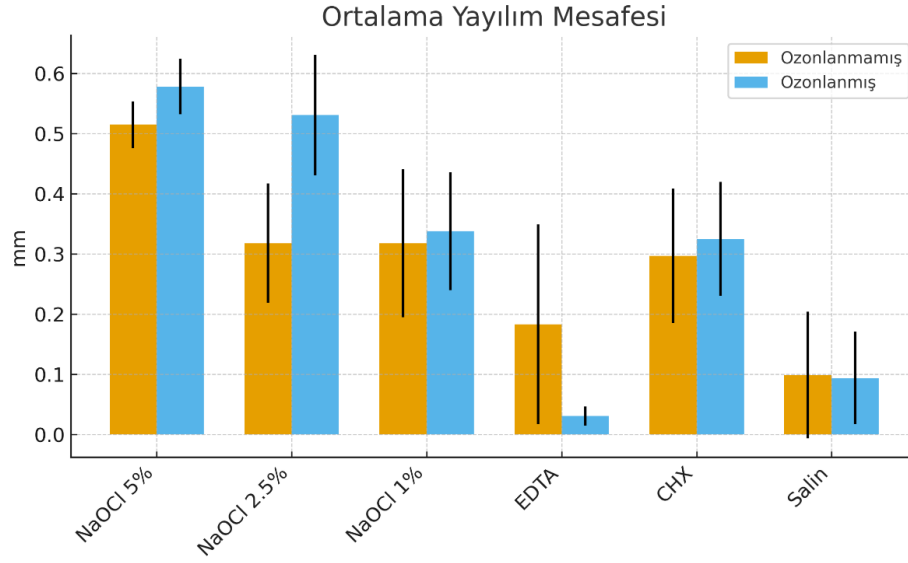
4.3.2 Ortalama Penetrasyon Mesafesi

Tablo 4.7. Solüsyonlarının ozonlama öncesi ve sonrası kanal lümeni çevresinde 360 derece boyunca dentin tübülllerinde ortalama yayılım uzunlukları (mm)

Solüsyon	Ozonsuz		Ozonlu		p değeri
	Ort $\pm$ SD	(Min – Max)	Ort $\pm$ SD	(Min – Max)	
NaOCl 5%	0.515 $\pm$ 0.039 ^A	(0.460 - 0.560)	0.578 $\pm$ 0.046 ^B	(0.497 - 0.644)	0.0256*
NaOCl 2.5%	0.318 $\pm$ 0.099 ^A	(0.170 - 0.483)	0.531 $\pm$ 0.100 ^B	(0.408 - 0.670)	0.0018*
NaOCl 1%	0.318 $\pm$ 0.123 ^A	(0.176 - 0.567)	0.338 $\pm$ 0.098 ^A	(0.197 - 0.459)	1.0000
EDTA	0.183 $\pm$ 0.166 ^A	(0.065 - 0.588)	0.031 $\pm$ 0.016 ^B	(0.011 - 0.054)	0.0020*
CHX	0.297 $\pm$ 0.112 ^A	(0.092 - 0.441)	0.325 $\pm$ 0.095 ^A	(0.110 - 0.415)	1.0000
Salin	0.099 $\pm$ 0.105 ^A	(0.012 - 0.338)	0.094 $\pm$ 0.077 ^A	(0.018 - 0.278)	1.0000

Aynı satır içindeki farklı üst karakterler, istatistiksel anlamlı farkı ($p<0,05$) belirtmektedir (Ort: Ortalama, SD: Standart Sapma, Min: Minimum, Max: Maksimum). Verilen p değerlerine Holm-Bonfferoni düzeltmesi uygulanmıştır.

Ozonlamanın en dikkat çekici etkisi ortalama penetrasyon mesafesinde görüldü. %5 ve %2.5 NaOCl gruplarında ozonlama sonrası penetrasyon derinliği istatistiksel olarak anlamlı şekilde arttı ($p=0.0066$ ve $p=0.0003$). %1 NaOCl ve CHX gruplarında değişim anlamlı bulunmazken, EDTA grubunda ozonlama sonrası ortalama penetrasyon mesafesi anlamlı düzeyde azaldı ($p=0.0248$). Salin grubunda da istatistiksel anlamlı bir farklılık saptanmadı. Bu bulgular, ozonun özellikle orta-yüksek konsantrasyonlarda hipokloritin dentin tübülllerine ilerleyişini kolaylaştırdığını göstermektedir.



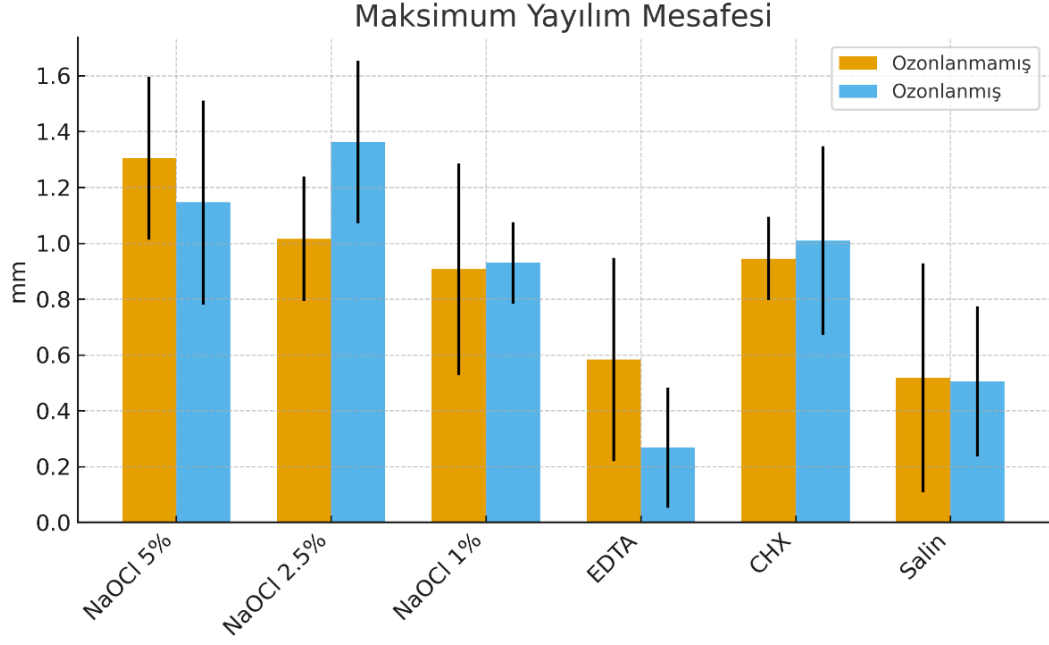
Şekil 4.5. Kanal lümeni çevresinde, 360 derece boyunca, dentin tübülllerinde ortalama yayılım uzunlukları bar grafikleri

4.3.3 Maksimum Penetrasyon Mesafesi

Tablo 4.8. Solüsyonlarının ozonlama öncesi ve sonrası kanal lümeni çevresinde 360 derece boyunca dentin tübülllerinde maksimum yayılım uzunlukları (mm)

Solüsyon	Ozonsuz		Ozonlu		p değeri
	Ort ± SD	(Min – Max)	Ort ± SD	(Min – Max)	
NaOCl 5%	1.305 ± 0.292 ^A	(0.900 - 1.708)	1.146 ± 0.365 ^A	(0.570 - 1.601)	0.943
NaOCl 2.5%	1.015 ± 0.223 ^A	(0.733 - 1.389)	1.362 ± 0.291 ^A	(1.072 - 1.756)	0.135
NaOCl 1%	0.907 ± 0.379 ^A	(0.478 - 1.733)	0.929 ± 0.147 ^A	(0.678 - 1.200)	1.000
EDTA	0.583 ± 0.364 ^A	(0.256 - 1.506)	0.268 ± 0.215 ^A	(0.039 - 0.756)	0.060
CHX	0.945 ± 0.150 ^A	(0.711 - 1.122)	1.009 ± 0.339 ^A	(0.350 - 1.400)	1.000
Salin	0.518 ± 0.410 ^A	(0.067 - 1.267)	0.506 ± 0.269 ^A	(0.233 - 0.922)	1.000

Aynı satır içindeki farklı üst karakterler, istatistiksel anlamlı farkı ($p < 0,05$) belirtmektedir (Ort: Ortalama, SD: Standart Sapma, Min: Minimum, Max: Maksimum). Verilen p değerlerine Holm-Bonfferoni düzeltmesi uygulanmıştır.



Şekil 4.6. Ozonlama Öncesi ve Sonrası Kanal Lümeni Çevresinde 360 Derece Boyunca Dentin Tübüllerinde Maksimum Yayılım Uzunluklarının Bar Grafikleri

Maksimum penetrasyon mesafeleri değerlendirildiğinde, ozonlamanın hiçbir grupta istatistiksel olarak anlamlı bir etkisi saptanmadı (tüm gruplar $p>0.05$, Holm–Bonferroni düzeltmesi sonrası). NaOCl, EDTA, CHX ve salin gruplarında ozonlama öncesi ve sonrası değerler arasında yalnızca küçük dalgalanmalar gözlemlendi, ancak bu değişiklikler istatistiksel anlamlılığa ulaşmadı. Maksimum değerlerin yüksek varyasyon göstermesi, bireysel dentin yapısındaki heterojenliğin bu parametre üzerinde daha belirleyici olduğunu düşündürmektedir.

5. TARTIŞMA

5.1 Ozonlamanın İrrigasyon Solüsyonlarının Fiziksel Özelliklerine Etkisi

Ozonlamanın irrigasyon solüsyonlarının fiziksel özellikleri üzerinde dikkate değer etkiler yarattığı görüldü. pH ölçümleri değerlendirildiğinde, NaOCl ve EDTA gruplarında yalnızca küçük dalgalanmalar gözlemlendi, ancak CHX ve salin gibi solüsyonlarda istatistiksel anlamlı düşüşler meydana geldi. Özellikle CHX'in pH değerinin 9.05'ten 6.35'e gerilemesi, diğer solüsyonlardan çok farklı bir sonuç olup, ozonlama sonrası moleküler yapıda olası bozunmaları işaret etmektedir. Bu değişiklik, CHX'in antimikrobiyal etkinliğini ve dentin yüzeyine bağlanma kapasitesini etkileyebilir.

Yoğunluk ölçümleri de ozonlamanın belirgin etkilerini ortaya çıkardı. NaOCl gruplarında ozonlama sonrası yoğunlukta istatistiksel olarak anlamlı azalmalar kaydedilirken, EDTA'da ise yoğunluğun arttığı görüldü. Bu zıt yönlü sonuçlar, NaOCl'de ozon çözünürlüğünün sıvı fazda daha düşük yoğunluklu bir yapı oluşturmaya karşın, EDTA'da ozonun molekülle etkileşerek daha kompakt bir yapıya neden olabileceğini düşündürmektedir. Bu yoğunluk değişiklikleri, sıvıların dentin tübüllerine nüfuz etme potansiyelini doğrudan etkileyebilecek önemli parametrelerdir. Ayrıca NaOCl'in ozonlanmasıyla, ışık altında net gözlemlenebilen ufak gaz kabarcıkları oluşmaktadır. Solüsyonların tazeliğini korumak adına bu gaz kabarcıklarının azalmasını beklemeden hemen piknometre ile ölçüm yapılması gerektiği. Bu da özellikle NaOCl'in özellikle yüksek konsantrasyonlarında meydana gelen fiziksel olarak açıklaması zor olabilecek yoğunluk azalmasının sebebi olabilir. Nitekim NaOCl'nin ozonlanmış hali 1 saat beklenip piknometreye alındığında, yoğunluk değerleri, ozonlama işleminin hemen ardından yapılan ölçümlere göre az bir miktar fazla çıktı (yine ozonlanmamış NaOCl'den düşük değerler elde edildi).

Viskozite sonuçları da genel tabloyu desteklemektedir. NaOCl gruplarında ozonlama sonrası viskozite belirgin şekilde düşerken, EDTA'da viskozite artışı saptandı. Bu durum, NaOCl'nin ozonlamayla daha düşük dirençle dentin tübüllerine ilerlemesini kolaylaştırırken, EDTA'da ise artan viskozitenin

penetrasyonu sınırlayabileceğini açıklamaktadır. Nitekim, dentin tübül penetrasyonu sonuçları incelendiğinde, NaOCl gruplarında ozonlama sonrası ortalama ve alan parametrelerinde istatistiksel olarak anlamlı artışlar gözlenirken; EDTA grubunda ozonlamayla penetrasyon mesafesi ve alanında azalma kaydedildi. NaOCl'in ozondan etkilenmesinin konsantrasyonuna bağlı olduğu da gösterildi. Başka bir deyişle NaOCl solüsyonunda ozonlamadan ekilenen komponent, yüksek ihtimalle seyreltici distile su değil, NaOCl'nin kendisidir. Nitekim distile suya, kimyasal ve fiziksel olarak çok yakın bir solüsyon olan salinin de ozonlamadan minimal etkilenmesi bu bulguyu destekler niteliktedir.

Sonuç olarak, ozonlamanın irrigasyon solüsyonlarının fiziksel özelliklerini değiştirerek dentin tübül penetrasyonunu doğrudan etkilediği görülmektedir. NaOCl'de düşük viskozite ve yoğunluk, artmış penetrasyon kapasitesine katkı sağlarken; EDTA'da bunun tam tersi bir tablo ortaya çıktı. Bu bulgular, ozonlamanın klinik başarıya katkısının solüsyon tipine özgü olduğunu ve her irrigant için aynı derecede fayda sağlamadığını göstermektedir.

5.2 Ozonlama, Konsantrasyon ve Viskozite İlişkisine Dair Regresyon Analizi

Bu çalışmada ayrıca ozonlamanın NaOCl konsantrasyonlarıyla etkileşimini değerlendirmek amacıyla lineer regresyon analizi yapıldı. Analiz sonuçları, konsantrasyon arttıkça ozonlamaya bağlı viskozite düşüşünün daha belirgin hale geldiğini gösterdi. Regresyon modeli istatistiksel olarak anlamlı bulundu ($p < 0.001$) ve orta düzeyde bir açıklayıcılık sağladı ($R^2 \approx 0.32$). Özellikle %2.5 NaOCl grubunda gözlenen viskozite azalması, diğer konsantrasyonlara kıyasla daha yüksek düzeyde olup, ozonlama etkisinin konsantrasyon bağımlı olduğunu ortaya koydu.

Bu sonuç, ozon çözüldürmenin NaOCl'nin fizikokimyasal yapısında lineer bir değişim yarattığını ve bu değişimin konsantrasyonla ilişkilendirilebileceğini gösterdi. Düşük konsantrasyonlu NaOCl çözeltilerinde etki sınırlı kalırken, orta ve yüksek konsantrasyonlarda ozonlamanın daha güçlü bir viskozite düşüşü yarattığı görüldü. Bu bulgu, ozonlamanın dentin tübüllerine penetrasyon kapasitesini

artırmasının altında yatan mekanizmayı açıklamada önemli bir parametre olarak değerlendirilebilir.

Dolayısıyla regresyon analizinden elde edilen veriler, ozonlama etkisinin tek başına değil, irrigantın konsantrasyonu ile birlikte değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Bu durum klinik uygulamalarda, ozonlanmış irrigantların seçimi ve kullanımında konsantrasyonun dikkate alınmasının gerekliliğini vurgulamaktadır.

5.3 Ozonlanmış NaOCl'nin Dentin Tübül Penetrasyonu Üzerindeki Etkisi

Ozonlama, irrigasyon solüsyonlarının dentin tübüllerine ilerleyiş kapasitesinde özellikle ortalama penetrasyon mesafesi ve yayılım alanı parametrelerinde belirgin artış sağladı. NaOCl'nin %5 ve %2.5 konsantrasyonlarında ozonlama sonrası ortalama penetrasyon mesafesi istatistiksel anlamlı derecede artarken, horizontal kesitlerde ölçülen yayılım alanları da istatistiksel olarak daha geniş bulundu. Bu bulgu, ozonlamanın solüsyonun dentin içine homojen dağılımını kolaylaştırdığını ve antimikrobiyal etkinliğin tübüllerin derin bölgelerine taşınmasında avantaj sağlayabileceğini gösterdi.

Maksimum penetrasyon mesafesi verilerinde ozonlamanın hiçbir grupta istatistiksel olarak anlamlı bir etkisi saptanmadı (tüm gruplar $p>0.05$, Holm–Bonferroni düzeltmesi sonrası). Bazı gruplarda artış veya azalma eğilimleri gözlemlense de bu değişiklikler istatistiksel olarak anlamlı bulunmadı. Maksimum değerlerin bireysel dentin yapısına bağlı yüksek varyasyon göstermesi, bu parametrede tutarlı sonuç elde edilmesini güçleştirmiştir. Bu nedenle ozonlamanın etkisi esasen ortalama penetrasyon mesafesi ve penetrasyon alanındaki artışlar üzerinden değerlendirilmelidir. Ayrıca, 360° ölçüm yönteminin sağladığı çoklu veri setleri, maksimum değerlere kıyasla istatistiksel farkların saptanmasında daha güçlü ve güvenilir bir yaklaşım sunmaktadır.

Literatür incelendiğinde, ozon gazı veya ozonlu suyun kök kanal dezenfeksiyonu üzerindeki antimikrobiyal etkileri üzerine çalışmalar bulunmakla birlikte, ozonlanmış irrigasyon solüsyonlarının dentin tübül penetrasyonu

üzerindeki etkilerini doğrudan inceleyen çalışma sayısı son derece sınırlıdır. Özellikle konfokal lazer taramalı mikroskop kullanılarak boyalı irrigantların penetrasyon derinliği ve alanının değerlendirilmesi, mevcut literatürde nadiren raporlanmıştır. Bu açıdan çalışma, yalnızca ozonlamanın fiziksel parametrelere etkisini değil, aynı zamanda bu değişimlerin dentin tübüllerindeki difüzyon kapasitesine nasıl yansıdığını ortaya koyması bakımından özgün bir katkı sunmaktadır.

5.4 Polar Transform Yöntemi ve 360 Dereceli Ölçümün Klasik Yöntemlere Göre Üstünlükleri

Bu çalışmada kullanılan polar transformer tabanlı görüntü analiz yönteminin, literatürde benzer irrigasyon araştırmalarında kullanılmadığı görüldü. Geleneksel değerlendirmelerde genellikle sınırlı sayıda açıdan (örneğin dört kadran üzerinden) ölçüm yapılmakta veya manuel çizimler üzerinden penetrasyon derinliği belirlenmektedir. Ancak bu yaklaşımlar, dentin tübül penetrasyonunun tüm çevresel dağılımını yansıtmakta yetersiz kalabilmektedir.

Polar transformer yöntemi, konfokal lazer taramalı mikroskop ile elde edilen dairesel kesit görüntülerini doğrusal eksene dönüştürerek, kanal lümeni çevresinde 360 ayrı açı için penetrasyon değerinin kaydedilmesine imkân sağladı. Böylece yalnızca belirli bölgelerin değil, tüm çevrenin homojen şekilde değerlendirilmesi mümkün oldu. Bu yaklaşımın iki temel avantajı vardır:

Objektif ve Tekrarlanabilir Ölçüm

360° boyunca elde edilen değerlerin ortalaması alınarak hesaplanan ortalama penetrasyon mesafesi, bireysel dentin farklılıklarının etkisini azaltır ve irrigantların genel yayılım kapasitesini daha güvenilir şekilde ortaya koyar. Bu durum, istatistiksel güç açısından da avantaj sağlamaktadır.

Maksimum ve Alan Analizi İmkânı

Polar dönüşüm sayesinde yalnızca ortalama değil, aynı zamanda maksimum penetrasyon mesafesi ve yayılım alanı parametreleri de hesaplanabildi. Böylece irrigantların hem en uç difüzyon kapasiteleri hem de dentin yüzeyinde

oluşturdukları toplam etki alanı nicel olarak değerlendirilebildi. Bu, Polar Transformer yönteminin esas uygulanma sebebidir.

Bu yöntem, dentin yapısının heterojenliği nedeniyle ortaya çıkabilecek ölçüm hatalarını en aza indirmiştir. Ayrıca irrigantların penetrasyon kapasitelerinin yalnızca “en iyi noktadan” değil, tüm kanal çevresi dikkate alınarak değerlendirilmesi, klinik gerçekliği daha iyi yansıtmaktadır. Çalışmamızın bu yönüyle literatüre yenilikçi bir katkı sunduğu ve irrigasyon solüsyonlarının değerlendirilmesinde daha kapsamlı bir standart oluşturabileceği düşünüldü.

5.5 EDTA ve CHX Gruplarında Ozonlama Sonrası Gözlenen Farklılıklar

Ozonlamaya maruz bırakılan EDTA solüsyonunda, deneysel gözlemler sırasında belirgin bir sarı renk değişimi saptandı (Fotoğraf 4.1). Bu renk değişimi, ozonun EDTA ile kimyasal etkileşerek molekülde yapısal dönüşümlere yol açtığını düşündürmektedir. Literatürde ozon gazı ile EDTA bileşiminin doğrudan renk değişimine neden olduğuna dair çalışmalar sınırlı olsa da, ozonun EDTA komplekslerini bozarak yapısal degradasyona neden olduğu çeşitli sistemlerde raporlanmıştır (Muñoz & Von Sonntag, 2000). Örneğin, ozonoliz veya ozonlu sonoliz (ultrason eşliğinde ozonlama) işlemlerinin EDTA’yı azotlu bileşiklere, nitrat türevlerine ve diğer düşük molekül ağırlıklı bileşiklere indirgediği gösterilmiştir (Wang vd., 2010). Ayrıca, EDTA’nın metal iyonlarıyla kompleks oluşturmuş hallerinde ozonla temasının güçlü oksidatif tepkimelere yol açarak dekompleksasyon sağladığı literatürde yer almaktadır (Finžgar & Leštan, 2006; Xu vd., 2020). Bu oksidatif bozunma süreçlerinin renk değişimiyle ilişkilendirilmesi mümkün olsa da bu konuda detaylı araştırmalar gerekmektedir.

Bu kimyasal dönüşüm, EDTA’nın fiziksel özelliklerinde de belirgin etkilere yol açtı. Artan yoğunluk ve viskozite değerleri, EDTA çözeltisinin daha yoğun ve hareketsiz bir yapı aldığını düşündürmektedir. Bu da dentin tübüllerine nüfuz etme kapasitesinde azalmaya yol açtı, penetrasyon alanı ve ortalama penetrasyon mesafesi parametrelerinde istatistiksel olarak anlamlı düşüşler gözlemlendi. Bu bulgular, ozonlamanın EDTA’nın şelasyon etkisini zayıflatabileceğini ve smear tabakasını çıkarma yeteneğini sınırlandırabileceğini düşündürmektedir.

EDTA'nın pH sonuçları da tartışma konusudur. Bu çalışmada kullanılan EDTA çözeltisinin pH değeri, beklenilenin aksine asidik değil oldukça bazik olarak ölçüldü ($\text{pH} \approx 12.5$). Ölçümler farklı günlerde, tekrarlı şekilde ve farklı şişelerden alınan örneklerle yapıldı; her defasında aynı sonuç elde edildi. Bu durum, kullanılan EDTA'nın serbest asit formu (H_4EDTA) yerine diş hekimliğinde yaygın olarak kullanılan sodyum tuzu formunun (özellikle tetrasodyum EDTA) tercih edilmesinden kaynaklanmaktadır (Zehnder, 2006). EDTA'nın sodyum tuzu, üreticiler tarafından çeşitli amaçlarla tamponlanarak, farklı pH değerlerinde hazırlanarak piyasaya sürülmektedir (Deari vd., 2019).

EDTA'nın bu formda kullanılmasının temel nedeni, klinik etkinliğin artırılmasıdır. Serbest asit formu düşük çözünürlük gösterdiğinden pratikte kullanılamazken, sodyum tuzu formu hem yüksek çözünürlük sağlar hem de yüksek pH sayesinde dentin kalsiyum iyonlarına karşı daha güçlü şelasyon kapasitesi sunar. Bir araştırma, üç farklı EDTA formunu pH 7.1'e indirerek karşılaştırmış ve özellikle tetrasodyum tuzunun, nötr pH'lı formuna göre eşit derecede etkili ancak daha ekonomik olduğunu belirtmiştir (O'Connell vd., 2000). Başka bir çalışmada ise, tetrasodyum EDTA'nın smear tabakasını uzaklaştırmada EDTAHNa_3 formuna kıyasla daha yavaş olduğunu; buna karşın NaOCl ile kullanıldığında organik doku çözmede ve smear tabakasını gidermede etkili olduğunu göstermiştir (Tartari vd., 2017). Dolayısıyla çalışmamızda gözlenen bazik pH, kullanılan EDTA formunun kimyasal yapısı ve üreticinin hazırlama koşullarıyla uyumludur. Bu kimyasal formülasyon, endodontide EDTA kullanımının standartı haline gelmiş olup, literatürde bildirilen bazik pH değerleri de bu durumu doğrulamaktadır.

Dolayısıyla elde edilen sonuç, metodolojik bir hata ya da ölçüm artefaktı değil, kullanılan ürünün kimyasal formülasyonu ve klinik gereklilikleri ile uyumlu bir bulgudur.

CHX solüsyonunda ise durum farklıdır. Ozonlama sonrası pH değerinde dramatik bir düşüş yaşandı, pH'da 9.05'ten 6.35'e gerileme görülmüştür. Bu, ozonun CHX molekülü üzerinde kimyasal bozunmaya yol açığının güçlü bir işareti olarak değerlendirilebilir. Ancak bu pH düşüşü, dentin tübül penetrasyonu parametreleri üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir değişikliğe yol açmadı. Bu gözlem, CHX'in dentin yüzeyine bağlanma ve penetrasyon mekanizmasının pH

değişimlerine rağmen nispeten stabil kaldığını; yani penetrasyon açısından kimyasal yapısallıktan daha fazla fiziksel özelliklerin belirleyici olduğunu düşündürmektedir. Ayrıca pH düşüşünün direkt olarak ozonun CHX ile etkileşiminden kaynaklı mı, yoksa CHX solüsyonunun içerisine üretici firmaların koyabileceği tamponlayıcı ajanlar vb. yan ürünlerin etkileşiminden kaynaklı mı olduğu da ayrı bir araştırma gerektirmektedir.

Sonuç olarak, ozonlamanın irrigasyon solüsyonlarına etkisi solüsyonun kimyasal doğasına göre değişkenlik göstermektedir. EDTA’da ozonlama; renk değişimi, yoğunluk ve viskozite artışı, penetrasyon kapasitesinde düşüş ve muhtemelen şelasyon verimliliğinde bozulma gibi çok boyutlu negatif etkiler doğurdu. CHX’te ise kimyasal stabilitedeki değişime rağmen (pH düşüşü), penetrasyon parametrelerinin görece korunmuş olması dikkat çekti. Bu farklı yanıt, her solüsyon türünde ozonun getirdiği fiziko-kimyasal değişimlerin klinik etki sağlamada aynı etkiyi göstermeyebileceğini ve her irrigant için ozon modifikasyonunun ayrı ayrı değerlendirilmesini gerektirdiğini göstermektedir.

5.6 Fiziksel Özellikler ile Penetrasyon İlişkisi

Bu çalışmanın bulguları, irrigasyon solüsyonlarının fiziksel özelliklerinde ozonlamayla meydana gelen değişimlerin dentin tübül penetrasyonu üzerinde doğrudan etkili olabileceğini ortaya koymaktadır. Özellikle NaOCl gruplarında gözlenen yoğunluk ve viskozite düşüşü, solüsyonun akışkanlığını artırarak dentin tübüllerine daha kolay ilerlemesini sağladı. Bu durum, ortalama penetrasyon mesafesi ve yayılım alanı parametrelerinde ozonlama sonrası elde edilen istatistiksel olarak anlamlı artışlarla uyumludur. Başka bir deyişle, ozonlamanın NaOCl’nin fiziksel özelliklerini modifiye etmesi, bu irrigantın dentin içerisine daha homojen ve derin nüfuz etmesine katkı sağladı.

Buna karşın EDTA grubunda tam tersi bir tablo gözlemlendi. Ozonlama sonrası yoğunluk ve viskozitenin artması, solüsyonun dentin tübüllerine girişini kısıtladı, buna bağlı olarak penetrasyon alanı ve ortalama penetrasyon mesafesi belirgin şekilde azaldı. Bu bulgu, fiziksel özelliklerdeki küçük değişimlerin bile irrigantların dentin yapısıyla etkileşiminde kritik rol oynayabileceğini göstermektedir.

CHX ve salin gruplarında ise ozonlama sonrası fiziksel parametrelerde gözlenen değişiklikler penetrasyon bulgularına yansımadı. Özellikle CHX'in pH değerinde dramatik bir düşüş olmasına rağmen penetrasyon kapasitesinin korunması, dentin yüzeyine bağlanma mekanizmasının pH'dan daha az etkilendiğini düşündürmektedir.

Sonuç olarak, ozonlamanın irrigasyon solüsyonları üzerindeki etkisi tek boyutlu değildir; yoğunluk, viskozite ve pH değişiklikleri penetrasyon kapasitesiyle sıkı bir ilişki içerisinde. Ancak bu ilişkinin yönü irrigantın kimyasal yapısına bağlı olarak farklılık göstermektedir. Bu nedenle klinik uygulamalarda ozonlanmış irrigantların değerlendirilmesi, yalnızca antimikrobiyal etkinlik üzerinden değil, aynı zamanda dentin tübül penetrasyonu ve bunu belirleyen fiziksel özellikler üzerinden yapılmalıdır.

5.7 Ozonun Kök Kanal Sistemindeki Mikroorganizmalara Etkisi

Kök kanal sistemindeki enfeksiyonların ana nedeni, kök kanallarında bulunan anaerobik ve fakültatif anaerobik mikroorganizmalardır (Goswami vd., 2024; Wong vd., 2021). Geleneksel kanal dezenfeksiyon yöntemleri, mikroorganizma yükünü azaltmada etkili olsa da karmaşık kök kanal anatomisi nedeniyle bazı bölgelerde yetersiz kalabilir (Siqueira & Rôças, 2008). Ozon, güçlü bir oksitleyici ajan olarak bakteri, virüs ve mantarları doğrudan etkisiz hale getirebilir ve biyofilm yapısını bozarak enfekte dentin tübüllerine daha derinlemesine nüfuz edebilir (Goswami vd., 2024).

Ozonun mikroorganizmalara karşı etkinliği, patojenlerin hücre zarlarını oksitleme ve hücresel metabolizmalarını bozma yeteneğine dayanır (Liaquat vd., 2023). Çalışmalar, ozonun özellikle *Enterococcus faecalis*, *Candida albicans* ve *Porphyromonas gingivalis* gibi endodontik enfeksiyonlarla ilişkilendirilen dirençli mikroorganizmalar üzerinde etkili olabileceğini göstermiştir (Noites vd., 2014). Bu patojenler, kök kanal sisteminde inatçı yerleşim göstererek tedavi sonrası tekrarlayan enfeksiyonlara neden olabilirler (Stojanović vd., 2014). Geleneksel irrigasyon solüsyonlarının etkinliği sınırlı olduğundan, ozon uygulamalarının bu mikroorganizmaların elimine edilmesinde tamamlayıcı bir rol oynayabileceği düşünülmektedir (Huth vd., 2009).

Bununla birlikte, ozonun mikroorganizmalara karşı etkisini belirleyen uygulama yöntemi, süresi ve solüsyon içindeki stabilitesi gibi faktörler önemli parametrelerdir. Ozon gazı formunda doğrudan uygulanabildiği gibi, irrigasyon solüsyonlarının ozonlanması yoluyla da kullanımı mümkündür (Nagayoshi vd., 2004). Ancak ozonlanmış irrigasyon solüsyonlarının antimikrobiyal etkinliğinin ne ölçüde değiştiği ve uzun vadede kök kanal sisteminde nasıl bir etki gösterdiği henüz tam olarak bilinmemektedir (Silva vd., 2020). Bu nedenle, ozonun endodontik enfeksiyon kontrolündeki yerini belirlemek için mikrobiyal etkinliği ve irrigasyon solüsyonlarıyla kombinasyon halinde nasıl etki gösterdiği daha ayrıntılı araştırılmalıdır.

5.8 Ozonun Dentin Dokusu Üzerine Etkisi

Dentin dokusu, organik ve inorganik bileşenlerden oluşan kompleks ve gözenekli bir yapı olup, irrigasyon solüsyonları ve dezenfektan ajanların etkilerine karşı duyarlıdır (Tjäderhane vd., 2009). Ozonun dentin dokusu üzerine olan etkileri, kimyasal, mekanik ve biyolojik düzeyde incelenmelidir. Ozon, dentin tübüllerine penetrasyon yeteneğine sahip olmasıyla dikkat çeker ve derin dentin tabakalarına kadar dezenfeksiyon sağlayabilir (Libonati vd., 2019). Bu özelliği sayesinde, geleneksel irrigasyon solüsyonlarına kıyasla enfekte dentin dokularına daha iyi ulaşarak mikrobiyal kontaminasyonun azalmasına katkıda bulunabilir (Nagayoshi vd., 2004).

Bununla birlikte, ozonun dentin yapısı üzerindeki mekanik ve kimyasal etkileri de dikkate alınmalıdır. Ozon uygulamasının dentin mikrosertliği, yüzey pürüzlülüğü ve mineral içeriği üzerindeki etkileri üzerine yapılan çalışmalar, bazı durumlarda dentinin remineralizasyonuna destek olabileceğini göstermiştir (Erçin vd., 2024). Özellikle uzun süreli veya yüksek konsantrasyonlu ozon uygulamalarının dentin dokusunda yapısal değişikliklere neden olup olmadığı önemli bir araştırma konusudur. Bununla birlikte, ozonlanmış irrigasyon solüsyonlarının dentin üzerine etkileri, henüz araştırılmamış bir alandır.

Ozonun dentin tübülleri içerisindeki yayılımı ve dezenfeksiyon kapasitesi solüsyonun viskozitesi, yoğunluğu ve pH seviyesiyle doğrudan ilişkili olabilir. Ozonun irrigasyon solüsyonlarıyla etkileşimi sonucu ortaya çıkabilecek pH

değişimleri dentinin kimyasal stabilitesini etkileyebilir ve mineral bileşimini değiştirebilir. Bu nedenle, ozon ve ozonlanmış irrigasyon solüsyonlarının dentin dokusu üzerindeki etkilerinin mikroskopik, mekanik ve kimyasal analizlerle detaylandırılması gerekmektedir.

5.8.1 Dentin yüzeyinin negatif yükü

Yapısal olarak, dentin hem mineral hem organik bileşenlerden oluşmaktadır. Organik kısmın büyük bölümünü kollajen ve non-kollajenöz proteinler oluşturur. Bu protein bileşenlerinden bazıları da (örneğin asidik amino asit kalıntıları, fosfoproteinler, proteoglikanlar) yüklü yan zincirler içermektedir. Bu yan zincirlerdeki karboksil ($-\text{COO}^-$), fosfat ($-\text{PO}_4^{2-}$) gibi gruplar, asitliği daha yüksek durumda proton kaybederek negatif yük oluşturabilir (Weerkamp vd., 1988). Özellikle demineralize veya açığa çıkmış dentin yüzeylerinde, mineral içindeki pozitif yüklü katyonların (örn. Ca^{2+} , Mg^{2+}) kaybı ile organik matriks daha görünür hale geldiğinde, bu negatif yük yoğunluğu artabilir (Weerkamp vd., 1988). Bazı çalışmalar dengeli iyonik ortamda dentin ve mine yüzeylerinin negatif yük taşıdığını, zeta potansiyelinin negatif olduğunu gösterilmiştir. Örneğin, bir çalışmada hem mine hem de dentin dokusunun negatif yüzey yükü taşıdığını bildirilmiştir (Weerkamp vd., 1988).

Sonuç olarak, dentin yüzeyinin negatif yük taşıdığı fikri hem biyokimyasal (protein/proteoglikan yapısı) hem de fizikokimyasal ölçümlerle desteklenmiş durumdadır. Bu durum genellikle negatif yük oluşumuna sebep olan ozon tepkimeleri için bir tartışma açmaktadır.

5.8.2 Ozonlama sonrası oluşabilecek potansiyel yüklü bileşikler

Ozonlama (tedavi amaçlı ozon uygulamaları / O_3 gazı ya da sulu formu) dentinde ve ağız ortamında birkaç kimyasal değişikliği tetikleyebilir:

Reaktif oksijen türleri (ROS): Ozon doğrudan ya da dolaylı yollarla ROS oluşturur: örneğin ozon + su $\rightarrow$ hidroksil radikali ($\bullet\text{OH}$), süperoksit (O_2^-), hidroperoksit ($\text{HO}_2\bullet$), vb. Çeşitli protein, amino asit, lipid, karbonhidrat bileşenleriyle reaksiyona girerek okside olur (El Meligy vd., 2023; Pryor, 1994; Veneri vd., 2024).

Amino asitlerin oksidasyonu: L-cysteine → cystine; L-methionine → methionine-sulfoxide gibi ürünler (Chang vd., 2012).

Formiyat gibi düşük moleküllü okside ürünler: Şeker (örneğin glukoz) gibi karbonhidratların parçalanması sonucu oluşabilir (Chang vd., 2012).

Aldehitler, Karbonil bileşikler: Lipit oksidasyonu, özellikle doymamış yağ asitlerinde ozonun “ozonid” oluşumu ve bunun daha sonra parçalanmasıyla ortaya çıkabilir (Chang vd., 2012).

Geçici radikaller / iyonik türler: Ozon + organik molekül tepkimeleri sonucu radikaller ve oksidasyon ara ürünleri meydana gelir. Bazı moleküller elektron verip yerel olarak negatif yük taşıyabilen radikal anyonlara dönüşebilir. Örneğin ozon ile etkileşen su çözeltilerinde geçici olarak elektron verici moleküllerden radikal anyonlar oluşabilir; bu tür ara ürünler doku içinde kısa süreli etkiler yaratabilir (Chang vd., 2012).

5.8.3 Ozonlama sonucu negatif/diğer yüklerin dentine yayılmayı zorlaştırabileceği olası mekanizmalar

Ozonlama sonrası oluşan bu yük taşıyan türlerin veya oksidatif ürünlerin dentin içinde madde yayılımını (örneğin remineralizan iyonlar, ilaç ajanları, bağlayıcı ajanlar) zorlaştırabileceği argümanları şöyle olabilir:

Elektrostatik itme: Dentin yüzeyi negatif yüklüyse ve ozonlama sonrası ortamda negatif yüklü moleküller (örneğin süperoksit anyonları, ozon üzerinden gelen oksidatif radikaller) mevcutsa, negatif-negatif etkileşim nedeniyle bu moleküllerin dentin yüzeyine yaklaşımı engellenebilir. Özellikle iyon/infiltrasyon şeklinde nüfuz etmesi gereken ajanlar için bu durum bir bariyer olabilir.

Radikalik reaktivite / oksidatif hasar: Ozon ile oluşan ROS ve diğer oksidatif ürünler, organik matris içinde (kollajen, non-kollajen proteinler) hasar yaratabilir. Bu, matriksin yapısal bütünlüğünü bozarak gözenekler/tubulus ağırlığını değiştirebilir; böylece iyon veya molekül yayılım yolları daralabilir ya da değişebilir.

Smear tabakası veya yüzey değişikliği: Ozon uygulaması, bazı çalışmaların bildirdiği gibi smear tabakasını kaldırabilir, dentin tübüllerini genişletebilir (Alnufaiy, 2025). Bu durum yayılımı kolaylaştırıcı gibi görünse de aynı zamanda yüzeyde oksidatif ürün kalıntıları, kovalent bağlanmış okside gruplar veya protein çapraz bağları gibi modifikasyonlar oluşabilir; bu modifikasyonlar yüzeyin hidrofobik / hidrofilik özelliklerini, iyonların bağlanma kapasitesini etkileyebilir (Alnufaiy, 2025; Pires vd., 2013; Veneri vd., 2024).

İyon/ajan bağlanma kinetiğinin azalması: Eğer ajanlar (örneğin remineralizan iyonlar Ca^{2+} , PO_4^{3-} , florür iyonları ya da pozitif yüklü moleküller) negatif yüzeye yaklaşırken ortamda rekabet eden negatif türler veya yüzey modifikasyonları varsa, ajan moleküllerinin bağlanma hızı ve penetrasyonu düşebilir (Alnufaiy, 2025; Pires vd., 2013).

Hangi frekansta, süreyle, hangi ozon yoğunluğuyla uygulamanın yüzeyde hangi derecede oksidatif ürün bıraktığı; yüzeyin yük karakteristiğini (yüzey potansiyeli / zeta potansiyeli) nasıl modifiye ettiği ve bu yük değişiminin iyon veya ajan infiltrasyonuna etkisi detaylı ölçülmemiş, çalışmalarda genellikle göz ardı edilmiş durumdadır. Çalışmamızda ozonun direkt olarak dentin ile temas etmemiş olması yukarıda bahsedilen negatif ürün çıkışlarının meydana gelmesini engellemiş olabilir. Ayrıca, ozon sonrası yüzeyin “temizlenmesi” ya da indirgen ajanlarla (antioxidant ya da redükleyici ajanlarla) muamele edilmesi gerekli olabilir. Okside ürünler yüzeyde kaldığı takdirde bağlayıcı ajanların adezyonunun zayıflaması gibi istenmeyen etkiler doğurabilir. Bazı çalışmalarda bu yönde öneriler bulunmaktadır (Pires vd., 2013).

Son olarak, klinik ortamda ağız sıvısının (tükürük), organik madde varlığı, iyonik güç, pH gibi pek çok değişken mevcuttur. Bu değişkenlerin ozon kaynaklı yük değişimlerini tamponlayabileceği ya da etkilerini azaltabileceği yönünde çok az veri vardır.

5.9 Ozonlama Dozunun Belirlenmesi

Ozon uygulamalarının etkinliği büyük ölçüde dozaj ve uygulama süresine bağlıdır. Yüksek konsantrasyonlarda ozon, mikroorganizmaları hızla elimine

edebilirken, dental dokular üzerinde toksik etkiler yaratabilir. Düşük konsantrasyonlarda uygulandığında ise, etkin bir dezenfeksiyon sağlamama riski bulunmaktadır. Bu nedenle, ozonun ideal konsantrasyonu ve uygulama süresinin belirlenmesi, güvenli ve etkili bir endodontik tedavi için gereklidir.

Mevcut literatürde genellikle 2 L/h akış hızı ve 0.25 µg/mL ozon konsantrasyonu gibi düşük doz protokoller kullanıldığı, bazılarında ise 650 mL/h ve 4.2 µg/mL gibi daha yüksek parametrelerle 0.06–8.2 mg aralığında ozon dozlarının uygulandığı rapor edilmiştir (Lynch, 2008; Sabbah vd., 2018; Schwartz vd., 2015). Çalışmamızda kullanılan 80 µg/NmL konsantrasyon, literatürdeki üst sınırdaki yer almasına rağmen, “maksimum etkin doz” perspektifiyle deneysel olarak tercih edildi. Böylece meydana gelebilecek herhangi bir etkinin net gözlemlenebilmesi amaçlandı.

5.10 Klinik Uygulamalara Yansıması

Bu çalışmanın bulguları, ozonlanmış irrigasyon solüsyonlarının klinik pratikte farklı sonuçlar doğurabileceğini göstermektedir. Özellikle NaOCl gruplarında gözlenen viskozite ve yoğunluk düşüşüyle birlikte artan dentin tübül penetrasyonu, irrigantın mikrobiyal biyofilmlere ve tübül derinliklerindeki patojenlere daha etkili ulaşabilmesini sağlayabilir. Bu durum, kök kanal dezenfeksiyonunun başarısını artıracak potansiyel bir avantajdır.

Buna karşın EDTA grubunda ozonlama sonrası gözlenen penetrasyon azalması, smear tabakası kaldırma ve dentin yüzeyinde tübül açıklığı oluşturma etkinliğinin sınırlanabileceğini düşündürmektedir. Bu nedenle EDTA’nın ozonlanmış formunun klinik etkinliği, konvansiyonel formuna kıyasla daha düşük olabilir. CHX grubunda ise ozonlama pH’da belirgin bir düşüşe yol açmış olsa da, dentin penetrasyonunda istatistiksel olarak anlamlı bir fark yaratmamıştır. Bu sonuç, CHX’in substantivite özelliğinin ozonlamadan bağımsız olarak korunabildiğini düşündürmektedir.

Klinik açıdan bu veriler, ozonlamanın irrigantların etkinliğini tek yönlü olarak artırmadığını, aksine solüsyon tipine göre farklı yönlü sonuçlar doğurduğunu göstermektedir. Ozonlanmış NaOCl’nin penetrasyon avantajı klinik uygulamalara

taşınabilirken, EDTA gibi solüsyonlarda ozonlamanın sınırlayıcı olabileceği göz önünde bulundurulmalıdır. Bu nedenle, ozonlamanın rutin klinik kullanıma girmesi için irrigant bazında ayrıntılı değerlendirmeler yapılmalı ve farklı kombinasyon protokolleri test edilmelidir.

5.11 Çalışmanın Kısıtlılıkları ve Gelecek Araştırmalar

Bu çalışmada elde edilen bulgular, irrigasyon solüsyonlarının ozonlama sonrası fiziksel özelliklerindeki değişimleri ve dentin tübül penetrasyonu üzerine etkilerini ortaya koysa da bazı sınırlılıklar göz önünde bulundurulmalıdır. Öncelikle çalışma tamamen in vitro koşullarda gerçekleştirildi. Klinik ortamda bulunan organik artıklar, kan, dentin sıvısı ve değişken kanal morfolojileri irrigantların davranışını farklılaştırabilir (Haapasalo vd., 2014). Bu nedenle sonuçların doğrudan klinik ortama yansıtılmasında dikkatli olunmalıdır.

Genel bilgiler kısmında da detaylıca bahsedildiği üzere ozonun sıvılar içerisindeki yarıömrü çok kısıtlıdır. Bu çalışmada ozonlu solüsyonlar her seferinde taze olarak hazırlanıp 15-20 dakika içinde kullanılıp, imha edildi. Yine de tüm bu önlemlere rağmen, ozonlama prosedürü, solüsyonların ölçüm için uygun cihazlara alınması, ölçüm sırasında geçen süre vb. zaman kayıpları, teoride çok az da olsa, belli bir miktar ozonun inaktif hale gelmesine yol açmış olabilir.

Bir diğer kısıtlılık, ozonlamanın tek bir cihaz ve sabit parametrelerle uygulanmış olmasıdır. Bu çalışma kendi alanında çok fazla örneği olan bir çalışma olmadığı için, sabit bir konsantrasyon üzerinden, temel irrigasyon solüsyonları üzerinde çalışma yapılması uygun görüldü. Farklı ozon konsantrasyonları, süreleri ve akış hızları solüsyonların fiziksel özelliklerini farklı derecelerde etkileyebilir. Ayrıca ozonun çözünürlüğü ve solüsyon içindeki kalıcılığı da ölçümler sırasında değişkenlik yaratabilecek faktörlerdir. Bu nedenle, farklı ozonlama protokollerinin karşılaştırıldığı ileri çalışmalar gereklidir.

Bu çalışmada penetrasyon yalnızca boya ile işaretlenmiş irrigantların CLSM altında incelenmesi ile değerlendirildi. Farklı görüntüleme yöntemleri (SEM, mikro-CT) veya bakteriyel penetrasyon modelleri kullanılarak ozonlamanın gerçek antimikrobiyal etkinliğe katkısı daha kapsamlı biçimde ortaya konabilir (Seda

Gültekin, 2025). Ayrıca, ozonlanmış irrigantların dentin yapısında kimyasal/morfolojik değişiklikler yaratıp yaratmadığının da incelenmesi önemlidir. Ayrıca Rodamin B boyasının da irrigasyon solüsyonları ile etkileşime girip floresans özelliğinin azalabileceği ihtimali de düşünülmelidir. Özellikle NaOCl'in, Rodamin B ile etkileşime geçip, floresans özelliklerini azaltabileceğini gösteren çalışmalar mevcuttur (Pasha & Narayana, 2007). Çalışmamız da bütün solüsyonlar Rodamin B ile eşit şartlarda boyandığı için ve her solüsyon yalnızca kendisinin ozonlu haliyle kıyaslandığı için, böyle bir durumda bile sonuçların etkilenme düzeyinin önemsiz olacağını düşünmekteyiz. Çalışmamızda tüm irrigasyon solüsyonları aynı koşullarda ve eşit konsantrasyonda Rodamin B ile işaretlendi, değerlendirmeler yalnızca her solüsyonun ozonlanmış ve ozonlanmamış halleri arasında yapıldı. Bu nedenle olası floresans sinyal değişikliklerinin karşılaştırmalı sonuçlarımız üzerinde belirleyici bir etkisinin bulunmadığı düşünülmektedir.

Gelecek araştırmalarda ozonlamanın irrigant kombinasyonlarında (örneğin NaOCl + EDTA veya CHX protokolleri) yaratacağı etkiler, antimikrobiyal testlerle birlikte ele alınmalıdır. Ayrıca, in vivo hayvan modelleri ve klinik çalışmalarda ozonlu irrigantların kök kanal tedavisindeki başarıya katkısı değerlendirilmelidir.

Bu yönde yapılacak kapsamlı araştırmalar, ozonlamanın rutin endodontik irrigasyon protokollerine dahil edilip edilmeyeceği konusunda daha güçlü kanıtlar sağlayacaktır.

6. SONUÇ ve ÖNERİLER

6.1 Çalışmanın Genel Sonuçları

Bu çalışmada irrigasyon solüsyonlarının ozonlama sonrası fiziksel özelliklerinde (pH, yoğunluk, viskozite) meydana gelen değişiklikler ve bunların dentin tübül penetrasyonu üzerindeki etkileri incelendi. Bulgular, ozonlamanın irrigantlara tek tip bir etki yapmadığını; solüsyonun kimyasal yapısına göre farklı sonuçlar doğurduğunu gösterdi. NaOCl gruplarında ozonlama sonrası viskozite ve yoğunluk değerlerinde istatistiksel anlamlı düşüşler gözlenmiş ve bu değişiklikler ortalama penetrasyon mesafesi ile yayılım alanında istatistiksel olarak anlamlı artışlara yansıdı. Buna karşılık EDTA grubunda yoğunluk ve viskozitenin artmasıyla birlikte dentin penetrasyonunda azalma kaydedildi, CHX grubunda ise pH'daki dramatik düşüşe rağmen penetrasyon parametreleri korundu. Aynı şekilde salin solüsyonu ve CHX'in ozonlanmasıyla istatistiksel anlamlı olarak bir penetrasyon veya viskozite artışı gözlemlenmedi.

6.2 Klinik Öneriler

Elde edilen bulgular, ozonlanmış NaOCl'nin dentin tübüllerine ilerleme kapasitesini artırarak kök kanal dezenfeksiyonunda ek bir avantaj sağlayabileceğini göstermektedir. Bu nedenle ozonlanmış NaOCl, özellikle biyofilm tabakalarının yoğun olduğu enfekte kök kanallarında tercih edilebilir bir seçenek olabilir. Ozon cihazlarının giderek ucuzlaması ve diş kliniklerinde de farklı endikasyonlar sebebi ile yer bulması da ozonlanmış NaOCl'yi pratik ve ulaşılabilir bir alternatif olarak öne çıkarabilir. Ancak EDTA'nın ozonlanmış formu, penetrasyon kapasitesinde azalma ve kimyasal yapısında gözlenen değişimler nedeniyle klinik uygulamalarda dikkatle değerlendirilmelidir. CHX'in ozonlama sonrası meydana gelen pH değişiminden etkilenmemesi, substantivite özelliğini koruduğunu düşündürmektedir; ancak bu varsayımlar deneysel araştırmalar ile teyide muhtaçtır. Sonuç olarak, ozonlamanın irrigantlarda rutin klinik kullanıma girmesi için irrigant tipine özgü değerlendirmeler yapılmalı ve protokoller buna göre belirlenmelidir.

6.3 Gelecek Araştırmalara Öneriler

Bu alışma, irrigasyon solüsyonlarının ozonlanmasıyla oluşabilecek fiziksel değişimleri ele alan öncü bir çalışma olarak görülmelidir. Çalışmamız in vitro koşullarda gerçekleştirilmiş olup, klinik koşulların getirdiği biyolojik ve anatomik değişkenler dikkate alınamamıştır. Bu nedenle, ozonlanmış irrigantların etkinliğini değerlendiren in vivo hayvan modelleri ve klinik çalışmalar yapılması gereklidir. Ayrıca farklı ozonlama süreleri, konsantrasyonları ve cihaz parametrelerinin irrigantlar üzerindeki etkileri araştırılmalıdır. Ozonlanmış irrigantların yalnızca penetrasyon kapasiteleri değil, aynı zamanda antibakteriyel etkinlikleri, dentin yapısına etkileri ve uzun vadeli biyouyumlulukları da kapsamlı şekilde incelenmelidir. Ozon ile muamele görmüş kök dentininin, kanal dolgu patlarının adezyonuyla olumlu/olumsuz ilişkisi de ayrıca araştırılabilir. Böylece ozonlamanın endodontide rutin kullanım potansiyeli daha güçlü kanıtlarla desteklenebilir. İnsan çalışmalarına başlanılmadan önce etik ilkeler titizlikle gözetilmeli, reaktif ozon gazı ile irrigasyon solüsyonlarının tepkimesiyle meydana gelebilecek, insan sağlığına zararlı olabilecek bileşiklerin varlığı sorgulanmalıdır.

KAYNAKLAR

- Akçay, M., Arslan, H., Mese, M., Durmus, N., & Capar, I. D. (2017). Effect of photon-initiated photoacoustic streaming, passive ultrasonic, and sonic irrigation techniques on dentinal tubule penetration of irrigation solution: a confocal microscopic study. *Clinical oral investigations*, 21(7), 2205-2212. <https://doi.org/10.1007/S00784-016-2013-Y>
- Alnufaiy, B. (2025). The Use of Ozone Therapy in Combination with a Desensitizing Agent for Dentinal Tubules Occlusion: An In Vitro Study. *The Open Dentistry Journal*, 19(1). <https://doi.org/10.2174/0118742106412774250710095721>
- Atilgan, M. R., Oder, G., Sincar, B., & Bayraktar, O. (2024). Applications of ozone in medical, medicine, and dentistry sciences. *Advances and Technology Development in Greenhouse Gases: Emission, Capture and Conversion: Methane, Nitrox Oxide, and Ozone Conversion and Utilization*, 247-283. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-19069-8.00004-4>
- Azarpazhooh, A., & Limeback, H. (2008). The application of ozone in dentistry: a systematic review of literature. *Journal of dentistry*, 36 2(2), 104-116. <https://doi.org/10.1016/J.JDENT.2007.11.008>
- Barbosa, B. P. N. P., Alcalá, M. H., & Castro, F. P. L. de. (2023). Major clinical findings on the safety and effectiveness of ozone therapy in endodontic treatment: a concise systematic review. *MedNEXT Journal of Medical and Health Sciences*, 4(S4). <https://doi.org/10.54448/MDNT23S402>
- Barczyk, I., Masłyk, D., Walczuk, N., Kijak, K., Skomro, P., Gronwald, H., Pawlak, M., Rusińska, A., Sadowska, N., Gronwald, B., Garstka, A. A., & Lietz-Kijak, D. (2023). Potential Clinical Applications of Ozone Therapy in Dental Specialties—A Literature Review, Supported by Own Observations. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 2023, Vol. 20, Page 2048, 20(3), 2048. <https://doi.org/10.3390/IJERPH20032048>
- Bhattad, A. (2023). Review on viscosity measurement: devices, methods and models. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 148(14), 6527-6543. <https://doi.org/10.1007/S10973-023-12214-0/FIGURES/16>
- Bocci, V. (2002). A Brief Historical Review. *Oxygen-Ozone Therapy*, 1-5. https://doi.org/10.1007/978-94-015-9952-8_1
- Boutsioukis, C., & Arias-Moliz, M. T. (2022). Present status and future directions – irrigants and irrigation methods. *International Endodontic Journal*, 55(S3), 588-612. <https://doi.org/10.1111/IEJ.13739>
- Boyarinov, G. A., Gordetsov, A. S., Peretyagin, S. P., Boyarinova, L. V., & Martusevich, A. K. (2016). Chemical transformations in treatment of saline solution with ozone-oxygen gas mixture. *Journal of Health Inequalities*, 2, 194-199. <https://doi.org/10.5114/JHI.2016.65363>
- Cárdenas-Bahena, Á., Sánchez-García, S., Tinajero-Morales, C., González-Rodríguez, V. M., & Baires-Várguez, L. (2012). Use of sodium hypochlorite in root canal irrigation: Opinion survey and concentration in commercial products. *Revista odontológica mexicana*, 16(4), 252-258. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-199X2012000400004&lng=es&nrm=iso&tlng=en
- Chang, H., Lynch, E., Grootveld, M., Chang, H., Lynch, E., & Grootveld, M. (2012). Oxidative Consumption of Oral Biomolecules by Therapeutically-Relevant Doses of Ozone. *Advances in Chemical Engineering and Science*, 2(2), 238-245. <https://doi.org/10.4236/ACES.2012.22028>
- Chapman, S. (1932). Discussion of memoirs. On a theory of upper-atmospheric ozone. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 58(243), 11-13. <https://doi.org/10.1002/QJ.49705824304>

- Chen, J., & Davidson, J. H. (2002). Ozone Production in the Positive DC Corona Discharge: Model and Comparison to Experiments. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 22(4), 495-522. <https://doi.org/10.1023/A:1021315412208>
- Chhem-Kieth, S., Holm Rasmussen, L., Rosenfjeld, M., & Larsen Andersen, M. (2022). Effects of vegetables and fruit with varying physical damage, fungal infection, and soil contamination on stability of aqueous ozone. *Food Bioscience*, 50. <https://doi.org/10.1016/J.FBIO.2022.102157>
- Chohan, H., Khullar, S., Patel, R. H., Rath, J., Mohammed, S., & Subramani, S. K. (2024). Investigations of the Antimicrobial Effectiveness of Different Disinfection Protocols Against Endodontic Pathogens in Root Canal Systems. *Journal of Pharmacy & Bioallied Sciences*, 16(Suppl 4), 3577-3579. https://doi.org/10.4103/JPBS.JPBS_1116_24
- Clavo, B., Rodríguez-Esparragón, F., Rodríguez-Abreu, D., Martínez-Sánchez, G., Llontop, P., Aguiar-Bujanda, D., Fernández-Pérez, L., & Santana-Rodríguez, N. (2019). Modulation of oxidative stress by ozone therapy in the prevention and treatment of chemotherapy-induced toxicity: Review and prospects. *Antioxidants*, 8(12). <https://doi.org/10.3390/ANTIOX8120588>
- Coronas, V. S., Villa, N., Nascimento, A. L. Do, Duarte, P. H. M., da Rosa, R. A., & Só, M. V. R. (2020). Dentinal Tubule Penetration of a Calcium Silicate-Based Root Canal Sealer Using a Specific Calcium Fluorophore. *Brazilian Dental Journal*, 31(2), 109-115. <https://doi.org/10.1590/0103-6440202002829>
- Çalt, S., & Serper, A. (2002). Time-Dependent Effects of EDTA on Dentin Structures. *Journal of Endodontics*, 28(1), 17-19. <https://doi.org/10.1097/00004770-200201000-00004>
- da Silva, L. M., F Mena, I., Montiel, M. A., Saez, C., Motheo, A. J., & Rodrigo, M. A. (2023). Electrochemical generation of ozone for application in environmental remediation. *Results in Engineering*, 20. <https://doi.org/10.1016/J.RINENG.2023.101436>
- 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(2), 237-243. <https://doi.org/10.1111/IEJ.12987>
- El Meligy, O. A., Elemam, N. M., & Talaat, I. M. (2023). Ozone Therapy in Medicine and Dentistry: A Review of the Literature. *Dentistry Journal 2023, Vol. 11, Page 187*, 11(8), 187. <https://doi.org/10.3390/DJ11080187>
- Erçin, Ö., Kopuz, D., Alkan, E., Tağtekin, D., & Yanikoğlu, F. (2024). Evaluation of the Effect of Different Remineralizing Agents and Ozone Application on Artificial Carises. *Ozone: Science & Engineering*, 46(6), 613-621. <https://doi.org/10.1080/01919512.2024.2355879>
- Fahad, F., Abdulrazzaq Al-Hashimi, R., & Jaffar Hussain, M. (2024). The Advancement in irrigation solution within the field of endodontics, A Review. *Journal of Baghdad College of Dentistry*, 36(1), 2311-5270. <https://doi.org/10.26477/jbcd.v36i1.3>
- Fang, Y., Du, X., Ji, X., Wang, W., Wang, C., Chen, R., Niu, Y., & Kan, H. (2024). Genome-wide profiling of long non-coding RNA following ozone exposure: a randomized, controlled exposure trial. *Environmental research*, 263. <https://doi.org/10.1016/J.ENVRES.2024.120101>
- Faul, F., Erdfelder, E., Lang, A. G., & Buchner, A. (2007). G*Power 3: A flexible statistical power analysis program for the social, behavioral, and biomedical sciences. *Behavior Research Methods*, 39(2), 175-191. <https://doi.org/10.3758/BF03193146/METRICS>
- Finžgar, N., & Leštan, D. (2006). Heap leaching of Pb and Zn contaminated soil using ozone/UV treatment of EDTA extractants. *Chemosphere*, 63(10), 1736-1743. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2005.09.015>
- Galiè, M., Covi, V., Tabaracci, G., & Malatesta, M. (2019). The role of Nrf2 in the antioxidant cellular response to medical ozone exposure. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(16). <https://doi.org/10.3390/IJMS20164009>
- Giardino, L., Pedullà, E., Cavani, F., Bisciotti, F., Giannetti, L., Checchi, V., Angerame, D., Consolo, U., & Generali, L. (2021). Comparative Evaluation of the Penetration Depth into Dentinal

- Tubules of Three Endodontic Irrigants. *Materials (Basel, Switzerland)*, 14(19). <https://doi.org/10.3390/MA14195853>
- Gilbert, E., & Hoffmann-Glewe, S. (1990). Ozonation of ethylenediaminetetraacetic acid (EDTA) in aqueous solution, influence of pH value and metal ions. *Water Research*, 24(1), 39-44. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(90\)90062-B](https://doi.org/10.1016/0043-1354(90)90062-B)
- Goswami, P., Sharma, K., Maiti, N., Yadav, S., Verma, V., & Puthenkandathil, R. (2024). Ozone: An Adjunct in Dental Treatment. *Journal of Pharmacy & Bioallied Sciences*, 16, 2-4. https://doi.org/10.4103/JPBS.JPBS_427_23
- Guerra-Blanco, P., Chairez, I., Poznyak, T., & Brito-Arias, M. (2021). Kinetic Analysis of Ozonation Degree Effect on the Physicochemical Properties of Ozonated Vegetable Oils. *Ozone: Science and Engineering*, 43(6), 546-561. <https://doi.org/10.1080/01919512.2020.1868972;SUBPAGE:STRING:FULL>
- Gupta, V., Grewal, M. S., Arya, A., Arora, A., & Goel, A. (2021). Reaching the Depths through Three-Dimensional Irrigation – A Review. *Journal of Evolution of Medical and Dental Sciences*, 10(6), 381-386. <https://doi.org/10.14260/JEMDS/2021/84>
- Haapasalo, M., Shen, Y., Wang, Z., & Gao, Y. (2014). Irrigation in endodontics. *British Dental Journal*, 216(6), 299-303. <https://doi.org/10.1038/SJ.BDJ.2014.204;SUBJMETA>
- Hirahara, Y., Iwata, K., & Nakamuro, K. (2019). Effect of Citric Acid on Prolonging the Half-life of Dissolved Ozone in Water. *Food Safety*, 7(4), 90-94. <https://doi.org/10.14252/FOODSAFETYFSCJ.D-19-00005>
- Huth, K. C., Quirling, M., Maier, S., Kamereck, K., Alkhayer, M., Paschos, E., Welsch, U., Miethke, T., Brand, K., & Hickel, R. (2009). Effectiveness of ozone against endodontopathogenic microorganisms in a root canal biofilm model. *International endodontic journal*, 42 1(1), 3-13. <https://doi.org/10.1111/J.1365-2591.2008.01460.X>
- Ivanov, A. V., Trakhtenberg, S., Bertram, A. K., Gershenzon, Y. M., & Molina, M. J. (2007). OH, HO₂, and ozone gaseous diffusion coefficients. *Journal of Physical Chemistry A*, 111(9), 1632-1637. <https://doi.org/10.1021/JP066558W/ASSET/IMAGES/MEDIUM/JP066558WE00017.GIF>
- Joshi, V., Rawtiya, M., Attur, K., Kamal, A., Bagada, P., & Patel, N. (2022). *Ozone in Conservative Dentistry and Endodontics Medical Science*.
- Kachari, M., Adarsha, M. S., Meena, N., Kumari, A., Sudhanva, M. E., & Vijayalakshmi, L. (2024). Assessment of different irrigation techniques on the penetration depth of different sealers into dentinal tubules by confocal laser scanning microscope: An in vitro comparative study. *Journal of Conservative Dentistry and Endodontics*, 27(4), 388-392. https://doi.org/10.4103/JCDE.JCDE_335_23
- Karlović, Z., Jukić-Krmek, S., Pilipović, A., & Katanec, T. (2021). Dentinal resistance to compressive forces after root canal instrumentation with three different machine endodontics systems. *AMJ*, 14(6), 168-173. <https://doi.org/10.35841/1836-1935.14.6.168-173>
- Kaye, J. A., & Jackman, C. H. (1994). Stratospheric ozone change. *Environmental Science & Technology*, 23, 123-168. https://doi.org/10.1007/978-94-015-3714-8_4
- Kerscher, M., Klein, T., Preuster, P., Wasserscheid, P., Koller, T. M., Rausch, M. H., & Fröba, A. P. (2022). Influence of dissolved hydrogen on the viscosity and interfacial tension of the liquid organic hydrogen carrier system based on diphenylmethane by surface light scattering and molecular dynamics simulations. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(92), 39163-39178. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2022.09.078>
- Khadre, M. A., Yousef, A. E., & Kim, J. G. (2001). Microbiological aspects of Ozone applications in food: A review. *Journal of Food Science*, 66(9), 1242-1252. <https://doi.org/10.1111/J.1365-2621.2001.TB15196.X>
- Kirichenko, A., Li, L., Morandi, M. T., & Holian, A. (1996). 4-hydroxy-2-nonenal-protein adducts and apoptosis in murine lung cells after acute ozone exposure. *Toxicology and applied pharmacology*, 141 2(2), 416-424. <https://doi.org/10.1006/TAAP.1996.0307>

- Kurylo, V. O., Korol, D. M., Rozhko, M. M., Kindii, D. D., Toncheva, K. D., & Kozak, R. V. (2024). EFFECTS OF OZONE TREATMENT ON 0.05% CHLORHEXIDINE BIGLUCONATE SOLUTION: ASSESSMENT OF CRYSTALLOGRAPHY RESULTS IN AN IN VITRO EXPERIMENT. *The Medical and Ecological Problems*, 28(2), 19-28. <https://doi.org/10.31718/MEP.2024.28.2.03>
- Liaqat, S., Tariq, S., Hayat, I., Mobeen, B., Fayyaz, S., Jabeen, H., Khalid, S., Muhammad, N., & Khan, M. A. (2023). Therapeutic Effects and Uses of Ozone in Dentistry: A Systematic Review. *Ozone: Science & Engineering*, 45(4), 387-397. <https://doi.org/10.1080/01919512.2022.2125363>
- Libonati, A., Di Taranto, V., Mea, A., Montemurro, E., Gallusi, G., Angotti, V., Nardi, R., Paglia, L., Marzo, G., & Campanella, V. (2019). Clinical antibacterial effectiveness Healozone Technology after incomplete caries removal. *European journal of paediatric dentistry*, 20(1), 73-78. <https://doi.org/10.23804/EJPD.2019.20.01.14>
- Llena, C., Forner, L., Cambralla, R., & Lozano, A. (2015). Effect of three different irrigation solutions applied by passive ultrasonic irrigation. *Restorative Dentistry & Endodontics*, 40(2), 143. <https://doi.org/10.5395/RDE.2015.40.2.143>
- Lynch, E. (2008). Evidence-based efficacy of ozone for root canal irrigation: Ask the experts. *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry*, 20(5), 287-293. <https://doi.org/10.1111/J.1708-8240.2008.00195.X>
- Mann, H. B., & Whitney, D. R. (1947). On a Test of Whether one of Two Random Variables is Stochastically Larger than the Other. <https://doi.org/10.1214/aoms/1177730491>, 18(1), 50-60. <https://doi.org/10.1214/AOMS/1177730491>
- McClurkin, J. D., & Maier, D. (t.y.). Half-life time of ozone as a function of air conditions and movement. *Julius-Kühn-Archiv*, 381-381. <https://doi.org/10.5073/JKA.2010.425.167.326>
- McClurkin, J. D., Maier, D. E., & Ileleji, K. E. (2013). Half-life time of ozone as a function of air movement and conditions in a sealed container. *Journal of Stored Products Research*, 55, 41-47. <https://doi.org/10.1016/J.JSPR.2013.07.006>
- Mittal, R., Tandan, M., & Kaushik, G. (2022). Antimicrobial efficacy of commercially available ozonated olive oil and sodium hypochlorite with and without ultrasonic activation in primary endodontic infections: A randomized clinical trial. *Endodontology*, 34(2), 102-107. https://doi.org/10.4103/ENDO.ENDO_57_21
- Mohammadi, Z., Shalavi, S., Kinoshita, J. I., Giardino, L., Gutmann, J. L., Banihashem Rad, S. A., Udoe, C. I., & Jafarzadeh, H. (2021). A Review on Root Canal Irrigation Solutions in Endodontics. *Journal of Dental Materials and Techniques*, 10(3), 121-132. <https://doi.org/10.22038/JDMT.2021.56003.1431>
- Moraes, M. M., Coelho, M. S., Nascimento, W. M., Nogales, C. G., de Campos, F. U. F., de Jesus Soares, A., & Frozoni, M. (2021). The antimicrobial effect of different ozone protocols applied in severe curved canals contaminated with *Enterococcus faecalis*: ex vivo study. *Odontology*, 109(3), 696-700. <https://doi.org/10.1007/S10266-021-00592-6>
- Muñoz, F., & Von Sonntag, C. (2000). The reactions of ozone with tertiary amines including the complexing agents nitrilotriacetic acid (NTA) and ethylenediaminetetraacetic acid (EDTA) in aqueous solution. *Journal of the Chemical Society, Perkin Transactions 2*, 10, 2029-2033. <https://doi.org/10.1039/B004417M>
- Mustafa, M. G. (1990). Biochemical basis of ozone toxicity. *Free radical biology & medicine*, 9 3(3), 245-265. [https://doi.org/10.1016/0891-5849\(90\)90035-H](https://doi.org/10.1016/0891-5849(90)90035-H)
- Nagayoshi, M., Kitamura, C., Fukuizumi, T., Nishihara, T., & Terashita, M. (2004). Antimicrobial effect of ozonated water on bacteria invading dentinal tubules. *Journal of endodontics*, 30(11), 778-781. <https://doi.org/10.1097/00004770-200411000-00007>
- Noites, R., Pina-Vaz, C., Rocha, R., Carvalho, M. F., Gonçalves, A., & Pina-Vaz, I. (2014). Synergistic Antimicrobial Action of Chlorhexidine and Ozone in Endodontic Treatment. *BioMed Research International*, 2014, 592423. <https://doi.org/10.1155/2014/592423>

- Nuvolone, D., Petri, D., & Voller, F. (2018). The effects of ozone on human health. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(9), 8074-8088. <https://doi.org/10.1007/S11356-017-9239-3>
- O'Connell, M. S., Morgan, L. A., Beeler, W. J., & Baumgartner, J. C. (2000). A comparative study of smear layer removal using different salts of EDTA. *Journal of Endodontics*, 26(12), 739-743. <https://doi.org/10.1097/00004770-200012000-00019>
- Ozasir, T., Eren, B., Gulsahi, K., & Ungor, M. (2021). The Effect of Different Final Irrigation Regimens on the Dentinal Tubule Penetration of Three Different Root Canal Sealers: A Confocal Laser Scanning Microscopy Study In Vitro. *Scanning*, 2021, 8726388. <https://doi.org/10.1155/2021/8726388>
- Pasha, C., & Narayana, B. (2007). A facile spectrophotometric method for the determination of hypochlorite using rhodamine B. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 18(1), 167-170. <https://doi.org/10.1590/S0103-50532007000100018>
- Pelinsari, S. M., Sarandy, M. M., Vilela, E. F., Novaes, R. D., Schlamb, J., & Gonçalves, R. V. (2024). Ozone Exposure Controls Oxidative Stress and the Inflammatory Process of Hepatocytes in Murine Models. *Antioxidants*, 13(2). <https://doi.org/10.3390/ANTIOX13020212>
- Peters, O. A. (2004). Current Challenges and Concepts in the Preparation of Root Canal Systems: A Review. *Journal of Endodontics*, 30(8), 559-567. <https://doi.org/10.1097/01.DON.0000129039.59003.9D>
- Pires, P. T., Ferreira, J. C., Oliveira, S., Silva, M. J., & Melo, P. R. (2013). Effect of ozone gas on the shear bond strength to enamel. *Journal of Applied Oral Science*, 21(2), 177-182. <https://doi.org/10.1590/1678-7757201302362>
- Pryor, W. A. (1994). Mechanisms of radical formation from reactions of ozone with target molecules in the lung. *Free radical biology & medicine*, 17(5), 451-465. [https://doi.org/10.1016/0891-5849\(94\)90172-4](https://doi.org/10.1016/0891-5849(94)90172-4)
- Rastogi, T., Sharma, S., Singh, A. K., Ahmed, A., & Kumar, A. (2016). Ozone Therapy: A Revolution in Dentistry. *International Journal of Oral Care & Research*, 4(3), 227-230. <https://doi.org/10.5005/JP-JOURNALS-10051-0050>
- Remondino, M., & Valdenassi, L. (2018). Different Uses of Ozone: Environmental and Corporate Sustainability. Literature Review and Case Study. *Sustainability*, 10(12). <https://doi.org/10.3390/SU10124783>
- Rojas-Valencia, M. (2012). *Research on ozone application as disinfectant and action mechanisms on wastewater microorganisms*.
- Sabbah, F., Goes Nogales, C., Zaremski, E., & Martínez Sánchez, G. (2018). Ozone therapy in Dentistry - Where we are and where we are going to? *Ozone therapy global journal*, ISSN-e 2659-8647, Vol. 8, N°. 1, 2018, págs. 37-63, 8(1), 37-63. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6554687&info=resumen&idioma=ENG>
- Sander, L. C., & Sniegowski, L. T. (2017). Determination of Liquid Density. *Journal of research of the National Institute of Standards and Technology*, 122. <https://doi.org/10.6028/JRES.122.008>
- Sarcan, F., Armstrong, A. J., Bostan, Y. K., Kus, E., McKenna, K. P., Erol, A., & Wang, Y. (2023). Ultraviolet-Ozone Treatment: An Effective Method for Fine-Tuning Optical and Electrical Properties of Suspended and Substrate-Supported MoS₂. *Nanomaterials*, 13(23). <https://doi.org/10.3390/NANO13233034>
- Saxena, I., & Kumar, V. (2021). Automatic Version of Ostwald Viscometer for Conductive Liquids. *Instruments and Experimental Techniques*, 64(2), 327-330. <https://doi.org/10.1134/S0020441221010322/TABLES/1>
- Schneider, S. W. (1971). A comparison of canal preparations in straight and curved root canals. *Oral surgery, oral medicine, and oral pathology*, 32(2), 271-275. [https://doi.org/10.1016/0030-4220\(71\)90230-1](https://doi.org/10.1016/0030-4220(71)90230-1)

- Schumacher, H. C. (1935). The Thermal Decomposition of Ozone: Some Remarks on the Paper by M. Ritchie on the Same Subject. *Proceedings of The Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 150(869), 220-222. <https://doi.org/10.1098/RSPA.1935.0097>
- Schwartz, A., S'anchez, G. M., & Sabah, F. (2015). *International Scientific Committee of Ozone Therapy (ISCO3): Madrid Declaration on Ozone Therapy*.
- Seda Gültekin, D. (2025). *Didem Seda GÜLTEKİN, 1 Funda KONT ÇOBANKARA 2 Cleaning Effectiveness of QMix and EDTA When Activated with Different Techniques: An In Vitro Study*. <https://doi.org/10.14744/eej.2025.27147>
- Shahzad, A., Miran, W., Rasool, K., Nawaz, M., Jang, J., Lim, S. R., & Lee, D. S. (2017). Heavy metals removal by EDTA-functionalized chitosan graphene oxide nanocomposites. *RSC Advances*, 7(16), 9764-9771. <https://doi.org/10.1039/C6RA28406J>
- Shapiro, S. S., & Wilk, M. B. (1965). An Analysis of Variance Test for Normality (Complete Samples). *Biometrika*, 52(3/4), 591. <https://doi.org/10.2307/2333709>
- Silva, E. L. da, Morais, B. S. de, & Vivacqua, F. D. (2022). Association of Ozonotherapy to Endodontics, aiming at the tissue repair of periapical lesions - a literature review / Associação da Ozonioterapia à Endodontia, visando o reparo tecidual de lesões periapicais – uma revisão de literatura. *BRAZILIAN APPLIED SCIENCE REVIEW*, 6(4), 1292-1304. <https://doi.org/10.34115/BASRV6N4-005>
- Silva, E. J. N. L., Prado, M. C., Soares, D. N., Hecksher, F., Martins, J. N. R., & Fidalgo, T. K. S. (2020). The effect of ozone therapy in root canal disinfection: a systematic review. *International endodontic journal*, 53(3), 317-332. <https://doi.org/10.1111/IEJ.13229>
- Sinha, N., Asthana, G., Parmar, G., Langaliya, A., Shah, J., Kumbhar, A., & Singh, B. (2021). Evaluation of Ozone Therapy in Endodontic Treatment of Teeth with Necrotic Pulp and Apical Periodontitis: A Randomized Clinical Trial. *Journal of Endodontics*, 47(12), 1820-1828. <https://doi.org/10.1016/J.JOEN.2021.09.006>
- Siqueira, J. F., & Rôças, I. N. (2008). Clinical Implications and Microbiology of Bacterial Persistence after Treatment Procedures. *Journal of Endodontics*, 34(11), 1291-1301.e3. <https://doi.org/10.1016/J.JOEN.2008.07.028>
- Stojanović, N., Krunic, J., Popović, B., Stojičić, S., & Živković, S. (2014). Prevalence of Enterococcus faecalis and Porphyromonas gingivalis in infected root canals and their susceptibility to endodontic treatment procedures: A molecular study. *Srpski arhiv za celokupno lekarstvo*, 142(9-10), 535-541. <https://doi.org/10.2298/SARH1410535S>
- Suh, Y., Patel, S., Kaitlyn, R., Gandhi, J., Joshi, G., Smith, N., & Khan, S. (2019). Clinical utility of ozone therapy in dental and oral medicine. *Medical Gas Research*, 9(3), 163-167. <https://doi.org/10.4103/2045-9912.266997>
- Talib, A. Q., Qasim, A., & Al-Huwaizi, H. F. (2024). *Assessment of the Effect of Different Irrigation Protocols on the Penetration of Irrigation Solution into Simulated Lateral Canals (In Vitro Study)*. <https://doi.org/10.14744/eej.2023.29494>
- Tartari, T., Oda, D. F., Zancan, R. F., da Silva, T. L., de Moraes, I. G., Duarte, M. A. H., & Bramante, C. M. (2017). Mixture of alkaline tetrasodium EDTA with sodium hypochlorite promotes in vitro smear layer removal and organic matter dissolution during biomechanical preparation. *International endodontic journal*, 50(1), 106-114. <https://doi.org/10.1111/IEJ.12595>
- Tjäderhane, L., Carrilho, M. R., Breschi, L., Tay, F. R., & Pashley, D. H. (2009). Dentin basic structure and composition—an overview. *Endodontic Topics*, 20(1), 3-29. <https://doi.org/10.1111/J.1601-1546.2012.00269.X>
- Tonini, R., Salvadori, M., Audino, E., Sauro, S., Garo, M. L., & Salgarello, S. (2022). Irrigating Solutions and Activation Methods Used in Clinical Endodontics: A Systematic Review. *Frontiers in Oral Health*, 3, 838043. <https://doi.org/10.3389/FROH.2022.838043/BIBTEX>

- Torul, D., Omezli, M. M., & Avci, T. (2023). Investigation of the clinical efficacy of CGF and ozone in the management of alveolar osteitis: a randomized controlled trial. *Clinical Oral Investigations*, 27(8), 4521-4529. <https://doi.org/10.1007/S00784-023-05074-3>
- Trambarulo, R., Ghosh, S. N., Burrus, C. A., & Gordy, W. (1953). The Molecular Structure, Dipole Moment, and g Factor of Ozone from Its Microwave Spectrum. *Journal of Chemical Physics*, 21(5), 851-855. <https://doi.org/10.1063/1.1699045>
- Trierveiler Paiva, R. C., Solda, C., Vendramini, F., Vanni, J. R., Baldissarelli Marcon, F., & Fornari, V. J. (2018). Regaining Apical Patency with Manual and Reciprocating Instrumentation during Retreatment. *Iranian Endodontic Journal*, 13(3), 351. <https://doi.org/10.22037/IEJ.V13I3.18020>
- Veneri, F., Filippini, T., Consolo, U., Vinceti, M., & Generali, L. (2024). Ozone therapy in dentistry: An overview of the biological mechanisms involved (Review). *Biomedical Reports*, 21(2), 115. <https://doi.org/10.3892/BR.2024.1803>
- Veneri, F., Lanteri, V., Consolo, U., Checchi, V., & Generali, L. (2025). Ozone in Dentistry: An Updated Overview of Current Applications and Future Perspectives. *Current Oral Health Reports*, 12(1). <https://doi.org/10.1007/S40496-024-00395-Y>
- Versiani, M. A., Martins, J. N. R., & Ordinola-Zapata, R. (2023). Anatomical complexities affecting root canal preparation: a narrative review. *Australian Dental Journal*, 68(S1), S5-S23. <https://doi.org/10.1111/ADJ.12992>
- Vezzu, G., Lopez, J. L., Freilich, A., & Becker, K. H. (2009). Optimization of Large-Scale Ozone Generators. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 37(6 PART 1), 890-896. <https://doi.org/10.1109/TPS.2009.2015452>
- Vijapur, P. V., Vijapur, L., Yaragattimath, P., Govindraj, Raibagi, Mallapur, Y., & Desai, B. (2022). FORMULATION AND EVALUATION OF HERBAL MOUTHWASH CONTAINING NATURAL INGREDIENTS FOR ANTI-MICROBIAL ACTIVITY.
- Wang, J., Wang, X., Li, G., Guo, P., & Luo, Z. (2010). Degradation of EDTA in aqueous solution by using ozonolysis and ozonolysis combined with sonolysis. *Journal of Hazardous Materials*, 176(1-3), 333-338. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.11.032>
- Weerkamp, A. H., Uyen, H. M., & Busscher, H. J. (1988). Effect of zeta potential and surface energy on bacterial adhesion to uncoated and saliva-coated human enamel and dentin. *Journal of dental research*, 67(12), 1483-1487. <https://doi.org/10.1177/00220345880670120801>
- Weidinger, T., Baranka, G., Balázs, R., & Tóth, K. (2011). Comparison of 19th Century and Present Concentrations and Depositions of Ozone in Central Europe. *Acta Silvatica et Lignaria Hungarica*, 7, 23-28. <https://doi.org/10.37045/ASLH-2011-0002>
- Weschler, C. J. (2000). Ozone in indoor environments: concentration and chemistry. *Indoor air*, 10(4), 269-288. <https://doi.org/10.1034/J.1600-0668.2000.010004269.X>
- Włodarski, J., & Chychłowski, M. (2021). Chemically tuned light source with an optical pump. *Photonics Letters of Poland*, 13(2), 46-48. <https://doi.org/10.4302/PLP.V13I2.1101>
- Wong, J., Manoil, D., Näsman, P., Belibasakis, G. N., & Neelakantan, P. (2021). Microbiological Aspects of Root Canal Infections and Disinfection Strategies: An Update Review on the Current Knowledge and Challenges. *Frontiers in Oral Health*, 2, 672887. <https://doi.org/10.3389/FROH.2021.672887/PDF>
- Wu, M. K., Wesselink, P. R., & Walton, P. R. (2000). Apical terminus location of root canal treatment procedures. *Oral surgery, oral medicine, oral pathology, oral radiology, and endodontics*, 89(1), 99-103. [https://doi.org/10.1016/S1079-2104\(00\)80023-2](https://doi.org/10.1016/S1079-2104(00)80023-2)
- Xia, Y., Niu, Y., Cai, J., Liu, C., Meng, X., Chen, R., & Kan, H. (2021). Acute Effects of Personal Ozone Exposure on Biomarkers of Inflammation, Oxidative Stress, and Mitochondrial Oxidative Damage — Shanghai Municipality, China, May–October 2016. *China CDC Weekly*, 3(45), 954-958. <https://doi.org/10.46234/CCDCW2021.232>

- Xu, S., Yan, N., Cui, M., & Liu, H. (2020). Decomplexation of Cu(II)/Ni(II)-EDTA by ozone-oxidation process. *Environmental science and pollution research international*, 27(1), 812-822. <https://doi.org/10.1007/S11356-019-06900-6>
- Yue, W., He, R., Yao, P., & Wei, Y. (2009). Ultraviolet radiation-induced accelerated degradation of chitosan by ozone treatment. *Carbohydrate Polymers*, 77(3), 639-642. <https://doi.org/10.1016/J.CARBPOL.2009.02.015>
- Zakhvatov, A. N., Tarasova, T. V., Vinogradova, A. A., Khaidar, D. A., & Timoshkin, V. O. (2020). Changes of the cytokine profile in patients with traumatic synovitis on the background of ozone therapy. *Science and Innovations in Medicine*, 5(4), 262-266. <https://doi.org/10.35693/2500-1388-2020-5-4-262-266>
- Zand, V., Milani, A. S., Yavari, H. R., Majidi, A. R., & Majidi, A. (2019). The Effects of Different Agitation Techniques of Canal Irrigant on Tubular Penetration of a Bioceramic Sealer. *IEJ Iranian Endodontic Journal*, 14(4), 289-295. <https://doi.org/10.22037/iej.v14i4.25548>
- Zehnder, M. (2006). Root Canal Irrigants. *Journal of Endodontics*, 32(5), 389-398. <https://doi.org/10.1016/J.JOEN.2005.09.014>
- Zhang, J., Guan, M., Xie, C., Luo, X., Zhang, Q., & Xue, Y. (2014). Increased Growth Factors Play a Role in Wound Healing Promoted by Noninvasive Oxygen-Ozone Therapy in Diabetic Patients with Foot Ulcers. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/273475>
- Ziyaina, M., & Rasco, B. (2021). Inactivation of microbes by ozone in the food industry: A review. *African Journal of Food Science*, 15(3), 113-120. <https://doi.org/10.5897/AJFS2020.2074>

EKLER

EK 1 Viskozite Ölçümlerinin Örneklem Boyutunu Belirlemek İçin Yapılan Ön Çalışmanın Sonuçları

Yapılan literatür taramalarında Ostwald Viskozimetresi kullanılarak, irrigasyon solüsyonlarının viskozitesini ölçen çalışmalar bulunmuştur fakat bu çalışmalarda standart sapma değerleri verilmemiş ve zayıf istatistiksel yöntemler kullanılmıştır. Bu sebeple örneklem büyüklüğünü belirleyebilmek için bir pilot çalışma yapıp, bu çalışma üzerinden power analizi yapılması gerekmiştir.

Tablo Ek 1: Viskozite Ölçümleri Pilot Çalışması Ham Verileri

SOLÜSYON	GEÇİŞ SÜRELERİ (6 TEKRAR) (SANİYE)	YOĞUNLUK (G/CM ³)	VİSKOZİTELER (MPA·S)
NAOCL %5	140	1.0712	1.4997
	141		1.5104
	141		1.5104
	140		1.4997
	142		1.5211
	140		1.4997
OZON-NAOCL %5	130	1.0302	1.3393
	129		1.3290
	132		1.3599
	130		1.3393
	130		1.3393
	131		1.3496
NAOCL %2.5	128	1.0081	1.2904
	130		1.3105
	127		1.2803
	127		1.2803
	127		1.2803
	128		1.2904
OZON-NAOCL %2.5	110	1.0043	1.1047
	110		1.1047
	109		1.0947
	109		1.0947
	110		1.1047
	110		1.1047
NAOCL %1	108	1.0101	1.0909
	107		1.0808
	107		1.0808
	108		1.0909
	106		1.0707
	108		1.0909

OZON-NAOCL %1	106		1.0650
	106		1.0650
	104	1.0047	1.0449
	104		1.0449
	105		1.0549
	104		1.0449
	104		1.0449
EDTA	180		1.9460
	182		1.9676
	182	1.0811	1.9676
	181		1.9568
	183		1.9784
	181		1.9568
	181		1.9568
OZON-EDTA	198		2.1574
	200		2.1792
	200	1.0896	2.1792
	200		2.1792
	200		2.1683
	199		2.1792
	200		2.1792
CHX	124		1.2525
	126		1.2727
	124	1.0101	1.2525
	124		1.2525
	128		1.2929
	124		1.2525
	124		1.2525
OZON-CHX	125		1.2590
	124		1.2489
	125	1.0072	1.2590
	127		1.2791
	125		1.2590
	125		1.2590
	125		1.2590
SALİN	100		1.0150
	103		1.0454
	102	1.0150	1.0353
	100		1.0150
	102		1.0353
	100		1.0150
	100		1.0150
OZON-SALİN	100		1.0067
	105		1.0570
	102	1.0067	1.0268
	100		1.0067
	103		1.0369
	102		1.0268
	102		1.0268

Kalibrasyon için distile su kullanıldı. **Geçiş süresi:** 100 saniye **Yoğunluk:** 0.995 g/cm³ **Viskozite:** 1.000 mPa·s

EK 2 Alan Ölçümü İçin Yazdığımız ImageJ Makrosu

```
macro "Polar Alan (mm^2)" {
    // Varsayım: x = r, y = theta; görüntü BINARY (beyaz=255)
    // 1) Ölçek (mm/pixel) gereklidir:
    getPixelSize(unit, pw, ph, pd); // pw = mm/pixel (x yönü)
    if (unit==" " || pw==0) {
        exit("Önce Analyze ? Set Scale ile mm/pixel gir.");
    }

    // 2) Açıl aralığı (derece) sor
    angle_deg = getNumber("Toplam açıl aralığı (°) ?", 360);
    if (angle_deg<=0) exit("Geçersiz açıl.");

    // 3) Geometri ve adımlar
    W = getWidth(); // x (r piksel)
    H = getHeight(); // y (theta piksel)
    dr = pw; // mm/pixel
    dtheta = (angle_deg*PI/180.0)/H; // rad/pixel (yön)

    // 4) Alan hesabı
    area = 0.0; // mm^2
    // İstersen hız için profiler kapat: setOption("DisablePopup",
true);

    for (y=0; y<H; y++) {
        for (x=0; x<W; x++) {
            if (getPixel(x,y) > 0) { // beyaz piksel
                r = x * dr; // mm
                area += r * dr * dtheta; // r·r·??
            }
        }
    }

    // 5) Sonucu göster
    showMessage("Alan Hesabı",
        "Alan = " + d2s(area, 6) + " mm^2\n" +
        "(angle="+d2s(angle_deg,3)+"°, dr="+d2s(dr,6)+" mm/pix,
d?="+d2s(dtheta,6)+" rad/pix)"
    );
}
```

EK 3 Her Açıdaki (360°) Penetrasyon Ölçümü İçin Yazdığımız ImageJ Makrosu

```
macro "Penetrasyon Ölçüm [F1]" {
    run("Set Measurements...", "mean min median max redirect=None
decimal=3");
    getPixelSize(unit, pw, ph, pd);
    w = getWidth(); h = getHeight();
    run("Clear Results");
    for (y=0; y<h; y++) {
        rpx = NaN;
        for (x=w-1; x>=0; x--) {
            if (getPixel(x, y) > 0) {
                rpx = x; break;
            }
        }
        setResult("row(y)", y, y);
        setResult("r_px", y, rpx);
        if (!isNaN(rpx)) setResult("r_"+unit, y, rpx*pw);
    }
    updateResults();
}
```