



TÜRKİYE CUMHURİYETİ
MARMARA ÜNİVERSİTESİ
SAĞLIK BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DIŞ KÖK REZORPSİYON RESTORASYONUNUN BİYOMEKANİK STRESLER ALTINDA DEĞERLENDİRİLMESİ

ŞEVVAL ÇELEBİ
DOKTORA TEZİ

DANIŞMAN
PROF. DR. HESNA SAZAK ÖVEÇOĞLU
ENDODONTİ DOKTORA PROGRAMI

İSTANBUL- 2025



TÜRKİYE CUMHURİYETİ
MARMARA ÜNİVERSİTESİ
SAĞLIK BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DIŞ KÖK REZORPSİYON RESTORASYONUNUN BİYOMEKANİK STRESLER ALTINDA DEĞERLENDİRİLMESİ

ŞEVVAL ÇELEBİ
DOKTORA TEZİ

DANIŞMAN
PROF. DR. HESNA SAZAK ÖVEÇOĞLU
ENDODONTİ DOKTORA PROGRAMI

İSTANBUL- 2025

BEYAN

Bu tez çalışmasının kendi çalışmam olduğunu, tezin planlanmasından yazımına kadar bütün safhalarda etik dışı davranışımın olmadığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve etik kurallar içinde elde ettiğimi, bu tez çalışması ile elde edilmemiş bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları da kaynaklar listesine aldığımı, yine bu tezin çalışılması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığı beyan ederim.

Şevval ÇELEBİ



TEŞEKKÜR

Doktora eğitimim süresince hem akademik hem de manevi anlamda desteğini her zaman yanımda hissettiğim, zorluklarla karşılaştığım anlarda bana rehberlik eden ve sadece akademik alanda değil, hayata karşı da beni eğiten çok değerli danışmanım Prof. Dr. Hesna Sazak Öveçoğlu'na en içten şükranlarımı sunarım.

Teorik ve pratik eğitimime katkıda bulunan Endodonti Anabilim Dalındaki değerli hocalarım Prof. Dr. Nevin Kartal, Prof. Dr. Hale Cimilli, Prof. Dr. Emre İriboz, Doç. Dr. Dilek Türkaydın, Dr. Öğr. Üyesi Ayşe Karadayı, Dr. Öğr. Üyesi Selin Göker Kamalı, Dr. Öğr. Üyesi İdil Özden ve diğer tüm hocalarıma teşekkür ederim.

Bu süreçte başından beri yanımda olan sevgili dönem arkadaşlarım Dt. İrem Coşar Tüfekçi, Dt. Büşra Sevinç ve birlikte çalıştığım tüm arkadaşlarıma da ayrıca teşekkür ederim.

Her zaman yanımda olan ve bugünlere gelmemi sağlayan canım annem Kıymet Çakar'a sonsuz minnettarım.

Hayatımda oldukları için çok şanslı hissettiğim, her zaman yanımda olan ve beni destekleyen canım arkadaşlarım Ozan Fikret Sayman, Dr. Rumeysa Bilici Geçer ve Merve Kalaycı'ya da teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR LİSTESİ	I
ŞEKİL LİSTESİ	III
TABLO LİSTESİ.....	IV
1.ÖZET	1
2. SUMMARY	2
3. GİRİŞ VE AMAÇ	3
4. GENEL BİLGİLER	5
4.1 KÖK REZORPSİYONLARI	5
4.1.1 Kök rezorpsiyonunun tarihsel gelişimi	5
4.1.2 Kök rezorpsiyonunun histolojik özellikleri	7
4.1.3 Kök rezorpsiyonunun sınıflandırılması	8
4.1.3.1 İç kök rezorpsiyonu	10
4.1.3.1.1 Enflamatuvar iç kök rezorpsiyonu.....	10
4.1.3.1.2 Replasman iç kök rezorpsiyonu.....	11
4.1.3.1.3 İç kök rezorpsiyonun etyolojisi	12
4.1.3.1.4 İç kök rezorpsiyonun histopatolojisi.....	13
4.1.3.1.5 İç kök rezorpsiyonun klinik özellikleri.....	14
4.1.3.1.6 İç kök rezorpsiyonunun radyolojik özellikleri.....	15
4.1.3.2 Dış kök rezorpsiyonu	16
4.1.3.2.1 Enflamatuvar dış kök rezorpsiyonu	17
Enflamatuvar dış kök rezorpsiyonun etyolojisi	18
Enflamatuvar dış kök rezorpsiyonun histolojisi	19
Enflamatuvar dış kök rezorpsiyonun klinik özellikleri	20
Enflamatuvar dış kök rezorpsiyonun radyolojik özellikleri	20
4.1.3.2.2 Replasman dış kök rezorpsiyonu.....	21
Replasman dış kök rezorpsiyonun etyolojisi	21
Replasman dış kök rezorpsiyonun histolojisi	22
Replasman dış kök rezorpsiyonun klinik özellikleri	22
Replasman dış kök rezorpsiyonun radyolojik özellikleri	23
4.1.3.2.3 Servikal dış kök rezorpsiyonu	23
Servikal dış kök rezorpsiyonunun etyolojisi	24
Servikal dış kök rezorpsiyonunun histolojik özellikleri	25
Servikal dış kök rezorpsiyonunun klinik özellikleri.....	25
Servikal dış kök rezorpsiyonunun radyolojik özellikleri.....	26
4.1.3.2.4 Dış kök yüzey rezorpsiyonu	27
4.1.3.2.5 Geçici apikal yıkım.....	29
4.1.4 Dış kök rezorpsiyonu tedavisinde tercih edilen restoratif materyaller	30
4.1.4.1 Cam iyonomer siman.....	30
4.1.4.2 Mineral trioksit agregat (MTA).....	31

4.1.4.3 Biodentin	32
4.1.4.4 Diğer tamir materyalleri	34
Amalgam	34
Kompozit	34
Çinko oksit ojenol.....	35
Guta perka.....	35
4.2 STRES ANALİZ YÖNTEMLERİ	35
4.2.1 Gerinim ölçer ile analiz yöntemi	36
4.2.2 Fotoelastik analiz yöntemi.....	37
4.2.3 Holografik interferometre analiz yöntemi	38
4.2.4 Kırılgan vernikle kaplama yöntemi	38
4.2.5 Sonlu elemanlar analizi	39
4.2.5.1 Sonlu elemanlar metodu ile stres analizi ve biyomekanikle ilgili temel kavramlar	42
4.2.5.1.1 Element.....	42
4.2.5.1.2 Düğüm	42
4.2.5.1.3 Analiz modeli için ağ tasarım süreci	42
4.2.5.1.4 Geometrik ve katı yapı modellemelerinin geliştirilmesi	42
4.2.5.1.5 Kuvvetler	43
4.2.5.1.6 Stres	43
4.2.5.1.6 Strain.....	43
4.2.5.1.7 Elastisite modülü	43
4.2.5.1.8 Poisson oranı.....	44
4.2.5.1.9 Von mises stresi.....	44
4.2.5.2 Sonlu elemanlar yöntemi ile yapısal inceleme adımları.....	45
4.2.5.2.1 Yapının modelinin oluşturulması ve sonlu elemanlara ayrıştırılması	45
4.2.5.2.2 Analiz için gerekli verilerin tanımlanması	46
4.2.5.2.3 Analizin yürütülmesi ve sonuçların elde edilmesi.....	47
5. GEREÇ VE YÖNTEM	48
5.1 MANDIBULAR KEMİK DOKULARININ MODELLENMESİ	48
5.2 DIŞ VE PERIODONTAL DOKULARIN MODELLENMESİ.....	49
5.3 REZORPSİYON KAVİTESİ VE KANAL DOLUM MODELLERİNİN OLUŞTURULMASI.....	50
5.4 MATEMATİKSEL MODELLERİN OLUŞTURULMASI VE MESHLEME	55
5.5 MALZEME ÖZELLİKLERİNİN TANIMLANMASI	56
5.6. YÜKLEME KOŞULLARI VE SINIR ŞARTLARI.....	57
5.7. SONLU ELEMANLAR ANALİZİ VE GERİLME DAĞILIMININ İNCELENMESİ.....	57
6. BULGULAR.....	58
6.1 TÜM DIŞTE OLUŞAN STRESLER.....	58
6.2 PERIODONTAL LİGAMENTTE OLUŞAN STRESLER	62
7. TARTIŞMA VE SONUÇ	65
8. KAYNAKLAR.....	74
9. ÖZGEÇMİŞ	88
10. BİLİMSEL FAALİYETLER.....	89

KISALTMALAR LİSTESİ

SEA: Sonlu elemanlar analizi

MTA: Mineral trioksit agregat

pH: potansiyel hidrojen

KIBT: Konik Işınlı Bilgisayarlı Tomografi

OPG: Osteoprogenitör

RANK: Reseptör Aktivator Nükleer Kappa

RANKL: Reseptör Aktivator Nükleer Kappa Ligandı

PDL: Periodontal ligament

İKR: İç kök rezorpsiyonu

TRAP: Tartarat dirençli asit fosfataz

EDKR: Enflamatuar dış kök rezorpsiyonu

RVG: RadioVisioGraphy

PSP: Photostimulable Phosphor Plate

RDKR: Replasman dış kök rezorpsiyonu

SDKR: Servikal dış kök rezorpsiyonu

CEJ: Sementodentin bileşkesi

%: yüzde

Al₂O₃: Alüminyum oksit

SiO₂: Silisyum oksit

CaO: kalsiyum oksit

SrO: Stronsiyum oksit

ZnO: çinko oksit

IRM: Ara restoratif malzeme

ISO: International Organization for Standardization

ZOE: çinko oksit ojenoldür

N: Newton

MPa: Megapaskal

N/m²: Newton/metrekare

SI: Uluslararası Birimler Sistemi

GPa: Gigapascal

CAD: bilgisayar destekli tasarım

BT: üç boyutlu bilgisayarlı tomografi

Mm: Milimetre



ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1: Kortikal Kemik Modeli

Şekil 2: Trabeküler Kemik Modeli

Şekil 3: Modelin fiziksel görüntüsü

Şekil 4: Model E1 Görseli

Şekil 5: Model E2 Görseli

Şekil 6: Model E3 Görseli

Şekil 7: Model E4 Görseli

Şekil 8: Model E5 Görseli

Şekil 9: Model E6 Görseli

Şekil 10: Model E7 Görseli

Şekil 11: Model E8 Görseli

Şekil 12: Ağ görüntüsü hazırlanmış model

Şekil 13: Yükleme koşulu örneği

Şekil 14: Oblik kuvvet altında apikal seviyedeki rezorpsiyon grubunda tüm dişte oluşan stres dağılımı

Şekil 15: Oblik kuvvet altında orta seviyedeki rezorpsiyon grubunda tüm dişte oluşan stres dağılımı

Şekil 16: Dikey kuvvet altında apikal seviyedeki rezorpsiyon grubunda tüm dişte oluşan stres dağılımı

Şekil 17: Dikey kuvvet altında orta seviyedeki rezorpsiyon grubunda tüm dişte oluşan stres dağılımı

Şekil 18: Oblik kuvvet altında apikal seviyedeki rezorpsiyon grubunda PDL’de oluşan stres dağılımı

Şekil 19: Oblik kuvvet altında orta seviyedeki rezorpsiyon grubunda PDL’de oluşan stres dağılımı

Şekil 20: Vertikal kuvvet altında apikal seviyedeki rezorpsiyon grubunda PDL’de oluşan stres dağılımı

Şekil 21: Vertikal kuvvet altında orta seviyedeki rezorpsiyon grubunda PDL’de oluşan stres dağılımı

TABLO LİSTESİ

Tablo 1: Kök rezorpsiyonlarının sınıflandırılması

Tablo 2: Farklı analiz modellerine ait eleman ve düğüm sayıları

Tablo 3: Malzemelerin elastik modülü ve Poisson oranları

Tablo 4: Tüm Dişte Oluşan Maksimum Stres Değerleri (MPa)

Tablo 5: PDL'de gözlenen maksimum stres değerleri



1.ÖZET

Tezin başlığı : Dış Kök Rezorpsiyon Restorasyonunun Biyomekanik Stresler Altında Değerlendirilmesi

Öğrencinin Adı Soyadı : Şevval Çelebi

Danışmanın Adı Soyadı : Prof. Dr. Hesna Sazak Öveçoğlu

Programın Adı : Endodonti Doktora Programı

Amaç : Kök rezorpsiyonu, dişlerin yapısal bütünlüğünü zayıflatan ve tedavisi zorlayıcı bir endodontik patolojidir. Bu çalışmada, dış kök rezorpsiyonunun restorasyonunda kullanılan çeşitli dolum ve tamir materyallerinin biyomekanik etkinliklerinin değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Farklı materyallerin köklerin stres direncini artırma kapasiteleri incelenmiş, çalışmamızda kullanılan materyallerin restorasyon süreçlerinde sağladığı biyomekanik destek etkinliği analiz edilmiştir.

Gereç ve Yöntem: Bu çalışmada, mandibular premolar dişlerde dış kök rezorpsiyonuna bağlı oluşan stres dağılımı Sonlu Elemanlar Analizi (SEA) ile incelenmiştir. Apikal ve orta seviye rezorpsiyon içeren sekiz model, Mineral Trioksit Agregat (MTA), Biodentine ve bu materyallerin gutta-perka ile kombinasyonlarıyla restore edilmiştir. Modeller, dikey ve oblik streslere maruz bırakılarak biyomekanik dayanıklılıkları değerlendirilmiştir. Diş modelleri ve destek dokular, ANSYS Spaceclaim ile tasarlandıktan sonra ANSYS Workbench kullanılarak analiz için hazırlanmıştır. Sonlu elemanlar çözümleri ise LS-DYNA ile gerçekleştirilmiştir.

Bulgular: Kanalin tamamen Biodentine veya MTA ile obturasyonu, stres seviyelerini belirgin biçimde düşürmüştür; Biodentine materyali göreceli bir üstünlük göstermiştir. Gutta-perka ile yapılan hibrit restorasyonlar, özellikle oblik yüklemeler altında yüksek stres konsantrasyonları oluşturmuştur.

Sonuç: MTA ve Biodentine, dış kök rezorpsiyonu bulunan dişlerde biyomekanik kuvvetlere karşı direnci artırmada etkili materyaller olarak saptanmıştır. Ancak, gutta-perka ile kombinasyonları direnci olumsuz yönde etkilemiştir. Bu bulgular , rezorpsiyon tespit edilen dişlerin restorasyonunda materyal seçiminin önemini vurgulamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Dış rezorpsiyon, sonlu elemanlar analizi, MTA, biyoseramik, biyomekanik

2. SUMMARY

Title of Thesis: Evaluation of Restoration External Root Resorption Under Biomechanical Stress

Student Name, Surname: Şevval Çelebi

Supervisor Name : Prof. Hesna Sazak Öveçoğlu

Program Name : Endodontics PhD Program

Objective: External root resorption is a challenging endodontic pathology that weakens tooth structure. This study aims to evaluate the biomechanical effectiveness of various filling and repair materials used in external root resorption restoration. The capacity of these materials to enhance stress resistance in roots was analyzed, comparing their biomechanical support in restoration processes.

Materials and Methods: The stress distribution in mandibular premolar teeth with external root resorption was analyzed using Finite Element Analysis . Eight models with apical and mid-level resorption were restored with Mineral Trioxide Aggregate (MTA), Biodentine, and combinations of these materials with gutta-percha. Models were subjected to vertical and oblique stresses, and their biomechanical durability was assessed. Tooth models and supporting tissues were designed using ANSYS Spaceclaim and analyzed with ANSYS Workbench. Finite element solutions were computed with LS-DYNA.

Results: Complete obturation with Biodentine or MTA reduced stress levels significantly, with Biodentine showing superior performance. Hybrid restorations with gutta-percha, particularly under oblique loads, led to high stress concentrations.

Conclusion: MTA and Biodentine are effective in enhancing resistance to biomechanical forces in teeth with external root resorption. However, gutta-percha combinations negatively affected resistance. These findings highlight the importance of material selection for restoring teeth with resorption.

Keywords: External resorption, finite element analysis, MTA, bio ceramics, biomechanic

3. GİRİŞ ve AMAÇ

Endodontik tedavinin başlıca hedefi, dişin doğal fonksiyonlarını mümkün olduğunca uzun süre devam ettirebilmesini sağlamaktır. Ancak, bazı kompleks kök patolojileri, tedavi sürecini ve restorasyonun uzun dönem başarısını olumsuz yönde etkileyebilir (Chatvanitkul ve Lertchirakarn, 2010). Klastik aktiviteye bağlı olarak zaman içinde dişin sert dokularında meydana gelen kayıplar kök rezorpsiyonu ile sonuçlanır (Patel ve Ford, 2007). Bu kayıplar fizyolojik ya da patolojik olabilir; süt dişlerinin doğal gelişim sürecinde görüldüğünde fizyolojik olarak nitelendirilirken, daimi dişlerde oluşan sert doku kayıpları patolojik kabul edilir (Bille ve ark., 2008).

Travma, enflamasyon, ortodontik tedaviler, periodontal hastalıklar, bazı neoplazik oluşumlar, gömülü dişler ve sistemik hastalıklar gibi faktörler, patolojik kök rezorpsiyonlarının ortaya çıkışını etkileyebilir; buna ek olarak, nedeni anlaşılamayan idiyopatik kökenli rezorpsiyonlar da görülebilir (Bakland, 1992). Geçmişten günümüze, kök rezorpsiyonlarına dair çeşitli sınıflandırmalar yapılmıştır. Temelde, rezorpsiyonun kökle ilişkisine bağlı olarak iç ve dış rezorpsiyon olarak iki ana kategoriye ayrılmıştır (Tronstad, 1988).

Periyodonsiyum ile kök kanalının olağan dışı bir birleşimini içeren dış kök rezorpsiyonları, diş yapısının geri kalanını zayıflatarak endodontik tedavinin prognozunu zorlaştırabilir. Bu dişler, oklüzal yüklere dayanabilecek materyaller ile restore edilmelidir (Silveira ve ark., 2009).

MTA, kök rezorpsiyonu tedavisinde sıkça tercih edilen materyallerden biridir; mikrosızıntıyı önleme, biyouyumluluk ve periradiküler dokularla etkileşiminde rejeneratif özellikleri ile öne çıkar (Torabinejad ve Chivian, 1999). Yeni nesil bir kalsiyum silikat çimentosu olan Biodentine, trikalsiyum silikat, kalsiyum karbonat, zirkonyum oksit ve su bazlı bir sıvı içeriği ile formüle edilmiştir. Endodontik endikasyonlar açısından MTA ile önemli benzerlikler taşımakla birlikte, Biodentine daha kısa sürede sertleşir ve 24 saat içerisinde daha yüksek bir push-out bağlanma dayanımı sağlar (Grech ve ark., 2013a).

Endodontik işlemlerde en yaygın dolgu materyallerinden biri olan gutta-perka, rezorpsiyon vakalarında biyouyumlu materyallerle rezorpsiyon kavitesinin doldurulmasının ardından kanalın geri kalan kısmının gutta-perka ile doldurulması tekniğinde de tercih edilir; bu yaklaşım "hibrit teknik" olarak bilinir (Hsien ve ark., 2003; Patel ve ark., 2010).

Bu çalışmanın amacı, sonlu elemanlar analizi (SEA) kullanılarak farklı materyaller ve tekniklerle restore edilen, farklı seviyelerde dış rezorpsiyon kaviteleri simüle edilmiş köklerde

meydana gelen biyomekanik stresleri değerlendirmektir. Çalışmada farklı kök seviyelerinde dış rezorpsiyon boşluklarına sahip mandibular premolar dışler modelleme çalışmaları ile oluşturulmuştur. Spaceclaim modelleme programı kullanılarak mine, dentin, kompozit dolgu, kortikal kemik, süngerimsi kemik, periodontal ligament, gutta-perka dolgu, Biodentine ve MTA'dan oluşan sekiz farklı restore edilmiş dış modeli geliştirilmiştir.

Modellemede, kökün apikal ve orta seviyelerinde dış rezorpsiyon kaviteleri bulunan iki grup oluşturulmuştur. Kavitelerin restorasyonunda yalnızca Biodentine, yalnızca MTA veya gutta-perka ile kombinasyon halinde MTA ya da Biodentine kullanılmıştır. Çalışmadan elde edilen bulguların, dış kök rezorpsiyonu görülen dışlerde uygulanan tedavi yöntemleri ve bu tedavilerde kullanılan materyallerin biyomekanik yüklenmelere karşı dışin uzun dönem prognozu üzerindeki etkileri konusunda literatüre katkı sağlaması beklenmektedir.



4. GENEL BİLGİLER

4.1 Kök Rezorpsiyonları

Kök rezorpsiyonu, odontoklastik hücrelerin aktivasyonu sonucunda ortaya çıkan, diş sert dokularında meydana gelen doku kaybını ifade eder. Amerikan Endodonti Derneği tarafından, dentin, sement veya kemik dokusunda kayba yol açan fizyolojik ya da patolojik bir süreç olarak tanımlanan bu durum, dişin yapısında geri dönüşü olmayan hasarlara neden olabilir (Garg ve Garg, 2018; Patel ve Ford, 2007). Rezorpsiyon, süt dişlerinde doğal bir fizyolojik süreç olarak kabul edilirken, daimi dişlerde ortaya çıktığında genellikle patolojik bir özellik taşır ve tedavi gerektirir. Daimi dişlerdeki bu tür rezorpsiyonlar genellikle travma, ortodontik tedavi, tümör, kronik enfeksiyonlar veya diş hareketi sonrası periodontal dokuda artan basınca bağlı olarak meydana gelebilir (Andreasen, 1970b; Bolhari ve ark., 2013; Harokopakis-Hajishengallis, 2007)

Patolojik kök rezorpsiyonu, kontrolsüz ve istenmeyen hücresel aktiviteler sonucu gelişir ve bu süreçte, osteoklastlar, sementoklastlar ve dentinoklastlar gibi çok çekirdekli dev hücrelerin oluşumu tetiklenir. Bu hücrelerin artan aktivitesi sonucunda diş dokusu kalıcı hasara uğrayarak doku kaybı meydana gelir. Rezorpsiyon, diş köklerinin diş yüzeyinde sınırlı kalabileceği gibi, ilerleyerek potansiyel olarak yıkıcı bir hal alabilir. Bu süreç, dişin restoratif işlemlerle düzeltilemeyecek kadar zarar görmesine ve hatta çekim ihtiyacı doğuracak seviyeye ulaşmasına yol açabilir (Bolhari ve ark., 2013; Harokopakis-Hajishengallis, 2007; Kheirieh ve ark., 2014; Mesgarani ve ark., 2014; Patel, Dawood, ve ark., 2009)

Fizyolojik olarak sürekli yenilenen kemik dokusunun aksine, diş yapısındaki rezorpsiyon süreci her zaman inflamatuvar özellik taşır ve genellikle patolojiktir. Dişlerdeki rezorpsiyonun temelinde inflamasyon, hücresel aktivite artışı ve kimyasal irritasyon gibi faktörler bulunur. Bu irritasyon, dentin, sement ve kemik dokularında çeşitli kimyasal değişikliklere yol açar ve diş yüzeylerinde doku kaybına neden olur (Bille ve ark., 2008; Bolhari ve ark., 2013; Harokopakis-Hajishengallis, 2007). Özellikle daimi dişlerde meydana gelen rezorpsiyonlar, tedavi edilmedikleri takdirde erken diş kaybına neden olabilecek ciddi bir klinik sorun teşkil eder. Rezorpsiyon vakalarında, patolojik sürecin sınırlanması ve diş sağlığının korunabilmesi için erken tanı ve müdahale büyük önem taşır (Andreasen ve Andreasen, 1988; Kaval ve ark., 2018)

4.1.1 Kök rezorpsiyonunun tarihsel gelişimi

En eski rezorpsiyon raporu, 1530 yılında Michael Blum tarafından, muhtemelen diş cerrahisi bilimi ve sanatına dair ilk kitap olan ‘Dişlerin Cerrahi Ameliyatı, Bilimi ve Sanatı Hakkında’

adlı eserde tanımlanmıştır (Silva ve ark., 2008). 1806 yılında, Josef Fox, diş rezorpsiyonuna dair ilk sistematik bilgileri sunmuş ve bu patolojik süreci kemik tümörlerine benzer bir biçimde tanımlamıştır (Fox, 1806). 1829 yılında, Bell, hem dış hem de iç "absorptif" bozuklukların varlığını kabul etmiştir. Dişlerin anatomi, fizyoloji ve hastalıklarına dair eserinde, yalnızca gözlemlerini detaylandırmakla kalmamış, aynı zamanda bu sürecin alveolar kemiği üzerindeki etkilerini de vurgulamıştır. Ancak, yazılarında sıklıkla kemik ve diş yapıları birbirinin yerine kullanılmıştır (Bell, 1829).

1849 yılında Jared Robin tarafından yayımlanan bir makalede, rezorpsiyonun çok çekirdekli hücrelerle olan bağlantısı ilk defa vurgulanmıştır (Hammarstrom ve Lindskog, 1985). 19. yüzyılın ortalarına gelindiğinde, Bates absorpsiyon sürecini ele alarak 1856'da bu kavramın gelişimine katkı sağlamıştır (Bates, 1856). Ancak, kalıcı dişlerde "absorpsiyon" vakasıyla karşılaşan Sir John Tomes, bu durumu dikkate değer ve anlamlı bir şekilde gözlemlemiştir. 1859 yılında yayımladığı 'A System of Dental Surgery' adlı eserinde bu vakayı ele almış ve kemik rezorpsiyonunda osteoklastların kritik bir rol oynadığını belirtmiştir (Tomes, 1859).

Kalıcı dişlerle ilgili olarak "rezorpsiyon" terimi ilk kez 1898'de Broomell tarafından kullanılmış, ancak diş hekimliği camiası tarafından yaygın olarak kabul edilmemiştir (Steadman, 1942). 20. yüzyılın başlarında, 1922'de Becks ve Marshall, absorpsiyon ve rezorpsiyon terimleri arasındaki terminolojik farkları açıklığa kavuşturmak üzere bir çalışma yayımlamışlardır. Bu çalışma, özellikle kalıcı dişlerde bu iki terimin kullanımına yönelik önemli bir tartışmayı gündeme getirmiştir ve yapılan çeşitli araştırmalar bu farkları vurgulamıştır (Becks ve Marshall, 1932).

1930'ların başlarında, absorpsiyon ve rezorpsiyon arasındaki ayrımı küresel ölçekte ele alan temel isimler Gottlieb & Orban ve Kronfeld olmuştur. Gottlieb & Orban, özellikle ortodonti sırasında meydana gelen rezorpsiyon üzerine yoğunlaşan ve rezorptif süreci radyografik ve histolojik detaylarla inceleyen bir metin yayımlamışlardır. Kronfeld ise "absorban organ" olarak adlandırdığı ve kalıcı dişlerin sürmesi sırasında süt dişi kökünün doğal olarak yıkılmasını ifade eden kavrama odaklanarak, rezorpsiyonun varlığı, etiyolojileri ve oklüzal travma, idiyopatik durumlar, süt dişleri, pulpa rolü, gömülü dişler, radyografik değerlendirmeler, pulpasız dişlerde, yeniden konumlandırılan dişlerde, tümörlerin etkisi, ortodonti sırasında ve sement onarımındaki rolü gibi birçok farklı bağlamda bu sürecin ayrıntılarına değinmiştir (Gottlieb ve Orban, 1931; Kronfeld, 1949).

Penick, 1963 yılında kök rezorpsiyonunun klinik yönetimine ilişkin kılavuzlar sunmuş, 1973'te ise Amerikan Endodontistler Birliği (American Association of Endodontists) tarafından

rezorpsiyon, kök rezorpsiyonu, iç ve dış rezorpsiyon kavramlarının tanımlanmasıyla bu durum ve beraberindeki zorluklar endodontik alanda belirgin bir odak haline getirilmiştir. 1974 yılında Frank, apikal ve iç rezorpsiyonu ve bu durumların klinik yönetim stratejilerini daha ayrıntılı olarak ele almıştır. Rezorpsiyonun kapsamlı bir incelemesi ve ayrıntılı yönetimine yönelik muhtemelen ilk kapsamlı çalışma ise, 1976 yılında Chivian tarafından "Kök Rezorpsiyonu" başlıklı bir bölümde sunulmuştur (Chivian ve ark., 1976; Frank, 1974; Penick, 1963).

4.1.2 Kök rezorpsiyonunun histolojik özellikleri

Osteoklastlar, dalak ya da kemik iliğinden köken alan monosit-makrofaj soyundaki tek çekirdekli öncü hücrelerin birleşmesiyle oluşan, kemiğin rezorpsiyonunu gerçekleştiren, hareketli ve çok çekirdekli dev hücrelerdir. Buna karşılık, osteoblastlar ve osteositler, osteoklastlardan farklı olarak iskelet kaynaklı prekürsör hücrelerden türemektedir (McHugh ve ark., 2007; Soltanoff ve ark., 2009). Osteoklastlar, yaralanma veya irritasyon bölgesine birçok proinflatuar sitokin salınımıyla çekilir ve kemik yüzeyine tutunarak görevlerini yerine getirir. Mineralize hücre dışı matrise temas ettiklerinde, aktif rezorpsiyon yapan osteoklastların aktin iskeleti yeniden düzenlenir ve hücre zarının bir kısmında organel içermeyen bir mühürleme alanı oluşturur. Bu mühürleme alanı, osteoklastların sert doku yüzeyi ile yakın temas kurmasını sağlar ve sert dokuların rezorpsiyonu için asidik bir mikroçevre oluşturarak dış ortamdan izole bir bölge olarak işlev görür (Pierce, 1989).

Odontoklastlar, dental sert dokuları rezorbe eden hücrelerdir ve morfolojik olarak osteoklastlara benzerlik gösterirler. Ancak odontoklastlar, osteoklastlardan daha küçük olup daha az çekirdeğe ve daha küçük mühürleme alanlarına sahiptirler (Furseth, 1968; Lindskog ve ark., 1983). Odontoklastlar ve osteoklastlar, benzer enzimatik özelliklere sahip olmaları nedeniyle hedef dokularını benzer mekanizmalarla rezorbe ederler. Rezorpsiyon işlemi sonucunda mineralize doku yüzeyinde "Howship lakünleri" olarak adlandırılan rezorpsiyon boşlukları oluşur (Nilsen ve Magnusson, 1979; Pierce, 1989). Bazı çalışmalar, odontoklastların aynı anda hem kemik hem de dental sert doku rezorpsiyonunu gerçekleştirebildiğini göstererek bu iki hücre tipinin aynı biyolojik özelliklere sahip olduğunu, yalnızca etkileşimde bulundukları dokuların farklılık gösterdiğini öne sürmektedir (Jones SJ ve Boyd A, 1988; Pierce, 1989). Wedenberg ve Yumita, osteoklastların tam mineralleşmiş dentini rezorbe ettiğini, ancak demineralize dentin veya predentin yüzeyine tutunmadığını belirtmiştir (Wedenberg ve Yumita, 1990). Osteoklastların mineralize olmamış kollajen matrise bağlanmadıkları bilinirken, predentin tabakasında bulunan kolajen içermeyen organik bileşenlerin kök kanal duvarlarını iç rezorpsiyona karşı koruduğu düşünülmektedir (Wedenberg, 1987; Wedenberg ve Lindskog, 1987). Benzer şekilde odontoklastlar da mineralleşmiş dokuların yüzeyindeki

arginin-glisin-aspartik asit (RGD) amino asit dizisine sahip hücre dışı proteinlere integrinler aracılığıyla bağlanarak görev yapmaktadır (Schaffner ve Dard, 2003). Osteopontin molekülü, bu bağlanma sürecinde osteoklastların yüzeye tutunması ve aktin iskeletinin yeniden düzenlenmesinde aracılık eder (Chung ve ark., 2008; Ishijima ve ark., 2001).

Moleküler sinyal açısından, kemik yeniden şekillenmesinde önemli bir rol oynayan osteoprogenitörlerin (OPG)/kappa B faktörü aktivatörü/RANK ligand (RANKL) transkripsiyon faktörü sistemi, kök rezorpsiyonunda da tanımlanmıştır (Tyrovolas ve ark., 2008). Yapılan çalışmalar, periodontal ligament (PDL), sement ve dental pulpa dokularının, kök rezorpsiyonu sırasında odontoklastların farklılaşması için gerekli olan RANKL'yi ifade edebileceğini göstermektedir (Kikuta ve ark., 2015; Uchiyama ve ark., 2009; Yamaguchi ve ark., 2006).

Kök kanalı duvarının kollajen içermeyen organik dış kısmı; odontoblast tabakası ve predentin ve kök yüzeyinin organik kısmı; presegmentum ve periodontal ligament, sırasıyla iç ve dış kök rezorpsiyonuna karşı dentini korur (Wedenberg, 1987; Wedenberg ve Lindskog, 1987). Bu katmanlar hasar gördüğünde, odontoklastlar proinflatuar sitokinlerin salınımıyla bölgeye çekilir ve rezorpsiyon süreci başlar. Rezorptif hücreler sementum ile temas kurduğunda, sürekli uyarılmadıkları takdirde rezorpsiyon süreci kendiliğinden sınırlanabilir (Andreasen, 1988). Ancak sürekli ortodontik tedaviye bağlı basınç, gömülü dişler, kistler, granülomlar, tümörler veya enfeksiyon gibi faktörler kök rezorpsiyonunun ilerlemesine katkıda bulunabilir (Fuss ve ark., 2003).

Kök rezorpsiyonu üç aşamada gerçekleşir: başlatma, rezorpsiyon ve onarım. Bu süreç bazen kendiliğinden sınırlanır ve klinik olarak fark edilmeyebilir; ancak enfeksiyon veya basınç gibi uyarıcılarla sürecin devam etmesi dental sert dokularda daha fazla kayba yol açar. Tedavi edilmediği takdirde, kök rezorpsiyonu dişin kaybına neden olabilir. Bu nedenle, kök rezorpsiyonu lezyonları, konumları ve radyografik özelliklerine göre dikkatlice sınıflandırılmalıdır (Mavridou ve ark., 2016).

4.1.3 Kök rezorpsiyonunun sınıflandırılması

Diş hekimliğinde sınıflandırma, teşhis ve tedavi planlamasında önemli bir rol oynar. Kök rezorpsiyonları için bugüne kadar birçok farklı sınıflandırma önerilmiş olup, bu sınıflandırmalar rezorpsiyonun mekanizmasına ve tipine göre çeşitlenmektedir. Kök rezorpsiyonu, en temel haliyle yerleşimine göre iç (pulpa kaynaklı) ve dış (periodontal ligament kaynaklı) olarak iki ana gruba ayrılabilir (Andreasen ve Andreasen, 1988; Tronstad, 1988). İlk kök rezorpsiyonu sınıflandırması 1970'lerde Andreasen tarafından yapılmış, bu sınıflandırma

literatürde en yaygın kullanılan ve kabul gören sınıflama olarak yerini korumuştur (Aidos ve ark., 2018). Andreasen, rezorpsiyonları lezyonun lokalizasyonu, tipi ve travma etkilerine göre gruplandırarak iç rezorpsiyonu yüzey, replasman ve enflamatuvar; dış rezorpsiyonu ise yüzey, replasman, enflamatuvar ve servikal olarak sınıflandırmıştır (Andreasen, 1970b).

Kök rezorpsiyonları ayrıca yüzeydeki konumlarına veya histolojik ve etiyolojik kökenlerine göre de sınıflandırılabilir (Andreasen ve ark., 2018; Patel ve Saberi, 2018; Tronstad, 1988). Bu kapsamda, dış kök rezorpsiyonu, travma, ortodontik müdahaleler ve beyazlatma işlemleri gibi çeşitli etkenlerden kaynaklanabilir ve daha yaygın görülen bir durumdur (Darcey ve Qualtrough, 2016). Diğer yandan, nadir görülen iç kök rezorpsiyonunun etiyolojisi ve patogenezi henüz tam olarak açıklığa kavuşmamıştır (Kaval ve ark., 2018). İç kök rezorpsiyonu, tanı sırasında dış kök rezorpsiyonu ile karıştırılabileceğinden, yanlış teşhis durumlarında uygun olmayan tedavilere yol açabilir (Frank, 1981). Bu nedenle, kök rezorpsiyonu olan dişlerde doğru tedaviyi seçebilmek için rezorpsiyon tipinin kesin olarak teşhis edilmesi kritik önem taşır.

Son sınıflandırma, Patel ve arkadaşları tarafından 2018 yılında yapılmış olup, farklı etiyolojik ve histolojik özellikleri göz önünde bulundurarak kök rezorpsiyonlarının alt türlerini daha ayrıntılı bir biçimde kategorize etmiştir. Günümüzde kök rezorpsiyonu için 15 farklı sınıflandırmanın bulunduğu literatürde bildirilmektedir (Patel ve Saberi, 2018).

Tablo 1: Kök rezorpsiyonlarının sınıflandırılması

Kök Rezorpsiyonu	
İç Kök Rezorpsiyonu	Dış Kök Rezorpsiyonu
Enflamatuvar rezorpsiyon	Enflamatuvar rezorpsiyon
Replasman rezorpsiyonu	Replasman rezorpsiyonu
	Servikal rezorpsiyon
	Yüzey rezorpsiyonu
	Geçici apikal yıkım

4.1.3.1 İç kök rezorpsiyonu

İç kök rezorpsiyonu, kök kanalının iç yüzeyinde ortaya çıkan ve kanal genişlemesinin düzensiz bir şekilde artmasıyla tanımlanan bir rezorpsiyon formudur (Andreasen, 1970b). Bu patoloji ilk olarak 1829'da Bell tarafından tanımlanmış olup, literatürde "iç granüloma," "iç progresif rezorpsiyon veya "pink tooth" gibi çeşitli isimlerle de anılmaktadır (Bell, 1829). Rezorpsiyon kron içinde veya servikale yakın bir bölgede gerçekleştiğinde, ince bir mine tabakasıyla örtülmüş bu bölge pembe veya kırmızımsı bir renge bürünebilir. "Pembe nokta" terimi ilk kez Fothergil tarafından kullanılmış ve 1920 yılında Mummery'nin bu patolojiye ilişkin kapsamlı çalışmasıyla daha ayrıntılı olarak tanımlanmıştır (Bellizzi ve Ciao, 1980; Petel ve Fuks, 2016).

Bu rezorpsiyon türü, mineralize dentin dokusunun iç kanal yüzeyinden başlayarak canlı pulpa dokusunun bulunduğu bölgelerde ilerler. Sürecin ilerleyen safhalarında, rezorptif alan granülasyon dokusuyla kaplanır ve bu boşluklar bazen kemik ya da sement benzeri mineralize dokularla dolabilir (Kanas ve Kanas, 2011; Lyroudia ve ark., 2002). İç kök rezorpsiyonu, başlıca iki tipe ayrılır: inflamatuvar iç kök rezorpsiyonu ve yer değiştirme (replasman) iç rezorpsiyonu (Andreasen, 1970b; Kanas ve Kanas, 2011).

4.1.3.1.1 Enflamatuvar iç kök rezorpsiyonu

Enflamatuvar iç kök rezorpsiyonu, kök kanal duvarından başlayarak sementuma doğru ilerleyen ve pulpa veya kök kanalı içerisinde dentin kaybına neden olan bir süreçtir. Bu tür rezorpsiyon, dentin dokusunun kaybına neden olduğu için "enflamatuvar" olarak tanımlanır. Genellikle odontoblast tabakasının ve preentinin sürekliliğinin travma veya bakteriyel inflamasyon nedeniyle bozulmasıyla ilişkilidir (Tronstad, 1988). Bu durum diş kökünün herhangi bir bölgesinde gelişebilir ve radyolojik olarak oval şekilli, düzgün kenarlı bir lezyon şeklinde kendini gösterebilir (Frank ve Weine, 1973). Bu süreç genellikle rezorptif defektin koronal kısmında nekrotik ve enfekte pulpa dokusunun varlığıyla ilişkilidir. Normal pulpa yapısı bu durumda kaybolur; odontoblastlar ve preentin tabakası yerini periodontal benzeri bağ dokusuna bırakır. Ancak histolojik çalışmalar, bu dokunun rezorpsiyon başlamadan önce mi yoksa sonra mı pulpaya yerleştiğini kesin olarak belirleyememiştir (Wedenberg ve Zetterqvist, 1987). Rezorpsiyon süreci aktifken, rezorptif alanın apikalinde iltihaplı pulpa dokusu bulunur ve bu bölge genellikle granülasyon dokusu ve dentinoklastlarla doludur (Patel ve ark., 2010). Enflamatuvar rezorpsiyon çoğunlukla asemptomatik seyreder ve kökte perforasyon, akut ya da kronik apikal periodontitis gibi komplikasyonlar gelişene kadar fark edilmeyebilir (Frank ve Weine, 1973). Aktif rezorpsiyon sırasında, pulpada oluşan hiperemi

oksijen basıncını artırarak pH'ın düşmesine ve klastik aktivitenin uyarılmasına neden olur (Sikri, 2011).

Rezorpsiyon, kök sınırları içinde sınırlı kaldığında perforasyon meydana gelmediği gibi, kemik ya da periodontal dokularda radyolüsent alanlar gözlenmez. Bununla birlikte, rezorpsiyonun ilerleyerek apikal veya lateral kanallar aracılığıyla çevre dokulara yayılması durumunda, radyografilerde radyolüsent bölgeler ortaya çıkabilir. Süreç ilerledikçe, kök kanal sisteminin koronal kısmındaki bakteriler enfekte kök kanal sistemine sahip diğer dişlerde olduğu gibi apikal bölgeye doğru ilerler. Bakterilerin yayılması sırasında kalan pulpa dokusu nekroze olur ve kök kanal sistemi enfekte hale gelir. "Nekrotik cephe" rezorptif defekti geçtiğinde, bu alanda kan desteği kalmaz ve dentinoklastlar yaşamını sürdüremez, böylece rezorpsiyon durur. Sonraki aşamalarda ise enfekte kök kanal sistemine sahip dişlerde olduğu gibi apikal periodontitis gelişir (Heithersay, 1985).

4.1.3.1.2 Replasman iç kök rezorpsiyonu

İç replasman rezorpsiyonu, pulpa dokusunun ve dentinin metaplazik mineralize bir doku ile yer değiştirerek kemik benzeri bir yapı oluşturduğu oldukça nadir görülen bir durumdur. Bu tür rezorpsiyon, genellikle kök kanal duvarlarından başlayarak sementuma doğru ilerler. Replasman terimi, bu süreçte meydana gelen doku değişimini tanımlamak için kullanılmaktadır. Bu rezorpsiyon tipi, genellikle odontoblast tabakasının ve predentin tabakasının fiziksel, kimyasal veya bakteriyel etkenlerle zarar görmesiyle ilişkilidir. Bu zarar, pulpa dokusunun metaplazik bir dokuya dönüşmesine yol açar ve bu doku kemik ya da sement benzeri mineralize bir yapı haline gelir. Yapılan çalışmalar, bu metaplazik dokunun tamir sementi veya osteodentin benzeri bir madde olduğunu ortaya koymuştur (Ne ve ark., 1999; Reichart ve ark., 1984).

İç replasman rezorpsiyonunun temel nedeninin travma veya pulpaya yönelik bir hasar olduğu düşünülmektedir. Bu durum, travma sonrası hemen ortaya çıkabileceği gibi yıllar sonra da gelişebilir. Bu sebeple, hastalar genellikle travmatik bir olayı hatırlamaz ya da olayın ayrıntılarını anımsayamaz. Bununla birlikte, internal replasman rezorpsiyonunun çok nadir görülmesi ve birçok diş hekimi tarafından bilinmemesi, bu duruma dair net verilerin toplanmasını zorlaştırmaktadır (Patel ve ark., 2010; Wedenberg ve Lindskog, 1985). Replasman rezorpsiyonu genellikle asemptomatik seyreder ve termal ya da elektrikli pulpa testlerinde normal yanıt alınabilir (Benenati, 1997). Rezorpsiyon süreci sırasında meydana gelen metaplazik mineralize doku birikimi, klinik ve radyografik değerlendirmelerde dikkatle analiz edilmesi gereken bir özelliktir (Abbott, 2022).

4.1.3.1.3 İç kök rezorpsiyonun etyolojisi

İç kök rezorpsiyonunun (İKR) gelişebilmesi için, kanal duvarındaki koruyucu odontoblast tabakasının ve predentin tabakasının hasar görmesi gerekir. Bu hasar, alttaki mineralize dokunun odontoklastlara maruz kalmasına yol açar (Trope, 1998; Wedenberg ve Lindskog, 1985; Wedenberg ve Zetterqvist, 1987). Ancak, bu süreci başlatan kesin mekanizmalar tam olarak açıklanamamıştır. Predentin kaybıyla ilişkilendirilen çeşitli faktörler arasında travma, periodontal enfeksiyonlar, çürük ve bunlara bağlı pulpitis, vital dişlerde restoratif işlemler sırasında oluşan aşırı ısı, kalsiyum hidroksit uygulamaları, vital kök rezeksiyonları, çatlak dişler, ortodontik tedavi ve sağlıklı pulpalarda ortaya çıkan idiopatik distrofik değişiklikler bulunmaktadır (Allen ve Gutmann, 1977; Andreasen, 1970b; Ashrafi ve Sadeghi, 1980; Penido ve ark., 1980; Rabinowitch, 1972; Silveira ve ark., 2009; Walton ve Leonard, 1986).

Literatürde internal kök rezorpsiyonunun (İKR) görülme sıklığına ilişkin sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Thoma (1935), 1000 diş arasında yalnızca bir İKR vakasına rastlandığını belirtmiştir. Cabrini ve Manfredi (1957) ise koronal pulpa amputasyonu ve kalsiyum hidroksit kaplaması uygulanan 28 dişin sekizinde (%28) İKR geliştiğini rapor etmiştir. Ahlberg ve arkadaşları (1983), ototransplante edilen maksiller kaninlerin %51,5'inde (33 dişin 17'sinde) İKR görüldüğünü bildirmiştir. Ancak bu çalışmaların çoğu, yalnızca iki boyutlu radyografik görüntüleme yöntemlerini kullanmıştır. Bu durum, İKR'nin gerçek prevalansının olduğundan daha düşük değerlendirilmesine yol açabilir (Patel ve ark., 2010).

Travmanın, İKR'nin başlamasında en önemli predispozan faktör olduğu düşünülmektedir. 25 diş kapsayan bir çalışmada, travmanın vakaların %45'inde en yaygın neden olduğu, çürüğe bağlı inflamasyonun %25 oranında ve çürük/periodontal lezyonların %14 oranında İKR'ye neden olduğu belirlenmiştir. Diğer vakalarda ise spesifik bir neden tespit edilememiştir (Calışkan ve Türkün, 1997). Literatürdeki birçok rapor, travma ile pulpal inflamasyon/enfeksiyonun İKR'nin başlamasında önemli katkı sağlayıcı faktörler olduğunu göstermektedir (Andreasen, 1970b; Haapasalo ve Endal, 2006; Wedenberg ve Lindskog, 1987; Wedenberg ve Zetterqvist, 1987).

Wedenberg ve Lindskog, İKR'nin geçici ya da ilerleyici bir süreç olarak ilerleyebileceğini ifade etmişlerdir. Bir in vivo primat çalışmasında, 32 kesici dişte kök kanalları açılmış ve predentin bilinçli olarak hasarlandırılmıştır. Dişlerin yarısının giriş kavitesi kapatılmış, diğer yarısı ağız ortamına açık bırakılmıştır. Kapalı tutulan dişlerde hasarlı dentin yüzeyinde çok çekirdekli klastik hücrelerin geçici kolonizasyonu gözlemlenmiş ve aktif sert doku rezorpsiyonu

görülmemiştir (geçici İKR). Ancak açık bırakılan dişlerde bakteriyel kontaminasyon artmış ve ilerleyici İKR belirtileri tespit edilmiştir (Wedenberg ve Lindskog, 1985).

İKR'nin ilerleyebilmesi için, rezorpsiyon bölgesinin apikalindeki pulpa dokusunun kan desteğine sahip olması gereklidir. Canlı pulpa, klastik hücreler ve gerekli besin maddelerini sağlarken, enfekte nekrotik koronal pulpa dokusu bu hücreleri uyarır (Tronstad, 1988). Bakteriler, dentin tübülleri, çürük kavimleri, çatlaklar, kırıklar ve lateral kanallar yoluyla pulpa kanalına girebilir. Ancak bakteriyel bir uyarı olmadan, rezorpsiyon genellikle sınırlı kalır ve klinik ya da radyografik olarak tespit edilebilecek bir aşamaya ilerlemez. Tedavi edilmediği durumlarda, İKR lezyonu apikal yönde ilerleyebilir ve nihayetinde rezorpsiyon bölgesinin apikalindeki pulpa nekrotik hale gelir. Bu durum, kök kanal sisteminin tamamının enfekte olmasına ve apikal periodontitis gelişmesine yol açabilir (Ricucci, 1998).

4.1.3.1.4 İç kök rezorpsiyonunun histopatolojisi

İç kök rezorpsiyonu (İKR), klastik hücrelerin mineralleşmemiş kollajen matrislere bağlanma yeteneği olmadığı için, ancak odontoblast tabakasının ve mineralleşmemiş predentin dokusunun kaybı veya hasarı durumunda başlar (Wedenberg, 1987; Wedenberg ve Lindskog, 1987). Bu süreç, İKR'nin iki aşamalı bir gelişimine yol açar: geçici ve ilerleyici evreler (Wedenberg ve Lindskog, 1985). Geçici evre, inflamasyon veya enfeksiyonun hasarlı kök kanal yüzeyine etki etmemesi nedeniyle kendiliğinden sınırlıdır ve rezorpsiyonu başlatacak veya sürdürecektir uyarıcıların yokluğundan kaynaklanır. İlerleyici evrede ise bakterilerin klastik hücreleri uyarması ve kök kanalı içindeki sürekli kan akışı sayesinde İKR ilerleme gösterir (Tronstad, 1988).

Wedenberg ve Zetterqvist (1987), ilerleyici İKR nedeniyle çekilmiş daimi ve süt diş örneklerini inceleyerek iç kök rezorpsiyonunun histolojik özelliklerini araştırmışlardır. Histolojik ve histokimyasal enzim analizleri ile taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılan bu çalışmada, her iki diş grubunun histolojik ve enzim profillerinin benzer olduğu, ancak rezorpsiyon sürecinin süt dişlerinde daha hızlı ilerlediği saptanmıştır. Tüm dişlerde pulpa dokusu, lenfositler ve makrofajlardan oluşan inflamatuvar hücresel infiltrasyonla doludur; bazı nötrofiller de bulunmaktadır (Wedenberg ve Zetterqvist, 1987).

Etkilenen pulpa dokusu, sağlıklı pulpa ile karşılaştırıldığında daha az vaskülarize olup, yoğun inflamatuvar hücre infiltrasyonu göstermektedir. Rezorpsiyon bölgesinde predentin ve odontoblastlar bulunmamaktadır. Pulpa boşluğundaki bağ dokusu, daha az damarlanmış ve periodontal membranın bağ dokusuna benzer şekilde daha fazla hücre ve lif içermektedir. Etkilenen dentin duvarlarında odontoblast tabakası ve predentin mevcut değildir; bu alanlar,

rezorpsiyon lakünelerini dolduran büyük, çok çekirdekli odontoklastlarla kaplıdır. Odontoklastlar, aktif rezorpsiyon sürecinin kanıtlarını sergilemekte ve odontoklastların öncüleri olduğu düşünülen mononükleer hücreler tarafından eşlik edilmektedir. Her iki hücre tipi de tartarat dirençli asit fosfataz (TRAP) aktivitesi göstermektedir. Araştırmada, incelenen tüm dişlerin kök kanal duvarlarının kemik veya sement benzeri mineralize doku ile eksik şekilde kaplandığı belirlenmiştir (Wedenberg ve Zetterqvist, 1987).

Üç vakada ise pulpa boşluğunda mineralize doku adacıkları gözlenmiştir. Bu adacıklar, iç replasman rezorpsiyonun karakteristik bir özelliği olarak tanımlanmıştır (Andreasen ve Andreasen, 1992). Araştırmacılar, bu mineralize dokunun oluşumunun, rezorpsiyon sürecinin sonunda osteoblastların etkilenen bölgeye göç ederek kemik oluşumuna katılmalarıyla ilişkili olabileceğini öne sürmüşlerdir (Wedenberg ve Zetterqvist, 1987).

Bakteriler, dentin tübülleri, çürükler, çatlaklar, kırıklar ve lateral kanallar aracılığıyla kök kanalına girerek İKR'nin ilerlemesine neden olabilir. Bu ilerleme, kökün perforasyonuna yol açarak lateral veya periodontal lezyonlara veya mikroorganizmaların tüm kök kanal sistemini enfekte etmesi sonucu apikal periodontite dönüşebilir. Pulpanın tamamen uzaklaştırılması veya pulpa nekrozu, rezorpsiyon sürecini durdurmaktadır (Calışkan ve Türkün, 1997).

Sonuç olarak, İKR'nin histolojik ve histokimyasal özellikleri primer ve sekonder dişlerde benzerlik gösterse de, rezorpsiyon süreci primer dişlerde daha hızlı ilerlemektedir. İç enflamatuvar rezorpsiyon yalnızca intraradiküler dentin kaybını içerirken, iç replasman rezorpsiyon durumunda dentin kaybını takiben rezorpsiyon boşluklarına metaplazik kemik benzeri veya sement benzeri sert dokuların birikimi gözlemlenir. Bu durum "başarısız onarım" olarak tanımlanmıştır (Patel ve ark., 2010).

4.1.3.1.5 İç kök rezorpsiyonun klinik özellikleri

İç kök rezorpsiyonunun klinik özellikleri, etkilenmiş pulpanın histolojik durumuna, rezorptif süreç sonucu oluşan sert doku yıkımının derecesine ve rezorpsiyon boşluğunun kök kanalı içindeki konumuna bağlıdır (Lyroudia ve ark., 2002). İKR'nin iç enflamatuvar ve iç replasman tipleri benzer klinik özellikler sergiler. Çoğu zaman, iç kök rezorpsiyon'lu dişler asemptomatiktir ve rutin radyografik incelemelerde tesadüfen tespit edilir (Haapasalo ve Endal, 2006; Patel ve ark., 2010). Bununla birlikte, mevcutsa, akut veya kronik pulpitisin semptom ve bulguları pulpanın durumuna, sert doku yıkımının boyutuna ve rezorpsiyonun dişteki yerine göre değişiklik gösterebilir (Lyroudia ve ark., 2002).

Hastalar, apse veya sinüs yolu oluşumu, perküsyona hassasiyet ve/veya renk değişikliği gibi belirtilerle başvurabilir (Patel ve ark., 2010). Kök kanalının koronal üçte birinde meydana gelen İKR, dış kronunda pembe renklenme ile kendini gösterebilir; bu durum, sert dokunun fibrovasküler granülomatöz doku ile rezorbe edilmesi ve yer değiştirmesi sonucu oluşur (Lyroudia ve ark., 2002). Bu pembe renklenme, bazen dış servikal kök rezorpsiyonu olarak da yanlış tanı alabilir (Patel, Dawood, ve ark., 2009).

Her ne kadar pembe renklenmeler sürecin yaygın bir klinik göstergesi olarak rapor edilse de, İKR vakalarında aslında nadir görülür. Bu lekeler, dış servikal kök rezorpsiyonu vakalarında nispeten daha sık ortaya çıkabilir, ancak bu rezorpsiyon tipinde de çok yaygın değildir (Lyroudia ve ark., 2002).

4.1.3.1.6 İç kök rezorpsiyonunun radyolojik özellikleri

Kök rezorpsiyonunun tanısı, radyografik görüntüleme ile sağlanır (Gartner ve ark., 1976; Patel ve ark., 2010). Geleneksel iki boyutlu radyografilerin sınırlı doğası, özellikle iç kök rezorpsiyonu ile dış servikal rezorpsiyonun ayırt edilmesini zorlaştırır, çünkü bu iki durum benzer radyografik özellikler gösterebilir (Gulabivala ve Searson, 1995; Tronstad, 1988).

İç kök rezorpsiyonu kök kanal sistemi içinde herhangi bir bölgede oluşabilir ve radyografik olarak kök kanalının simetrik, oval veya dairesel genişlemesi şeklinde homojen bir radyolusensi olarak görünür (Gartner ve ark., 1976). İç enflamatuar kök rezorpsiyonu genellikle düzgün sınırlı ve eşit yoğunlukta radyolusent bir lezyon olarak ortaya çıkarken, internal replasman (metaplastik) kök rezorpsiyonu, kalsifiye materyalin varlığı nedeniyle benekli veya bulutlu görünümlü düzensiz şekilli bir radyolusensi olarak izlenir (Patel ve ark., 2010).

Tek kanallı dişlerde iç kök rezorpsiyonu, lezyon kök kanal duvarlarıyla süreklilik gösterdiğinden, kanal duvarları lezyon boyunca izlenemez; çünkü kanal duvarı balonlaşmıştır. Buna karşılık, dış servikal lezyonları kök kanalının dış yüzeyinde bulunduğu için radyografilerde kanal sisteminin üzerine süperempoze olur ve kanal duvarları lezyon boyunca izlenebilir (Gartner ve ark., 1976).

Çok kanallı dişlerde ise, iç kök rezorpsiyonu lezyonu sağlıklı bir kanalın üzerine süperempoze olarak dış servikal kök rezorpsiyonu ile karıştırılabilir ve yanlış tanıya neden olabilir (Patel ve ark., 2010). Bu nedenle, rezorpsiyonun doğasını daha iyi anlamak için paralel radyografi tekniğinin kullanılması önerilir. İç kök rezorpsiyonu lezyonları, farklı açılardan çekilen radyografilerde kök kanalına göre konumunu korurken, dış servikal kök rezorpsiyonu lezyonları x-ışını tüpünün hareketine bağlı olarak yer değiştirir; lingual/palatal konumlu dış

servikal kök rezorpsiyonu lezyonları tüp kaymasıyla aynı yöne, bukkal konumlu olanlar ise ters yöne hareket eder (Gartner ve ark., 1976).

Geleneksel radyografilerin sınırlamalarından dolayı, iç kök rezorpsiyonu ve dış servikal kök rezorpsiyonu arasındaki ayrımı netleştirmek ve lezyonun tam konumunu, boyutunu ve varsa perforasyonları belirlemek için yüksek çözünürlüklü, küçük görüş alanına sahip konik ışınlı bilgisayarlı tomografi (KIBT) kullanımı önerilmektedir (AAOMR, 2015). CBCT, iç kök rezorpsiyonu'nun potansiyel olarak tedavi edilebilir lezyonlarının doğasını detaylı bir şekilde ortaya koyar ve geleneksel radyografilerle oluşabilecek tanısal belirsizlikleri ortadan kaldırır (Bhuva ve ark., 2011). Ayrıca, KIBT'nin kök rezorpsiyonunun tanı ve tedavi planlamasında radyografilere kıyasla daha üstün olduğu çeşitli çalışmalarla desteklenmiştir (Chogle ve ark., 2020; Ee ve ark., 2014; Madani ve ark., 2016; Patel, Dawood, ve ark., 2009; Rodríguez ve ark., 2017).

Sonuç olarak, iç kök rezorpsiyonun radyolojik özellikleri vaka bazında değerlendirilmelidir, çünkü her lezyon farklılık gösterebilir (Ne ve ark., 1999). Doğru tanı ve etkin tedavi planlaması için geleneksel radyografilerin yanı sıra ileri görüntüleme tekniklerinin kullanımı önem taşımaktadır (Patel ve ark., 2010).

4.1.3.2 Dış kök rezorpsiyonu

Dış kök rezorpsiyonu, dış kök yüzeyinde, sement ya da sement-dentin birleşim bölgesinde hücresel lizisin başlamasıyla meydana gelen geri dönüşü olmayan bir süreç olarak tanımlanır (Bergmans ve ark., 2002). Kök yüzeyinde bulunan sement tabakasının veya diğer dış dokularının hasar görmesi ya da kaybedilmesi, dış kök rezorpsiyonunun başlamasına yol açabilir (Leach ve ark., 2001). Sementoblast ve osteoklastların aktiviteleri arasındaki dengenin patojenik uyarılar sonucu bozulması ve bu süreçte sementoblastların ve sementin hasar görmesi, dış kök rezorpsiyonunun temel nedenlerinden biridir. Rezorpsiyonun ileri aşamaları, tüm dentin ve sementi etkileyerek kök kanal perforasyonuna neden olabilir. Ayrıca, rezorpsiyonun etkileri bitişik alveol kemiğinde de görülebilir (Cohen ve Hargreaves, 2011). Dış kök rezorpsiyonu, sıklıkla 21-30 yaş arasındaki bireylerde ve kadınlarda daha yüksek oranlarda görülmektedir (Opacić-Galić ve Zivković, 2004) .

Dış kök rezorpsiyonunun nedenleri birden fazladır. Lokal faktörler arasında gömülü dişler, ortodontik tedavi sırasında uygulanan aşırı mekanik kuvvetler, tümörler ve kistler, diş lüksasyonu, reimplantasyon işlemleri, dentoalveolar veya ortognatik cerrahi girişimler, mandibulektomi, maksillektomi, periradiküler inflamatuvar lezyonlar, komşu dişin sürmesi, kök kırıkları, periodontal hastalıklar ve beyazlatma işlemleri sayılabilir. Ayrıca,

hipoparatiroidizm, hiperparatiroidizm, kalsinozis, radyoterapi, Turner sendromu, kemik displazisi, Gaucher hastalığı, Paget hastalığı, Papillon-Lefevre sendromu ve Steven-Johnson sendromu gibi sistemik rahatsızlıklar da dış kök rezorpsiyonuna katkıda bulunabilir (Al-Momani ve Nixon, 2013; Cholia ve ark., 2005; Yadav ve ark., 2013).

Travmanın, dış kök rezorpsiyonunun gelişiminde önemli bir rol oynadığı bilinmektedir. Travmaya maruz kalan dişlerde farklı derecelerde ataşman hasarları meydana gelebilir. Bunun yanı sıra, pulpa nekrozu geliştiğinde diş enfeksiyona daha açık hale gelir (Trope, 2000). Enfekte bir kök kanalı sonucu oluşan toksinler, apikal foramen veya geniş aksesuar kanallar yoluyla periodontal dokulara geçebilir. Sement tabakasının hasar gördüğü ya da kaybolduğu durumlarda, enfekte pulpa boşluğundan kaynaklanan inflamatuvar uyaranlar, dentin tübülleri üzerinden periodontal ligament içine nüfuz ederek inflamatuvar bir tepki oluşumuna yol açabilir. Bu inflamatuvar yanıt, hem kök hem de kemik rezorpsiyonuna neden olabilir (Trope, 2002).

4.1.3.2.1 Enflamatuvar dış kök rezorpsiyonu

Enflamatuvar dış kök rezorpsiyonu (EDKR), kronik apikal periodontitis teşhisi konulan dişlerin büyük bir kısmında kökün dış yüzeyinde görülmektedir (Laux ve ark., 2000; Tronstad, 1988; Vier ve Figueiredo, 2002). Ayrıca, ciddi dental travmaya maruz kalan dişleri de etkiler; örneğin, avulsiyon ve lüksasyon vakalarında (Andreasen ve Hjorting-Hansen, 1966a). Diş travması durumlarında, EDKR kök yüzeyinin ve komşu periodonsiyumun hasarı sonucu ortaya çıkar ve başlangıçta sadece hasarlı kök yüzeyine odaklanır. Pulpa vitalitesinin kaybı ve nekrotik pulpanın enfeksiyonu ise EDKR'nin ilerlemesine yol açabilir (Patel ve ark., 2022).

EDKR, tedavi edilmezse hızlı ve ilerleyici bir seyir izleyebilir; birkaç ay içinde tüm kök yüzeyi rezorbe olabilir (Andreasen ve ark., 2007; Andreasen ve Hjorting-Hansen, 1966a). Bu durum, lüksasyon ve avulsiyon yaralanmalarından sonra en sık görülen dış rezorpsiyon biçimidir (Crona-Larsson ve ark., 1991). Kronik periapikal periodontitis teşhisi konulan dişler de EDKR'den etkilenebilir (Laux ve ark., 2000).

Lüksasyon yaralanmalarından sonra EDKR'nin prevalansı, yaralanmanın şiddetine bağlı olarak değişiklik gösterir. Andreasen ve Vestergaard Pedersen, 637 kalıcı lükse olmuş dişi 10 yıl boyunca takip etmiş ve konküzyon yaralanmalarından sonra EDKR vakası bildirmemiştir. Sublüksasyon vakalarında ise sadece %0,5 oranında EDKR görülmüştür. Ekstrüzif lüksasyon geçiren dişlerin %6'sı ve lateral lüksasyon geçiren dişlerin %3'ü EDKR geliştirmiştir. Intrüziv lüksasyon vakalarında ise bu oran %38'e yükselmiştir (Andreasen ve Pedersen, 1985). Başka

bir çalışmada, ekstrüviziv lükse olmuş dişlerin %60'ında ve intrüze olmuş dişlerin %22'sinde EDKR komplikasyonu rapor edilmiştir (Crona-Larsson ve ark., 1991).

EDKR'nin klinik tedavisi, kök kanalı içindeki enfekte nekrotik pulpa dokusunun etkin bir şekilde uzaklaştırılmasına dayanır (Dumsha ve Hovland, 1995). Rezorpsiyon süreci teşhis edilir edilmez tedaviye başlanmalıdır; erken teşhis ve müdahale, etkilenen dişin prognozunu iyileştirir (Cvek, 2007).

Klinik uygulamada EDKR tanısı, sürecin radyografik olarak gösterilmesine dayanır. Bazı durumlarda, avulse dişlerin replantasyonundan sadece iki hafta sonra EDKR'nin radyografik belirtileri gözlemlenebilir (Andreasen ve Hjørtting-Hansen, 1966a). Ancak, geleneksel radyografik görüntülemenin sınırlamaları iyi bilinmektedir; bitişik anatomik yapıların yansıması, geometrik bozulmalar ve üç boyutlu yapıların iki boyutlu görüntüye indirgenmesi tanısal değeri azaltabilir. Bu sınırlamalar, dental travma sonrası EDKR'nin geç teşhis edilmesine neden olabilir (Bender ve Seltzer, 1961; Gröndahl ve Huuonen, 2004; Kundel ve Revesz, 1976)

Sonuç olarak, EDKR'nin erken dönemde tanınması ve uygun şekilde tedavi edilmesi, dişin uzun vadeli sağkalımı için kritiktir. Dental travma veya kronik periapikal periodontitis vakalarında EDKR belirtilerine karşı dikkatli olunması gerekmektedir (Patel ve ark., 2022).

Enflamatuvar dış kök rezorpsiyonun etyolojisi

Enflamatuvar dış kök rezorpsiyonu (EDKR), diş kök yüzeyinin çeşitli etkenler sonucu osteoklastik aktivite ile yıkıma uğramasıdır. Normal şartlarda, daimi dişler rezorpsiyona karşı dirençlidir ve bu direncin arkasındaki mekanizmalar tam olarak aydınlatılamamış olsa da, kök yüzeyini kaplayan mineralize olmamış tabakaların (presegmentum ve preentin) odontoklastların bağlanması engellediği kabul edilmektedir (Andreasen, 1988; Hammarstrom ve Lindskog, 1985; Wedenberg, 1987; Wedenberg ve Lindskog, 1985, 1987).

Travmatik dental yaralanmalar, özellikle intrüzyon, lateral luksasyon ve avulsiyon gibi periodontal yapıları etkileyen hasarlar, periodontal ligamenti (PDL) zedeleyerek EDKR'nin başlamasına zemin hazırlar (Andreasen, 1988). Bu tür yaralanmalarda, presegmentum tabakasının bütünlüğünün bozulması, osteoklastların ve odontoklastların mineralize dentin ve sementuma bağlanmasına ve rezorpsiyona yol açar (Ehnevid ve ark., 1993).

EDKR'nin patogenezi, yaralanma sonrası oluşan PDL kontüzyonlarının iyileşme sürecinde osteoklast ve makrofajların hasarlı bölgeye çekilmesiyle açıklanabilir. Eğer başlangıçtaki osteoklastik aktivite dentin tübüllerini açığa çıkaracak kadar şiddetliyse, pulpa boşluğu ile dış kök yüzeyi arasında bir iletişim oluşur (Andreasen, 1981; Andreasen ve Hjorting-Hansen, 1966b). Bu durumda, pulpa nekrozu ve enfeksiyonu sonucu oluşan mikroorganizmalar ve toksinleri, dentin tübülleri aracılığıyla rezorpsiyon bölgesine ulaşarak osteoklastik aktiviteyi artırır (Andreasen ve Løvschall, 2007).

Kök kanal mikroflorası, çürükler, mikrosızıntı veya başarısız kanal tedavileri nedeniyle enfekte olmuş nekrotik kök kanallarından kaynaklanarak, kronik apikal periodontitisli dişlerin çoğunda EDKR'ye neden olur. Ağır dental travma sonucu pulpa nekrozu ve kök kanallarının enfeksiyonu, bakterilerin dentin tübüllerini geçerek kökün dış yüzeyindeki rezorpsiyon bölgesine ulaşmasına ve EDKR'nin devam etmesine neden olabilir . (Laux ve ark., 2000; Vier ve Figueiredo, 2002).

Enflamatuvar dış kök rezorpsiyonun histolojisi

Enflamatuvar dış kök rezorpsiyonun (EDKR) histolojik görünümü, sement ve dentinde oluşan kase veya çanak biçimindeki rezorpsiyon alanlarıyla karakterizedir; bu alanlara bitişik periodontal membranda da eş zamanlı inflamasyon gözlenir. Rezorpsiyon boşluklarında sıklıkla Howship lakünaları bulunur ve histolojik kesitlerde bu lakünaların zaman zaman odontoklastlar tarafından doldurulduğu tespit edilir. Periodontal membrandaki inflamatuvar reaksiyon yoğun olup, granülasyon dokusu matrisi içinde plazma hücreleri, lenfositler ve polimorfonükleer lökositlerden oluşan karma bir hücre infiltrasyonunu içerir .İltihaplı bölgelerde kapiller proliferasyonu da dikkati çeken bir özelliktir (Andreasen ve Hjorting-Hansen, 1966b).

Diş travması sonrası EDKR'nin patogenezi, periodontal ligamente ait kontüzyon yaralanmalarının koruyucu mineralize olmamış presegmentum tabakasında bütünlüğün bozulmasına yol açmasıyla başlar (Fuss ve ark., 2003; Tronstad, 1988). Odontoklastlar/osteoklastlar ve makrofajlar hasar bölgesine göç ederek alttaki mineralize sert dokuya bağlanır ve kök yüzeyini rezorbe ederler . Ancak rezorpsiyonun ilerlemesi, enfekte nekrotik pulpadan kaynaklanan bakterilerin ve/veya bunların yan ürünlerinin difüzyonuna bağlıdır(Andreasen ve Hjorting-Hansen, 1966b).

EDKR, deneysel diş replantasyonundan bir hafta sonra histolojik olarak tanımlanabilir (Andreasen, 1980). Histolojik olarak, rezorpsiyon alanlarının Howship lakünaları içerdiği ve

bu lakünaların bazen odontoklastlarla dolu olduğu görülür. Bitişik periodontal dokulardaki inflamasyon yoğun olup, polimorfonükleer lökositler, lenfositler ve plazma hücrelerinden oluşan karma bir inflamatuvar hücre infiltrasyonunu içerir. Ayrıca, inflamasyon bölgelerinde kapiller proliferasyonu belirgin bir özelliktir (Andreasen ve Hjorting-Hansen, 1966b).

Enflamatuvar dış kök rezorpsiyonun klinik özellikleri

EDKR'nin klinik özellikleri arasında geri dönüşümsüz pulpit ve/veya apikal periodontitis semptomları bulunur. Hastalar ağrı, şişlik, perküsyon veya palpasyonda duyarlılık, sinüs yolu ve dişte renk değişikliği gibi şikayetlerle başvurabilirler. Etkilenen diş genellikle pulpa duyarlılık testlerinde negatif yanıt verir, bu da pulpal nekrozu işaret edebilir (Andreasen ve Hjorting-Hansen, 1966a; Tronstad, 1988)).

Enflamatuvar dış kök rezorpsiyonun radyolojik özellikleri

Enflamatuvar dış kök rezorpsiyonunun (EDKR) tanısı, öncelikle radyografik bulgulara dayanır. Enfekte nekrotik pulpa içeriğine bağlı gelişen EDKR, kökün beklenenden daha kısa veya ince görünmesine ve kök ucunda düzensiz kenarlar ile ilgili periapikal radyolüsensi oluşumuna neden olabilir. Travmatik dental yaralanma öyküsü olan vakalarda ise, kök yüzeyinin lateral sınırında düzensiz, kase şeklinde çöküntüler ve bitişik periradiküler radyolüsensi gözlemlenir. EDKR'nin etkilenen bölgesinde lamina dura kaybı görülebilir ve bu bulgu, dental travmadan sonraki 3-4 hafta içinde tespit edilebilir. Erken evrelerde kök kanalının konturu sağlam kalırken, ileri aşamalarda rezorpsiyonun ilerlemesiyle kök kanal duvarında perforasyon meydana gelebilir. EDKR hızlı ve agresif bir seyir izleyebilir; kökün tamamen rezorbe olması aylar içinde gerçekleşebilir. Bu nedenle, EDKR'nin mümkün olan en kısa sürede teşhis edilip kanal tedavisi ile ilerleyişinin durdurulması önemlidir (Andreasen ve Hjorting-Hansen, 1966a, 1966b).

Geleneksel radyografi, enflamatuvar dış kök rezorpsiyonunun (EDKR) başlangıçta teşhisinde tercih edilen görüntüleme yöntemidir. Ancak, konvansiyonel radyografilerin bazı dezavantajları vardır. İki boyutlu yapısı nedeniyle, özellikle küçük boyutlu rezorpsiyon defektlerini tespit etmede yetersiz kalmakta ve yalnızca kökün proksimal yüzeylerindeki EDKR'yi saptayabilmektedir. Ayrıca, bukkal veya palatal/lingual yüzeylerdeki lezyonların boyutunu ve kapsamını doğru bir şekilde belirleyememektedir (Andreasen ve ark., 1987; Goldberg ve ark., 1998).

Dijital radyografi sistemleri olan RadioVisioGraphy (RVG) ve Photostimulable Phosphor Plate (PSP) teknolojileri incelendiğinde, RVGnin film bazlı radyografiler kadar hassas olduğu,

ancak PSP sistemlerinin daha düşük doğruluk oranlarına sahip olabileceği belirlenmiştir (Borg ve ark., 1998; Kamburoğlu ve ark., 2008). Konik ışınlı bilgisayarlı tomografinin (KIBT), EDKR'nin teşhisinde ve lezyonların kapsamının belirlenmesinde konvansiyonel radyografiye göre üstünlük sağladığı ve düşük dozlarda bile güvenilir ve geçerli sonuçlar verdiği kanıtlanmıştır (Alqerban ve ark., 2009; D'Addazio ve ark., 2011; Patel, Dawood, ve ark., 2009).

4.1.3.2.2 Replasman dış kök rezorpsiyonu

Dış replasman rezorpsiyonu, sement ve dentinin rezorbe edilerek kemik dokusu ile yer değiştirmesi sürecini ifade eder; "replasman" terimi bu rezorpsiyonun doğasını en iyi şekilde yansıtır. Bu konunun incelenmesinde, sıklıkla yanlış ve birbirinin yerine kullanılan "ankiloz" teriminin de ele alınması önemlidir. Ankiloz, periodontal ligamentin (PDL) kaybı sonucunda kemik ile diş kökünün doğrudan temas ederek birleşmesi olarak tanımlanır. Ankiloz başlangıçta rezorpsiyon olmaksızın da meydana gelebilir; ancak PDL'nin koruyucu işlevinin yokluğu nedeniyle zamanla dış replasman rezorpsiyonuna yol açar (AAE, 2020) .

Ankiloz, diğer dış rezorpsiyon türleriyle de ilişkili olabilir ve gelişimi, bu rezorpsiyonların tedavisi sonrasında oluşan iyileşme yanıtına veya rezorpsiyonun ilerleyici doğasına bağlı olarak şekillenebilir; örneğin dış invaziv rezorpsiyonda olduğu gibi (Mavridou ve ark., 2016; A. M. Mavridou ve ark., 2016). Bu bilgiler doğrultusunda, ankiloz ve dış replasman rezorpsiyonu ayrı ve bağımsız patolojik süreçler olarak değerlendirilmelidir.

Replasman dış kök rezorpsiyonunun etyolojisi

Replasman dış kök rezorpsiyonu (RDKR), periodontal ligament (PDL) ve/veya sementumun hasar görmesi sonucu ortaya çıkar ve özellikle ciddi lüksasyon yaralanmaları, örneğin avülsiyon ve intrüzyon sonrasında yaygın olarak görülür (Andreasen, 1970b; Andreasen ve Hjorting-Hansen, 1966a; Cvek ve ark., 2019; Lauridsen ve ark., 2017). Soares ve arkadaşlarının retrospektif çalışması replasman rezorpsiyonunun en sık avülsiyon vakalarında (%87,2), ardından intrüziv lüksasyonlarda (%57,1) görüldüğünü ortaya koymuştur (Soares ve ark., 2015). Ayrıca, Souza ve arkadaşlarının gerçekleştirdiği bir meta-analiz, avülsiyon vakalarında replasman kök rezorpsiyonu oranının %51 olduğunu göstermiştir (Souza ve ark., 2018).

Lateral lüksasyon sonrasında da replasman dış kök rezorpsiyonu (RDKR) gelişebilir; özellikle kökün apikal kısmının, labial alveolar kortikal plağın kırılmasıyla oluşan kemik çıkıntısı üzerinde sürtünmesi sonucu meydana gelir. Bu durum, kökün koronal üçte birinin palatal yüzeyinde de periodontal ligament (PDL) ve sementumun ezilmesine sebep olabilir. Ekstrüzyon yaralanmalarında RDKR oluşma olasılığı daha düşüktür, zira bu tür yaralanmalar

kök yüzeyine daha az zarar verir; ancak PDL'nin hasar görmesi nedeniyle yine de meydana gelebilir (Andreasen ve Hjorting-Hansen, 1966b) .

Replasman dış kök rezorpsiyonun histolojisi

Replasman dış kök rezorpsiyonu (RDKR), yaralanmanın türüne bağlı olarak gelişebilir ve periodontal ligamentin (PDL) yırtılması, ezilmesi veya kuruması sonucunda dejenerasyon ortaya çıkabilir. Bu durum, PDL hücrelerinin nekrozu ile birlikte hasarlı sement ve dentinin osteoklastların etkisiyle rezorpsiyona uğramasına ve sonrasında osteoblastlar tarafından bu bölgelerin alveolar kemikle doldurulmasına neden olur (Andersson ve ark., 1984). Osteoblastların bu aktivitesi, yeniden şekillenme sürecinde radiküler dentini kademeli olarak kemikle değiştirebilir. RDKR, bazen kendiliğinden sınırlı ya da lokalize bir karakter gösterebilir. Andreasen, maymunlarda diş replante edildikten sonra en sık rastlanan bulgunun PDL'nin tamamen mineralize olması olduğunu belirtmiştir. Ayrıca, erken ankiloz bölgesinde kök yüzeyi ve alveol duvarında kemik birikimi, yumuşak bağ dokusu ile çevrili olarak saptanmıştır (Andreasen, 1980).

Replasman dış kök rezorpsiyonun klinik özellikleri

Replasman dış kök rezorpsiyonunun (RDKR) klinik özellikleri arasında, dişin fizyolojik hareketliliğinde azalma veya kayıp yer alır (Andersson ve ark., 1984; Andreasen, 1975). Bu durum, ankilozun replasman rezorpsiyonu öncesinde meydana gelmesiyle ilişkili olup, dişte hareket kabiliyetinin azalmasına ve perküsyonda farklı bir ses veya his alınmasına yol açar. Çalışmalara göre, bu ses "yüksek perdeli", "metalik" veya "odunsu" olarak tanımlanmıştır, ancak sesin niteliği rezorpsiyonun boyutuna göre değişebilir. Bu tür bir dişte alınan perküsyon sesi, genellikle komşu, ankiloz veya replasman rezorpsiyonu olmayan dişlerden farklı, daha mat ve donuktur (Andreasen ve ark., 1995; Malmgren ve ark., 2006).

Andersson ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, RDKR kök yüzeyinin %20'sinden fazlasını etkilediğinde dişin fizyolojik hareketliliğini kaybedebileceği ve perküsyonda yüksek perdeli veya metalik bir ses verebileceği sonucuna varılmıştır. Ancak bu değerlendirme, geleneksel radyografilerin labial ve lingual/palatal kök yüzeylerindeki RDKR'nin varlığını ve yaygınlığını yeterince tespit edememesi nedeniyle yetersiz olabilir. Ayrıca, gelişim sürecinde RDKR meydana gelirse, özellikle pubertal büyüme atağından önce, diş infraokluze bir görünüm sergileyebilir. Bu tür dişler genellikle travmatik bir yaralanma öyküsüne sahiptir ve çoğu zaman hasta tarafından herhangi bir belirti bildirilmez. Etkilenen diş, pulpa duyarlılık testlerine normal bir yanıt verebilir; ancak tersiyer dentin oluşumu varsa, bu yanıt gecikebilir veya tamamen engellenebilir. Ancak duyarlılık testine yanıt alınamaması, bu dişte kanal tedavisi yapılması

gerektiği anlamına gelmez, çünkü bu patolojik durum tamamen periodonsiyumun etkisiyle ilerler (Andersson ve ark., 1984; Andreasen, 1975).

Replasman dış kök rezorpsiyonunun radyolojik özellikleri

Replasman dış kök rezorpsiyonunun radyolojik özellikleri incelendiğinde, periodontal ligament boşluğunun kaybolduğu ve kök yüzeyinin çevredeki kemikle birleşmiş gibi görüldüğü tespit edilir (Andreasen ve Hjørtting-Hansen, 1966b). Bu durumda, kök dentininin düzensiz bir yapı kazandığı ve kemikle yer değiştirildiği gözlemlenir. Bu düzensizlik, radyografik görünümde 'güve yeniği' şeklinde bir tabirle betimlenebilir (Durack ve Patel, 2016). Radyografilerde, replasman rezorpsiyonunun meydana geldiği alanlarda periodontal ligament aralığı ve lamina durada kayıplar görülür (Abbott, 2022).

Konvansiyonel radyografik incelemeler, replasman dış kök rezorpsiyonunun varlığını ancak kökün proksimal yüzeylerinde ortaya koyabilir. Bu durum, özellikle bukkal ve palatinal yüzeylerde meydana gelen rezorpsiyonları tespit etmek için yetersiz kalabilir ve dolayısıyla bu tip rezorpsiyonun kapsamı ve yaygınlığını eksik değerlendirme riski taşır. Bu nedenle, bu tip rezorpsiyonun doğru bir şekilde değerlendirilmesi için Konik Işın Hacim Tomografisi (KIBT) kullanılması önerilmektedir. KIBT, kökün tüm yüzeylerinde meydana gelen rezorpsiyonun kapsamını ve niteliğini daha hassas bir şekilde ortaya koyabilir (Durack ve Patel, 2016).

Ayrıca, rezorpsiyonun hızının bölgesel olarak değişiklik gösterdiği ve bu nedenle kalan kökün çok düzensiz bir kontur kazandığı gözlemlenmiştir. Rezorpsiyon ilerledikçe, kök yüzeyinde düzensiz bir görünüm oluşmakta ve bu durum, radyolojik olarak diş yapısının belirgin özelliklerini değiştirmektedir (Abbott, 2022).

4.1.3.2.3 Servikal dış kök rezorpsiyonu

Servikal dış kök rezorpsiyonu (SDKR), diş kök yüzeyinin dış kısmından başlayan ve kök dentinini çeşitli yönlerde ve farklı derecelere kadar etkileyebilen bir kök rezorpsiyon türüdür. SDKR, genellikle dişetin epitelial ataşmanının hemen apikalinde gelişmekte olup, bu nedenle diş kökünün servikal bölgesinde yaygın olarak tespit edilmektedir. Bu durum, lezyonun servikal bölgedeki lokalizasyonuna dayanmaktadır. Bununla birlikte, periodontal desteğin kaybedildiği ve/veya uzun bağlantı epiteli gelişmiş dişlerde, rezorptif defekt daha apikal bölgelerde meydana gelebilir, kökün orta ve apikal üçlüklerine kadar ilerleyerek kök dentinine çeşitli yönlerde yayılabilir (Mavridou ve ark., 2016).

Servikal dış kök rezorpsiyonu, invazif servikal rezorpsiyon, periferik inflamatuvar kök rezorpsiyonu ve subepitelyal dış kök rezorpsiyonu gibi daha önce kullanılan terminolojilerle tanımlanmış olmasına rağmen son yapılan çalışmalar, lezyonun doğasını ve lokalizasyonunu en iyi şekilde ifade ettiği için "servikal dış kök rezorpsiyonu" teriminin kullanılmasını önermektedir (Gold ve Hasselgren, 1992; Heithersay, 2004; Trope, 2002)

SDKR, invazif bir karaktere sahip olup hem diş dokusunu hem de periodontal yapıları etkileyebilmektedir. Bu durum, dişin iç yapısındaki bozulmaların ötesinde, klinik olarak çeşitli sorunlara yol açabilir ve uygun tedavi gerektirir.

Servikal dış kök rezorpsiyonunun etyolojisi

Servikal Dış Kök Rezorpsiyonu (SDKR) etyolojisi tam olarak anlaşılamamış olup, multifaktöriyel bir sürece sahip olduğu düşünülmektedir. SDKR'nin oluşumunda, diş kök yüzeyinde klastik hücrelerin dentine bağlanmasına olanak tanıyan koruyucu olmayan bir bölgenin bulunması gerektiği ve bu hücrelerin resorpsiyonu sürdürmek üzere uyarılması gerektiği kabul edilmektedir. Bununla birlikte, SDKR'ye özgü tüm etkenler henüz tam olarak belirlenememiştir. Sementodentin bileşkesinin (CEJ) anatomik yapısındaki farklılıklar, bazı dişlerde korunmasız dentin alanlarının ortaya çıkmasına ve bu bölgelerin osteoklastik aktiviteye duyarlı hale gelmesine neden olabilir (Neuvald ve Consolaro, 2000).

SDKR'nin etyolojisiyle ilgili yapılan araştırmalarda birçok predispozan faktör tanımlanmıştır. Heithersay'ın 222 hastada 257 SDKR vakası üzerinde yaptığı çalışmada, ortodontik tedavi, dental travma, oral cerrahi, periodontal tedavi, parafonksiyonel alışkanlıklar, geç diş sürmesi ve dental gelişim anomalileri gibi çeşitli faktörler tek başına veya kombinasyon halinde SDKR'ye neden olabilen etkenler olarak belirlenmiştir. En sık predispozan faktör olarak ortodontik tedavi belirlenmiş ve hastaların %21'inde ortodontik tedavi öyküsü olduğu saptanmıştır. Tek başına dental travma ise %14 oranında tespit edilmiştir (Heithersay, 1999b).

SDKR gelişimine katkıda bulunabilecek diğer faktörler arasında komşu diş çekimi herpes zoster virüsü, kedilerde görülen virüsler, bifosfonat kullanımı ve intrakoronal beyazlatma bulunmaktadır (Friedman ve ark., 1988; Gunst ve ark., 2013; Patel ve Saberi, 2015; Solomon ve ark., 1986; von Arx ve ark., 2009). Tüm bu faktörler predispozan olarak değerlendirilmekte olup, henüz kesin bir sebep-sonuç ilişkisi kanıtlanmamıştır (Patel ve ark., 2018).

SDKR'nin yaygınlığı ile ilgili yapılan bazı çalışmalar, prevalansı %0.02 ile %2.3 arasında bildirmiştir. Ancak bu oran, SDKR lezyonlarının tespiti ve tanısındaki zorluklar nedeniyle düşük tahmin edilebilir (Gulsahi ve ark., 2007; Irinakis ve ark., 2020).

SDKR'nin resorptif sürecinin devamı konusunda farklı görüşler vardır. Bir görüşe göre, süreç gingival sulkustan kaynaklanan mikroorganizmalar tarafından sürdürülmektedir (Fuss ve ark., 2003; Tronstad, 1988). Buna karşıt olarak Heithersay, SDKR'nin mikroorganizmaların aktif rol oynamadığı ve "iyi huylu proliferatif fibro-vasküler veya fibroosseöz bir bozukluk" olduğunu ileri sürmektedir (Heithersay, 2004).

Servikal dış kök rezorpsiyonunun histolojik özellikleri

Servikal dış kök rezorpsiyonunun histopatolojik süreci henüz tam anlamıyla anlaşılmamış olmasına rağmen, süreç invaziv bir karakter sergilemekte ve çeşitli aşamalardan oluşmaktadır. İlk aşamalarda, resorptif alan granülasyon (fibrovasküler) dokusu ile doludur ve rezorbe edilen yüzeyde odontoklastlar lakünalar içinde gözlemlenebilir (Heithersay, 1999b). Erken dönemde akut inflamatuvar hücreler genellikle bulunmaz, ancak rezorpsiyon alanında daha sonraki dönemlerde ikincil bakteriyel kolonizasyon meydana gelebilir (Cvek ve Lindvall, 1985; Heithersay, 2004).

Resorptif lezyon, kök kanal sistemine doğru ilerleyerek çevresel ya da apiko-koronal yönde radiküler dentin boyunca genişler; bu esnada çoğunlukla kök kanalıyla bağlantı kurmaz. Dentin içinde oluşan dar "kanallar" periodontal ligamente uzanabilir. Ancak, perikanaliküler rezorpsiyon dirençli tabaka sayesinde kök kanalının perforasyonu genellikle geç evrede meydana gelir (Mavridou ve ark., 2016). Bu nedenle, rezorpsiyon bölgesine yakın pulpa dokusu, kök kanalı invazyonla karşılaşana kadar normal histolojik yapısını korumaya devam eder. Lezyon ilerledikçe, resorptif boşlukta kemik benzeri bir doku dentinle doğrudan temas halinde birikerek önceki doku hasarını onarmaya yönelik bir girişim sergiler (Heithersay, 1999b).

Servikal dış kök rezorpsiyonunun klinik özellikleri

Servikal dış kök rezorpsiyonun (SDKR) klinik özellikleri oldukça değişkenlik gösterebilir ve çoğu durumda klasik bir belirti tablosu bulunmamaktadır (Patel ve ark., 2018). Bu durumun erken evrelerinde genellikle asemptomatik bir seyir izlediği bildirilmiştir. Hastalığın fark edilmesi çoğunlukla tesadüfi bir radyografik bulguya dayanır. Özellikle erken evrelerde klinik belirti ve semptomların bulunmaması yaygındır, bu durum teşhisi geciktirebilir (Liang ve ark., 2003).

Bazı durumlarda, dişin servikal bölgesinde pembe veya kırmızı bir renk değişikliği meydana gelebilir. Bu renklenme, resorptif defekti dolduran fibro-vasküler granülasyon dokusundan kaynaklanır ve bu bölgedeki mine ve dentin tabakalarının incilmesi nedeniyle oluşur. Söz

konusu pembe renklenme, mine ve dentinin incelmesi nedeniyle dişin yüzeyine yansır ve bazen "pembe nokta" ("pink spot") olarak adlandırılır. Bu belirti nadir olmakla birlikte, hastalar, diş hekimleri veya ağız hijyenistleri tarafından genellikle tesadüfen fark edilir. Özellikle labial veya lingual yüzeylerde gözlemlenebilecek bu renklenme, lezyonun kolayca tespit edilebildiği bölgelerde meydana geldiğinde fark edilmesi daha olasıdır (Patel ve Ford, 2007)

ECR'nin ilerlemesiyle birlikte, periodontal ataçman kaybı görülebilir ve rezorptif defektin sondalanması sırasında granülasyon dokusunun yoğun bir şekilde kanamasına neden olabilir. Granülasyon dokusunun, mine veya dentin seviyesinde gingival bölgede perforasyon yaparak hafif bir gingival hiperplazi görüntüsü oluşturabileceği de bildirilmektedir. Ayrıca, sondalama sırasında rezorptif defektin sert ve çizik bir his vermesi, bu durumu çürükten ayırt etmeye yardımcı olan önemli bir özelliktir (Patel, Kanagasingam, ve ark., 2009).

İleri evrelerde, rezorptif süreç kök kanalı duvarını delerek pulpaya ulaşabilir ve bakteriyel kontaminasyon sonucunda pulpit veya periapikal periodontit belirtileri ve/veya semptomları ortaya çıkabilir. Bu aşamada, etkilenen diş genellikle pulpa duyarlılık testlerine yanıt verir; ancak ECR pulpaya kadar ilerlemiş ve nekroz meydana gelmişse bu yanıt kaybolabilir. Klinik belirtiler, dişte renk değişikliği, spontan lokalize ağrı, çiğneme sırasında hassasiyet, perküsyonda hassasiyet, apikal bölgede palpasyonla hassasiyet, fistül oluşumu ve/veya bukkal sulkus şişliği gibi semptomları içerebilir (Frank ve Torabinejad, 1998).

Servikal dış kök rezorpsiyonunun radyolojik özellikleri

Servikal dış kök rezorpsiyonu (SDKR), lezyonun konumu, invazyon derinliği ve lezyon içindeki fibroosseöz ve fibro-vasküler dokuların oranına bağlı olarak farklı radyolojik özellikler gösterebilir. SDKR genellikle rezorptif fazda radyolusent bir yapı olarak ortaya çıkar; ancak daha ileri vakalarda, rezorptif bölgede fibroosseöz doku birikimi nedeniyle radyolojik görünümünde bulutlu veya lekeli bir yapı oluşabilir. Lezyonun sınırları belirgin olabilir ya da düzensiz, pürüklü bir görüntü sunabilir; dolayısıyla SDKR için "klasik" bir radyolojik görünüme sahip olduğu söylenemez. SDKR, genellikle servikal bölgede yerleşen radyolusent bir lezyon olarak tespit edilse dahi, lezyon daha apikal bölgelere de yayılabilir ve bu durum diş eti ataşmanının konumuna bağlıdır. Lezyonun çevresindeki sınırlar, lezyonun derinliği ve içindeki osseöz dokuların oranına göre değişiklik gösterebilir; bazı lezyonların düzenli, bazılarının ise düzensiz sınırları olabilir. İleri vakalarda, fibroosseöz doku birikimi nedeniyle lezyonun radyografik görünümü daha bulanık hale dönüşebilir ve bu durum lezyonun uzun süreli olduğuna işaret eder (Gunst ve ark., 2013; Patel, Kanagasingam, ve ark., 2009).

SDKR'nin radyografik özellikleri, iç kök rezorpsiyonu (İKR) ile benzerlik gösterebilir ve bu iki durum arasında ayrım yapmak, özellikle klinik belirtilerin bulunmadığı vakalarda zor olabilir (Durack ve Patel, 2016). SDKR vakalarında, kanal duvarının sınırları lezyon boyunca izlenebilir ve bu sınırlar bozulmamış bir şekilde devam eder, çünkü rezorpsiyon dış kök yüzeyinde yer almakta ve kanal sistemi ile doğrudan iletişimde değildir. Ancak İKR vakalarında, rezorptif defekt kök kanalı duvarının bir uzantısı olduğundan kanal duvarı bu defekt boyunca süreklilik gösterir (Gartner ve ark., 1976).

Bu iki durum arasında ayrım yapmak için paralel teknik kullanılması önerilir. Bu yöntemde, standart periapikal radyografa ek olarak, x-ışını tüpünün yatay açısında bir kayma ile ikinci bir radyograf çekilir. SDKR vakalarında, rezorptif defektin konumu kök kanalına göre hareket eder; bu hareket, lezyonun yerleşimine bağlı olarak x-ışını tüpünün hareketiyle aynı veya zıt yönde olabilir (Patel, Dawood, ve ark., 2009)

Radyografik tanıda kullanılan Heithersay sınıflandırması, SDKR lezyonlarının yaygınlığını değerlendirmekte kullanılır ve dört sınıf tanımlar. Bu sınıflandırmaya göre, sınıf I lezyon, koronal dentinde yüzeysel bir rezorpsiyon olarak görülürken; sınıf II lezyon, pulpa yakınına kadar ilerleyen daha derin bir rezorpsiyonla karakterizedir. Sınıf III, koronal üçlüğü aşan bir yayılıma sahipken, sınıf IV ise kökün koronal üçlüğünün ötesine kadar ilerler (Heithersay, 1999a, 1999b).

Radyograflarla karşılaştırıldığında, konik Işın Hacimli Bilgisayarlı Tomografi'nin (KIBT) SDKR'nin lokalizasyonu ve yayılımını değerlendirmede daha yüksek bir tanı doğruluğu sağladığı görülmüştür. KIBT, SDKR lezyonunun kök kanal duvarını delip delmediğini belirlemek için özellikle faydalıdır ve bu sayede kanal tedavisi gerekliliği olup olmadığına karar vermede yardımcı olabilir (Patel ve ark., 2016; Patel, Dawood, ve ark., 2009).

SDKR'nin radyolojik tanısı, lezyonun yeri, yayılım seviyesi ve içindeki doku bileşenleri gibi çeşitli faktörlere bağlı olarak değişiklik gösterir. KIBT'nin kullanımı, hem tanı koymada hem de tedavi planı oluşturmada önemli bir avantaj sağlamakta ve bu nedenle SDKR'nin yönetiminden önce değerlendirilmesi önerilmektedir (ESE, 2019).

4.1.3.2.4 Dış kök yüzey rezorpsiyonu

Dış kök yüzey rezorpsiyonu, genellikle sementin küçük bölgelerinde meydana gelen ve bazen dentine kadar uzayabilen bir rezorpsiyon türü olarak tanımlanır. Bu rezorpsiyon, çoğunlukla

dışın dış yüzeyini etkilediğinden "yüzey" terimi ile ifade edilmektedir. Genellikle lokalize bir yaralanmanın ardından ortaya çıkan bu süreç, sınırlı ve kendi kendini sınırlayan bir özellik gösterir. Yaralanma geçici bir olay olduğu sürece ve dış bakterilerle kontamine olmadığı müddetçe rezorpsiyon süreci devam etmez. Bu tür yüzey rezorpsiyonu, küçük bir travmanın ardından iyileşme sürecinin bir parçası olarak kabul edilebilir (Darcey ve Qualtrough, 2013).

Dış kök yüzey rezorpsiyonu, basınca bağlı bir süreçtir ve kökün dış yüzeyinde meydana gelir. Bu durum enfeksiyona bağlı değildir ve kaynağı ortadan kaldırıldığında kendiliğinden sınırlanır ve semental iyileşme sağlanır. Çeşitli etiyolojik faktörler bu duruma yol açabilir. Gömülü dişler, ortodontik tedavi, kistler veya tümörlerin oluşturduğu basınç yaygın nedenler arasında yer alır (Andreasen, 1981; Tronstad, 1988). Ayrıca, ortodontik tedavi gören dişlerde ciddi yüzey rezorpsiyonu oranının %1 ile %5 arasında değiştiği belirtilmiştir (Killiany, 1999; Weltman ve ark., 2010). Özellikle, daha önce diş travması yaşamış olan dişler, ortodontik tedavi sırasında yüzey rezorpsiyonuna daha yatkın olabilir (Levander ve Malmgren, 1988; Malmgren ve ark., 1982).

Çeşitli çalışmalar, ortodontik tedaviye bağlı olarak artan dış kök yüzey rezorpsiyonu riskine katkıda bulunabilecek faktörleri değerlendirmiştir. Bu faktörler, dişe bağlı, hasta ile ilgili ve tedaviye bağlı olarak üç kategoride sınıflandırılabilir. Örneğin, künt ve pipet şeklindeki kök uçları, önceki travma öyküsü ve Sınıf III maloklüzyon, ortodontik tedavi gören hastalarda daha yüksek rezorpsiyon oranları ile ilişkilendirilmiştir (Kaley ve Phillips, 1991; Levander ve Malmgren, 1988; Linge ve Linge, 1983; Malmgren ve ark., 1982). Ayrıca, yaş ve cinsiyet gibi hasta ile ilgili faktörlerin etkisi belirsiz olarak değerlendirilmiştir (Baumrind ve ark., 1996; Kjaer, 1995). Sistemik durumlar, örneğin astım, DKYR riskini artırabilirken, artmış tiroksin hormonu seviyesinin DKYR insidansını azalttığı bildirilmiştir (McNab ve ark., 1999; Shirazi ve ark., 1999).

Ortodontik tedaviye bağlı yüzey rezorpsiyonu açısından sürekli kuvvet uygulamasının, kesintili kuvvet uygulamasına kıyasla daha yüksek risk taşıyabileceği sınırlı kanıtlarla öne sürülmüştür (Acar ve ark., 1999; Weltman ve ark., 2010). Sabit ortodontik apareylerle yapılan tedavilerde, çıkarılabilir apareylere kıyasla daha yüksek DKYR insidansı görülme olasılığı daha yüksektir (Linge ve Linge, 1983; Yassir ve ark., 2021). Gömülü üçüncü molar ve kanin dişler, komşu dişlerde DKYR oluşumuna neden olabilmektedir (Chu ve ark., 2003; Cooke ve Wang, 2006).

Dış kök yüzey rezorpsiyonu genellikle asemptomatiktir ve klinik olarak belirti göstermez. Histopatolojik incelemelerde, rezorpsiyon sürecinin, gömülü dişler, kistler veya ortodontik tedavi gibi nedenlerin oluşturduğu basınç sonucu sementoblastların ölümü ve odontoklastların

kök yüzeyini rezorbe etmeye başlaması ile ilişkilendirildiği bildirilmektedir). Bu süreçte periodontal ligamentteki damarların sıkışması ve hipoksi durumu önemli rol oynar. Rezorpsiyon süreci, basınç kaynağı ortadan kaldırıldığında sona erer (Martins ve ark., 2019).

Radyografik olarak, dış kök yüzey rezorpsiyonu genellikle fark edilmez çünkü rezorpsiyonun sığ doğası nedeniyle bu tür lezyonlar genellikle yalnızca histolojik incelemelerde ortaya çıkar. Bununla birlikte, konik ışınli bilgisayarlı tomografi (KIBT) gibi daha gelişmiş görüntüleme teknikleri, rezorpsiyonun tespit edilme oranını artırmakta ve sürecin kapsamı hakkında daha kesin bilgi sunmaktadır. Bu tür rezorpsiyonlar genellikle tedavi gerektirmez; çünkü süreç kendi kendine sınırlanır ve eğer bakteriyel kontaminasyon yoksa iyileşme meydana gelir (Marmulla ve ark., 2005; Moze ve ark., 2013).

4.1.3.2.5 Geçici apikal yıkım

Geçici apikal yıkım kök ucunun ve komşu kemik dokusunun enfeksiyon kaynaklı olmayan, zamanla kendi kendine iyileşen geçici bir rezorpsiyonudur. Bu durum, genellikle travma geçirmiş dişlerde görülmekte olup, doku hasarı sonrasındaki onarım süreci sonucunda ortaya çıkan bir durumdur. Geçici apikal yıkım, kök ucu tam gelişmiş ve kapanmış dişlerde görülmekte, apeksi açık olan dişlerde ise genellikle gözlemlenmemektedir. Bunun sebebi, gelişen kök ucuna eşlik eden periapikal radyolüsensinin apikal patoloji bulgularını maskeleymesi olabilir. Geçici apikal yıkım, genellikle travma kaynaklı diş yaralanmaları sonucu ortaya çıkar ve genellikle ekstrüzyon veya lateral lüksasyon gibi orta düzeyde travmalarla ilişkilendirilir. Diş yer değıştirme miktarı arttıkça bu durumun ortaya çıkma olasılığı azalmaktadır. Sublüksasyon yaralanmalarında görölme sıklığı daha düşükken, ekstrüde ve laterale lüksasyona uğramış dişlerde bu olgu daha fazla rapor edilmiştir (Andreasen, 1986).

Bu durum, klinik olarak dişte hafif renk değışikliği ve pulpa duyarlılık testine gecikmiş veya negatif yanıtla karakterize edilebilir. Dişte meydana gelen renk değışikliği ve duyarlılık kaybı genellikle bir yıl içerisinde düzelmektedir. Pulpa duyarlılık testi gecikmiş veya negatif yanıt gösteriyorsa, bu durum kök kanallarının obliterasyonu ile ilişkilendirilebilir. Bu süreç sonunda dişte genellikle kök kanalların obliterasyonu ve dış yüzey rezorpsiyonu meydana gelir (Andreasen, 1986; Boyd, 1995).

Geçici apikal yıkımın histopatolojik mekanizması henüz tam olarak anlaşılamamıştır. Ancak, bu durumun nekrotik veya zarar görmüş dokunun onarım süreci sonucunda sağlıklı doku ile yer değışmesi olarak açıklanabileceği düşünülmektedir. Bunun yanı sıra, geçici bir bakteriyel enfeksiyonun da bu duruma neden olabileceği öne sürölmüştür (Andreasen, 1986).

Radyografik olarak ise geçici apikal yıkım, periodontal ligament alanında genişleme ve apikal lamina durada kayıp veya bulanık bir görünüme yol açabilir. Bu radyografik bulgular, dişin tam olarak sokete oturması ve zamanla rezorpsiyonun gerilemesiyle normale dönebilir. Ancak, radyografik incelemelerde kullanılan tekniklerin sınırlılıkları nedeniyle bu bulgular bazen yanıltıcı olabilmektedir. Geleneksel radyografilerdeki minik açısal değişiklikler, periapikal veya periodontal ligament değişikliklerinin kaybolmasına neden olabileceğinden, bu durum radyografik bir artefakt olarak değerlendirilebilir (Cohenca ve ark., 2003; Patel ve Saberi, 2018; Rudolph ve White, 1988).

4.1.4 Dış kök rezorpsiyonu tedavisinde tercih edilen restoratif materyaller

4.1.4.1 Cam iyonomer siman

Cam iyonomer simanlar, dental uygulamalarda yaygın olarak kullanılan asit-baz reaksiyonuna dayalı malzemelerdir. Bu simanlar, düşük moleküler ağırlıklı polimerik asitlerin bazik alüminosilikat cam tozları ile reaksiyona girmesi sonucu oluşur. 1969 yılında geliştirilen ve 1972'de Wilson ve Kent tarafından tanıtılan cam iyonomer simanlar, zamanla restoratif tedavilerde önemli bir yer edinmiştir (Crisp ve ark., 1980; Mount, 2002) .

Cam iyonomer simanın bileşimi; suda çözünebilen polimerik asit, bazik cam partikülleri ve sudan oluşmaktadır. Bu cam partiküllerinin temel bileşenleri arasında silisyum oksit (SiO_2), alüminyum oksit (Al_2O_3) ve kalsiyum oksit (CaO) yer almaktadır. Stronsiyum oksit (SrO) ve çinko oksit (ZnO) ise bazen kalsiyum oksit yerine tercih edilmekte ve radyopasitenin artmasına katkıda bulunmaktadır . Cam partikülleri üzerinde gerçekleşen reaksiyonun sonucunda oluşan materyal, asit-baz reaksiyonunun iki aşamasını içerir: çözünme ve donma fazı (Crisp ve ark., 1980; Shahid ve ark., 2014) .

Cam iyonomer simanlar, sertleşme sürecinde iki ana aşama geçirir. İlk aşamada, polimerik asit cam partiküllerinin yüzeyine etki ederek çeşitli iyonların (örneğin alüminyum, flor, kalsiyum veya stronsiyum) salınımını sağlar. Bu iyonların salınımı, karboksil gruplarının iyonlarla bağ kurmasına olanak tanıyarak malzemenin sertleşme sürecine yardımcı olur. Sertleşme sürecinin ikinci aşamasında ise, alüminyum ve kalsiyum iyonları poliasit zincirleri ile bağlanarak malzemenin dayanıklılığını artırır ve olgunlaşma sürecini tamamlar (Walls, 1986) .

Cam iyonomer simanlar, dental uygulamalarda kullanılan diğer restoratif malzemelerle kıyaslandığında hem kimyasal hem de mikromekanik bağlanma yeteneğine sahiptir. Mineye ve dentine olan adezyonu, bu materyalin mikro sızıntıyı azaltmasına ve sekonder çürüklerin önlenmesine katkıda bulunur. Ayrıca, poliasit bileşeni sayesinde cam iyonomer simanın

'kendiliğinden aşındırma' özelliği, mikromekanik bağlanma gücünü artırmaktadır (Nicholson, 2016) .

Cam iyonomer simanın bir diğer avantajı ise flor salınımıdır. Flor salınımı, diş dokularında düşük seviyelerde sürekli olarak devam eder ve bu, diş hassasiyetini azaltarak çürük oluşumunu önlemede önemli bir rol oynar. Bu nedenle, cam iyonomer simanlar süt dişleri, kaide materyali, pit ve fissür örtücü olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Ayrıca ortodontik braket yapıştırıcıları olarak da tercih edilmektedirler (Hsu ve ark., 2004; Mount, 2002) .

Cam iyonomer simanların performansı üzerine yapılan çeşitli çalışmalar, bu malzemelerin diş hekimliği alanındaki başarısını desteklemektedir. Örneğin, Alhadainy ve Himel tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, ışıkla sertleşen cam iyonomer simanın furkasyon perforasyonlarının onarımında amalgam veya Cavit'e kıyasla daha iyi bir sızdırmazlık sağladığı tespit edilmiştir. Benzer şekilde, başka bir çalışmada ışıkla sertleşen cam iyonomer simanın, kimyasal olarak sertleşen cam iyonomer simandan daha üstün bir sızdırmazlık yeteneğine sahip olduğu öne sürülmüştür. Genel olarak, cam iyonomer simanlar, adezyon özellikleri sayesinde geleneksel malzemelere göre daha yüksek sızdırmazlık potansiyeline sahiptir (Alhadainy ve Himel, 1993a, 1993b).

4.1.4.2 Mineral trioksit agregat (MTA)

MTA (Mineral Trioksit Agregat), 1990'ların başlarında Mahmoud Torabinejad tarafından geliştirilen ve endodontide kullanılan ilk biyoseramik esaslı materyaldir. Portland çimentosu temel alınarak oluşturulan MTA, ince hidrofilik partiküllerden oluşan bir toz olup nemli ortamlarda sertleşir. Su ile karıştırıldığında pH'ı 12.5 olan kolloidal bir jel oluşturur ve yaklaşık 4 saat içinde sert bir yapıya dönüşür (Torabinejad ve ark., 1995).

MTA'nın ilk ticari formu ProRoot MTA (Dentsply/Tulsa Dental, Tulsa, OK, USA) adıyla piyasaya sürülmüş, ardından Angelus MTA (Beyaz/Gri- MTA, Angelus, Londrina, PR, Brazil) ve CPM (Beyaz- MTA, Egeo, Buenos Aires, Argentina) gibi ürünler takip etmiştir. Portland çimentosu ile benzer kimyasal ve fiziksel özelliklere sahip olmasına rağmen, MTA potasyum içermez ve bizmut oksit eklenerek radyopasitesi artırılmıştır. Ayrıca, MTA'nın çalışma süresi daha uzun ve partikül boyutu daha küçüktür (Islam ve ark., 2006; Parirokh ve Torabinejad, 2010a; Saidon ve ark., 2003).

Hidratasyon sürecinde MTA'dan kalsiyum hidroksit açığa çıkar; bu madde karışım yapıldıktan 4 saat sonra salınmaya başlar ve bir yıla kadar devam eder. Salınan kalsiyum iyonları,

dokulardaki fosfatlarla etkileşerek hidroksiapatit kristalleri oluşturur ve sert doku oluşumunu teşvik eder (Torabinejad ve ark., 1995).

Estetik kaygılar nedeniyle MTA, gri ve beyaz olmak üzere iki farklı formda üretilmiştir. Gri MTA'da bulunan demir iyonları ve alümino-ferrit fazı, dişlerde renklenmeye neden olabilir; bu nedenle beyaz MTA'da bu bileşenler çıkarılmıştır. Beyaz MTA ayrıca daha küçük partiküllere ve daha az boyutsal genleşmeye sahiptir (Camilleri, 2008)

MTA, perforasyon tamiri, vital pulpa tedavileri, retrograd dolgu, apeksifikasyon ve rezorpsiyon tamiri gibi çeşitli endodontik uygulamalarda kullanılmaktadır. İn vitro ve in vivo çalışmalarda, MTA'nın sızdırmazlık yeteneğinin amalgam ve diğer geleneksel materyallere göre üstün olduğu gösterilmiştir. Ayrıca, biyouyumluluğu yüksektir ve inflamatuvar reaksiyonlara neden olmaz. Deney hayvanlarında yapılan implantasyon çalışmalarında, MTA ile doğrudan kemik temasının sağlandığı ve inflamasyonun gözlenmediği rapor edilmiştir (Ford ve ark., 1996; Lee ve ark., 1993; Shabahang ve ark., 1999; Torabinejad ve ark., 1998) .

Perforasyon tamirinde MTA'nın etkinliği üzerine yapılan çalışmalarda, Lee ve arkadaşları MTA'nın sızdırmazlık açısından IRM ve amalgamdan daha üstün olduğunu belirtmişlerdir. Nakata ve ekibi ise MTA'nın furkal perforasyonlarda *Fusobacterium nucleatum* sızmasını engellemede amalgamdan daha etkili olduğunu göstermiştir. Pitt Ford ve çalışma arkadaşları, köpeklerde yaptıkları histolojik incelemelerde, MTA ile tamir edilen perforasyon bölgelerinde minimal inflamasyon ve bazı örneklerde tamir materyali üzerinde sement oluşumu tespit etmişlerdir (Ford ve ark., 1995; Lee ve ark., 1993; Nakata ve ark., 1997).

MTA endodontik tedavilerde çok yönlü kullanıma sahip, yüksek biyouyumluluk ve üstün sızdırmazlık özellikleri gösteren bir materyaldir. Hem laboratuvar hem de klinik çalışmalarda başarılı sonuçlar elde edilmiş ve geleneksel materyallere göre üstünlükleri kanıtlanmıştır (Torabinejad ve Chivian, 1999).

4.1.4.3 Biodentin

Biodentin, 2009 yılında tanıtılan ve diş hekimliğinde kullanılan trikalsiyum silikat bazlı simanların önemli bir örneği olan kalsiyum silikat esaslı bir materyaldir. MTA'nın uzun sertleşme süresi, kullanım zorlukları ve kuron renklenmesi gibi dezavantajlarını gidermek amacıyla geliştirilmiştir. Üstün fiziksel özellikleri, kullanım kolaylığı, artan biyouyumluluğu ve geniş klinik uygulama alanları nedeniyle literatürde olumlu değerlendirmeler almaktadır (Caronna ve ark., 2014; Malkondu ve ark., 2014).

Tek kullanımlık kapsüller halinde üretilen Biodentin'in hazırlanması için kapsül içerisine beş damla likit eklenip 30 saniye boyunca amalgamatörde karıştırılması gerekmektedir. Toz bileşenleri arasında zirkonyum oksit, kalsiyum karbonat ve trikalsiyum silikat bulunurken; likiti su ve kalsiyum klorür içermektedir. Kalsiyum karbonat, kalsiyum silikat hidrat jellerinin çekirdeklenmesi için bir merkez oluşturarak sertleşme süresini kısaltır. Ayrıca, kalsiyum klorürün sertleşme süresini azaltıcı etkisi olduğu belirtilmiştir (Caronna ve ark., 2014; Grech ve ark., 2013b; Malkondu ve ark., 2014).

Biodentin'in sertleşme süresi konusunda yapılan araştırmalarda, başlangıç süresinin 9-12 dakika arasında olduğu üretici tarafından belirtilirken, farklı çalışmalarda bu sürenin 6 ile 30 dakika arasında değiştiği rapor edilmiştir (Alhodiry ve ark., 2014; Butt ve ark., 2014). Grech ve ark. tarafından yapılan bir çalışmada, sertleşmenin tamamlanma süresi 45 dakika olarak bulunmuştur. Bu farklılıkların, çalışmalar arasındaki metodolojik çeşitlilikten kaynaklanabileceği düşünülmektedir. (Grech ve ark., 2013b).

Radyopasitesi diğer trikalsiyum silikat bazlı simanlara göre daha düşük olan Biodentin'in, ISO standartlarına uygunluğu konusunda çelişkili sonuçlar mevcuttur (Kaup ve ark., 2015; Tanalp ve ark., 2013). Renk stabilitesi hakkında da tutarsız bulgular bildirilmiştir (Beatty ve Svec, 2015; Vallés ve ark., 2015). Ancak olumlu olarak, Biodentin diğer simanlara kıyasla daha yüksek basma direnci, mikrosertlik, eğilme direnci, sızdırmazlık özelliği, itme-bağlanma direnci ve kalsiyum iyonu salınımı göstermiştir (Butt ve ark., 2014; Camilleri ve ark., 2014; Dawood ve ark., 2015; Nagas ve ark., 2016). Öte yandan, uzun vadede artan çözünürlük, daha yüksek ağır metal salınımı ve azalmış makaslama bağlanma direnci gibi olumsuzluklar da saptanmıştır (Jang ve ark., 2014).

Antimikrobiyal etkinliği açısından, Biodentin'in *Streptococcus sanguis*, *Enterococcus faecalis*, *Escherichia coli* ve *Candida albicans* gibi bazı mikroorganizmalara karşı daha etkili olduğu, ancak *Streptococcus mutans* ve *Streptococcus salivarius*'a karşı daha az antibakteriyel aktivite gösterdiği belirtilmiştir. Diğer trikalsiyum silikat bazlı simanlarda olduğu gibi, Biodentin'in sitotoksitesi de doz ve zamana bağlıdır (Rajasekharan ve ark., 2018).

Hayvan deneylerinde, pulpa kaplama işlemlerinde daha kalın sert doku köprüleri ve pulpotomi işlemlerinde artmış mineralize doku oluşumu gözlemlenmiştir (Tziafa ve ark., 2014). Randomize kontrollü çalışmalar ve vaka kontrol çalışmaları, Biodentin'in MTA'ya uygun bir alternatif olabileceğini göstermektedir (Kusum ve ark., 2015). Biodentin'in kullanımıyla ilgili geniş bir klinik uygulama yelpazesi vaka raporları şeklinde yayınlanmış olsa da uzun dönem

etkinliğini değerlendiren yüksek kanıt düzeyine sahip klinik çalışmaların eksikliği kesin bir sonuca varmayı engellemektedir (Niranjani ve ark., 2015).

Literatürde defalarca vurgulandığı üzere, Biodentin'in geliştirilmiş fiziksel ve biyolojik özellikleri vardır. MTA'nın dezavantajlarını aşma yeteneği sayesinde, özellikle travmatik yaralanmalar sonrasında, pedodonti ve endodontide farklı tedavi yaklaşımlarını önemli ölçüde değiştirme potansiyeline sahiptir. Biodentin, apeksifikasyon tedavileri, perforasyon tamiri, vital pulpa tedavileri ve kök rezorpsiyonlarının onarımı gibi endodontik uygulamalarda kullanılmaktadır (Rajasekharan ve ark., 2018).

4.1.4.4 Diğer tamir materyalleri

Son dönemlerde, rezorpsiyon onarımında hekimler arasında MTA ve biyoseramik tabanlı materyaller yaygın olarak tercih edilen popüler seçenekler haline gelmiştir. Ancak buna rağmen, amalgam, ışıkla sertleşen rezin kompozitler, çinko oksit-ojenol, ve gutaperka gibi geleneksel malzemelerin kullanımı da sürmektedir (Heithersay, 1999a) .

Amalgam

Amalgam, eski çağlardan beri çok yönlü olarak kullanılan materyallerden biridir. Genellikle restoratif amaçlarla tercih edilmesine rağmen, endodontik perforasyonların tamirinde deneysel olarak kullanılmıştır. Mahmoud ve arkadaşlarının gerçekleştirdiği bir çalışmada, furkasyon perforasyonlarının tamiri için amalgam kullanıldığında, cavit ve kalsiyum hidroksit ile karşılaştırıldığında daha üstün sızdırmazlık özellikleri gösterdiği bulunmuştur. Başka bir araştırmada ise Benenati ve ekibi, amalgamın dikey sıkıştırılmış sıcak gutta-perka'ya kıyasla daha kabul edilebilir bir tamir malzemesi olduğunu belirlemiştir (Benenati ve ark., 1986; ElDeeb ve ark., 1982).

Kompozit

ışıkla sertleşen kompozit, perforasyon tamirinde denenmiş bir malzemedir. Lateral perforasyonların onarımında kullanıldığında, amalgam ve IRM'ye kıyasla daha iyi sızdırmazlık sağladığı gösterilmiştir. Bununla birlikte, ışıkla sertleşen kompozitlerde aktif monomerlerin neden olduğu toksik etkiler azalmış olsa da, zararlı etkilerinin tamamen ortadan kalkmaması gibi durumlar bu malzeme için de geçerlidir. Ayrıca, kompozitin dezavantajı, lateral perforasyon tamirinde kullanıldığında en yüksek taşma oranına sahip olmasıdır (Mannocci ve ark., 1997).

Çinko oksit ojenol

Diş hekimliğinde çeşitli amaçlarla kullanılan terapötik simanlardan biri de çinko oksit ojenoldür (ZOE). Bramante ve arkadaşlarının çalışmasında, ZOE ile onarılan perforasyonların zayıf bir prognoz sergilediği belirtilmiştir. Araştırma, bu materyalin furkasyon perforasyonlarının tamirinde kullanıldığında şiddetli iltihabi reaksiyonlara, apse oluşumuna ve alveolar kret rezorpsiyonuna yol açabileceğini göstermiştir (Bramante ve Berbert, 1987).

Guta perka

Guttaperka, 1867 yılında Bowman tarafından tanıtılmış olup, endodontide en yaygın kullanılan dolgu materyalidir. Lantz ve Persson, perforasyon onarımlarında gutta-perka kullanıldığında çinko fosfat siman veya amalgama göre daha az iltihaplanma meydana geldiğini bildirmişlerdir. Ancak, Benenati ve arkadaşlarının çalışmalarında, gutta-perka ile yapılan onarımların, amalgam ile yapılanlara göre daha sık başarısızlıkla sonuçlandığı sonucuna varılmıştır (Al-Momani ve Nixon, 2013; Benenati ve ark., 1986; Lantz ve Persson, 1965).

4.2 Stres Analiz Yöntemleri

Dental travmalar, diş ve çevre dokular üzerinde karmaşık biyomekanik etkiler yaratmaktadır. Bu etkilerin tam olarak anlaşılması, diş hekimliğinde restoratif ve travmatik müdahalelerin başarısı açısından kritik öneme sahiptir. Travmanın diş ve komşu dokular üzerindeki yıkıcı etkilerini belirleyen başlıca faktörler arasında darbenin enerjisi, şekli, direnci ve kuvvetin yönü bulunmaktadır. Özellikle, düşük hızda uygulanan darbeler diş yapısına minimal zarar verirken, çevre dokular üzerinde daha fazla hasar oluşturma eğilimindedir. Buna karşılık, yüksek hızda gelen kuvvetler diş kırıklarına yol açarken, komşu dokulara verilen zarar nispeten azalmaktadır (Andreasen, 1970a).

Biyomekanik analizlerde kullanılan yöntemler, in vivo hayvan modellerinden in vitro ve ex vivo modellere kadar geniş bir yelpazeyi kapsamaktadır. Ancak, canlı hayvan modellerinin etik ve maliyet açısından sınırlamaları, insan çalışmalarında etik sorunlar yaratmaktadır. Canlı dokulara doğrudan travmatik kuvvet uygulamak etik açıdan uygun olmadığından, in vitro ve ex vivo modeller sıkça tercih edilmektedir (Andreasen, 1976; Domon ve ark., 1998). Bununla birlikte, periodontal ligament gibi yumuşak dokuların doğru bir şekilde taklit edilmesi zorluğu, bu modellerin sınırlamalarını artırmaktadır. Kuvvet dağılımını ve yayılımını doğru şekilde analiz edebilmek için yumuşak doku etkilerinin de hesaba katılması gerekmektedir (Olsen, 2013).

Stres analiz yöntemleri, bir cisim üzerine etki eden kuvvetlerin yoğunlaştığı bölgeleri belirlemek ve bu bölgelerdeki stres dağılımını incelemek amacıyla kullanılmaktadır. Bu yöntemler, malzeme özelliklerine bağlı olarak kuvvet miktarının farklı etkilerini ortaya koymayı hedefler. Canlı dokuların fonksiyonel ve travmatik kuvvetlere karşı gösterdiği direnç, doğrudan ölçülememekle birlikte, stres analiz modelleri aracılığıyla simüle edilebilmektedir. Böylece, diş ve çevre dokuların daha dayanıklı ve güçlü olabilmesi için gerekli yapısal optimizasyonlar önceden belirlenebilir (Çalikkocaoğlu, 1996; Magne, 2007).

Diş hekimliğinde biyomekanik stres analizleri, restorasyonların ve travmatik müdahalelerin etkilerini anlamak ve optimize etmek için vazgeçilmez bir araçtır. Gelişen modelleme teknikleri ve analiz yöntemleri, daha doğru ve etik çalışmalara olanak sağlayarak, diş hekimliğinde tedavi başarısını artırmayı hedeflemektedir (Caputo ve Standlee, 1987).

Diş hekimliğinde kullanılmakta olan kuvvet analizi yöntemleri şunlardır:

1. Gerinim ölçer ile analiz yöntemi
2. Fotoelastik analiz yöntemi
3. Holografik interferometre ile analiz yöntemi
4. Kırılğan vernikle kaplama yöntemi
5. Sonlu eleman stres analiz yöntemi (Çalikkocaoğlu, 1996)

4.2.1 Gerinim ölçer ile analiz yöntemi

Gerinim ölçerler, malzemelerin üzerine uygulanan yükler sonucu meydana gelen şekil değişikliklerini belirlemek amacıyla kullanılan hassas cihazlardır. Mekanik, optik, elektronik, akustik ve elektriksel özelliklere sahip çeşitli türleri bulunan gerinim ölçerler, farklı uygulama alanlarında etkin bir şekilde kullanılmaktadır. Yük uygulandığında, gerinim ölçer belirli bir bölgede oluşan basınç miktarını ölçerek stres dağılımını analiz eder (Wain, 1957).

Elektriksel gerinim ölçerler, streslerin nicel analizini sağlamak için yaygın olarak tercih edilmektedir. Malzeme ile gerilim arasındaki tanımlanmış ilişki sayesinde, belirli bir gerinim değeri ölçüldüğünde, malzemenin elastik modülü bilindiği takdirde stres değeri hesaplanabilir. Bu prensip, elektriksel gerinim ölçerlerin stres ölçümlerinde kullanılmasını mümkün kılar. Gerinim ölçerler, incelenen numunenin yüzeyine yapıştırılan tel filamentlerinin direnç değişimini ölçerek çalışır. Yük uygulandığında, filamentler üzerindeki gerinim artar veya azalır ve bu değişim elektrik akımı aracılığıyla tespit edilir (Regli ve Gaskill, 1954)

Diş hekimliği alanında, gerinim ölçerler çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır. Restoratif tedavilerde yapılan işlemlerin diş ve çevre dokular üzerindeki etkilerini analiz etmek için bu yöntemden yararlanılır. Ayrıca ortodontik uygulamalarda diş hareketlerinin oluşturduğu streslerin değerlendirilmesinde de gerinim ölçerler önemli bir rol oynar. Periodontal tedavilerde, diş etleri ve destekleyici yapılar üzerindeki stres dağılımını incelemek için bu cihazlar kullanılmaktadır (Çalikkocaoğlu, 1996) .

Gerinim ölçerlerin diş hekimliğinde kullanılmasının en büyük avantajlarından biri, cihazların küçük boyutları sayesinde minimal müdahaleye olanak tanınmasıdır. Ancak, bu ölçerlerin ağız içi ortamın nemi ve diğer faktörlerine karşı etkili bir şekilde mühürlenmesi gerekmektedir. Ayrıca, ölçüm yapılan bölgelerin doğru konumlandırılması ve hizalanması, elde edilen verilerin doğruluğu açısından kritik öneme sahiptir. Kırılğan vernik kaplamalarla birlikte kullanıldığında, gerinim ölçerler yüksek stres yoğunluk bölgelerinin daha doğru tespit edilmesini sağlar. Bu kombinasyon, ölçümlerin daha güvenilir olmasına ve cihazların doğru yerleştirilmesine yardımcı olur (Matthews ve Wain, 1956).

4.2.2 Fotoelastik analiz yöntemi

Fotoelastik analiz, mühendislik alanında yaygın olarak kabul görmüş bir stres analiz tekniğidir ve diş hekimliğinde 1949 yılında Noonan tarafından ilk kez uygulanmıştır (Noonan, 1949). Bu yöntem, amalgam restorasyonlar ve oklüzyon tasarımı gibi diş hekimliği uygulamalarında streslerin değerlendirilmesi amacıyla kullanılmaya başlanmıştır. Fotoelastik teknik, incelenmek istenen yapının fotoelastik bir malzemeden oluşturulan modelinin hazırlanmasını gerektirir. doğru stres analizleri elde edilebilmesi için, Uygulanan kuvvetlerin yönü, büyüklüğü ve desteklenme şekli, gerçek yapının koşullarını yansıtacak şekilde tasarlanmalıdır (Darbar ve ark., 1994).

Fotoelastik materyaller, stres altında çift kırılma özelliği gösterir. Yüklenen yapıdan geçen polarize ışık, malzeme içindeki dikey titreşimlerle farklı hızlarda ilerleyerek faz farkı oluşturur. Bu faz farkı, polariskop cihazı kullanılarak gözlemlenir ve renkli halka desenleri şeklinde ortaya çıkar. Elde edilen renkli çizgiler, yapının hangi bölgelerinde yüksek stres birikimi olduğunu görsel olarak belirlemeye olanak tanır. Diş hekimliğinde fotoelastik analiz, özellikle karmaşık geometrilere sahip yapılar üzerinde stres dağılımını incelemek için idealdir. Başlangıçta iki boyutlu modeller kullanılırken, teknolojik gelişmeler sayesinde üç boyutlu modeller de kullanılmaya başlanmıştır. Ancak, üç boyutlu fotoelastik analizlerin uygulanması, karmaşık şekillerdeki yapılar için stres durumunun tam olarak belirlenmesi açısından zorluklar barındırmaktadır (Mahler ve Peyton, 1955)

Fotoelastik yöntemin diş hekimliğinde kullanımı, protez tasarımlarından ortodontik uygulamalara kadar geniş bir yelpazede yer almaktadır. Örneğin, yapay dişlerin konumlandırılmasının çene kemisine olan etkilerini incelemek için bu yöntem kullanılmaktadır. Yapılan çalışmalar, protezlerin alveolar crest ile olan ilişkisinin stres dağılımını nasıl etkilediğini göstermiştir. Ayrıca, ortodontik apareylerin dişler ve çevre dokular üzerindeki stresleri analiz etmek için de fotoelastik analizden yararlanılmaktadır (Kubota, 1959).

Fotoelastik analiz yönteminin en büyük avantajlarından biri, stres dağılımını görsel olarak sunabilmesidir. Bu sayede, diş hekimleri ve araştırmacılar, yapı üzerindeki streslerin yoğunlaştığı bölgeleri kolayca belirleyebilir ve tasarımlarını buna göre optimize edebilirler. Bununla birlikte, bu yöntemin uygulanabilmesi için özel ekipman ve uzmanlık gerekmektedir. Ayrıca, modelin uniform kalınlıkta olması ve doğru desteklenmesi gibi hazırlık aşamaları titizlikle yapılmalıdır (Darbar ve ark., 1994).

4.2.3 Holografik interferometre analiz yöntemi

Holografi, lazer gibi bir ışık kaynağından yayılan iki ışının etkileşimi sonucu oluşan mikroskobik girişim desenlerinin kaydedilmesiyle cisimlerin üç boyutlu görüntülerinin elde edildiği bir tekniktir. Bir cismin holografik görüntüsü kaydedildikten sonra, cisme kuvvet uygulandığında oluşan yeni görüntü kaydedilir ve girişim desenlerindeki şekil, yön ve mesafe değişiklikleri incelenerek cisimdeki deformasyonlar analiz edilir (Kumar ve ark., 2009).

4.2.4 Kırılğan vernikle kaplama yöntemi

1940'larda DeForest tarafından geliştirilen kırılğan kaplama yöntemi, bir cismin yüzeyindeki gerilme ve şekil değişikliği kalıplarını tespit etmek için kullanılır. Bu yöntem, özel bir verniğin cismin yüzeyine uygulanması ve ardından kuvvete maruz bırakılması sonrasında oluşan çatlakların incelenmesi esasına dayanır (DeForest ve ark., 1942; Sonugelen ve Artunç, 2002; Ulusoy ve Aydın, 2003)

Yöntem, test edilecek cismin yüzeyine bir vernik püskürtülmesi ve kuruması ile başlar. Daha sonra, istenilen şekilde yükler uygulanır. Vernik, gerilme altında kırıldığında, maksimum gerilme alanlarında çatlaklar oluşur. Vernik seçimi, nem, sıcaklık ve gereken duyarlılığa bağlı olarak kritik önem taşır. Kullanılan vernik temel bileşeni genellikle kolofon reçinesidir ve püskürtme için özel olarak tasarlanmış ekipmanlar kullanılır. Bu teknik, gerilme kalıplarının hem nitel hem de yaklaşık nicel bir analizini sağlar, ancak bazı sınırlamaları vardır. Yük altında kolayca görülebilen çatlaklar, yük kaldırıldığında genellikle kaybolur. Ayrıca, çatlakların yüzeye yayılmaması nedeniyle, boyama öncesi yüzeyin aşındırılması gerekir. Yöntem ayrıca

sıcaklık ve nem dalgalanmalarına duyarlıdır ve yalnızca gerilmelerin nitel bir değerlendirmesini sağlar (Darbar ve ark., 1994).

Bu sınırlamalara rağmen, kırılma kaplama yöntemi basitliği nedeniyle çeşitli alanlarda yaygın olarak kullanılmıştır. Diş hekimliğinde, ilk olarak Matthews ve Wain tarafından protezlerin gerilme analizinde kullanılmıştır. Tam protezlerde nitel gerilme analizinde vernik kullanan araştırmacılar, çiğneme sırasında palatal yüzeyin daha büyük çekme gerilmelerine maruz kaldığını bulmuşlardır (Matthews ve Wain, 1956). Diğer araştırmacılar, bu yöntemi, tam protezler altında kemik deformasyonunu etkileyen yapay diş formlarını incelemek için kullanmışlardır ve aynı yüklerin anatomik diş formları altında anatomik olmayan formlara kıyasla daha fazla kemik deformasyonuna yol açtığını bulmuşlardır (Sharpy ve ark., 1960).

Kırılma vernik tekniği, ilk bir test olarak modifikasyon ihtiyacına hızlı ve kolay bir rehber sağlar, ancak daha nicel ölçümler için, bu yöntemin elektrikli gerinim ölçerleri ile birlikte kullanılması önerilir (Darbar ve ark., 1994).

4.2.5 Sonlu elemanlar analizi

Sonlu elemanlar analizi, mühendislik ve bilim alanlarında yaygın olarak kullanılan bir sayısal modelleme ve simülasyon tekniğidir (Sakaguchi ve Powers, 2011) . Bu yaklaşım, karmaşık sistemleri ve yapıları daha küçük, daha yönetilebilir parçalara (sonlu elemanlara) bölmeyi ve bu parçaların davranışlarını matematiksel olarak modellemeyi içerir (Geng ve ark., 2001). Daha sonra, bu küçük parçaların davranışları bir araya getirilerek tüm sistemin veya yapının davranışı tahmin edilebilir. Sonlu elemanlar analizi, çeşitli sektörlerde geniş bir uygulama yelpazesi sunar. Yapı mühendisliğinde bir köprünün veya bir binanın mekanik davranışını modellemek için, uçak mühendisliğinde bir uçağın kanatlarının aerodinamik davranışını analiz etmek için veya biyomedikal mühendisliğinde bir insan vücudunun belirli bir bölümünün (örneğin, bir eklem veya bir organ) mekanik davranışını simüle etmek için kullanılabilir (Geng ve ark., 2001; Wakabayashi ve ark., 2008). Bu yöntem, mühendislerin ve bilim insanlarının karmaşık sistemleri ve yapıları daha iyi anlamalarına ve optimize etmelerine olanak sağlar. Ayrıca, yeni tasarımların ve teknolojilerin geliştirilmesine de önemli katkılarda bulunur. Sonlu elemanlar analizi, sürekli olarak gelişen ve ilerleyen bir alandır. Yeni bilgisayarlı modelleme ve simülasyon tekniklerinin geliştirilmesi ve bu yöntemin çeşitli sektörlerde daha geniş bir uygulama yelpazesi sunması, sonlu elemanlar analizinin, mühendislik ve bilim dünyasında önemli bir rol oynamasına neden olmuştur. Bu yöntem, bilim insanlarına ve mühendislere karmaşık sistemleri ve yapıları daha iyi anlamak, analiz etmek ve optimize etmek için güçlü bir

araç sağlar. Ayrıca, yeni teknolojilerin ve çözümlerin geliştirilmesine de önemli katkılarda bulunur (Akpınar ve ark., 2000; Geng ve ark., 2001).

Diş hekimliğinde sonlu elemanlar yöntemiyle stres analizi, ilk olarak Ledley ve Huang tarafından 1968 yılında gerçekleştirilmiştir (Ledley ve Huang, 1968). Bu çalışma kapsamında, matematiksel modellerle tasarlanmış dişlere kuvvet uygulanmış ve bu kuvvetlerin çevresindeki kemik dokularında yarattığı gerilmeler detaylı bir şekilde incelenmiştir. Günümüzde bu yöntemin kapsamlı bir şekilde kullanılması, Farah ve Craig'ın 1974 yılında yaptıkları araştırmayla diş hekimliği alanında yaygınlaşmaya başlamıştır (Farah ve Craig, 1974)

Diş hekimliğinde sonlu eleman analiz yöntemi şu alanlarda kullanılmıştır: (Mackerle, 2004)

1. Dental materyaller

- Diş ve tabakaları (Mine, dentin, pulpa)
- Amalgam
- Kompozit rezinler, cam iyonomer simanlar ve yapıştırma simanları
- Cam, seramik, zirkonyum sistemler
- Metaller ve metalik sistemler
- Post ve kanal dolgu maddeleri

2. Oral ve maksillofasiyal yapıların mekaniği ve cerrahisi

- Maksilla ve mandibula kırıkları ile bunların fiksasyonu, osteotomi
- Temporomandibular eklem mekaniği,
- Periodontal ligament, alveol kemik, trabeküler kemik, kortikal kemik
- İmplant materyalleri, mini vida ve plak

3. Ortodontik tedaviler, dişlerin hareket ettirilmesi, ortodontik apareyler

4. Konservatif ve endodontik tedaviler, kaviteğin modellenmesi, köle defektleri, kök kanal sisteminin modellenmesi, kanal içi stresler, kanal eğeleri, irrigasyon sistemleri ve iğneleri,

5. Dental restorasyonlar

- Dolgu materyalleri

- Kuron ve köprü protezleri
- Sabit ve parsiyel protezler
- Dental implantlar

6. Dizayn özellikleri

7. Materyal özellikleri

Kuvvet yükleme ve diğer parametreler

Osseointegrasyon

Sonlu elemanlar analizi yönteminin laboratuvar testlerinde birçok avantajı olduğu bildirilmiştir. Değişkenleri kolayca ayarlayabilme, insan materyaline gerek duyulmama ve standardizasyonu en üst düzeye çıkarabilme özellikleri bu avantajlar arasında sayılır. SESA, malzemelerin en yüksek gerilmelerine ve şekil değiştirmelerine ilişkin noktaları görselleştirebilme ve bu noktaları daha iyi anlama konusunda yardımcı olur (Srirekha ve Bashetty, 2010). Ayrıca, sonlu elemanların boyutları ve şekillerindeki çeşitlilik sayesinde bir cismin geometrisini tam olarak temsil edebilme özelliği de sonlu elemanlar analizinin bir diğer avantajıdır. Örneğin, dişlerin yapısal ve morfolojik olarak simetrik olmaması ve düzensiz bir yapıya sahip olması nedeniyle, sonlu elemanlar analizi gibi bir yöntem diş gibi düzensiz yapı ve geometrik özellikleri bulunan cisimlerin kolayca incelenmesine ve sınır koşullarının kolayca uygulanmasına olanak sağlar. Yöntemin çok yönlülüğü ve esnekliği sayesinde neden-sonuç ilişkilerini hesaplamak çok daha kolay hale gelebilir (Srirekha ve Bashetty, 2010). Ek olarak, sonlu elemanlar analizi yöntemi diğer birçok yöntemle göre daha az zaman alıcıdır (Shetty ve ark., 2010). Bilgisayar programlarının yüksek maliyetleri ve genellikle bu tür analizleri yapmak için uzmanlara ihtiyaç duyulması, diğer analiz yöntemlerinin dezavantajları arasında sayılabilir (Shetty ve ark., 2010). Ayrıca, yapılan araştırmaların geçerliliği ve malzeme özelliklerinin sisteme yüklenmesi gibi önemli noktalar da bu yöntemlerin sonuçlarına bağlıdır (Ramoğlu ve Ozan, 2015). Sonlu elemanlar analizi, karmaşık bir mekanik sorunun çözümünde rahatça kullanılan bir tekniktir. İncelenecek bölgeyi küçük ve basit alanlara (elemanlara) ayırarak incelemeyi kolaylaştıran ve çözümü bu küçük parçalar içerisinde sağlayan bir yöntemdir (Geng ve ark., 2001).

4.2.5.1 Sonlu elemanlar metodu ile stres analizi ve biyomekanikle ilgili temel kavramlar

4.2.5.1.1 Element

Sonlu Elemanlar, karmaşık bir sistemi basit geometrik elementlere bölerek analiz eder. Bu elementlerin birleşimiyle matematiksel denklemler oluşturulur ve bu denklemler çözülerek sistemin davranışları incelenir. Orijinal yapının görsel olarak küçük parçalara ayrılmasıyla elde edilen elementler, yapının mekanik özelliklerini yansıtır. Kuvvet dağılımını daha hassas ve gerçekçi bir şekilde değerlendirebilmek için mümkün olduğunca çok sayıda element kullanmak büyük önem taşır (Geng ve ark., 2001).

4.2.5.1.2 Düğüm

Sonlu Elemanlar analizinde, modelin parçalandığı ve elementlerin birbirine bağlandığı noktalara düğüm denir. Her düğümün konumu, belirlenen başlangıç noktasına göre kartezyen koordinat sistemi üzerinde x, y ve z değerleriyle tanımlanır ve bu koordinatlar bilgisayar ortamına aktarılır. Model kapsamında, düğümlere uygulanan kuvvetler ve sınır koşulları doğrultusunda matrisler oluşturulur. Bu matrisler, bilgisayar yardımıyla çözülerek her bir düğümdeki yer değiştirmeler hesaplanmaya çalışılır (Geng ve ark., 2001).

4.2.5.1.3 Analiz modeli için ağ tasarım süreci

Sonlu Elemanlar analizinde, incelenen yapının elemanlara ayrıştırılması için kapsamlı bir ağ yapısının oluşturulması gereklidir. Ağ üretim süreci, otomatik yazılım araçları kullanılarak veya kullanıcı müdahalesiyle gerçekleştirilebilir. Bu süreç kapsamında, yapıyı oluşturan düğüm noktalarının ve elemanların geometrik koordinatları belirlenir ve sistematik olarak kaydedilir. Eleman sayısında, eleman tipinde veya ağ oluşturma yönteminde yapılan değişiklikler gerektiğinde, analizlerin devam edebilmesi amacıyla ağ yapısı yeniden düzenlenebilir (Geng ve ark., 2001).

4.2.5.1.4 Geometrik ve katı yapı modellemelerinin geliştirilmesi

Modelleme süreçleri iki veya üç boyutlu biçimlerde gerçekleştirilebilir. Üç boyutlu modellemeler, her eksendeki kuvvetlerin hesaba katılması sayesinde daha detaylı ve doğru analiz sonuçları sunar. Katı model oluşturma aşamasında ise, nesnenin hem iç hem de dış geometrik özelliklerini bilgisayar ortamında eksiksiz bir şekilde temsil etmek amaçlanmaktadır (Geng ve ark., 2001).

4.2.5.1.5 Kuvvetler

Kuvvet, cisimlerin deformasyonuna veya hareket etmesine yol açan etkiler olarak tanımlanır ve vektörel bir büyüklük olduğu için büyüklük, yön ve doğrultu gibi özelliklere sahiptir (İnan, 2001). Kuvvetin uygulandığı bölgede, yüzeye yayılmış kuvvetin birim alana düşen yoğunluğu gerilim olarak ifade edilir. Bu gerilmeler, yönlerine bağlı olarak kayma, çekme ve sıkışma gibi çeşitli türlerde sınıflandırılmaktadır. Sonlu Elemanlar Analizi kapsamında, kuvvetin yönü, büyüklüğü ve tipi büyük önem taşır; çünkü farklı yönlerde uygulanan kuvvetler yapısal gerilmelerin oluşumunu etkiler ve bu gerilmeler detaylı bir şekilde incelenir (Soykan ve ark., 2013). Malzemelerde meydana gelebilecek kırılma ve deformasyon risklerini azaltmak amacıyla, normal gerilmelerin maksimum değerlerinin belirlenmesi kritik bir öneme sahiptir (Misch, 2008). Kuvvetin ölçüm birimi ise Uluslararası Birimler Sistemi (SI) tarafından Newton (N) olarak kabul edilmektedir (Caputo ve Standlee, 1987).

4.2.5.1.6 Stres

Bir cisme dışarıdan etki eden kuvvetler, o cisimde karşıt bir direnç oluşturur. Bu direnç, uygulanan kuvvetin büyüklüğüyle orantılı ancak ters yönde olan gerilme olarak tanımlanır. Gerilme, kuvvetin cisim yüzeyine dağılımı sonucu birim alana düşen kuvvet miktarıyla ölçülür ve genellikle Megapaskal (MPa) veya Newton/metrekaire (N/m^2) birimleriyle ifade edilir. Uygulanan kuvvet arttıkça veya alan küçüldükçe gerilme değeri de artar (İnan, 2001; Sakaguchi ve Powers, 2011).

4.2.5.1.6 Strain

Gerinim, bir cisme uygulanan kuvvet sonucu ortaya çıkan boyutsal değişimin orijinal boyuta oranı olarak tanımlanır ve ölçü birimi içermez. Elastik ve plastik deformasyonları kapsayan gerinim, malzemelerin mekanik özelliklerini değerlendirmede önemli bir rol oynar. Stres ise, kuvvetin etkisiyle oluşan ve büyüklük ile yönü olan bir kuvvettir. Gerinim ve stres, malzeme bilimi ve mühendislikte malzemelerin dayanıklılığını ve esnekliğini analiz etmek için birlikte kullanılır. Temel prensiplerle ilişkilendirilen bu kavramlar, yapıların tasarımı ve dayanıklılık değerlendirmelerinde kritik öneme sahiptir (Craig, 1988).

4.2.5.1.7 Elastisite modülü

Elastisite Modülü, bir malzemenin uygulanan kuvvet karşısında ne kadar direnç gösterdiğini ve ne ölçüde şekil değiştirdiğini belirleyen temel bir özelliktir. Malzemenin sertliği ve katılığı

hakkında bilgi sunan bu modül, gerilmenin gerinime oranı olarak tanımlanır ve birimi Gigapascal (GPa) ile ifade edilir. Young Modülü olarak da bilinen Elastisite Modülü, yüksek değerlere sahip olduğunda, malzemenin aynı stres altında daha az deformasyona uğrayacağını gösterir (O'Brien, 2002).

Malzemenin elastik davranış gösterdiği lineer bölgede sabit bir değere sahip olan Elastisite Modülü, nonlinear elastik malzemelerde ise uygulanan yükün büyüklüğüne bağlı olarak değişkenlik gösterebilir (O'Brien, 2002; Powers ve ark., 2006). Malzemenin sertliği arttıkça Elastisite Modülü de artar, bu da malzemenin şekil değişimine karşı daha dayanıklı olduğunu belirtir (Craig, 1988).

4.2.5.1.8 Poisson oranı

Malzemelerin elastik davranışlarını tam anlamıyla değerlendirmek için Poisson oranı temel bir mekanik parametredir. Tek eksenli bir yük uygulandığında, malzemeler yalnızca yükleme yönünde değil, aynı zamanda bu yöne dik olan enine yönde de şekil değişimine uğrarlar. Poisson oranı, enine yöndeki birim deformasyonun boyuna yöndeki birim deformasyona oranını ifade eder ve bu değer malzemenin sıkıştırılabilirliğine bağlı olarak 0 ile 0,5 arasında değişir. Özellikle, yüksek elastisite modülüne sahip malzemelerde Poisson oranı genellikle 0,5'e yaklaşıp; bu da malzemenin neredeyse sıkıştırılamaz olduğunu gösterir (Chabrier ve ark., 1999). Çekme veya basma yüklemeleri sırasında, deformasyonlar hem uygulanan kuvvetin yönünde hem de bu kuvvete dik yönde eş zamanlı olarak gerçekleşir. Elastik sınırlar içinde, bu iki yöndeki birim şekil değişimlerinin oranı Poisson oranı olarak tanımlanır (Craig, 1988).

4.2.5.1.9 Von mises stresi

Von Mises stresi, malzemelere uygulanan kuvvetler sonucu oluşan gerilme dağılımlarını ve yoğunlaşma bölgelerini analiz etmek için önemli bir parametredir. Bir cismin belirli bir bölgesindeki iç gerilme belirli bir eşik değeri aştığında, yapı üzerinde deformasyon meydana gelir ve bu nokta malzemenin akma sınırına ulaştığı anı temsil eder. Sünek materyallerde şekil değiştirmenin başlangıcını belirlemek için kullanılan Von Mises stresi, çekme dayanıklılığının ölçümünde de kritik bir rol oynar (O'Brien, 1997). İki veya üç boyutlu gerilmeleri tek bir değer altında birleştirerek, malzemenin tek eksenli yükleme altındaki davranışını tahmin etmemize olanak tanır. Bu stres değeri, kırılma dayanıklılığının analizlerinde de sıklıkla kullanılır (Incropera ve ark., 2007).

4.2.5.2 Sonlu elemanlar yöntemi ile yapısal inceleme adımları

Sonlu elemanlar yöntemine dayalı stres analizleri, ardışık birkaç adımın birleştirilmesiyle gerçekleştirilir. Bu adımlar şunlardır:

1. Yapının modelinin oluşturulması ve sonlu elemanlara ayrıştırılması
2. Analiz için gerekli verilerin tanımlanması (sınır koşulları)
3. Analizin yürütülmesi ve sonuçların elde edilmesi

4.2.5.2.1 Yapının modelinin oluşturulması ve sonlu elemanlara ayrıştırılması

Sonlu elemanlar analizi gerçekleştirmek için öncelikle yapının bilgisayar ortamında bir modelinin oluşturulması gereklidir. Bu süreç, yapının karmaşık geometrisinin dijital olarak temsil edilmesini sağlar ve ileri seviye modelleme teknikleri kullanılarak gerçekleştirilir. Geometrik modeller genellikle bilgisayar destekli tasarım (CAD) yazılımları yardımıyla hazırlanır ve karmaşık yapıların modellenmesinde üç boyutlu bilgisayarlı tomografi (BT) tarayıcıları, üç boyutlu lazer tarayıcıları veya üç boyutlu çizim programları gibi yöntemlerden faydalanılır (Chen ve ark., 2006; Kusnoto ve Evans, 2002; Ramoğlu ve Ozan, 2015)

Oluşturulan geometrik model, birbirine düğüm noktalarında bağlanan daha basit geometrik şekillere ayrılır; bu işlem, modelin mümkün olduğunca fazla sayıda elemana bölünmesiyle gerçekleştirilir (Taşkınsel ve Gümüş, 2015). Eleman sayısının artırılması, kuvvet ve gerilmelerin dağılımının daha hassas bir şekilde analiz edilmesine olanak tanır ve sonuçların gerçeğe daha yakın olmasını sağlar (DeTolla ve ark., 2000; Geramy ve Morgano, 2004). Elemanlar, tek boyutlu (düz çizgiler), iki boyutlu (üçgenler, dörtgenler) veya üç boyutlu (prizmalar, piramitler) gibi çeşitli şekillerde olabilir (Shetty ve ark., 2010).

Elemanların birleştiği noktalara düğüm (node), elemanların tümüne ise ağ (mesh) adı verilir (Magne, 2007). Ağ oluşturma süreci, elemanların ve bunlardaki düğüm noktalarının koordinatlarının belirlenmesi ve birleştirilmesiyle gerçekleştirilir. Modelin ağ yapısı, analiz sonuçlarının doğruluğunda kritik bir rol oynar; bu nedenle, elemanların boyutları ve şekilleri modele uygun seçilmelidir.

Oluşturulan model, canlı bir yapının matematiksel temsidir; bu nedenle, doğal davranışın tüm detaylarının tam olarak aktarılması mümkün olmayabilir (Taşkınsel ve Gümüş, 2015). Ancak, model bilgisayar ortamında olduğu için, değişkenler ve yükleme koşulları üzerinde istenildiği

gibi değişiklik yapılabilir. Bu nedenle, modelin dikkatli ve doğru bir şekilde hazırlanması, yapılacak analiz için son derece önemlidir (Taşkınsel ve Gümüş, 2015).

4.2.5.2.2 Analiz için gerekli verilerin tanımlanması

Sonlu elemanlar analizinde, yapının modellenmesinin ardından, analizin doğru ve güvenilir sonuçlar verebilmesi için gerekli verilerin titizlikle tanımlanması gerekir. Bu aşamada, modeldeki elemanların malzeme özellikleri, uygulanacak yükler ve sınır koşulları belirlenir ve yazılıma yüklenir. Malzeme özelliklerinin tanımlanması, analiz edilen yapının gerçek davranışını yansıtabilmesi açısından kritiktir. Elastisite modülü ve Poisson oranı gibi temel mekanik özellikler, her malzeme için özgündür ve bu değerlerin analize dahil edilmesi gerekir. Elastisite modülü, malzemenin uygulanan gerilme altındaki deformasyon miktarını belirlerken, Poisson oranı ise yükleme sırasında malzemenin enine ve boyuna deformasyonları arasındaki ilişkiyi ifade eder. Çalışmanın niteliğine bağlı olarak, termal genleşme katsayısı, sürtünme katsayısı veya ısıl iletkenlik gibi ek malzeme özellikleri de analize eklenebilir (Sekerere ve Mushiri, 2017).

Sınır koşulları, modelin belirli noktalarında hareket veya kuvvet kısıtlamalarını tanımlar. Yapıya uygulanan kuvvetlerin etkilerinin doğru bir şekilde hesaplanabilmesi için, modelin uygun noktalarının sabitlenmesi veya belirli hareket serbestliklerinin kısıtlanması gerekir. Bu, sonsuz bir ortamda bir cisme kuvvet uygulandığında ortaya çıkabilecek sonsuz hareketlerin önüne geçerek, sistemin gerçekçi bir şekilde modellenmesini sağlar. Yükleme koşulları, modele uygulanacak kuvvetlerin büyüklüğünü, yönünü ve uygulama noktalarını belirler. Bu bilgiler, malzemenin veya yapının gerçek çalışma koşullarını simüle etmek için hassas bir şekilde tanımlanmalıdır. Uygulanacak kuvvetler, analizin amacına bağlı olarak noktasal veya belirli bölgeler üzerinde tanımlanabilir ve vektörel özellikleri dikkate alınarak modele uygulanır (Geng ve ark., 2001).

Bu verilerin doğru ve eksiksiz bir şekilde tanımlanması, analizin güvenilirliğini ve doğruluğunu doğrudan etkiler. Doğru tanımlanmış malzeme özellikleri, sınır koşulları ve yükleme koşulları sayesinde, sonlu elemanlar analizi yapının gerçek davranışını daha iyi yansıtır ve elde edilen sonuçlar tasarım ve mühendislik süreçlerinde daha etkili bir şekilde kullanılabilir (Qian ve ark., 2009).

4.2.5.2.3 Analizin yürütülmesi ve sonuçların elde edilmesi

Sonlu elemanlar analizi tamamlandığında, elde edilen stres değerleri matematiksel hesaplamaların sonucudur ve bu değerlerin varyansı olmadığı için istatistiksel analizleri yapılamaz. Bu nedenle, sonuçların detaylı bir şekilde incelenmesi ve yorumlanması önemlidir. Bu yöntem, stresin hangi bölgelerde ve hangi yoğunlukta oluştuğunu belirlemeye yardımcı olur. Başlangıçta karmaşık geometrik yapılara sahip mühendislik sistemleri için geliştirilen bu sayısal analiz yöntemi, bilgisayar teknolojisindeki ilerlemelere paralel olarak diş hekimliği biyomekaniğinde de kullanılmaya başlanmıştır (Geng ve ark., 2001).

Kuvvet uygulandıktan sonra, sistem her bir düğüm ve eleman için oluşturulan denklemleri çözerek sayısal veriler üretir. İyi tanımlanmış bir geometrik modelde binlerce denklem ve sonuç ortaya çıktığından, bu verilerin okunması ve yorumlanması genellikle renk skalaları veya animasyonlar gibi görsel araçlar kullanılarak kolaylaştırılır. Sayısal verilerle renk haritaları birlikte incelendiğinde, kuvvetin gerilme ve şekil değiştirme üzerindeki etkileri daha anlaşılır hale gelir. Bazı sistemlerde ise yer değiştirme verileri çıktı olarak sunulur ve bu yer değiştirme miktarları, lineer denklemlerin çözümünde ve yorumlanmasında kullanılır (Geng ve ark., 2001).

Bu tez çalışmasının amacı; mandibular premolar diş modelinin farklı kök seviyelerinde oluşturulan eksternal kök rezorpsiyonlarının farklı tamir materyalleri ile restore edildikten sonra üç boyutlu sonlu eleman stres analizi ile değerlendirilmesidir.

Bu tez çalışmasının hipotezi; mandibular premolar diş modelinin farklı kök seviyelerinde oluşturulan eksternal kök rezorpsiyonlarının farklı tamir materyalleri ile restore edildikten sonra dişte oluşacak stres birikimleri arasında fark olmasıdır.

5. GEREÇ VE YÖNTEM

Bu çalışma, Marmara Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi ve Tinus Technologies iş birliğiyle gerçekleştirilmiştir. Üç boyutlu sonlu elemanlar analizi modellerinin oluşturulması ve stres analizi işlemleri, 2.40 GHz hızında INTEL Xeon E-2286 işlemcili ve 64 GB ECC belleğe sahip HP iş istasyonlarında yapılmıştır.

5.1 Mandibular Kemik Dokularının Modellenmesi

Mandibular kemik modelinin oluşturulması için, mevcut bir veri setinden elde edilen anonim tomografi verileri kullanılmıştır. Tomografi görüntüleri 0,1 mm kesit kalınlığıyla alınmış ve DICOM formatında 3DSlicer yazılımına aktarılmıştır. Bu yazılımda, uygun Hounsfield değerleri kullanılarak kemik dokuları segmentasyon işlemiyle ayrıştırılmış ve üç boyutlu model haline getirilmiştir. Elde edilen üç boyutlu model, ".stl" formatında dışa aktarılmıştır.

ANSYS SpaceClaim yazılımında, üç boyutlu mandibular kemik modeline içe doğru 2 mm offset uygulanarak kortikal kemik tabakası oluşturulmuştur. Kortikal kemiğin iç yüzeyi referans alınarak, trabeküler kemik modeli elde edilmiştir (Nelson, 2015).



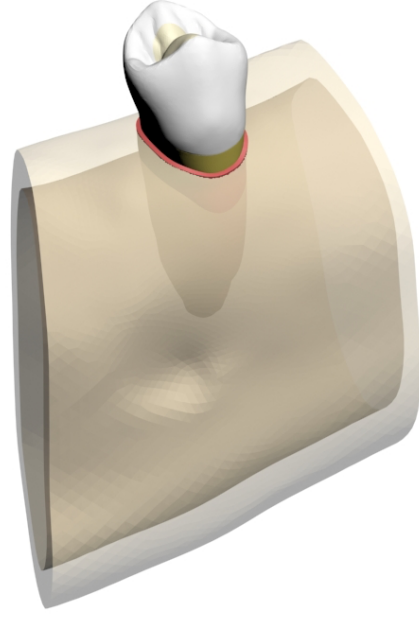
Şekil 1: Kortikal Kemik Modeli



Şekil 2: Trabeküler Kemik Modeli

5.2 Diş ve Periodontal Dokuların Modellenmesi

Mandibular birinci premolar dişin dentin ve pulpa yapıları, Wheeler atlasındaki anatomik ölçümlere göre ANSYS SpaceClaim yazılımında modellenmiştir (Nelson, 2015). Alveolar kemik seviyesinin 1,93 mm yukarısı mine-sement sınırı olarak belirlenmiştir (Zekry ve ark., 2014). Periodontal ligament, dentinin dış yüzeyi referans alınarak 0,2 mm kalınlığında modellenmiş ve alveolar kemik seviyesinden başlayacak şekilde konumlandırılmıştır (Kaushik ve ark., 2018). Sement tabakasının dentine benzeyen fiziksel özellikleri ve oldukça ince yapısı nedeniyle modelleme çalışmasına dahil edilmemiştir (Poiate ve ark., 2009).



Şekil 3: Modelin fiziksel görüntüsü

5.3 Rezorpsiyon Kavitesi ve Kanal Dolum Modellerinin Oluşturulması

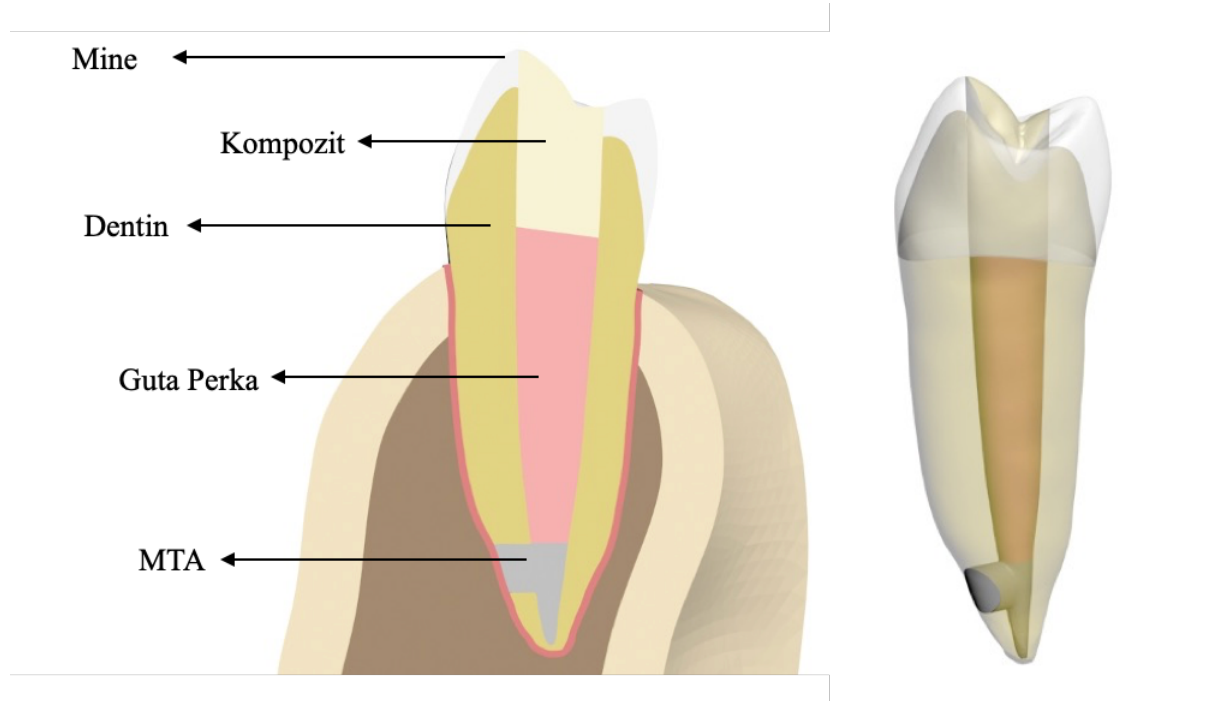
Modeller, kökün apikal ve orta bölgelerinde eksternal rezorpsiyon kavitesi olacak şekilde hazırlanmıştır. Rezorpsiyon kavitesi ölçüleri apikal bölgede 1,8 mm (serviko-apikal) x 1,43 mm (bukko-lingual), orta kök bölgesinde ise 2,8 mm (serviko-apikal) x 1,72 mm (bukko-lingual) olarak belirlenmiştir. Rezorpsiyon kavitesinin kök ucuna olan mesafesi apikal bölgede 3 mm, orta bölgede 8 mm'dir.

Sekiz farklı kanal dolum modeli geliştirilmiştir:

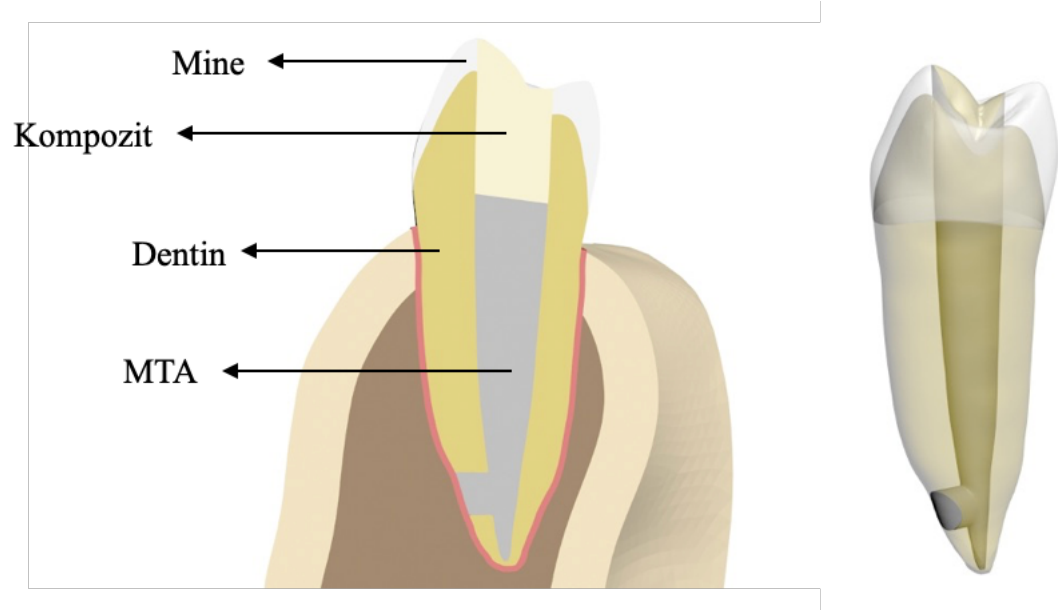
- **Model E1:** Apikal bölgedeki rezorpsiyon kavitesi ve kanalın apikal kısmı MTA ile doldurulmuş, koronal kısım hibrit teknikle gutta-perka ile doldurulmuştur.
- **Model E2:** Apikal bölgedeki rezorpsiyon kavitesi ve tüm kök kanalı MTA ile doldurulmuştur.
- **Model E3:** Apikal bölgedeki rezorpsiyon kavitesi ve kanalın apikal kısmı Biodentin ile doldurulmuş, koronal kısım hibrit teknikle gutta-perka ile doldurulmuştur.
- **Model E4:** Apikal bölgedeki rezorpsiyon kavitesi ve tüm kök kanalı Biodentin ile doldurulmuştur.
- **Model E5:** Orta kök bölgesindeki rezorpsiyon kavitesi ve kanalın apikal kısmı MTA ile doldurulmuş, koronal kısım hibrit teknikle gutta-perka ile doldurulmuştur.

- **Model E6:** Orta kök bölgesindeki rezorpsiyon kavitesi ve tüm kök kanalı MTA ile doldurulmuştur.
- **Model E7:** Orta kök bölgesindeki rezorpsiyon kavitesi ve kanalın apikal kısmı Biodentin ile doldurulmuş, koronal kısım hibrit teknikle gutta-perka ile doldurulmuştur.
- **Model E8:** Orta kök bölgesindeki rezorpsiyon kavitesi ve tüm kök kanalı Biodentin ile doldurulmuştur.

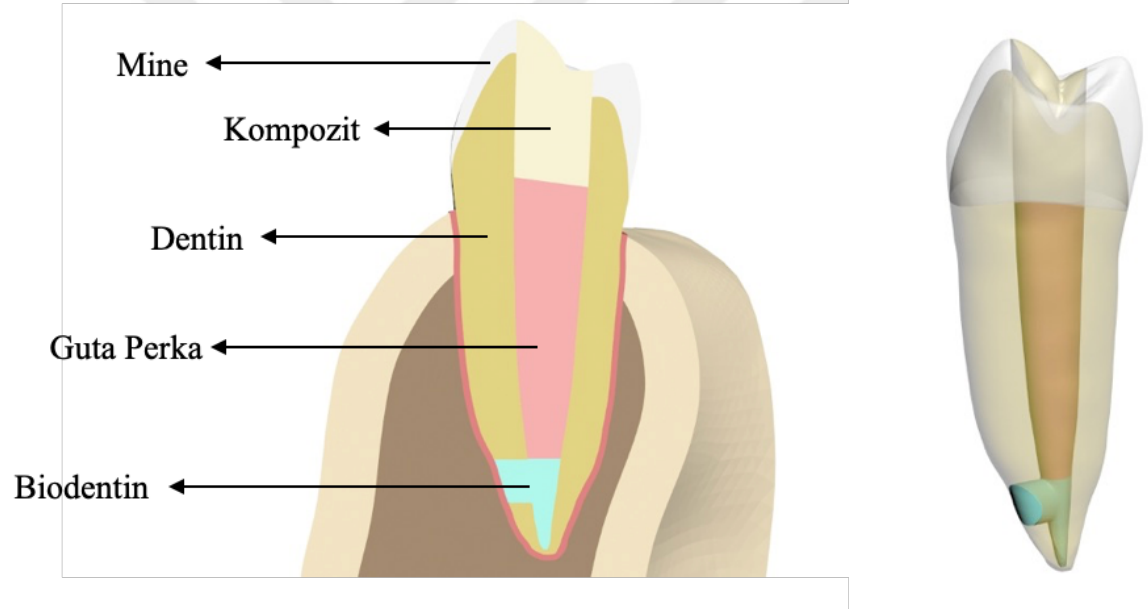
Rezorpsiyonlar, tek taraflı ve sadece eksternal olacak şekilde modellenmiştir. Giriş kavitesi, yazılım aracılığıyla kompozit rezin ile restore edilmiştir.



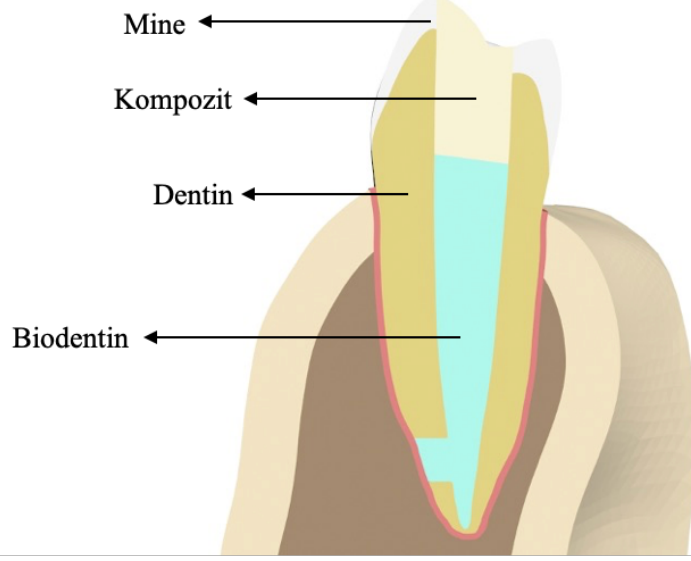
Şekil 4: Model E1 Görseli



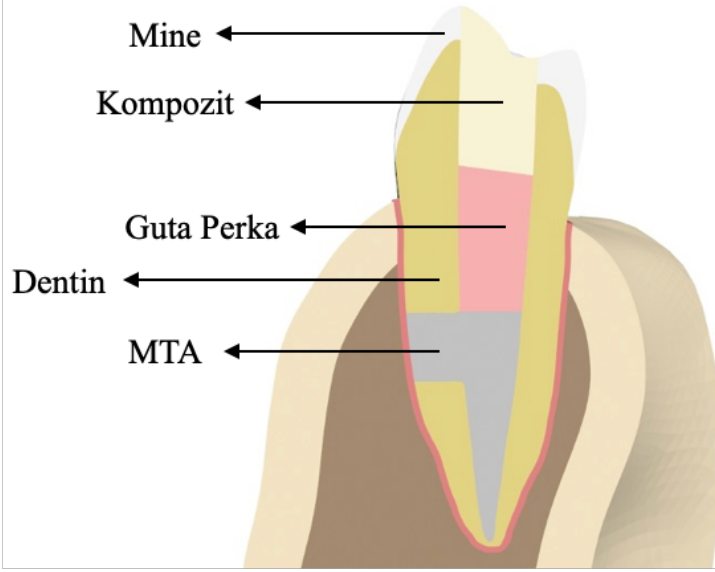
Şekil 5: Model E2 Görseli



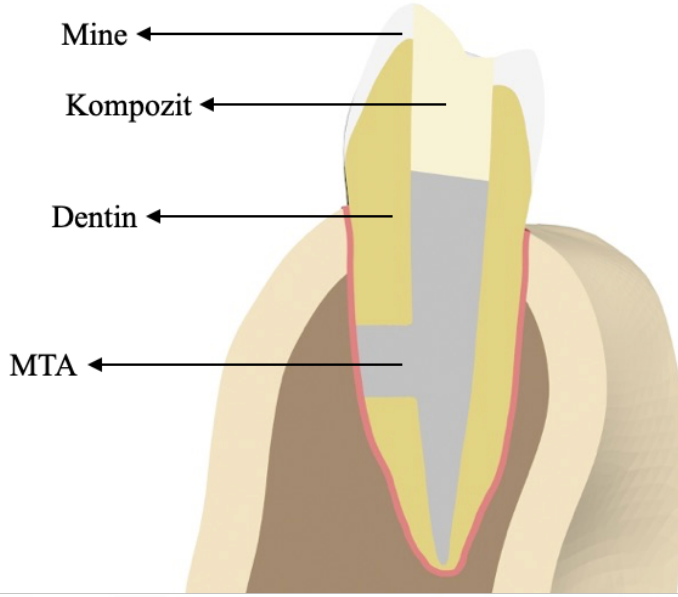
Şekil 6: Model E3 Görseli



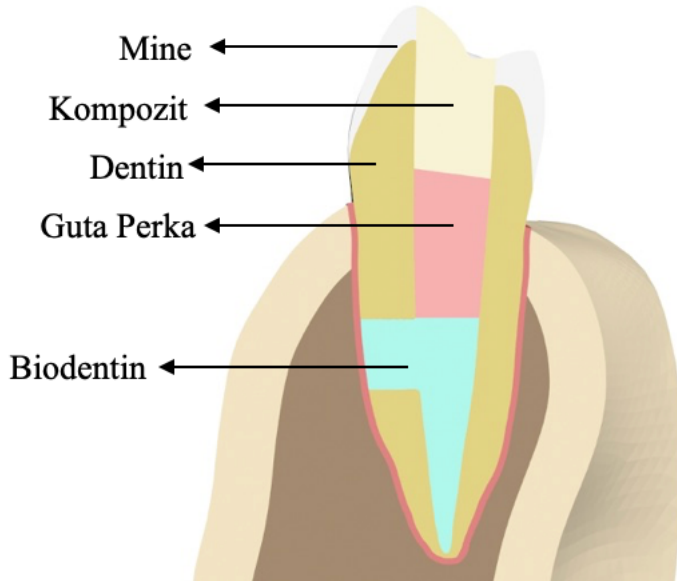
Şekil 7: Model E4 Görseli



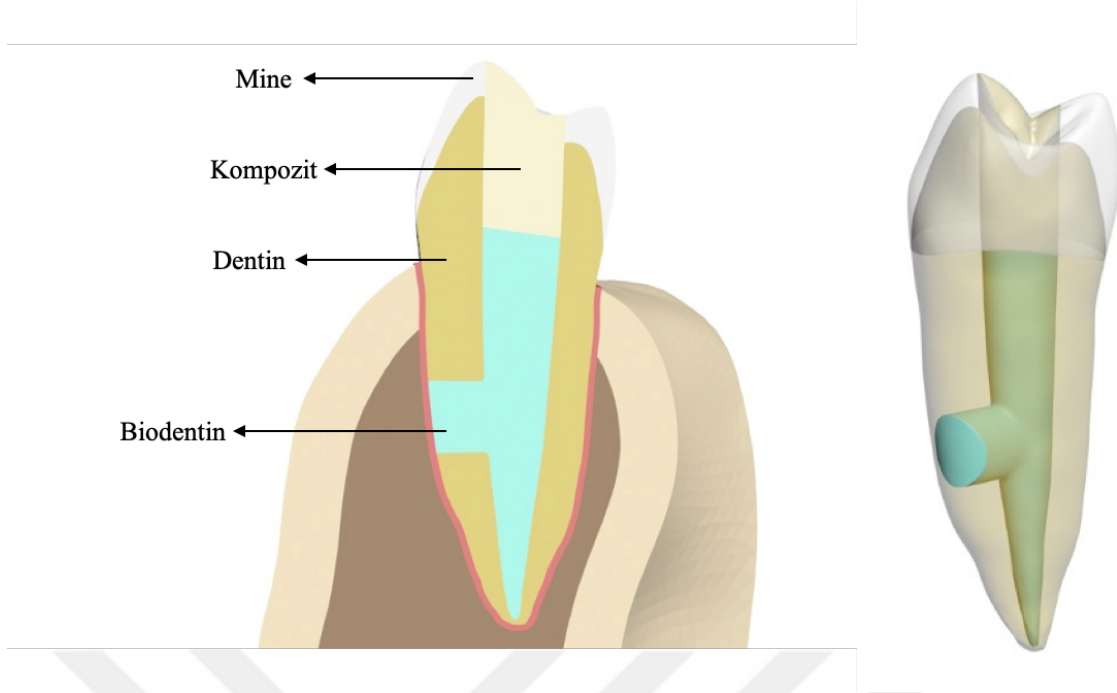
Şekil 8: Model E5 Görseli



Şekil 9: Model E6 Görseli



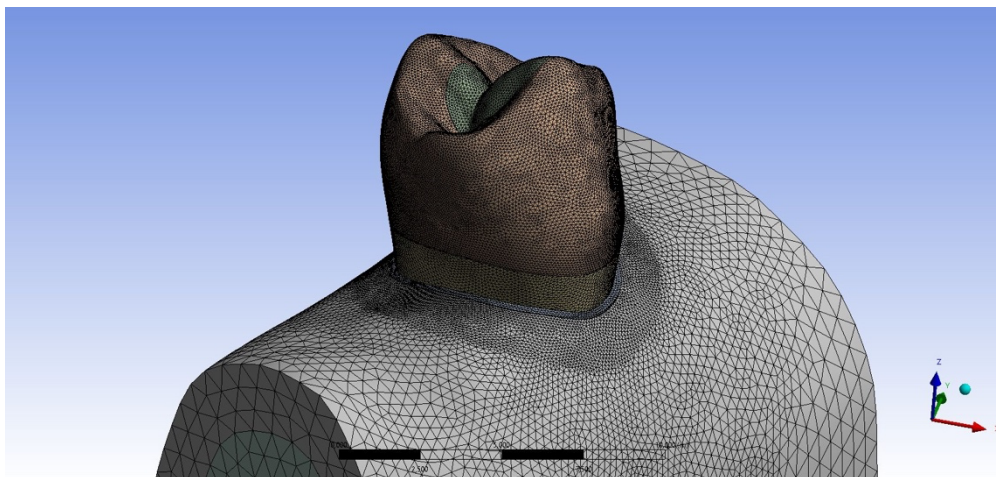
Şekil 10: Model E7 Görseli



Şekil 11: Model E8 Görseli

5.4 Matematiksel Modellerin Oluşturulması ve Meshleme

Geometrik modeller, sonlu elemanlar analizine uygun hale getirmek için basit ve küçük parçalara (mesh) bölünmüştür. ANSYS Workbench yazılımında, modellerin doğruluğunu artırmak amacıyla optimize edilmiş bir ağ yapısı oluşturulmuştur. Farklı analiz modellerine ait eleman ve düğüm sayıları Tablo 1'de verilmiştir. Analizlerin yapılabilmesi için, ANSYS Workbench yazılımında hazırlanan matematiksel modeller LS-DYNA çözücüsüne aktarılmıştır.



Şekil 12: Ağ görüntüsü hazırlanmış model

Tablo 2: Farklı analiz modellerine ait eleman ve düğüm sayıları

Modeller	Toplam Düğüm Sayısı	Toplam Element Sayısı
Model 1/3	254162	1009130
Model 2/4	257019	1021833
Model 5/7	256665	1016680
Model 6/8	255653	1013645

Modellerde, parçalar arasındaki yüzey ilişkileri "bonded" tipi kontaklarla tanımlanmıştır. Bu yaklaşım, parçaların hareket sırasında tam uyum içinde olduğunu varsayar.

5.5 Malzeme Özelliklerinin Tanımlanması

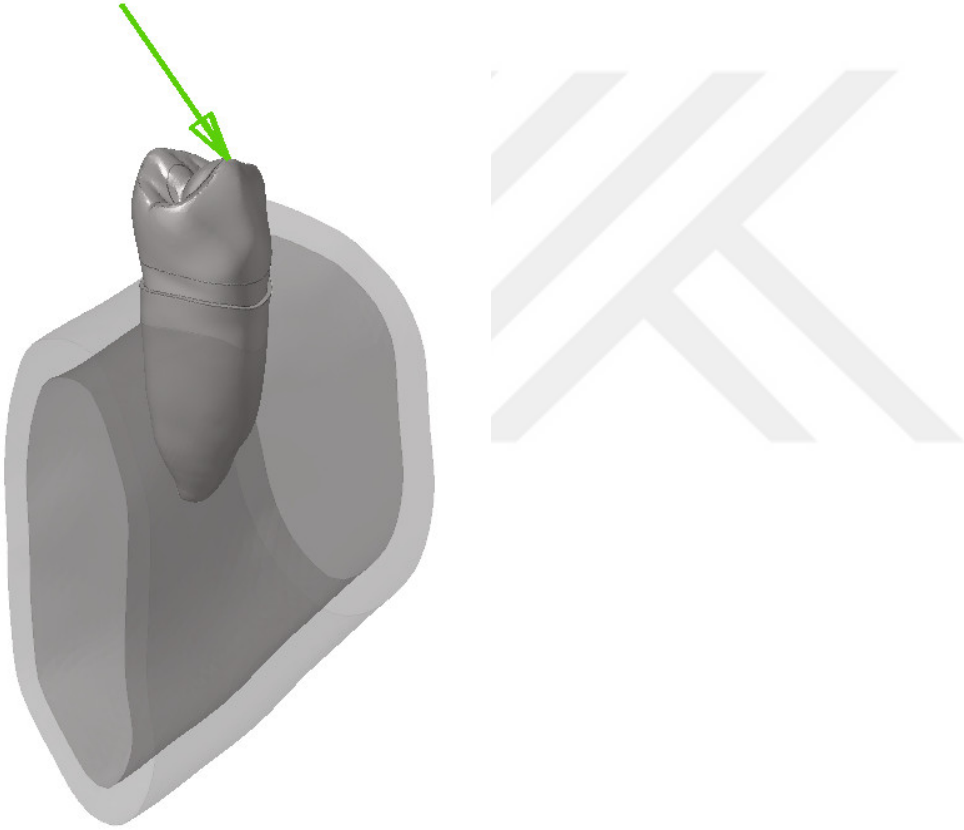
Analizlerde kullanılan tüm malzemeler, lineer elastik, izotropik ve homojen özelliklere sahip kabul edilmiştir. Malzemelerin elastik modülü ve Poisson oranları literatürden alınarak Tablo 2'de sunulmuştur (Belli ve ark., 2016; Brito-Júnior ve ark., 2014).

Tablo 3: Malzemelerin elastik modülü ve Poisson oranları

Malzeme	Elastik Modül [MPa]	Poisson Oranı
Kortikal	13700	0,30
Sponge	1370	0,30
Dentin	18600	0,31
Mine	41000	0,31
Periodontal ligament	68.9	0,45
Guta perka	140	0,45
Rezin Kompozit	12000	0,3
MTA	15700	0,23
Biodentin	22000	0,3

5.6. Yükleme Koşulları ve Sınır Şartları

Tüm modellerde, dişin bukkal kuspına dişin uzun aksıyla 135 derece ve 90 derece açı yapacak şekilde 300 N'luk kuvvet uygulanmıştır (Eraslan ve ark., 2011). Kuvvetler, gerilme tekilliğini önlemek için çevre düğüm noktalarına dağıtılarak uygulanmıştır. Modeller, kemiğin anterior, posterior ve inferior bölgelerindeki düğüm noktalarından her üç eksendeki hareketi engellenecek şekilde sınırlandırılmıştır.



Şekil 13: Yükleme koşulu örneği

5.7. Sonlu Elemanlar Analizi ve Gerilme Dağılımının İncelenmesi

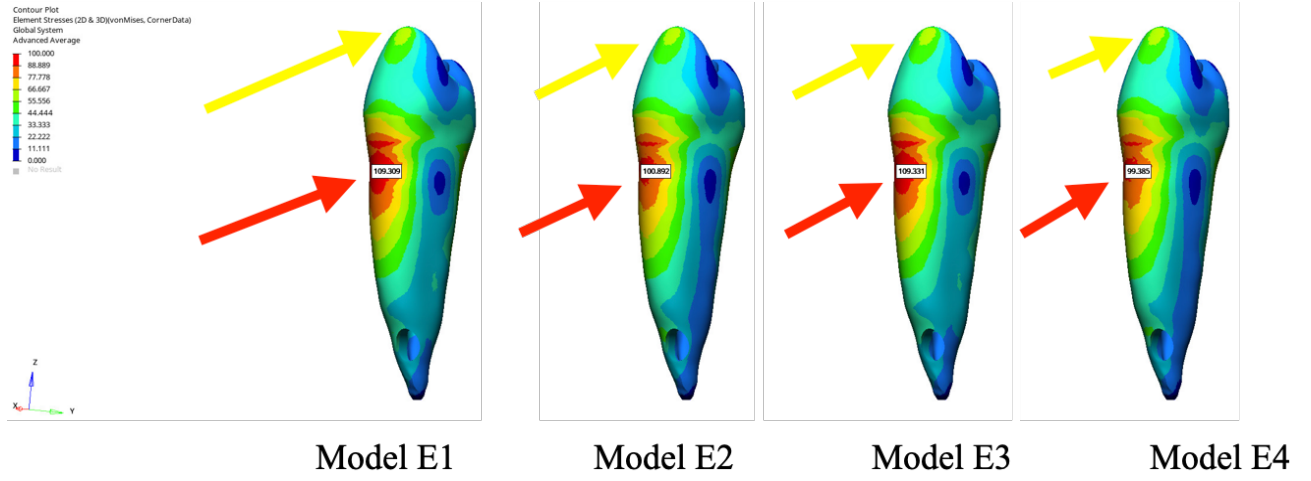
ANSYS Workbench yazılımında hazırlanan matematiksel modeller, LS-DYNA çözücüsü kullanılarak analiz edilmiştir. Tüm modellerde, Von Mises gerilme kriterine göre gerilme dağılımları incelenmiştir. Analiz sonuçları, mine, dentin, restorasyon ve periodontal ligament üzerinde oluşan gerilmelerin değerlendirilmesi şeklinde sunulmuştur.

6. BULGULAR

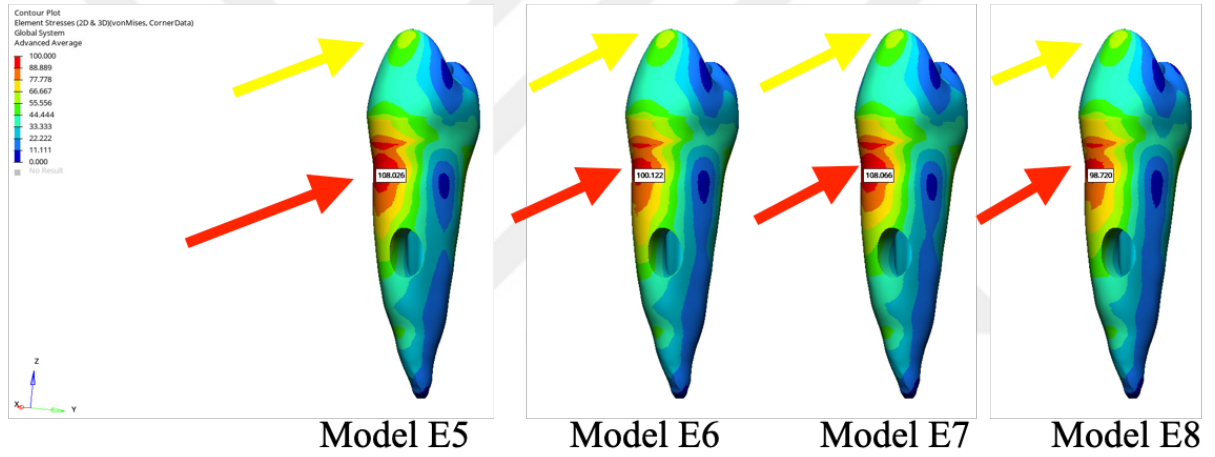
Bu çalışmada, dış kök rezorpsiyonu simüle edilmiş mandibular ikinci premolar diş modellerine uygulanan 300 N değerinde yatay ve oblik kuvvetlerin, farklı restoratif materyaller kullanıldığında stres dağılımına etkisi üç boyutlu sonlu elemanlar analizi ile incelenmiştir. Bulgular, von Mises stres kriterlerine göre değerlendirilmiş ve stres yoğunlukları renk skalası ile görselleştirilmiştir; kırmızı renk en yüksek stresi, mavi renk ise en düşük stresi temsil etmektedir. Elde edilen sayısal değerler megapascal (MPa) cinsinden ifade edilmiştir.

6.1 Tüm Dişte Oluşan Stresler

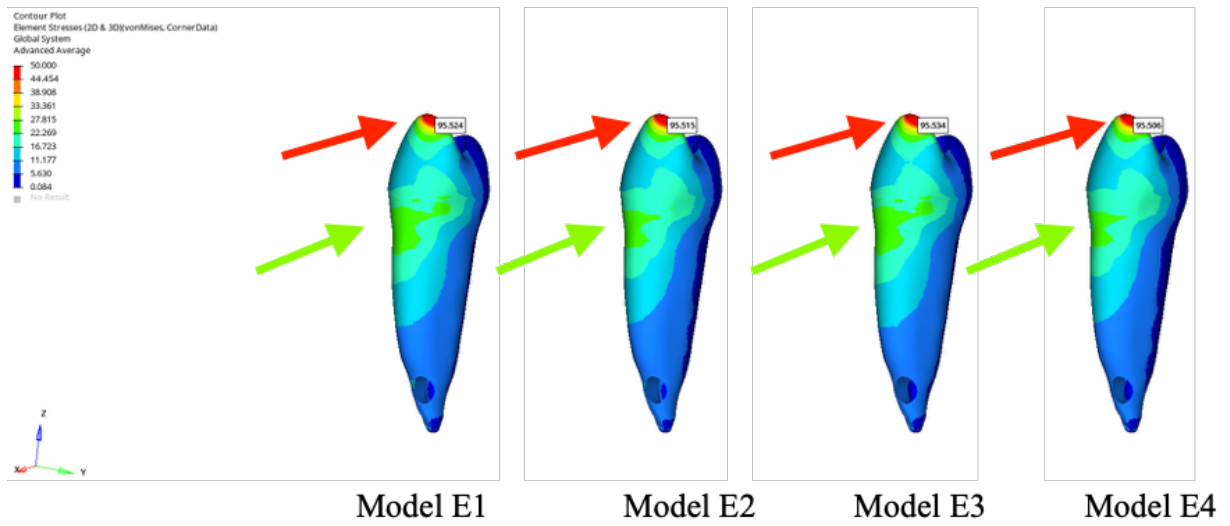
Oblik kuvvetlerin uygulanması sonucunda, tüm dişte oluşan stres dağılımları apikal seviyede rezorpsiyon kavitesi oluşturulmuş dişler için Şekil 1'de, orta seviyede rezorpsiyon kavitesi oluşturulmuş dişler için ise Şekil 2'de gösterilmiştir. Dikey kuvvetlerin uygulanması sonucunda, tüm dişte oluşan stres dağılımları apikal seviyede rezorpsiyon kavitesi oluşturulmuş dişler için Şekil 3'te, orta seviyede rezorpsiyon kavitesi oluşturulmuş dişler için ise Şekil 4'te gösterilmiştir. Bu analizlerde, farklı tamir yöntemlerini içeren sekiz model (E1-E8) değerlendirilmiştir. Apikal bölgedeki tamir modellerinde (E1-E4), rezorpsiyon kavitesi ve kök kanalı ya tamamen MTA (E2) ya da Biodentin (E4) ile doldurulmuş veya koronal kısım hibrit teknikle gutta-perka kullanılarak tamamlanmıştır (E1 ve E3). Hibrit teknikte, apikal bölgedeki rezorpsiyon kavitesi E1'de MTA, E3'te ise Biodentin ile tamir edilmiştir. Orta kök seviyesindeki tamir modellerinde (E5-E8) ise benzer şekilde rezorpsiyon kavitesi ve kök kanalı ya tamamen MTA (E6) ya da Biodentin (E8) ile doldurulmuş veya koronal kısım hibrit teknikle gutta-perka kullanılarak tamamlanmıştır (E5 ve E7). Hibrit teknikte, orta kök bölgesindeki rezorpsiyon kavitesi E5'te MTA, E7'de ise Biodentin ile tamir edilmiştir. Bu modellerin uygulanmasıyla, dolgu malzemesi ve teknik farklılıklarının apikal ve orta seviyelerdeki rezorpsiyon kavitelerinde stres dağılımına etkileri detaylı olarak incelenmiştir.



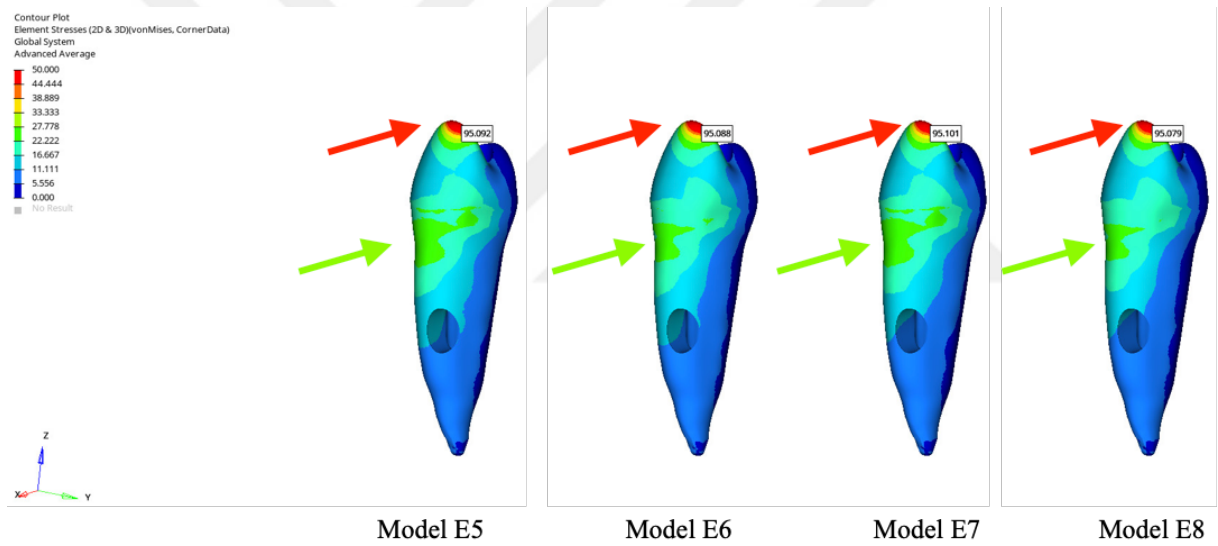
Şekil 14: Oblik kuvvet altında apikal seviyedeki rezorpsiyon grubunda tüm dişte oluşan stres dağılımı



Şekil 15: Oblik kuvvet altında orta seviyedeki rezorpsiyon grubunda tüm dişte oluşan stres dağılımı



Şekil 16: Dikey kuvvet altında apikal seviyedeki rezorpsiyon grubunda tüm dişte oluşan stres dağılımı



Şekil 17: Dikey kuvvet altında orta seviyedeki rezorpsiyon grubunda tüm dişte oluşan stres dağılımı

Hem apikal hem de orta seviyedeki rezorpsiyon gruplarında, şekil 1 ve şekil 2’de oblik kuvvetler altında en yüksek stresin servikobukkal bölgede yoğunlaştığı gözlenmiştir. İkinci en yüksek stres ise bukkal tüberkülün bukkal yüzeyinde tespit edilmiştir. Dikey kuvvetler uygulandığında, maksimum stres seviyesi şekil 3 ve şekil 4’de bukkal tüberkülde olup, ikinci en yüksek stres seviyesi yine servikobukkal bölgede gözlenmiştir. Her iki senaryoda da stres, apikal yönüne doğru azalmaktadır.

Apikal ve orta seviyedeki rezorpsiyon gruplarında, Şekil 1 ve Şekil 2’de oblik kuvvetler altında en yüksek stresin servikobukkal bölgede yoğunlaştığı tespit edilmiştir. İkinci en yüksek stres ise bukkal tüberkülün bukkal yüzeyinde gözlenmiştir. Dikey kuvvetler uygulandığında, Şekil 3 ve Şekil 4’te maksimum stres seviyesi bukkal tüberkülde, ikinci en yüksek stres seviyesi ise yine servikobukkal bölgede görülmüştür. Her iki senaryoda da stres, apikal yönüne doğru azalmaktadır. Ayrıca, maksimum stres alanlarının kullanılan dolgu materyalleri (MTA veya Biodentin) ve uygulama tekniklerinden bağımsız olarak aynı bölgelerde biriktiği belirlenmiştir. Bu durum, malzeme ve teknik farklılıklarının stres dağılımının genel lokalizasyonunu değiştirmediğini ortaya koymaktadır.

Maksimum stres değerleri Tablo 4’te sunulmuştur. Sunulan verilere göre, kullanılan dolgu materyalleri ve tekniklerin, maksimum stres değerleri üzerinde bazı farklılıklara yol açtığı görülmektedir. Oblik kuvvetler altında, apikal grupta en yüksek stres değerinin E3 modelinde (109.331 MPa), orta grupta ise E7 modelinde (108.066 MPa) elde edilmesi, her iki modelde de hibrit teknikle gutta-perka kullanılarak restorasyon yapılmasının, strese karşı daha fazla birikime yol açabileceğini göstermektedir. Bu modellerde, rezorpsiyon kavitesi Biodentin ile tamir edilmiş olup, koronal kısım hibrit teknikle tamamlanmıştır.

En düşük stres değerleri ise apikal grupta E4 modelinde (99.385 MPa), orta grupta ise E8 modelinde (98.720 MPa) tespit edilmiştir. Her iki modelde de rezorpsiyon kavitesinin ve kök kanalının tamamen Biodentin ile doldurulmuş olması, bu malzemenin strese karşı daha etkin bir şekilde yük paylaşımı sağladığını göstermektedir.

Dikey kuvvetler altında ise benzer bir dağılım gözlenmiştir. Maksimum stres değerleri apikal grupta E3 modelinde (95.534 MPa) ve orta grupta E7 modelinde (95.101 MPa) görülmüştür. Minimum stres değerleri ise apikal grupta E4 modelinde (95.506 MPa) ve orta grupta E8 modelinde (95.079 MPa) elde edilmiştir. Dikey kuvvetler altında stres farklarının daha düşük seviyelerde olması, yükün daha homojen dağıldığını ve materyal farklarının etkisinin azaldığını göstermektedir.

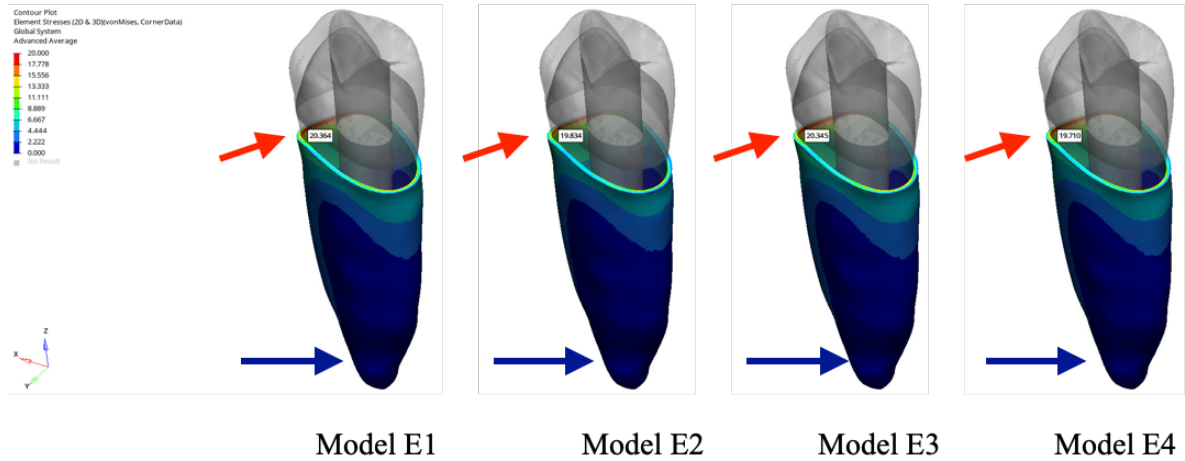
Genel olarak, hibrit tekniklerin kullanıldığı modellerde stres birikiminin daha yüksek olduğu, tamamen Biodentin kullanılan modellerde ise stresin daha düşük seviyelerde kaldığı sonucuna varılmaktadır.

Tablo 4: Tüm Dişte Oluşan Maksimum Stres Değerleri (MPa)

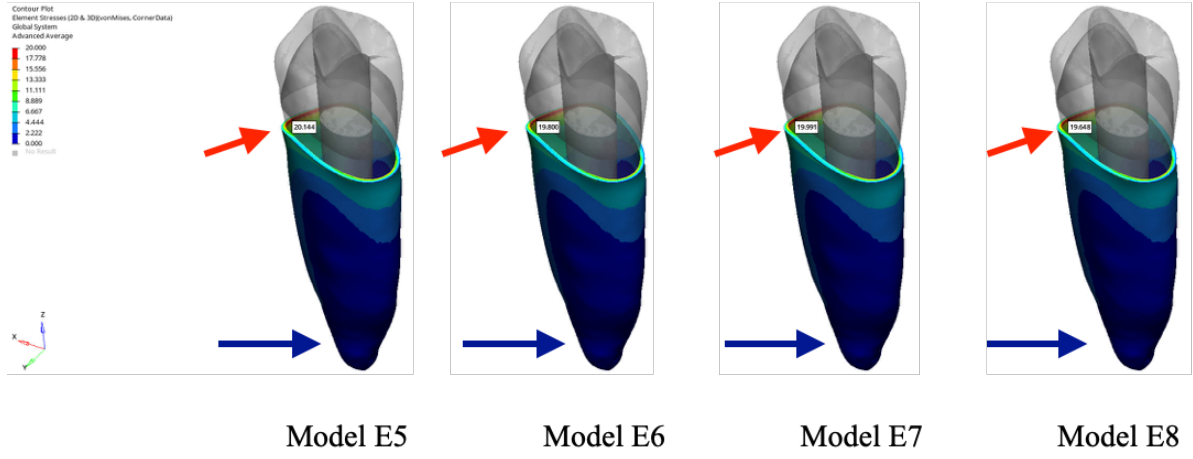
Model	Dikey Kuvvet	Oblik Kuvvet
E1	95.524	109.309
E2	95.515	100.892
E3	95.534	109.331
E4	95.506	99.385
E5	95.092	108.026
E6	95.088	100.122
E7	95.101	108.066
E8	95.079	98.720

6.2 Periodontal Ligamentte Oluşan Stresler

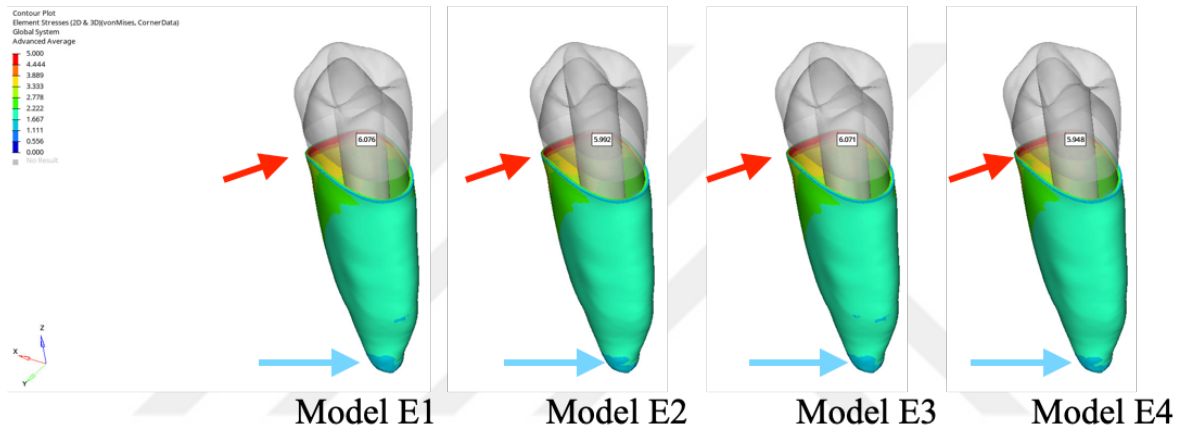
Periodontal ligamentte (PDL) oluşan stres dağılımları, apikal ve orta seviyedeki rezorpsiyon gruplarında benzer bir dağılım göstermektedir. Oblik kuvvetler altında, Şekil 5 ve Şekil 6’da, en yüksek stres seviyesinin PDL’nin servikal seviyesinde ve bukkal yüzünde yoğunlaştığı tespit edilmiştir. Dikey kuvvetler uygulandığında ise Şekil 7 ve Şekil 8’de, maksimum stresin yine servikal seviyede ve bukkal yüzde olduğu, stresin apikal yönünde azaldığı gözlenmiştir. Ayrıca, maksimum stres alanlarının kullanılan tamir materyalleri (MTA veya Biodentin) ve uygulama tekniklerinden bağımsız olarak aynı bölgelerde biriktiği belirlenmiştir. Bu sonuçlar, malzeme ve teknik farklılıklarının stresin genel lokalizasyonunu değiştirmedini göstermektedir.



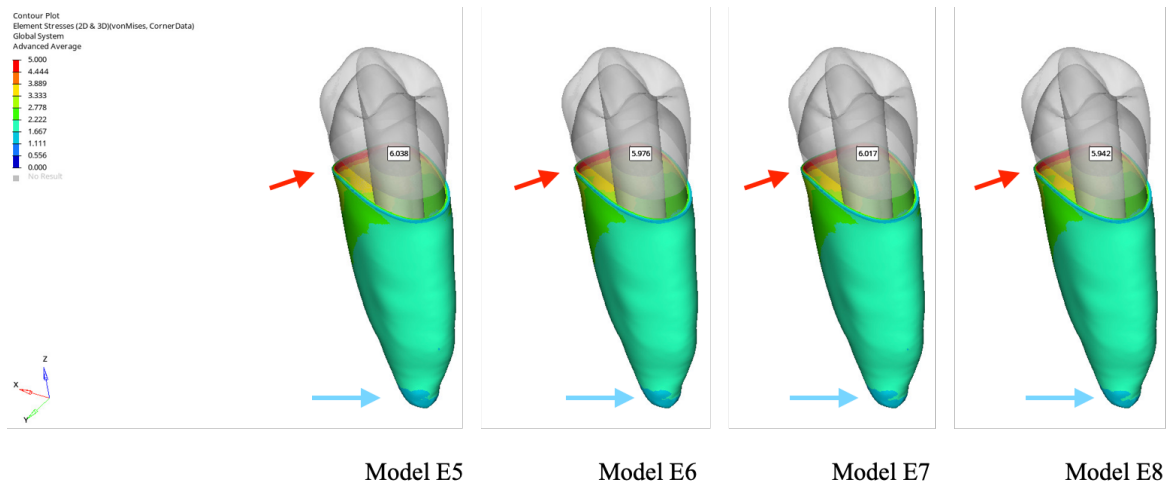
Şekil 18: Oblik kuvvet altında apikal seviyedeki rezorpsiyon grubunda PDL’de oluşan stres dağılımı



Şekil 19: Oblik kuvvet altında orta seviyedeki rezorpsiyon grubunda PDL’de oluşan stres dağılımı



Şekil 20: Vertikal kuvvet altında apikal seviyedeki rezorpsiyon grubunda PDL’de oluşan stres dağılımı



Şekil 21: Vertikal kuvvet altında orta seviyedeki rezorpsiyon grubunda PDL’de oluşan stres dağılımı

Tablo 5, PDL'de gözlenen maksimum stres değerlerini göstermektedir. Oblik kuvvetler altında, en fazla stres apikal grupta E1 modelinde ve orta grupta E5 modelinde bulunmuştur. En az stres ise apikal grupta E4 modelinde ve orta grupta E8 modelinde tespit edilmiştir. Dikey kuvvetler altında da benzer sonuçlar elde edilmiştir.

Maksimum stres değerleri Tablo 5'te sunulmuştur. Sunulan verilere göre, kullanılan tamir materyalleri ve tekniklerin, PDL'de oluşan maksimum stres değerleri üzerinde bazı farklılıklara yol açtığı görülmektedir. Oblik kuvvetler altında, apikal grupta en yüksek stres değerinin E1 modelinde, orta grupta ise E5 modelinde bulunması, bu modellerde kullanılan teknik ve materyal kombinasyonlarının strese karşı daha fazla birikime neden olduğunu göstermektedir. Bu modellerde, rezorpsiyon kavitesi MTA ile tamir edilmiş, koronal kısım ise hibrit teknikle tamamlanmıştır.

En düşük stres değerleri ise apikal grupta E4 modelinde, orta grupta ise E8 modelinde tespit edilmiştir. Her iki modelde de rezorpsiyon kavitesinin ve kök kanalının tamamen Biodentin ile doldurulmuş olması, bu malzemenin PDL üzerindeki stres birikimini azaltmada etkili olduğunu göstermektedir.

Dikey kuvvetler altında da benzer bir dağılım gözlenmiştir. Maksimum stres değerleri apikal grupta E1 modelinde, orta grupta ise E5 modelinde görülmüştür. Minimum stres değerleri ise apikal grupta E4 modelinde, orta grupta ise E8 modelinde elde edilmiştir. Dikey kuvvetler altında stres farklarının daha düşük seviyelerde olması, yükün daha homojen bir şekilde dağıldığını göstermektedir.

Genel olarak, MTA ve hibrit tekniklerin kullanıldığı modellerde stres birikiminin daha yüksek olduğu, tamamen Biodentin kullanılan modellerde ise stresin daha düşük seviyelerde kaldığı sonucuna varılmaktadır.

Tablo 5: PDL'de gözlenen maksimum stres değerleri

Model	Dikey Kuvvet	Oblik Kuvvet
E1	6.076	20.364
E2	5.992	19.834
E3	6.071	20.345
E4	5.948	19.710
E5	6.038	20.144
E6	5.976	19.800
E7	6.017	19.991
E8	5.942	19.648

7. TARTIŞMA VE SONUÇ

Kök rezorpsiyonları, odontoklastik aktivitenin bir sonucu olarak diş sert dokularının kaybıyla karakterize olan ve dişin yapısal bütünlüğünü ciddi ölçüde zayıflatarak kırılma riskini artıran patolojik süreçlerdir (Silveira ve ark., 2009) . Özellikle dış kök rezorpsiyonu, diş hekimliğinde sık karşılaşılan ve tedavisi karmaşık olan multidisipliner bir sorundur.Daimi dişlerde kök kanalını veya kökün dış yüzeyini etkileyebilmekte buna karşı belirli protokolü bulunmamaktadır (Patel ve ark., 2022).

Tedavi planlaması yapılırken, lezyonun yeri, boyutu, dişin canlılığı ve hastanın bireysel özellikleri dikkate alınarak, klinik ve radyolojik bulgular ışığında yapılmalıdır (Al-Momani ve Nixon, 2013). Restorasyonun mümkün olduğu durumlarda, ortograd veya cerrahi olmak üzere endodontik müdahaleler gerekebilmektedir. (Patel ve ark., 2022). Ancak rezorpsiyon kavitesinin restorasyonu, defektin subgingival lokalizasyonu ve defektin bir kısmına ulaşılabilmesi nedeniyle önemli zorluklar içermektedir. Ayrıca, rezorpsiyon defektlerinin sürekli ağız sıvılarıyla temas halinde olması nedeniyle, tedavi esnasında kan ve nem izolasyonunu güçleştirmektedir (Kampanas ve Antoniadou, 2018).Bu nedenle, kullanılacak tamir materyallerinin seçiminde büyük bir hassasiyet gösterilmelidir. Materyallerin iyi bir sızdırmazlık sağlaması, toksik maddeler içermemesi, biyouyumlu olması, doku sıvılarının varlığında çözünmemesi ve periradiküler dokuların rejenerasyonunu desteklemesi beklenmektedir (AM ve ark., 2014). Ayrıca, rezorpsiyonun ilerlediği durumlarda dişlerin kırılmaya olan yatkınlığının artması nedeniyle, tedavide kullanılan materyalin diş yapısını güçlendirmesi de istenilen bir özelliktir (Main ve ark., 2004).Biz de çalışmamızda sızdırmazlık özelliği yüksek biyouyumlu tamir materyali olan MTA ve Biodentin kullandık.

Literatür incelendiğinde, kökün farklı seviyelerinde ve farklı büyüklüklerdeki dış kök rezorpsiyonu kavitelerinin, farklı biyouyumlu materyaller ve farklı dolum teknikleri kullanılarak yapılan restorasyonlarının kök dentinindeki ve periodontal ligamenetteki stres birikimi üzerine etkisini inceleyen çalışmaların sınırlı olduğu görülmektedir. Çalışmamızda, dış kök rezorpsiyonu bulunan dişlere uygulanan fonksiyonel kuvvetlerin dişin hangi bölgelerinde ne kadar stres ve deformasyona neden olabileceğini ve oluşan bu stres birikimlerinin kullanılan tamir materyalinin türüne ve uygulanan dolum tekniğine göre değişip değişmeyeceğini belirlemeyi amaçladık. Çalışmamızın sonucunda sonlu eleman analizi yöntemi kullanılarak, söz konusu problemlerin çözümüne katkı sağlanmayı hedefledik.

Sonlu elemanlar stres analizi teknikleriyle yapılan araştırmalar, elastik modülü dentinin elastik modülüne yakın olan malzemelerin kök dayanıklılığını artırabileceğini ortaya koymaktadır (Li ve ark., 2006). Bir malzemenin dayanımı, genellikle i  yapısında kalıcı bir deformasyon veya kırılma oluşması için gereken maksimum stres miktarı olarak tanımlanmaktadır. Diş hekimliği uygulamalarında, özellikle oklüzal kuvvetlere maruz kalan malzemelerin dayanıklılığı klinik açıdan büyük önem taşımaktadır. Endodontik tedavilerde kullanılan simanların fiziksel özellikleri incelenirken, bükülme dayanımı, basma dayanımı ve itme bağlanma dayanımı gibi parametreler ön plana çıkmaktadır (Anusavice, 2003). Biz  alışmamızda vertikal ve oblik kuvvet altında tamir materyallerindeki stres dağılımını, hangi bölgelerde stres yoğunluğu oluştuğunu tespit ettik.

Dişlerde oluşan kırıklar, ciddi klinik sorunlara neden olabilmektedir. Yapılan araştırmalar, diş kayıplarının  r kler ve periodontal hastalıklardan sonra en sık üçüncü sebebinin diş kırıkları olduğunu göstermektedir (Brady ve Maxwell, 1981). Normal fonksiyonel yükler, mekanik özelliklerin yetersizliği, kök gelişiminin tamamlanmaması, doku kayıpları ( r kler, aşınmalar, i  ve diş rezorpsiyonlar, endodontik tedaviler) ve yaşlanma sonucu diş yapısındaki değişiklikler, kron veya kök kırıklarına yol açabilmektedir (Arslan ve ark., 2014; Kishen, 2006). Brady ve Maxwell (1981), ile Kishen (2006) tarafından yapılan çalışmalarda ileri derecede diş kök rezorpsiyonu olan dişlerde, madde kaybına bağlı olarak kırılma riskinde artma olduğunu saptamışlardır (Brady ve Maxwell, 1981; Kishen, 2006).

Endodontik tedavi görmüş dişlerin kırılma direncini inceleyen çok sayıda in vitro çalışma bulunmaktadır (Andreasen ve ark., 2006; Bortoluzzi ve ark., 2007). Bu çalışmaların ana amacı, dişe kırık oluşana dek kuvvet uygulayarak kırığın meydana geldiği kuvvet seviyesini belirlemektir. Bizim tez çalışmamızda kullandığımız sonlu elemanlar analizi yöntemi ise, bu in vitro çalışmalara göre çeşitli avantajlar sunmaktadır. Bu yöntem sayesinde birçok değişken aynı anda değerlendirilebilmektedir, insan dokusuna ihtiyaç duyulmadan canlı dokular modellenilebilmekte ve yüksek düzeyde standardizasyon sağlanmaktadır. Ayrıca, stres ve deformasyon bölgelerinin görselleştirilmesine ve daha iyi anlaşılmasına olanak tanımaktadır (Srirekha ve Bashetty, 2010).

Çalışmamızda, diş kök rezorpsiyonunun en sık görüldüğü dişlerden olan alt premolarlar modellenmiştir (Opaci -Gali  ve Zivkovi , 2004). Sonlu elemanlar analizlerinde modellere uygulanan statik ve dinamik kuvvetler genellikle 100 N ile 2000 N arasında değişmektedir. Yapılan bazı çalışmalarda, premolar bölgesindeki çiğneme kuvvetlerinin yaklaşık 300 N olduğu belirlenmiştir. Eraslan ve ark. (2011) ile Belli ve ark. (2016), ciddi hasar görmüş endodontik

tedavili premolar dişlerin restorasyonlarını inceledikleri çalışmalarında dişlere 300 N'luk statik oblik kuvvet uygulamışlardır. Bizim çalışmamız da fonksiyonel hareketleri daha gerçekçi bir şekilde simüle etmek amacıyla, 300 N'luk statik oblik kuvvetin yanı sıra dinamik oklüzyonu taklit etmek için 300 N'luk dikey kuvvet uygulanmıştır (Belli ve ark., 2016; Eraslan ve ark., 2011). Çalışmamızın sonuçları Belli ve arkadaşlarının çalışma sonuçlarıyla uyumlu çıkmıştır. Yani en fazla stres birikimi guta perka MTA kombinasyonunda olmuştur.

Yaptığımız çalışmada, kök rezorpsiyonunun tedavisinde sıklıkla kullanılabilecek materyallerin uygunluğunu belirlemek amacıyla Mineral Trioksit Agregat (MTA) ve Biodentin kullanılarak bu materyallerin kök direncini artırma potansiyeli incelenmiştir. MTA, üstün sızdırmazlık özellikleri ve biyouyumluluğu nedeniyle rezorpsiyon vakalarında sıklıkla tercih edilmektedir. MTA, dayanıklı ve uzun ömürlü bir bariyer oluşturarak ek kemik kaybı riskini azaltmakta ve epitel proliferasyonunu desteklemektedir. Ancak, MTA'nın sertleşme süresinin uzun olması dezavantaj oluşturmaktadır. MTA, özellikle apikal tıkaç veya kök dolgusu materyali olarak kullanıldığında, kimyasal ve fiziksel özellikleri nedeniyle retreatment gerektiren durumlarda kök kanalı içerisinden tamamen uzaklaştırılması son derece zor bir materyaldir. MTA, içerdiği kalsiyum silikat esaslı bileşikler nedeniyle kimyasal ajanlarla yumuşatmak suretiyle çıkarmak mümkün değildir. Kanal içerisine yerleştirildikten sonra, ortamda bulunan nem ve dokularla etkileşime girerek zamanla sert, mineralize benzeri bir yapı oluşturur. Bu oluşan sert matriks, diş dokusuyla mikromekanik bir tutunma sağlar, hatta bazı durumlarda dentinal tübüllerle etkileşime girebilmektedir. Bu da materyalin sadece kanal lümeninde değil, aynı zamanda dentin yüzeylerinde mikro düzeyde tutunmasına neden olmaktadır (Torabinejad ve ark., 2018).

Biodentin ise daha iyi renk stabilitesi, kullanım kolaylığı ve yüksek biyouyumluluğa sahiptir. Daha hızlı sertleşmesi ve dentine iyi bağlanması, nedeniyle etkili bir sızdırmazlık sağlamaktadır (Torabinejad ve ark., 2018). Ancak, Biodentin'in de retreatment sırasında çıkarılmasının zor olması ve bilinen bir çözücüsünün bulunmaması dezavantajlarındandır. Her iki materyal de etkili olmasına rağmen, Biodentin kullanım kolaylığı ve daha kısa tedavi süreleri gibi avantajları vardır. Her materyalin klinik uygulamada kendine özgü avantajları ve dezavantajları nedeniyle ve seçim hastanın ihtiyaçları ve tedavi koşullarına göre belirlenmesi gerekliliği bildirilmiştir (Parirokh ve Torabinejad, 2010b). Biz de çalışmamızın sonuçlarına baktığımızda MTA ve Biodentin arasında anlamlı bir fark olmaması nedeniyle vakaya göre materyal tercihi yapılması gerektiğini düşünmekteyiz.

Türker ve ark (2018), çekilmiş alt küçük azı dişlerinde yapay iç kök rezorpsiyonu kavimleri oluşturmuş ve bu kavimler dahil olmak üzere kök kanallarını üç farklı kalsiyum silikat temelli

simanla doldurarak dişlerin kırılma direncini incelemişlerdir. Çalışma sonuçlarına göre Biodentine ile onarılan dişlerin, MTA ve MTA Plus kullanılanlara kıyasla istatistiksel açıdan anlamlı derecede daha yüksek bir kırılma direncine sahip olduğu bildirilmiştir (Aktemur Türker ve ark., 2018) . Bizim çalışmamızda Biodentin grubunda MTA ile doldurulan gruba göre daha yüksek kırılma direnci elde edilmiş ancak anlamlı bir fark bulunamamıştır.

Kalan kanal boşluğunun etkin bir şekilde doldurulması, biyomekanik stresin optimal dağılımında büyük önem taşımaktadır. Ancak, bu amaç için en uygun materyal konusunda bir fikir birliği bulunmamaktadır (Aktemur Türker ve ark., 2018). Kanal boşluğu tamamen MTA veya Biodentin ile doldurulabileceği gibi sadece, rezorpsiyon kavitesi MTA veya Biodentin ile restore edildikten sonra kalan boşluk gütta perka ve kanal patı ile doldurulabildiği hibrit yaklaşım da mevcuttur (Aslan ve ark., 2019).

Kök kanalının ve rezorbsiyon alanının gütta perka ve kanal patı kombinasyonu ile doldurulması kullanım kolaylığı nedeniyle tercih edilmekte ancak Thakur ve ark. (2013) tarafından yapılan çalışmada özellikle karmaşık kanal anatomisi söz konusu olduğunda kök kanalının tamamen MTA veya Biodentin doldurulduğu durum kadar etkili bir sızdırmazlık sağlayamayabildiği bildirilmiştir. (Thakur ve ark., 2013). Bu nedenle, materyal seçimi, dolum tekniği rezorpsiyon kavitesinin konumu ve hedeflenen sonuçlar doğrultusunda yapılmalıdır. Bu konuda Torabinejad ve ark. (2018) hibrit tekniğin, biyomekanik stres yönetimi ve sızdırmazlık açısından dengeli bir yaklaşım sunduğunu, ancak optimal materyal seçimi için daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyulduğunu bildirmişlerdir (Torabinejad ve ark., 2018).

Bizim çalışmamızda, farklı kök kanal dolgu materyallerinin ve tekniklerinin dayanıklılığını değerlendirmek ve klinik uygulamalar için rehberlik sağlamak amaçlanmıştır. Yaptığımız çalışmada kök kanalı ve rezorbsiyon alanı sadece Biodentin, MTA veya hibrit teknik olarak MTA+ gütta perka, Biodentin + gütta perka kullanılmıştır. Gerçek koşulların sayısal analizlerle doğru bir şekilde simüle edilmesini sağlayan sonlu elemanlar analizi ile deney sonuçları elde edilmiştir. SEA, diş dokularının ve materyallerin biyomekanik davranışlarını in vivo olarak değerlendirmede zorlukların olduğu durumlarda etkili bir yöntemdir (Santos-Filho ve ark., 2014). Literatürde belgelenen boyutlara uygun olarak, tek köklü alt ikinci küçük azı dişinin standart bir modeli geliştirilmiştir (Nelson, 2015). Bu model ile restorasyonların dayanıklılığı, rezorpsiyonun sık görüldüğü apikal bölge ve kökün orta kısmında değerlendirilmiştir (Opacić-Galić ve Zivković, 2004).

Diş kökü toplam 14,5 mm uzunluğunda tasarlanmış ve her biri kök uzunluğunun yaklaşık üçte birini temsil eden yaklaşık 4,8 mm'lik bölümlere ayrılmıştır (Nelson, 2015). Rezorpsiyon kaviteleri, apikal seviyede 1,8 mm ve orta kök seviyesinde 2,8 mm çapında olacak şekilde tasarlanmış ve çevreleyen dentinden eşit destek alacak şekilde konumlandırılmıştır. Bu modellerin oluşturulmasında, rezorpsiyon kavitesi ve kanal boşluğu tamamen MTA veya Biodentin ile doldurulmuştur. Alternatif olarak, rezorpsiyon kavitesi MTA veya Biodentin ile restore edildikten sonra kalan boşluk güta perka ve kanal patı ile doldurulmuştur. Modeller, uygulanan tamir teknikleri ve materyallerinin dayanıklılığını değerlendirmek için 300 N'luk eğik veya dikey oklüzal streslere maruz bırakılmıştır.

Çalışmamızın sonuçlarına baktığımızda, apikal veya orta seviye kök rezorpsiyonu vakalarında kök kanainin tamamen Biodentin ile doldurulmasının hem dikey hem de eğik kuvvetler altında en az stres birikimine yol açtığını göstermektedir. Stres birikim değeri olarak apikal ve orta kök seviyesi arasında hem Biodentin hem de MTA materyali kullanılan gruplar arasında anlamlı bir fark bulunamamıştır. Çalışmamızın sonuçları, Biodentin'in daha iyi stres dağılımı özelliklerine sahip olduğunu gösteren önceki araştırmalarla da desteklemektedir. Bu konuda Arıcan ve arkadaşları 2022 yılında yaptıkları çalışmalarında, eksternal servikal rezorpsiyon kavitelerinin restorasyonunda kırılma direncini artırmada en etkili materyalin Biodentin olduğunu saptamışlardır (Arıcan ve ark., 2023).

Buna karşı, Bayram ve Bayram'ın (2016) immatür apekslere sahip dişlerde MTA, BioAggregate ve Biodentine materyallerini karşılaştırdığı çalışmalarında, MTA'nın kırılma direnci testlerinde Biodentin'den daha iyi performans gösterdiği bildirilmiştir. Bu çalışmada, MTA'nın mikroskobik yapısının dentin yüzeyiyle daha etkili bir bağlanma sağladığı, kırılma direncini artırıcı bir etki yarattığı bildirilmiştir. (Bayram ve Bayram, 2016). Bu çalışmadan farklı olarak bizim çalışmamızda apikal veya orta seviye rezorpsiyon bölgelerinin ve kök kanalının tamamen Biodentin ile doldurulması ile, tüm diş yapısında daha homojen bir stres dağılımı sağlamış, dikey ve oblik kuvvetler altında gerilme birikimini azaltarak yapısal bütünlüğü korumada daha etkili olduğu saptanmıştır. Bu sonuç, Biodentin'in dentine benzer elastik modül 18.600 MPa ve Poisson oranı 0,30 gibi mekanik özelliklerinden kaynaklandığını düşünmekteyiz.

MTA'nın elastik modülü 15.700 MPa dentine yakın olsa da biyomekanik uyumluluğun doğru değerlendirilmesi için Poisson oranı gibi deformasyon davranışlarının da dikkate alınması gereklidir. Dentinin 0,31 poisson oranı ve Biodentinin 0,30 poisson oranı olması nedeniyle deformasyon profilleri açısından uyumlu olup, MTA'nın Poisson oranı 0,23 ise bu uyumluluktan farklıdır. Bu özellikler, Biodentin'in gerilme odaklarını azaltarak diş yapısının

biyomekanik streslere karşı daha dayanıklı hale getirdiği saptanmıştır. Buna ek olarak Bayram ve Bayram'ın çalışmasının bizim araştırmamızla farklı sonuçlara ulaşmasının farklı bir nedeni de her iki çalışmada ele alınan methodların, deneysel yöntemlerin ve değerlendirme kriterlerinin birbirinden önemli ölçüde ayrışmasıdır. Bayram ve Bayram'ın incelemesinde, immatür apeksli dişlerde MTA, BioAggregate ve Biodentin'in koronal uygulama sonrasındaki kırılma direnci karşılaştırılmıştır. Bizim çalışmamızda ise apikal veya orta seviyedeki rezorpsiyon kavitelerinin farklı tamir materyalleriyle, özellikle Biodentin ile tamamen doldurulmasının diş üzerinde oluşturduğu stres dağılımı incelenmiştir. Araştırmamızda yalnızca materyalin kırılma direncini değil, aynı zamanda dikey ve oblik yükler altındaki gerilme miktarını ve dağılımını değerlendirilmiştir. İki çalışma arasındaki farklılıklar, deneysel yöntemler, test protokolü, diş gelişim düzeyleri, materyal uygulama yöntemleri ve değerlendirme ölçütlerindeki farklılıktan kaynaklandığını düşünmekteyiz.

Çalışmamızda MTA ile kanal ve rezorpsiyon kavitesinin tamamen doldurulduğu durumda da düşük stres oluşumu gözlenmiş, ancak Biodentin ile karşılaştırıldığında iki grup arasında anlamlı bir fark bulunmamıştır. Bu bulgu, Kabtoleh ve ark. (2023) tarafından yapılan biyoseramik simanların kullanılarak endodontik tedavi görmüş molar dişlerde simüle strip perforasyonların tamirinde kırılma direncinin geri kazandırılarak dişin genel dayanıklılığını artırıldığını gösteren çalışmanın sonuçlarıyla paralellik göstermektedir (Kabtoleh ve ark., 2023). Girish ve ark. (2017), alt küçük azı dişlerinin kök ucunu rezeke edilerek MTA ve Biodentin malzemelerini kullanmış ve bu dişlerin kırılma direncini ex vivo olarak değerlendirmişlerdir. Araştırmalarında dişleri iki gruba ayırmışlardır: İlk grupta, kök kanalları Gütta Perka ile doldurulmuş ve kök ucuna MTA veya Biodentin uygulanmıştır. İkinci grupta ise kök kanallarının tamamı doğrudan MTA veya Biodentin ile doldurulmuştur. Elde edilen sonuçlara göre, kök kanalları tamamen kalsiyum silikat bazlı materyallerle tedavi edilen dişlerin kırılma direncinin daha yüksek olduğu bildirilmiştir. MTA ve Biodentin arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark bulunmamıştır (Girish ve ark., 2017). Benzer şekilde, bizim çalışmamızda da dişin tüm yapısı üzerindeki stres dağılımı değerlendirildiğinde, kök kanalının tamamının MTA veya Biodentin ile doldurulmasının daha homojen bir stres dağılımı sağladığı görülmüştür. Her ne kadar MTA ve Biodentin arasında belirgin bir istatistiksel fark bulunmasa da elde edilen veriler Biodentin'in stres dağılımı açısından bir miktar daha avantajlı olabileceğini göstermektedir. Bu sonuçlar ışığında, literatürle uyumlu olarak her iki materyalin de tam kanal dolgusu protokollerinde etkili birer seçenek olabileceğini düşünmekteyiz.

Çalışmamızda, rezorpsiyon kavitesinin biyouyumlu materyallerle doldurulup kalan kanalın gütta perka ile doldurulduğu hibrit yaklaşımda, her iki yönde uygulanan kuvvetler altında en

yüksek stres birikiminin olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuç, Türker ve arkadaşlarının (2018) perforasyonlu iç rezorpsiyon kaviteleri oluşturulan mandibular premolar dişlerde gerçekleştirdiği çalışmada, tamamen kalsiyum silikat esaslı simanlarla doldurulan grupların, güta perka/sealer kombinasyonu kullanılan gruplara kıyasla daha yüksek kırılma direnci sergilediğini belirten sonuçlarla uyumludur. Türker ve arkadaşları çalışmalarında, bizim çalışmamızda saptadığımız gibi Biodentine ile tamamen doldurulan grubun en yüksek kırılma direncine sahip olduğunu bildirmişlerdir (Aktemur Türker ve ark., 2018).

Çalışmamızda, güta perka ile Biodentin kombinasyonunun, MTA ile güta perka kombinasyonuna kıyasla daha fazla stres birikimine neden olduğu tespit edilmiştir. Bu durumun, kullanılan malzemelerin elastik modülleri arasındaki uyumsuzluktan kaynaklandığı düşünülmektedir. Özellikle güta perkanın elastik modülü (140 MPa), dentin dokusunun elastik modülüne (18600 MPa) kıyasla oldukça düşüktür. Bu belirgin fark, güta perka ile kullanılan restoratif materyalin (Biodentin ya da MTA) mekanik özellikleri dentine yakın olsa dahi, arayüz bölgesinde oluşan gerilmelerin etkin şekilde dağıtılmasını engelleyebilmektedir. Benzer şekilde, Li ve arkadaşlarının (2006) yaptıkları çalışmada, madde kaybı fazla olan diş köklerinin farklı elastik modüllere sahip simanlar ve titanyum alaşımlı postlarla restore edilmesi sırasında oluşan stres dağılımını incelenmiştir. Çalışmada, sonlu eleman analizi (SEA) kullanılarak, zayıf köklerin restorasyonunda kullanılan simanların elastik modülünün, kök dentinindeki stres seviyeleri ve dağılımı üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Bu çalışma, elastik modülü dentine yakın simanların stres dağılımını iyileştirerek kök yapısını desteklediğini ve kırık riskini azalttığını göstermiştir. Bu bağlamda, elastik özelliklerin restoratif sistemdeki materyal uyumunu ideal hale getirmek için kritik bir değişken olduğu belirtilmiştir. Bizim bulgularımıza paralel olarak diş yapısını desteklemek ve uzun dönem dayanıklılık sağlamak amacıyla elastik özellikleri dentine benzer materyallerin tercih edilmesinin önemini vurgulamışlardır (Li ve ark., 2006).

Çalışmamızda hem eğik hem de dikey kuvvetlerden en fazla stres birikimi kökün servikobukkal seviyesinde gözlenmiştir. Bu bölge, her iki kuvvet türünden kaynaklanan maksimum stresi aldığı için, potansiyel yapısal sorunların oluşabileceği yerlerdir. Bu bulgu, Baghani ve ark. (2023) tarafından yapılan çalışmada da alt molarların bukkal bölgesinin stres konsantrasyonuna daha yatkın olduğu bildirilmiştir (Baghani ve ark., 2023).

Yaptığımız çalışmada kök kanalının ve rezorpsiyon kavitesinin tamamen Biodentin ile doldurulduğu grupta, periodontal ligamentte (PDL) eğik ve dikey stresler altında en düşük stres seviyeleri saptanmıştır. Tamamen MTA ile doldurulan grup ile anlamlı bir fark bulunmamıştır.

Bu durum, her iki malzemenin de benzer elastik özelliklere sahip kalsiyum silikat esaslı yapılar olmasıyla açıklanabilir. Bu yapısal benzerlik nedeniyle, diş dokusu ve restoratif materyal arasındaki gerilmeyi yumuşatarak PDL üzerinde aşırı stres birikimini önlediklerini göstermektedir. Periodontal ligamentte en yüksek stres birikimi, rezorpsiyon kavitesinin MTA ile doldurulup kalan kanalın gütta perka ile doldurulduğu hibrit grupta gözlenmiştir. Stres dağılım desenleri hem eğik hem de dikey kuvvetlerin periodontal ligament üzerinde etkili olduğunu ve tepe stres değerlerinin periodontal ligamentin apikal kısmına doğru azaldığını göstermiştir. Bu bulgu, Bucchi ve ark. (2022) tarafından yapılan ve periodontal ligamentte gerilim dağılımının incelendiği çalışmanın sonuçlarıyla da örtüşmektedir. Bu çalışmada, PDL genelinde gerilim seviyelerinin apikale doğru inildikçe kökün tamamına göre daha düşük olduğu, ancak maksimum stres konsantrasyonlarının özellikle dişin bukkal yüzeyinde ve servikal bölgesinde yoğunlaştığı vurgulanmıştır. Özellikle servikal bölgenin, diş-doku arayüzünde meydana gelen farklı dokuların kesişme noktası olması, elastik modül farklarının ve yapı geçişlerinin bu bölgede stres konsantrasyonuna yol açmasıyla sonuçlanmaktadır. Bu nedenle, bukkal ve servikal yüzeylerde oluşan yüksek stres birikimleri, anatomik ve yapısal özellikler ile yük altında ortaya çıkan deformasyon davranışının bir sonucudur (Bucchi ve ark., 2022).

Bizim bulgularımıza göre eğik ve dikey kuvvetlerin neden olduğu streslerin analizinde, eğik kuvvetlerin daha fazla stres birikimine neden olduğunu tespit ettik. Bu bulgu, Maceri ve ark. (2010) tarafından yapılan ve eğik yüklerin endodontik tedavi görmüş dişlerde dikey yüklerden daha yüksek risk oluşturduğunu belirten çalışmanın sonuçları ile uyumludur (Maceri ve ark., 2007).

Her ne kadar sonlu elemanlar analizleri, dişlerin biyomekanik olarak stres yüklenmesini anlamak için yararlı bir araç olmasıyla birlikte gerçekte klinik durumların karmaşıklığını bize tam olarak yansıtamamaktadır. Klinik uygulamada, diş kırıkları genellikle dinamik yüklerden kaynaklanması nedeniyle deneysel olarak yeniden oluşturulması zordur. Ayrıca, çalışmamızda kullanılan materyaller izotropik, homojen ve lineer elastik olarak kabul edilmiş ise de canlı dokular doğası gereği anizotropik ve heterojendir. Dolayısıyla, sanal simülasyon gerçek klinik ortamın tüm karmaşıklığını yansıtmamaktadır. Ayrıca, sonlu elemanlar analizi mikrosızıntı ve mikrobiyal kontaminasyon gibi önemli oral çevre faktörlerini göz ardı ederek sadece biyomekanik bir yaklaşımla sınırlı kalmaktadır. Klinikte yapılan tedavinin sonuçları biyomekanik değerlendirmelerin ötesinde birçok faktörden etkilenmektedir (Zeng ve ark., 2024). Çalışmamızın devamında aynı grupları sızdırmazlık yönünden de araştırmayı planlamaktayız.

Sonuçlar

- Fonksiyonel kuvvetlerin etkisi altında olan ve dış kök rezorpsiyonu gelişmiş dişlerde, tüm dişte stres birikimi en yoğun şekilde dişin bukkal servikal kısmında gözlemlenmektedir.
- Fonksiyonel kuvvetler sonucunda PDL'de en fazla stres birikimi servikobukkal bölgede gözlenmiştir.
- Oblik kuvvetlerin uygulandığı durumlarda, dikey kuvvetlere kıyasla daha yüksek stres birikimi tespit edilmiştir. Bu bulgu, oblik kuvvetlerin diş yapısı üzerinde daha tehlikeli biomekanik etkiler oluşturduğunu ortaya koymaktadır.
- Dişlerde dış kök rezorpsiyonu mevcut olduğunda, dentin bölgesinde stres birikimlerini azaltmak için defekti onarmada tercih edilen restoratif materyalin çeşidi kritik bir rol oynamaktadır.
- Rezorpsiyon defektlerinin tedavisinde, kavite ile birlikte kanalın tamamının Biodentin ve MTA ile doldurulması, dişlerdeki stres birikimini azaltmaktadır. Bu uygulamada Biodentin daha üstün bir performans sergilerken, MTA materyali de etkili ve uygun bir alternatiftir.
- Rezorpsiyon defektlerinin Biodentin veya MTA ile tamiri ve kanalın geri kalanının gutaperka ile doldurulmasını içeren hibrit teknik, her iki grupta da dişlerdeki stres birikimini artırmaktadır.
- Rezorpsiyon defektlerinin tedavisinde, kavite ile birlikte kanalın tamamının Biodentin ve MTA ile doldurulması, PDL'deki stres birikimini azaltmaktadır.
- Rezorpsiyon defektlerinin Biodentin veya MTA ile tamiri ve kanalın geri kalanının gutaperka ile doldurulmasını içeren hibrit teknik, PDL'deki stres birikimini artırmaktadır.
- Her klinik vakada dişin ve hastanın bireysel özellikleri dikkate alınarak, restoratif materyal ve teknik seçiminin özelleştirilmiş yaklaşımlarla yapılması önem taşımaktadır.
- Gelecekteki araştırmalarda, kökün diğer bölgelerindeki rezorpsiyon kavitelerini ve parafonksiyonel kuvvetlerin etkilerini detaylı bir şekilde incelenmesi önerilmektedir.
- Bu alanda elde edilen bulguların doğrulanması ve genişletilmesi amacıyla daha kapsamlı klinik ve laboratuvar çalışmaları yapılması gerekmektedir.

8. KAYNAKLAR

- Glossary of Endodontic Terms, (2020). <https://www.aae.org/specialty/clinical-resources/glossary-endodontic-terms/>
- AAOMR, A. a. (2015). *AAE and AAOMR Joint Position Statement: Use of Cone Beam Computed Tomography in Endodontics 2015 Update*.
- Abbott, P. V. (2022). Pulp, root canal and peri-radicular conditions. In Ahmed H. & D. P.M. (Eds.), *Endodontic advances and evidence-based clinical guidelines*. Wiley.
- Acar, A., Canyürek, U., Kocaaga, M., & Erverdi, N. (1999). Continuous vs. discontinuous force application and root resorption. *Angle Orthod*, 69(2), 159-163; discussion 163-154. [https://doi.org/10.1043/0003-3219\(1999\)069<0159:Cvdfaa>2.3.Co;2](https://doi.org/10.1043/0003-3219(1999)069<0159:Cvdfaa>2.3.Co;2)
- Aidos, H., Diogo, P., & Santos, J. M. (2018). Root Resorption Classifications: A Narrative Review and a Clinical Aid Proposal for Routine Assessment. *Eur Endod J*, 3(3), 134-145. <https://doi.org/10.14744/ej.2018.33043>
- Akpinar, I., Anil, N., & Parnas, L. (2000). A natural tooth's stress distribution in occlusion with a dental implant. *Journal of Oral Rehabilitation*, 27(6), 538-545. <https://doi.org/https://doi.org/10.1046/j.1365-2842.2000.00511.x>
- Aktemur Türker, S., Uzunoğlu, E., Deniz Sungur, D., & Tek, V. (2018). Fracture Resistance of Teeth with Simulated Perforating Internal Resorption Cavities Repaired with Different Calcium Silicate-based Cements and Backfilling Materials. *J Endod*, 44(5), 860-863. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2018.01.019>
- Al-Momani, Z., & Nixon, P. J. (2013). Internal and external root resorption: aetiology, diagnosis and treatment options. *Dent Update*, 40(2), 102-104, 107-108, 111-102. <https://doi.org/10.12968/denu.2013.40.2.102>
- Alhadainy, H. A., & Himel, V. T. (1993a). Comparative study of the sealing ability of light-cured versus chemically cured materials placed into furcation perforations. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol*, 76(3), 338-342. [https://doi.org/10.1016/0030-4220\(93\)90264-5](https://doi.org/10.1016/0030-4220(93)90264-5)
- Alhadainy, H. A., & Himel, V. T. (1993b). Evaluation of the sealing ability of amalgam, Cavit, and glass ionomer cement in the repair of furcation perforations. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol*, 75(3), 362-366. [https://doi.org/10.1016/0030-4220\(93\)90152-t](https://doi.org/10.1016/0030-4220(93)90152-t)
- Alhodiry, W., Lyons, M. F., & Chadwick, R. G. (2014). Effect of saliva and blood contamination on the bi-axial flexural strength and setting time of two calcium-silicate based cements: Portland cement and biodentine. *Eur J Prosthodont Restor Dent*, 22(1), 20-23.
- Allen, A. L., & Gutmann, J. L. (1977). Internal root resorption after vital root resection. *J Endod*, 3(11), 438-440. [https://doi.org/10.1016/s0099-2399\(77\)80119-2](https://doi.org/10.1016/s0099-2399(77)80119-2)
- Alqerban, A., Jacobs, R., Souza, P. C., & Willems, G. (2009). In-vitro comparison of 2 cone-beam computed tomography systems and panoramic imaging for detecting simulated canine impaction-induced external root resorption in maxillary lateral incisors. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 136(6), 764.e761-711; discussion 764-765. <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2009.03.036>
- AM, E. L.-M. a., Qualtrough, A. J., & Watts, D. C. (2014). Resistance to vertical fracture of MTA-filled roots. *Dent Traumatol*, 30(1), 36-42. <https://doi.org/10.1111/edt.12025>
- Andersson, L., Blomlöf, L., Lindskog, S., Feiglin, B., & Hammarström, L. (1984). Tooth ankylosis. Clinical, radiographic and histological assessments. *Int J Oral Surg*, 13(5), 423-431. [https://doi.org/10.1016/s0300-9785\(84\)80069-1](https://doi.org/10.1016/s0300-9785(84)80069-1)
- Andreasen, F. M. (1986). Transient apical breakdown and its relation to color and sensibility changes after luxation injuries to teeth. *Endod Dent Traumatol*, 2(1), 9-19. <https://doi.org/10.1111/j.1600-9657.1986.tb00118.x>
- Andreasen, F. M., & Andreasen, J. O. (1988). Resorption and mineralization processes following root fracture of permanent incisors. *Endod Dent Traumatol*, 4(5), 202-214. <https://doi.org/10.1111/j.1600-9657.1988.tb00323.x>
- Andreasen, F. M., & Pedersen, B. V. (1985). Prognosis of luxated permanent teeth--the development of pulp necrosis. *Endod Dent Traumatol*, 1(6), 207-220. <https://doi.org/10.1111/j.1600-9657.1985.tb00583.x>
- Andreasen, F. M., Sewerin, I., Mandel, U., & Andreasen, J. O. (1987). Radiographic assessment of simulated root resorption cavities. *Endod Dent Traumatol*, 3(1), 21-27. <https://doi.org/10.1111/j.1600-9657.1987.tb00167.x>

- Andreasen, J. O. (1970a). Etiology and pathogenesis of traumatic dental injuries. A clinical study of 1,298 cases. *Scand J Dent Res*, 78(4), 329-342. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0722.1970.tb02080.x>
- Andreasen, J. O. (1970b). Luxation of permanent teeth due to trauma A clinical and radiographic follow-up study of 189 injured teeth. *European Journal of Oral Sciences*, 78(1-4), 273-286. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1600-0722.1970.tb02074.x>
- Andreasen, J. O. (1975). Periodontal healing after replantation of traumatically avulsed human teeth: Assessment by mobility testing and radiography. *Acta Odontologica Scandinavica*, 33(6), 325-335. <https://doi.org/10.3109/00016357509004637>
- Andreasen, J. O. (1976). The influence of traumatic intrusion of primary teeth on their permanent successors. A radiographic and histologic study in monkeys. *Int J Oral Surg*, 5(5), 207-219. [https://doi.org/10.1016/s0300-9785\(76\)80016-6](https://doi.org/10.1016/s0300-9785(76)80016-6)
- Andreasen, J. O. (1980). A time-related study of periodontal healing and root resorption activity after replantation of mature permanent incisors in monkeys. *Swed Dent J*, 4(3), 101-110.
- Andreasen, J. O. (1981). Relationship between surface and inflammatory resorption and changes in the pulp after replantation of permanent incisors in monkeys. *Journal of Endodontics*, 7(7), 294-301. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0099-2399\(81\)80095-7](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0099-2399(81)80095-7)
- Andreasen, J. O. (1988). *The biological mechanisms of tooth eruption and root resorption*. EBSCO Media.
- Andreasen, J. O., & Andreasen, F. M. (1992). Root resorption following traumatic dental injuries. *Proc Finn Dent Soc*, 88 Suppl 1, 95-114.
- Andreasen, J. O., Andreasen, F. M., & Andersson, L. (2007). *Textbook and Color Atlas of Traumatic Injuries to the Teeth*. Wiley. <https://books.google.com.tr/books?id=geE1Zeui1bMC>
- Andreasen, J. O., Andreasen, F. M., & Andersson, L. (2018). *Textbook and Color Atlas of Traumatic Injuries to the Teeth*. Wiley. <https://books.google.com.tr/books?id=AdtytAEACAAJ>
- Andreasen, J. O., Borum, M. K., Jacobsen, H. L., & Andreasen, F. M. (1995). Replantation of 400 avulsed permanent incisors. 4. Factors related to periodontal ligament healing. *Endod Dent Traumatol*, 11(2), 76-89. <https://doi.org/10.1111/j.1600-9657.1995.tb00464.x>
- Andreasen, J. O., & Hjorting-Hansen, E. (1966a). Replantation of teeth. I. Radiographic and clinical study of 110 human teeth replanted after accidental loss. *Acta Odontol Scand*, 24(3), 263-286. <https://doi.org/10.3109/00016356609028222>
- Andreasen, J. O., & Hjorting-Hansen, E. (1966b). Replantation of teeth. II. Histological study of 22 replanted anterior teeth in humans. *Acta Odontol Scand*, 24(3), 287-306. <https://doi.org/10.3109/00016356609028223>
- Andreasen, J. O., & Løvschall, H. (2007). Response of oral tissues to trauma. In J. O. Andreasen, F. M. Andreasen, & L. Andersson (Eds.), *Textbook and Color Atlas of Traumatic Injuries to the Teeth*. Wiley. <https://books.google.com.tr/books?id=geE1Zeui1bMC>
- Andreasen, J. O., Munksgaard, E. C., & Bakland, L. K. (2006). Comparison of fracture resistance in root canals of immature sheep teeth after filling with calcium hydroxide or MTA. *Dent Traumatol*, 22(3), 154-156. <https://doi.org/10.1111/j.1600-9657.2006.00419.x>
- Anusavice, K. J. (2003). *Phillips' Science of Dental Materials - eBook: Phillips' Science of Dental Materials - eBook*. Elsevier Health Sciences. <https://books.google.com.tr/books?id=ZtFwJCAiF3wC>
- Arıcan, B., Sesen Uslu, Y., & Sarılioğlu Güngör, A. (2023). Resistance to fracture of simulated external cervical resorption cavities repaired with different materials. *Aust Endod J*, 49(1), 174-182. <https://doi.org/10.1111/aej.12714>
- Arslan, H., Karataş, E., Capar, I. D., Ozsu, D., & Doğanay, E. (2014). Effect of ProTaper Universal, Endoflare, Revo-S, HyFlex coronal flaring instruments, and Gates Glidden drills on crack formation. *J Endod*, 40(10), 1681-1683. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2014.06.004>
- Ashrafi, M. H., & Sadeghi, E. M. (1980). Idiopathic multiple internal resorption: report of case. *ASDC J Dent Child*, 47(3), 196-199.
- Aslan, T., Üstün, Y., & Esim, E. (2019). Stress distributions in internal resorption cavities restored with different materials at different root levels: A finite element analysis study. *Aust Endod J*, 45(1), 64-71. <https://doi.org/10.1111/aej.12275>
- Baghani, Z., Soheilifard, R., & Bayat, S. (2023). How Does the First Molar Root Location Affect the Critical Stress Pattern in the Periodontium? A Finite Element Analysis. *J Dent (Shiraz)*, 24(2), 182-193. <https://doi.org/10.30476/dentjods.2022.93271.1704>

- Bakland, L. K. (1992). Root resorption. *Dent Clin North Am*, 36(2), 491-507.
- Bates, S. (1856). Absorption. *Br J Dent Sci* 1(256-259).
- Baumrind, S., Korn, E. L., & Boyd, R. L. (1996). Apical root resorption in orthodontically treated adults. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 110(3), 311-320. [https://doi.org/10.1016/s0889-5406\(96\)80016-3](https://doi.org/10.1016/s0889-5406(96)80016-3)
- Bayram, E., & Bayram, H. M. (2016). Fracture resistance of immature teeth filled with mineral trioxide aggregate, bioaggregate, and biodentine. *Eur J Dent*, 10(02), 220-224. <https://doi.org/10.4103/1305-7456.178310>
- Beatty, H., & Svec, T. (2015). Quantifying Coronal Tooth Discoloration Caused by Biodentine and EndoSequence Root Repair Material. *J Endod*, 41(12), 2036-2039. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2015.08.032>
- Becks, H., & Marshall, J. (1932). Resorption or absorption? *J Am Dent Assoc* 19, 1528-1537.
- Bell, T. (1829). *The Anatomy, Physiology, and Diseases of the Teeth*. S. Highley. <https://books.google.com.tr/books?id=30ZkuGe2VawC>
- Belli, S., Eraslan, O., & Eskitascioglu, G. (2016). Effect of Root Filling on Stress Distribution in Premolars with Endodontic-Periodontal Lesion: A Finite Elemental Analysis Study. *Journal of Endodontics*, 42(1), 150-155. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2015.09.010>
- Bellizzi, R., & Ciao, W. L. (1980). Endodontic management of extensive internal root resorption. Report of a case. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol*, 49(2), 162-165. [https://doi.org/10.1016/0030-4220\(80\)90310-2](https://doi.org/10.1016/0030-4220(80)90310-2)
- Bender, I. B., & Seltzer, S. (1961). Roentgenographic and direct observation of experimental lesions in bone: I. *The Journal of the American Dental Association*, 62(2), 152-160. <https://doi.org/https://doi.org/10.14219/jada.archive.1961.0030>
- Benenati, F. W. (1997). Root resorption: types and treatment. *Gen Dent*, 45(1), 42-45.
- Benenati, F. W., Roane, J. B., Biggs, J. T., & Simon, J. H. (1986). Recall evaluation of iatrogenic root perforations repaired with amalgam and gutta-percha. *J Endod*, 12(4), 161-166. [https://doi.org/10.1016/s0099-2399\(86\)80055-3](https://doi.org/10.1016/s0099-2399(86)80055-3)
- Bergmans, L., Van Cleynenbreugel, J., Verbeken, E., Wevers, M., Van Meerbeek, B., & Lambrechts, P. (2002). Cervical external root resorption in vital teeth. *J Clin Periodontol*, 29(6), 580-585. <https://doi.org/10.1034/j.1600-051x.2002.290615.x>
- Bhuva, B., Barnes, J. J., & Patel, S. (2011). The use of limited cone beam computed tomography in the diagnosis and management of a case of perforating internal root resorption. *Int Endod J*, 44(8), 777-786. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2591.2011.01870.x>
- Bille, M. L., Kvetny, M. J., & Kjaer, I. (2008). A possible association between early apical resorption of primary teeth and ectodermal characteristics of the permanent dentition. *Eur J Orthod*, 30(4), 346-351. <https://doi.org/10.1093/ejo/cjn010>
- Bolhari, B., Meraji, N., & Nosrat, A. (2013). Extensive idiopathic external root resorption in first maxillary molar: a case report. *Iran Endod J*, 8(2), 72-74.
- Borg, E., Källqvist, A., Gröndahl, K., & Gröndahl, H. G. (1998). Film and digital radiography for detection of simulated root resorption cavities. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod*, 86(1), 110-114. [https://doi.org/10.1016/s1079-2104\(98\)90159-7](https://doi.org/10.1016/s1079-2104(98)90159-7)
- Bortoluzzi, E. A., Souza, E. M., Reis, J. M., Esberard, R. M., & Tanomaru-Filho, M. (2007). Fracture strength of bovine incisors after intra-radicular treatment with MTA in an experimental immature tooth model. *Int Endod J*, 40(9), 684-691. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2591.2007.01266.x>
- Boyd, K. S. (1995). Transient apical breakdown following subluxation injury: a case report. *Endod Dent Traumatol*, 11(1), 37-40. <https://doi.org/10.1111/j.1600-9657.1995.tb00677.x>
- Braly, B. V., & Maxwell, E. H. (1981). Potential for tooth fracture in restorative dentistry. *J Prosthet Dent*, 45(4), 411-414. [https://doi.org/10.1016/0022-3913\(81\)90102-5](https://doi.org/10.1016/0022-3913(81)90102-5)
- Bramante, C. M., & Berbert, A. (1987). Root perforations dressed with calcium hydroxide or zinc oxide and eugenol. *J Endod*, 13(8), 392-395. [https://doi.org/10.1016/s0099-2399\(87\)80200-5](https://doi.org/10.1016/s0099-2399(87)80200-5)
- Brito-Júnior, M., Pereira, R. D., Veríssimo, C., Soares, C. J., Faria-e-Silva, A. L., Camilo, C. C., & Sousa-Neto, M. D. (2014). Fracture resistance and stress distribution of simulated immature teeth after apexification with mineral trioxide aggregate. *International Endodontic Journal*, 47(10), 958-966. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/iej.12241>
- Bucchi, C., Del Fabbro, M., & Marcé-Nogué, J. (2022). Orthodontic Loads in Teeth after Regenerative Endodontics: A Finite Element Analysis of the Biomechanical Performance of the Periodontal Ligament. *Applied Sciences*, 12(14), 7063. <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/14/7063>

- Butt, N., Talwar, S., Chaudhry, S., Nawal, R. R., Yadav, S., & Bali, A. (2014). Comparison of physical and mechanical properties of mineral trioxide aggregate and Biodentine. *Indian J Dent Res*, 25(6), 692-697. <https://doi.org/10.4103/0970-9290.152163>
- Calışkan, M. K., & Türkün, M. (1997). Prognosis of permanent teeth with internal resorption: a clinical review. *Endod Dent Traumatol*, 13(2), 75-81. <https://doi.org/10.1111/j.1600-9657.1997.tb00014.x>
- Camilleri, J. (2008). The chemical composition of mineral trioxide aggregate. *J Conserv Dent*, 11(4), 141-143. <https://doi.org/10.4103/0972-0707.48834>
- Camilleri, J., Grech, L., Galea, K., Keir, D., Fenech, M., Formosa, L., Damidot, D., & Mallia, B. (2014). Porosity and root dentine to material interface assessment of calcium silicate-based root-end filling materials. *Clin Oral Investig*, 18(5), 1437-1446. <https://doi.org/10.1007/s00784-013-1124-y>
- Caputo, A. A., & Standlee, J. P. (1987). *Biomechanics in Clinical Dentistry*. Quintessence Publishing Company. <https://books.google.com.tr/books?id=NQdqAAAAMAAJ>
- Caronna, V., Himel, V., Yu, Q., Zhang, J. F., & Sabey, K. (2014). Comparison of the surface hardness among 3 materials used in an experimental apexification model under moist and dry environments. *J Endod*, 40(7), 986-989. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2013.12.005>
- Chabrier, F., Lloyd, C. H., & Scrimgeour, S. N. (1999). Measurement at low strain rates of the elastic properties of dental polymeric materials. *Dent Mater*, 15(1), 33-38. [https://doi.org/10.1016/s0109-5641\(99\)00011-1](https://doi.org/10.1016/s0109-5641(99)00011-1)
- Chatvanitkul, C., & Lertchirakarn, V. (2010). Stress distribution with different restorations in teeth with curved roots: a finite element analysis study. *J Endod*, 36(1), 115-118. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2009.09.026>
- Chen, F., Terada, K., Hanada, K., & Saito, I. (2006). Anchorage effect of palatal implants under various forces: A finite element study. *Orthodontic Waves*, 65(1), 1-8. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.odw.2005.11.001>
- Chivian, N., Louis H. Berman, Kenneth M. Hargreaves, & Cohen, S. R. (1976). Root Resorption. In *Pathways of the Pulp*. The C.V. Mosby Co.
- Chogle, S., Zuaitar, M., Sarkis, R., Saadoun, M., Mecham, A., & Zhao, Y. (2020). The Recommendation of Cone-beam Computed Tomography and Its Effect on Endodontic Diagnosis and Treatment Planning. *J Endod*, 46(2), 162-168. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2019.10.034>
- Cholia, S. S., Wilson, P. H., & Makdissi, J. (2005). Multiple idiopathic external apical root resorption: report of four cases. *Dentomaxillofac Radiol*, 34(4), 240-246. <https://doi.org/10.1259/dmfr/74146718>
- Chu, F. C., Li, T. K., Lui, V. K., Newsome, P. R., Chow, R. L., & Cheung, L. K. (2003). Prevalence of impacted teeth and associated pathologies--a radiographic study of the Hong Kong Chinese population. *Hong Kong Med J*, 9(3), 158-163.
- Chung, C. J., Soma, K., Rittling, S. R., Denhardt, D. T., Hayata, T., Nakashima, K., Ezura, Y., & Noda, M. (2008). OPN deficiency suppresses appearance of odontoclastic cells and resorption of the tooth root induced by experimental force application. *J Cell Physiol*, 214(3), 614-620. <https://doi.org/10.1002/jcp.21250>
- Cohen, S. R., & Hargreaves, K. M. (2011). *Cohen's Pathways of the Pulp* Mosby Elsevier. <https://books.google.com.tr/books?id=Jl7gSo5zcWEC>
- Cohenca, N., Karni, S., & Rotstein, I. (2003). Transient apical breakdown following tooth luxation. *Dent Traumatol*, 19(5), 289-291. <https://doi.org/10.1034/j.1600-9657.2003.t01-1-00191.x>
- Cooke, J., & Wang, H. L. (2006). Canine impactions: incidence and management. *Int J Periodontics Restorative Dent*, 26(5), 483-491.
- Craig, R. G. (1988). Review of dental impression materials. *Adv Dent Res*, 2(1), 51-64. <https://doi.org/10.1177/08959374880020012001>
- Crisp, S., Kent, B. E., Lewis, B. G., Ferner, A. J., & Wilson, A. D. (1980). Glass-ionomer cement formulations. II. The synthesis of novel polycarboxylic acids. *J Dent Res*, 59(6), 1055-1063. <https://doi.org/10.1177/00220345800590060801>
- Crona-Larsson, G., Bjarnason, S., & Norén, J. G. (1991). Effect of luxation injuries on permanent teeth. *Endod Dent Traumatol*, 7(5), 199-206. <https://doi.org/10.1111/j.1600-9657.1991.tb00436.x>
- Cvek, M. (2007). Endodontic management and the use of calcium hydroxide in traumatized permanent teeth. In J. Andreasen, F. Andreasen, & L. Andersson (Eds.), *Textbook and Color Atlas of Traumatic Injuries to the Teeth* (4 ed.). Blackwell Munksgaard.

- Cvek, M., Abbott, P., Baklan, L., & Heithersay, G. (2019). Management of Trauma-Related Pulp Disease and Tooth Resorption. In J. Andreasen, F. Andreasen, & L. Andersson (Eds.), *Textbook and Color Atlas of Traumatic injuries to the Teeth* (5 ed., pp. 648-717). Wiley-Blackwell.
- Cvek, M., & Lindvall, A. M. (1985). External root resorption following bleaching of pulpless teeth with oxygen peroxide. *Endod Dent Traumatol*, 1(2), 56-60. <https://doi.org/10.1111/j.1600-9657.1985.tb00561.x>
- Çalikkocaoğlu, S. (1996). *Bölümlü Protezler*. İstanbul Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi.
- D'Addazio, P. S., Campos, C. N., Özcan, M., Teixeira, H. G., Passoni, R. M., & Carvalho, A. C. (2011). A comparative study between cone-beam computed tomography and periapical radiographs in the diagnosis of simulated endodontic complications. *Int Endod J*, 44(3), 218-224. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2591.2010.01802.x>
- Darbar, U. R., Huggett, R., & Harrison, A. (1994). Stress analysis techniques in complete dentures. *J Dent*, 22(5), 259-264. [https://doi.org/10.1016/0300-5712\(94\)90054-x](https://doi.org/10.1016/0300-5712(94)90054-x)
- Darcey, J., & Qualtrough, A. (2013). Resorption: part 1. Pathology, classification and aetiology. *Br Dent J*, 214(9), 439-451. <https://doi.org/10.1038/sj.bdj.2013.431>
- Darcey, J., & Qualtrough, A. (2016). Root Resorption: Simplifying Diagnosis and Improving Outcomes. *Prim Dent J*, 5(2), 36-45. <https://doi.org/10.1308/205016816819304222>
- Dawood, A. E., Manton, D. J., Parashos, P., Wong, R., Palamara, J., Stanton, D. P., & Reynolds, E. C. (2015). The physical properties and ion release of CPP-ACP-modified calcium silicate-based cements. *Aust Dent J*, 60(4), 434-444. <https://doi.org/10.1111/adj.12255>
- DeForest, A. V., Ellis, G., & Stern, F. B. (1942). Brittle coating for quantitative strain measurements. *J Appl Mech Trans ASME*, 64A, 184-188.
- DeTolla, D. H., Andreana, S., Patra, A., Buhite, R., & Comella, B. (2000). Role of the finite element model in dental implants. *J Oral Implantol*, 26(2), 77-81. [https://doi.org/10.1563/1548-1336\(2000\)026<0077:Trotfe>2.3.Co;2](https://doi.org/10.1563/1548-1336(2000)026<0077:Trotfe>2.3.Co;2)
- Domon, T., Yasuda, M., Osanai, M., Suzuki, R., Takahashi, S., Yamamoto, T., & Wakita, M. (1998). Increase in odontoclast nuclei number by cell fusion: a three-dimensional reconstruction of cell fusion of human odontoclasts. *Anat Rec*, 252(3), 462-471. [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1097-0185\(199811\)252:3<462::Aid-ar14>3.0.Co;2-2](https://doi.org/10.1002/(sici)1097-0185(199811)252:3<462::Aid-ar14>3.0.Co;2-2)
- Dumsha, T., & Hovland, E. J. (1995). Evaluation of long-term calcium hydroxide treatment in avulsed teeth--an in vivo study. *Int Endod J*, 28(1), 7-11. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2591.1995.tb00149.x>
- Durack, C., & Patel, S. (2016). Root Resorption. In S. Patel, S. Harvey, H. Shemesh, & C. Durack (Eds.), *Cone Beam Computed Tomography in Endodontics* (1 ed., pp. 119-131). Quintessence
- Ee, J., Fayad, M. I., & Johnson, B. R. (2014). Comparison of endodontic diagnosis and treatment planning decisions using cone-beam volumetric tomography versus periapical radiography. *J Endod*, 40(7), 910-916. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2014.03.002>
- Ehnevid, H., Lindskog, S., Jansson, L., & Blomlöf, L. (1993). Tissue formation on cementum surfaces in vivo. *Swed Dent J*, 17(1-2), 1-8.
- ElDeeb, M. E., ElDeeb, M., Tabibi, A., & Jensen, J. R. (1982). An evaluation of the use of amalgam, Cavit, and calcium hydroxide in the repair of furcation perforations. *J Endod*, 8(10), 459-466. [https://doi.org/10.1016/s0099-2399\(82\)80151-9](https://doi.org/10.1016/s0099-2399(82)80151-9)
- Eraslan, Ö., Eraslan, O., Eskitaşcıoğlu, G., & Belli, S. (2011). Conservative restoration of severely damaged endodontically treated premolar teeth: a FEM study. *Clin Oral Investig*, 15(3), 403-408. <https://doi.org/10.1007/s00784-010-0397-7>
- European Society of Endodontology position statement: Use of cone beam computed tomography in Endodontics: European Society of Endodontology (ESE) developed by, 1675-1678 12 (2019).
- Farah, J. W., & Craig, R. G. (1974). Finite element stress analysis of a restored axisymmetric first molar. *J Dent Res*, 53(4), 859-866. <https://doi.org/10.1177/00220345740530041701>
- Ford, T. R., Torabinejad, M., Abedi, H. R., Bakland, L. K., & Kariyawasam, S. P. (1996). Using mineral trioxide aggregate as a pulp-capping material. *J Am Dent Assoc*, 127(10), 1491-1494. <https://doi.org/10.14219/jada.archive.1996.0058>
- Ford, T. R., Torabinejad, M., McKendry, D. J., Hong, C. U., & Kariyawasam, S. P. (1995). Use of mineral trioxide aggregate for repair of furcal perforations. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod*, 79(6), 756-763. [https://doi.org/10.1016/s1079-2104\(05\)80313-0](https://doi.org/10.1016/s1079-2104(05)80313-0)

- Fox, J. (1806). *The History and Treatment of the Diseases of the Teeth and Gums, and the Alveolar Processes, with the Operations which They Respectively Require: To which are Added, Observations on Other Diseases of the Mouth and on the Mode of Fixing Artificial Teeth* (5th ed. ed.). James Swan. <https://books.google.com.tr/books?id=x1pcPLjrVIAC>
- Frank, A. L. (1974). Resorption, perforations, and fractures. *Dent Clin North Am*, 18(2), 465-487.
- Frank, A. L. (1981). External-internal progressive resorption and its nonsurgical correction. *J Endod*, 7(10), 473-476. [https://doi.org/10.1016/s0099-2399\(81\)80310-x](https://doi.org/10.1016/s0099-2399(81)80310-x)
- Frank, A. L., & Torabinejad, M. (1998). Diagnosis and treatment of extracanal invasive resorption. *J Endod*, 24(7), 500-504. [https://doi.org/10.1016/s0099-2399\(98\)80056-3](https://doi.org/10.1016/s0099-2399(98)80056-3)
- Frank, A. L., & Weine, F. S. (1973). Nonsurgical therapy for the perforative defect of internal resorption. *J Am Dent Assoc*, 87(4), 863-868. <https://doi.org/10.14219/jada.archive.1973.0526>
- Friedman, S., Rotstein, I., Libfeld, H., Stabholz, A., & Heling, I. (1988). Incidence of external root resorption and esthetic results in 58 bleached pulpless teeth. *Endod Dent Traumatol*, 4(1), 23-26. <https://doi.org/10.1111/j.1600-9657.1988.tb00288.x>
- Furseth, R. (1968). The resorption processes of human deciduous teeth studied by light microscopy, microradiography and electron microscopy. *Arch Oral Biol*, 13(4), 417-431. [https://doi.org/10.1016/0003-9969\(68\)90168-4](https://doi.org/10.1016/0003-9969(68)90168-4)
- Fuss, Z., Tsesis, I., & Lin, S. (2003). Root resorption--diagnosis, classification and treatment choices based on stimulation factors. *Dent Traumatol*, 19(4), 175-182. <https://doi.org/10.1034/j.1600-9657.2003.00192.x>
- Garg, N., & Garg, A. (2018). *Textbook of Endodontics*. Jaypee Brothers Medical Publishers Pvt. Limited. <https://books.google.com.tr/books?id=53KSDwAAQBAJ>
- Gartner, A. H., Mack, T., Somerlott, R. G., & Walsh, L. C. (1976). Differential diagnosis of internal and external root resorption. *J Endod*, 2(11), 329-334. [https://doi.org/10.1016/s0099-2399\(76\)80071-4](https://doi.org/10.1016/s0099-2399(76)80071-4)
- Geng, J. P., Tan, K. B., & Liu, G. R. (2001). Application of finite element analysis in implant dentistry: a review of the literature. *J Prosthet Dent*, 85(6), 585-598. <https://doi.org/10.1067/mpr.2001.115251>
- Geramy, A., & Morgano, S. M. (2004). Finite element analysis of three designs of an implant-supported molar crown. *J Prosthet Dent*, 92(5), 434-440. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2004.08.011>
- Girish, K., Mandava, J., Chandra, R. R., Ravikumar, K., Anwarullah, A., & Athaluri, M. (2017). Effect of obturating materials on fracture resistance of simulated immature teeth. *J Conserv Dent*, 20(2), 115-119. <https://doi.org/10.4103/0972-0707.212238>
- Gold, S. I., & Hasselgren, G. (1992). Peripheral inflammatory root resorption. A review of the literature with case reports. *J Clin Periodontol*, 19(8), 523-534. <https://doi.org/10.1111/j.1600-051x.1992.tb00679.x>
- Goldberg, F., De Silvio, A., & Dreyer, C. (1998). Radiographic assessment of simulated external root resorption cavities in maxillary incisors. *Endod Dent Traumatol*, 14(3), 133-136. <https://doi.org/10.1111/j.1600-9657.1998.tb00826.x>
- Gottlieb, B., & Orban, B. J. (1931). *Die veränderungen der gewebe bei übermässiger beanspruchung der zähne*. Georg Thieme verlag. <https://books.google.com.tr/books?id=-JEnxwEACAAJ>
- Grech, L., Mallia, B., & Camilleri, J. (2013a). Characterization of set Intermediate Restorative Material, Biodentine, Bioaggregate and a prototype calcium silicate cement for use as root-end filling materials. *Int Endod J*, 46(7), 632-641. <https://doi.org/10.1111/iej.12039>
- Grech, L., Mallia, B., & Camilleri, J. (2013b). Investigation of the physical properties of tricalcium silicate cement-based root-end filling materials. *Dent Mater*, 29(2), e20-28. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2012.11.007>
- Gröndahl, H.-G., & Huuonen, S. (2004). Radiographic manifestations of periapical inflammatory lesions. *Endodontic Topics*, 8(1), 55-67. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1601-1546.2004.00082.x>
- Gulabivala, K., & Searson, L. J. (1995). Clinical diagnosis of internal resorption: an exception to the rule. *Int Endod J*, 28(5), 255-260. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2591.1995.tb00310.x>
- Gulsahi, A., Gulsahi, K., & Ungor, M. (2007). Invasive cervical resorption: clinical and radiological diagnosis and treatment of 3 cases. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod*, 103(3), e65-72. <https://doi.org/10.1016/j.tripleo.2006.10.005>
- Gunst, V., Mavridou, A., Huybrechts, B., Van Gorp, G., Bergmans, L., & Lambrechts, P. (2013). External cervical resorption: an analysis using cone beam and microfocus computed tomography and scanning electron microscopy. *Int Endod J*, 46(9), 877-887. <https://doi.org/10.1111/iej.12073>

- Haapasalo, M., & Endal, U. (2006). Internal inflammatory root resorption: the unknown resorption of the tooth. *Endodontic Topics*, 14(1), 60-79. <https://doi.org/10.1111/j.1601-1546.2008.00226.x>
- Hammarstrom, L., & Lindskog, S. (1985). General morphological aspects of resorption of teeth and alveolar bone. *Int Endod J*, 18(2), 93-108. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2591.1985.tb00426.x>
- Harokopakis-Hajishengallis, E. (2007). Physiologic root resorption in primary teeth: molecular and histological events. *J Oral Sci*, 49(1), 1-12. <https://doi.org/10.2334/josnusd.49.1>
- Heithersay, G. S. (1985). Clinical endodontic and surgical management of tooth and associated bone resorption. *Int Endod J*, 18(2), 72-92. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2591.1985.tb00425.x>
- Heithersay, G. S. (1999a). Clinical, radiologic, and histopathologic features of invasive cervical resorption. *Quintessence Int*, 30(1), 27-37.
- Heithersay, G. S. (1999b). Invasive cervical resorption: an analysis of potential predisposing factors. *Quintessence Int*, 30(2), 83-95.
- Heithersay, G. S. (2004). Invasive cervical resorption. *Endodontic Topics*, 7(1), 73-92. <https://doi.org/10.1111/j.1601-1546.2004.00060.x>
- Hsien, H. C., Cheng, Y. A., Lee, Y. L., Lan, W. H., & Lin, C. P. (2003). Repair of perforating internal resorption with mineral trioxide aggregate: a case report. *J Endod*, 29(8), 538-539. <https://doi.org/10.1097/00004770-200308000-00011>
- Hsu, H. M., Huang, G. F., Chang, H. H., Wang, Y. L., & Guo, M. K. (2004). A continuous flow system for assessing fluoride release/uptake of fluoride-containing restorative materials. *Dent Mater*, 20(8), 740-749. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2003.10.008>
- Incropera, F., DeWitt, D., Bergman, T., & Lavine, A. (2007). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*.
- Irinakis, E., Aleksejuniene, J., Shen, Y., & Haapasalo, M. (2020). External Cervical Resorption: A Retrospective Case-Control Study. *J Endod*, 46(10), 1420-1427. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2020.05.021>
- Ishijima, M., Rittling, S. R., Yamashita, T., Tsuji, K., Kurosawa, H., Nifuji, A., Denhardt, D. T., & Noda, M. (2001). Enhancement of osteoclastic bone resorption and suppression of osteoblastic bone formation in response to reduced mechanical stress do not occur in the absence of osteopontin. *J Exp Med*, 193(3), 399-404. <https://doi.org/10.1084/jem.193.3.399>
- Islam, I., Chng, H. K., & Yap, A. U. (2006). X-ray diffraction analysis of mineral trioxide aggregate and Portland cement. *Int Endod J*, 39(3), 220-225. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2591.2006.01077.x>
- İnan, M. (2001). *Cisimlerin Mukavemeti*. İtū Vakfı.
- Jang, Y. E., Lee, B. N., Koh, J. T., Park, Y. J., Joo, N. E., Chang, H. S., Hwang, I. N., Oh, W. M., & Hwang, Y. C. (2014). Cytotoxicity and physical properties of tricalcium silicate-based endodontic materials. *Restor Dent Endod*, 39(2), 89-94. <https://doi.org/10.5395/rde.2014.39.2.89>
- Jones SJ, & Boyd A. (1988). *Biological Mechanisms of Tooth Eruption and Root Resorption: Proceedings of the International Conference Held at the Great Southern Hotel, Columbus, Ohio, April 28-30, 1988*. EBSCO Media. <https://books.google.com.tr/books?id=nEpqAAAAMAAJ>
- Kabtoleh, A., Aljabban, O., & Alsayed Tolibah, Y. (2023). Fracture Resistance of Molars With Simulated Strip Perforation Repaired With Different Calcium Silicate-Based Cements. *Cureus*, 15(1), e34462. <https://doi.org/10.7759/cureus.34462>
- Kaley, J., & Phillips, C. (1991). Factors related to root resorption in edgewise practice. *Angle Orthod*, 61(2), 125-132. [https://doi.org/10.1043/0003-3219\(1991\)061<0125:Frtrri>2.0.Co;2](https://doi.org/10.1043/0003-3219(1991)061<0125:Frtrri>2.0.Co;2)
- Kamburoğlu, K., Tsesis, I., Kfir, A., & Kaffe, I. (2008). Diagnosis of artificially induced external root resorption using conventional intraoral film radiography, CCD, and PSP: an ex vivo study. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod*, 106(6), 885-891. <https://doi.org/10.1016/j.tripleo.2008.01.005>
- Kampanas, N. S., & Antoniadou, M. (2018). Glass Ionomer Cements for the Restoration of Non-Carious Cervical Lesions in the Geriatric Patient. *J Funct Biomater*, 9(3). <https://doi.org/10.3390/jfb9030042>
- Kanas, R. J., & Kanas, S. J. (2011). Dental root resorption: a review of the literature and a proposed new classification. *Compend Contin Educ Dent*, 32(3), e38-52.
- Kaup, M., Schäfer, E., & Dammaschke, T. (2015). An in vitro study of different material properties of Biodentine compared to ProRoot MTA. *Head Face Med*, 11, 16. <https://doi.org/10.1186/s13005-015-0074-9>
- Kaushik, M., Kumar, U., Sharma, R., Mehra, N., & Rath, A. (2018). Stress distribution in endodontically treated abraded mandibular premolar restored with different cements and crowns: A three-dimensional finite element analysis. *J Conserv Dent*, 21(5), 557-561. https://doi.org/10.4103/jcd.Jcd_206_18

- Kaval, M. E., Güneri, P., & Çalışkan, M. K. (2018). Regenerative endodontic treatment of perforated internal root resorption: a case report. *Int Endod J*, 51(1), 128-137. <https://doi.org/10.1111/iej.12784>
- Kheirieh, S., Fazlyab, M., Torabzadeh, H., & Eghbal, M. J. (2014). Extraoral Retrograde Root Canal Filling of an Orthodontic-induced External Root Resorption Using CEM Cement. *Iran Endod J*, 9(2), 149-152.
- Kikuta, J., Yamaguchi, M., Shimizu, M., Yoshino, T., & Kasai, K. (2015). Notch signaling induces root resorption via RANKL and IL-6 from hPDL cells. *J Dent Res*, 94(1), 140-147. <https://doi.org/10.1177/0022034514555364>
- Killiany, D. M. (1999). Root resorption caused by orthodontic treatment: an evidence-based review of literature. *Semin Orthod*, 5(2), 128-133. [https://doi.org/10.1016/s1073-8746\(99\)80032-2](https://doi.org/10.1016/s1073-8746(99)80032-2)
- Kishen, A. (2006). Mechanics and risk factors for fracture predilection in endodontically treated teeth. *Endodontic Topics*, 13, 57-83. <https://doi.org/10.1111/j.1601-1546.2006.00201.x>
- Kjaer, I. (1995). Morphological characteristics of dentitions developing excessive root resorption during orthodontic treatment. *Eur J Orthod*, 17(1), 25-34. <https://doi.org/10.1093/ejo/17.1.25>
- Kronfeld, R. (1949). *Histopathology of the Teeth and Their Surrounding Structures*. Kimpton. <https://books.google.com.tr/books?id=OvNpAAAAMAAJ>
- Kubota, H. (1959). The relation between the position of artificial teeth and the alveolar crest in dentures. *Shikua Gakuho*, 59, 377-384, 490-496.
- Kumar, Y. M., Ravindran, N. S., & Balasubramaniam, M. R. (2009). Holographic analysis of the initial canine displacement produced by four different retraction springs. *Angle Orthod*, 79(2), 368-372. <https://doi.org/10.2319/121407-587.1>
- Kundel, H. L., & Revesz, G. (1976). Lesion conspicuity, structured noise, and film reader error. *AJR Am J Roentgenol*, 126(6), 1233-1238. <https://doi.org/10.2214/ajr.126.6.1233>
- Kusnoto, B., & Evans, C. A. (2002). Reliability of a 3D surface laser scanner for orthodontic applications. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 122(4), 342-348. <https://doi.org/10.1067/mod.2002.128219>
- Kusum, B., Rakesh, K., & Richa, K. (2015). Clinical and radiographical evaluation of mineral trioxide aggregate, biodentine and propolis as pulpotomy medicaments in primary teeth. *Restor Dent Endod*, 40(4), 276-285. <https://doi.org/10.5395/rde.2015.40.4.276>
- Lantz, B., & Persson, P. A. (1965). Experimental root perforation in dogs' teeth. A roentgen study. *Odontol Revy*, 16(3), 238-257.
- Lauridsen, E., Blanche, P., Yousaf, N., & Andreasen, J. O. (2017). The risk of healing complications in primary teeth with intrusive luxation: A retrospective cohort study. *Dent Traumatol*, 33(5), 329-336. <https://doi.org/10.1111/edt.12341>
- Laux, M., Abbott, P. V., Pajarola, G., & Nair, P. N. (2000). Apical inflammatory root resorption: a correlative radiographic and histological assessment. *Int Endod J*, 33(6), 483-493. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2591.2000.00338.x>
- Leach, H. A., Ireland, A. J., & Whaites, E. J. (2001). Radiographic diagnosis of root resorption in relation to orthodontics. *Br Dent J*, 190(1), 16-22. <https://doi.org/10.1038/sj.bdj.4800870>
- Ledley, R. S., & Huang, H. K. (1968). Linear model of tooth displacement by applied forces. *J Dent Res*, 47(3), 427-432. <https://doi.org/10.1177/00220345680470031401>
- Lee, S. J., Monsef, M., & Torabinejad, M. (1993). Sealing ability of a mineral trioxide aggregate for repair of lateral root perforations. *J Endod*, 19(11), 541-544. [https://doi.org/10.1016/s0099-2399\(06\)81282-3](https://doi.org/10.1016/s0099-2399(06)81282-3)
- Levander, E., & Malmgren, O. (1988). Evaluation of the risk of root resorption during orthodontic treatment: a study of upper incisors. *Eur J Orthod*, 10(1), 30-38. <https://doi.org/10.1093/ejo/10.1.30>
- Li, L. L., Wang, Z. Y., Bai, Z. C., Mao, Y., Gao, B., Xin, H. T., Zhou, B., Zhang, Y., & Liu, B. (2006). Three-dimensional finite element analysis of weakened roots restored with different cements in combination with titanium alloy posts. *Chin Med J (Engl)*, 119(4), 305-311.
- Liang, H., Burkes, E. J., & Frederiksen, N. L. (2003). Multiple idiopathic cervical root resorption: systematic review and report of four cases. *Dentomaxillofac Radiol*, 32(3), 150-155. <https://doi.org/10.1259/dmfr/12925020>
- Lindskog, S., Blomlöf, L., & Hammarström, L. (1983). Repair of periodontal tissues in vivo and in vitro. *J Clin Periodontol*, 10(2), 188-205. <https://doi.org/10.1111/j.1600-051x.1983.tb02207.x>
- Linge, B. O., & Linge, L. (1983). Apical root resorption in upper anterior teeth. *Eur J Orthod*, 5(3), 173-183. <https://doi.org/10.1093/ejo/5.3.173>

- Lyroudia, K. M., Dourou, V. I., Pantelidou, O. C., Labrianidis, T., & Pitas, I. K. (2002). Internal root resorption studied by radiography, stereomicroscope, scanning electron microscope and computerized 3D reconstructive method. *Dent Traumatol*, 18(3), 148-152. <https://doi.org/10.1034/j.1600-9657.2002.00012.x>
- Maceri, F., Martignoni, M., & Vairo, G. (2007). Mechanical behaviour of endodontic restorations with multiple prefabricated posts: a finite-element approach. *J Biomech*, 40(11), 2386-2398. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2006.11.018>
- Mackerle, J. (2004). Finite element modelling and simulations in dentistry: a bibliography 1990-2003. *Comput Methods Biomech Biomed Engin*, 7(5), 277-303. <https://doi.org/10.1080/10255840412331309243>
- Madani, Z., Moudi, E., Bijani, A., & Mahmoudi, E. (2016). Diagnostic Accuracy of Cone-Beam Computed Tomography and Periapical Radiography in Internal Root Resorption. *Iran Endod J*, 11(1), 51-56. <https://doi.org/10.7508/iej.2016.01.010>
- Magne, P. (2007). Efficient 3D finite element analysis of dental restorative procedures using micro-CT data. *Dent Mater*, 23(5), 539-548. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2006.03.013>
- Mahler, D. B., & Peyton, F. A. (1955). Photoelasticity as a research technique for analyzing stresses in dental structures. *J Dent Res*, 34(6), 831-838. <https://doi.org/10.1177/00220345550340060601>
- Main, C., Mirzayan, N., Shabahang, S., & Torabinejad, M. (2004). Repair of root perforations using mineral trioxide aggregate: a long-term study. *J Endod*, 30(2), 80-83. <https://doi.org/10.1097/00004770-200402000-00004>
- Malkondu, Ö., Karapinar Kazandağ, M., & Kazazoğlu, E. (2014). A review on biodentine, a contemporary dentine replacement and repair material. *Biomed Res Int*, 2014, 160951. <https://doi.org/10.1155/2014/160951>
- Malmgren, B., Malmgren, O., & Andreasen, J. (2006). Alveolar bone development after decoronation of ankylosed teeth. *Endodontic Topics*, 14(1), 35-40. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1601-1546.2008.00225.x>
- Malmgren, O., Goldson, L., Hill, C., Orwin, A., Petrini, L., & Lundberg, M. (1982). Root resorption after orthodontic treatment of traumatized teeth. *Am J Orthod*, 82(6), 487-491. [https://doi.org/10.1016/0002-9416\(82\)90317-7](https://doi.org/10.1016/0002-9416(82)90317-7)
- Mannocci, F., Vichi, A., & Ferrari, M. (1997). Sealing ability of several restorative materials used for repair of lateral root perforations. *J Endod*, 23(10), 639-641. [https://doi.org/10.1016/s0099-2399\(97\)80178-1](https://doi.org/10.1016/s0099-2399(97)80178-1)
- Marmulla, R., Wörtche, R., Mühling, J., & Hassfeld, S. (2005). Geometric accuracy of the NewTom 9000 Cone Beam CT. *Dentomaxillofac Radiol*, 34(1), 28-31. <https://doi.org/10.1259/dmfr/31342245>
- Martins, G. G., Oliveira, I. A., & Consolaro, A. (2019). The mechanism: how dental resorptions occur in ameloblastoma. *Dental Press J Orthod*, 24(4), 21-32. <https://doi.org/10.1590/2177-6709.24.4.021-032.oin>
- Matthews, E. M., & Wain, E. A. (1956). Stresses in denture bases. *Br Dent J*, 100.
- Mavridou, Hauben, E., Wevers, M., Schepers, E., Bergmans, L., & Lambrechts, P. (2016). Understanding External Cervical Resorption in Vital Teeth. *J Endod*, 42(12), 1737-1751. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2016.06.007>
- Mavridou, A. M., Pyka, G., Kerckhofs, G., Wevers, M., Bergmans, L., Gunst, V., Huybrechts, B., Schepers, E., Hauben, E., & Lambrechts, P. (2016). A novel multimodular methodology to investigate external cervical tooth resorption. *Int Endod J*, 49(3), 287-300. <https://doi.org/10.1111/iej.12450>
- McHugh, K. P., Shen, Z., Crotti, T. N., Flannery, M. R., Fajardo, R., Bierbaum, B. E., & Goldring, S. R. (2007). Role of cell-matrix interactions in osteoclast differentiation. *Adv Exp Med Biol*, 602, 107-111. https://doi.org/10.1007/978-0-387-72009-8_14
- McNab, S., Battistutta, D., Taverne, A., & Symons, A. L. (1999). External apical root resorption of posterior teeth in asthmatics after orthodontic treatment. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 116(5), 545-551. [https://doi.org/10.1016/s0889-5406\(99\)70187-3](https://doi.org/10.1016/s0889-5406(99)70187-3)
- Mesgarani, A., Haghanifar, S., Ehsani, M., Yaghub, S. D., & Bijani, A. (2014). Accuracy of conventional and digital radiography in detecting external root resorption. *Iran Endod J*, 9(4), 241-245.
- Misch, C. E. (2008). Bone density: a key determinant for treatment planning. *Contemporary Implant Dentistry*, 130-146.
- Mount, G. J. (2002). *An Atlas of Glass-Ionomer Cements: A Clinician's Guide*. Taylor & Francis. <https://books.google.com.tr/books?id=NvYIdwPl-acC>

- Moze, G., Seehra, J., Fanshawe, T., Davies, J., McDonald, F., & Bister, D. (2013). In vitro comparison of contemporary radiographic imaging techniques for measurement of tooth length: reliability and radiation dose. *J Orthod*, 40(3), 225-233. <https://doi.org/10.1179/1465313313y.0000000049>
- Nagas, E., Cehreli, Z. C., Uyanik, M. O., Vallittu, P. K., & Lassila, L. V. (2016). Effect of several intracanal medicaments on the push-out bond strength of ProRoot MTA and Biodentine. *Int Endod J*, 49(2), 184-188. <https://doi.org/10.1111/iej.12433>
- Nakata, T. T., Bae, K. S., & Baumgartner, J. C. (1997). Perforation repair comparing mineral trioxide aggregate and amalgam. *Journal of Endodontics*, 23, 259.
- Ne, R. F., Witherspoon, D. E., & Gutmann, J. L. (1999). Tooth resorption. *Quintessence Int*, 30(1), 9-25.
- Nelson, S. J. (2015). *WHEELER'S DENTAL ANATOMY, PHYSIOLOGY, AND OCCLUSION* (10 ed.). Elsevier.
- Neuvald, L., & Consolaro, A. (2000). Cementoenamel junction: microscopic analysis and external cervical resorption. *J Endod*, 26(9), 503-508. <https://doi.org/10.1097/00004770-200009000-00004>
- Nicholson, J. W. (2016). Adhesion of glass-ionomer cements to teeth: A review. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 69, 33-38. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2016.03.012>
- Nilsen, R., & Magnusson, B. C. (1979). Enzyme histochemistry of induced heterotropic bone formation in guinea-pigs. *Archives of Oral Biology*, 24(10), 833-841. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0003-9969\(79\)90047-5](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0003-9969(79)90047-5)
- Niranjani, K., Prasad, M. G., Vasa, A. A., Divya, G., Thakur, M. S., & Saujanya, K. (2015). Clinical Evaluation of Success of Primary Teeth Pulpotomy Using Mineral Trioxide Aggregate®, Laser and Biodentine(TM)- an In Vivo Study. *J Clin Diagn Res*, 9(4), Zc35-37. <https://doi.org/10.7860/jcdr/2015/13153.5823>
- Noonan, M. A. (1949). The use of photoelasticity in a study of cavity preparations. *J Dent Child*, 16(4), 24-28, illust.
- O'Brien, W. J. (1997). *Dental Materials and Their Selection*. Quintessence Publishing Company. <https://books.google.com.tr/books?id=HChqAAAAMAAJ>
- O'Brien, W. J. (2002). *Dental Materials and Their Selection* (3 ed.). Quintessence.
- Olsen, J. L. (2013). *Finite Element Analysis of Maxillary Central Incisor Trauma* University of North Carolina]. Chapel Hill.
- Opacić-Galić, V., & Zivković, S. (2004). [Frequency of the external resorptions of tooth roots]. *Srp Arh Celok Lek*, 132(5-6), 152-156. <https://doi.org/10.2298/sarh0406152o> (Uceсталost eksternih resorpcija na korenu zuba.)
- Parirokh, M., & Torabinejad, M. (2010a). Mineral trioxide aggregate: a comprehensive literature review--Part I: chemical, physical, and antibacterial properties. *J Endod*, 36(1), 16-27. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2009.09.006>
- Parirokh, M., & Torabinejad, M. (2010b). Mineral trioxide aggregate: a comprehensive literature review--Part III: Clinical applications, drawbacks, and mechanism of action. *J Endod*, 36(3), 400-413. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2009.09.009>
- Patel, K., Mannocci, F., & Patel, S. (2016). The Assessment and Management of External Cervical Resorption with Periapical Radiographs and Cone-beam Computed Tomography: A Clinical Study. *J Endod*, 42(10), 1435-1440. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2016.06.014>
- Patel, S., Dawood, A., Wilson, R., Horner, K., & Mannocci, F. (2009). The detection and management of root resorption lesions using intraoral radiography and cone beam computed tomography - an in vivo investigation. *Int Endod J*, 42(9), 831-838. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2591.2009.01592.x>
- Patel, S., & Ford, T. P. (2007). Is the resorption external or internal? *Dent Update*, 34(4), 218-220, 222, 224-216, 229. <https://doi.org/10.12968/denu.2007.34.4.218>
- Patel, S., Kanagasingam, S., & Pitt Ford, T. (2009). External cervical resorption: a review. *J Endod*, 35(5), 616-625. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2009.01.015>
- Patel, S., Mavridou, A. M., Lambrechts, P., & Saberi, N. (2018). External cervical resorption-part 1: histopathology, distribution and presentation. *Int Endod J*, 51(11), 1205-1223. <https://doi.org/10.1111/iej.12942>
- Patel, S., Ricucci, D., Durak, C., & Tay, F. (2010). Internal root resorption: a review. *J Endod*, 36(7), 1107-1121. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2010.03.014>

- Patel, S., & Saberi, N. (2015). External cervical resorption associated with the use of bisphosphonates: a case series. *J Endod*, 41(5), 742-748. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2015.01.035>
- Patel, S., & Saberi, N. (2018). The ins and outs of root resorption. *Br Dent J*, 224(9), 691-699. <https://doi.org/10.1038/sj.bdj.2018.352>
- Patel, S., Saberi, N., Pimental, T., & Teng, P. H. (2022). Present status and future directions: Root resorption. *Int Endod J*, 55 Suppl 4(Suppl 4), 892-921. <https://doi.org/10.1111/iej.13715>
- Penick, E. C. (1963). The endodontic management of root resorption. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology*, 16(3), 344-352. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0030-4220\(63\)90298-6](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0030-4220(63)90298-6)
- Penido, R. S., Carrel, R., & Chialastri, A. J. (1980). The anachoretic effect in root resorption: report of case. *J Pedod*, 5(1), 85-88.
- Petel, R., & Fuks, A. (2016). Pink Spot - Literature Review and Case Report. *J Clin Pediatr Dent*, 40(5), 353-355. <https://doi.org/10.17796/1053-4628-40.5.353>
- Pierce, A. M. (1989). Experimental basis for the management of dental resorption. *Endod Dent Traumatol*, 5(6), 255-265. <https://doi.org/10.1111/j.1600-9657.1989.tb00371.x>
- Poiate, I. A., Vasconcellos, A. B., Poiate Junior, E., & Dias, K. R. (2009). Stress distribution in the cervical region of an upper central incisor in a 3D finite element model. *Braz Oral Res*, 23(2), 161-168. <https://doi.org/10.1590/s1806-83242009000200012>
- Qian, L., Todo, M., Morita, Y., Matsushita, Y., & Koyano, K. (2009). Deformation analysis of the periodontium considering the viscoelasticity of the periodontal ligament. *Dental Materials*, 25(10), 1285-1292. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.dental.2009.03.014>
- Rabinowitch, B. Z. (1972). Internal resorption. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol*, 33(2), 263-282. [https://doi.org/10.1016/0030-4220\(72\)90396-9](https://doi.org/10.1016/0030-4220(72)90396-9)
- Rajasekharan, S., Martens, L. C., Cauwels, R., & Anthonappa, R. P. (2018). Biodentine™ material characteristics and clinical applications: a 3 year literature review and update. *Eur Arch Paediatr Dent*, 19(1), 1-22. <https://doi.org/10.1007/s40368-018-0328-x>
- Ramoğlu, S., & Ozan, O. (2015). FINITE ELEMENT METHODS IN DENTISTRY [Diş hekimliğinde sonlu elemanlar stres analiz yöntemi]. *Atatürk Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi Dergisi*, 24(-3), 175-180. <https://doi.org/10.17567/dfd.27537>
- Regli, C. P., & Gaskill, H. L. (1954). Denture base deformation during function. *J Prosthet Dent* 4, 548-554.
- Reichart, P. A., Dürr, U. M., Triadan, H., & Vickendey, G. (1984). Periodontal disease in the domestic cat. A histopathologic study. *J Periodontal Res*, 19(1), 67-75. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0765.1984.tb01197.x>
- Ricucci, D. (1998). Apical limit of root canal instrumentation and obturation, part 1. Literature review. *Int Endod J*, 31(6), 384-393. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2591.1998.00184.x>
- Rodríguez, G., Abella, F., Durán-Sindreu, F., Patel, S., & Roig, M. (2017). Influence of Cone-beam Computed Tomography in Clinical Decision Making among Specialists. *J Endod*, 43(2), 194-199. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2016.10.012>
- Rudolph, D. J., & White, S. C. (1988). Film-holding instruments for intraoral subtraction radiography. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol*, 65(6), 767-772. [https://doi.org/10.1016/0030-4220\(88\)90027-8](https://doi.org/10.1016/0030-4220(88)90027-8)
- Saidon, J., He, J., Zhu, Q., Safavi, K., & Spångberg, L. S. (2003). Cell and tissue reactions to mineral trioxide aggregate and Portland cement. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod*, 95(4), 483-489. <https://doi.org/10.1067/moe.2003.20>
- Sakaguchi, R. L., & Powers, J. M. (2011). *Craig's Restorative Dental Materials - E-Book: Craig's Restorative Dental Materials - E-Book*. Mosby. <https://books.google.com.tr/books?id=MrPwAwAAQBAJ>
- Santos-Filho, P. C., Veríssimo, C., Raposo, L. H., Noritomi MecEng, P. Y., & Marcondes Martins, L. R. (2014). Influence of ferrule, post system, and length on stress distribution of weakened root-filled teeth. *J Endod*, 40(11), 1874-1878. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2014.07.015>
- Schaffner, P., & Dard, M. M. (2003). Structure and function of RGD peptides involved in bone biology. *Cell Mol Life Sci*, 60(1), 119-132. <https://doi.org/10.1007/s000180300008>
- Sekerere, K., & Mushiri, T. (2017). *Finite Element Analysis of a Cubesat* International Symposium on Industrial Engineering and Operations Management, Bristol, UK.

- Shabahang, S., Torabinejad, M., Boyne, P. P., Abedi, H., & McMillan, P. (1999). A comparative study of root-end induction using osteogenic protein-1, calcium hydroxide, and mineral trioxide aggregate in dogs. *J Endod*, 25(1), 1-5. [https://doi.org/10.1016/s0099-2399\(99\)80388-4](https://doi.org/10.1016/s0099-2399(99)80388-4)
- Shahid, S., Hassan, U., Billington, R. W., Hill, R. G., & Anderson, P. (2014). Glass ionomer cements: effect of strontium substitution on esthetics, radiopacity and fluoride release. *Dent Mater*, 30(3), 308-313. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2013.12.003>
- Sharry, J. J., Askew, H. C., & Hoyer, H. (1960). Influence of artificial tooth forms on bone deformation beneath complete dentures. *J Dent Res*, 39, 253-266. <https://doi.org/10.1177/00220345600390020701>
- Shetty, P., Hegde, A. M., & Rai, K. (2010). Finite element method--an effective research tool for dentistry. *J Clin Pediatr Dent*, 34(3), 281-285. <https://doi.org/10.17796/jcpd.34.3.yu44334815546435>
- Shirazi, M., Dehpour, A. R., & Jafari, F. (1999). The effect of thyroid hormone on orthodontic tooth movement in rats. *J Clin Pediatr Dent*, 23(3), 259-264.
- Sikri, V. K. (2011). Root resorption an enigma, . *Indian Journal of Comprehensive Dental Care*, 1(1), 15.
- Silva, L. B., Guimaraes, C. S., & Santos, R. A. (2008). Immunology of root resorption: a literature review. *Indian J Dent Res*, 19(4), 340-343. <https://doi.org/10.4103/0970-9290.44539>
- Silveira, F. F., Nunes, E., Soares, J. A., Ferreira, C. L., & Rotstein, I. (2009). Double 'pink tooth' associated with extensive internal root resorption after orthodontic treatment: a case report. *Dent Traumatol*, 25(3), e43-47. <https://doi.org/10.1111/j.1600-9657.2008.00755.x>
- Soares, A. J., Souza, G. A., Pereira, A. C., Vargas-Neto, J., Zaia, A. A., & Silva, E. J. (2015). Frequency of root resorption following trauma to permanent teeth. *J Oral Sci*, 57(2), 73-78. <https://doi.org/10.2334/josnusd.57.73>
- Solomon, C. S., Coffiner, M. O., & Chalfin, H. E. (1986). Herpes zoster revisited: implicated in root resorption. *J Endod*, 12(5), 210-213. [https://doi.org/10.1016/s0099-2399\(86\)80157-1](https://doi.org/10.1016/s0099-2399(86)80157-1)
- Soltanoff, C. S., Yang, S., Chen, W., & Li, Y. P. (2009). Signaling networks that control the lineage commitment and differentiation of bone cells. *Crit Rev Eukaryot Gene Expr*, 19(1), 1-46. <https://doi.org/10.1615/critreveukargeneexpr.v19.i1.10>
- Sonugelen, M., & Artunç, C. (2002). *Ağız Protezleri ve Biyomekanik*. Ege Üniversitesi Yayınları.
- Souza, B. D. M., Dutra, K. L., Kuntze, M. M., Bortoluzzi, E. A., Flores-Mir, C., Reyes-Carmona, J., Felipe, W. T., Porporatti, A. L., & De Luca Canto, G. (2018). Incidence of Root Resorption after the Replantation of Avulsed Teeth: A Meta-analysis. *J Endod*, 44(8), 1216-1227. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2018.03.002>
- Soykan, E., Eskitaşçıoğlu, G., Ünsal, E., & Bağış, N. (2013). Dental implantların biyomekaniği ve sonlu elemanlar stres analiz yöntemi uygulamaları [Dental İmplantların biyomekanikö ve sonlu elemanlar stres analiz yöntemi uygulamaları]. *European Annals of Dental Sciences*, 40(2), 87-95. <https://dergipark.org.tr/en/pub/eads/issue/63720/964576>
- Srirekha, A., & Bashetty, K. (2010). Infinite to finite: an overview of finite element analysis. *Indian J Dent Res*, 21(3), 425-432. <https://doi.org/10.4103/0970-9290.70813>
- Steadman, S. R. (1942). Résumé of the Literature on Root Resorption*. *The Angle Orthodontist*, 12(1), 28-38. [https://doi.org/10.1043/0003-3219\(1942\)012<0028:Rotlor>2.0.Co;2](https://doi.org/10.1043/0003-3219(1942)012<0028:Rotlor>2.0.Co;2)
- Tanalp, J., Karapınar-Kazandağ, M., Dölekoğlu, S., & Kayahan, M. B. (2013). Comparison of the radiopacities of different root-end filling and repair materials. *ScientificWorldJournal*, 2013, 594950. <https://doi.org/10.1155/2013/594950>
- Taşkinsel, E., & Gümüş, H. (2015). SONLU ELEMANLAR STRES ANALİZİ VE RESTORATİF DİŞ HEKİMLİĞİNDE KULLANIMI [Finite elements stress analysis and its use in restorative dentistry -]. *Atatürk Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi Dergisi*, 24(Supplement 8), 131-135. <https://doi.org/10.17567/dfd.18264>
- Thakur, S., Emil, J., & Paulaian, B. (2013). Evaluation of mineral trioxide aggregate as root canal sealer: A clinical study. *J Conserv Dent*, 16(6), 494-498. <https://doi.org/10.4103/0972-0707.120944>
- Tomes, J. (1859). *A System of Dental Surgery*. John Churchill. <https://books.google.com.tr/books?id=6NB3xdrnwLAC>
- Torabinejad, M., & Chivian, N. (1999). Clinical applications of mineral trioxide aggregate. *J Endod*, 25(3), 197-205. [https://doi.org/10.1016/s0099-2399\(99\)80142-3](https://doi.org/10.1016/s0099-2399(99)80142-3)

- Torabinejad, M., Ford, T. R., Abedi, H. R., Kariyawasam, S. P., & Tang, H. M. (1998). Tissue reaction to implanted root-end filling materials in the tibia and mandible of guinea pigs. *J Endod*, 24(7), 468-471. [https://doi.org/10.1016/s0099-2399\(98\)80048-4](https://doi.org/10.1016/s0099-2399(98)80048-4)
- Torabinejad, M., Hong, C. U., McDonald, F., & Pitt Ford, T. R. (1995). Physical and chemical properties of a new root-end filling material. *J Endod*, 21(7), 349-353. [https://doi.org/10.1016/s0099-2399\(06\)80967-2](https://doi.org/10.1016/s0099-2399(06)80967-2)
- Torabinejad, M., Parirokh, M., & Dummer, P. M. H. (2018). Mineral trioxide aggregate and other bioactive endodontic cements: an updated overview - part II: other clinical applications and complications. *Int Endod J*, 51(3), 284-317. <https://doi.org/10.1111/iej.12843>
- Tronstad, L. (1988). Root resorption--etiology, terminology and clinical manifestations. *Endod Dent Traumatol*, 4(6), 241-252. <https://doi.org/10.1111/j.1600-9657.1988.tb00642.x>
- Trope, M. (1998). Root resorption of dental and traumatic origin: classification based on etiology. *Pract Periodontics Aesthet Dent*, 10(4), 515-522.
- Trope, M. (2000). Luxation injuries and external root resorption--etiology, treatment, and prognosis. *J Calif Dent Assoc*, 28(11), 860-866.
- Trope, M. (2002). Root Resorption due to Dental Trauma. *Endodontic Topics*, 1(1), 79-100. <https://doi.org/https://doi.org/10.1034/j.1601-1546.2002.10106.x>
- Tyrovola, J. B., Spyropoulos, M. N., Makou, M., & Perrea, D. (2008). Root resorption and the OPG/RANKL/RANK system: a mini review. *J Oral Sci*, 50(4), 367-376. <https://doi.org/10.2334/josnusd.50.367>
- Tziafa, C., Koliniotou-Koumpia, E., Papadimitriou, S., & Tziafas, D. (2014). Dentinogenic responses after direct pulp capping of miniature swine teeth with Biodentine. *J Endod*, 40(12), 1967-1971. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2014.07.021>
- Uchiyama, M., Nakamichi, Y., Nakamura, M., Kinugawa, S., Yamada, H., Udagawa, N., & Miyazawa, H. (2009). Dental pulp and periodontal ligament cells support osteoclastic differentiation. *J Dent Res*, 88(7), 609-614. <https://doi.org/10.1177/0022034509340008>
- Ulusoy, M., & Aydın, K. (2003). *Diş Hekimliğinde Hareketli Bölümlü Protezler* (Vol. 1). Ankara Üniversitesi Diş Hekimliği
- Vallés, M., Roig, M., Duran-Sindreu, F., Martínez, S., & Mercadé, M. (2015). Color Stability of Teeth Restored with Biodentine: A 6-month In Vitro Study. *J Endod*, 41(7), 1157-1160. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2015.03.014>
- Vier, F. V., & Figueiredo, J. A. (2002). Prevalence of different periapical lesions associated with human teeth and their correlation with the presence and extension of apical external root resorption. *Int Endod J*, 35(8), 710-719. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2591.2002.00554.x>
- von Arx, T., Schawalder, P., Ackermann, M., & Bosshardt, D. D. (2009). Human and feline invasive cervical resorptions: the missing link?--Presentation of four cases. *J Endod*, 35(6), 904-913. <https://doi.org/10.1016/j.joen.2009.03.044>
- Wain, F. A. (1957). Stresses in denture bases. *Dent Practit*, 8, 37-41.
- Wakabayashi, N., Ona, M., Suzuki, T., & Igarashi, Y. (2008). Nonlinear finite element analyses: advances and challenges in dental applications. *J Dent*, 36(7), 463-471. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2008.03.010>
- Walls, A. W. (1986). Glass polyalkenoate (glass-ionomer) cements: a review. *J Dent*, 14(6), 231-246. [https://doi.org/10.1016/0300-5712\(86\)90030-8](https://doi.org/10.1016/0300-5712(86)90030-8)
- Walton, R. E., & Leonard, L. A. (1986). Cracked tooth: an etiology for "idiopathic" internal resorption? *J Endod*, 12(4), 167-169. [https://doi.org/10.1016/s0099-2399\(86\)80056-5](https://doi.org/10.1016/s0099-2399(86)80056-5)
- Wedenberg, C. (1987). Evidence for a dentin-derived inhibitor of macrophage spreading. *Scand J Dent Res*, 95(5), 381-388. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0722.1987.tb01628.x>
- Wedenberg, C., & Lindskog, S. (1985). Experimental internal resorption in monkey teeth. *Endod Dent Traumatol*, 1(6), 221-227. <https://doi.org/10.1111/j.1600-9657.1985.tb00584.x>
- Wedenberg, C., & Lindskog, S. (1987). Evidence for a resorption inhibitor in dentin. *European Journal of Oral Sciences*, 95(3), 205-211. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1600-0722.1987.tb01832.x>
- Wedenberg, C., & Yumita, S. (1990). Evidence for an inhibitor of osteoclast attachment in dentinal matrix. *Dental Traumatology*, 6(6), 255-259. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1600-9657.1990.tb00428.x>

- Wedenberg, C., & Zetterqvist, L. (1987). Internal resorption in human teeth--a histological, scanning electron microscopic, and enzyme histochemical study. *J Endod*, 13(6), 255-259. [https://doi.org/10.1016/s0099-2399\(87\)80041-9](https://doi.org/10.1016/s0099-2399(87)80041-9)
- Weltman, B., Vig, K. W., Fields, H. W., Shanker, S., & Kaizar, E. E. (2010). Root resorption associated with orthodontic tooth movement: a systematic review. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 137(4), 462-476; discussion 412A. <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2009.06.021>
- Yadav, P., Rao, Y., Jain, A., Relhan, N., & Gupta, S. (2013). Treatment of internal resorption with mineral trioxide aggregates: a case report. *J Clin Diagn Res*, 7(10), 2400-2401. <https://doi.org/10.7860/jcdr/2013/6349.3538>
- Yamaguchi, M., Aihara, N., Kojima, T., & Kasai, K. (2006). RANKL increase in compressed periodontal ligament cells from root resorption. *J Dent Res*, 85(8), 751-756. <https://doi.org/10.1177/154405910608500812>
- Yassir, Y. A., McIntyre, G. T., & Bearn, D. R. (2021). Orthodontic treatment and root resorption: an overview of systematic reviews. *Eur J Orthod*, 43(4), 442-456. <https://doi.org/10.1093/ejo/cjaa058>
- Zekry, A., Wang, R., Chau, A. C., & Lang, N. P. (2014). Facial alveolar bone wall width - a cone-beam computed tomography study in Asians. *Clin Oral Implants Res*, 25(2), 194-206. <https://doi.org/10.1111/clr.12096>
- Zeng, B., Luo, B., Hu, J., Meng, D., Zhang, J., Cao, X., & Jiang, Q. (2024). Effect of margin designs and loading conditions on the stress distribution of endocrowns: a finite element analysis. *BMC Oral Health*, 24(1), 657. <https://doi.org/10.1186/s12903-024-04422-3>

9. ÖZGEÇMİŞ



10. BİLİMSEL FAALİYETLER

Makale

Çelebi,Ş. & Öveçoğlu, H.S. (2024). Evaluating the Restoration of External Root Resorption Under Biomechanical Stress: A Finite Element Analysis. *Cureus*

Bildiri

Çelebi,Ş. & Öveçoğlu, H.S. (2024, Mayıs 20). İki Farklı Odontojenik Kaynaklı Periapikal Kistin Cerrahi Olmayan Tedavisi: Olgu Sunumu [Poster presentation]. 10. Uluslararası Endodonti Sempozyumu, Antalya, Türkiye.

Çelebi,Ş. & Öveçoğlu, H.S. (2024, Eylül 14). Evaluating the Restoration of External Root Resorption Under Biomechanical Stress: A Finite Element Analysis. [Oral presentation]. 14th IFEA World Endodontic Congress, Glasgow, İskoçya.