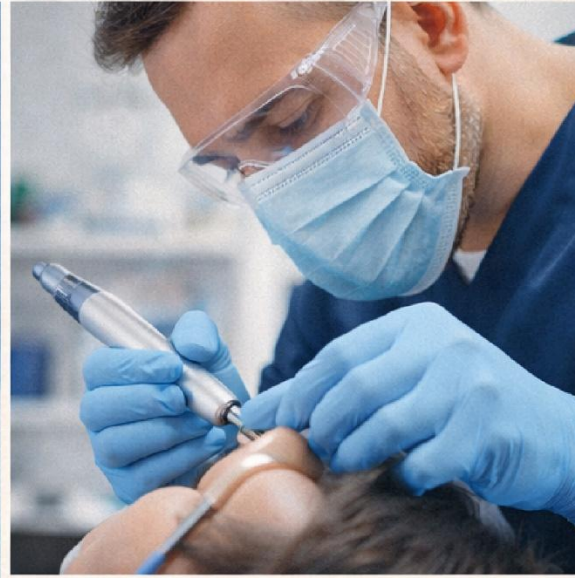
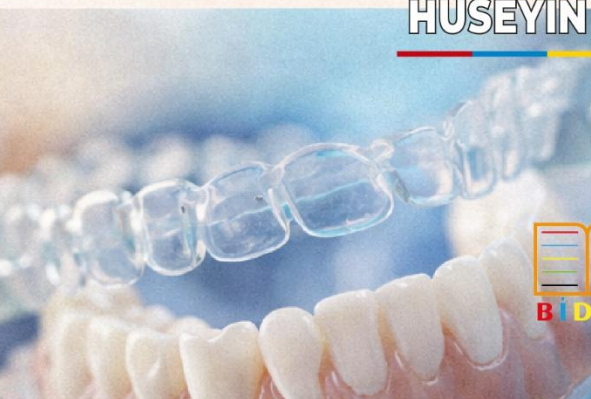


DİŞ HEKİMLİĞİNDE GÜNCEL GELİŞMELER



Editör
HÜSEYİN HATIRLI



BİDGE Yayınları

DİŞ HEKİMLİĞİNDE GÜNCEL GELİŞMELER

Editör: HÜSEYİN HATIRLI

ISBN: 978-625-372-884-7

1. Baskı

Sayfa Düzeni: Gözde YÜCEL

Yayınlama Tarihi: 20.12.2025

BİDGE Yayınları

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

Sertifika No: 71374

Yayın hakları © BİDGE Yayınları

www.bidgeyayinlari.com.tr - bidgeyayinlari@gmail.com

Krc Bilişim Ticaret ve Organizasyon Ltd. Şti.

Güzeltepe Mahallesi Abidin Daver Sokak Sefer Apartmanı No: 7/9 Çankaya /
Ankara



İÇİNDEKİLER

DİŞ HEKİMLİĞİNDE YAPAY ZEKÂ KULLANIMI	4
BURAK CÖMERT	4
EMİNE ŞİRİN KARAARSLAN	4
KOMPOZİT REZİNLERDE POLİMERİZASYON BÜZÜLMESİ VE ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ	49
SEVİLAY KÖSE.....	49
EMİNE ŞİRİN KARAARLAN	49
DİŞ HEKİMLİĞİNDE METAL OKSİT NANOPARÇACIKLARI	90
MELİKE KARABULUT	90
EMİNE ŞİRİN KARAARSLAN	90

DİŞ HEKİMLİĞİNDE YAPAY ZEKÂ KULLANIMI

BURAK CÖMERT¹
EMİNE ŞİRİN KARAARSLAN²

Giriş

Yapay zekâ (YZ), günümüzde insan yaşamına entegre olan elektronik cihazların ürettiği verilerin işlenmesi ve analiz edilmesinde önemli bir rol üstlenmektedir. Başlangıçta 1950’lerde tanımlanan bir kavram olan YZ, günümüzde tüm sektörlerde hızla gelişen ve yaygınlaşan bir teknoloji haline gelmiştir. En yaygın tanımlardan biri, yapay zekâyı; “görsel algılama, konuşma tanıma, karar verme ve diller arası çeviri gibi normalde insan zekâsı gerektiren görevleri yerine getirebilen bilgisayar sistemlerinin teorisi ve geliştirilmesi” olarak ifade etmektedir (Stevenson, 2010).

YZ, günümüzde yalnızca robotik, otomotiv, akıllı şehir uygulamaları ve finansal analiz gibi endüstrilerde değil, aynı zamanda tıp ve diş hekimliği alanında da geniş bir kullanım alanı bulmuştur. Özellikle; tıbbi ve dental görüntüleme, klinik karar desteği, dijital ve hassas tıp, ilaç geliştirme, giyilebilir cihazlar,

¹ Arş. Gör. Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Diş Hekimliği Fakültesi Restoratif Diş Tedavisi AD. Orcid: 0009-0002-1973-0145

² Doç. Dr. Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Diş Hekimliği Fakültesi, Restoratif Diş Tedavisi AD. Orcid: 0000-0002-6298-2463

hastane otomasyonu, robotik cerrahi ve sanal asistan sistemleri bu teknolojinin yoğun olarak kullanıldığı alanlardandır. Yapay zekâ, birçok durumda klinisyenlerin ve dış hekimlerinin iş yükünü azaltmakta, daha doğru ve hızlı karar vermelerine katkı sağlamaktadır.

Ayrıca YZ, yalnızca tek bir bilgi kaynağına dayalı teşhis yapmakla kalmayıp, çok modlu verilerden öğrenerek insan yeteneklerinin ötesinde analizler gerçekleştirebilmektedir. Örneğin; yaş, cinsiyet, vücut kitle indeksi (BMI), sigara kullanımı, kan basıncı ve diyabet riski gibi klinik parametrelerle birlikte fundus fotoğrafları analiz edilerek yalnızca diyabetik retinopati gibi göz hastalıkları değil, aynı zamanda kalp hastalıkları da tahmin edilebilmektedir (Poplin ve ark., 2018). Bu durum, YZ'nin farklı veri tiplerini bütünleştirerek yeni klinik içgörüler sunma potansiyelini ortaya koymaktadır.

YZ tabanlı görüntü analizlerinin, özellikle güvenilirlik ve başarımlar açısından güçlü sonuçlar verdiği bildirilmektedir. Bu başarımın arkasında; gelişen bilgi işlem kapasitesi (donanım), ilerleyen algoritmik yöntemler (yazılım) ve büyüyen veri tabanları (girdi verileri) yer almaktadır. Dolayısıyla yapay zekânın dış hekimliği ve tıp alanında kullanımının önümüzdeki yıllarda çok daha geniş bir potansiyel taşıdığı öngörülmektedir.

Dış hekimliğinde YZ uygulamaları; tanı, karar verme, tedavi planlaması, tedavi başarısının öngörülmesi ve hastalık prognozu gibi birçok aşamada kullanılmaktadır. Literatürde, bu alana ilişkin çok sayıda derleme ve araştırma yayımlanmış olup, mevcut incelemeler genellikle YZ'nin tarihsel gelişimini, sınıflandırmalarını, dental alandaki güncel uygulamalarını ve Kanıta Dayalı Dış Hekimliği ile ilişkisini ele almaktadır (AbuSalim ve ark., 2022; Khanagar, Al-Ehaideb, Maganur, ve ark., 2021; Khanagar, Al-Ehaideb, Vishwanathaiah, ve ark., 2021; Mahmood ve ark., 2020). Bununla

birlikte, yapay zekâ uygulamalarının mevcut sınırlılıkları da tartışılmaktadır.

Yapay Zekâ

Yapay zekâ, insan beyninin bilişsel süreçlerini taklit eden ve öğrenme, muhakeme, planlama, problem çözme ile karar verme gibi yetenekleri yerine getirebilen bilgisayar tabanlı sistemler ve algoritmalar bütünüdür (Mahajan ve ark., 2023).

Bu teknolojinin temel bileşenleri arasında makine öğrenimi, derin öğrenme ve yapay sinir ağları bulunmaktadır. Makine öğrenimi, makinelerin veri üzerinden öğrenmesini sağlayan bir yöntemken, derin öğrenme büyük veri kümelerinden öğrenme amacıyla çok katmanlı sinir ağlarını kullanarak kendi kendine öğrenme yeteneğine sahiptir. Yapay sinir ağları ise insan beynindeki nöronların işleyişinden esinlenilerek geliştirilmiş matematiksel modeller olup, derin öğrenmenin temelini oluşturur (F. a. Schwendicke ve ark., 2020).

Şekil 1 Yapay zeka ve alt kümeleri



Soffer, S., ve ark.. (2019). Convolutional neural networks for radiologic images: a radiologist's guide. Radiology, 290(3), 590-606.

Yapay Zekânın Tarihi

Yapay zekâ yeni bir kavram değildir. Alan Turing, 1950 yılında Mind dergisinde yayımlanan ünlü makalesi “Computing Machinery and Intelligence” (Turing, 2007). ile bu alandaki en önemli adımlardan birini atmıştır. Turing, söz konusu makalesinde şu ifadeyi kullanmıştır:

“Yüzyılın sonunda (20. yüzyılda) kelimelerin kullanımı ve genel eğitilmiş görüşler o kadar değişecek ki, makinelerin düşündüğünden bahsederken herhangi bir çelişkiyle karşılaşmayı beklemeyeceğiz.”

Bu dönemde “yapay zekâ” terimi henüz kullanılmamakta olup, Turing bu kavramı “düşünen makineler” olarak tanımlamıştır. Çalışmalarında yapay zekânın uygulanabilirliğini matematiksel bir çerçevede ele almış; akıllı makinelerin nasıl inşa edilebileceğini ve makine zekâsının nasıl ölçülebileceğini araştırmıştır. Turing’e göre, insanlar mevcut bilgilerini ve mantıksal çıkarımlarını kullanarak sorunları çözmekte ve kararlar almaktadır; benzer şekilde makineler de aynı süreçleri gerçekleştirebilecek potansiyele sahiptir (Turing, 2007).

Turing, Computing Machinery and Intelligence (Turing, 2007). adlı makalesinde, bir makinenin insan seviyesinde zekâyâ ulaşip ulaşamayacağını sınamak amacıyla bugün Turing Testi olarak bilinen yöntemi önermiştir. Bu test, bir insan değerlendiricinin bir insan katılımcı ile bir makine arasındaki doğal dil etkileşimlerini ayırt edip edemeyeceğine dayanır. İletişim yalnızca metin tabanlı olarak sınırlandırılmıştır; böylece makinenin konuşma veya ses tanıma yeteneğinden ziyade mantıksal ve dilsel yanıt verme becerisi değerlendirilir. Eğer insan değerlendirici, makine ile insanı ayırt edemezse, söz konusu makinenin “makine zekâsına” sahip olduğu kabul edilir.

Bu dönemin ardından, 1955 yılında John McCarthy, Marvin Minsky, Nathaniel Rochester ve Claude Shannon'un öncülüğünde gerçekleştirilen Dartmouth Yaz Araştırma Projesi ile ilk kez "Artificial Intelligence" (AI) terimi kullanılmıştır. Ancak, bu kavram başlangıçta yalnızca teorik bir çerçevede kalmıştır (McCarthy ve ark., 2006).

1957–1974 yılları arasında, bilgisayar gücü ve algoritmalarındaki gelişmeler sayesinde yapay zekâ çalışmaları hızlı bir ilerleme kaydetti. Bu dönemin önemli örneklerinden biri, doğal dil girdilerini yorumlayabilen ELIZA adlı bilgisayar programıdır (Weizenbaum, 1966). Ancak, yeterli pratik uygulama bulunamaması ve fon yetersizliği nedeniyle 1970'lerin ortalarından itibaren yapay zekâ araştırmaları durağanlaşmış ve tarihsel olarak "Yapay Zekâ Kışı" olarak adlandırılan iki dönem yaşanmıştır (Hendler, 2008).

1980'lerde yapay zekâ yeniden canlanmış ve iki ana yaklaşım öne çıkmıştır: Makine Öğrenmesi (ML) ve Uzman Sistemler. ML, bilgisayarların deneyim yoluyla öğrenmesini mümkün kılarken (LeCun ve ark., 2015), uzman sistemler insan uzmanların bilgi ve kurallarını taklit ederek karar verme süreçlerini simüle etmiştir (Liebowitz, 1995). Uzman sistemlerin endüstrideki en bilinen örneklerinden biri, 2.500 kural içeren R1 (Xcon) programıdır; bu sistem, bilgisayar montajında bileşen seçimi için kullanılmış ve Digital Equipment Corporation (DEC) tarafından uygulanmıştır (McDermott, 1980).

Görsel algı alanında ise özellikle 2012 ve 2017 yılları kritik dönüm noktalarıdır. 2012'de, derin öğrenme (DL) tabanlı sekiz katmanlı bir sinir ağı GPU'lar üzerinde uygulanarak ImageNet Büyük Ölçekli Görsel Tanıma Yarışması'nda %15,3 hata oranı ile büyük bir başarı elde etmiştir (Krizhevsky ve ark., 2017). 2017'de ise SE-NET modeli hata oranını %2,25'e düşürerek insan

performansının (%5,1) altına inmeyi başarmıştır (Russakovsky ve ark., 2015).

Yapay zekânın toplumsal ve kültürel alanda geniş yankı uyandırmasına neden olan çeşitli örnekler de vardır. 1997’de IBM’in geliştirdiği satranç oynayan uzman sistemi Deep Blue, dünya şampiyonu Garry Kasparov’u yenmiştir (Campbell ve ark., 2002). Yaklaşık 20 yıl sonra, 2017’de Google’ın derin öğrenme tabanlı programı AlphaGo, Go oyununda dünya bir numarası Ke Jie’yi mağlup etmiştir (Chao ve ark., 2018). Son olarak, 2022’nin sonunda OpenAI tarafından geliştirilen ChatGPT, insan benzeri metin üretebilme kabiliyeti ile küresel çapta yoğun ilgi görmüş ve yapay zekâ tartışmalarını yeniden gündeme taşımıştır (Schulman ve ark., 2022).

Yapay Zekâ Algoritmaları

Yapay zeka algoritmaları, düşünme, öğrenme ve problem çözme gibi *insana* özgü bilişsel becerileri bilgisayar sistemlerine entegre etmeyi amaçlayan çeşitli teknikleri ifade eder. Bu teknikler arasında uzman sistemler, bulanık mantık, genetik algoritmalar ve yapay sinir ağları yer alır. Söz konusu algoritmalar içinde, yapay sinir ağları en yaygın bilinen ve en dikkat çekici olanlardan biridir (Tandon ve ark., 2020).

Uzman Sistemler

Uzman sistemler, belirli bir uzmanlık alanındaki verilerden faydalanan uzmanların bilgi ve deneyimlerini taklit eden, böylece sorunlara çözüm üreten mekanizmalardır. Bu sistemler, problemlere özgün bir çözüm tasarımı sunmaktan ziyade, mevcut veri tabanlarındaki geçmiş tecrübelerle dayalı bilgileri kullanarak sonuçlara ulaşır. Dolayısıyla, bu sistemlerin güncelliğini koruması için ilgili alandaki yeniliklerin sürekli olarak sisteme dahil edilmesi gerekmektedir (Bahrammirzaee, 2010; Warwick, 2013).

Uzman sistemlerin temel amacı, alanında uzman kişileri devre dışı bırakmak değildir. Aksine, uzmanlara erişimin kısıtlı olduğu durumlarda bile sorunların çözümüne katkı sağlamaktır (Bozdemir & Mendi, 2005).

Bulanık Mantık

Kesin doğruluk prensibine dayanan klasik mantığın aksine, bulanık mantık, belirsiz ve gri alanlar içeren gerçek dünya problemlerini modellemek için geliştirilmiş bir yapay zekâ algoritmasıdır. Bu yaklaşım, kesin sayılarla ifade edilemeyen, kesinlikten uzak nitelendirmelerden oluşan kural tabanları kullanır. Dolayısıyla, yargılar keskin "doğru" veya "yanlış" yerine, ara değerleri ve formları içermektedir (Yılmaz, 2021).

Genetik Algoritmalar

Evrım teorisinden ilham alan genetik algoritmalar, insanlardaki genetik süreci taklit ederek problemleri çözmek için bilgisayar ortamında kromozom benzeri bir veri yapısını kullanır. Bu algoritmalar, genetik ve doğal seçim prensiplerini temel alarak en uygun ve başarılı çözümlerin hayatta kalması mantığıyla çalışır; bu nedenle fonksiyon optimize edici olarak da bilinirler. Belirli bir probleme odaklanan uzman sistemlerin aksine, genetik algoritmalar daha dinamik ve hızlı değişen koşullara uyum sağlayabilir. Bu özellikleri sayesinde, farklı senaryoları değerlendirme ve değişken durumlara uygun kararlar alıp çözümler üretme yeteneğine sahiptirler (Mathew, 2012).

Yapay Sinir Ağları

İnsan beynindeki nöronların çalışma prensibinden ilham alan yapay sinir ağları, insan zekâsının öğrenme, ilişki kurma, sınıflandırma, genelleme ve veri işleme gibi özelliklerini taklit etmek amacıyla geliştirilmiş sistemlerdir. Bu sistemler, yapay sinir hücrelerinin (yapay nöronların) katmanlı bir ağ yapısı oluşturacak

şekilde bir araya gelmesiyle meydana gelir. Bu ağların temel yapı taşları yapay sinir hücreleri veya diğer adıyla yapay nöronlardır (Atalay & Çelik, 2017; Ergezer ve ark., 2003).

Yapay Sinir Hücresinin Yapısı

Biyolojik sinir hücreleri (nöronlar), temel olarak dendritler, hücre gövdesi (soma), akson ve sinapslardan meydana gelir. Bir nöron, dendritleri aracılığıyla diğer nöronlardan gelen sinyalleri alır, bu sinyalleri hücre gövdesinde işler ve akson boyunca iletir. Nöronlar, sinapslar üzerinden birbirleriyle etkileşime girerek bir iletişim ağı kurar (AKBULUT, 2024).

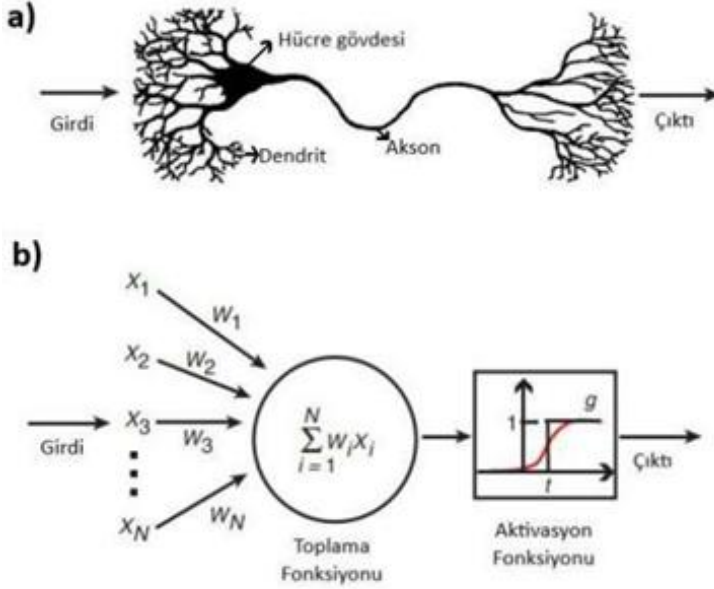
Bu biyolojik yapının fonksiyonel elemanları, yapay sinir hücresini oluşturmak için matematiksel olarak modellenmiştir. Bir yapay sinir hücresi beş temel birimden oluşur: girdiler, ağırlıklar, toplama fonksiyonu, aktivasyon fonksiyonu ve çıktılar. Biyolojik nöronlardaki dendritler, hücre gövdesi ve aksonun yapay sinir hücresindeki karşılıkları sırasıyla ağırlıklar, toplama fonksiyonu ve aktivasyon fonksiyonudur (Soffer ve ark., 2019).

Tablo 1 *Biyolojik sinir sistemindeki yapıların yapay sinir sistemindeki karşılıkları*

Biyolojik Sinir Sistemi	Yapay Sinir Sistemi
Nöron	İşlemci Elemanı(Yapay Sinir Hücresi)
Dendrit	Ağırlıklar
Soma	Toplama Fonksiyonu
Akson	Aktivasyon Fonksiyonu
Sinaps	Yapay Nöron Çıkışı

Soffer, S., Ben-Cohen, A., Shimon, O., Amitai, M. M., Greenspan, H., & Klang, E. (2019). Convolutional neural networks for radiologic images: a radiologist's guide. Radiology, 290(3), 590-606.

Şekil 2 (a) Biyolojik sinir hücresi, (b)Yapay sinir hücresi



Soffer, S., Ben-Cohen, A., Shimon, O., Amitai, M. M., Greenspan, H., & Klang, E. (2019). Convolutional neural networks for radiologic images: a radiologist's guide. *Radiology*, 290(3), 590-606.

Yapay Sinir Ağının Yapısı

Yapay sinir ağları, temel birimi olan yapay sinir hücrelerinin katmanlı bir ağ yapısı oluşturacak şekilde bir araya gelmesiyle oluşur. Bu ağlar genellikle üç katmandan meydana gelir: girdi katmanı, gizli katman ve çıktı katmanı. Girdi ve çıktı katmanları genellikle birer tanedir. Yapay sinir ağının en temel tabakası olan gizli katman, ağda birden fazla sayıda bulunabilir. Bu katman sayısı ve her bir katmandaki nöron sayısı, ağın tasarımına ve tasarımcının deneyim ve bilgi birikimine göre farklılık gösterir (Kaynar ve ark., 2016).

Girdi ve çıktı katmanları, ağın dış dünya ile etkileşimini sağlayan bölümlerdir; diğer tüm nöronlar ise gizli tabakalarda yer alır. Girdi katmanı, veri gruplarının ağa sunulduğu giriş noktasıdır

ve bu veriler, ilgili bağlantıların ağırlıklarıyla çarpılarak gizli katmana iletilir (Efe & Kaynak, 2004).

Yapay Sinir Ağlarının Eğitimi

Yapay sinir ağı modellerinin eğitimi, insanın öğrenme sürecine benzer şekilde, belirli bir eğitim veri seti modele sunulularak gerçekleştirilir. Bu eğitimin temel amacı, ağıdaki nöronlar arasındaki bağlantı ağırlıklarını optimize ederek, modelin tahmini çıktıları ile gerçek çıktılar arasındaki hatayı en aza indirmektir (Chartrand ve ark., 2017). Eğitim sırasında, modelin performansını ve gidişatını izlemek için doğrulama (validasyon) seti adı verilen bağımsız bir veri kümesi kullanılır. Eğitim tamamlandığında ise, modelin genel performansını değerlendirmek amacıyla test seti adı verilen ayrı bir veri kümesi kullanılır (Wang, 2003).

Bir yapay sinir ağı modeli, yalnızca eğitim sürecinde sunulan verilerden öğrenir, bu nedenle eğitim setinin kapsamlı olması büyük önem taşır. Modelin, eğitim setinde yer alan özellikleri etkili bir şekilde öğrenebilmesi için veri kümesinin yeterli büyüklükte olması gerekir. Ancak, veri kümesinin gereğinden fazla ayrıntı içermesi, sinir ağının ağırlıkları ayarlamasını zorlaştırabilir. Bu nedenle, başarılı bir model eğitimi için eğitim setinin kapsamlı, dengeli, özenle seçilmiş ve ilgili bilgileri içeren bir yapıya sahip olması kritiktir (Wang, 2003).

Derin Öğrenme

Yıllarca yapay zekâ alanında, genellikle bir veya iki katmandan oluşan sığ yapılar olarak adlandırılan algoritmalar tercih edilmiştir. Bu mimariler, karmaşık veri setleriyle başa çıkmakta zorlanıyordu. Ancak, verilerin giderek daha büyük ve karmaşık hale gelmesi, yapay sinir ağlarının öğrenme yeteneklerini geliştirmeye yönelik yeni yaklaşımları zorunlu kıldı. Bu doğrultuda, derin öğrenme algoritmaları çok katmanlı yapıları sayesinde karmaşık

verileri işleme ve anlamlandırma konusunda daha etkili bir çözüm sundu. Derin öğrenme, büyük ölçekli veri setleri üzerinde başarılı analiz, tahmin ve çıkarım yetenekleri sağlayarak yapay sinir ağlarının performansını önemli ölçüde artırdı (Pesapane ve ark., 2018).

Derin öğrenme, geleneksel makine öğrenimi yöntemlerinden farklı olarak özellik çıkarma gibi ön işlemlere ihtiyaç duymaz. Derin öğrenme ağlarındaki katmanlar, verileri doğrudan işleyerek otomatik olarak özellik çıkarımı yapabilme yeteneğine sahiptir. Bu süreç, yapay sinir ağının katman yapısına entegre edilmiştir, böylece özellik çıkarımı verilerin işlenmesi sırasında ağ tarafından öğrenilir ve ağa dahil edilir (Hao ve ark., 2016).

Derin öğrenme, radyologların lezyon tespiti, segmentasyon ve sınıflandırma gibi süreçlerini otomatikleştirmenin yanı sıra, geleneksel yöntemlerle zor olan tedavi yanıtının öngörülmesi gibi zaman alıcı görevlerde de etkin bir şekilde kullanılabilir (Montagnon ve ark., 2020).

Derin Öğrenme Yönteminin Radyolojik Görüntülerin Analizinde Rolü

Derin öğrenme teknolojisindeki ilerlemeler, karmaşık sorunların daha hızlı ve etkili çözümlerine imkân tanıyarak verimliliği artırmayı hedefler. Bu gelişmeler, özellikle sağlık sektöründe hekimlerin daha doğru teşhisler koymasına katkı sağlayabilir. Günümüzde radyolojik görüntülerin analizi gibi tıbbi görüntüleme sorunlarını çözmek için derin öğrenme yöntemlerine büyük ilgi gösterilmektedir (Kim ve ark., 2019).

Görüntü Sınıflandırması: Radyologlar için temel bir görev olup, hastaların tıbbi görüntülerine uygun bir ayırıcı tanı koymayı amaçlar. Bu sınıflandırma görevi, bir hastalığın varlığını veya yokluğunu belirlemek için görüntüdeki oluşumların

sınıflandırılmasını ve benzer özelliklere sahip bölgelerin gruplandırılmasını içerir (Kim ve ark., 2019).

Segmentasyon: Derin öğrenmede segmentasyon, medikal görüntülerde belirli anatomik yapıları veya anormal oluşumları piksel düzeyinde tanımlayan bir tekniktir (Heo ve ark., 2021). Bu yöntem, tümör tespiti, organ segmentasyonu ve lezyon analizi gibi uygulamalarda yüksek doğruluk sağlayan derin sinir ağlarıyla gerçekleştirilir. Ancak, segmentasyon algoritmalarında bazı yapısal sınırlamalar bulunmaktadır. Örneğin, girdi görüntüsündeki işaretli bölgelerin pikselleriyle komşu piksellerin büyük ölçüde örtüşmesi, aynı konvolüsyon işlemlerinin defalarca tekrarlanmasına yol açabilir. Bu durum, model verimliliğini düşürebilir ve bellek kullanımını artırabilir. Bu tür sorunları optimize etmek için U-Net, DeepLab ve Mask R-CNN gibi ileri düzey mimariler geliştirilmiştir (Litjens ve ark., 2017).

Nesne Tespiti: Biyomedikal görüntü analizinde derin öğrenmeye dayalı nesne tespiti, hastanın lezyonlarının yerini belirlemeyi ve bu lezyonları kategorize etmeyi kapsayan bir süreçtir (Kim ve ark., 2019). Geleneksel Konvolüsyonel Sinir Ağlarından (KSA) farklı olarak, nesne tespiti yapan segmentasyon modelleri, nesne tespiti ve sınır belirleme süreçlerini içeren ek bileşenlere sahiptir. Özellikle regresyon ve bölge önerisi mekanizmalarıyla desteklenen bu modeller, tespit edilen yapıların konumlarını hassas bir şekilde belirleyerek ayrıntılı analizler sunar. Bu yaklaşım, tıbbi görüntülerin piksel bazında değerlendirilmesini sağlayarak radyolojik tanılarda doğruluğu artırır ve klinik karar destek sistemlerinin etkinliğini güçlendirir (Heo ve ark., 2021).

Derin Öğrenme Yöntemleri

Nesne tespitinde yüksek başarı gösteren derin öğrenme algoritmaları arasında R-CNN, Fast R-CNN, Faster R-CNN, SSD (Single Shot MultiBox Detector) ve YOLO (You Only Look Once)

gibi modeller bulunmaktadır. Bu algoritmalar içinde özellikle YOLO, SSD ve Faster R-CNN etkinliği kanıtlanmış en yaygın kullanılan yöntemlerdir.

Yapay Zekânın Sağlık Hizmetlerinde Uygulanması

Teşhis

Yapay zekâ algoritmaları, radyograflar ve üç boyutlu taramalar gibi tıbbi görüntüleri analiz ederek anormallikleri tespit etme konusunda oldukça başarılıdır (Ker ve ark., 2018). Bu durum, sağlık uzmanlarının daha doğru teşhisler koymasına, dolayısıyla daha erken müdahalelere ve hasta sonuçlarının iyileştirilmesine yardımcı olmaktadır (M. Li ve ark., 2023).

Tahmine Dayalı Analitik

Yapay zekâ, tıbbi kayıtlar ve genetik bilgiler gibi geniş veri kümelerini kullanarak hastalık olasılığını tahmin edebilir (Khalifa & Albadawy, 2024). Bu yetenek, sağlık hizmeti sunucularının hasta sonuçlarını öngörmesini ve önleyici tedbirler almasını sağlayarak hem hasta bakımını hem de kaynakların dağıtımını iyileştirmektedir.

Kişiselleştirilmiş Tıp

Yapay zekâ, hastanın tıbbi geçmişini, genetik yapısını ve yaşam tarzı faktörlerini analiz ederek kişiselleştirilmiş tedavi planları oluşturmada kritik bir rol oynamaktadır. Bu yaklaşım, yalnızca tedavinin etkinliğini artırmakla kalmayıp, aynı zamanda olası yan etkileri de en aza indirir (Alowais ve ark., 2023).

İlaç Keşfi

Yapay zekâ, kimyasal bileşikleri analiz edip bunların tedavi edici etkinliğini tahmin ederek ilaç keşif sürecini kökten değiştirmektedir. Bu, geliştirme sürecini hızlandırmakta ve

potansiyel olarak yeni tedavilerin daha kısa sürede kullanıma sunulmasını sağlamaktadır (Vişan & Neğu, 2024).

Klinik Karar Desteği

Yapay zekâ sistemleri, doktorlara geręek zamanlı tıbbi öneriler sunarak karar alma süreçlerini, klinik iş akışlarını ve hasta güvenliğini geliştirmektedir (Secinaro ve ark., 2021). Güncel bilgileri hasta verileriyle birleştirerek tanı, tedavi ve hasta yönetiminde devrim yaratmaktadır (Alowais ve ark., 2023). Teknolojinin gelişimiyle birlikte, yapay zekânın sağlık hizmetlerine entegrasyonunun daha da yaygınlaşması, hasta bakımında ve sonuçlarında sürekli iyileşmelere yol açması beklenmektedir. Bu, yapay zekânın sağlık hizmeti sunumunu kökten değiştirme ve hasta sonuçlarını iyileştirme potansiyelini açıkça göstermektedir.

Klinik Diş Hekimliğinde Yapay Zekâ

Ağız, Diş Ve Çene Radyolojisi Alanında Yapay Zekâ

Kabir ve ark., panoramik ve ağız içi radyograflarda diş numaralarını otomatik olarak düzenleyen bir YZ algoritması geliştirmiştir. İki aşamalı bu süreçte, ilk olarak her diş periapikal ve bitewing radyograflarda numaralandırılır, ardından tüm görüntüler ve full mouth serilerini (FMS) formatında düzenlenir. Bu model, önceki modellere kıyasla daha yüksek duyarlılık ve özgüllük değerlerine ulaşmıştır. Modelin diğer dental tanı sistemleri ve elektronik sağlık kayıt (EHR) sistemleriyle entegrasyonu, klinik kayıtların doğrulanmasına olanak tanımaktadır (Kabir ve ark., 2022).

Song ve ark., YZ tabanlı tekniklerin yumuşak doku kalsifikasyonlarını (tükürük bezi taşları ve karotis arter kalsifikasyonları gibi) tespit etmedeki etkinliğini değerlendirmiştir. YZ kullanımı, hem genel diş hekimlerinin hem de oral tıp radyologlarının kalsifikasyon tespitindeki doğruluk oranını artırmıştır. YZ'nin etkili kullanımıyla, panoramik görüntülemenin

diğer hastalıkların taranmasında değerli bir araç olarak hizmet edebileceği görülmüştür (Song ve ark., 2022).

Fontenele ve ark. Konik Işınlı Bilgisayarlı Tomografi (CBCT) görüntülerinde otomatik diş segmentasyonu amacıyla kullanılan Evrişimli Sinir Ağları, dolgusu bulunmayan kontrol grubunda %100, dolgulu dişlerden oluşan deney grubunda ise %99–100 arasında değişen yüksek doğruluk oranları sağlamıştır (Fontenele ve ark., 2022). Ari ve ark., U-Net tabanlı bir YZ modelini kullanarak periapikal radyografları değerlendirmiştir. Model, periapikal görüntülerde kaviteleri, kronları, dolguları, diş pulpasını, periapikal lezyonları ve kök kanalı dolgularını ayırt etmede %80'e varan F1 puanı ile başarılı olmuştur. Baydar ve ark. ise, bitewing görüntülerinde derin öğrenme teknikleriyle eğitilen YZ uygulamalarının güvenilirliğini test etmiştir. Çürük teşhisinde başarı oranı düşük olsa da, kronlar, dolgular ve kök kanalı dolguları gibi diğer dental teşhislerde %95'lik bir başarı oranı elde edilmiştir (Ari ve ark., 2022; Baydar ve ark., 2023).

Hung ve ark., maksillofasiyal bozuklukların teşhis ve tedavisinde bilgisayarlı tomografi (CT) ve konik ışınlı bilgisayarlı tomografi (CBCT) verilerinde derin öğrenme ve radyomiklerin uygulanmasını vurgulamıştır. YZ, çene kistleri, tümörler, tükürük bezi problemleri, çene kırıkları ve deformiteler gibi durumların otomatik olarak tespiti, segmentasyonu ve etiketlenmesi için çeşitli yollar sunmaktadır (Hung ve ark., 2022). Shahnavaizi ve Mohamadrahimi, panoramik radyograflarda mandibula kırıklarını otomatik olarak tespit eden bir derin öğrenme algoritması geliştirmiştir. Faster R-CNN modeli, %91.67'lik bir doğrulukla, insan uzmanlardan (%87.22) daha iyi bir performans sergilemiştir (Shahnavaizi & Mohamadrahimi, 2023).

Choi ve ark., dental panoramik radyograflarda (DPR) doğal dişleri ve dental tedavi kalıplarını otomatik olarak bulan bir YZ aracı

geliştirmiştir. Model, doğal dişlerde %99.1, protezlerde %80.6, tedavi görmüş kök kanallarında %81.2 ve implantlarda %96.8'lik ortalama bir hassasiyetle başarılı olmuştur (Choi ve ark., 2022).

Ortodonti Alanında Yapay Zekâ

Ortodontik tedaviyi kişiselleştirmek amacıyla yapay zekânın (YZ) kullanımı, büyük ilgi çeken en son yeniliklerden biridir. Doğru 3B fotoğraflar ve simüle edilmiş temsiller kullanılarak, ortodontik apareylerin 3B yazdırılması süreci oldukça basitleşmektedir (Dalbah, 2021). YZ sistemleri, hastanın benzersiz diş verilerini analiz ederek gerekli ayarlamaları akıllıca hesaplar, optimum kuvvetleri ve basınç noktalarını belirler (Dhopte & Bagde, 2023). YZ destekli hizalayıcılar, hem hassas tedavi uygulaması sağlamakta hem de tedavinin ilerleyişini değerlendirmeye yardımcı olmaktadır. Bu sistemler, tedavi süresini ve gereken konsültasyon sayısını azaltma potansiyeli taşımaktadır (Tao ve ark., 2023).

Araştırmalar, YZ destekli sefalometrik analizin, manuel analizlere kıyasla daha güvenilir ve tutarlı olduğunu ortaya koymuştur. Manuel analizler, operatörün dönüm noktalarını belirleme becerisine bağlı olarak önemli farklılıklar gösterebilmektedir (Hwang ve ark., 2021; Hwang ve ark., 2020). Lateral radyografi, sefalometrik analiz için en yaygın yöntem olsa da, YZ'deki gelişmelerle birlikte Konik Işınlı Bilgisayarlı Tomografi (CBCT) de son zamanlarda popülerlik kazanmıştır (Chung ve ark., 2022).

Seo ve ark. tarafından bildirildiği gibi, servikal vertebral olgunlaşma değerlendirmelerinde, Konvolüsyonel Sinir Ağları (CNN) tabanlı modellerin %90'ın üzerinde doğruluk oranlarına ulaştığı görülmüştür (Seo ve ark., 2021). Yazarlar, bu sonuçların, lateral sefalometrik radyografların bir çocuğun kemik olgunluk durumunun otomatik olarak belirlenmesinde kullanışlı olabileceğini gösterdiğini belirtmektedir. Ancak, özellikle büyüme zirvesi gibi

kritik dönemlerde doğruluk oranlarının düşük olabildiğini gösteren başka çalışmalar da olduğu için, servikal vertebral olgunlaşma değerlendirmelerinde YZ sonuçları dikkatli bir şekilde analiz edilmelidir (de Dumast ve ark., 2018; Kök ve ark., 2019).

Son araştırmalar, YZ'nin temporomandibular eklem (TME) osteoartritini tespit etme ve evrelemede olağanüstü tanısal yeteneklerini ortaya koymaktadır (Bianchi ve ark., 2021). Araştırmacılar, eklem morfolojisinin otomatik ve kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesinin mümkün olduğunu göstermek için panoramik radyografiler, CBCT ve manyetik rezonans görüntüleme (MRG) dahil olmak üzere çeşitli görüntüleme tekniklerini kullanmıştır. Uzmanlar, YZ sistemlerinin TME'nin tanısal görüntülenmesinde kullanılmasının, artrit erken tespitini kolaylaştıracağına ve her birey için en uygun tedavinin bulunmasına yardımcı olacağına inanmaktadır. Bu alanda yapılan çeşitli incelemeler ve meta-analizler, modellerin TME osteoartritini belirlemede orta ila yüksek doğrulukta olduğunu göstermiştir (Jha ve ark., 2022; Xu ve ark., 2023).

Ağız, Diş Ve Çene Cerrahisi Alanında Yapay Zekâ

Alsomali ve ark., CBCT görüntülerinde potansiyel implant bölgelerini belirlemek için radyoaktif stentlerdeki işaretleyicileri otomatik olarak bulan bir YZ modeli oluşturmuştur. Mevcut sistem işaretleyicilerin çoğunu başarıyla bulsa da, %2.8 yanlış pozitif ve %17 kaçırılan vaka tespit edilmiştir. Bu durum, yalnızca eksenel görüntülerle bir YZ programını eğitmenin yeterli olmadığını göstermiştir (Alsomali ve ark., 2022).

Hong ve arkadaşları, ortognatik cerrahilerde kritik öneme sahip sefalometrik referans noktalarının %75'ini tanımlayabilen bir model geliştirmiştir. Bu yöntem, ortodontik apareyler, cerrahi plaklar, vidalar, sabit retainerlar veya kemik şekillendirme işlemleri mevcut olsa dahi uygulanabilir bulunmuştur (Hong ve ark., 2022).

Lateral ve frontal sefalogramlardan yararlanılan konvolüsyonel sinir ağı (CNN) tabanlı bir modelin, ortognatik cerrahi vakalarını %94,4 doğrulukla sınıflandırabildiği gösterilmiştir (S. H. Jeong ve ark., 2020). Jeong ve arkadaşlarının çalışmasında ise derin öğrenme algoritmalarının ön ve yan yüz fotoğraflarına dayanarak cerrahi adaylarını doğru şekilde tanıyabildiği rapor edilmiştir (Seung Hyun Jeong ve ark., 2020). Benzer şekilde, Tanikawa ve ekibi, yapay zekâ algoritmalarının ortodontik ve ortognatik cerrahi sonrasında yüz morfolojisindeki üç boyutlu değişiklikleri başarıyla öngörebildiğini ve bu uygulamaların hem güvenilir hem de etkili olduğunu ortaya koymuştur (Tanikawa & Yamashiro, 2021).

Diş implantlarının doğru biçimde tespit edilmesinde gelişmiş yöntemlerin etkili sonuçlar verdiği gösterilmiştir. Örneğin, panoramik radyografiler üzerinde R-CNN yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilen bir çalışmada implantların oldukça yüksek doğrulukla ayırt edilebildiği bildirilmiştir (Chen ve ark., 2023). Ayrıca Al-Sarem M ve çalışma arkadaşları, implantların doğru konumlandırılabilmesi amacıyla diş bölgelerinin belirlenmesinde önceden eğitilmiş derin öğrenme modellerinden yararlanmışlardır. Bu araştırmada, CBCT görüntülerinde %52,50 ile %79,17 arasında değişen doğruluk seviyelerine ulaşıldığı belirtilmiş, böylece implant cerrahisi öncesi planlamanın daha etkin yapılabileceği ortaya konmuştur (Al-Sarem ve ark., 2022). Elde edilen bulgular, bu teknolojilerin diş hekimliğinde tanısal doğruluğu artırma ve klinik süreçleri dönüştürme potansiyelini gözler önüne sermektedir.

Restoratif Diş Tedavisi Alanında Yapay Zekâ

Diş Yüzeyi Kaybı

Schwendicke ve ark., bite-wing radyografilerde çürük tespiti için evrişimli sinir ağı (CNN) tabanlı bir sistem geliştirmiştir. Bu çalışmada, 29.011 çürüksüz ve 19.760 çürük lezyonlu diştan elde edilen veriler farklı oranlarda (%10, %25, %50 ve %100) eğitim için

kullanılmış ve elde edilen sonuçlar, AI tabanlı aracın çürük tespitinde yüksek doğruluk ve maliyet etkinlik sağladığını göstermiştir. Bu çalışma, diş hekimliğinde yapay zekâ uygulamaları için eğitim veri setlerinin değerini değerlendiren ilk araştırma olmuştur (F. Schwendicke ve ark., 2022).

Qayyum ve ark, çürük tespitine yönelik derin öğrenme temelli yarı gözetimli bir model geliştirmiş ve 141 radyografiden oluşan veri setinde %6'luk piksel doğruluğu artışı sağlamışlardır (Qayyum ve ark., 2023).

Diş Rengi

Yapay zekâ alanındaki ilerlemeler, özellikle Evrişimsel Sinir Ağları (CNN'ler), ağız içi fotoğraflardan uzamsal özellikleri çıkararak restoratif diş hekimliğini önemli ölçüde etkiler. Bu, diş renginin hassas bir şekilde belirlenmesini ve doğal diş renkleriyle doğru bir şekilde eşleştirilmesini sağlar (Carrillo-Perez ve ark.; Thurzo ve ark., 2022).

Geri Yayılımlı Sinir Ağları (BPNN) ve Bulanık Mantık (FL), diş rengindeki değişkenliği yakalayarak ve bu değişkenliği hesaba katarak farklı veri kümeleri arasında uyarlanabilirliğe katkıda bulunur (Carrillo-Perez ve ark.). Diş renginde restorasyonlar için dijital renk eşleştirme teknolojisindeki gelişmeler, spektrofotometri, dijital fotoğrafçılık ve yapay zekâ odaklı algoritmaları bir araya getirmiştir. Bu yöntemler, restorasyonlarında renk üretiminin doğruluğunu ve tutarlılığını artırır. Yapay zekâ entegrasyonu, diş rengindeki ince değişiklikleri bile tanıyarak hassasiyeti daha da yükseltir (Binhuraib ve ark., 2024).

Endodonti Alanında Yapay Zekâ

Yapay zekâ, pulpa hastalıklarının radyografiler aracılığıyla ayırt edilmesinde dikkate değer başarılar göstermektedir. Bununla

birlikte, yalnızca radyografik değerlendirme yeterli olmayıp pulpa ve periapikal testlerle desteklenmesi gerekmektedir.

Panoramik radyograflardan yararlanan Tumbelaka ve arkadaşları, normal pulpa, pulpitis ve nekrotik pulpayı ayırt etmek amacıyla yapay sinir ağı (YSA) kullanmışlardır (Tumbelaka ve ark., 2014).

Yapay zekânın endodontide kullanımına yönelik çalışmalar, apikal foramenin izlenmesi, çalışma uzunluğunun ölçülmesi, periapikal lezyonların tespiti ve tedavi planlaması gibi geniş bir uygulama alanı bulunduğunu göstermektedir (Karobari ve ark., 2023). CNN tabanlı DetectNet, FPACNN ve diğer makine öğrenimi yöntemleri, dikey kök kırıklarının tespitinde başarılı sonuçlar ortaya koymuştur. Ayrıca, apikal forameni belirleme ve kök kanal morfolojisini öngörmeye Deep Learning tabanlı bilgisayarlı görme yaklaşımlarının etkili olduğu gösterilmiştir. Zheng ve ark., panoramik radyograflarda derin çürük ve pulpitis tanısında VGG19, Inception V3 ve ResNet18 modellerini kullanmış ve ResNet18'in klinik faktörlerle birlikte daha yüksek doğruluk sağladığını tespit etmiştir (Zheng ve ark., 2021).

Endodontik tedavilerde doğru çalışma uzunluğunun belirlenmesi kritik öneme sahiptir. Saghiri ve ark., 50 tek köklü dişte yapay sinir ağı ile panoramik radyograflardan elde edilen verileri analiz etmiş ve apikal deliklerin tanımlanmasında başarı sağlamıştır (Saghiri, Garcia-Godoy, ve ark., 2012). Aynı araştırma grubunun bir başka çalışması, kadavra dişlerinde Yapay Sinir Ağının endodontistlerden daha yüksek doğrulukla çalışma uzunluğu belirlediğini göstermiştir (Saghiri, Asgar, ve ark., 2012). Qiao ve ark., çok frekanslı empedans yöntemini YSA'larla birleştirerek çalışma uzunluğu ölçümünde doğruluk ve sağlamlığı artırmışlardır (Qiao ve ark., 2020).

Fukuda ve ark., dikey kök kırıklarının panoramik radyograflardan CNN ile tespitini sağlamış (Fukuda ve ark., 2020)., Shah ve arkadaşları ise yüksek çözünürlüklü CBCT görüntülerinde kırıkların otomatik tespit ve lokalizasyonunu gerçekleştirmiştir. Benzer şekilde, CBCT'nin 2B radyograflara göre daha doğru ve spesifik sonuçlar verdiği kanıtlanmıştır (Shah ve ark., 2018).

Gao ve ark.'nın yaptığı bir araştırmada, kök kanal tedavisinden sonra görülen postoperatif ağrının tahmin edilmesinde Geri Yayılımlı Sinir Ağı (BPNN) modeli kullanılmış ve %95,60 doğruluk oranına ulaşılmıştır (Gao ve ark., 2021). Başka bir çalışmada ise periapical radyograflarda apikal lezyonların belirlenmesi amacıyla CNN tabanlı bir topluluk modeli uygulanmış ve %92,75 oranında doğruluk elde edilmiştir (C.-W. Li ve ark., 2021). Benzer şekilde, periapikal lezyonların sınıflandırılması için kullanılan CNN tabanlı yaklaşımlar %86,30 doğruluk değeri sağlamıştır (Moidu ve ark., 2022).

SantosJunior ve arkadaşları, CBCT verilerini kullanarak tek köklü dişlerde otomatik kök kanal segmentasyonu için yapay zeka destekli bir yöntem geliştirmiştir. Çalışmada %89–93 aralığında Dice benzerlik katsayıları rapor edilmiş ve manuel segmentasyona kıyasla işlem süresinde belirgin bir azalma sağlanarak endodontik iş akışlarının daha verimli hale geldiği vurgulanmıştır. Benzer şekilde, Slim ve ekibi (2024), CNN tabanlı bir yaklaşımın CBCT görüntülerinde mandibular molar dişlerin pulpa boşluklarını başarılı şekilde ayırt edebildiğini göstermiştir. Bu yöntem, birinci molarlar için %88, ikinci molarlar için ise %90 Dice katsayısı elde etmiş ve manuel segmentasyon yöntemlerine göre süre açısından kayda değer bir avantaj sunmuştur (Santos-Junior ve ark., 2025).

Bu bulgular, yapay zekânın endodonti alanındaki tanı ve tedavi planlamasına yönelik yenilikçi katkılarını ortaya koymakta ve klinik süreçlerde giderek artan rolünü göstermektedir.

Periodontoloji Alanında Yapay Zekâ

Yapay zekâ, periodontal tehlike analizinde etkili bir şekilde kullanılmaktadır. Bu yaklaşım, yaşlanma, sondlama sırasında kanama, cep derinliği, kök plağının varlığı ve radyografilerdeki kemik kaybı derecesi gibi çeşitli faktörleri değerlendirir (Revilla-León ve ark., 2023).

Yapay zekâ teknolojisinin diş hekimliği yazılımlarına entegrasyonu gibi yenilikçi yaklaşımlar, diş hekimlerinin periodontitis teşhisini standardize etmelerine yardımcı olabilir. Aynı zamanda, hastaların kendi sağlık okuryazarlıklarını ve periodontal durumlarını daha iyi anlamalarını sağlayarak tedavi kabul oranlarını artırabilir (Bombard ve ark., 2018). YZ destekli radyografi analizleri, sement-mine birleşiminden (CEJ) krestal kemiğe kadar ölçüm yapabilme yeteneğine sahiptir. Bu özellik, diş hekimlerinin klinik karar verme ve tanı tutarlılığını destekler. YZ kullanımı, hasta katılımını da iyileştirerek optimum sağlık sonuçları elde edilmesini kolaylaştırır (Patil ve ark., 2022).

YZ modelleri, premolar ve molar dişlerde periodontal hastalığı sırasıyla %81 ve %76.7 doğrulukla teşhis edebilmektedir. (Lee ve ark., 2018). Nakano ve arkadaşları, mikrobiyotadan kaynaklanan ağız kokusunu %97'lik bir doğrulukla tespit etmek için derin öğrenme kullanmıştır (Nakano ve ark., 2018). Danks ve arkadaşları, periapikal radyografları analiz ederek periodontal kemik kaybını ölçmek için bir derin sinir ağı kullanmış ve %89.9'luk bir doğru anahtar noktası yüzdesi elde etmiştir (Danks ve ark., 2021). Tonetti ve diğerleri ise, panoramik görüntülerde periodontal kemik kaybını belirlemek ve ölçmek için bir derin öğrenme modeli kullanmış, bu da periodontitin evrelendirilmesine yardımcı olmuştur (Tonetti ve ark., 2018).

Protetik Diş Tedavisi Alanında Yapay Zekâ

Evrişimli Sinir Ağları (CNN), üç boyutlu ağız içi taramaları değerlendirirken öncelikle diş yapılarını öne çıkarır ve yumuşak dokulardan kaynaklanabilecek hataları en aza indirir. Elde edilen bu yüksek hassasiyetteki veriler, daha sonraki CAD sürecinde farklı restoratif yaklaşımlar için ayrıntılı dijital modellerin hazırlanmasında kullanılmaktadır. Farook ve ark. tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, ağız içi taramalara dayalı olarak kısmi diş kronlarının (PDC) tasarlanması amacıyla bir 3B-CNN modeli geliştirilmiş ve doğruluk testleri yapılmıştır. Model, yaklaşık %60 düzeyinde doğruluk sağlamış olsa da, diş restorasyonlarının dijital modelleme sürecinin otomatikleştirilmesinde yapay zekânın önemli bir potansiyel taşıdığını göstermektedir (Farook ve ark., 2023). Bununla birlikte, daha geniş ve çeşitlendirilmiş veri kümeleriyle yapılacak ek çalışmalar, yöntemin klinik uygulamalara uyarlanabilirliğini artırabilir.

Yapay zekâ (YZ), bilgisayar destekli tasarım ve üretim (CAD/CAM) yazılımlarını kullanarak diş protezlerinin (kronlar ve hareketli cihazlar) doğruluğunu ve uygunluğunu artırır. Araştırmacılar, karşıt kavramsal ağlardaki (GAN) ilerlemeler sayesinde, kişiselleştirilmiş, fonksiyonel ve yapısal olarak gelişmiş diş rekonstrüksiyonları oluşturmak için YZ'yi kullanmaktadır (Paulose ve ark., 2022). YZ destekli yazılımlar, dijital ölçü alma sürecinin tamamında diş hekimine rehberlik ederek yüksek kaliteli bir ölçü alınmasına yardımcı olur ve bu durum, hastanın protez diş hekimliğine ilişkin algısını önemli ölçüde iyileştirir. Ayrıca, YZ çene arklarının ölçüsünün analizine ve hareketli parsiyel veya tam protezlerin üretimine katkıda bulunur (Jia-Mahasap ve ark., 2022).

Yapay zekânın implantolojiye uygulanması, protezlerin otomatik ve doğru bir şekilde üretilmesini mümkün kılmıştır. Ayrıca, implantların optimum yerleşimini belirleme sürecini de basitleştirir.

YZ'nin dil kontrol teknolojisi, ağız boşluğundaki dil hareketlerini izleyebilir ve talimatlara yanıt verebilir (Assaf ve ark., 2023).

Alharbi ve arkadaşları, diş implantı gerekliliğini belirlemek amacıyla dört makine öğrenmesi algoritması geliştirmiştir. Bu algoritmalar arasında AdaBoost, Random Forest, Bayes ağı ve geliştirilmiş bir AdaBoost yöntemi yer almıştır. Analizler, geliştirilmiş AdaBoost algoritmasının %91.7'lik bir doğruluk oranıyla diğer yöntemlerden çok daha iyi bir performans sergilediğini göstermektedir (Alharbi & Almutiq, 2022). Bornes ve arkadaşlarının implant destekli tedavide YZ kullanımı üzerine yaptığı bir literatür analizinde, incelenen on altı makalenin on üçünde makine öğrenimi (ML), derin öğrenme (DL) ve konvolüsyonel sinir ağları (CNN) gibi YZ algoritmalarının evrimi görülmüştür. Çoğu çalışma, implantları tanımlamak, hasarı teşhis etmek, implant yerleşimini optimize etmek ve ağız içi rehabilitasyonu iyileştirmek için 2 boyutlu görüntülemeyi kullanmıştır (Bornes ve ark., 2023).

Yapay zeka algoritmaları yalnızca yanlış teşhisi azaltmakla kalmayıp aynı zamanda potansiyel sonuçları da tahmin etme yeteneğine sahip biyoenformatik araçların oluşturulmasını sağlamıştır. CAD/CAM gibi bilgisayar destekli üretim ve tasarım süreçleri, standart laboratuvar ve klinik uygulamalarına entegre olmuştur (Bernauer ve ark., 2021). Diş hekimliğinde dijitalleşme ilerledikçe YZ, düz görüntüleme temelinde diş restorasyonlarının değerlendirilmesinde de kullanılmaya başlanmıştır. Konvolüsyonel sinir ağları (CNN), çıkarılan protezlerde diş arklarını sınıflandırabilmektedir. Dişsiz hastalarda hem fonksiyonel hem de estetik gereksinimleri karşılayan protezler yapmak diş hekimleri için her zaman zorlayıcı olmuştur. Ancak, CAD/CAM yazılımındaki makine öğrenimi, dişlerin doğru konumlandırılmasıyla çeneler arası sağlam bağlantıların yeniden kurulmasına yardımcı olmaktadır. Birkaç ön diş veya sadece bir merkezi kesici diş gibi estetik

zorlukların olduğu durumlarda, YZ doğru renk eşleştirmesine yardımcı olabilir. Ağız içi dedektörler tarafından hızlıca tespit edilen implant yerleşimleri, implant diş hekimliğinde kullanılan CAD yazılımına aktarılabilir. Bu sayede, YZ potansiyel olarak diş implantı tasarımı ve uygulamasını geliştirebilir (Reyes ve ark., 2021).

Pedodonti Alanında Yapay Zekâ

Yapay zekânın (YZ) tüm sektörlerdeki benimsenme ivmesi, çocuk diş hekimliği alanında da yeni çığırlar açmaktadır. YZ, araştırma ve tanı testlerinden başlayarak, davranışsal ve ağrı yönetimi, diş hareketliliği ve rejeneratif diş bakımı gibi birçok alanda umut vaat eden çözümler sunar (Wikström ve ark., 2022). Bu uygulamalar, modern diş bakımı eğitimi ve uygulamasında devrim yaratma potansiyeline sahiptir. Yapay zekanın sanal gerçeklik (VR) gibi diğer yeniliklerle sanal bir eğitim ortamı oluşturacak şekilde entegre edilmesi, daha fazla çocuğa yardımcı olma ve kişiselleştirilmiş bir öğrenme deneyimi sağlama potansiyeli taşır (Pandey & Vaughn, 2021).

Diş çürükleri, dişlerin kalıcı, karmaşık ve şekere bağımlı bakteriyel enfeksiyonlarıdır. Bu hastalık, demineralizasyon ve remineralizasyon süreçleri arasındaki bir dengesizlikten kaynaklanır. Sosyoekonomik durum, yaşam tarzı, beslenme alışkanlıkları ve yetersiz ağız hijyeni gibi değiştirilebilir değişkenler de hastalığın yayılmasına katkıda bulunabilir (Aminoshariae ve ark., 2021). Al-Jallad ve arkadaşları, çocukların fotoğraflarını kullanarak çürükleri tespit etmek amacıyla yapay zekâ destekli bir uygulama geliştirmiştir. Bu çürük uygulaması, Sistem Kullanılabilirlik Ölçeği (SUS)'nde 78.4 puan alarak kullanıcılar tarafından mükemmel bir kabul gördüğünü göstermiştir (Al-Jallad ve ark., 2022). Ebeveynlerin çocuklarının fotoğraflarını akıllı telefonlarıyla çekebilmelerini sağlayan bu uygulama, çürükleri önlemede faydalı bir araç olabilir.

Yakın zamanda yapılan sistematik bir inceleme, YZ ve makine öğreniminin genellikle Çocuk Ağız Sağlığı Puanı (COHSI) ve Ağız Sağlığı Tedavi İhtiyaçları Yönlendirmesi (RFTN) gibi halk sağlığını değerlendirme araçları geliştirmek için kullanıldığını belirtmektedir. Ayrıca, fazla diş, plak tespiti ve fissür örtücülerin uygunluğunu değerlendirme; erken çocukluk çürüklerini tahmin etme; diş yaşını ve batık dişleri belirleme; ve yanlış yerde çıkan dişleri saptama gibi alanlarda da kullanılırlar (Vishwanathaiah ve ark., 2023).

Diş enfeksiyonları, hem gelişmiş hem de gelişmekte olan ülkelerde her yaştan çocuk için ciddi bir halk sağlığı sorunudur ve yaygın kronik çocukluk hastalıkları arasında yer alır. Bu bozukluklar, bir çocuğun hem diş sağlığını hem de genel refahını ciddi şekilde etkileyebilir, bu nedenle hızlı bir şekilde tanımlanmaları ve yönetilmeleri esastır. Diş hastalıkları kontrol edilebilir olsa da, maliyetli tedavilere karşı önleyici stratejiler oluşturmak için hızlı ve hassas risk tespiti büyük önem taşır. Bu bağlamda, araştırmacılar diş çürüğü gibi ağız hastalıkları için erken uyarı göstergelerini belirlemek amacıyla çürük olasılığı tahmin teknikleri geliştirmiştir. Bu yöntemler, potansiyel olarak tıbbi tedaviyi iyileştirebilecek önleyici müdahalelerin geliştirilmesine yol açabilir (Kotha, 2024).

Adli Diş Hekimliği Alanında Yapay Zekâ

YZ, adli tıp alanında giderek daha fazla önem kazanan yenilikçi bir teknolojidir. Özellikle diş hekimliği uygulamalarında, bireylerin biyolojik yaşının ve cinsiyetinin belirlenmesinde başarılı sonuçlar vermektedir. Bunun yanı sıra, YZ'nin diş izlerinin analizinde ve mandibular anatomik yapının tahmininde de potansiyel katkılar sağladığı bildirilmektedir (Smitha, 2021).

Mohammad ve ark., adli odontolojide YZ'nin olası uygulamalarını dört kategori altında toplamıştır: insan ısırık izlerinin

analizi, cinsiyet ve yaş tahmini, ve dental karşılaştırmalar. Bu güçlü araç, yeterli veri setleri ve uygun algoritmik mimarilerle adli vakaların çözümüne yardımcı olabilir (Mohammad ve ark., 2022).

Diş hekimliği pratiğinde kullanılan donanımlar da teknolojik ilerlemelerden etkilenmiştir. Geleneksel olarak mekanik kompresörlü, hidrostatik basınçla çalışan ünitlerin yerini, çok sayıda sensörle donatılmış elektronik sistemler almıştır. Günümüzde bu dönüşüm, sesle komut verilen ünitler ile yeni bir boyut kazanmıştır. Ses kontrollü sistemler, hekimin manuel müdahalesine duyulan ihtiyacı ortadan kaldırarak klinik süreçleri hızlandırmakta ve kolaylaştırmaktadır (Baliga, 2019). Yakın gelecekte bu koltukların, hastaların vital bulgularını, anksiyete düzeylerini, vücut ağırlıklarını ve işlem sürelerini otomatik olarak takip edebileceği öngörülmektedir. Ayrıca, olası farklılıkları saptayarak klinisyenleri uyarması, diş hekimliği uygulamalarının güvenliğini ve etkinliğini artıracaktır.

YZ'nin diş hekimliğindeki en yenilikçi kullanım alanlarından biri ise biyobaskı teknolojileridir. “Biyobaskılama”, canlı hücrelerin ve organ benzeri yapıların katmanlar halinde üretilmesini sağlayan ileri bir tekniktir. Bu yöntem, gelecekte patofizyolojik veya travmatik nedenlerle hasar görmüş sert ve yumuşak dokuların yeniden oluşturulmasında önemli bir rol üstlenebilecek potansiyele sahiptir.

Yapay Zekâ ile İlgili Limitasyonlar

Diş hekimliğinde YZ sistemlerinin kullanımı yaygınlaştıkça, bu teknolojilerin karar alma süreçlerindeki rolü artmaktadır. Ancak, klinisyenlerin YZ tabanlı sistemlere aşırı güvenmesi, etik ve hukuki sorumluluklar açısından tartışmalara yol açmaktadır. Bu nedenle, YZ destekli teşhislerin yalnızca bir yardımcı araç olduğu ve nihai kararın mutlaka uzman hekimler tarafından verilmesi gerektiği vurgulanmalıdır (Jayalekshmy ve ark., 2020).

Güvenilirlik ve Veri Sorunları

Bir YZ algoritmasının farklı klinik senaryolar ve hasta profillerinde güvenilir olabilmesi için geniş ve çeşitlendirilmiş veri setleriyle eğitilmesi kritik öneme sahiptir. Özellikle derin öğrenme algoritmalarının yüksek doğrulukla çalışabilmesi için radyolojik veri setlerinin en az 1000 görüntüden oluşması gerekmektedir (Cho ve ark., 2015). Mevcut çalışmaların çoğunda verilerin sınırlı büyüklükte olması ve hasta bilgilerinin gizliliği nedeniyle veri paylaşımındaki zorluklar, YZ modellerinin genelleştirilebilirliğini kısıtlayan temel faktörlerdir (Gianfrancesco ve ark., 2018).

Ayrıca, klinik karar verme süreci sadece radyografik görüntülere değil, aynı zamanda anamnez, fiziksel muayene ve diğer tanı yöntemlerine de dayanmalıdır. Bu durum, mevcut YZ uygulamalarının klinik teşhiste tek başına yeterli olamayacağını göstermektedir. Görüntü işleme süreçlerinde veri hacmini azaltmak için uygulanan kırpma ve düşük çözünürlükte analiz gibi işlemler, teşhis doğruluğunu olumsuz etkileyerek model performansını düşürebilir (Özkesici & Yılmaz, 2021).

Gelecek Perspektifi

Diş hekimliği pratiğinde kullanılan donanımlar da teknolojik ilerlemelerden etkilenmiştir. Geleneksel olarak mekanik kompresörlü, hidrostatik basınçla çalışan ünitlerin yerini, çok sayıda sensörle donatılmış elektronik sistemler almıştır. Günümüzde bu dönüşüm, sesle komut verilen ünitler ile yeni bir boyut kazanmıştır. Ses kontrollü sistemler, hekimin manuel müdahalesine duyulan ihtiyacı ortadan kaldırarak klinik süreçleri hızlandırmakta ve kolaylaştırmaktadır (Baliga, 2019). Yakın gelecekte bu koltukların, hastaların vital bulgularını, anksiyete düzeylerini, vücut ağırlıklarını ve işlem sürelerini otomatik olarak takip edebileceği öngörülmektedir. Ayrıca, olası farklılıkları saptayarak klinisyenleri

uyarması, diş hekimliği uygulamalarının güvenliğini ve etkinliğini artıracaktır.

YZ'nin diş hekimliğindeki en yenilikçi kullanım alanlarından biri ise biyobaskı teknolojileridir. “Biyobaskılama”, canlı hücrelerin ve organ benzeri yapıların katmanlar halinde üretilmesini sağlayan ileri bir tekniktir. Bu yöntem, gelecekte patofizyolojik veya travmatik nedenlerle hasar görmüş sert ve yumuşak dokuların yeniden oluşturulmasında önemli bir rol üstlenebilecek potansiyele sahiptir.

Sonuç

Yapay zekâ, diş hekimliği alanında hızla büyüyen ve gelecek vadeden bir teknoloji olarak öne çıkmaktadır. YZ, diş hekimlerinin iş yükünü azaltma potansiyeli taşıırken, teşhis, karar verme, tedavi planlaması ve hastalık prognozu gibi kritik süreçlerde hassasiyeti artırmaktadır. Temelde, olağanüstü hızlı ve etkili bir şekilde performans göstermek üzere programlanabilen bir araçtır. Bu teknolojinin başarılı bir şekilde entegrasyonu, güvenli ve kontrollü bir süreci zorunlu kılmakta; bu da sürekli eğitim ve diş hekimliği alanında adaptasyon gerektirmektedir.

Farklı diş hekimliği disiplinlerinde YZ sistemleri geliştirildikçe, bu teknolojilerin sağlık sistemindeki geleceği umut verici hale gelmektedir. YZ, diş hekimlerine önemli bir destek sunarak, klinik uygulamaları güçlendirmektedir. Ancak, YZ'nin diş hekimliği pratiğinde daha geniş çaplı benimsenmesi için kapsamlı araştırmalara hala ihtiyaç vardır. Bu araştırmalar, YZ modellerinin güvenilirliğini ve farklı hasta gruplarına uygulanabilirliğini değerlendirmek açısından büyük önem taşımaktadır. Literatürdeki çalışmalar YZ'nin diş hekimliğinin hemen her alanında tanı, tedavi ve planlama süreçlerinde etkin olduğunu göstermektedir. Ancak, etik ve hukuki düzenlemelerle desteklenmeden bu teknolojilerin yaygın kullanımının riskler barındırabileceği de açıktır.

Kaynakça

AbuSalim, S., Zakaria, N., Islam, M. R., Kumar, G., Mokhtar, N., & Abdulkadir, S. J. (2022). *Analysis of deep learning techniques for dental informatics: a systematic literature review*. Paper presented at the Healthcare.

Akbulut, N. H. (2024). Sinir Sistemi Histolojisi. *Sağlık & Bilim 2024: Histoloji ve Embriyoloji-I*, 51.

Al-Jallad, N., Ly-Mapes, O., Hao, P., Ruan, J., Ramesh, A., Luo, J., . . . Ren, J. (2022). Artificial intelligence-powered smartphone application, AICaries, improves at-home dental caries screening in children: Moderated and unmoderated usability test. *PLOS digital health*, 1(6), e0000046.

Al-Sarem, M., Al-Asali, M., Alqutaibi, A. Y., & Saeed, F. (2022). Enhanced tooth region detection using pretrained deep learning models. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(22), 15414.

Alharbi, M. T., & Almutiq, M. M. (2022). Prediction of dental implants using machine learning algorithms. *Journal of Healthcare Engineering*, 2022(1), 7307675.

Alowais, S., Alghamdi, S., Alsuhbany, N., Alqahtani, T., Alshaya, A., Almohareb, S., . . . Albekairy, A. (2023). Revolutionizing healthcare: the role of artificial intelligence in clinical practice. *BMC Medical Education*, 23. doi:10.1186/s12909-023-04698-z

Alsomali, M., Alghamdi, S., Alotaibi, S., Alfadda, S., Altwaijry, N., Alturaiki, I., & Al-Ekrish, A. (2022). Development of a deep learning model for automatic localization of radiographic markers of proposed dental implant site locations. *Saudi Dent J*, 34(3), 220-225. doi:10.1016/j.sdentj.2022.01.002

Aminoshariae, A., Kulild, J., & Nagendrababu, V. (2021). Artificial intelligence in endodontics: current applications and future directions. *Journal of endodontics*, 47(9), 1352-1357.

Ari, T., Sağlam, H., Öksüzoğlu, H., Kazan, O., Bayrakdar, İ., Duman, S. B., . . . Orhan, K. (2022). Automatic Feature Segmentation in Dental Periapical Radiographs. *Diagnostics (Basel)*, 12(12). doi:10.3390/diagnostics12123081

Assaf, M. H., Kumar, R., Sharma, K., & Sharma, B. (2023). Optimized tongue driven system using artificial intelligence. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering: Imaging & Visualization*, 11(3), 696-710.

Atalay, M., & Çelik, E. (2017). Büyük veri analizinde yapay zekâ ve makine öğrenmesi uygulamaları-artificial intelligence and machine learning applications in big data analysis. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 9(22), 155-172.

Bahrammirzaee, A. (2010). A comparative survey of artificial intelligence applications in finance: artificial neural networks, expert system and hybrid intelligent systems. *Neural Computing and Applications*, 19(8), 1165-1195.

Baliga, S. M. (2019). Artificial intelligence-The next frontier in pediatric dentistry. In (Vol. 37, pp. 315): Medknow.

Baydar, O., Różyło-Kalinowska, I., Futyma-Gąbka, K., & Sağlam, H. (2023). The U-Net Approaches to Evaluation of Dental Bite-Wing Radiographs: An Artificial Intelligence Study. *Diagnostics (Basel)*, 13(3). doi:10.3390/diagnostics13030453

Bernauer, S. A., Zitzmann, N. U., & Joda, T. (2021). The use and performance of artificial intelligence in prosthodontics: a systematic review. *Sensors*, 21(19), 6628.

Bianchi, J., Ruellas, A., Prieto, J. C., Li, T., Soroushmehr, R., Najarian, K., . . . Cevdanes, L. (2021). Decision Support Systems in Temporomandibular Joint Osteoarthritis: A review of Data Science and Artificial Intelligence Applications. *Semin Orthod*, 27(2), 78-86. doi:10.1053/j.sodo.2021.05.004

Binhuraib, H., Aloqayli, S., Alkhalifah, S., Aljohani, A., Alotaibi, R., Almalki, R., . . . Alzahrani, A. (2024). Digital Shade Matching Techniques in Fixed Prosthodontics. *JOURNAL OF HEALTHCARE SCIENCES*, 04. doi:10.52533/JOHS.2024.40104

Bombard, Y., Baker, G. R., Orlando, E., Fancott, C., Bhatia, P., Casalino, S., . . . Pomey, M. P. (2018). Engaging patients to improve quality of care: a systematic review. *Implement Sci*, 13(1), 98. doi:10.1186/s13012-018-0784-z

Bornes, R. S., Montero, J., Correia, A. R. M., & das Neves Rosa, N. R. (2023). Use of bioinformatic strategies as a predictive tool in implant-supported oral rehabilitation: A scoping review. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, 129(2), 322. e321-322. e328.

Bozdemir, M., & Mendi, F. (2005). Yapay Zeka Destekli Sistematik Tasarım İçin Bilgi Yönetim Sistem Mimarisi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 20(2).

Campbell, M., Hoane Jr, A. J., & Hsu, F.-h. (2002). Deep blue. *Artificial intelligence*, 134(1-2), 57-83.

Carrillo-Perez, F., Pecho, O., Morales, J., Paravina, R., Della Bona, A., Ghinea, R., . . . Pérez, M. LJ Herrera Applications of artificial intelligence in dentistry: A comprehensive review., 2022, 34. DOI: <https://doi.org/10.1111/jerd.12844>, 259-280.

Chao, X., Kou, G., Li, T., & Peng, Y. (2018). Jie Ke versus AlphaGo: A ranking approach using decision making method for large-scale data with incomplete information. *European Journal of Operational Research*, 265(1), 239-247.

Chartrand, G., Cheng, P. M., Vorontsov, E., Drozdal, M., Turcotte, S., Pal, C. J., . . . Tang, A. (2017). Deep learning: a primer for radiologists. *Radiographics*, 37(7), 2113-2131.

Chen, S.-L., Chen, T.-Y., Mao, Y.-C., Lin, S.-Y., Huang, Y.-Y., Chen, C.-A., . . . Abu, P. A. R. (2023). Detection of various dental conditions on dental panoramic radiography using Faster R-CNN. *IEEE Access*, 11, 127388-127401.

Cho, J., Lee, K., Shin, E., Choy, G., & Do, S. (2015). How much data is needed to train a medical image deep learning system to achieve necessary high accuracy? *arXiv preprint arXiv:1511.06348*.

Choi, H. R., Siadari, T. S., Kim, J. E., Huh, K. H., Yi, W. J., Lee, S. S., & Heo, M. S. (2022). Automatic detection of teeth and dental treatment patterns on dental panoramic radiographs using deep neural networks. *Forensic Sci Res*, 7(3), 456-466. doi:10.1080/20961790.2022.2034714

Chung, E. J., Yang, B. E., Park, I. Y., Yi, S., On, S. W., Kim, Y. H., . . . Byun, S. H. (2022). Effectiveness of cone-beam computed tomography-generated cephalograms using artificial intelligence cephalometric analysis. *Sci Rep*, 12(1), 20585. doi:10.1038/s41598-022-25215-0

Dalbah, L. (2021). Digitization in dentistry.

Danks, R. P., Bano, S., Orishko, A., Tan, H. J., Moreno Sancho, F., D'Aiuto, F., & Stoyanov, D. (2021). Automating Periodontal bone loss measurement via dental landmark localisation. *Int J Comput Assist Radiol Surg*, 16(7), 1189-1199. doi:10.1007/s11548-021-02431-z

de Dumast, P., Mirabel, C., Cevidanes, L., Ruellas, A., Yatabe, M., Ioshida, M., . . . Prieto, J. C. (2018). A web-based system for neural network based classification in temporomandibular joint

osteoarthritis. *Comput Med Imaging Graph*, 67, 45-54. doi:10.1016/j.compmedimag.2018.04.009

Dhopte, A., & Bagde, H. (2023). Smart Smile: Revolutionizing Dentistry With Artificial Intelligence. *Cureus*, 15. doi:10.7759/cureus.41227

Efe, M. Ö., & Kaynak, O. (2004). *Yapay sinir ağları ve uygulamaları*: Boğaziçi Üniversitesi.

Ergezer, H., Dikmen, M., & Özdemir, E. (2003). Yapay sinir ağları ve tanıma sistemleri. *PiVOLKA*, 2 (6), 14–17. In.

Farook, T. H., Ahmed, S., Jamayet, N. B., Rashid, F., Barman, A., Sidhu, P., . . . Dudley, J. (2023). Computer-aided design and 3-dimensional artificial/convolutional neural network for digital partial dental crown synthesis and validation. *Scientific reports*, 13(1), 1561.

Fontenele, R. C., do Nascimento Gerhardt, M., Pinto, J. C., Van Gerven, A., Willems, H., Jacobs, R., & Freitas, D. Q. (2022). Influence of dental fillings and tooth type on the performance of a novel artificial intelligence-driven tool for automatic tooth segmentation on CBCT images—A validation study. *Journal of dentistry*, 119, 104069.

Fukuda, M., Inamoto, K., Shibata, N., Arijji, Y., Yanashita, Y., Kutsuna, S., . . . Arijji, E. (2020). Evaluation of an artificial intelligence system for detecting vertical root fracture on panoramic radiography. *Oral Radiol*, 36(4), 337-343. doi:10.1007/s11282-019-00409-x

Gao, X., Xin, X., Li, Z., & Zhang, W. (2021). Predicting postoperative pain following root canal treatment by using artificial neural network evaluation. *Scientific reports*, 11(1), 17243.

Gianfrancesco, M. A., Tamang, S., Yazdany, J., & Schmajuk, G. (2018). Potential biases in machine learning algorithms using electronic health record data. *JAMA internal medicine*, 178(11), 1544-1547.

Hao, X., Zhang, G., & Ma, S. (2016). Deep learning. *International Journal of Semantic Computing*, 10(03), 417-439.

Hendler, J. (2008). Avoiding another AI winter. *IEEE Intelligent Systems*, 23(02), 2-4.

Heo, M.-S., Kim, J.-E., Hwang, J.-J., Han, S.-S., Kim, J.-S., Yi, W.-J., & Park, I.-W. (2021). Artificial intelligence in oral and maxillofacial radiology: what is currently possible? *Dentomaxillofacial Radiology*, 50(3), 20200375.

Hong, M., Kim, I., Cho, J.-H., Kang, K.-H., Kim, M., Kim, S.-J., . . . Lim, S.-H. (2022). Accuracy of artificial intelligence-assisted landmark identification in serial lateral cephalograms of Class III patients who underwent orthodontic treatment and two-jaw orthognathic surgery. *Korean Journal of Orthodontics*, 52(4), 287-297.

Hung, K. F., Ai, Q. Y. H., Wong, L. M., Yeung, A. W. K., Li, D. T. S., & Leung, Y. Y. (2022). Current Applications of Deep Learning and Radiomics on CT and CBCT for Maxillofacial Diseases. *Diagnostics (Basel)*, 13(1). doi:10.3390/diagnostics13010110

Hwang, H. W., Moon, J. H., Kim, M. G., Donatelli, R. E., & Lee, S. J. (2021). Evaluation of automated cephalometric analysis based on the latest deep learning method. *Angle Orthod*, 91(3), 329-335. doi:10.2319/021220-100.1

Hwang, H. W., Park, J. H., Moon, J. H., Yu, Y., Kim, H., Her, S. B., . . . Lee, S. J. (2020). Automated identification of

cephalometric landmarks: Part 2-Might it be better than human? *Angle Orthod*, 90(1), 69-76. doi:10.2319/022019-129.1

Jayalekshmy, R., Unnithan, J. J., Kumar, A. M., & Majid, S. A. (2020). Artificial intelligence-finding new frontiers in oral and maxillofacial radiology. *Journal of Dental and Orofacial Research*, 16(1), 32-38.

Jeong, S. H., Yun, J. P., Yeom, H.-G., Lim, H. J., Lee, J., & Kim, B. C. (2020). Deep learning based discrimination of soft tissue profiles requiring orthognathic surgery by facial photographs. *Scientific reports*, 10(1), 16235.

Jeong, S. H., Yun, J. P., Yeom, H. G., Lim, H. J., Lee, J., & Kim, B. C. (2020). Deep learning based discrimination of soft tissue profiles requiring orthognathic surgery by facial photographs. *Sci Rep*, 10(1), 16235. doi:10.1038/s41598-020-73287-7

Jha, N., Lee, K. S., & Kim, Y. J. (2022). Diagnosis of temporomandibular disorders using artificial intelligence technologies: A systematic review and meta-analysis. *PloS one*, 17(8), e0272715. doi:10.1371/journal.pone.0272715

Jia-Mahasap, W., Rungsiyakull, C., Bumrungsiri, W., Sirisereephap, N., & Rungsiyakull, P. (2022). Effect of number and location on stress distribution of mini dental implant-assisted mandibular Kennedy Class I removable partial denture: three-dimensional finite element analysis. *International journal of dentistry*, 2022(1), 4825177.

Kabir, T., Lee, C. T., Chen, L., Jiang, X., & Shams, S. (2022). A comprehensive artificial intelligence framework for dental diagnosis and charting. *BMC oral health*, 22(1), 480. doi:10.1186/s12903-022-02514-6

Karobari, M. I., Adil, A. H., Basheer, S. N., Murugesan, S., Savadamoorthi, K. S., Mustafa, M., . . . Almokhatieb, A. A. (2023).

Evaluation of the diagnostic and prognostic accuracy of artificial intelligence in endodontic dentistry: a comprehensive review of literature. *Computational and Mathematical Methods in Medicine*, 2023(1), 7049360.

Kaynar, O., Görmez, Y., Yıldız, M., & Albayrak, A. (2016). *Makine öğrenmesi yöntemleri ile Duygu Analizi*. Paper presented at the International Artificial Intelligence and Data Processing Symposium (IDAP'16).

Ker, J., Wang, L., Rao, J., & Lim, T. (2018). Deep Learning Applications in Medical Image Analysis. *IEEE Access*, 6, 9375-9389. doi:10.1109/ACCESS.2017.2788044

Khalifa, M., & Albadawy, M. (2024). Artificial Intelligence for Clinical Prediction: Exploring Key Domains and Essential Functions. *Computer Methods and Programs in Biomedicine Update*. doi:10.1016/j.cmpbup.2024.100148

Khanagar, S. B., Al-Ehaideb, A., Maganur, P. C., Vishwanathaiah, S., Patil, S., Baeshen, H. A., . . . Bhandi, S. (2021). Developments, application, and performance of artificial intelligence in dentistry—A systematic review. *Journal of Dental Sciences*, 16(1), 508-522.

Khanagar, S. B., Al-Ehaideb, A., Vishwanathaiah, S., Maganur, P. C., Patil, S., Naik, S., . . . Sarode, S. S. (2021). Scope and performance of artificial intelligence technology in orthodontic diagnosis, treatment planning, and clinical decision-making—a systematic review. *Journal of Dental Sciences*, 16(1), 482-492.

Kim, M., Yun, J., Cho, Y., Shin, K., Jang, R., Bae, H.-j., & Kim, N. (2019). Deep learning in medical imaging. *Neurospine*, 16(4), 657.

Kotha, S. B. (2024). Deep learning concept for early dental caries detection. *Journal of Updates in Pediatric Dentistry*, 3, 22-28.

Kök, H., Acilar, A. M., & İzgi, M. S. (2019). Usage and comparison of artificial intelligence algorithms for determination of growth and development by cervical vertebrae stages in orthodontics. *Prog Orthod*, 20(1), 41. doi:10.1186/s40510-019-0295-8

Krizhevsky, A., Sutskever, I., & Hinton, G. E. (2017). ImageNet classification with deep convolutional neural networks. *Communications of the ACM*, 60(6), 84-90.

LeCun, Y., Bengio, Y., & Hinton, G. (2015). Deep learning. *nature*, 521(7553), 436-444.

Lee, J. H., Kim, D. H., Jeong, S. N., & Choi, S. H. (2018). Diagnosis and prediction of periodontally compromised teeth using a deep learning-based convolutional neural network algorithm. *J Periodontal Implant Sci*, 48(2), 114-123. doi:10.5051/jpis.2018.48.2.114

Li, C.-W., Lin, S.-Y., Chou, H.-S., Chen, T.-Y., Chen, Y.-A., Liu, S.-Y., . . . Chen, S.-L. (2021). Detection of dental apical lesions using CNNs on periapical radiograph. *Sensors*, 21(21), 7049.

Li, M., Jiang, Y., Zhang, Y., & Zhu, H. (2023). Medical image analysis using deep learning algorithms. *Frontiers in Public Health*, 11. doi:10.3389/fpubh.2023.1273253

Liebowitz, J. (1995). Expert systems: A short introduction. *Engineering Fracture Mechanics*, 50(5-6), 601-607.

Litjens, G., Kooi, T., Bejnordi, B. E., Setio, A. A. A., Ciompi, F., Ghafoorian, M., . . . Sánchez, C. I. (2017). A survey on deep learning in medical image analysis. *Medical image analysis*, 42, 60-88.

Mahajan, K., Kunte, S. S., Patil, K. V., Shah, P. P., Shah, R. V., & Jajoo, S. S. (2023). Artificial intelligence in pediatric dentistry-

A systematic review. *Journal of Dental Research and Reviews*, 10(1), 7-12. doi:10.4103/jdrr.jdrr_199_22

Mahmood, H., Shaban, M., Indave, B., Santos-Silva, A., Rajpoot, N., & Khurram, S. (2020). Use of artificial intelligence in diagnosis of head and neck precancerous and cancerous lesions: A systematic review. *Oral Oncology*, 110, 104885.

Mathew, T. V. (2012). Genetic algorithm. *Report submitted at IIT Bombay*, 53, 18-19.

McCarthy, J., Minsky, M. L., Rochester, N., & Shannon, C. E. (2006). A proposal for the dartmouth summer research project on artificial intelligence, august 31, 1955. *AI magazine*, 27(4), 12-12.

McDermott, J. P. (1980). *RI: an Expert in the Computer Systems Domain*. Paper presented at the AAAI.

Mohammad, N., Ahmad, R., Kurniawan, A., & Mohd Yusof, M. Y. P. (2022). Applications of contemporary artificial intelligence technology in forensic odontology as primary forensic identifier: A scoping review. *Frontiers in artificial intelligence*, 5, 1049584.

Moidu, N. P., Sharma, S., Chawla, A., Kumar, V., & Logani, A. (2022). Deep learning for categorization of endodontic lesion based on radiographic periapical index scoring system. *Clinical oral investigations*, 26(1), 651-658.

Montagnon, E., Cerny, M., Cadrin-Chênevert, A., Hamilton, V., Derennes, T., Ilinca, A., . . . Tang, A. (2020). Deep learning workflow in radiology: a primer. *Insights into imaging*, 11(1), 22.

Nakano, Y., Suzuki, N., & Kuwata, F. (2018). Predicting oral malodour based on the microbiota in saliva samples using a deep learning approach. *BMC oral health*, 18(1), 128.

Özkesici, M. Y., & Yılmaz, S. (2021). Oral ve maksillofasiyal radyoloji’de yapay zeka. *Sağlık Bilimleri Dergisi*, 30(3), 346-351.

Pandey, V., & Vaughn, L. (2021). The potential of virtual reality in social skills training for autism: Bridging the gap between research and adoption of virtual reality in occupational therapy practice. *The Open Journal of Occupational Therapy*, 9(3), 1-12.

Patil, S., Albogami, S., Hosmani, J., Mujoo, S., Kamil, M. A., Mansour, M. A., . . . Ahmed, S. (2022). Artificial Intelligence in the Diagnosis of Oral Diseases: Applications and Pitfalls. *Diagnostics (Basel)*, 12(5). doi:10.3390/diagnostics12051029

Paulose, A., Jayalakshmi, M., Thampy, A. M., Kurian, C. M., Alias, A. M., & Aluckal, E. (2022). Smartening up with artificial intelligence in dentistry: A review. *Journal of Orofacial Research*, 11(2), 28-33.

Pesapane, F., Codari, M., & Sardanelli, F. (2018). Artificial intelligence in medical imaging: threat or opportunity? Radiologists again at the forefront of innovation in medicine. *European radiology experimental*, 2(1), 35.

Poplin, R., Varadarajan, A. V., Blumer, K., Liu, Y., McConnell, M. V., Corrado, G. S., . . . Webster, D. R. (2018). Prediction of cardiovascular risk factors from retinal fundus photographs via deep learning. *Nature biomedical engineering*, 2(3), 158-164.

Qayyum, A., Tahir, A., Butt, M. A., Luke, A., Abbas, H. T., Qadir, J., . . . Abbasi, Q. H. (2023). Dental caries detection using a semi-supervised learning approach. *Sci Rep*, 13(1), 749. doi:10.1038/s41598-023-27808-9

Qiao, X., Zhang, Z., & Chen, X. (2020). Multifrequency impedance method based on neural network for root canal length measurement. *Applied Sciences*, 10(21), 7430.

Revilla-León, M., Gómez-Polo, M., Barmak, A. B., Inam, W., Kan, J. Y. K., Koïs, J. C., & Akal, O. (2023). Artificial

intelligence models for diagnosing gingivitis and periodontal disease: A systematic review. *J Prosthet Dent*, 130(6), 816-824. doi:10.1016/j.prosdent.2022.01.026

Reyes, L. T., Knorst, J. K., Ortiz, F. R., & Ardenghi, T. M. (2021). Scope and challenges of machine learning-based diagnosis and prognosis in clinical dentistry: A literature review. *Journal of clinical and translational research*, 7(4), 523.

Russakovsky, O., Deng, J., Su, H., Krause, J., Satheesh, S., Ma, S., . . . Bernstein, M. (2015). Imagenet large scale visual recognition challenge. *International journal of computer vision*, 115(3), 211-252.

Saghiri, M. A., Asgar, K., Boukani, K. K., Lotfi, M., Aghili, H., Delvarani, A., . . . Garcia-Godoy, F. (2012). A new approach for locating the minor apical foramen using an artificial neural network. *Int Endod J*, 45(3), 257-265. doi:10.1111/j.1365-2591.2011.01970.x

Saghiri, M. A., Garcia-Godoy, F., Gutmann, J. L., Lotfi, M., & Asgar, K. (2012). The reliability of artificial neural network in locating minor apical foramen: a cadaver study. *J Endod*, 38(8), 1130-1134. doi:10.1016/j.joen.2012.05.004

Santos-Junior, A. O., Fontenele, R. C., Neves, F. S., Tanomaru-Filho, M., & Jacobs, R. (2025). A novel artificial intelligence-powered tool for automated root canal segmentation in single-rooted teeth on cone-beam computed tomography. *Int Endod J*, 58(4), 658-671. doi:10.1111/iej.14200

Schulman, J., Zoph, B., Kim, C., Hilton, J., Menick, J., Weng, J., . . . Pokorny, M. (2022). Chatgpt: Optimizing language models for dialogue. *OpenAI blog*, 2(4). Retrieved from <https://openai.com/blog/chatgpt/>

Schwendicke, F., Mertens, S., Cantu, A. G., Chaurasia, A., Meyer-Lueckel, H., & Krois, J. (2022). Cost-effectiveness of AI for

caries detection: randomized trial. *J Dent*, 119, 104080. doi:10.1016/j.jdent.2022.104080

Schwendicke, F. a., Samek, W., & Krois, J. (2020). Artificial intelligence in dentistry: chances and challenges. *Journal of dental research*, 99(7), 769-774.

Secinaro, S., Calandra, D., Secinaro, A., Muthurangu, V., & Biancone, P. (2021). The role of artificial intelligence in healthcare: a structured literature review. *BMC Medical Informatics and Decision Making*, 21. doi:10.1186/s12911-021-01488-9

Seo, H., Hwang, J., Jeong, T., & Shin, J. (2021). Comparison of Deep Learning Models for Cervical Vertebral Maturation Stage Classification on Lateral Cephalometric Radiographs. *J Clin Med*, 10(16). doi:10.3390/jcm10163591

Shah, H., Hernandez, P., Budin, F., Chittajallu, D., Vimort, J. B., Walters, R., . . . Paniagua, B. (2018). Automatic quantification framework to detect cracks in teeth. *Proc SPIE Int Soc Opt Eng*, 10578. doi:10.1117/12.2293603

Shahnavazi, M., & Mohamadrhimi, H. (2023). The application of artificial neural networks in the detection of mandibular fractures using panoramic radiography. *Dent Res J (Isfahan)*, 20, 27. doi:10.4103/1735-3327.369629

Smitha, T. (2021). Artificial intelligence in forensic odontology. *Journal of Forensic Dental Sciences*, 13(1), 1-2.

Soffer, S., Ben-Cohen, A., Shimon, O., Amitai, M. M., Greenspan, H., & Klang, E. (2019). Convolutional neural networks for radiologic images: a radiologist's guide. *Radiology*, 290(3), 590-606.

Song, Y. B., Jeong, H. G., Kim, C., Kim, D., Kim, J., Kim, H. J., & Park, W. (2022). Comparison of detection performance of

soft tissue calcifications using artificial intelligence in panoramic radiography. *Sci Rep*, 12(1), 19115. doi:10.1038/s41598-022-22595-1

Stevenson, A. (2010). *Oxford dictionary of English*: Oxford University Press.

Tandon, D., Rajawat, J., & Banerjee, M. (2020). Present and future of artificial intelligence in dentistry. *Journal of oral biology and craniofacial research*, 10(4), 391-396.

Tanikawa, C., & Yamashiro, T. (2021). Development of novel artificial intelligence systems to predict facial morphology after orthognathic surgery and orthodontic treatment in Japanese patients. *Sci Rep*, 11(1), 15853. doi:10.1038/s41598-021-95002-w

Tao, Z., Zhao, T., Ngan, P., Qin, D., Hua, F., & He, H. (2023). The use of dental patient-reported outcomes among randomized controlled trials in orthodontics: a methodological study. *Journal of Evidence-Based Dental Practice*, 23(1), 101795.

Thurzo, A., Urbanova, W., Novak, B., Czako, L., Siebert, T., Stano, P., . . . Varga, I. (2022). *Where is the artificial intelligence applied in dentistry? Systematic review and literature analysis*. Paper presented at the Healthcare.

Tonetti, M., Greenwell, H., & Kornman, K. (2018). Staging and grading of periodontitis: framework and proposal of a new classification and case definition. 89: 159–172. In.

Tumbelaka, B. Y., Oscandar, F., Baihaki, F. N., Sitam, S., & Rukmo, M. (2014). Identification of pulpitis at dental X-ray periapical radiography based on edge detection, texture description and artificial neural networks. *Saudi Endodontic Journal*, 4(3), 115-121.

Turing, A. M. (2007). Computing machinery and intelligence. In *Parsing the Turing test: Philosophical and methodological issues in the quest for the thinking computer* (pp. 23-65): Springer.

Vişan, A., & Neğu, I. (2024). Integrating Artificial Intelligence for Drug Discovery in the Context of Revolutionizing Drug Delivery. *Life*, 14. doi:10.3390/life14020233

Vishwanathaiah, S., Fageeh, H. N., Khanagar, S. B., & Maganur, P. C. (2023). Artificial intelligence its uses and application in pediatric dentistry: a review. *Biomedicines*, 11(3), 788.

Wang, S.-C. (2003). Artificial Neural Network. In (pp. 81-100).

Warwick, K. (2013). *Artificial intelligence: the basics*: Routledge.

Weizenbaum, J. (1966). ELIZA—a computer program for the study of natural language communication between man and machine. *Communications of the ACM*, 9(1), 36-45.

Wikström, A., Brundin, M., Romani Vestman, N., Rakhimova, O., & Tsilingaridis, G. (2022). Endodontic pulp revitalization in traumatized necrotic immature permanent incisors: Early failures and long-term outcomes—A longitudinal cohort study. *International endodontic journal*, 55(6), 630-645.

Xu, L., Chen, J., Qiu, K., Yang, F., & Wu, W. (2023). Artificial intelligence for detecting temporomandibular joint osteoarthritis using radiographic image data: A systematic review and meta-analysis of diagnostic test accuracy. *PloS one*, 18(7), e0288631. doi:10.1371/journal.pone.0288631

Yılmaz, d. Ö. Ü. A. (2021). *Yapay zekâ: kodlab yayın dağıtım yazılım ltd. Şti.*

Zheng, L., Wang, H., Mei, L., Chen, Q., Zhang, Y., & Zhang, H. (2021). Artificial intelligence in digital cariology: a new tool for the diagnosis of deep caries and pulpitis using convolutional neural networks. *Ann Transl Med*, 9(9), 763. doi:10.21037/atm-21-119

KOMPOZİT REZİNLERDE POLİMERİZASYON BÜZÜLMESİ VE ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ

SEVİLAY KÖSE³
EMİNE ŞİRİN KARAARLAN⁴

Giriş

Kompozit rezinler, yapı olarak inorganik doldurucular ile güçlendirilmiş polimer sistemlerden oluşmaktadır. Polimer; köken olarak “poli” (çok) ve “mer” (birim, parça) sözcüklerinin birleşiminden gelir ve çok sayıda molekülün bağlanmasıyla oluşan büyük molekülleri ifade eder (R. L. Sakaguchi & Powers, 2012). Resin esaslı restoratif materyaller, estetik, biyouyumluluk ve adezyon özellikleri nedeniyle modern restoratif diş hekimliğinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Gorgen & Guler, 2015; Ilie & Hickel, 2011).

Restoratif materyallerdeki güncel yenilikler ve estetik performanslarındaki belirgin iyileşmelere karşın, resin esaslı kompozitlerin tamamının polimerizasyon sırasında meydana gelen

³ Arş. Gör. Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Diş Hekimliği Fakültesi, Restoratif Diş Tedavisi AD, Orcid: 0009-0001-3618-0205

⁴ Doç. Dr. Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Diş Hekimliği Fakültesi, Restoratif Diş Tedavisi AD, Orcid: 0000-0002-6298-2463

kimyasal reaksiyonların doğal bir sonucu olarak *intrinsik bir hacimsel büzülme* sergilemeleri en büyük dezavantajlarıdır (Gonçalves, Azevedo, Ferracane, & Braga, 2011). Kompozit rezinlerin kavite duvarlarına adeziv sistemler aracılığıyla bağlanmış olması, bu hacim azalmasının serbestçe gerçekleşmesine engel olmakta ve materyal içerisinde **içsel büzülme streslerinin** birikimine yol açmaktadır (A. J. Feilzer, De Gee, & Davidson, 1987). Bu stresler, kompozitin mekanik ve kimyasal stabilitesini olumsuz yönde etkileyerek **marjinal uyumun bozulmasına** ve bağlanma ara yüzünde bütünlük kaybına neden olabilmektedir. Marjinal sızıntı ise adeziv bağlantının bozulması ve kavite duvarları boyunca bakteriyel infiltrasyonun artmasıyla sonuçlanır; bunun klinik yansımaları arasında postoperatif hassasiyet, sekonder çürük gelişimi, pulpal irritasyon veya enfeksiyon, restorasyonun renk stabilitesinde bozulma ve restoratif materyalde kırılma gibi komplikasyonlar yer almaktadır (A. J. Feilzer et al., 1987; J. L. Ferracane, 2011; Zhang & Xie, 2020).

Kompozit Resinlerin Yapısı ve Polimerizasyon Büzülmesi ile İlişkisi

Kompozit resinlerin polimerizasyon davranışı ve büzülme özellikleri büyük ölçüde materyalin kimyasal kompozisyonu tarafından belirlenmektedir. Kompozit resinlerin temel yapısını; organik polimer matrisi, bu matrisi güçlendiren inorganik doldurucular, bu iki faz arasında bağlanmayı sağlayan silan bağlayıcı ajan ve polimerizasyonu başlatan başlatıcı-aktivasyon sisteminden oluşturur (Davidson, De Gee, & Feilzer, 1984). Organik matris, polimerizasyon büzülmesinin en büyük kaynağı olup çoğunlukla dimetakrilat yapısındaki monomerlerin (Bis-GMA, UDMA, TEGDMA vb.) farklı oranlarda kombinasyonundan oluşur (J. Ferracane & Greener, 1984).

Matris, başlatıcı sistemin etkisi nedeniyle bir çapraz bağlanma reaksiyonuna girer ve dimetakrilat monomer molekülünün karbon-karbon çift bağlarını ($C=C$) kırar. Daha sonra karbon-karbon tek bağlarına ($C-C$) dönüşürler ve bir polimer oluştururlar (Barszczewska-Rybarek, 2019). Bis-GMA gibi yüksek viskoziteli ve rijit monomerler, zincir hareketliliğinin sınırlı olması nedeniyle daha düşük büzülme eğilimi gösterirken; TEGDMA gibi düşük viskoziteli seyreltici monomerler polimerizasyon hızını artırmakla birlikte **daha yüksek hacimsel büzülmeye** neden olur. UDMA, Bis-GMA'ya kıyasla daha esnek yapıda olup dönüşüm derecesini artırabilse de büzülme üzerinde orta düzeyde etki göstermektedir (Gajewski, Pfeifer, Fróes-Salgado, Boaro, & Braga, 2012).

Kompozit rezinlerde inorganik doldurucu miktarı artıkça, polimerizasyon büzülmesi azalmaktadır. Küresel dolgu maddesi parçacıklarına sahip kompozit rezinlerin, düzensiz dolgu maddesi parçacıklarına sahip olanlara kıyasla daha düşük büzülme gerinim değerleri sergilediği görülmüştür (Habib, Wang, Wang, Zhu, & Zhu, 2016). Doldurucu boyutu da kritik bir parametre olup nano doldurucular daha fazla olan yüzey alanları nedeniyle dönüşüm derecesini artırabilmekte, ancak matris oranı yüksek olduğu için büzülme miktarı da artabilmektedir (Satterthwaite, Maisuria, Vogel, & Watts, 2012). Mikrohibrit ve nanohibrit sistemler ise hem mekanik dayanım hem de polimerizasyon davranışı açısından daha dengeli bir yapı sunar. Bazı çalışmalar, nano-hibrit kompozit rezinlerin daha küçük parçacıkları nedeniyle, doldurucu maddeler ile organik matris arasında geniş bir arayüz ve güçlü arayüz etkileşimleri oluşturduğu için mikro-hibrit malzemelere kıyasla daha düşük büzülme gerinim değerlerine sahip olduğunu göstermiştir (Chen, Chen, Hsu, Sun, & Su, 2006; Ilie & Hickel, 2011; Xu et al., 2020). Ayrıca doldurucuların silanizasyona tabi tutulması, polimerizasyon sırasında gelişen stresin organik matrise değil, dolduruculara aktarılmasını sağlar ve bu durum restorasyonun bütünlüğünü

koruma açısından önemlidir (J. Condon & Ferracane, 1998). Tüm bu bileşenler birlikte değerlendirildiğinde, kompozit rezinlerin polimerizasyon büzülmesinin; monomer tipi ve oranı, doldurucu miktarı ve boyutu ile matris–doldurucu etkileşimi tarafından belirlenen karmaşık bir özellik olduğu görülmektedir.

Polimerizasyon Kinetiği

Rezin esaslı kompozitlerde polimerizasyon kinetiği, materyalin sertleşme süreci boyunca gerçekleşen kimyasal ve fiziksel olayların zamanla değişimini tanımlayan temel bir kavramdır. Dental kompozitlerde polimerizasyon, aynı kimyasal yapıya sahip monomerlerin içerdiği **karbon çift bağlarının ($C=C$)** serbest radikaller aracılığıyla açılarak kovalent bağlarla birbirine bağlanması sonucu üç boyutlu bir polimer ağı oluşması şeklinde tanımlanır. Polimerde çift karbon bağ sayısı azaldıkça, polimerizasyon oranı yükselir, böylece rezin kompozitin fiziksel yapısı güçlenir (Dewaele, Truffier-Boutry, Devaux, & Leloup, 2006). Artık monomer molekülleri, van der Waals kuvveti ile zayıf bir şekilde bağlıdır. Reaksiyona girmeyen çift bağlar ve artık monomerler, materyal içinde zayıf şekilde tutunur ve bu durum mikrosızıntı, sekonder çürük, renklenme ile bağlanma arayüzünde zayıflama gibi klinik sorunlara yol açabilir; ayrıca biyolojik dokular açısından potansiyel toksisite riski taşır (Leprince, Palin, Hadis, Devaux, & Leloup, 2013).

Polimerizasyon sonrasında, monomerler arası mesafe kıaldıkça polimerde kovalent bağlar güçlü bir şekilde oluşur ve bu durum polimerizasyon büzülmesine yol açar. Bu büzülme, pre-gel ve post-gel olmak üzere iki aşamada gerçekleşir: pre-gel fazda materyal hâlen akışkan olduğu için büzülme (ağ oluşumu öncesi büzülme) kısmen telafi edilebilirken, jelleşme noktasından sonra akışkanlık kaybolur ve büzülme (katılaşma büzülmesi) doğrudan **büzülme stresine** dönüşür (Daronch, Rueggeberg, & De Goes, 2005).

Polimerizasyonun nicel göstergesi olan **dönüşüm derecesi (DC)**, monomerlerin polimer zincirlerine dâhil olma yüzdesini gösteren bir parametredir. Dimetakrilat bazlı kompozitlerde DC genellikle %55–75 arasındadır. Daha yüksek dönüşüm derecesi artık monomer miktarının azalması ve kompozitin klinik performansının artması demektir (Al-Ahdal, Ilie, Silikas, & Watts, 2015; Braga & Ferracane, 2002).

Polimerizasyon kinetiği; monomer viskozitesi, doldurucu miktarı ve partikül boyutu gibi materyal bileşenleri tarafından da etkilenir. Yüksek viskoziteli monomerler daha erken jelleşmeye neden olurken, düşük viskoziteli sistemler daha uzun bir pre-gel dönemi sağlar. Modern kompozit tasarımları, jelleşme sonrası oluşan büzülme stresini azaltmak amacıyla yüksek molekül ağırlıklı veya reaktif olmayan monomer modifikasyonlarını kullanmaktadır (Topa-Skwarczyńska & Ortyl, 2023).

Polimerizasyonu etkileyen faktörler

Teknolojik gelişmelere rağmen kompozit rezinlerin en önemli dezavantajı hâlâ polimerizasyon büzülmesidir. Bu büzülme tek bir faktöre bağlı olmayıp, genel olarak dört ana başlık altında değerlendirilmektedir.

1- Kompozit rezinler ile ilgili Faktörler

Organik matriks

Kompozit rezinlerde polimerizasyon büzülmesini esas belirleyen faz organik matrikstir. Matrikste yer alan monomerlerin molekül ağırlığı, viskozitesi ve içerdiği metakrilat uç sayısı, birim hacimdeki çift bağ yoğunluğunu ve dolayısıyla hem büzülmenin miktarını hem de hızını belirler (Gonçalves et al., 2011)

Düşük viskoziteli, düşük molekül ağırlıklı seyreltici monomerler (örneğin TEGDMA), birim hacimde daha fazla çift bağ

içerdiğinden, yüksek dönüşüm derecesi ile birlikte daha fazla hacimsel büzülmeye yol açar. Buna karşın yüksek molekül ağırlıklı dimetakrilatların veya AUDMA, DX-511 gibi monomerlerin kullanılması, birim hacimdeki reaktif grup yoğunluğunu azaltarak nihai büzülmenin düşürülmesine katkı sağlar (Al Sunbul, Silikas, & Watts, 2016; Charton, Falk, Marchal, Pla, & Colon, 2007; D. Watts & Alnazzawi, 2014). Bis-GMA ise yüksek molekül ağırlıklı ve viskoz bir monomer olduğu için teorik olarak daha düşük büzülme potansiyeline sahip olsa da, pratikte mutlaka TEGDMA gibi seyreltici monomerler ile kombine edilir; bu karışımda artan hareketlilik ve dönüşüm derecesi nedeniyle sistemin toplam polimerizasyon büzülmesi ve büzülme stresi yükselir. Bu nedenle güncel kompozit rezin tasarımlarında, yalnızca doldurucu oranı değil, Bis-GMA/TEGDMA/UDMA gibi matriks bileşenlerinin türü ve oranı, polimerizasyon büzülmesinin kontrolünde kritik bir rol oynamaktadır (Chung, Kim, Kim, Kim, & Kim, 2002).

Kompozit Rezinin Rengi

Kompozit rezinlerin öne çıkan üstünlüklerinden biri, yüksek estetik beklentileri karşılayabilmeleridir. Doğal diş dokularıyla uyumlu bir görünüm sağlamak ve restorasyonun kamuflajını güçlendirmek amacıyla, farklı **transluseri ve opasite derecelerine** sahip çok sayıda kompozit rengi üretilmiştir. Daha koyu renkteki kompozitler söz konusu olduğunda, bazı üreticiler **ışıkla polimerizasyon süresinin uzatılmasını** önermektedir. Bu önerinin temeli, materyalin rengine bağlı olarak **monomer dönüşüm oranının değişebileceğini** ortaya koyan çeşitli çalışmalara dayanmaktadır. Daha koyu ya da opak kompozit rezinlerin, gelen ışığın daha büyük bir kısmını absorbe ettiği gösterilmiştir. Bunun sonucunda, alt tabakalarda yer alan kompozit materyalin ışıkla polimerizasyon verimi de azalmaktadır (J. Ferracane, Aday, Matsumoto, & Marker, 1986; Guirardo et al., 2009).

Doldurucu Tipi, Miktarı Ve Diğer Yapılar

Kompozit rezin materyallerde ışığın tabakalar boyunca ilerleyebilmesi; kullanılan monomer yapısı, doldurucu partiküllerin tipi ve oranı ile doldurucu faz ve polimer matriksin kırılma indisleri gibi pek çok parametreye bağlıdır. Polimerizasyon amacıyla uygulanan ışığın şiddeti restorasyonun yüzeyinde en yüksek düzeydedir; materyalin derinlerine ilerledikçe, ışığın saçılması ve yansımaları nedeniyle yoğunluk giderek azalır. Özellikle doldurucu partikül boyutu küçüldükçe, bu partiküller başlatıcı sistemin dalga boyu aralığına daha fazla karşılık geldiğinden, ışık saçılması artma eğilimindedir. Doldurucu taneciklerinin çapı, kütleme ışığının dalga boyunun yaklaşık yarısına yaklaştığında ise saçılma daha belirgin hale gelir ve derin tabakalardaki polimerizasyon etkinliği olumsuz etkilenebilir. (Campbell, Johnston, & O'brien, 1986; Prati, Chersoni, Montebugnoli, & Montanari, 1999).

Mikrofil kompozitlerde, doldurucu partiküllerinin çok küçük ve genellikle yoğun olmayan şekilde dağılmış olması, yüzeyde üstün bir cilalanabilirlik ve parlaklık sağlarken, ışığın matriks içinde daha farklı bir yolla kırılmasına ve yayılmasına neden olabilir. Buna karşılık nanofil kompozitlerde hem nanometre düzeyinde partiküller hem de bunların kümelenmiş yapıları bulunur; bu yapı, materyale hem daha iyi mekanik özellikler kazandırmakta hem de ışığın saçılma ve absorpsiyon davranışını değiştirerek estetik özelliklerin ve derinlik boyunca polimerizasyon dengesinin farklılaşmasına yol açmaktadır (Braga & Ferracane, 2002; J. R. Condon & Ferracane, 2002).

Kompozit Resinin Kalınlığı

Kompozit rezin restorasyonlarda tabaka kalınlığı arttıkça, polimerizasyonu sağlayan ışığın derin bölgelere ulaşma etkinliği belirgin biçimde azalır. Özellikle 2 mm'den daha kalın kompozit

tabakalarında, monomerlerin polimere dönüşüm oranında anlamlı bir düşüş olduğu gösterilmiştir. Rueggeberg ve ark., yaptıkları çalışmada, yeterli düzeyde polimerize olmuş bir kompozit rezin restorasyonu elde edebilmek için, 2 mm kalınlığındaki bir tabakanın en az 400 mW/cm² ışık şiddetiyle 60 saniye süreyle kürlenmesi gerektiği sonucuna varmışlardır (F. A. Rueggeberg et al., 1994). Benzer şekilde Flury ve ark. da farklı kompozit kalınlıklarının Vickers mikrosertlik değerleri üzerindeki etkisini incelemiş ve 2 mm'den daha derin bölgelerde mikrosertlikte azalma meydana geldiğini bildirmişlerdir. Bu bulgular, klinikte kompozitlerin mümkün olduğunca ince tabakalar halinde yerleştirilmesi ve her tabaka için uygun süre ve şiddette ışık uygulanmasının önemini vurgulamaktadır (Flury, Peutzfeldt, & Lussi, 2014).

Başlatıcı Tipi

Kompozit rezin materyallerin polimerizasyonunda kullanılan başlatıcı sistem, materyalin hem fiziksel hem kimyasal özelliklerini doğrudan etkileyen temel bileşenlerden biridir (Asmussen & Peutzfeldt, 1999). Foto-başlatıcı tipi, uygulanan ışığın hangi dalga boyu aralığında etkin olacağını, polimerizasyon reaksiyonunun nasıl başlayacağını ve zincir reaksiyonunun ne kadar verimli ilerleyeceğini belirler. Bu nedenle, başlatıcı sistem yalnızca kompozitin sertleşme mekanizmasını değil, aynı zamanda klinik başarısını da yakından ilgilendirmektedir (Charbeneau, 1988).

Her foto-başlatıcı maddenin kendine özgü bir absorpsiyon spektrumu vardır ve bu spektrum, hangi dalga boyundaki ışığın başlatıcıyı aktive edebileceğini ortaya koyar (Ikemura & Endo, 2010). Örneğin sık kullanılan kamforokinon mavi ışık bölgesinde; bazı alternatif başlatıcı sistemler ise daha kısa dalga boyu aralıklarında etkindir. Örneğin; α -diketon ve asilfosfin oksit gibi ışığa duyarlı başlatıcıları içeren kompozitler de vardır. Bu tip

başlatıcı kullanan kompozitler de her ışık cihazıyla tepkimeye giremeyebilir. Bu yüzden kullanıcının kompozitin kullanım talimatlarına göre ışık cihazına dikkat etmelidir Bu durum, kompozit rezin ile kullanılan ışık cihazı arasında bir uyum gerektirir. Işık kaynağının yaydığı dalga boyu, kompozitin içerdiği başlatıcı ile örtüşmediği takdirde, polimerizasyon yetersiz kalacak; materyalin derin kısımlarında dönüşüm derecesi düşecek ve restorasyonun dayanıklılığı olumsuz etkilenecektir (Mahn, 2013).

2- Işık Cihazları İle İlgili Faktörler

Işık Cihazının Tipi

Diş hekimliğinde ışıkla kürleme yapan ünitelerin gelişimi, rezin esaslı materyallerin polimerizasyonu için UV ışık kaynaklarının kullanılmaya başlandığı 1970’li yıllara dayanmaktadır (Murray, Yates, & Newman, 1981). Ancak bu ilk sistemlerde, ışığın sınırlı derinliğe nüfuz etmesi ve olası sağlık riskleri nedeniyle, daha güvenli ve etkin alternatif arayışları gündeme gelmiştir. Bu doğrultuda, daha sonra kuvars-tungsten-halojen (QTH) lambaya dayalı, görünür ışıkla kürleme yapabilen geleneksel üniteler geliştirilmiştir. QTH sistemleri, halojen, iyot veya brom gazı ile doldurulmuş kuvars bir ampul içerisinde tungsten filament bulunduran yapıdadır. Bununla birlikte, QTH cihazları görece büyük hacimli olmaları, düşük enerji verimliliği ve kullanım sırasında belirgin ısınma oluşturmaları nedeniyle bazı kısıtlılıklara sahiptir (F. Rueggeberg, 1999).

Bu sorunların ardından kompozit rezinlerin polimerizasyonu için plazma ark ve LED esaslı ışık cihazları klinik kullanıma girmiştir. Plazma ark üniteleri, kompozit rezinleri yaklaşık 3 saniye gibi çok kısa sürelerde polimerize edebilmektedir (R. Price, Ehrnfond, Andreou, & Felix, 2003). Her ışık kaynağı türü kendi içinde belirli üstünlükler ve dezavantajlar barındırmaktadır. LED

tabanlı cihazlarda ışık üretimi için geleneksel anlamda bir ampul bulunmamakta olup, ışık kaynağının ortalama kullanım ömrü yaklaşık 10.000 saat olarak bildirilmektedir. LED'lerin yaydığı ışık, halojen lambalara kıyasla daha dar bir spektruma (400–500 nm) sahip olmasına rağmen, kamfrokinon içeren kompozit rezinlerin polimerizasyonu için gerekli dalga boyu aralığını kapsamaktadır. Bu sayede, halojen ışık kaynaklarına göre daha düşük enerjiyle çalışırken daha az ısı açığa çıkarırlar (Mills, Jandt, & Ashworth, 1999).

Işık uygulama süresi

Kompozit rezinlerin tam olarak sertleşebilmesi için sadece kullanılan ışık kaynağının tipi değil, aynı zamanda uygulanan toplam enerjinin de yeterli olması gerekir. Bu enerji (E), ışık cihazının (LCU) ürettiği ışınım şiddetinin (I) (mW/cm^2) uygulama süresi (T) ile çarpılmasıyla elde edilir ($E = I \times T$). Işık yoğunluğu yükseldikçe, aynı enerjiyi sağlamak için gereken uygulama süresi ters orantılı olarak kısalmır. Kompozit tabakasının kalınlığı 2 mm'ye ulaştığında, yeterli polimerizasyonun sağlanabilmesi için yaklaşık $16\text{--}24 \text{ J/cm}^2$ arasında bir ışık dozuna maruz kalması gerektiği bildirilmiştir (Sobrinho, De Goes, Consani, Sinhoreti, & Knowles, 2000).

Işık Kaynağı Ucu-Restorasyon Arası Mesafe

Birçok araştırma, ışık cihazı ucunun kompozit yüzeyinden uzaklaştıkça kompozite ulaşan ışık enerjisinde belirgin bir azalma meydana geldiğini göstermiştir. Bu kayıp, morfolojik faktörlerle ilişkili olabilir; örneğin kusp yüksekliği, kuspal eğim ve kavite derinliğinin artması, ışık ucunun kompozit yüzeyine olan mesafesini artırarak enerji miktarını azaltabilir (Aguiar, Lazzari, Lima, Ambrosano, & Lovadino, 2005).

Standart bir ışık kaynağı ile yapılan bir çalışmada, uygulama mesafesinin 0 mm'den 6 mm'ye çıkarılmasının ışık yoğunluğunu yaklaşık %50 oranında düşürdüğü bildirilmiştir. Turbo uçlu bir ışık kılavuzu kullanıldığında ise bu azalmanın %77'ye kadar ulaştığı belirtilmiştir. Bu nedenle, ışık cihazı ucunun kompozit rezin yüzeyine mümkün olduğunca yaklaştırılması önemlidir. Mesafe azaltılamıyorsa, uygulama süresinin uzatılması veya daha yüksek ışık enerjisi sağlayan bir ışık kaynağı tercih edilmesi önerilmektedir (Richard BT Price, Labrie, Rueggeberg, & Felix, 2010).

3- Çevresel Faktörler

Atmosferin Etkisi

Işık kaynağından çıkan ışınların ilerlerken saçılması, kompozit rezine ulaşan enerji miktarını doğrudan etkiler. Hava ortamının oluşturduğu direnç de göz önünde bulundurulduğunda, ışık cihazı ucunun kompozit rezinden uzaklaşmasıyla birlikte bu saçılma artar ve yüzeye ulaşan etkili ışık enerjisi azalır (Malhotra & Kundabala, 2010).

Ortamın Etkisi

Günümüzde kullanılan kompozit rezinler görünür ışığa karşı duyarlı materyallerdir. Bu nedenle ortamdan gelen ışık dahi kompozitte polimerizasyonu başlatabilmekte, bu da materyalin erken sertleşmesine ve çalışma süresinin kısılmasına yol açabilmektedir. Bu etkiyi azaltmak amacıyla, özellikle işlem sırasında kompoziti istenmeyen ışıktan korumak için poliester içerikli fotografik filtrelerin kullanılması önerilmektedir (Malhotra & Kundabala, 2010).

4- Diğer etkenler

Kavite Genişliği

Maksiller ve mandibular arkta yer alan molar ve premolar dişler, meziodistal ve bukkolingual boyutları açısından farklılık gösterdiğinden, molar bölgede daha geniş çaplı restorasyonlar yapılabilir. Piyasada bulunan birçok ışık cihazı, ışığı alan üzerine eşit olarak dağıtamamakta; bu da bazı bölgelerde daha yüksek, bazı alanlarda ise daha düşük yoğunlukta ışık oluşmasına yol açmaktadır (Richard B Price, Labrie, Whalen, & Felix, 2011). Farklı ışık cihazlarının yaydığı ışığın dağılımını inceleyen bir çalışmada, bu dağılım paternlerinin hem monomer dönüşüm derecesi (MDD) hem de kompozit rezin yüzey sertliği üzerinde belirgin etkiler oluşturduğu bildirilmiştir. Kavite çapı büyüdükçe, restorasyonun çeşitli kısımlarında polimerizasyon derecesi ve MDD'nin değişkenlik gösterme olasılığı artmaktadır. Bu durum, restorasyonun genel performansını olumsuz etkileyerek fonksiyonunu ve uzun dönem dayanıklılığını azaltabilir (Haenel et al., 2015).

C Faktörü

C faktörü, konfigürasyon oranı olarak adlandırılır ve kompozit rezinin bağlandığı (yapışık) yüzey sayısının, serbest (bağlanmamış) yüzey sayısına oranı ile ifade edilir. Bu oranın artması, polimerizasyon büzülmesi sırasında oluşan gerilmelerin şiddetini yükseltirken; düşük olması, büzülme stresini daha sınırlı düzeyde tutar. Örneğin, Sınıf I kaviteye yerleştirilen bir kompozit rezinde C faktörü 5 olarak bildirilmiş olup bu da yüksek büzülme stresine işaret eder. Buna karşılık, MOD kavitelerde söz konusu oran 1 olarak hesaplanmış ve bu durumda büzülmenin daha düşük düzeyde gerçekleştiği belirtilmiştir (A. J. Feilzer et al., 1987).

C faktöründen kaynaklanan olumsuz etkileri azaltmak amacıyla kompozitin tabakalar hâlinde uygulanması önerilmektedir. İnce katmanlarla yerleştirilen kompozit, büzülme stresinin daha kontrollü dağılmasına ve polimerizasyonun daha dengeli olmasına yardımcı olur. Sonuç olarak, C faktörü; restorasyonun mekanik dayanıklılığı, klinik ömrü ve başarısı üzerinde kritik bir parametre olup, bu etkinin azaltılması için mümkün olduğunca düşük C faktörüne sahip kavite tasarımlarının ve uygun yerleştirme tekniklerinin tercih edilmesi gerektiği vurgulanmıştır (A. Feilzer, De Gee, & Davidson, 1989).

Kavite Lokasyonu

Posterior bölgelerde, özellikle de ikinci molarların bukkal ve lingual/palatinal yüzeylerinde, ışık cihazı ucunun restorasyon yüzeyine tam olarak paralel ve 90°'lik açıyla yerleştirilmesi her zaman mümkün olmayabilir. Bu tür alanlarda polimerizasyon ışığının hem erişim açısı hem de yönü kısıtlandığı için, kompozit rezinin maksimum dönüşüm derecesi seviyesine ulaşması güçleşebilmektedir (Richard BT Price, Murphy, & Dérand, 2000; Williams & Johnson, 1993).

Polimerizasyon Büzülmesi Ölçüm Yöntemleri

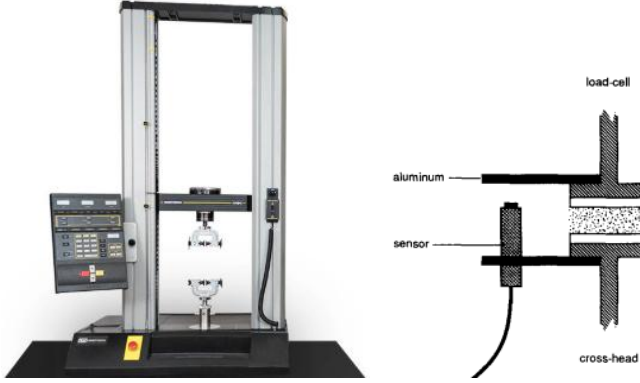
Polimerizasyon büzülmesi günümüzde halen kompozit rezinlerde başa çıkılması en zor problemdir. Bunun için pek çok farklı çözüm yolları denenmiş olmasına rağmen henüz tam olarak otadan kaldırılamamıştır. Üretici firmalar farklı doldurucu ve içeriklerle bunu azaltmaya çalışmaktadır. Polimerizasyon büzülmesi ölçümü için birçok farklı yöntem bulunmaktadır. Kullanılan yöntemleri kompozit rezinin yoğunluk ve hacimsel farklılığını ölçenler ve lineer ölçüm yöntemleri olarak iki ana grupta inceleyebiliriz. Bu yöntemlerden bazıları kompozit rezin ile temasta bulunurken, bazıları temas etmeden ölçüm yapabilirler.

Tensilometre

Tensilometre yöntemi, kompozit rezinlerin polimerizasyon sırasında oluşturduğu büzülme gerilimini nicel olarak değerlendirmek için kullanılan çekme tipi bir test düzeneğidir. İki metal veya cam çubuk universal test makinesinin karşılıklı çenelerine bağlanır, kompozit bu çubukların düz ve paralel uçları arasına yerleştirilir ve polimerizasyon süresince kompozitin b z lmeye bağlı olarak geliştirdiği eksenel kuvvet kaydedilir. Elde edilen kuvvet, örneğin veya çubukların kesit alanına bölünerek nominal büzülme gerilimi (MPa) hesaplanır; sistemde ekstansometre kullanıldığında çubuklar arası mesafe sabit tutulur ve bu sayede gerçek büzülme gerilimi daha doğru biçimde izlenir (Alster, Feilzer, de Gee, & Davidson, 1997).

Bu yöntemin başlıca avantajı, polimerizasyon büzülme gerilimini doğrudan gerilme birimiyle (MPa) ifade etmesi ve iki rijit yüzey arasında ince bir kompozit tabakası kullanarak yüksek C-faktörlü, rijit duvarlı kavite koşullarına yakın bir sınır durumu simüle etmesidir . Ayrıca zaman–gerilme eğrisinin elde edilebilmesi, farklı kompozit tipleri, bulk-fill materyaller, ışık kaynakları ve k r protokollerinin dinamik büzülme gerilimi davranışlarının aynı düzende kar ıla tırılmasına olanak tanır (Alster et al., 1997; Bowen, 1967).

Şekil 1: Tensilometre (A. Feilzer, De Gee, & Davidson, 1993)

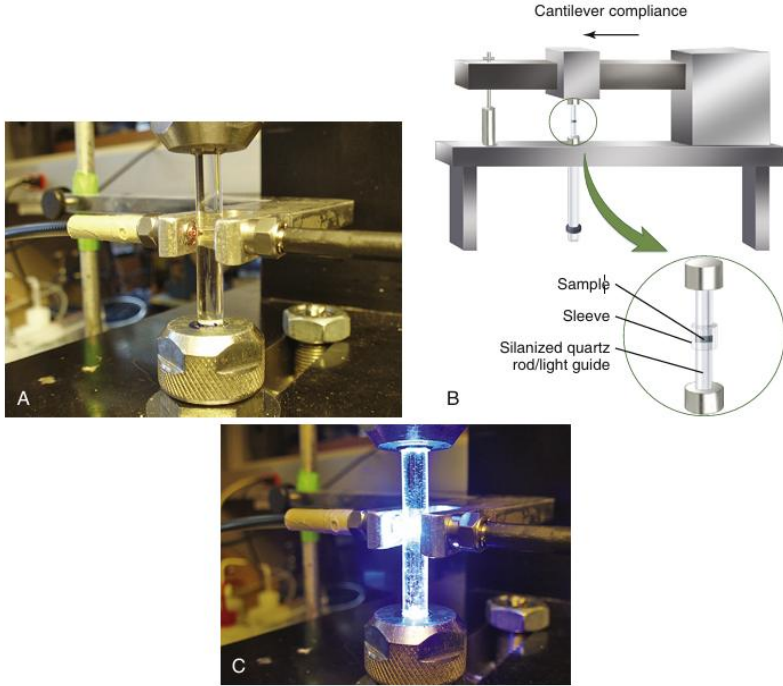


Bununla birlikte tensilometre düzeneği, test sisteminin esnekliğine, çubukların deformasyonuna ve hizalanmasına oldukça duyarlıdır; rodların ve bağlantı elemanlarının uzaması veya birbirine yaklaşması, yük hücresine iletilen kuvveti azaltarak gerçek stresi olduğundan düşük gösterebilir. Örnek geometrisi ve klinik kavite morfolojisini tam olarak yansıtmaz (Jongsma & Kleverlaan, 2015).

Tensometre

Tensometre cihazında, polimerize edilmemiş kompozit rezin, iki kuvars çubuk arasına bağlanır; alt çubuk gövdeye sabitlenirken üst çubuk kalibre edilmiş bir konsol kirişe bağlanır. Işıklı polimerizasyon sırasında gelişen büzülme gerilimi, Lineer Değişken Diferansiyel Transformatör (LVDT) kullanılarak ölçülür. Sistemde doğrudan kuvvet ölçümü yapılmaz. Elde edilen defleksiyon değeri, kirişin elastik modülü ve eylemsizlik momenti gibi bilinen geometrik ve mekanik parametreler kullanılarak **kiriş teorisi üzerinden kuvvete**, kuvvet de örneğin kesit alanına oranlanarak **nominal polimerizasyon büzülme gerilimine (MPa)** dönüştürülür (R. L. Sakaguchi & Powers, 2012; Wang, Landis, Giuseppetti, Lin-Gibson, & Chiang, 2014).

Şekil 2: Kompozitlerin kürlenmesi sırasında polimerizasyon gerilimini ölçmek için Tensometres. Işık maruziyetinden önce test konfigürasyonu (A); test cihazının çizimi (B); ışık maruziyeti sırasında (C) (R. L. Sakaguchi & Powers, 2012)



Böylece tensometre, yüksek dolduruculu kompozitlerde dahi, polimerizasyonun başlangıcından itibaren hem büzülme geriliminin zaman içindeki gelişimini hem de farklı kısıtlama derecelerinin (rod aralığı, giriş üzerindeki örnek konumu vb.) stres oluşumu üzerindeki etkisini duyarlı bir biçimde incelemeye olanak tanır (R. L. Sakaguchi & Powers, 2012).

Çatlak Analizi

Çatlak analizi yöntemi, kompozit rezinlerin polimerizasyon büzülmesi sonucu oluşturduğu gerilmeyi, dış minesini taklit eden

kırılgan bir materyal (cam veya cam-seramik) içindeki çatlakların davranışına bakarak dolaylı yoldan hesaplayan bir laboratuvar testidir. Bunun için önce cam blok içinde kavite açılır, kavite çevresinde Vickers sertlik cihazı ile girinti yapılarak küçük radyal çatlaklar oluşturulur ve bu çatlakların başlangıç boyu ölçülür. Daha sonra kavite adeziv sistem ve kompozit rezinle doldurulur ve ışıkla polimerize edilir; kompozitin büzülmesi kavite duvarlarını çekerek camda çekme gerilmesi oluşturur ve bu gerilme etkisiyle mevcut çatlaklar uzar. Polimerizasyon sonrası çatlak boyu yeniden ölçülür ve çatlaklardaki bu artış, cam/seramiğin bilinen kırılma tokluğu ile birlikte kırılma mekaniği denklemlerine yerleştirilerek kompozitin oluşturduğu polimerizasyon gerilmesi (MPa cinsinden) hesaplanır (R. L. Sakaguchi & Powers, 2012; Yamamoto, Ferracane, Sakaguchi, & Swain, 2009).

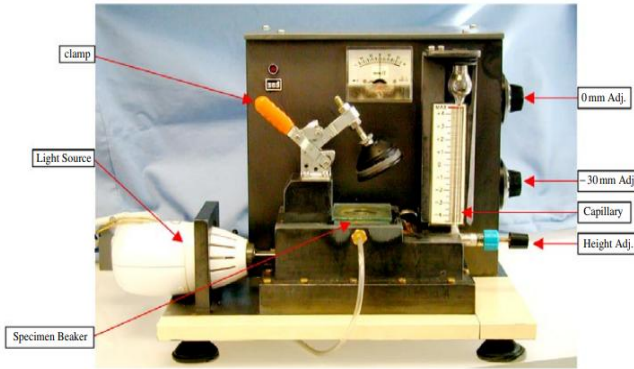
Yöntem, gerçek bir diş-kavite benzeri ortamda gerilme oluşumunu incelemeye ve farklı kompozitler, adezivler, C-faktörü, ışık uygulama protokolleri ve kavite tasarımlarının etkisini karşılaştırmaya olanak tanınması açısından avantajlıdır. Ancak kırılma model materyalin gerçek diş dokusunu sadece yaklaşık temsil etmesi, deney düzeneğinin nispeten karmaşık olması ve sonuçların çatlak ölçüm hassasiyetine oldukça duyarlı olması önemli sınırlamalarıdır (R. L. Sakaguchi & Powers, 2012).

Dilatometre

Dilatometre, malzemelerin sıcaklık değişimine bağlı olarak gösterdiği genleşme veya büzülme hassas şekilde hacimsel olarak ölçen bir cihazdır. Klinik açıdan doğrudan sonuç vermese de, kompozitlerin termal özellikleri ve hacimsel değişimlerinin belirlenmesinde sık kullanılan bir yöntemdir. Bu teknikte, reaksiyona girmeyen bir sıvı (su veya cıva) kompozit numuneyi kürlenme süresi boyunca tamamen çevreler. Kapiller tüpteki sıvı seviyesindeki değişim izlenerek polimerizasyon süresince oluşan

hacimsel büzülme hesaplanır ve jel öncesi–jel sonrası tüm süreç için “toplam büzülme” değeri elde edilir. Eskiden düşük genleşme katsayısı nedeniyle cıva tercih edilirken, toksik ve çevresel riskleri nedeniyle günümüzde su kullanılan dilatometreler daha çok benimsenmiştir (Oberholzer, Grobler, Pameijer, & Rossouw, 2001a; Penn, 1986).

şekil 3: Dilatometre (Oberholzer, Grobler, Pameijer, & Rossouw, 2001b)



Ancak polimerizasyon sırasında oluşan küçük sıcaklık dalgalanmaları sıvı hacmini etkileyerek ölçüm hatalarına neden olabilir; numune hazırlığı zahmetlidir ve akışkan kompozitlerin ölçümü güçtür. Işıkla sertleşen dental materyallerde ışığın numuneye ulaşması ve cıvanın opaklığı ek sorunlar oluşturur (Oberholzer et al., 2001b).

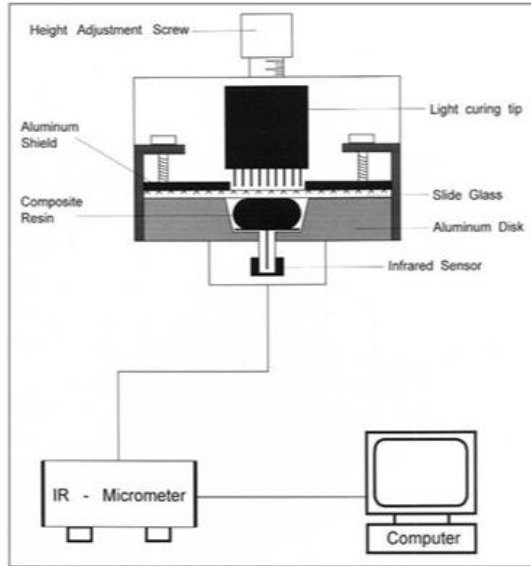
Linometre

1993 yılında de Gee ve ark. nispeten basit, hızlı ve sıcaklık değişimlerine duyarsız olup **tutarlı sonuçlar veren** bir linometre tanıtmişlardır. Bu yöntem ile dilatometri arasında anlamlı bir fark bulmamışlardır. Kompozit rnek, bir cam lam ile alüminyum disk arasına yerleştirilmiştir. Rezin örneğinin yüksekliğinin seçilebilmesi için, alüminyum disk ile cam arasındaki mesafe, yer değiştirme

transdüseri kullanılarak ayarlanabilmekteydi. Kompozit örneğin yapışmasını önlemek amacıyla disk ve cam yağlanmıştır. Ancak bu düzenek yalnızca **doğrusal (lineer) değişimleri** ölçmektedir (De Gee, Feilzer, & Davidson, 1993).

Linometre, rezin esaslı diş hekimliği materyallerinin polimerizasyon büzülmesini **doğrusal yer değiştirme** üzerinden ölçen bir laboratuvar cihazıdır. Genellikle teflon veya benzeri bir kalıp içine yerleştirilen kompozit rezin, üst kısmında linometreye bağlı hareketli bir piston/çubuk ile temas halindedir. Materyal ışıqla polimerize olurken meydana gelen büzülme, bu pistonu aşağı doğru çeker; pistonun zaman içindeki yer değiştirmesi yüksek hassasiyetli bir LVDT veya dijital ölçüm sistemi ile kaydedilerek doğrusal büzülme miktarı (μm veya % olarak) hesaplanır (S.-H. Park, Krejci, & Lutz, 1999; S. H. Park, Krejci, & Lutz, 2002).

Şekil 4: Linometre şema çizimi (S. H. Park et al., 2002)



Strain Gauge (Gerilim-ölçer) Yöntemi

Şekil 5: Gerinim-ölçer cihazı (Lotfy, Mahmoud, & Riad, 2022)



Kompozit polimerizasyondan önce yumuşak ve akışkan olduğundan, bu yöntem esas olarak **jel noktasından sonra**, malzemenin artık akamaz hale geldiği ve elastik özellik gösterdiği döneme ait büzülme gerinimini ölçer; bu nedenle elde edilen değerler genellikle **post-gel shrinkage strain (PGSS)** olarak rapor edilir. Ölçümler, ışık uygulaması sırasında ve sonrasındaki birkaç dakika boyunca sürekli kaydedilerek **zaman–gerinim eğrisi** elde edilir ve bu eğriden farklı materyallerin veya farklı sıcaklık, viskozite ve uygulama koşullarının polimerizasyon büzülmesi üzerindeki etkileri karşılaştırılabilir (Lotfy et al., 2022).

Arşimet Metodu

Arşimet prensibi temelde, bir cismin sıvı içine daldırıldığında, yer değiştirdiği sıvının ağırlığına eşit bir kaldırma kuvvetine maruz kaldığı ilkesine dayanır. Bu yaklaşımda, numunenin damıtılmış su gibi bilinen yoğunluktaki bir sıvı içindeki kaldırma kuvveti zamanla izlenir. Polimerizasyon büzülmesini bu yöntemle ölçmek için, aynı numune polimerizasyon öncesi ve sonrası hem havada hem de bilinen yoğunluktaki bir sıvıda birkaç kez tartılır. Elde edilen görünür ağırlık farklarından numunenin o andaki hacmi hesaplanır; ilk ve son hacim arasındaki fark da hacimsel büzülme miktarını verir (de Melo Monteiro et al., 2011).

Yöntem nispeten basit, ucuz ve teorik olarak oldukça hassas olmakla birlikte bazı sınırlılıkları vardır. Özellikle kompomer veya akışkan kompozitler gibi hidrofilik materyallerde su absorpsiyonu, ölçülen kaldırma kuvvetini etkileyerek gerçek büzülmenin olduğundan farklı görünmesine yol açabilir; bu durumda su yerine yağ veya cıva gibi alternatif sıvı ortamları kullanılabilir. Ayrıca ölçüm çok basamaklı ve zaman alıcıdır. Buna rağmen, uygun kontrol ve standartlaştırma sağlandığında Arşimet yöntemi, kompozitlerin gerçek hacimsel polimerizasyon büzülmesinin değerlendirilmesinde

güvenilir referans yöntemlerden biri olarak kabul edilmektedir (de Melo Monteiro et al., 2011).

Bonded (disk) Yöntemi

Bonded disk yöntemi ilk olarak 1991 yılında tanımlanmış olup, çok fazla ekipman gerektirmemesi sebebiyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Kompozit rezin, cam plakaya bağlanmış pirinç bir halkanın içine yerleştirilir. Halkanın içindeki kompozitin halkaya yapışmayan üst kısmı, çok ince bir mikroskop cam ile kapatılır. Üstteki bu ince camın tam ortasına bir LVDT probu değdirilir. Kompozit rezin alt yüzeyden ışıkla polimerize edilirken büzülme meydana gelir; cam plakaya güçlü şekilde bağlı olan alt kısım sabit kalırken, serbest üst kısım büzülmenin etkisiyle mikroskop camını aşağı doğru çeker. Camın yer değiştirmesi LVDT probu ile sürekli kaydedilir ve ölçülen düşey yer değiştirme (Δh), kompozit tabakasının başlangıç yüksekliğine (h) oranlanarak lineer büzülme yüzdesi hesaplanır (D. C. Watts & Cash, 1991).

Bu sistemde kompozit, cam tabaka ile bağlı (bonded) olduğu için, özellikle jel noktasından sonra oluşan büzülme, ciddi stresler üretir; metodun asıl ölçtüğü de bu post-jel büzülme kısmıdır. Bonded disk yöntemi, basit ve düşük maliyetli bir düzenekle kompozit rezinlerin post-jel dönemine ait lineer büzülme ve buna bağlı büzülme stresini gerçek zamanlı olarak değerlendirmeye olanak sağlar. Ancak yalnızca tek yöndeki yer değiştirmeye dayandığı için hacimsel büzülme hesaplarında izotropik büzülme varsayımına ihtiyaç duyar ve erken (pre-jel) fazdaki hacim değişimleri ile klinik kavite geometrisini tam olarak yansıtmaz (Ghavami-Lahiji & Hooshmand, 2017).

Video Görüntüleme (Acuvol Test Cihazı)

Acuvol (Acuvol™ Volumetric Shrinkage Analyzer), Bisco Inc. (Schaumburg, IL, USA) tarafından geliştirilmiş, dental kompozit rezinlerin hacimsel polimerizasyon büzülmesini ölçmek için tasarlanmış bir video-görüntüleme cihazıdır. Sistem; bir CCD video kamera, mercek, kırmızı LED ışık kaynakları ve görüntüleri işleyen özel bir yazılımdan oluşur. Amaç, kompozit rezin örneğinin polimerizasyon öncesi ve sonrası hacmini karşılaştırarak büzülme yüzdesini hassas bir şekilde hesaplamaktır (Sharp, Choi, Lee, Sy, & Suh, 2003).

Birçok çalışmada, Acuvol ile elde edilen sonuçların, klasik civa dilatometresi ile ölçülen değerlerle istatistiksel olarak benzer olduğu bildirilmiştir. Ölçüm için, cihazın polietilen teflondan yapılmış kaidesi üzerine ışıkla sertleştirilmemiş küçük bir kompozit rezin örneği yerleştirilir ve aynı anda materyalin görüntüsü kaydedilir. Daha sonra kompozit ışıkla polimerize edilir, yaklaşık 5 dakika beklendikten sonra ikinci ölçüm/görüntü alınır. Yazılım, bu iki görüntüyü karşılaştırarak kompozitin hacmindeki farkı hesaplar ve **hacimsel büzülme yüzdesini** sayısal veri olarak ekrana yansıtır (R. L. Sakaguchi & Powers, 2012; Sharp et al., 2003).

Şekil 6: Acu-vol cihazı ve örnek yerleştirme



Volumetrik büzülmeyi doğrudan  l er. Lineer büzülme ölçümlerinde olduğu gibi “ izotropik büzülme varsayımı” yapmak gerekmez; görüntü üzerinden doğrudan hacim hesabı yapılır.  l  m hassasiyeti yüksektir, gerçek zamanlı ölçüm ve grafik Őeması verir. Mekanik temas gerektirmez; bu da numunenin davranışını daha az etkilemesi anlamına gelir. Dezavantajları ve kısıtlılıkları ise küçük numune boyutu hem örnek boyutunu sınırlamakta hem de örneğin kaideye düzgün yerleştirilmesini zorlaştırmaktadır. Ortam sıcaklığının kontrolsüz olması; ölçüm odası doğrudan  evre ortamına açıktır; bu nedenle ölçümler fizyolojik sıcaklıkta (37 C) yapılmak istendiğinde sistemde ek bir termostatik düzenek yoktur. Bu da sıcaklığa duyarlı malzeme davranışlarının incelenmesini sınırlar. Sadece volumetrik büzülme için kullanılabilmesi, kontak açısı, yüzey gerilimi gibi farklı parametreler ölçülemez (R. L. Sakaguchi & Powers, 2012; Tiba, Charlton, Vandewalle, & Ragain Jr, 2005).

Lazer Triang lasyon Yöntemi

Lazer triangülasyon; kompozitin üst yüzeyine eğik açıyla gönderilen lazer ışığının, yüzey hareket ettikçe sensör üzerindeki yer değiştirmesini ölçen **temassız** bir yöntemdir. Böylece polimerizasyon sırasında kompozit büzüldükçe üst yüzeyin ne kadar aşağı indiği gerçek zamanlı olarak kaydedilir ve buradan **büzülme miktarı, büzülme hızı (Rmax) ve jel zamanı** hesaplanır. Avantajı, çok hassas ve gerçek zamanlı veri sağlaması, dezavantajı ise sadece yüzey hareketini görmesi ve optik düzeneğin hassas kalibrasyon gerektirmesidir (Gao, Lin, Zheng, Xu, & Yang, 2012).

Micro-CT yöntemi

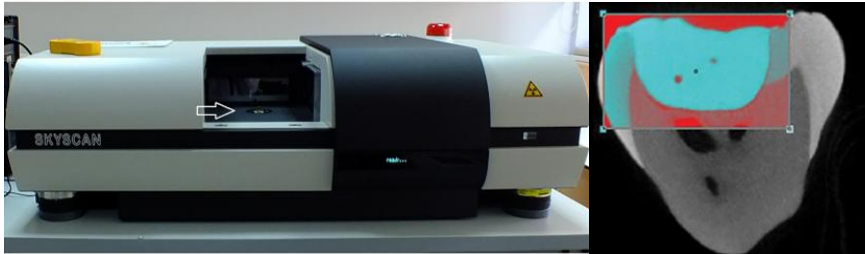
Mikro-bilgisayarlı tomografi (micro-CT), kompozit rezinlerin polimerizasyon büzülmesini üç boyutlu ve tahribatsız olarak değerlendirmeye imkân veren ileri bir görüntüleme

yöntemidir. Temel prensip, dişi veya restorasyonlu örneği polimerizasyondan önce ve sonra micro-CT cihazında taramak, her iki taramadan elde edilen 3D hacimsel verileri karşılaştırmak ve hacim farkından büzölme yi hesaplamaktır. Çalışmalarda genellikle çekilmiş insan dişlerine standart kaviteler hazırlanır, adeziv ve kompozit uygulanır; diş önce polimerizasyon öncesi taranır, ardından kompozit ışıkla polimerize edilir ve aynı örnek yeniden taranır. Elde edilen kesit görüntüleri özel yazılımlarla (rekonstrüksiyon + analiz) üç boyutlu olarak birleştirilir, ilgi alanı (kompozit hacmi) eşik (threshold) değeri ile belirlenir ve başlangıç hacmi (V_0) ile polimerizasyon sonrası hacim (V_1) karşılaştırılarak hacimsel büzölme genellikle şu şekilde ifade edilir:

$$\text{Volumetrik büzölme (\%)} = \frac{V_0 - V_1}{V_0} \times 100$$

Bazı çalışmalarda, polimerizasyondan önceki ve sonraki 3D veri setleri üst üste karşılaştırılarak, sadece hacim kaybı değil, aynı zamanda kür büzölmesinin oluşturduğu gerçek deformasyon vektörleri de görselleştirilebilmektedir (Swain & Xue, 2009).

şekil 7: Micro-Ct (Kamalak & Kamalak, 2018)



Micro-CT ile polimerizasyon büzölmesini ölçmenin en önemli **avantajı**, kompozit ve dişi üç boyutlu, yüksek çözünürlüklü ve **tahribatsız** olarak incelemeye izin vermesidir. Böylece gerçek

diş kaviteleri gibi **linik açıdan anlamlı geometrilerde**, objenin şekline ve pozisyonuna çok bağımlı olmadan hacimsel büzülme hesaplanabilir. Hava kabarcıklarından kaynaklanan artefaktlar yazılımsal olarak düzeltiler ve büzülmenin oluşturduğu **gerçek deformasyon vektörleri** (hangi yönde ne kadar çektiği) görselleştirilebilir; ayrıca elde edilen büzülme değerlerinin varyasyonu genelde makul ve tekrarlanabilir düzeydedir. **Dezavantajları** arasında, cihaz ve yazılım maliyetinin yüksek olması, tarama ve veri analizinin zaman alıcı ve teknik bilgi gerektirmesi, materyalin radyopaklığı yetersiz ise kompozit ile diş ayırmanın zorlaşması, hacim hesabında kullanılan eşik seçimine duyarlılık ve polimerizasyondan önceki ve sonraki taramaların tam olarak aynı konumda hizalanmamasından kaynaklanabilecek küçük hatalar sayılabilir (Hirata et al., 2015; Swain & Xue, 2009).

Kaspal eğilme analizi yöntemi

Kompozit rezin restorasyon kavite duvarlarına adeziv sistemlerle bağlandıktan sonra polimerize olduğunda, hacimsel büzülme sonucu oluşan çekme kuvvetleri tüberküleri **birbirine doğru çeker** ve diş yapısında ölçülebilir düzeyde deformasyon meydana gelir (Abbas, Fleming, Harrington, Shortall, & Burke, 2003). Klasik yöntemler, kompozitin polimerizasyon büzülmesini genellikle serbest haldeki örnekler üzerinde (örneğin dilatometre ile) ölçmekte; ancak bu ölçümler **diş kavitesi içindeki gerçek sınır koşullarını** yansıtmamaktadır. Bu nedenle, polimerizasyon büzülmesinin **diş yapısı üzerindeki etkisini** daha gerçekçi yansıtan parametrelere ihtiyaç duyulmuştur. Bu noktada **tüberküler hareket (cuspal movement/deflection)** kavramı önem kazanmıştır. Kaspal sapmanın nicel olarak ölçülmesi, klinik durumla ilişkilendirilmeye çalışılarak, bir diş boşluğu içindeki bağlanmış kompozitin büzülme ölçümünün göstergesidir (Fleming, Cara, Palin, & Burke, 2007; McCulloch & Smith, 1986).

Tüberküler sapma genellikle **laboratuvar**da, kompozit dolgu yapılmış dişte tüberküllerin polimerizasyon öncesi ve sonrası **ne kadar yer değiştirdiğinin** ölçülmesiyle değerlendirilir. Bunun için; mikrometreli **mikroskop/fotoğraf sistemleri**, **strain gauge'ler**, **LVDT** sensörleri, **profilometri**, **dijital görüntü korelasyonu (DIC)** ve **interferometrik yöntemler** (örneğin Michelson interferometrisi, speckle interferometrisi) gibi teknikler kullanılır. Bu yöntemlerin hepsi, kompozit büzülürken diş tüberküllerinin birbirine ne kadar yaklaştığını sayısal olarak belirlemeyi amaçlar. Literatürde, kompozit rezinlerle restore edilen dişlerde ölçülen tüberküler sapma değerleri genellikle **yaklaşık 15 µm ile 50 µm** aralığında rapor edilmiştir. Ancak bu aralık; kullanılan ölçüm yöntemine, dişin boyut ve morfolojisine, kavite sınıfına ve konfigürasyonuna, kullanılan adeziv sistem ve kompozit materyale, restorasyon tekniğine (inkremental yerleştirme, bulk fill, ışık uygulama yönü vb.) bağlı olarak önemli farklılıklar gösterebilmektedir (Fleming et al., 2007).

Optik koherens tomografi (OCT)

Optik koherens tomografi (OCT), invaziv olmayan ve temas gerektirmeyen bir tıbbi tanı görüntüleme yöntemidir. OCT'nin çalışma prensibi, sırasıyla X ışınları ve ses dalgalarını kullanan BT, MR ve B-taramalı ultrasonografi gibi yöntemlere benzer, ancak yalnızca ışık kullanılır (Baek, Na, Lee, Choi, & Son, 2009).

OCT, düşük koherensli ve geniş bantlı bir ışık kaynağına sahip bir Michelson interferometresine dayanmaktadır. Cihaz, bir tarama probu, ışık kaynağı olarak süperlüminesan diyot içeren bir taban ünitesi ve bir bilgisayardan oluşur. Bu yöntemde 3 tarama gerçekleştirilir: önce teflondan yapılmış içi boş silindirik bir kalıp üzerinde bir tarama yapılır, ardından kompozit malzeme yerleştirilir ve ikinci bir tarama, ardından 15 dakikalık fotokürlemeden sonra üçüncü bir tarama gerçekleştirilir. Özel bir formülle doğrusal

büzülme miktarı hesaplanır (de Melo Monteiro et al., 2011; Sangra, Farooq, Rashid, & Ahmad, 2020).

OCT tekniği, hastayı iyonlaştırıcı radyasyona maruz bırakmaması, temas gerektirmemesi ve mikron düzeyinde aksiyel çözünürlüğe ulaşabilmesi nedeniyle hem dişlerin hem de periodontal dokuların yüksek çözünürlüklü gerçek zamanlı görüntülerini üretir. Bununla birlikte OCT'nin penetrasyon derinliği yüksek optik soğurma veya yoğun saçılma gösteren dokularda sınırlı olabilir; görüntü kalitesi materyalin optik özelliklerinden etkilenebilir ve cihaz maliyeti yüksek olabilir. Yine de yüksek hassasiyeti, gerçek zamanlı çalışabilmesi ve yapıları harap etmeden değerlendirebilmesi, OCT'yi modern dento-medikal araştırmalarda ve klinik uygulamalarda son derece değerli bir görüntüleme aracı hâline getirmektedir.

Dijital görüntü korelasyonu (DIC)

Dijital görüntü korelasyonu (DIC), dental materyallerde polimerizasyon büzülmesi ve deformasyonu temassız olarak ölçen, speckle desenli yüzey görüntülerinin yüksek çözünürlüklü kameralarla kaydedilip yazılım aracılığıyla karşılaştırılmasına dayanan optik bir tekniktir. Referans ve deformasyon sonrası görüntüler arasındaki gri seviye değişimleri analiz edilerek yer değiştirme ve gerinim haritaları elde edilir; böylece kompozit rezinlerin büzülme miktarı, yönü, mekânsal dağılımı ve zaman içindeki değişimi, hatta derinlik boyunca büzülme kinetiği tam alan olarak izlenebilir (Lau, Li, Heo, & Fok, 2015; Yoon, Jung, Knowles, & Lee, 2021).

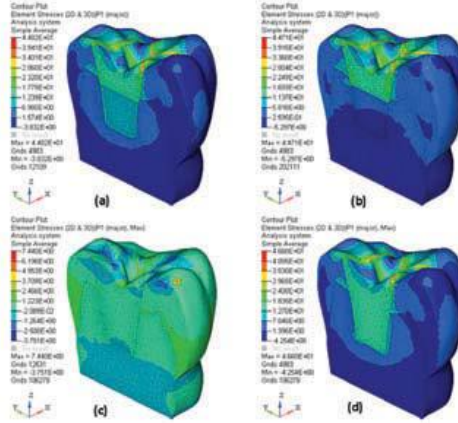
DIC'nin en önemli üstünlükleri; örneğe herhangi bir sensör bağlanmaması, tüm yüzeyde ayrıntılı deformasyon analizi yapılabilmesi ve 2D/3D konfigürasyonlarda karmaşık diş ve restorasyon geometrilerine uygulanabilmesidir. Ancak sistemin yüksek donanım ve yazılım maliyeti, korelasyon için speckle

desenin özenli hazırlanma gerekliliği, kamera gürültüsü ve lens distorsiyonuna bağlı hata olasılığı ile derin ve optik erişimi sınırlı kaviteelerde görüntüleme güçlüğü, yöntemin başlıca kısıtlılıkları olarak kabul edilmektedir (Yoon et al., 2021).

Sonlu elemanlar analiz yöntemi

Sonlu elemanlar analizi (finite element analysis, FEA), polimerizasyon büzülmesini **doğrudan ölçen bir cihaz** olmamakla birlikte diş ile kompozit arasında oluşan **gerilme ve deformasyonları bilgisayar ortamında simüle etmeye yarayan sayısal (matematiksel) bir yöntemdir**. Bu yöntemde önce diş, kavite ve kompozit rezin, gerçek diş boyutlarına benzeyen 2D veya 3D bir **geometrik model** olarak bilgisayar programında oluşturulur, model çok sayıda küçük “eleman”a bölünür, her elemanın **elastik modülü, Poisson oranı, büzülme miktarı** gibi malzeme özellikleri tanımlanır, sonra polimerizasyon büzülmesi modele genellikle “ön gerinim” veya “ısı büzülme” gibi bir yükleme olarak uygulanır ve program bu yükleme altında dişte ve kompozitte **hangi bölgede ne kadar gerilme ve yer değiştirme** oluştuğunu hesaplar. Böylece, farklı kompozit türlerinin, adeziv sistemlerin, kavite şekillerinin ve C-faktörünün polimerizasyon stresine etkisi, deney yapmadan, **sanal olarak** karşılaştırılabilir (Ausiello et al., 2019; R. L. Sakaguchi & Powers, 2012).

Şekil 8: Sonlu elemanlar analizi (Ausiello et al., 2019)



En önemli avantajları, gerçekçi geometri ve malzeme kombinasyonlarını denemeye izin vermesi, diş yapısı içinde **gerilmenin nerede yoğunlaştığını** renkli haritalarla göstermesi ve pek çok şartı (kavite derinliği, ışık uygulama yönü, materyal sertliği vb.) kolayca değiştirebilmeye imkân tanınmasıdır. Buna karşılık en büyük dezavantajları, tamamen **girdi olarak verilen varsayımlara (malzeme değerleri, sınır koşulları, büzülme miktarı)** bağlı olması, yani hatalı veya basitleştirilmiş veri girilirse sonuçların gerçeği yansıtmaması ve deneysel yöntemler gibi doğrudan ölçüm değil, **dolaylı bir hesaplama/simülasyon** olmasıdır (R. L. Sakaguchi & Powers, 2012).

Sonuç

Kompozit rezinlerde polimerizasyon büzülmesi, restorasyonun klinik başarısını doğrudan etkileyen en önemli problemlerden biridir. Materyalin kimyasal yapısı, uygulama tekniği, kullanılan ışık cihazı, kavite morfolojisi ve çevresel faktörler büzülme miktarını ve hızını değiştirmekte; bu süreçte oluşan içsel stresler marjinal uyumu bozarak sekonder çürük, postoperatif hassasiyet ve restorasyonun uzun dönem başarısızlığına yol

açabilmektedir. Günümüzde monomer yapısında ve doldurucu teknolojilerinde önemli gelişmeler sağlanmış olsa da polimerizasyon büzülmesi tam olarak elimine edilememiştir. Buna karşın uygun materyal seçimi, tabakalama tekniğinin kullanılması, ışık uygulama protokolünün doğru planlanması ve düşük C-faktörü sağlayan kavite tasarımlarının tercih edilmesi sayesinde, büzülmeye bağlı klinik sorunlar anlamlı ölçüde azaltılabilmektedir. Bu nedenle büzülme mekanizmasının anlaşılması, uygun ölçüm yöntemleri ile objektif olarak değerlendirilmesi ve elde edilen bulguların klinik stratejilere yansıtılması, kompozit rezin restorasyonlarının uzun dönem performansını artırmada temel bir gereklilik haline gelmiştir.

Polimerizasyon büzülmesini değerlendirmek için geliştirilen yöntemler incelendiğinde, tek bir “altın standart” ölçüm tekniğinden söz etmek mümkün değildir. İncelenmek istenen parametreye ve klinik senaryoya bağlı olarak en uygun yöntemin seçilmesi, hatta gerektiğinde birden fazla tekniğin birlikte kullanılması, elde edilen verilerin klinik gerçeklikle daha sağlıklı ilişkilendirilmesini sağlamaktadır. Literatürdeki bulgular, dental rezin esaslı kompozitlerin polimerizasyon kinetiğini ve büzülme davranışını etkileyen çok sayıda faktör bulunduğunu; ayrıca bu materyallerin polimerizasyon büzülmesini ve büzülme gerilimlerini ölçmek için tanımlanan yöntemlerin her birinin kendine özgü avantaj ve dezavantajlara sahip olduğunu göstermektedir. Bildirilen veriler arasındaki belirgin farklılıklar göz önüne alındığında, kompozit materyallerin mümkün olduğunca aynı analitik yöntemle değerlendirilerek karşılaştırılması daha güvenilir sonuçlar verecektir. Bununla birlikte, diş hekimliğinde rezin esaslı materyallerin hem büzülme gerilimini hem de sürekli hacimsel polimerizasyon büzülmesini standart, tekrarlanabilir ve klinik koşullarla daha uyumlu biçimde ölçebilecek ideal bir cihaz arayışının hâlen devam ettiği söylenebilir.

Kaynakça

Abbas, G., Fleming, G., Harrington, E., Shortall, A., & Burke, F. (2003). Cuspal movement and microleakage in premolar teeth restored with a packable composite cured in bulk or in increments. *Journal of dentistry*, 31(6), 437-444.

Aguiar, F. H. B., Lazzari, C. R., Lima, D. A. N. L., Ambrosano, G. M. B., & Lovadino, J. R. (2005). Effect of light curing tip distance and resin shade on microhardness of a hybrid resin composite. *Brazilian oral research*, 19, 302-306.

Al-Ahdal, K., Ilie, N., Silikas, N., & Watts, D. C. (2015). Polymerization kinetics and impact of post polymerization on the Degree of Conversion of bulk-fill resin-composite at clinically relevant depth. *Dental Materials*, 31(10), 1207-1213.

Al Sunbul, H., Silikas, N., & Watts, D. C. (2016). Polymerization shrinkage kinetics and shrinkage-stress in dental resin-composites. *Dental Materials*, 32(8), 998-1006.

Alster, D., Feilzer, A. J., de Gee, A. J., & Davidson, C. L. (1997). Polymerization contraction stress in thin resin composite layers as a function of layer thickness. *Dental Materials*, 13(3), 146-150.

Asmussen, E., & Peutzfeldt, A. (1999). Direction of shrinkage of light-curing resin composites. *Acta Odontologica Scandinavica*, 57(6), 310-315.

Ausiello, P. P., Ciaramella, S., Lanzotti, A., Ventre, M., Borges, A. L., Tribst, J. P., . . . Garcia-Godoy, F. (2019). Mechanical behavior of Class I cavities restored by different material combinations under loading and polymerization shrinkage stress. A 3D-FEA study. *Am. J. Dent*, 32(2), 55-60.

Baek, J. H., Na, J., Lee, B. H., Choi, E., & Son, W. S. (2009). Optical approach to the periodontal ligament under orthodontic tooth movement: a preliminary study with optical coherence tomography. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 135(2), 252-259.

Barszczewska-Rybarek, I. M. (2019). A guide through the dental dimethacrylate polymer network structural characterization and interpretation of physico-mechanical properties. *Materials*, 12(24), 4057.

Bowen, R. (1967). Adhesive bonding of various materials to hard tooth tissues. VI. Forces developing in direct-filling materials during hardening. *The Journal of the American Dental Association*, 74(3), 439-445.

Braga, R. R., & Ferracane, J. (2002). Contraction stress related to degree of conversion and reaction kinetics. *Journal of dental research*, 81(2), 114-118.

Campbell, P., Johnston, W. M., & O'brien, W. (1986). Light scattering and gloss of an experimental quartz-filled composite. *Journal of dental research*, 65(6), 892-894.

Charbeneau, G. T. (1988). Principles and practice of operative dentistry. (*No Title*).

Charton, C., Falk, V., Marchal, P., Pla, F., & Colon, P. (2007). Influence of Tg, viscosity and chemical structure of monomers on shrinkage stress in light-cured dimethacrylate-based dental resins. *Dental Materials*, 23(11), 1447-1459.

Chen, M.-H., Chen, C.-R., Hsu, S.-H., Sun, S.-P., & Su, W.-F. (2006). Low shrinkage light curable nanocomposite for dental restorative material. *Dental Materials*, 22(2), 138-145.

Chung, C.-M., Kim, J.-G., Kim, M.-S., Kim, K.-M., & Kim, K.-N. (2002). Development of a new photocurable composite resin with reduced curing shrinkage. *Dental Materials*, 18(2), 174-178.

Condon, J., & Ferracane, J. (1998). Reduction of composite contraction stress through non-bonded microfiller particles. *Dental Materials*, 14(4), 256-260.

Condon, J. R., & Ferracane, J. L. (2002). Reduced polymerization stress through non-bonded nanofiller particles. *Biomaterials*, 23(18), 3807-3815.

Daronch, M., Rueggeberg, F., & De Goes, M. (2005). Monomer conversion of pre-heated composite. *Journal of dental research*, 84(7), 663-667.

Davidson, C., De Gee, A., & Feilzer, A. (1984). The competition between the composite-dentin bond strength and the polymerization contraction stress. *Journal of dental research*, 63(12), 1396-1399.

De Gee, A., Feilzer, A., & Davidson, C. (1993). True linear polymerization shrinkage of unfilled resins and composites determined with a linometer. *Dental Materials*, 9(1), 11-14.

de Melo Monteiro, G. Q., Montes, M. A. J. R., Rolim, T. V., de Oliveira Mota, C. C. B., Kyotoku, B. d. B. C., Gomes, A. S. L., & de Freitas, A. Z. (2011). Alternative methods for determining shrinkage in restorative resin composites. *Dental Materials*, 27(8), e176-e185.

Dewaele, M., Truffier-Boutry, D., Devaux, J., & Leloup, G. (2006). Volume contraction in photocured dental resins: the shrinkage-conversion relationship revisited. *Dental Materials*, 22(4), 359-365.

Feilzer, A., De Gee, A., & Davidson, C. (1989). Increased wall-to-wall curing contraction in thin bonded resin layers. *Journal of dental research*, 68(1), 48-50.

Feilzer, A., De Gee, A., & Davidson, C. (1993). Setting stresses in composites for two different curing modes. *Dental Materials*, 9(1), 2-5.

Feilzer, A. J., De Gee, A. J., & Davidson, C. (1987). Setting stress in composite resin in relation to configuration of the restoration. *Journal of dental research*, 66(11), 1636-1639.

Ferracane, J., Aday, P., Matsumoto, H., & Marker, V. (1986). Relationship between shade and depth of cure for light-activated dental composite resins. *Dental Materials*, 2(2), 80-84.

Ferracane, J., & Greener, E. (1984). Fourier transform infrared analysis of degree of polymerization in unfilled resins—methods comparison. *Journal of dental research*, 63(8), 1093-1095.

Ferracane, J. L. (2011). Resin composite—State of the art. *Dental Materials*, 27(1), 29-38.

Fleming, G., Cara, R., Palin, W., & Burke, F. (2007). Cuspal movement and microleakage in premolar teeth restored with resin-based filling materials cured using a ‘soft-start’ polymerisation protocol. *Dental Materials*, 23(5), 637-643.

Flury, S., Peutzfeldt, A., & Lussi, A. (2014). Influence of increment thickness on microhardness and dentin bond strength of bulk fill resin composites. *Dental Materials*, 30(10), 1104-1112.

Gajewski, V. E., Pfeifer, C. S., Fróes-Salgado, N. R., Boaro, L. C., & Braga, R. R. (2012). Monomers used in resin composites: degree of conversion, mechanical properties and water sorption/solubility. *Brazilian dental journal*, 23, 508-514.

Gao, B.-T., Lin, H., Zheng, G., Xu, Y.-X., & Yang, J.-L. (2012). Comparison between a silorane-based composite and methacrylate-based composites: shrinkage characteristics, thermal properties, gel point and vitrification point. *Dental Materials Journal*, 31(1), 76-85.

Ghavami-Lahiji, M., & Hooshmand, T. (2017). Analytical methods for the measurement of polymerization kinetics and stresses of dental resin-based composites: A review. *Dental Research Journal*, 14(4), 225-240.

Gonçalves, F., Azevedo, C. L., Ferracane, J. L., & Braga, R. R. (2011). BisGMA/TEGDMA ratio and filler content effects on shrinkage stress. *Dental Materials*, 27(6), 520-526.

Gorgen, V. A., & Guler, C. (2015). Residual Monomer in Dentistry: A Literature Review [Diş Hekimliğinde Artık Monomerler: Bir Literatür Derlemesi]. *Medicine Science*, 4(1), 2024-2038.

Guiraldo, R. D., Consani, S., Consani, R. L. X., Berger, S. B., Mendes, W. B., & Sinhoreti, M. A. C. (2009). Light energy transmission through composite influenced by material shades. *The Bulletin of Tokyo Dental College*, 50(4), 183-190.

Habib, E., Wang, R., Wang, Y., Zhu, M., & Zhu, X. (2016). Inorganic fillers for dental resin composites: present and future. *ACS biomaterials science & engineering*, 2(1), 1-11.

Haenel, T., Hausnerová, B., Steinhaus, J., Price, R. B., Sullivan, B., & Moeginger, B. (2015). Effect of the irradiance distribution from light curing units on the local micro-hardness of the surface of dental resins. *Dental Materials*, 31(2), 93-104.

Hirata, R., Clozza, E., Giannini, M., Farrokhmanesh, E., Janal, M., Tovar, N., . . . Coelho, P. G. (2015). Shrinkage assessment of low shrinkage composites using micro-computed tomography.

Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials, 103(4), 798-806.

Ikemura, K., & Endo, T. (2010). A review of the development of radical photopolymerization initiators used for designing light-curing dental adhesives and resin composites. *Dental Materials Journal*, 29(5), 481-501.

Ilie, N., & Hickel, R. (2011). Resin composite restorative materials. *Australian dental journal*, 56, 59-66.

Jongsma, L. A., & Kleverlaan, C. J. (2015). Influence of temperature on volumetric shrinkage and contraction stress of dental composites. *Dental Materials*, 31(6), 721-725.

Kamalak, H., & Kamalak, A. (2018). Evaluation of polymerization shrinkage of dental composites by microcomputed tomography. *Biomed Res*, 29, 844-852.

Lau, A., Li, J., Heo, Y. C., & Fok, A. (2015). A study of polymerization shrinkage kinetics using digital image correlation. *Dental Materials*, 31(4), 391-398.

Leprince, J. G., Palin, W. M., Hadis, M. A., Devaux, J., & Leloup, G. (2013). Progress in dimethacrylate-based dental composite technology and curing efficiency. *Dental Materials*, 29(2), 139-156.

Lotfy, M., Mahmoud, N. A., & Riad, M. I. (2022). Effect of preheating on polymerization shrinkage strain of BIS-GMA free and containing resin composite restorative materials (in vitro study). *Bulletin of the National Research Centre*, 46(1), 74.

Mahn, E. (2013). Clinical criteria for the successful curing of composite materials. *Revista clínica de periodoncia, implantología y rehabilitación oral*, 6(3), 148-153.

Malhotra, N., & Kundabala, M. (2010). Light-curing considerations for resin-based composite materials: a review. Part I. *CompendContinEduc Dent*, 31(7), 498-505.

McCulloch, A., & Smith, B. (1986). In vitro studies of cuspal movement produced by adhesive restorative materials. *British dental journal*, 161(11), 405-409.

Mills, R., Jandt, K., & Ashworth, S. (1999). Dental composite depth of cure with halogen and blue light emitting diode technology. *British dental journal*, 186(8), 388-391.

Murray, G. A., Yates, J. L., & Newman, S. M. (1981). Ultraviolet light and ultraviolet light-activated composite resins. *The Journal of prosthetic dentistry*, 46(2), 167-170.

Oberholzer, T. G., Grobler, S. R., Pameijer, C. H., & Rossouw, R. J. (2001a). A modified dilatometer for determining volumetric polymerization shrinkage of dental materials. *Measurement Science and Technology*, 13(1), 78.

Oberholzer, T. G., Grobler, S. R., Pameijer, C. H., & Rossouw, R. J. (2001b). A modified dilatometer for determining volumetric polymerization shrinkage of dental materials. *Measurement Science and Technology*, 13(1), 78.

Park, S.-H., Krejci, I., & Lutz, F. (1999). Consistency in the amount of linear polymerization shrinkage in syringe-type composites. *Dental Materials*, 15(6), 442-446.

Park, S. H., Krejci, I., & Lutz, F. (2002). Microhardness of resin composites polymerized by plasma arc or conventional visible light curing. *Operative dentistry*, 27(1), 30-37.

Penn, R. (1986). A recording dilatometer for measuring polymerization shrinkage. *Dental Materials: Official Publication of the Academy of Dental Materials*, 2(2), 78-79.

Prati, C., Chersoni, S., Montebugnoli, L., & Montanari, G. (1999). Effect of air, dentin and resin-based composite thickness on light intensity reduction. *American journal of dentistry*, 12(5), 231-234.

Price, R., Ehrnford, L., Andreou, P., & Felix, C. A. (2003). Comparison of quartz-tungsten-halogen, light-emitting diode, and plasma arc curing lights. *The journal of adhesive dentistry*.

Price, R. B., Labrie, D., Rueggeberg, F. A., & Felix, C. M. (2010). Irradiance differences in the violet (405 nm) and blue (460 nm) spectral ranges among dental light-curing units. *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry*, 22(6), 363-377.

Price, R. B., Labrie, D., Whalen, J. M., & Felix, C. M. (2011). Effect of distance on irradiance and beam homogeneity from 4 light-emitting diode curing units. *Journal (Canadian Dental Association)*, 77, b9-b9.

Price, R. B., Murphy, D. G., & Dérand, T. (2000). Light energy transmission through cured resin composite and human dentin. *Quintessence international*, 31(9).

Rueggeberg, F. (1999). Contemporary issues in photocuring. *Compendium of continuing education in dentistry*.(Jamesburg, NJ: 1995). *Supplement*(25), S4-15; quiz S73.

Rueggeberg, F. A., Caughman, W. F., Curtis, J. W., Davis, H. C., Rueggeberg, F., Caughman, W., . . . Davis, H. (1994). A predictive model for the polymerization of photo-activated resin composites. *International Journal of Prosthodontics*, 7(2).

Sakaguchi, R., Sasik, C., Bunczak, M., & Douglas, W. H. (1991). Strain gauge method for measuring polymerization contraction of composite restoratives. *Journal of dentistry*, 19(5), 312-316.

Sakaguchi, R. L., & Powers, J. M. (2012). Fundamentals of materials science. *Craig's Restorative Dental Materials*. Mosby, Inc, 33-81.

Sangra, A., Farooq, R., Rashid, A., & Ahmad, F. (2020). Comparative evaluation of interfacial gaps at the dentin-restorative interface using different bulk fill composites through optical coherence tomography.

Satterthwaite, J. D., Maisuria, A., Vogel, K., & Watts, D. C. (2012). Effect of resin-composite filler particle size and shape on shrinkage-stress. *Dental Materials*, 28(6), 609-614.

Sharp, L. J., Choi, I. B., Lee, T. E., Sy, A., & Suh, B. I. (2003). Volumetric shrinkage of composites using video-imaging. *Journal of dentistry*, 31(2), 97-103.

Sobrinho, L. C., De Goes, M., Consani, S., Sinhoreti, M., & Knowles, J. (2000). Correlation between light intensity and exposure time on the hardness of composite resin. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 11(6), 361-364.

Swain, M. V., & Xue, J. (2009). State of the art of Micro-CT applications in dental research. *International journal of oral science*, 1(4), 177-188.

Tiba, A., Charlton, D. G., Vandewalle, K. S., & Ragain Jr, J. C. (2005). Comparison of two video-imaging instruments for measuring volumetric shrinkage of dental resin composites. *Journal of dentistry*, 33(9), 757-763.

Topa-Skwarczyńska, M., & Ortyl, J. (2023). Photopolymerization shrinkage: strategies for reduction, measurement methods and future insights. *Polymer Chemistry*, 14(18), 2145-2158.

Wang, Z., Landis, F. A., Giuseppetti, A. A., Lin-Gibson, S., & Chiang, M. Y. (2014). Simultaneous measurement of polymerization stress and curing kinetics for photo-polymerized composites with high filler contents. *Dental Materials*, 30(12), 1316-1324.

Watts, D., & Alnazzawi, A. (2014). Temperature-dependent polymerization shrinkage stress kinetics of resin-composites. *Dental Materials*, 30(6), 654-660.

Watts, D. C., & Cash, A. (1991). Determination of polymerization shrinkage kinetics in visible-light-cured materials: methods development. *Dental Materials*, 7(4), 281-287.

Williams, P., & Johnson, L. (1993). Composite resin restoratives revisited. *Journal (Canadian Dental Association)*, 59(6), 538-543.

Xu, T., Li, X., Wang, H., Zheng, G., Yu, G., Wang, H., & Zhu, S. (2020). Polymerization shrinkage kinetics and degree of conversion of resin composites. *Journal of oral science*, 62(3), 275-280.

Yamamoto, T., Ferracane, J. L., Sakaguchi, R. L., & Swain, M. V. (2009). Calculation of contraction stresses in dental composites by analysis of crack propagation in the matrix surrounding a cavity. *Dental Materials*, 25(4), 543-550.

Yoon, S., Jung, H.-J., Knowles, J., & Lee, H.-H. (2021). Digital image correlation in dental materials and related research: A review. *Dental Materials*, 37(5), 758-771.

Zhang, N., & Xie, C. (2020). Polymerization shrinkage, shrinkage stress, and mechanical evaluation of novel prototype dental composite resin. *Dental Materials Journal*, 39(6), 1064-1071.

DIŞ HEKİMLİĞİNDE METAL OKSİT NANOPARÇACIKLARI

**MELİKE KARABULUT⁵
EMİNE ŞİRİN KARAARSLAN⁶**

Giriş

Metaller, yüksek iletkenliğe sahip, parlak ve şekillendirilebilir özellikleriyle bilinen elementlerdir. Bu özelliklerin temelinde, kristal yapılarında yer alan metalik bağlar bulunur (Petrucci ve ark., 1977). Metallerin antimikrobiyal amaçlarla kullanımı çok eskiye dayanır. Gümüş, bakır, altın, titanyum ve çinko gibi metaller, kendilerine özgü etki mekanizmaları ve mikrobiyal etki alanlarıyla öne çıkmaktadır. Tıp tarihindeki bazı önemli ilerlemeler, bu metallerin mikrobiyal ajanlara karşı gösterdiği etkiler sayesinde mümkün olmuştur (O'shea, 1990).

Metal oksitler, metal elementlerinin en yaygın bileşik türlerinden biridir. Nanoparçacık (NP) formundaki metal oksitler; yüzey etkileşimleri, manyetik özellikler, optik ve elektronik

⁵Arş. Gör. Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Diş Hekimliği Fakültesi, Restoratif Diş Tedavisi AD. Orcid:0009-0006-4614-241X

⁶ Doç. Dr. Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Diş Hekimliği Fakültesi, Restoratif Diş Tedavisi AD. Orcid: 0000-0002-6298-2463

davranışlar, ligandlarla bağlanma kapasitesi, termal dayanıklılık, antimikrobiyal etkiler ve biyouyum gibi pek çok dikkat çekici özelliğe sahiptir. Bu nedenle, bu materyaller; birçok alanda kullanılmıştır (Anderson ve ark., 2019; Bibi ve ark., 2019; Li ve ark., 2018; Oun ve ark., 2020; Sarkar ve ark., 2012).

Günümüzde nanoteknoloji, gösterdiği hızlı ilerlemeyle birçok bilimsel ve teknolojik gelişmenin temelini oluşturan kritik bir disiplin konumuna yükselmiştir (Nikkerdar ve ark., 2024). Bu disiplinin temel yapı taşlarından biri olan NP'lar, hacimli yapıdaki geleneksel malzemelere göre daha farklı ve gelişmiş fiziksel, kimyasal ve biyolojik davranışlar ortaya koymaktadır (Agarwal ve ark., 2019; Mallakpour & Madani, 2015). Metal oksit NP'lar, antimikrobiyal özellikleri açısından önemli potansiyele sahiptir; zira alışılmışın dışında kristal şekillerle üretilebilmekte ve bu yapılar, yüksek yüzey alanlarının yanı sıra birçok aktif kimyasal bölge içermektedir (Stoimenov ve ark., 2002).

Metal ve metal oksit NP'lar, nanoteknoloji tabanlı uygulamalarda en sık tercih edilen yapılardan biridir (Nikolova & Chavali, 2020). Bu yapıların tıp ve diş hekimliği gibi biyomedikal alanlardaki kullanım potansiyeli oldukça geniştir; özellikle diş hekimliğinde, dental materyallerin mekanik, kimyasal ve biyolojik özelliklerini iyileştirmek amacıyla bu NP'ların entegrasyonu yaygınlaşmaktadır (Safaei & Moghadam, 2022).

Örneğin, bakır oksit (CuO), titanyum dioksit (TiO₂), zirkonyum dioksit (ZrO₂), çinko oksit (ZnO) ve silisyum dioksit (SiO₂) gibi metal oksit NP'ları, protez taban materyallerinin özelliklerini ve klinik başarısını geliştirmek için kullanılmaya başlanmıştır.(Ghahremani ve ark., 2017; Raouf ve ark., 2019; Salman ve ark., 2017; Sharan ve ark., 2017)

Bu bölümde, metal oksitlerin temel karakteristiklerini açıklayarak, diş hekimliğinde sahip oldukları kullanım alanlarını kapsamlı biçimde değerlendirmek amaçlanmaktadır.

Temel Metal Oksit Nanoparçacıkları ve Diş Hekimliğinde Kullanım Alanları

Titanyum Dioksit

Titanyum dioksit (TiO_2), beyaz renkte ve düşük çözünürlükte bir bileşik olup, tıp, ilaç ve kozmetik sektörlerinde çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır. Ayrıca, fotokatalitik antimikrobiyal ajan olarak etkinliği literatürde ortaya konmuştur (Baan ve ark., 2006; Bavykin ve ark., 2006; Blake ve ark., 1999; Garimella & Eltorai, 2017).

Yaygın konsantrasyonlarda biyolojik olarak uyumlu kabul edilen TiO_2 'nin, nano boyutta sitokin salınımını uyarak inflamasyon oluşturabileceği ve bu durumun sağlık açısından risk taşıyabileceği yönünde artan kaygılar mevcuttur (Yazdi ve ark., 2010). Nanoyapılı TiO_2 , 1966 yılında Amerikan Gıda ve İlaç Dairesi (FDA) tarafından gıda ve ilaçla temas eden ürünlerde kullanım amacıyla onaylanmıştır (Bonetta ve ark., 2013).

Dünya genelinde en yaygın kronik hastalıklardan biri olan diş çürüğü, ağız ve sistemik sağlık üzerinde olumsuz sonuçlara yol açarak, toplum sağlığı açısından önemli bir mali ve sağlık yüküne neden olmaktadır (Weintraub & Burt, 1985). Ortaya çıkan bu klinik soruna yönelik çözüm arayışlarında, TiO_2 NP'lerinin dental rezin sistemlerine ilavesi tercih edilen bir strateji olmuştur. Yayımlanan çeşitli çalışmalarda, TiO_2 NP'lerinin rezin esaslı matrislere eklenmesinin; kompozitler, fissür örtücüler, astar ve baz materyalleri, adeziv sistemler ve dental simanlar gibi pek çok materyalde belirgin antibakteriyel etki sağladığı bildirilmiştir (Garcia-Contreras ve ark., 2015; Jafari ve ark., 2020).

Rezin kompozitlere %0, %1, %5 ve %10 oranlarında TiO₂ NP'ları eklenmiş ve bu modifikasyonun hem mekanik hem de antimikrobiyal özellikler üzerindeki etkileri incelenmiştir. Araştırma bulguları, NP ilavesinin *Streptococcus mutans* (*S. mutans*) ve *Streptococcus sanguinis* (*S. sanguinis*) gibi oral bakterilerin koloni oluşumunu anlamlı düzeyde baskıladığını ortaya koymuştur (Sodagar ve ark., 2017).

TiO₂ NP'ları, çürüklerin önlenmesine yönelik yapılan araştırmalarda en çok ilgi gören titanyum esaslı nanomateryallerden biridir. Bu NP'ların cam iyonomer simanla birleştirilmesi, çürüklerin engellenmesinde potansiyel bir restoratif seçenek olarak değerlendirilmiştir (Elsaka ve ark., 2011).

Çeşitli çalışmalar, TiO₂ NP'larının geleneksel cam iyonomer simanların hem mekanik performansını hem de bakterisit özelliklerini iyileştirdiğini ortaya koymuştur. Elsaka ve ekibi tarafından yürütülen araştırmada, %3 ve %5 (a/a) oranlarında TiO₂ nanoparçacığı ile modifiye edilen geleneksel cam iyonomerlerin, *S. mutans*'a karşı belirgin antibakteriyel etki gösterdiği ve aynı zamanda kırılma tokluğu, eğilme direnci ile basma dayanımı gibi mekanik parametrelerinde anlamlı artış sağlandığı rapor edilmiştir (Elsaka ve ark., 2011). Cam iyonomer simana TiO₂ NP'larının eklenmesiyle, antibakteriyel etkinlik, mikrosertlik ile eğilme ve basma direncinde anlamlı artış sağlanmış; buna karşın mine ve dentine adezyon özelliklerinde olumsuz bir değişiklik gözlenmemiştir (Garcia-Contreras ve ark., 2015).

Kök kanalı boşluğunun, irrigasyon solüsyonları kullanılarak etkin bir şekilde temizlenebileceği ve biyofilm tabakalarının bu yöntemle daha etkili uzaklaştırılabileceği bilinmektedir. Endodontistler uzun yıllardır farklı irrigasyon solüsyonlarından yararlanmış olmakla birlikte, son yıllarda toksik olmayan yeni bir alternatif olarak TiO₂ NP'ları gündeme gelmiştir. Jowkar ve çalışma

arkadaşlarının bulgularına göre, gümüş, çinko oksit ve TiO₂ NP'ları içeren nihai kök kanal irrigasyon solüsyonlarının uygulanması, endodontik tedavi görmüş köklerin kırılma direncini artırmıştır (Jowkar ve ark., 2020).

Mineral trioksit agregalar (MTA), birçok zor endodontik uygulamada tercih edilmektedir. Bu materyalin fizikokimyasal ve mekanik özelliklerini geliştirmek amacıyla çinko, gümüş ve TiO₂ NP'ları eklenmişti (Dsouza ve ark., 2016). Samiei ve çalışma arkadaşları, Mineral Trioksit Agregasına %1 ağırlık oranında (w/w) TiO₂ NP'ları eklemenin basma dayanımı, itme kuvveti bağlanma dayanımı ve çalışma süresi üzerinde belirgin şekilde olumlu etkiler sağladığını ortaya koymuştur (Samiei ve ark., 2017).

Çinko Oksit

Çinko, kas, kemik, cilt ve dişin sert dokularında bulunan ve bu dokuların sağlığı için hayati öneme sahip temel bir eser elementtir (Baek ve ark., 2012). Çinko oksit (ZnO), suda çözünmeyen beyaz renkli bir inorganik bileşiktir ve ZnO kimyasal formülüne sahiptir (Ordinola-Zapata ve ark., 2015).

Diş hekimliğinde ZnO NP'nin yaygın kullanımının nedenleri; benzersiz optik, manyetik, morfolojik, elektriksel, katalitik, mekanik ve fotokimyasal özelliklere sahip olmasıdır. Bu zellikler, parçacık boyutunun küçültülmesi, katkılı bileşiklerin eklenmesi veya sentez koşullarına müdahale edilmesi yoluyla kolaylıkla değiştirilebilir. Özellikle parçacık boyutu azaldıkça, bu istenen fonksiyonlarda belirgin gelişmeler gözlemlenmektedir (Baek ve ark., 2012).

ZnO'nun makro ve mikro boyutlu parçacıkları, restoratif materyallerde inorganik dolgu öğesi olarak değerlendirilmektedir. Özellikle kompozit reçineler, adeziv sistemler, endodontik patlar ve çeşitli simanlar bu araştırmalarda ne çıkan materyallerdir

(Ordinola-Zapata ve ark., 2015) (Garcia ve ark., 2021). ZnO nanopartikülleri üzerine yapılan çalışmalar; mikroplara karşı koruma, dişte yeniden mineralizasyon sağlama ve kanser hücrelerine karşı potansiyel etki gibi pek çok yenilikçi kullanım alanı nedeniyle devam etmektedir (Carrouel ve ark., 2020; Wiesmann ve ark., 2020).

ZnO nanopartikülleri; rejeneratif tedavilerden restoratif, endodontik ortodonti, implant ve protetik uygulamalara kadar diş hekimliğinin çeşitli alanlarında değerlendirilmektedir (Moradpoor ve ark., 2021). ZnO nanopartiküllerinin dental restoratif materyallerin mekanik ve antibakteriyel performansını artırdığı; *S. mutans*'ın tutunma ve büyümesinin engellendiği, üstelik düşük oranlarda kullanımda mekanik özelliklerin korunabildiği ifade edilmiştir. (Wang ve ark., 2019). Teymoornezhad ve çalışma arkadaşlarının yaptığı araştırmada, akışkan rezin kompozit içerisine %3 ZnO NP ilavesinin mikro-sızıntıyı azalttığı saptanmıştır (Teymoornezhad ve ark., 2016).

Yapılan çalışmalara göre, rezin esaslı dental kompozitlere ağırlıkça %10 ZnO NP eklenmesinin *S. sobrinus* üzerinde güçlü antibakteriyel etki gösterdiği ve bakteri biyofilm oluşumunu önemli ölçüde engellediği bildirilmiştir (Aydin Sevinç & Hanley, 2010). Ayrıca literatürde ZnO nanopartiküllerinin *S. mutans* ve *Lactobacillus* türlerine de etkili antibakteriyel aktivite sergilediği görülmüştür (Kasraei ve ark., 2014).

Cam iyonomer simana (GIC) ZnO NP ilavesi, *S. mutans*'a karşı antibakteriyel etkinliği belirgin biçimde artırmış, ancak mekanik özelliklerde herhangi bir değişime yol açmamıştır (Nivedhitha ve ark., 2014). Çeşitli araştırmalarda, ZnO NP ilavesinin dental adeziv sistemlerin bağlanma kuvvetini etkilemeden antimikrobiyal özelliklerini belirgin şekilde geliştirdiği rapor edilmiştir (Gutiérrez ve ark., 2019; Saffarpour ve ark., 2016).

Bazı kaynaklar, endodontik enfeksiyonun giderilmesinde kullanılan irrigasyon solüsyonlarının bileşimi ve yoğunluğunun belirleyici bir faktör olduğunu belirtmektedir (Jowkar ve ark., 2020). Kök kanal irrigasyon solüsyonlarının sınırlı antimikrobiyal etkisi nedeniyle, endodontik tedavilerde kullanılmak üzere yeni nesil NP içerikli çözeltiler tasarlanmıştır (De Almeida ve ark., 2018). Jowkar ve ark. tarafından yapılan bir çalışmada, ZnO NP'ler EDTA solüsyonuna eklendiğinde, köklerin kırılma direncini artırdığı bildirilmiştir (Jowkar ve ark., 2020).

Endodontik uygulamalarda, farklı tür ve özelliklere sahip kök kanal dolgu materyalleri kullanılmaktadır (Kontakiotis ve ark., 2007). ZnO NP'ları, polietilen glikol ile veya kalsiyum hidroksit ile kombine edilip kök kanalına yerleştirildiğinde; *Escherichia coli*, *Candida albicans*, *Klebsiella pneumoniae*, *Pseudomonas aeruginosa* ve *Staphylococcus aureus* üzerinde belirgin düzeyde antimikrobiyal etki ortaya koymuştur (İbrahim ve ark., 2017).

Hadi ve ekibi, ZnO NP'ları içeren endodontik dolgu patlarının *Candida* ve *E. faecalis*'in gelişimini durdurma potansiyelini değerlendirmiştir. Araştırma sonuçları, kullanılan tüm konsantrasyonlarda bu NP'ların *Candida* ile *E. faecalis* türlerine karşı belirgin derecede güçlü antimikrobiyal etki gösterdiğini ortaya koymuştur (Hadi & Al-Mizraqchi, 2019).

ZnO NP'ları içeren kök kanal dolgu patları, pulpa odası ile apikal bölgedeki mikrobiyal sızıntı ve invazyonu engelleme özellikleri sayesinde tercih edilen materyaller arasındadır (Shrestha & Kishen, 2016) (Versiani ve ark., 2016) (Samiei ve ark., 2016). Kishen ve ekibinin bulgularına göre, ZnO, kitosan/ ZnO bileşimi ya da kitosan kaplı ZnO gibi antibakteriyel NP'lar, *E. faecalis*'in yüzeye tutunma oranını belirgin şekilde azaltmıştır (Kishen ve ark., 2008).

ZnO NP'ları, özellikle rejeneratif endodonti uygulamalarında gelecek vadede biyomalzemeler arasında

görülmektedir (Kozusko ve ark., 2017). Yönlendirilmiş doku rejenerasyonu (GTR) kapsamında gerçekleştirilen periodonsiyum onarım çalışmalarında, elektro-eğirme tekniği ile elde edilen polikaprolakton (PCL)–jelatin (GEL) karışımı membranlara ZnO nanopartikül ilavesinin, *S. aureus*'un hem planktonik hem de biyofilm formundaki çoğalmasını kayda değer biçimde engellediği belirtilmiştir (Prado-Prone ve ark., 2020).

PMMA temelli protez bazlarına ZnO NP'lerinin dahil edilmesiyle, konak hücrelere toksisite oluşturmaksızın *C. albicans*'ın biyofilm oluşturmalarının önüne geçildiği saptanmıştır. Bu sonuç, söz konusu materyalin gelecekte protez bazında tercih edilebilecek yeni bir alternatif olabileceğini göstermektedir (Cierech ve ark., 2019).

NiTi teller üzerine uygulanan ZnO nanopartikül kaplamalarının, sürtünme kuvvetini %21 oranında düşürdüğü ve *S. mutans*'a karşı antimikrobiyal etki sağladığı rapor edilmiştir (Kachoei ve ark., 2016). ZnO NP kaplamalı teller ve braketler, bakteri yükünü azaltırken aynı zamanda sürtünmeyi düşürerek tedavi kontrolünü optimize etmektedir (Ahmad ve ark., 2016). Kitosan veya ZnO NP kaplanmış paslanmaz çelik teller ve braketler ise tel-braket arasındaki sürtünmeyi düşürerek ankrajın korunmasına katkıda bulunur ve kök rezorpsiyonu riskini azaltır (Elhelbawy & Ellaithy, 2021).

Zirkonyum Dioksit

Zirkonyum dioksit (ZrO_2), değişik bakteri ve fungus türleri üzerinde antimikrobiyal aktivite göstermektedir (Gowri ve ark., 2014; Jangra ve ark., 2012). Ayrıca, doğal dentisyonun estetik görünümünü yansıtabilme kapasitesine sahiptir. (Della Bona ve ark., 2015) Dolayısıyla, optik ve estetik niteliklerin geliştirilmesi amacıyla çok sayıda ticari rezin kompozit formülasyonunda zirkonyum dioksit kullanılmaktadır (Kolb ve ark., 2020).

TiO₂, alüminyum oksit (Al₂O₃) ve zirkonyum oksit (ZrO₂) gibi metal oksitler, kompozit reçine karışımına çok küçük miktarlarda eklenebilen opaklaştırıcı ajanlardır. Bu opaklaştırıcıların kırılma indisleri, reçine matriksinin kırılma indisine göre önemli ölçüde farklılık gösterir.

Kırılma indisine ek olarak, dolgu partiküllerinin şekli ve boyutunun da ışık geçirgenliği ve deneysel kompozit rezinlerin renk özellikleri üzerinde anlamlı etkiler gösterdiği belirtilmiştir. Düzensiz şekilli ve küçük boyutlu opaklaştırıcılar içeren materyaller, daha büyük ve küresel şekilli dolgular içeren kompozitlere kıyasla daha yüksek ışık geçirgenliği ve saçılma açısı dağılımı sergilemektedir (Arikawa ve ark., 1998; Lee, 2007).

Dental primer ve adeziv içerisine %5, %10, %15 ve %20 düzeylerinde ZrO₂ eklenmesi, mikrokerilim bağ dayanıklılığını belirgin biçimde artırmıştır. Özellikle %20 oranında primere ilave edildiğinde 41.1 ± 12.9 MPa ile en yüksek değer elde edilmiş olup, bu sonuç kontrol grubunun 25.1 ± 10.9 MPa değerine kıyasla istatistiksel olarak anlamlı şekilde daha yüksek bulunmuştur (Lohbauer ve ark., 2010).

Son dönemlerde endodontide yoğun ilgi gören ZrO₂, özgün özelliklere sahip bir kimyasal oksittir. ZrO₂ nanopartikülleri; üstün kırılma tokluğu, yüksek dayanım, korozyona karşı direnç, biyouyumlu yapı ve düşük düzeyde sitotoksosite gibi öne çıkan fiziko-kimyasal ve mekanik nitelikler sergilemektedir (Elsaka ve ark., 2011).

Suda çözünmeyen yapıları sayesinde ZrO₂ NP'ları, mikroorganizmaların yüzeye bağlanmasını engellemektedir (Li & Coleman, 2014). Endodonti alanında, güçlü antimikrobiyal aktiviteleri nedeniyle ZrO₂ nanopartikülleri, özellikle *E. faecalis* gibi oral patojenlere karşı sıklıkla antibakteriyel ajan olarak tercih edilmektedir (Elsaka ve ark., 2011). Yapılan çalışmalar, bu

nanopartiküllerin *E. faecalis* başta olmak üzere çeşitli bakterilerin elimine edilmesinde etkili olabileceğini göstermiştir (Li ve ark., 2013).

Radyoopak NP içeren sealerların kök kanalı boyunca daha homojen ve düzenli bir mikroyapı sağladığı, Viapiana ve arkadaşlarının bulguları ile ortaya konmuştur. ZrO₂ NP'ları ile modifiye edilen Portland temelli ve epoksi rezin esaslı sealerların, apikal üçlü bölgede dentin tübüllerine daha derinlemesine ilerleyerek adezyon ve sızdırmazlık özelliklerini iyileştirdiği rapor edilmiştir (Viapiana ve ark., 2014)

Huang ve ekibinin çalışmasında, ZrO₂ NP'ları ile modifiye edilen biyocam esaslı kök kanal materyallerinin; artan radyoopaklık, gelişmiş akışkanlık ve daha ince sealer film tabakası sunduğu belirlenmiştir. (Huang ve ark., 2022) Hu ve ekibinin çalışmasında, ZrO₂ NP'lerinin 3 mm düzeyinde ideal radyoopaklık sağladığı ve bu değer ISO/ADA standartlarıyla uyumlu olduğu rapor edilmiştir (Huang ve ark., 2022).

Portland çimentosu tabanlı ve ZrO₂ ile niobyum oksit NP'ları içeren endodontik sealerlar üzerine yapılan Viapiana ve arkadaşlarının çalışması, bu materyallerin mekanik ve fiziko-kimyasal yönlerini incelemiştir. Elde edilen bulgular, söz konusu sealerların çözünürlüğünün düşük, akışkanlığının kabul edilebilir düzeyde ve basma dayanımının yeterli olduğunu; dolayısıyla klinik uygulama için gerekli koşulları yerine getirdiğini göstermiştir (Viapiana ve ark., 2014).

Periapikal dokularla sürekli temas eden kök kanal sealer'ları ve kök ucu dolgu materyallerinin biyoaktif karakter göstermesi klinik açıdan önemlidir Viapiana ve arkadaşlarının yürüttüğü çalışmada, Portland çimentosu–epoksi rezin–radyoopak ajan kombinasyonundan elde edilen yeni tip sealer'lara mikro ve nano boyutlu ZrO₂ parçacıkları eklenmiş ve bu materyallerin biyoaktivite

potansiyeli değerlendirilmiştir. AH Plus ve MTA Fillapex ile yapılan karşılaştırmalar sonucunda, yenilikçi sealer'ların partikül boyutu ile kimyasal özellikler arasında yalnızca zayıf bir ilişki bulunduğu belirlenmiştir (Bosso-Martelo ve ark., 2016).

Martelo ve ekibinin bulgularına göre, ZrO_2 NP'ları, kalsiyum silikat esaslı simanların fiziko-kimyasal özelliklerini mikropartikül formu ile karşılaştırıldığında anlamlı biçimde etkilememiştir (Bosso-Martelo ve ark., 2015). Gowri ve arkadaşları, ZrO_2 NP'ları ile modifiye edilen PMMA'nın, daha yüksek mekanik performans sergilediği ve *C.albicans*'ın yüzeye tutunma oranını azalttığını bildirmiştir (Gowri ve ark., 2014).

Grafen Oksit

Grafen oksit (GO), kendine özel tabakalı yapısı, geniş yüzey alanı ve çok sayıda oksijen içeren fonksiyonel grupları (hidroksil, karboksil vb.) bulunan iki boyutlu yeni bir karbon biyomalzeme olarak değerlendirilmektedir (Kiew ve ark., 2016).

GO'nun yapısında bulunan oksijenli gruplar, yüksek reaktivite göstererek yüzeyinin kolayca fonksiyonelleştirilmesine olanak tanır. Bu durum materyale gereksinime göre farklı özellikler kazandırma imkânı sağlar (Kumar ve ark., 2017). GO'nun keskin kenarlarının hücre zarlarını mekanik olarak zedelemesiyle ve oksijen içeren gruplarının neden olduğu oksidatif stres grafen oksite özgü antimikrobiyal özellikler kazandırır (Yang ve ark., 2017). Araştırmacıların çoğu, bu özelliklerinden dolayı GO'yu antimikrobiyal ajan olarak kullanmaktadır (Anand ve ark., 2019).

Dış hekimliği literatürüne bakıldığında, GO'nun implantların yüzey özelliklerinin geliştirilmesi, beyazlatma ajanlarının iyileştirilmesi, doku mühendisliği uygulamalarına katkı sağlanması, bakteriyel biyofilm oluşumunun engellenmesi ve rezin materyallerin

özelliklerinin artırılması gibi pek çok alanda önemli etkilere sahip olduğunu görmekteyiz (Tahriri ve ark., 2019).

GO, mekanik sağlamlık, kimyasal ve termal stabilite gibi dikkate değer özellikler sergilemekte; adezivlerle kombinasyonu ise materyale antibakteriyel nitelikler kazandırmaktadır. Yapılan bir çalışmada, GO'nun sekonder çürük riskini azaltmasının yanı sıra bağlanma dayanımını da artırabildiği rapor edilmiştir (Alshahrani ve ark., 2020).

Başka bir raporda, GO'nun RMGIC'ye eklenmesinin makaslama bağlanma dayanımını (SBS) iyileştirdiği belirtilmiştir (Al-Qahtani, 2021). GO, kompozit rezinlere eklendiğinde antibakteriyel etki sağlayabilir (Aydin Sevinç & Hanley, 2010, Zanni ve ark., 2016). Ancak, dolgu partiküllerinin opaklığı görünür ışığın iletimini kısıtlamakta ve bu durum kompozit materyallerin mekanik performansını da etkilemektedir (Beun ve ark., 2007).

GO'nun *Enterococcus faecalis*'e karşı belirgin antibakteriyel etki sergilediği ve kök dentinine bağlanarak yapısal değişikliklere yol açmadan biyofilm çoğalmasını inhibe ettiği gösterilmiştir [(Beun ve ark., 2007 , Martini ve ark., 2020)]. GO'nun etkinliğini artırmak amacıyla çeşitli materyallerle birlikte GO kompozitleri geliştirilmiş EDTA ve kitosan (CHIT) da bu bileşenler arasında test edilmiştir [(Karahan ve ark., 2018), (Priyadarsini ve ark., 2018)]. Daha önce incelenmiş kalsiyum florür ve gümüş kalsiyum florür endodontik sealantları üzerine GO ile yapılan modifikasyon değerlendirilmiş ve biyoaktivitenin, dentin sızdırmazlığının ve antibakteriyel etkinliğin arttığı gösterilmiştir (Nizami ve ark., 2022).

Araştırmacılar, GO'nun farklı materyallerle kombine ederek *in vitro* ortamda antikariyojenik etkisi gösterebileceğini bulmuşlardır.(Liu ve ark., 2022). GO-gümüş (Ag) ve GO-Ag-kalsiyum florür (GO-Ag-CaF₂) kombinasyonlarının dentin yıkımını önlediği ve *S. mutans* gelişimini inhibe ettiği belirlenmiştir (Nizami

ve ark., 2020). Khosalim ve arkadaşları, GO'nun hidroksiapatit mineralizasyonunu destekleyebileceğini ve dentin kesitlerinde nano sertlik artışını gözlemlemişlerdir (Khosalim ve ark., 2021). Mao ve arkadaşları ise GO-bakır nanokompozitlerin *Streptococcus mutans*'ın büyümesini engelleyebileceğini bulmuştur (Mao ve ark., 2021). GO, protez materyali olan polimetil metakrilat reçineyi geliştirmek için kullanılmış ve bu sayede *Streptococcus mutans*'a karşı etkili antibakteriyel aktivite sergilemiştir (Gamal ve ark., 2019).

GO kaplı titanyum implantların in vitro biyolojik etkinliği incelenmiş, GO'nun periodontal ligament kök hücrelerinin proliferasyonu ve farklılaşmasını artırdığı bulunmuştur (Zhou ve ark., 2016).

Titanyum yüzeyinin GO-Ag nanokompozit ile kaplanması, ***P. gingivalis*'e karşı %95,45 oranında antibakteriyel etki** göstermiş ve **bakteri yapışmasını %4,55'e kadar düşürmüştür**. Ayrıca bu kaplama, bakterilerin **hücre zarında bozulma, hücre ölümü (apoptoz)** gibi mikroyapısal ve biyolojik etkiler oluşturmıştır (Jin ve ark., 2017).

Çinko oksit ile fonksiyonlandırılmış grafen oksit-PEEK bileşimi, periopatojen bakteriler *P. gingivalis*, *F. nucleatum*, *S. sanguinis* ve *S. mutans* üzerinde belirgin antibakteriyel etki göstermiş ve oksidatif stres mekanizması aracılığıyla biyofilm oluşumunu etkili şekilde engellemiştir (Guo ve ark., 2021; Yang ve ark., 2022).

GO kaplı titanyum implantlar, hücre proliferasyonunu artırmış; ALP aktivitesini ve osteogenezle ilişkili genlerin ekspresyonunu yükseltmiştir (Zhou ve ark., 2016).

Li ve arkadaşları, GO kaplı titanyum implantların **daha fazla yeni kemik oluşumuna** yol açtığını ve implant ile çevresindeki

kemik dokusu arasında **daha az boşluk** oluştuğunu raporlamıştır (Li & Wang, 2020).

İpek fibroine eklenen GO ve rGO ile bir kompozit oluşturulmuş; bu yapı, PDL kök hücrelerinin çoğalmasını artırmış ve osteoblastik ile sementoblastik farklılaşmayı desteklemiştir (Vera-Sánchez ve ark., 2016).

GO ile kaplanan 3D kolajen iskele, sınıf II furkasyon defektli köpeklere uygulandığında, kaplanmamış iskeleye göre **daha fazla alveoler kemik, PDL-benzeri doku ve sement-benzeri doku oluşumu** sağlamıştır (Kawamoto ve ark., 2018).

Grafen oksit bazlı iskeleler hücre yapışmasını ve çoğalmasını destekledi, in vitro ve in vivo testlerde osteogenezi iyileştirdi (Nishida ve ark., 2016; Suo ve ark., 2019; Unnithan ve ark., 2017).

Wan ve arkadaşlarının (2011) çalışmasında, jelatin esaslı bir materyale %1 oranında GO ilavesiyle çekme dayanımında %84, Young modülünde ise %65 artış elde edilmiştir. Ayrıca, jelatin/GO kompozitinin biyolojik aktiviteyi artırdığı ve kalsiyum fosfat nanokristallerinin oluşumunu hızlandırdığı rapor edilmiştir (Wan ve ark., 2011). GO mikroflakeleri ile kalsiyum fosfat NP'lerinin oluşturduğu nanokompozitler, kök hücrelerin osteoblastlara dönüşümünü hızlandırıcı ortak bir etki göstermiştir (Tatavarty ve ark., 2014).

Bakır Oksit

Yarı iletken özellik gösteren Bakır (II) oksit (CuO), monoklinik kristal örgü yapısına sahip önemli bir inorganik bileşiktir.(Cava, 1990). Bakır iyonlarının antimikrobiyal etkisi, hücre içerisinde reaktif hidroksil radikallerinin üretimi ve sülfhidril gruplarının bozulmasıyla ilişkilidir (Gudkov ve ark., 2024).

CuO NP'ları süspansiyon halinde kullanıldığında, *E. coli* ve MRSA dâhil çeşitli patojen bakterilere karşı antimikrobiyal aktivite

göstermektedir (Ren ve ark., 2009). Cu₂O (Bakır (I) oksit; kupröz oksit), kırmızı renkli toz bir yapıya sahip olup nanoparçacık boyutunda da sentezlenebilmektedir. Bu materyal, CuO ile karşılaştırılabilir düzeyde antimikrobiyal aktivite sergileyerek farklı bakteri türleri ve suşlarını inhibe etmiştir. (Ren ve ark., 2009).

Kontrol grubu ile kıyaslandığında, CuO NP'leriyle kaplanan braketlerin *S. mutans* üzerinde daha güçlü bir antimikrobiyal etki oluşturduğu gözlemlenmiştir (Ramazanzadeh ve ark., 2015). Çeşitli çalışmalar, CuO'nun bakteri kolonizasyonu ile plak oluşumunu engellemenin yanı sıra, farklı patojen türlerine karşı da güçlü antimikrobiyal aktivite gösterdiğini ortaya koymuştur (Atack ve ark., 1996; Horowitz, 2004).

Yaklaşık 40 nm boyutundaki CuO NP'lerinin, düşük konsantrasyonlarda *S. mutans* üzerinde antimikrobiyal etki gösterdiği; 50 µg/ml düzeyinde ise hücre dışı polisakkarit üretimini ve çok türlü biyofilm oluşumunu baskıladığı, daha yüksek miktarlarda kullanıldığında ise bakteriyel büyümeyi belirgin biçimde engellediği rapor edilmiştir (Amiri ve ark., 2017), (Khan ve ark., 2013).

Başka bir çalışmada, dişler CuO NP'leri ile kaplandığında, biyofilm oluşumunda %70 civarında anlamlı bir azalma gözlenmiştir (Eshed ve ark., 2012). Padmavathi ve ark. yaptıkları çalışmada, CuO ve Cu₂O NP'lerinin antifungal özellikler sergilediğini rapor etmiştir (Padmavathi ve ark., 2020). Fe katkılı CuO'nun *C. albicans* üzerinde belirgin antimikrobiyal ve anti-biyofilm özellikler sergilediği, ayrıca CuO NP'lerinin *C. albicans*, *C. krusei* ve *C. glabrata* gibi farklı oral Candida türlerinin büyümesini de baskıladığı bildirilmiştir (Amiri ve ark., 2017), (Pugazhendhi ve ark., 2018).

Dentin adezivlerine CuO ve CuO–kitosan NP'lerinin eklenmesiyle, kesme bağ dayanımı korunurken materyalin mekanik

özellikleri, su absorpsiyonu ve çözünürlüğünde iyileşme sağlandığı rapor edilmiştir (Javed ve ark., 2021). Yapılan bir başka araştırmada, kök yüzeyine uygulanan CuO katkılı restoratif dolgunun çürük önleyici etkileri değerlendirilmiş ve bu materyalin *S. mutans*'a karşı antibakteriyel özellik gösterdiği belirtilmiştir (Thneibat ve ark., 2008).

Magnezyum Oksit

Antibakteriyel özellikleri nedeniyle magnezyum oksit (MgO) NP'ları, tıbbi uygulamalarda öne çıkmaktadır. (Krishnamoorthy ve ark., 2012) MgO NP'ları, biyoyumlulukları ve bozunma ürünlerinin güvenliği bakımından diğer metal oksit nanopartiküllerine kıyasla daha avantajlıdır ve FDA tarafından güvenli bulunmuştur (Di ve ark., 2012).

MgO NP'lar, antibakteriyel etkinlikleri ve biyofilm engelleyici özellikleriyle ilgi görmektedir (Coelho ve ark., 2019; Kong ve ark., 2020) (Liu ve ark., 2021; Monzavi ve ark., 2015). Araştırmalar, MgO NP'ların gram-pozitif ve gram-negatif bakteriler, mantarlar, mayalar ve dirençli suşlar gibi birçok patojene karşı etkili olduğunu göstermektedir (Nguyen ve ark., 2018; Sawai & Yoshikawa, 2004). Antibakteriyel deneyler, MgO NP'ların *S. mutans* üzerinde de etkili olduğunu göstermiştir (Rangrazi ve ark., 2022; Wu ve ark., 2020).

Yapılan çalışmada Noori ve arkadaşları, %1 oranına kadar MgO nanoparçacığı içeren cam iyonomer simanın *S. mutans* ve *S. sobrinus*'a karşı güçlü antibakteriyel aktivite gösterdiğini ortaya koymuştur. (İbrahim, 2019; Noori & Kareem, 2019) Yapılan çalışmalar, %2, %4 ve %6 oranında MgO NP veya Ag NP katkılı akrilik rezinlerin, *Candida albicans*'ın yol açtığı protez stomatit üzerinde etkili antifungal özellikler gösterdiğini rapor etmiştir (Peter ve ark., 2023).

Soğuk kürlenen akrilik rezinlere düşük oranlarda MgO NP ilavesinin, fleksural dayanımı artırdığı bulunmuştur (Altaee & Al-Ali, 2022). Yapılan çalışmada, sınırlı miktarlarda (%2–4) MgO NP eklenmesinin akrilik rezinlerin sertliğini yükselttiği; fakat bu oranın üzerindeki katkıların hem mekanik dayanımı hem de renk stabilitesini bozduğu bildirilmiştir (Abdulsattar, 2023). Silikon esaslı protez astarlarına %3 MgO NP eklenmesi, yüzey sertliğinde önemli bir değişiklik oluşturmamış; ancak çekme bağlanma dayanımını belirgin biçimde yükseltmiştir (Abdelrahman & Salem Al-Sammaraie, 2020).

Endodontik tedavide irrigasyon solüsyonu olarak kullanılan magnezyum oksit NP'ları ile *E. faecalis*'in başarıyla ortadan kaldırıldığı belirtilmiştir (Bosso-Martelo ve ark., 2016).

Alkali özellik gösteren MgO nanopartikül süspansiyonları, asidojenik bakterilere karşı mücadeleyi kolaylaştırmakta ve mine dokusunun remineralizasyonu için uygun koşullar yaratmaktadır (Tang & Lv, 2014). MgONP'ler; biyouyumlu yapıları, bakteriyostatik aktiviteleri, düşük maliyetleri, ulaşılabilir olmaları ve kimyasal esneklikleri sayesinde biyofilmle ilişkili oral enfeksiyonların tedavisine yönelik yeni stratejilerde alternatif bir ajan olarak değerlendirilmektedir (Yang ve ark., 2021).

Seryum Oksit

Lantanit grubuna dâhil ve atom numarası 58 olan seryum, pek çok biyolojik ve biyomedikal alanda kullanılmaktadır (Singh ve ark., 2020). Seryum oksit (CeO_2) NP'ları, reaktif oksijen türlerini (ROS) yeniden üretme, serbest radikalleri yok etme ve yenileme mekanizmaları sayesinde antibakteriyel ve antiinflamatuvar özellikler göstermektedir (Gojova ve ark., 2009; Xia ve ark., 2008).

CeO_2 , mine floresansını taklit edebilmesi nedeniyle diş hekimliğinde seramiklerde uygulanmıştır (Espelid ve ark., 1991).

Yüksek atom numarası sayesinde X-ray ışınlarını iyi attenüe eden CeO₂, sekonder çürüklerin daha kolay fark edilebilmesi için dental adezivlerin radyopasitesini artırmada kullanılmaktadır (Akça & Erzeneoğlu, 2014).

CeO₂ mikropartikülleri %0.36–5.76 aralığında adezive eklendiğinde, artan konsantrasyon adezivin radyopasitesini de artırmıştır. (Garcia ve ark., 2020) Konsantrasyon yükseldikçe dönüşüm derecesinde düşüş gözlenmiş, fakat bu değerler klinik olarak uygun kabul edilmiştir. En iyi radyopasite ve dönüşüm derecesi kombinasyonu %1.44 oranında CeO₂ içeren grupta rapor edilmiştir (Garcia ve ark., 2020).

CeO₂ nanopartiküllerinin doz artışı antibakteriyel etkiyi güçlendirirken mekanik özelliklerde azalmaya yol açmıştır. Ancak mezogözenekli silika partiküllerinin silanla modifiye edilmesi bu zayıflamayı dengeleyebilmekte; ayrıca CeO₂ ile kaplanan mezogözenekli silikanın dental rezin kompozitlerde **uygun bir dolgu seçeneği** olabileceği belirtilmiştir (Byun ve ark., 2024).

CeO₂ nanopartiküllerin eklenmesi, diş malzemelerinin fiziksel özelliklerini iyileştirebilir (Machado-Santos ve ark., 2020). %3 CeO₂ eklenmiş kompozitler, mekanik ve fiziksel özellikleri üzerine ek araştırmalar yapılması kaydıyla antibakteriyel açıdan umut vaat etmektedir. (Varghese ve ark., 2022). CeO₂'nin restoratif kompozitlere dolgu nanoparçacığı şeklinde dâhil edilmesinin, materyalin antibakteriyel kapasitesini artırdığı ortaya konmuştur (Varghese ve ark., 2022).

Alüminyum Oksit

Alüminyum oksit nanopartikülleri (Al₂O₃ NP), akrilik kompozit polimerlerin özelliklerini iyileştirmek için kullanılan malzemelerden biridir. Bir çalışma, yapılarına Al₂O₃ NP eklendikten sonra ısıyla kürlenene akrilik polimerlerin eğilme dayanımında ve ısıl

iletkenliğinde iyileşme olduğunu göstermiştir (Ellakwa ve ark., 2008).

Başka bir çalışmada ise, ısıyla kürlenene polimetil metakrilata %10 Al₂O₃ NP eklenmesi, protez tabanlarının ısı iletkenliğini iyileştirmiştir; ancak akrilik reçinenin eğilme dayanımını değiştirmemiştir (Kul ve ark., 2016). Yine, başka bir araştırma, Al₂O₃ NP'nin hem kendi kendine sertleşen hem de ısıyla sertleşen akrilik rezinlere eklenmesi durumunda **eğilme dayanımının arttığını**, ancak bu artışın **kendi kendine sertleşen rezinlerde daha belirgin** olduğunu ortaya koymuştur (Dhole ve ark., 2017).

Al₂O₃ NP'nin hem ısıyla hem de kendiliğinden kürlenene akrilik rezinlere %1 ve %3 oranlarında eklenmesi, her iki materyalin de **ısı iletkenliğini artırmıştır**. Bu artış ısıyla kürlenene rezinde daha belirgin olmuş ve partikül oranı yükseldikçe termal iletkenlik anlamlı şekilde artmıştır (Barzegar ve ark., 2022). Alümina nanoparçacıklarının yapıştırıcı sisteme eklenmesi bağlanma dayanımını artırmakta; en yüksek değer %2 nano-dolgu oranında elde edilmektedir. Ancak nanoalümina miktarı arttıkça viskozite yükselir, yüzey ıslatma azalır ve bağlanma dayanımı düşer (Vietri ve ark., 2014).

PLA/Al₂O₃ partiküllerinin reçine kompozitlere eklenmesi mekanik özellikleri belirgin şekilde etkilemiştir. Heliomolar Flow kompozitinde 80 ppm'de eğilme dayanımı, modül ve basınç dayanımı yüksek bulunmuş; konsantrasyon 100 ppm'e kadar arttıkça bu değerlerde genel bir artış gözlenmiştir. Ancak daha yüksek dozlarda agregasyon nedeniyle mekanik performans düşmüştür (Ranjbar ve ark., 2019).

Air abrazyon (kumlama), diş hekimliğinde mine/dentin yüzey hazırlığı, eski restoratif materyal yüzey pürüzlendirme, indirekt restorasyon öncesi yüzey temizliği gibi işlemler için kullanılan yaygın bir yöntemdir; bu yöntemde genellikle Aluminum

oxide (Al_2O_3) partikülleri tercih edilir. Al_2O_3 ile kumlama; yüzey pürüzlülüğü artırarak, yapıştırıcı (rezin siman / adeziv) ile diş dokusu ya da restoratif materyal arasındaki **mikromekanik bağlanmayı** kolaylaştırabilir (do Nascimento Santos ve ark., 2025; Eram ve ark., 2024).

Kaynakça

Abdelrahman, H. K., & Salem Al-Sammaraie, S. A. (2020). Effect of addition of Magnesium Oxide Nanoparticles on surface hardness and tensile bond strength of denture soft liner. *Indian Journal of Forensic Medicine & Toxicology*, 14(3).

Abdulsattar, M. H. (2023). Assessment the mechanical and color changes properties of denture base material after reinforcement with nanoparticles material. *Tikrit Journal for Dental Sciences*, 11(1), 10-16.

Agarwal, H., Nakara, A., & Shanmugam, V. K. (2019). Anti-inflammatory mechanism of various metal and metal oxide nanoparticles synthesized using plant extracts: A review. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 109, 2561-2572.

Ahmad, B., Mojgan, K., Masumeh, K., & Baharak, D. (2016). The effect of ZnO nanoparticle coating on the frictional resistance between orthodontic wires and ceramic brackets.

Akça, B., & Erzeneoğlu, S. Z. (2014). The mass attenuation coefficients, electronic, atomic, and molecular cross sections, effective atomic numbers, and electron densities for compounds of some biomedically important elements at 59.5 keV. *Science and Technology of Nuclear Installations*, 2014(1), 901465.

Al-Qahtani, Y. M. (2021). Impact of graphene oxide and silver diamine fluoride in comparison to photodynamic therapy on bond integrity and microleakage scores of resin modified glass ionomer cement to demineralized dentin. *Photodiagnosis and Photodynamic Therapy*, 33, 102163.

Alshahrani, A., Bin-Shuwaish, M. S., Al-Hamdan, R. S., Almohareb, T., Maawadh, A. M., Al Deeb, M., Alhenaki, A. M., Abduljabbar, T., & Vohra, F. (2020). Graphene oxide nano-filler based experimental dentine adhesive. A SEM/EDX, Micro-Raman

and microtensile bond strength analysis. *Journal of Applied Biomaterials & Functional Materials*, 18, 2280800020966936.

Altaee, N., & Al-Ali, A. (2022). The effects of magnesium oxide nanoparticles addition on flexural strength of cold-cured acrylic resin material. *Al-Rafidain Dental Journal*, 22(1), 101-112.

Amiri, M., Etemadifar, Z., Daneshkazemi, A., & Nateghi, M. (2017). Antimicrobial effect of copper oxide nanoparticles on some oral bacteria and candida species. *Journal of dental biomaterials*, 4(1), 347.

Anand, A., Unnikrishnan, B., Wei, S.-C., Chou, C. P., Zhang, L.-Z., & Huang, C.-C. (2019). Graphene oxide and carbon dots as broad-spectrum antimicrobial agents—a minireview. *Nanoscale horizons*, 4(1), 117-137.

Anderson, D., Anderson, T., & Fahmi, F. (2019). Advances in applications of metal oxide nanomaterials as imaging contrast agents. *physica status solidi (a)*, 216(16), 1801008.

Arikawa, H., Fujii, K., Kanie, T., & Inoue, K. (1998). Light transmittance characteristics of light-cured composite resins. *Dental Materials*, 14(6), 405-411.

Atack, N. E., Sandy, J. R., & Addy, M. (1996). Periodontal and microbiological changes associated with the placement of orthodontic appliances. A review. *Journal of periodontology*, 67(2), 78-85.

Aydin Sevinç, B., & Hanley, L. (2010). Antibacterial activity of dental composites containing zinc oxide nanoparticles. *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*, 94(1), 22-31.

Baan, R., Straif, K., Grosse, Y., Secretan, B., El Ghissassi, F., & Coglianò, V. (2006). Carcinogenicity of carbon black, titanium dioxide, and talc. *The lancet oncology*, 7(4), 295-296.

Baek, M., Chung, H.-E., Yu, J., Lee, J.-A., Kim, T.-H., Oh, J.-M., Lee, W.-J., Paek, S.-M., Lee, J. K., & Jeong, J. (2012). Pharmacokinetics, tissue distribution, and excretion of zinc oxide nanoparticles. *International journal of nanomedicine*, 3081-3097.

Barzegar, A., Ghaffari, T., & Parizad, A. (2022). Effect of incorporating aluminum oxide nanoparticles on thermal conduction and flexural strength of acrylic resins. *Dental Research Journal*, 19(1), 33.

Bavykin, D. V., Friedrich, J. M., & Walsh, F. C. (2006). Protonated titanates and TiO₂ nanostructured materials: synthesis, properties, and applications. *Advanced materials*, 18(21), 2807-2824.

Beun, S., Glorieux, T., Devaux, J., Vreven, J., & Leloup, G. (2007). Characterization of nanofilled compared to universal and microfilled composites. *Dental Materials*, 23(1), 51-59.

Bibi, A., Rehman, S.-u., & Yaseen, A. (2019). Alginate-nanoparticles composites: kinds, reactions and applications. *Materials Research Express*, 6(9), 092001.

Blake, D. M., Maness, P.-C., Huang, Z., Wolfrum, E. J., Huang, J., & Jacoby, W. A. (1999). Application of the photocatalytic chemistry of titanium dioxide to disinfection and the killing of cancer cells. *Separation and purification methods*, 28(1), 1-50.

Bonetta, S., Bonetta, S., Motta, F., Strini, A., & Carraro, E. (2013). Photocatalytic bacterial inactivation by TiO₂-coated surfaces. *Amb Express*, 3(1), 59.

Bosso-Martelo, R., Guerreiro-Tanomaru, J. M., Viapiana, R., Berbert, F. L. C., Duarte, M. A. H., & Tanomaru-Filho, M. (2016). Physicochemical properties of calcium silicate cements associated with microparticulate and nanoparticulate radiopacifiers. *Clinical oral investigations*, 20(1), 83-90.

Bosso-Martelo, R., Guerreiro-Tanomaru, J. M., Viapiana, R., Berbert, F. L. C. V., Basso Bernardi, M. I., & Tanomaru-Filho, M. (2015). Calcium silicate-based cements associated with micro-and nanoparticle Radiopacifiers: physicochemical properties and bioactivity. *International scholarly research notices*, 2015(1), 874283.

Byun, S.-Y., Han, A. R., Kim, K.-M., & Kwon, J.-S. (2024). Antibacterial properties of mesoporous silica coated with cerium oxide nanoparticles in dental resin composite. *Scientific reports*, 14(1), 18014.

Carrouel, F., Viennot, S., Ottolenghi, L., Gaillard, C., & Bourgeois, D. (2020). Nanoparticles as anti-microbial, anti-inflammatory, and remineralizing agents in oral care cosmetics: a review of the current situation. *Nanomaterials*, 10(1), 140.

Cava, R. (1990). Structural chemistry and the local charge picture of copper oxide superconductors. *Science*, 247(4943), 656-662.

Cierech, M., Wojnarowicz, J., Kolenda, A., Krawczyk-Balska, A., Prochwicz, E., Woźniak, B., Łojkowski, W., & Mierzwińska-Nastalska, E. (2019). Zinc oxide nanoparticles cytotoxicity and release from newly formed PMMA–ZnO nanocomposites designed for denture bases. *Nanomaterials*, 9(9), 1318.

Coelho, C. C., Araújo, R., Quadros, P. A., Sousa, S. R., & Monteiro, F. J. (2019). Antibacterial bone substitute of

hydroxyapatite and magnesium oxide to prevent dental and orthopaedic infections. *Materials Science and Engineering: C*, 97, 529-538.

De Almeida, J., Cechella, B. C., Bernardi, A. V., de Lima Pimenta, A., & Felipe, W. T. (2018). Effectiveness of nanoparticles solutions and conventional endodontic irrigants against *Enterococcus faecalis* biofilm. *Indian Journal of Dental Research*, 29(3), 347-351.

Della Bona, A., Pecho, O. E., & Alessandretti, R. (2015). Zirconia as a dental biomaterial. *Materials*, 8(8), 4978-4991.

Dhole, R. I., Srivatsa, G., Shetty, R., Huddar, D., Sankeshwari, B., & Chopade, S. (2017). Reinforcement of aluminum oxide filler on the flexural strength of different types of denture base resins: An in vitro study. *Journal of Clinical and Diagnostic Research: JCDR*, 11(4), ZC101.

Di, D.-R., He, Z.-Z., Sun, Z.-Q., & Liu, J. (2012). A new nano-cryosurgical modality for tumor treatment using biodegradable MgO nanoparticles. *Nanomedicine: Nanotechnology, Biology and Medicine*, 8(8), 1233-1241.

do Nascimento Santos, J. V., Almeida, H. N., Diniz, L. B. N., de Andrade Nogueira, M., Junior, J. F. S., Özcan, M., & e Souza, R. O. d. A. (2025). Effectiveness of dentin cleaning using air abrasion with aluminum oxide particles on the bond strength of resin-based cements: A systematic review and meta-analysis. *Journal of Dentistry*, 105950.

Dsouza, T. S., Radhakrishna, V., Dsouza, N., & Kumari, S. (2016). In vitro cytotoxic evaluation of Mineral Trioxide Aggregate with silver and titanium dioxide nanoparticles. *World Journal of Dentistry*, 10(6), 432-434.

Elhelbawy, N., & Ellaithy, M. (2021). Comparative evaluation of Stainless-steel wires and brackets coated with nanoparticles of Chitosan or Zinc oxide upon friction: An in vitro study. *International Orthodontics*, 19(2), 274-280.

Ellakwa, A. E., Morsy, M. A., & El-Sheikh, A. M. (2008). Effect of aluminum oxide addition on the flexural strength and thermal diffusivity of heat-polymerized acrylic resin. *Journal of Prosthodontics*, 17(6), 439-444.

Elsaka, S. E., Hamouda, I. M., & Swain, M. V. (2011). Titanium dioxide nanoparticles addition to a conventional glass-ionomer restorative: influence on physical and antibacterial properties. *Journal of Dentistry*, 39(9), 589-598.

Eram, A., Kr, R. V., Keni, L. G., Shetty, D. D., Zuber, M., & Kumar, S. (2024). Air-abrasion in dentistry: A short review of the materials and performance parameters. *Journal of Biomedical Physics & Engineering*, 14(1), 99.

Eshed, M., Lellouche, J., Matalon, S., Gedanken, A., & Banin, E. (2012). Sonochemical coatings of ZnO and CuO nanoparticles inhibit *Streptococcus mutans* biofilm formation on teeth model. *Langmuir*, 28(33), 12288-12295.

Espelid, I., Tveit, A., Erickson, R., Keck, S., & Glasspoole, E. (1991). Radiopacity of restorations and detection of secondary caries. *Dental Materials*, 7(2), 114-117.

Gamal, R., Gomaa, Y. F., & Said, A. M. (2019). Incorporating nano graphene oxide to poly-methyl methacrylate; antibacterial effect and thermal expansion. *Journal of Modern Research*, 1(1), 19-23.

Garcia-Contreras, R., Scougall-Vilchis, R. J., Contreras-Bulnes, R., Sakagami, H., Morales-Luckie, R. A., & Nakajima, H. (2015). Mechanical, antibacterial and bond strength properties of

nano-titanium-enriched glass ionomer cement. *Journal of Applied Oral Science*, 23, 321-328.

Garcia, I. M., Balhaddad, A. A., Ibrahim, M. S., Weir, M. D., Xu, H. H., Collares, F. M., & Melo, M. A. S. (2021). Antibacterial response of oral microcosm biofilm to nano-zinc oxide in adhesive resin. *Dental Materials*, 37(3), e182-e193.

Garcia, I. M., Leitune, V. C. B., Takimi, A. S., Bergmann, C. P., Samuel, S. M. W., Melo, M. A., & Collares, F. M. (2020). Cerium dioxide particles to tune radiopacity of dental adhesives: Microstructural and physico-chemical evaluation. *Journal of functional biomaterials*, 11(1), 7.

Garimella, R., & Eltorai, A. E. (2017). Nanotechnology in orthopedics. *Journal of orthopaedics*, 14(1), 30-33.

Ghahremani, L., Shirkavand, S., Akbari, F., & Sabzikari, N. (2017). Tensile strength and impact strength of color modified acrylic resin reinforced with titanium dioxide nanoparticles. *Journal of Clinical and Experimental Dentistry*, 9(5), e661.

Gojova, A., Lee, J.-T., Jung, H. S., Guo, B., Barakat, A. I., & Kennedy, I. M. (2009). Effect of cerium oxide nanoparticles on inflammation in vascular endothelial cells. *Inhalation toxicology*, 21(sup1), 123-130.

Gowri, S., Gandhi, R. R., & Sundrarajan, M. (2014). Structural, optical, antibacterial and antifungal properties of zirconia nanoparticles by biobased protocol. *Journal of Materials Science & Technology*, 30(8), 782-790.

Gudkov, S. V., Burmistrov, D. E., Fomina, P. A., Validov, S. Z., & Kozlov, V. A. (2024). Antibacterial Properties of Copper Oxide Nanoparticles (Review). *International Journal of Molecular Sciences*, 25(21), 11563. <https://www.mdpi.com/1422-0067/25/21/11563>

Guo, C., Lu, R., Wang, X., & Chen, S. (2021). Graphene oxide-modified polyetheretherketone with excellent antibacterial properties and biocompatibility for implant abutment. *Macromolecular Research*, 29(5), 351-359.

Gutiérrez, M. F., Alegría-Acevedo, L. F., Méndez-Bauer, L., Bermudez, J., Dávila-Sánchez, A., Buvinic, S., Hernández-Moya, N., Reis, A., Loguercio, A. D., & Farago, P. V. (2019). Biological, mechanical and adhesive properties of universal adhesives containing zinc and copper nanoparticles. *Journal of Dentistry*, 82, 45-55.

Hadi, S. A., & Al-Mizraqchi, A. S. (2019). Antibacterial Activity of Zinc Oxide Nanoparticles on the Growth of Enterococcus Feacales, Candida and Total Root Canal Microbiota (in Vitro Study). *Indian Journal of Public Health Research & Development*, 10(11).

Horowitz, A. (2004). A report on the NIH consensus development conference on diagnosis and management of dental caries throughout life. *Journal of dental research*, 83(1_suppl), 15-17.

Huang, G., Liu, S.-Y., Wu, J.-L., Qiu, D., & Dong, Y.-M. (2022). A novel bioactive glass-based root canal sealer in endodontics. *Journal of dental sciences*, 17(1), 217-224.

Ibrahim, A., Petrik, L., Moodley, D., & Patel, N. (2017). Use of antibacterial nanoparticles in endodontics. *South African Dental Journal*, 72(3), 105-112.

Ibrahim, A. I. (2019). Nanoparticles as advanced treatment modalities to disinfect the root canal system.

Jafari, S., Mahyad, B., Hashemzadeh, H., Janfaza, S., Gholikhani, T., & Tayebi, L. (2020). Biomedical applications of TiO₂ nanostructures: recent advances. *International journal of nanomedicine*, 3447-3470.

Jangra, S. L., Stalin, K., Dilbaghi, N., Kumar, S., Tawale, J., Singh, S. P., & Pasricha, R. (2012). Antimicrobial activity of zirconia (ZrO₂) nanoparticles and zirconium complexes. *Journal of nanoscience and nanotechnology*, 12(9), 7105-7112.

Javed, R., Rais, F., Kaleem, M., Jamil, B., Ahmad, M. A., Yu, T., Qureshi, S. W., & Ao, Q. (2021). Chitosan capping of CuO nanoparticles: Facile chemical preparation, biological analysis, and applications in dentistry. *International Journal of Biological Macromolecules*, 167, 1452-1467.

Jin, J., Zhang, L., Shi, M., Zhang, Y., & Wang, Q. (2017). Ti-GO-Ag nanocomposite: the effect of content level on the antimicrobial activity and cytotoxicity. *International journal of nanomedicine*, 4209-4224.

Jowkar, Z., Hamidi, S. A., Shafiei, F., & Ghahramani, Y. (2020). The effect of silver, zinc oxide, and titanium dioxide nanoparticles used as final irrigation solutions on the fracture resistance of root-filled teeth. *Clinical, cosmetic and investigational dentistry*, 141-148.

Kachoei, M., Nourian, A., Divband, B., Kachoei, Z., & Shirazi, S. (2016). Zinc-oxide nanocoating for improvement of the antibacterial and frictional behavior of nickel-titanium alloy. *Nanomedicine*, 11(19), 2511-2527.

Karahan, H. E., Wiraja, C., Xu, C., Wei, J., Wang, Y., Wang, L., Liu, F., & Chen, Y. (2018). Graphene materials in antimicrobial nanomedicine: current status and future perspectives. *Advanced healthcare materials*, 7(13), 1701406.

Kasraei, S., Sami, L., Hendi, S., AliKhani, M.-Y., Rezaei-Soufi, L., & Khamverdi, Z. (2014). Antibacterial properties of composite resins incorporating silver and zinc oxide nanoparticles

on *Streptococcus mutans* and *Lactobacillus*. *Restorative dentistry & endodontics*, 39(2), 109-114.

Kawamoto, K., Miyaji, H., Nishida, E., Miyata, S., Kato, A., Tateyama, A., Furihata, T., Shitomi, K., Iwanaga, T., & Sugaya, T. (2018). Characterization and evaluation of graphene oxide scaffold for periodontal wound healing of class II furcation defects in dog. *International journal of nanomedicine*, 2365-2376.

Khan, S. T., Ahamed, M., Al-Khedhairi, A., & Musarrat, J. (2013). Biocidal effect of copper and zinc oxide nanoparticles on human oral microbiome and biofilm formation. *Materials Letters*, 97, 67-70.

Khosolim, I. P., Zhang, Y. Y., Yiu, C. K. Y., & Wong, H. M. (2021). Electrophoresis-aided biomimetic mineralization system using graphene oxide for regeneration of hydroxyapatite on dentin. *Materials*, 15(1), 199.

Kiew, S. F., Kiew, L. V., Lee, H. B., Imae, T., & Chung, L. Y. (2016). Assessing biocompatibility of graphene oxide-based nanocarriers: A review. *Journal of Controlled Release*, 226, 217-228.

Kishen, A., Shi, Z., Shrestha, A., & Neoh, K. G. (2008). An investigation on the antibacterial and antibiofilm efficacy of cationic nanoparticulates for root canal disinfection. *Journal of endodontics*, 34(12), 1515-1520.

Kolb, C., Gumpert, K., Wolter, H., & Sextl, G. (2020). Highly translucent dental resin composites through refractive index adaption using zirconium dioxide nanoparticles and organic functionalization. *Dental Materials*, 36(10), 1332-1342.

Kong, F., Wang, J., Han, R., Ji, S., Yue, J., Wang, Y., & Ma, L. (2020). Antifungal activity of magnesium oxide nanoparticles: effect on the growth and key virulence factors of *Candida albicans*. *Mycopathologia*, 185(3), 485-494.

Kontakiotis, E. G., Tzanetakis, G. N., & Loizides, A. L. (2007). A comparative study of contact angles of four different root canal sealers. *Journal of endodontics*, 33(3), 299-302.

Kozuszkó, S. N., Sanchez, M. A., de Ferro, M. I. G., Sfer, A. M., Madrid, A. P. M., Takabatake, K., Nakano, K., Nagatsuka, H., & Rodriguez, A. P. (2017). Antibacterial activity and biocompatibility of zinc oxide and graphite particles as endodontic materials. *Journal of Hard Tissue Biology*, 26(4), 311-318.

Krishnamoorthy, K., Manivannan, G., Kim, S. J., Jeyasubramanian, K., & Premanathan, M. (2012). Antibacterial activity of MgO nanoparticles based on lipid peroxidation by oxygen vacancy. *Journal of Nanoparticle Research*, 14(9), 1063.

Kul, E., Aladağ, L. İ., & Yesildal, R. (2016). Evaluation of thermal conductivity and flexural strength properties of poly (methyl methacrylate) denture base material reinforced with different fillers. *The Journal of prosthetic dentistry*, 116(5), 803-810.

Kumar, H. V., Huang, K. Y.-S., Ward, S. P., & Adamson, D. H. (2017). Altering and investigating the surfactant properties of graphene oxide. *Journal of colloid and interface science*, 493, 365-370.

Lee, Y.-K. (2007). Influence of scattering/absorption characteristics on the color of resin composites. *Dental Materials*, 23(1), 124-131.

Li, J., Cha, R., Mou, K., Zhao, X., Long, K., Luo, H., Zhou, F., & Jiang, X. (2018). Nanocellulose-based antibacterial materials. *Advanced healthcare materials*, 7(20), 1800334.

Li, Q., & Coleman, N. J. (2014). Hydration kinetics, ion-release and antimicrobial properties of white Portland cement blended with zirconium oxide nanoparticles. *Dental materials journal*, 33(6), 805-810.

Li, Q., Deacon, A. D., & Coleman, N. J. (2013). The impact of zirconium oxide nanoparticles on the hydration chemistry and biocompatibility of white Portland cement. *Dental materials journal*, 32(5), 808-815.

Li, Q., & Wang, Z. (2020). Involvement of FAK/P38 signaling pathways in mediating the enhanced osteogenesis induced by nano-graphene oxide modification on titanium implant surface. *International journal of nanomedicine*, 4659-4676.

Liu, C., Tan, D., Chen, X., Liao, J., & Wu, L. (2022). Research on graphene and its derivatives in oral disease treatment. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(9), 4737.

Liu, M., Wang, X., Li, H., Xia, C., Liu, Z., Liu, J., Yin, A., Lou, X., Wang, H., & Mo, X. (2021). Magnesium oxide-incorporated electrospun membranes inhibit bacterial infections and promote the healing process of infected wounds. *Journal of Materials Chemistry B*, 9(17), 3727-3744.

Lohbauer, U., Wagner, A., Belli, R., Stoetzel, C., Hilpert, A., Kurland, H.-D., Grabow, J., & Müller, F. A. (2010). Zirconia nanoparticles prepared by laser vaporization as fillers for dental adhesives. *Acta Biomaterialia*, 6(12), 4539-4546.

Machado-Santos, L., Silikas, N., Baroudi, K., Sinhoreti, M.-A.-C., Brandt, W.-C., & Liporoni, P.-C.-S. (2020). Mechanical performance of experimental acrylic resins modified by nanoparticles after chemical and mechanical degradation. *Journal of Clinical and Experimental Dentistry*, 12(12), e1157.

Mallakpour, S., & Madani, M. (2015). A review of current coupling agents for modification of metal oxide nanoparticles. *Progress in Organic Coatings*, 86, 194-207.

Mao, M., Zhang, W., Huang, Z., Huang, J., Wang, J., Li, W., & Gu, S. (2021). Graphene oxide-copper nanocomposites suppress

cariogenic *Streptococcus mutans* biofilm formation. *International journal of nanomedicine*, 7727-7739.

Martini, C., Longo, F., Castagnola, R., Marigo, L., Grande, N. M., Cordaro, M., Cacaci, M., Papi, M., Palmieri, V., & Bugli, F. (2020). Antimicrobial and antibiofilm properties of graphene oxide on *Enterococcus faecalis*. *Antibiotics*, 9(10), 692.

Monzavi, A., Eshraghi, S., Hashemian, R., & Momen-Heravi, F. (2015). In vitro and ex vivo antimicrobial efficacy of nano-MgO in the elimination of endodontic pathogens. *Clinical oral investigations*, 19(2), 349-356.

Moradpoor, H., Safaei, M., Mozaffari, H. R., Sharifi, R., Imani, M. M., Golshah, A., & Bashardoust, N. (2021). An overview of recent progress in dental applications of zinc oxide nanoparticles. *RSC advances*, 11(34), 21189-21206.

Nguyen, N.-Y. T., Grelling, N., Wetteland, C. L., Rosario, R., & Liu, H. (2018). Antimicrobial activities and mechanisms of magnesium oxide nanoparticles (nMgO) against pathogenic bacteria, yeasts, and biofilms. *Scientific reports*, 8(1), 16260.

Nikkerdar, N., Golshah, A., Mobarakeh, M. S., Fallahnia, N., Azizie, B., & Shoochanizad, E. (2024). Recent progress in application of zirconium oxide in dentistry. *Journal of Medicinal and Pharmaceutical Chemistry Research*, 6, 1042-1071.

Nikolova, M. P., & Chavali, M. S. (2020). Metal oxide nanoparticles as biomedical materials. *Biomimetics*, 5(2), 27.

Nishida, E., Miyaji, H., Kato, A., Takita, H., Iwanaga, T., Momose, T., Ogawa, K., Murakami, S., Sugaya, T., & Kawanami, M. (2016). Graphene oxide scaffold accelerates cellular proliferative response and alveolar bone healing of tooth extraction socket. *International journal of nanomedicine*, 2265-2277.

Nivedhitha, M., Nishad, N., & Soman, D. (2014). Effects of zinc oxide nanoparticles in combination with conventional glass ionomer cement: in vitro study. *Advances in Human Biology*, 4(3), 31-36.

Nizami, M. Z. I., Gorduysus, M., Shinoda-Ito, Y., Yamamoto, T., Nishina, Y., Takashiba, S., & Arias, Z. (2022). Graphene oxide-based endodontic sealer: An in vitro study. *Acta Med Okayama*, 76(6), 715-721.

Nizami, M. Z. I., Nishina, Y., Yamamoto, T., Shinoda-Ito, Y., & Takashiba, S. (2020). Functionalized graphene oxide shields tooth dentin from decalcification. *Journal of dental research*, 99(2), 182-188.

Noori, A. J., & Kareem, F. A. (2019). The effect of magnesium oxide nanoparticles on the antibacterial and antibiofilm properties of glass-ionomer cement. *Heliyon*, 5(10).

O'shea, J. (1990). 'Two minutes with venus, two years with mercury'-mercury as an antisyphilitic chemotherapeutic agent. *Journal of the Royal Society of Medicine*, 83(6), 392-395.

Ordinola-Zapata, R., Bramante, C. M., García-godoy, F., Moldauer, B. I., Minotti, P. G., TercíLIA Grizzo, L., & Duarte, M. A. H. (2015). The effect of radiopacifiers agents on p H, calcium release, radiopacity, and antimicrobial properties of different calcium hydroxide dressings. *Microscopy research and technique*, 78(7), 620-625.

Oun, A. A., Shankar, S., & Rhim, J.-W. (2020). Multifunctional nanocellulose/metal and metal oxide nanoparticle hybrid nanomaterials. *Critical reviews in food science and nutrition*, 60(3), 435-460.

Padmavathi, A. R., P, S. M., Das, A., Priya, A., Sushmitha, T., Pandian, S. K., & Toleti, S. R. (2020). Impediment to growth and

yeast-to-hyphae transition in *Candida albicans* by copper oxide nanoparticles. *Biofouling*, 36(1), 56-72.

Peter, M., Bembalagi, M., Kanathila, H., Santhosh, V. N., Roy, T. R., & Monsy, M. (2023). Comparative Evaluation of Antifungal Property of Acrylic Resin Reinforced with Magnesium Oxide and Silver Nanoparticles and their Effect on Cytotoxic Levels: An In vitro Study. *Journal of Microscopy and Ultrastructure*, 10.4103.

Petrucci, R. H., Herring, F. G., Madura, J. D., & Bissonnette, C. (1977). *General Chemistry: Principles and Modern Applications, 11e*. Macmillan.

Prado-Prone, G., Silva-Bermudez, P., Bazzar, M., Focarete, M. L., Rodil, S. E., Vidal-Gutiérrez, X., García-Macedo, J. A., García-Pérez, V. I., Velasquillo, C., & Almaguer-Flores, A. (2020). Antibacterial composite membranes of polycaprolactone/gelatin loaded with zinc oxide nanoparticles for guided tissue regeneration. *Biomedical Materials*, 15(3), 035006.

Priyadarsini, S., Mohanty, S., Mukherjee, S., Basu, S., & Mishra, M. (2018). Graphene and graphene oxide as nanomaterials for medicine and biology application. *Journal of Nanostructure in Chemistry*, 8(2), 123-137.

Pugazhendhi, A., Kumar, S. S., Manikandan, M., & Saravanan, M. (2018). Photocatalytic properties and antimicrobial efficacy of Fe doped CuO nanoparticles against the pathogenic bacteria and fungi. *Microbial pathogenesis*, 122, 84-89.

Ramazanzadeh, B., Jahanbin, A., Yaghoubi, M., Shahtahmassbi, N., Ghazvini, K., Shakeri, M., & Shafaei, H. (2015). Comparison of antibacterial effects of ZnO and CuO nanoparticles coated brackets against *Streptococcus mutans*. *Journal of Dentistry*, 16(3), 200.

Rangrazi, A., Daneshmand, M. S., Ghazvini, K., & Shafaei, H. (2022). Effects of magnesium oxide nanoparticles incorporation on shear bond strength and antibacterial activity of an orthodontic composite: an in vitro study. *Biomimetics*, 7(3), 133.

Ranjbar, M., Dehghan Noudeh, G., Hashemipour, M.-A., & Mohamadzadeh, I. (2019). A systematic study and effect of PLA/Al₂O₃ nanoscaffolds as dental resins: Mechanochemical properties. *Artificial Cells, Nanomedicine, and Biotechnology*, 47(1), 201-209.

Raouf, L., Faraj, S., & Azhdar, B. (2019). Evaluation of Flexural Strength of Heat Cure PMMA Denture Base Material Reinforced with Various Concentrations of Zirconium Oxide Nanoparticle: An In-vitro Study. *Sulaimani Dent. J*, 6, 22-30.

Ren, G., Hu, D., Cheng, E. W., Vargas-Reus, M. A., Reip, P., & Allaker, R. P. (2009). Characterisation of copper oxide nanoparticles for antimicrobial applications. *International journal of antimicrobial agents*, 33(6), 587-590.

Safaei, M., & Moghadam, A. (2022). Optimization of the synthesis of novel alginate-manganese oxide bionanocomposite by Taguchi design as antimicrobial dental impression material. *Materials Today Communications*, 31, 103698.

Saffarpour, M., Rahmani, M., Tahriri, M., & Peymani, A. (2016). Antimicrobial and bond strength properties of a dental adhesive containing zinc oxide nanoparticles. *Brazilian Journal of Oral Sciences*, 15(1), 66-69.

Salman, A. D., Jani, G. H., & Fatalla, A. A. (2017). Comparative study of the effect of incorporating SiO₂ nano-particles on properties of poly methyl methacrylate denture bases. *Biomedical and Pharmacology Journal*, 10(3), 1525-1535.

Samiei, M., Farjami, A., Dizaj, S. M., & Lotfipour, F. (2016). Nanoparticles for antimicrobial purposes in Endodontics: A systematic review of in vitro studies. *Materials Science and Engineering: C*, 58, 1269-1278.

Samiei, M., Janani, M., Asl-Aminabadi, N., Ghasemi, N., Divband, B., Shirazi, S., & Kafili, K. (2017). Effect of the TiO₂ nanoparticles on the selected physical properties of mineral trioxide aggregate. *Journal of Clinical and Experimental Dentistry*, 9(2), e191.

Sarkar, S., Guibal, E., Quignard, F., & SenGupta, A. (2012). Polymer-supported metals and metal oxide nanoparticles: synthesis, characterization, and applications. *Journal of Nanoparticle Research*, 14(2), 715.

Sawai, J., & Yoshikawa, T. (2004). Quantitative evaluation of antifungal activity of metallic oxide powders (MgO, CaO and ZnO) by an indirect conductimetric assay. *Journal of applied microbiology*, 96(4), 803-809.

Sharan, J., Singh, S., Lale, S. V., Mishra, M., Koul, V., & Kharbanda, O. P. (2017). Applications of nanomaterials in dental science: a review. *Journal of nanoscience and nanotechnology*, 17(4), 2235-2255.

Shrestha, A., & Kishen, A. (2016). Antibacterial nanoparticles in endodontics: a review. *Journal of endodontics*, 42(10), 1417-1426.

Singh, K. R., Nayak, V., Sarkar, T., & Singh, R. P. (2020). Cerium oxide nanoparticles: properties, biosynthesis and biomedical application. *RSC advances*, 10(45), 27194-27214.

Sodagar, A., Akhoundi, M. S. A., Bahador, A., Jalali, Y. F., Behzadi, Z., Elhaminejad, F., & Mirhashemi, A. H. (2017). Effect of TiO₂ nanoparticles incorporation on antibacterial properties and

shear bond strength of dental composite used in Orthodontics. *Dental press journal of orthodontics*, 22(05), 67-74.

Stoimenov, P. K., Klinger, R. L., Marchin, G. L., & Klabunde, K. J. (2002). Metal oxide nanoparticles as bactericidal agents. *Langmuir*, 18(17), 6679-6686.

Suo, L., Jiang, N., Wang, Y., Wang, P., Chen, J., Pei, X., Wang, J., & Wan, Q. (2019). The enhancement of osseointegration using a graphene oxide/chitosan/hydroxyapatite composite coating on titanium fabricated by electrophoretic deposition. *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*, 107(3), 635-645.

Tahriri, M., Del Monico, M., Moghanian, A., Yarak, M. T., Torres, R., Yadegari, A., & Tayebi, L. (2019). Graphene and its derivatives: Opportunities and challenges in dentistry. *Materials Science and Engineering: C*, 102, 171-185.

Tang, Z.-X., & Lv, B.-F. (2014). MgO nanoparticles as antibacterial agent: preparation and activity. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 31, 591-601.

Tatavarty, R., Ding, H., Lu, G., Taylor, R. J., & Bi, X. (2014). Synergistic acceleration in the osteogenesis of human mesenchymal stem cells by graphene oxide–calcium phosphate nanocomposites. *Chemical communications*, 50(62), 8484-8487.

Teymoornezhad, K., Alaghehmand, H., Daryakenari, G., Khafri, S., & Tabari, M. (2016). Evaluating the microshear bond strength and microleakage of flowable composites containing zinc oxide nano-particles. *Electronic physician*, 8(11), 3289.

Thneibat, A., Fontana, M., Cochran, M. A., Gonzalez-Cabezas, C., Moore, B. K., Matis, B. A., & Lund, M. R. (2008). Anticariogenic and antibacterial properties of a copper varnish using

an in vitro microbial caries model. *Operative dentistry*, 33(2), 142-148.

Unnithan, A. R., Sasikala, A. R. K., Park, C. H., & Kim, C. S. (2017). A unique scaffold for bone tissue engineering: An osteogenic combination of graphene oxide–hyaluronic acid–chitosan with simvastatin. *Journal of industrial and engineering chemistry*, 46, 182-191.

Varghese, E. J., Sihivahanan, D., & Venkatesh, K. V. (2022). Development of novel antimicrobial dental composite resin with nano cerium oxide fillers. *International Journal of Biomaterials*, 2022(1), 3912290.

Vera-Sánchez, M., Aznar-Cervantes, S., Jover, E., Garcia-Bernal, D., Onate-Sanchez, R. E., Hernández-Romero, D., Moraleda, J. M., Collado-González, M., Rodríguez-Lozano, F. J., & Cenis, J. L. (2016). Silk-fibroin and graphene oxide composites promote human periodontal ligament stem cell spontaneous differentiation into osteo/cementoblast-like cells. *Stem cells and development*, 25(22), 1742-1754.

Versiani, M. A., Abi Rached-Junior, F. J., Kishen, A., Pécora, J. D., Silva-Sousa, Y. T., & de Sousa-Neto, M. D. (2016). Zinc oxide nanoparticles enhance physicochemical characteristics of Grossman sealer. *Journal of endodontics*, 42(12), 1804-1810.

Viapiana, R., Guerreiro-Tanomaru, J. M., Hungaro-Duarte, M. A., Tanomaru-Filho, M., & Camilleri, J. (2014). Chemical characterization and bioactivity of epoxy resin and Portland cement-based sealers with niobium and zirconium oxide radiopacifiers. *Dental Materials*, 30(9), 1005-1020.

Vietri, U., Guadagno, L., Raimondo, M., Vertuccio, L., & Lafdi, K. (2014). Nanofilled epoxy adhesive for structural aeronautic materials. *Composites Part B: Engineering*, 61, 73-83.

Wan, C., Frydrych, M., & Chen, B. (2011). Strong and bioactive gelatin–graphene oxide nanocomposites. *Soft Matter*, 7(13), 6159-6166.

Wang, Y., Hua, H., Li, W., Wang, R., Jiang, X., & Zhu, M. (2019). Strong antibacterial dental resin composites containing cellulose nanocrystal/zinc oxide nanohybrids. *Journal of Dentistry*, 80, 23-29.

Weintraub, J. A., & Burt, B. A. (1985). Oral health status in the United States: tooth loss and edentulism. *Journal of Dental Education*, 49(6), 368-378.

Wiesmann, N., Tremel, W., & Brieger, J. (2020). Zinc oxide nanoparticles for therapeutic purposes in cancer medicine. *Journal of Materials Chemistry B*, 8(23), 4973-4989.

Wu, Z., Xu, H., Xie, W., Wang, M., Wang, C., Gao, C., Gu, F., Liu, J., & Fu, J. (2020). Study on a novel antibacterial light-cured resin composite containing nano-MgO. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 188, 110774.

Xia, T., Kovochich, M., Liong, M., Madler, L., Gilbert, B., Shi, H., Yeh, J. I., Zink, J. I., & Nel, A. E. (2008). Comparison of the mechanism of toxicity of zinc oxide and cerium oxide nanoparticles based on dissolution and oxidative stress properties. *ACS nano*, 2(10), 2121-2134.

Yang, S., Liang, L., Liu, L., Yin, Y., Liu, Y., Lei, G., Zhou, K., Huang, Q., & Wu, H. (2021). Using MgO nanoparticles as a potential platform to precisely load and steadily release Ag ions for enhanced osteogenesis and bacterial killing. *Materials Science and Engineering: C*, 119, 111399.

Yang, S., Yu, W., Zhang, J., Han, X., Wang, J., Sun, D., Shi, R., Zhou, Y., Zhang, H., & Zhao, J. (2022). The antibacterial property of zinc oxide/graphene oxide modified porous

polyetheretherketone against *S. sanguinis*, *F. nucleatum* and *P. gingivalis*. *Biomedical Materials*, 17(2), 025013.

Yang, Z., Sun, C., Wang, L., Chen, H., He, J., & Chen, Y. (2017). Novel Poly (l-lactide)/graphene oxide films with improved mechanical flexibility and antibacterial activity. *Journal of colloid and interface science*, 507, 344-352.

Yazdi, A. S., Guarda, G., Riteau, N., Drexler, S. K., Tardivel, A., Couillin, I., & Tschoop, J. (2010). Nanoparticles activate the NLR pyrin domain containing 3 (Nlrp3) inflammasome and cause pulmonary inflammation through release of IL-1 α and IL-1 β . *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(45), 19449-19454.

Zanni, E., Chandraiahgari, C. R., De Bellis, G., Montereali, M. R., Armiento, G., Ballirano, P., Polimeni, A., Sarto, M. S., & Uccelletti, D. (2016). Zinc oxide nanorods-decorated graphene nanoplatelets: a promising antimicrobial agent against the cariogenic bacterium *Streptococcus mutans*. *Nanomaterials*, 6(10), 179.

Zhou, Q., Yang, P., Li, X., Liu, H., & Ge, S. (2016). Bioactivity of periodontal ligament stem cells on sodium titanate coated with graphene oxide. *Scientific reports*, 6(1), 19343.

DİŞ HEKİMLİĞİNDE GÜNCEL GELİŞMELER

